



**UNIVERZITET U BEOGRADU  
MAŠINSKI FAKULTET  
Katedra za proizvodno mašinstvo  
Beograd, Srbija**



**33. SAVETOVANJE PROIZVODNOG MAŠINSTVA SRBIJE  
SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM**

**33<sup>rd</sup> CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING OF SERBIA  
WITH FOREIGN PARTICIPANTS**

# **ZBORNİK RADOVA PROCEEDINGS**

Generalni pokrovitelj / Sponsor General

SKUPŠTINA GRADA BEOGRADA  
ASSEMBLY OF THE CITY OF BELGRADE

MINISTARSTVO ZA NAUKU I TEHNOLOŠKI RAZVOJ REPUBLIKE SRBIJE  
MINISTRY OF SCIENCE AND TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT, REPUBLIC OF  
SERBIA

Beograd, 16-17. jun 2009.

ZBORNİK RADOVA 33.SAVETOVANJA PROIZVODNOG MAŠINSTVA SRBIJE, SA  
MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM  
Beograd, 2009.  
PROCEEDINGS OF THE 33<sup>rd</sup> CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING OF  
SERBIA WITH FOREIGN PARTICIPANTS  
Belgrade, 2009.

---

*Izdavač:* MAŠINSKI FAKULTET

Kraljice Marije 16  
11120 Beograd  
Srbija

*Publisher:* FACULTY OF MECHANICAL  
ENGINEERING  
Kraljice Marije 16  
11120 Belgrade  
Serbia

*Za izdavača:*  
*For publisher:*

Prof.dr Milorad MILOVANČEVIĆ, dekan Fakulteta

*Glavni i odgovorni urednik:* Prof.dr Ljubodrag TANOVIĆ  
*Editor:*

*Recenzentski tim:*  
*Reviewers team:*

Dr Milisav KALAJDŽIĆ, red.prof.  
Dr Pavao BOJANIĆ, red.prof.  
Dr Žarko SPASIĆ, red.prof.  
Dr Miroslav PILIPOVIĆ, red.prof.  
Dr Miloš GLAVONJIĆ, red.prof.  
Dr Vidosav MAJSTOROVIĆ, red.prof.  
Dr Dragan MILUTINOVIĆ, red.prof.  
Dr Ljubodrag TANOVIĆ, red.prof.  
Dr Bojan BABIĆ, red.prof.  
Dr Petar PETROVIĆ, red.prof.  
Dr Zoran MILJKOVIĆ, vanr.prof.  
Dr Radovan PUZOVIĆ, docent

*Tehnička obrada:*  
*Technical treatment:*

Mr Mihajlo Popović  
Nikola Slavković, dipl.ing.  
Goran Mladenović, dipl.ing.

*Rukopis predat u štampu:*

01.06.2009. godine

*Manuscript submitted for publication:*

June 01.2009

*Izdanje:*

prvo

*Printing:*

1<sup>st</sup>

*Tiraž:*

200 primeraka

*Circulation:*

200 copies

Odobreno za štampu odlukom dekana  
128/09 od 25.05.2009. godine

*Štampa:* Planeta print doo

*Printed by:* 11000 Beograd, Ruzveltova 10, tel.: 011 3088 129

**ISBN: 978-86-7083-662-4**

---

Izdavanje Zbornika radova, organizovanje i održavanje 33. Savetovanja proizvodnog mašinstva Srbije pomogao je pokrovitelj **Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije**  
Financing of the Proceedings was sponsored by the **Ministry of Science and Technological Development of the Republic of Serbia**

---



**XXXIII SAVETOVANJE  
PROIZVODNOG MAŠINSTVA  
SRBIJE 2009**  
sa međunarodnim učešćem  
Beograd, 16-17.06.2009.



**33<sup>rd</sup> CONFERENCE  
ON PRODUCTION ENGINEERING  
OF SERBIA 2009**  
with foreign participants  
Belgrade, 16-17.06.2009.

NOSIOCI ORGANIZACIJE:  
*ORGANIZING INSTITUTIONS :*

Zajednica naučno istraživačkih institucija proizvodnog mašinstva Srbije

- Mašinski fakultet - Katedra za proizvodno mašinstvo, Beograd
- Mašinski fakultet, Niš
- Mašinski fakultet, Kragujevac
- Fakultet tehničkih nauka – Departman za proizvodno mašinstvo, Novi Sad
- Fakultet tehničkih nauka – Departman za industrijsko inženjerstvo i menadžment, Novi Sad
- Tehnički fakultet, Čačak
- Mašinski fakultet, Kraljevo
- Fakultet tehničkih nauka, Kosovska Mitrovica
- LOLA Institut, Beograd

ORGANIZATOR:  
*ORGANIZERS:*

UNIVERZITET U BEOGRADU  
**MAŠINSKI FAKULTET**  
Katedra za proizvodno mašinstvo  
Kraljice Marije 16  
11000 Beograd  
Tel. +381 (11) 3370-360; Fax. +381 (11) 3370-364  
Web: <http://cent.mas.bg.ac.rs/spms09>  
email: [spms09@mas.bg.ac.rs](mailto:spms09@mas.bg.ac.rs)

MESTO ODRŽAVANJA:  
*SYMPOSIUM VENUE:*

Beograd  
Mašinski fakultet, amfiteatar Cent-a  
Kraljice Marije 16  
16-17. jun 2009.



---

**NAUČNI ODBOR – SCIENTIFIC COMMITTEE**

---

- |   |   |
|---|---|
| 1. Prof. dr Milisav Kalajdžić, MF, Beograd, predsednik, SRB | 27. Prof. dr Dragan Milutinović, MF, Beograd, SRB         |
| 2. Prof. dr Bojan Babić, MF, Beograd, SRB                   | 28. Prof. dr Zoran Miljković, MF, Beograd, SRB            |
| 3. Prof. dr Miroslav Badida, ME, Košice, SK                 | 29. Prof. dr Bogdan Nedić, MF, Kragujevac, SRB            |
| 4. Prof. dr Sabo Bela, FTN, Novi Sad, SRB                   | 30. Prof. dr Mircea Nicoara, FM, Timosoara, RO            |
| 5. Prof. dr Nikolai Bobyr, KPI, Kiev, UA                    | 31. Prof. dr Zoran Pandilov, MF, Skoplje, MK              |
| 6. Prof. dr Pavao Bojanić, MF, Beograd, SRB                 | 32. Prof. dr Petar Petrović, MF, Beograd, SRB             |
| 7. Prof. dr Aleksandar Bukvić, MF, Ist. Sarajevo, RS, BIH   | 33. Prof. dr Miroslav Pilipović, MF, Beograd, SRB         |
| 8. Prof. dr Miodrag Bulatović, MF, Podgorica, MNE           | 34. Prof. dr Miroslav Plančak, FTN, Novi Sad, SRB         |
| 9. Prof. dr Ilija Ćosić, FTN, Novi Sad, SRB                 | 35. Doc. dr Radovan Puzović, MF, Beograd, SRB             |
| 10. Prof. dr Kornel Ehmann, Northwestern U., Chicago, SAD   | 36. Prof. dr Snežana Radonjić, TF, Čačak, SRB             |
| 11. Prof. dr Miloš Glavonjić, MF, Beograd, SRB              | 37. Prof. dr Radomir Slavković, MF, Kraljevo, SRB         |
| 12. Prof. dr Janko Hodolić, FTN, Novi Sad, SRB              | 38. Prof. dr Mirko Soković, FS, Ljubljana, SLO            |
| 13. Prof. dr Ratomir Ječmenica, TF, Čačak, SRB              | 39. Prof. dr Bogdan Sovilj, FTN, Novi Sad, SRB            |
| 14. Prof. dr Simo Jokanović, MF, Banja Luka, RS, BIH        | 40. Prof. dr Žarko Spasić, MF, Beograd, SRB               |
| 15. Prof. dr Vid Jovišević, MF, Banja Luka, RS, BIH         | 41. Prof. dr Victor Starkov, Stankin, Moscow, RUS         |
| 16. Prof. dr Damir Kakaš, FTN, Novi Sad, SRB                | 42. Prof. dr Milentije Stefanović, MF, Kragujevac, SRB    |
| 17. Prof. dr Michael Kheifetz, PSU, Novopolotsk, BY         | 43. Prof. dr Ljubodrag Tanović, MF, Beograd, SRB          |
| 18. Prof. dr Sergey Klimenko, ISM, Kiev, UA                 | 44. Prof. dr Tomislav Todić, FTN, Kosovska Mitrovica, SRB |
| 19. Prof. dr Pavel Kovač, FTN, Novi Sad, SRB                | 45. Prof. dr Velimir Todić, FTN, Novi Sad, SRB            |
| 20. Dr Vladimir Kvrđić, Lola Institut, Beograd, SRB         | 46. Prof. dr Miroslav Trajanović, MF, Niš, SRB            |
| 21. Prof. dr Miodrag Lazić, MF, Kragujevac, SRB             | 47. Prof. dr Dragiša Vilotić, FTN, Novi Sad, SRB          |
| 22. Prof. dr Ljubomir Lukić, MF, Kraljevo, SRB              | 48. Prof. dr Radomir Vukasojević, MF, Podgorica, MNE      |
| 23. Prof. dr Vidosav Majstorović, MF, Beograd, SRB          | 49. Prof. dr Milan Vukčević, MF, Podgorica, MNE           |
| 24. Prof. dr Miodrag Manić, MF, Niš, SRB                    | 50. Prof. dr Miomir Vukićević, MF, Kraljevo, SRB          |
| 25. Prof. dr Velibor Marinković, MF, Niš, SRB               | 51. Prof. dr Milan Zeljković, FTN, Novi Sad, SRB          |
| 26. Prof. dr Ostoja Miletić, MF, Banja Luka, RS, BIH        |   |
- 

**POČASNI ODBOR**

Members of the Honorary Committee are:

1. Prof. dr Vladimir MILAČIĆ, MF, Beograd, Chairman
  2. Prof. dr Ratko GATALO, FTN, Novi Sad
  3. Dipl. ing. Mile BENEDETIĆ, LOLA Institut, Beograd
  4. Prof. dr Branislav DEVERDŽIĆ, MF, Kragujevac
  5. Prof. dr Dragan DOMAZET, MF, Niš
  6. Prof. dr Branko IVKOVIĆ, MF, Kragujevac
  7. Prof. dr Milenko JOVIČIĆ, MF, Beograd
  8. Prof. dr Milisav KALAJDŽIĆ, MF, Beograd
  9. Prof. dr Vučko MEČANIN, MF, Kraljevo
  10. Prof. dr Dragoje MILIKIĆ, FTN, Novi Sad
  11. Prof. dr Mihajlo MILOJEVIĆ, MF, Kraljevo
  12. Prof. dr Predrag POPOVIĆ, MF, Niš
  13. Prof. dr Jožef REKECKI, FTN, Novi Sad
  14. Prof. dr Sava SEKULIĆ, FTN, Novi Sad
  15. Prof. dr Joko STANIĆ, MF, Beograd
  16. Prof. dr Vojislav STOILJKOVIĆ, MF, Niš
  17. Prof. dr Sreten UROŠEVIĆ, TF, Čačak
  18. Prof. dr Svetislav ZARIĆ, MF, Beograd
  19. Prof. dr Dragutin ZELENOVIĆ, FTN, Novi Sad
- 

**ORGANIZACIONI ODBOR**

*ORGANISATIONAL COMMITTEE*

1. Dr Ljubodrag Tanović, red.prof., predsednik
  2. Dr Miloš Glavonjić, red.prof.
  3. Dr Radovan Puzović, docent
  4. Mr Mihajlo Popović, asistent, sekretar
  5. Mr Saša Živanović, asistent
  6. Mr Branko Kokotović, asistent
  7. Mr Božica Bojović, asistent
  8. Mr Živana Jakovljević, asistent
  9. Dipl.ing. Nikola Slavković, istraživač pripravnik
  10. Dipl.ing. Goran Mladenović, istraživač pripravnik
-



ORGANIZATORI SAVETOVANJA PROIZVODNOG MAŠINSTVA  
JUGOSLAVIJE / SRBIJE I CRNE GORE / SRBIJE 1965-2009.

*ORGANIZER OF CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING OF  
JUGOSLAVIA / SERBIA AND MONTENEGRO / SERBIA 1965-2009.*

I	Beograd	Mašinski fakultet	1965.
II	Zagreb	Fakultet za strojarstvo i brodogradnju	1966.
III	Ljubljana	Fakultet za strojništvo	1967.
IV	Sarajevo	Mašinski fakultet	1968.
V	Kragujevac	Mašinski fakultet	1969.
VI	Opatija	Fakultet za strojarstvo i brodogradnju Zagreb	1970.
VII	Novi Sad	Mašinski fakultet	1971.
VIII	Ljubljana	Fakultet za strojništvo	1973.
IX	Niš	Mašinski fakultet	1974.
X	Beograd	Mašinski fakultet	1975.
XI	Ohrid	Mašinski fakultet Skoplje	1977.
XII	Maribor	Visoka tehnička škola	1978.
XIII	Banja Luka	Mašinski fakultet	1979.
XIV	Čačak	Pedagoško-tehnički fakultet	1980.
XV	Novi Sad	Fakultet tehničkih nauka	1981.
XVI	Mostar	Mašinski fakultet	1982.
XVII	Budva	Mašinski fakultet Podgorica	1983.
XVIII	Niš	Mašinski fakultet	1984.
XIX	Kragujevac	Mašinski fakultet	1985.
XX	Beograd	Mašinski fakultet	1986.
XXI	Opatija	Tehnički fakultet Rijeka	1987.
XXII	Ohrid	Mašinski fakultet Skoplje	1989.
XXIII	Zagreb	(nije održano)	1991.
XXIV	Novi Sad	Fakultet tehničkih nauka	1992.
XXV	Beograd	Mašinski fakultet	1994.
XXVI	Podgorica	Mašinski fakultet	1996.
XXVII	Niš	Mašinski fakultet	1998.
XXVIII	Kraljevo	Mašinski fakultet	2000.
XXIX	Beograd	LOLA Institut	2002.
XXX	Čačak	Tehnički fakultet i Viša tehnička škola	2005.
XXXI	Kragujevac	Mašinski fakultet	2006.
XXXII	Novi Sad	Fakultet tehničkih nauka	2008.
<b>XXXIII</b>	<b>Beograd</b>	<b>Mašinski fakultet</b>	<b>2009.</b>



## ZAHVALNICA

Organizovanje 33. Savetovanja proizvodnog mašinstva Srbije, sa međunarodnim učešćem, omogućeno je zahvaljujući razumevanju i finansijskoj pomoći donatora:

- **IKARBUS AD**, Beograd
- **OSA RAČUNARSKI INŽENJERING**, Beograd
- **NBS, Zavod za izradu novčanica i kovanog novca - Topčider**
- **METALAC AD**, Gornji Milanovac
- **FABRIKA REZNOG ALATA – Alatnica, Čačak**
- **CORUN doo**, Užice



**DOSADAŠNJI DOBITNICI POVELJE I PLAKETE  
“Prof. dr Pavle Stanković“**

*za 1983. godinu*

Prof. dr Rudolf Zdenković, dipl. ing., Fakultet strojništva i brodogradnje, Zagreb  
Prof. dr Vladimir Šolaja, dipl. ing., Mašinski fakultet, Beograd  
Prof. dr Julije Kimer, dipl. ing., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

*za 1984. godinu*

Prof. dr Janez Peklenik, dipl. ing., Fakultet za strojništvo, Ljubljana  
Prof. dr Binko Musafija, dipl. ing., Mašinski fakultet, Sarajevo

*za 1985. godinu*

Prof. dr Predrag Popović, dipl. ing., Mašinski fakultet, Niš  
Prof. dr Vladimir Milačić, dipl. ing., Mašinski fakultet, Beograd

*za 1986. godinu*

Prof. dr Branko Ivković, dipl. ing., Mašinski fakultet, Kragujevac  
Prof. dr Strezo Trajkovski, dipl. ing., Mašinski fakultet, Skoplje

*za 1987. godinu*

Prof. dr Svetislav Zarić, dipl. ing., Mašinski fakultet, Beograd  
Prof. dr Josip Hribar, dipl. ing., Fakultet strojništva i brodogradnje, Zagreb

*za 1988. godinu*

Prof. dr Branislav Deverdžić, dipl. ing., Mašinski fakultet, Kragujevac  
Prof. dr Elso Kuljanić, dipl. ing., Mašinski fakultet, Rijeka  
Prof. dr Zoran Seljak, dipl. ing., Fakultet za strojništvo, Ljubljana

*za 1992. godinu*

Prof. dr Jožef Rekecki, dipl. ing., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad  
Prof. dr Sava Sekulić, dipl. ing., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad  
Prof. dr Joko Stanić, dipl. ing., Mašinski fakultet, Beograd  
Prof. dr Vlado Vujović, dipl. ing., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

*za 1994. godinu*

Mile Benedetić, dipl. ing., LOLA Institut, Beograd  
Prof. dr Vuko Domazetović, dipl. ing., Mašinski fakultet, Podgorica  
Prof. dr Milenko Jovičić, dipl. ing., Mašinski fakultet, Beograd

*za 1996. godinu*

Prof. dr Milisav Kalajdžić, dipl. ing., Mašinski fakultet, Beograd  
Prof. dr Dragutin Zelenović, dipl. ing., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

*za 1998. godinu*

Prof. dr Ratko Gatalo, dipl. ing., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad  
Prof. dr Vučko Mečanin, dipl. ing., Mašinski fakultet, Kraljevo

*za 2000. godinu*

Prof. dr Mihailo Milojević, dipl. ing., Mašinski fakultet, Kraljevo  
Prof. dr Dragoje Milikić, dipl. ing., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

*za 2002. godinu*

Prof. dr Vojislav Stoiljković, dipl. ing., Mašinski fakultet, Niš  
Prof. dr Ilija Ćosić, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

*za 2005. godinu*

Prof. dr Dragan Domazet, dipl. ing., Mašinski fakultet, Niš  
Prof. dr Pavao Bojanić, dipl. ing., Mašinski fakultet, Beograd

*za 2006. godinu*

Prof. dr Miroslav Plančak, dipl. ing., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad  
Prof. dr Ratomir Ječmenica, dipl. ing., Tehnički fakultet, Čačak

*za 2008. godinu*

Prof. dr Dragan Milutinović, dipl. ing., Mašinski fakultet, Beograd  
Prof. dr Milentije Stefanović, dipl. ing., Mašinski fakultet, Kragujevac



**Prof. dr DRAGAN MILUTINOVIĆ, dipl. inž.**

Dr Dragan Milutinović, dipl. maš. inž., redovni profesor Mašinskog fakulteta u Beogradu, rođen je 20. jula 1952. godine u Stojniku, Beograd. Osnovnu i srednju tehničku školu je završio u Beogradu. Diplomirao je na Mašinskom fakultetu u Beogradu 1976. godine na smeru za Proizvodno mašinstvo. Na istom fakultetu je magistrirao 1981. godine i doktorirao 1987. iz oblasti industrijskih robota. Eksperimentalni deo doktorske disertacije je radio na Tokijskom univerzitetu u periodu 1984-1986. godina.

Od 1976. godine je zaposlen na Mašinskom fakultetu u Beogradu, na Katedri za proizvodno mašinstvo. U zvanje docenta je izabran 1988. godine, u zvanje vanrednog profesora 1992. godine, a u zvanje redovnog profesora 2002. godine. Od 1988. do 1993. godine je držao nastavu iz predmeta Tehnologija mašinogradnje. Na Katedri za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta u Beogradu je 1991. godine uveo predmet Industrijski roboti. Od tada iz ove oblasti drži nastavu na svim vidovima studija. Osnivač je i rukovodilac laboratorije za Industrijsku robotiku i veštačku inteligenciju od 1993. godine. U periodu od 1988. do 1998. godine je bio zamenik rukovodioca Instituta za proizvodno mašinstvo i kompjuterski integrisane tehnologije mašinskog fakulteta. Bio je mentor većeg broja diplomskih, magistarskih i doktorskih radova i gostujući profesor na Tokyo University for Agriculture and Technology. Održao je veći broj predavanja po pozivu na više univerziteta u Japanu. Bio je član velikog broja programskih i naučnih odbora na naučnim skupovima, simpozijumima i kongresima širom sveta.. Organizovao je dve međunarodne konferencije i YU-USA workshop iz oblasti industrijske robotike u našoj zemlji. Dva puta je bio gost urednik i recenzent u časopisu Robotics & Computer Integrated Manufacturing.

Kao istraživač i rukovodilac bio je uključen u veliki broj domaćih i dva međunarodna projekta (NSF i EUREKA!) iz oblasti proizvodnog mašinstva, industrijskih robota, mašina sa paralelnom kinematikom, fleksibilnih tehnoloških sistema, CAD/CAM, robotizovane montaže i sistema prepoznavanja. Razvio je i realizovao veći broj mašinskih i softverskih sistema iz oblasti robotike, fleksibilnih tehnoloških sistema, paralelnih mašina, sistema geometrijskog modeliranja i sistema za prepoznavanje. Od preko 150 referenci 90 su radovi na domaćim i međunarodnim skupovima, kao i u međunarodnim časopisima (10 radova u vodećim međunarodnim časopisima i 20 radova na međunarodnim skupovima održanim u inostanstvu). Navedeni radovi su citirani više od 10 puta u časopisima sa SCI SCOPUS Citation Index liste. Kao koautori u nekim od ovih radova su i poznata imena iz oblasti proizvodnog mašinstva i industrijske robotike iz Japana. Koautor je u dve domaće i u poglavlju jedne međunarodne monografije. Od tri priznata patenta dva su međunarodna (Japan).

Od 1996. godine je dopisni član CIRP-a (The International Academy for Production Engineering) sa sedištem u Parizu, od 2006. je član IAENG (International Association of Engineers), a od 2007. je dopisni član AINS (Akademija inženjerskih nauka Srbije). Od 2001. do 2006. godine je bio Nacionalni COST koordinator. U periodu od 2001. do 2003. godine je bio pomoćnik svaeznog sekretara za razvoj i nauku, gde je vodio sektor međunarodne saradnje. Od 2005. godine je na listi eksperata Okvirnih programa EU (Fp 6 i Fp 7).

Za naučni i stručni doprinos dobio je veći broj nagrada. Oktobarsku nagradu grada Beograda za najbolje radove studenata ( magistarski rad) je dobio 1981. godine. Godišnju nagradu Privredne komore Beograda za tehničko rešenje Troosna mašina sa paralelnom kinematikom je dobio 2005. godine. Za isto rešenje je dobio i Grand Prix nagradu Izložbe Pronalazaštvo-Beograd 2005. Nagradu grada Beograda u oblasti nauka-pronalazaštvo je dobio 2006. godine. Nagradu na takmičenju za najbolju tehnološku inovaciju NTI-2007 je dobio 2007. godine.





**Prof. dr MILENTIJE STEFANOVIĆ, dipl. inž.**

Dr Milentije Stefanović, dipl. inž. mašinstva, redovni profesor Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, rođen je 1. februara 1951. godine u Babušnici u Srbiji. Osnovnu i srednju školu završio je u Kragujevcu sa odličnim uspehom. Mašinski fakultet u Kragujevcu upisao je 1969. godine i diplomirao 1974. godine kao prvi u svojoj generaciji.

Poslediplomske studije upisao je 1974. godine na Smeru za proizvodno mašinstvo na istom fakultetu. Magistarsku tezu iz oblasti obrade metala plastičnim oblikovanjem odbranio je 1978. godine. Doktorsku disertaciju pod naslovom „Prilog istraživanju uticaja kontaktnog trenja na obradivost tankih limova pri dubokom izvlačenju“ odbranio je 1985. godine na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu. Mentor ovih radova je bio prof. dr Branislav Devedžić.

Po diplomiranju se zaposlio na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu, najpre kao asistent pripravnika, a zatim kao asistent na grupi predmeta iz oblasti proizvodnih tehnologija - obrade metala plastičnim oblikovanjem. Za docenta iz oblasti obrade metala plastičnim deformisanjem biran je 1985. godine, za vanrednog profesora 1990. godine i za redovnog profesora 1995. godine.

U proteklom periodu, prof. Stefanović je imao istaknute rezultate, kako u nastavnom, tako i u naučno-istraživačkom radu. Učestvovao je u izvođenju svih oblika nastave. Po izboru u nastavničko zvanje, predavao je predmete: Obrada metala deformisanjem (OMD), Mašine i alati u OMD, Proizvodne tehnologije I, Tehnologija plastičnog oblikovanja. Sa saradnicima je za navedene predmete napisao odgovarajuća skripta. Na poslediplomskim studijama na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu na usmerenju iz oblasti OMD predavao je predmete Eksperimentalne metode, Projektovanje alata, Obrada metala deformisanjem II. Od 2004. godine angažovan je u izvođenju nastave na poslediplomskim studijama na Mašinskom fakultetu u Banjoj Luci na predmetu: Teorija plastičnosti i tribologija.

Bio je mentor za 3 doktorske disertacije, 4 magistarske teze i više desetina diplomskih radova. Učestvovao je u brojnim komisijama za odbranu magistarskih i doktorskih radova u Novom Sadu, Nišu, Banjoj Luci.

Učestvovao je na mnogim naučnim skupovima u zemlji i inostranstvu. Do sada je objavio preko 200 naučno-stručnih radova na konferencijama u zemlji i inostranstvu, u domaćim i stranim časopisima. Od 1977. godine praktično učestvuje na skoro svim Savetovanjima proizvodnog mašinstva Jugoslavije, odnosno Srbije. 1985. godine bio je sekretar 19. Savetovanja, a 2006. godine predsednik organizacionog odbora 31. Savetovanja proizvodnog mašinstva SCG.

Monografiju pod naslovom „Tribologija dubokog izvlačenja“ u izdanju Jugoslovenskog društva za tribologiju objavio je 1994. godine. Učestvovao je u recenzijama udžbenika, monografija i radova za časopise i naučne konferencije. Član je redakcionih odbora časopisa *Journal for Technology of Plasticity* (Izdavač FTN – Novi Sad, jedini međunarodni časopis u Srbiji iz oblasti Tehnologije plastičnog oblikovanja metala, 33 godine izdavanja), *ZASTAVA* (Izdavač – Institut za automobile Zastava, Kragujevac, časopis za nauku i praksu, 21 godina izdavanja).

Presedavao je na konferencijama u zemlji (konferencije proizvodnog mašinstva, konferencije iz tribologije) i inostranstvu (npr. 1<sup>st</sup> World Tribology Congress, London, 1977., 2nd ICMEN 2005, Grčka, 3rd ICMEN 2008). Obavio je studijske boravke u više instituta u Berlinu, Štutgartu, Krakovu, Atini.

Učestvovao je u relizaciji i rukovodio brojnim projektima, koji su bili finansirani od strane Ministarstva za nauku i tehnologije Republike Srbije, ili realizovani u direktnoj saradnji sa privredom, iz

oblasti obradivosti niskouglednih tankih limova za duboko izvlačenje, čelika povišene čvrstoće, limova od nerđajućeg čelika, na razvoju tehnologije toplog, polutoplog i hladnog kovanja čelika i obojenih metala, razvoju novih aluminijumskih legura za primenu u automobilske industriji. Posebno treba naglasiti doprinos u oblasti tribologije u procesima OMD, npr. u razvoju specijalnih tipova tribo-modela pri dubokom izvlačenju delova kompleksne geometrije. Za skoro 35 godina aktivnog rada i učešća u razvoju tehnologija OMD, ostvario je veoma uspešnu saradnju sa brojnim preuzećima i institutima – Zavodima Crvenom Zastavom iz Kragujevca, Fabrikom namenske proizvodnje iz Kragujevca, Institutom za crnu metalurgiju željezare SARTID iz Smedereva, IMPOL SEVAL-om iz Sevojna, Institutom ITNMS iz Beograda, IKARUS-om iz Beograda itd.

Bio je direktor programa profesionalne edukacije EUREKNA projekata, koordinator na Univerzitetu u Kragujevcu odgovarajućih TEMPUS projekata, rukovodio temom u okviru međunarodnog projekta iz programa EUREKA-ASMATA i sl. U okviru aktivnosti Centra za virtuelnu proizvodnju (CEVIP) na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu rukovodi poslovima saradnje sa privredom. Za period od 2002. do 2006. godine bio je imenovan je od strane Ministarstva za nauke Republike Srbije za člana Ekspertske komisije za pripremu i ocenu projekata iz oblasti mašinstva i industrijskog softvera.

Na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu je u više mandata obavljao dužnosti prodekana, u periodu 2004.-2006. godine vršio je dužnost prorektora za finansije Univerziteta u Kragujevcu, od 2006-2009. godine predsedava Stručnim većem za tehničko-tehnološke nauke na Univerzitetu u Kragujevcu. Za poseban doprinos u razvoju Mašinskih fakulteta u Kragujevcu i Banjoj Luci dobio je plakete 1996. godine, odnosno 2005. godine.

## **PREDGOVOR**

*Prvo Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije održano je u Beogradu 1965. godine, i to na inicijativu prof. dr Vladimira Šolaje, kada je i formirana Zajednica naučno-istraživačkih institucija proizvodnog mašinstva, koju su sačinjavali mašinski fakulteti i istraživački instituti iz skoro svih republičkih centara tadašnje države. Zajednica naučno-istraživačkih institucija proizvodnog mašinstva je, u novim okolnostima, najpre obnovljena 1994. godine a zatim 2005. godine i Izvršni odbor ove Zajednice je poverio organizaciju 33. Savetovanja Mašinskom fakultetu u Beogradu.*

*Organizator Savetovanja, Katedra za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta, je ambiciozno pristupila organizovanju ovog Savetovanja postavljajući tri cilja: (1) da se ukaže na stanje istraživanja u oblasti proizvodnog mašinstva u domaćim uslovima a time i definiše pozicija domaće industrije, (2) da se ukaže na značaj permanentnog obrazovanja i neophodnost većeg ulaganja države kao preduslova ekonomije zasnovane na znanju i (3) da se ukaže na neophodnost grinfild investicija i novih tehnologija u proizvodne procese kao preduslova konkurentnosti industrije Srbije. Istraživači sa fakulteta, instituta i stručnjaci iz industrije razmeniće iskustva i dati odgovore na postavljene ciljeve, kako bi se došlo do strategije podsticanja ekonomije zasnovane na znanju koja vodi ka konkurentnosti industrije.*

*Održavanje ovogodišnjeg Savetovanja je pomerenom godinu dana unapred i na njemu će biti obeleženo sto godina od rođenja prof. dr Pavla Stankovića. Na Savetovanju će biti izloženo 80 radova autora iz Srbije i inostranstva (Slovenije, Hrvatske, Bosne i Hercegovine, Crne Gore, Makedonije, Ukrajine, Belorusije i Libije). Aktivnosti će se realizovati kroz četiri sekcije, koje obuhvataju sledeće tematske oblasti: Obradne procese i materijale, Projektovanje proizvoda i tehnologija, Optimizaciju i Kvalitet.*

*Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike, zajedno sa donatorima iz industrije su finansijskom podrškom omogućili organizovanje ovog Savetovanja, na čemu im se organizator i ovim putem zahvaljuje, dok se pokroviteljstvo Skupštine grada Beograda shvata kao podrška naporima za unapređenje nauke i struke u oblasti proizvodnog mašinstva.*

*U ime organizacionog odbora posebno se zahvaljujem svim domaćim i stranim autorima, kao i članovima recenzentskog tima na izvršenim recenzijama.*

*Beograd,  
16.06.2009. god.*

*Predsednik organizacionog odbora 33.SPMS  
i*

*Predsednik Zajednice PMS*

*Prof. dr Ljubodrag TANOVIĆ*

## **FOREWORD**

*The first Scientific conference on production engineering of Yugoslavia was held in Belgrade, in 1965, initiated by Prof. Vladimir Šolaja. This also marked the forming of the Association of scientific and research institutions in production engineering, which included faculties of mechanical engineering and research institutes of almost all major cities of the former federation. The association of scientific and research institutions in production engineering was reinstated, under new circumstances, in 1994, so in 2005, the Executive Board of the Association delegated the organization of 33rd Conference to the Faculty of Mechanical Engineering in Belgrade.*

*The organizer of this Conference, the Department of Production Engineering of the Faculty of Mechanical Engineering, has ambitiously approached the task of organizing this Conference, setting three primary goals: (1) to point to the current state of research in the area of production engineering in the country, and thus define the position of local industry, (2) to point to the importance of permanent education and the necessity for bigger investment of the state as the precondition for knowledge-based economy and (3) to point to the need for greenfield investment and new technologies into production processes, as the precondition for a competitive position of Serbian industry. Researches from faculties, institutes and industrial experts will exchange experience and give responses to set goals, so as to reach strategies for boosting knowledge-based economy leading to the industry competitiveness.*

*The organization of this year's Conference is to be held one year earlier, commemorating a centenary of the birth of Professor Pavle Stanković. 80 papers will be presented in the Conference, by authors from Serbia and foreign countries (Slovenia, Croatia, Bosnia and Herzegovina, Montenegro, Macedonia, Ukraine, Belorussia and Libya). The activities are to be realized through four sections, comprising the following theme areas: Machining Processes and Materials, Product and Technology Design, Optimization and Quality.*

*The Ministry of Science and Technological Development of Serbia, together with donors from industry, have financially supported the organization of this Conference, for which the organizer wishes to express gratitude on this occasion, at the same time acknowledging the auspices of Belgrade City Hall as the support to our endeavours for the advancement of science in the area of production engineering.*

*On behalf of the organizational committee, I wish to express my gratitude to all domestic and foreign contributors, as well as the editing board for the performed reviews.*

*Belgrade  
Jun 16, 2009*

*President of the organizational board of 33<sup>rd</sup> SPMS  
and President of the Association*

*Professor Dr. Ljubodrag Tanović*



## Sadržaj Contents

### UVODNI RADOVI / PLENNARY PRESENTATIONS:

<b>Jovičić, M., Mandić, D., Milačić, V., Nikolić, D.</b> ПРОФ. ДР ПАВЛЕ П. СТАНКОВИЋ, ПЕДАГОШКИ И НАУЧНИ ДОПРИНОСИ У ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДНОГ МАШИЊСТВА.....	3
<b>Nedeljković, M.</b> МЕЂУНАРОДНА АКРЕДИТАЦИЈА ИНЖЕЊЕРСКИХ СТУДИЈА - ИЗЛАЗАК НА МЕЂУНАРОДНО ТРЖИШТЕ УНИВЕРЗИТЕТСКОГ ОБРАЗОВАЊА.....	4
<b>Tanović, L.</b> МЕТАЛОПРЕРАЂИВАЧКА ИНДУСТРИЈА РЕПУБЛИКЕ СРБИЈЕ.....	5
<b>Milačić, V.</b> MISTERIJA EKONOMSKOG RASTA I PROPADANJA DRŽAVA - DOBA MEGA KRIZA.....	9

### SEKCIJA A / SECTION A:

<b>Stamenković, D., Bojović, B., Miljković, Z., Babić, B., Kojić, D.</b> TEHNOLOGIJA MAŠINSKE OBRADE I BIOKOMPATIBILNOST POLIMERA.....	13
<b>Sovilj Nikić, I., Radonjić, S., Sovilj, B., Deljanin, L.</b> ANALIZA EKSPLOATACIONIH KARAKTERISTIKA PROFILNIH ALATA ZA OZUBLJENJE U INDIJUSTRJI IMK „14 OKTOBAR“.....	17
<b>Sovilj Nikić, I., Radonjić, S., Sovilj, B.</b> ANALIZA PRIMENE KRIVE ZA LEĐNU OBRADU ZUBA PROFILNIH GLODALA.....	21
<b>Sekulić, S.</b> PREGLED IZRAZA ZA OCENU PEREFORMANSI REZNOG ALATA.....	25
<b>Antić, A., Petrović, P., Zeljković, M.</b> UTICAJ POHABANOSTI ALATA NA MEHANIZAM FORMIRANJA I OBLIK STRUGOTINE PRI OBRADI STRUGANJEM.....	27
<b>Borojević, S., Sredanović, B., Globočki Lakić, G., Nedić, B., Čiča, Đ.</b> ANALIZA INDEKSA OBRADIVOSTI ALUMINIJUMSKIH LEGURA PRIMJENOM APLIKATIVNOG PROGRAMSKOG RJEŠENJA.....	31
<b>Rančić, B., Lazarević, A., Lazarević, D.</b> ANALIZA ENERGETSKOG BILANSA KOD SEČENJA PLAZMOM.....	35
<b>Janković, P., Lazarević, A., Lazarević, D.</b> REZANJE PLAZMOM I UNAPREĐENJE KVALITETA PRESEČNE POVRŠINE.....	39
<b>Клименко, С., Копеккина, М., Тановић, ЈБ.</b> ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ – ОСНОВА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ.....	43
<b>Мельничук, П., Лоев, Е., Кравчук, О.</b> ЧИСТОВЕ ТОРЦЕВЕ ФРЕЗЕРУВАННЯ ШИРОКИХ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ НЕЖОРСКИХ ДЕТАЛЕЙ. АНАЛІЗ УТВОРЕННЯ ПОХИБОК І ПОПЕРЕДНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЇХ МІНІМІЗАЦІЇ.....	47
<b>Adamović, D., Devedžić, G., Ristić, B., Ivanović, L.</b> IZBOR MATERIJALA ZA IMPLANTATE.....	51
<b>Pejović, B., Todić, A., Mičić, V.</b> PRIMENA METODE DEFORMACIJSKOG RADA KOD PROJEKTOVANJA NOSAČA ALATA PRI UNUTRAŠNEM STRUGANJU DUGAČKIH OBRADAKA.....	61
<b>Vilotić, D., Plančak, M., Movrin, D., Trbojević, I., Milutinović, M.</b> NUMERIČKA ANALIZA PROCESA SABIJANJA ( <i>Rad po pozivu / Invited Paper</i> ).....	67
<b>Marinković, V.</b> PRILOG ODREĐIVANJU SILE SLOBODNOG SAVIJANJA LIMOVA.....	71

<b>Vukčević, M., Janjić, M., Šibalić, N.</b> MJERENJA SILA KOD PROCESA ZAVARIVANJA TRENJEM .....	75
<b>Baralić, J., Radonjić, S., Nedić, B., Kovač, P.</b> HABANJE CEVI ZA USMERAVANJE MLAZA.....	79
<b>Krašnik, M., Šljivić, M., Trifković, S.</b> NEKI ASPEKTI DEFORMABILNOSTI POROZNIH MATERIJALA DOBIJENIH POSTUPCIMA METALURGIJE PRAHA.....	83
<b>Mohieldeen, A.R., Raddad, B.</b> DEFORMATION OF HIGH PURITY COPPER SPECIMENS IN COMPRESSION BETWEEN FLAT AND GROOVED DIES.....	87
<b>Mohieldeen, A.R., Raddad, B.</b> EXPANDING OF HOLES IN 0.08% C STEEL SHEETS USED FOR WATER HEATERS USING A HEMISPHERICAL PUNCH .....	93
<b>Marković, S., Josifović, D., Tanasijević, S., Jovičić, S.</b> TEHNOLOŠKI ISPRAVNO OBLIKOVANJE DELOVA OD PLASTIČNIH MASA .....	101
<b>Marković, S., Veličković, D., Erić, D.</b> TEHNOLOGIČNOST OBLIKOVANJA LIVENIH MAŠINSKIH DELOVA .....	105
<b>Adamović, D., Stefanović, M., Živković, M., Devedžić, G.</b> UTICAJ PARAMETARA DUBOKOG IZVLAČENJA SA STANJENJEM DEBLJINE NA NAPON ZATEZANJA ZIDA IZVLAČENOG ČELIČNOG DELA .....	109

## SEKCIJA B / SECTION B:

<b>Bojanić, P.</b> GENERISANJE PUTANJE ALATA PRI OBRADI SKULPTORSKIH POVRŠINA NA 3-OSNIM CNC MAŠINAMA LOPTASTIM GLODALOM ( <i>Rad po pozivu / Invited Paper</i> ) .....	115
<b>Tabaković, S., Živković, A., Gatalo, R., Zeljković, M., Mijušković, M.</b> UNAPREĐENJE KARAKTERISTIKA UNIVERZALNOG ZGLOBA OPTIMIZACIJOM GEOMETRIJE POJEDINIH NJEGOVIH ELEMENATA .....	119
<b>Kosec, B., Karpe, B., Ličen, M., Soković, M., Kosec, L.</b> TEMPERATURE FIELD ANALYSIS AT INDUCTIVE HEATING AND QUENCHING OF PLANETARY SHAFTS.....	123
<b>Todić, V., Milošević, M., Lukić, D.</b> PODLOGE ZA RAZVOJ STANDARDNIH TEHNOLOŠKIH PROCESA PROIZVODNJE KOTRLJAJNIH LEŽAJA .....	127
<b>Živković, A., Zeljković, M., Borojev, L.</b> NELINEARNI MATEMATIČKI MODEL ZA ANALIZU STATIČKOG PONAŠANJA KUGLIČNIH LEŽAJEVA.....	131
<b>Đukanović, V., Todić, M., Miletić, O.</b> NAPONSKO - DEFORMACIONO STANJE NOSEĆE STRUKTURE ČETVEROSTUBNE HIDRAULIČNE PRESE .....	135
<b>Sovilj, B., Seuček, I., Radonjić, S., Bughart, D., Sovilj Nikić, I., Borenović, M.</b> PROJEKTOVANJE PROFILNOG GLODALA ZA IZRADU NAVOJA PRIMENOM PROGRAMSKOG SISTEMA CATIA .....	139
<b>Sovilj, B., Seuček, I., Kovač, P., Bera, R., Milenković, Đ., Sovilj Nikić, I.</b> PROJEKTOVANJE PRAVOG ZUPČASTOG NOŽA PRIMENOM SAVREMENIH PROGRASKIH SISTEMA .....	143
<b>Babić, A., Pljakić, M., Ilić, N., Petrović, A.</b> POVEZIVANJE PROCESA PROJEKTOVANJA PROIZVODA U CAD-U SA MONTAŽNIM OPERACIJAMA U CAM-U NA PRIMERU GLODAČKIH GLAVA.....	147
<b>Milutinović, D., Glavonjić, M., Živanović, S., Dimić, Z., Slavković, N.</b> RAZVOJ REKONFIGURABILNOG OBRADNOG SISTEMA NA BAZI ROBOTA ( <i>Rad po pozivu / Invited Paper</i> ) .....	151
<b>Nedić, B., Kaplarević, M.</b> NOVI PRISTUP PROJEKTOVANJU FLEKSIBILNI PRIBORA ZA IZRADU SLOŽENIH PROSTORNIH DELOVA .....	157
<b>Ćirković, B., Todić, T., Todić, A.</b> ПРОЈЕКТОВАЊЕ И ИЗБОР МОДЕЛА НОСЕЋЕ СТРУКТУРЕ МАШИНА ОД КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА .....	161

<b>Čiča, Đ., Zeljković, M., Golubović, V., Globočki Lakić, G.</b> IDENTIFIKACIJA PARAMETARA VEZE DINAMIČKIH SISTEMA KORIŠĆENJEM FUNKCIJE FREKVENTNOG ODZIVA .....	165
<b>Simonović, S.</b> KONSTRUISANJE ZA FLEKSIBILNU MASOVNU PROIZVODNJU .....	169
<b>Kheifetz, M., Koukhta, S., Liakhovich, A., Alekseeva, T.</b> DESIGNING OF MANUFACTURING PROCESSES ON THE BASIS OF USE STRUCTURAL ANALYSIS .....	173
<b>Pejović, B., Todić, A., Mičić, V.</b> ANALIZA DINAMIČKOG OPTEREĆENJA KOD PRENOSNIKA MAŠINA ALATKI U PRELAZNOM PERIODU .....	177
<b>Janković, M., Munćan, J.</b> ANALIZA ČVRSTOĆE VRATILA I OSOVINA I TENDENCIJA NJENOG USAVRŠAVANJA .....	183
<b>SEKCIJA C / SECTION C:</b>	
<b>Pilipović, M., Spasić, Ž.</b> VIRTUELNA PROIZVODNJA-VIRTUELNO PROIZVODNO MAŠINSTVO? ( <i>Rad po pozivu / Invited Paper</i> )	189
<b>Dimić, Z., Kvirgić, V., Živanović, S., Krošnjari, A.</b> KONCEPT UPRAVLJANJA PETOOSNOG VERTIKALNOG STRUGARSKOG OBRADNOG CENTRA UPRAVLJAČKIM SISTEMOM OTVORENE ARHITEKTURE .....	195
<b>Jurković, Z., Brezočnik, M., Sekulić, M.</b> MODELIRANJE PROCESA OBRADE REZANJEM PRIMENOM GENETSKIH ALGORITAMA .....	199
<b>Erić, M., Tadić, B., Mitrović, S.</b> MOGUĆI PRAVCI OSTVARIVANJA REINŽENJERINGA TEHNOLOŠKIH PROCESA MALIH PREDUZEĆA .....	203
<b>Sovilj, B., Brezočnik, M., Sovilj Nikić, I., Kovač, P.</b> MODELIRANJE FUNKCIJE POSTOJANOSTI ALATA PRIMENOM GENETSKOG ALGORITMA I PLANA EKSPERIMENTA PRI IZRADI PROFILA .....	207
<b>Drndarević, D., Petrović, S., Milivojević, M., Panić, S.</b> MODELOVANJE PROCESA METALURGIJE PRAHA POMOĆU NEURONSKIH MREŽA.....	211
<b>Jovanović, J., Đukić, R.</b> UPRAVLJANJE PROIZVODNIM PROCESIMA KORIŠĆENJEM APLIKATIVNOG SOFTVERA MS PROJECT.....	215
<b>Petrović, P., Jakovljević, Ž.</b> 3D DIGITALIZACIJA OBJEKATA KOMPLEKSNE GEOMETRIJE INTEGRACIJOM LASERSKOG TRIANGULACIONOG SENZORA I INDUSTRIJSKOG ROBOTA ( <i>Rad po pozivu / Invited Paper</i> ) .....	219
<b>Đukić, R., Bradić, Z., Jovanović, J., Stefanović, M.</b> PLANIRANJE PROIZVODNJE SLOŽENOG PROIZVODA .....	225
<b>Movrin, D., Skakun, P., Vilotić, D., Plančak, M., Maravić, I., Jovičić, R.</b> OPTIMIZACIJA PROCESA KOVANJA PNEUMATSKE STEZALJKE NUMERIČKOM SIMULACIJOM.....	229
<b>Jovišević, V., Jokanović, S., Borojević, S.</b> MODELIRANJE I SIMULACIJA PROIZVODNIH PROCESA PRIMJENOM PROGRAMSKOG SISTEMA TECNOMATIX PLANT SIMULATION .....	233
<b>Cvetković, S.</b> MODELIRANJE SISTEMA TOKOVA MATERIJALA .....	237
<b>Randelović, S., Milosavljević, P., Stanković, B.</b> SIMULACIJA PROCESA ISTISKIVANJA ALUMINIJUMA PRIMENOM FEM ADAPTIVNIH METODA ....	241
<b>Koreshkov, V., Kheifetz, M., Liakhovich, A., Tochilo, V.</b> COMBINED PROCESSING CONTROL ON THE BASIS OF STATISTIC AND STRUCTURAL ANALYSIS .....	245
<b>Brzaković, R., Marjanović, Z.</b> RAČUNARSKI SISTEMI ZA UPRAVLJANJE PROIZVODNjom .....	249

**SEKCIJA D / SECTION D:**

<b>Majstorović, V.</b> PRAKSA MENADŽMENTA KVALITETOM U SRBIJI - REZULTATI ISTRAŽIVANJA ( <i>Rad po pozivu / Invited Paper</i> ) .....	255
<b>Popović, B., Klarin, M., Veljković, Z.</b> PROCES POBOLJŠAVANJA- SISTEM ŠEST SIGMA .....	259
<b>Nuhodžić, S., Bulatović, M.</b> OŠTEĆENJA OSOVINSKIH LEŽAJA ŽELJEZNIČKOG VOZILA .....	263
<b>Jovanović, D., Nedić, B.</b> UTICAJ TEHNOLOGIJE IZRADA NA RADNE KARAKTERISTIKE MAŠINSKIH ELEMENATA .....	267
<b>Živković, P., Makragić, S.</b> RAZARANJA CENTRALNIH ZUPČANIK PLANETARNIH PRENOSNIKA SNAGE .....	271
<b>Stanković, B., Milosavljević, P., Randelović, S.</b> PRILOG UNAPREĐENJA PROCESA ODRŽAVANJA PRIMENOM METODE TPM U INDUSTRIJSKOJ ENERGANI .....	275
<b>Đuričić, M., Ačimović-Pavlović, Z., Milutinović, I., Nenadić, M.</b> NEUTRALISANJE I SAGOREVANJE OPASNOG MEDICINSKOG OTPADA- ZNAČAJNA ŠANSA ODRŽIVOG RAZVOJA.....	279
<b>Janjuš, Z., Petrović, A., Jovović, A., Ilić, P.</b> ПРИЈЕДЛОГ УПРАВЉАЊА ОТПАДНИМ ПАПИРОМ.....	283
<b>Đapić, M., Zeljković, V., Urošević, A., Senkijević, A., Đurić, A.</b> USKLAĐIVANJE MAŠINA ZA SEČENJE METALNIH OJAČANJA SA ZAHTEVIMA EVROPSKIH DIREKTIVA.....	287
<b>Marjanović, Z., Brzaković, R.</b> DIJAGNOSTIČKE METODE ZA ODRŽAVANJE IZOLACIJE ASINHRONOG MOTORA.....	291
<b>Milunović, S., Ječmenica, R.</b> METODA STRUKTURIRANJE FUNKCIJE KVALITETA (QFD) U PLANIRANJU KVALITETA PROIZVODA: TRADICIONALNI I FUZZY PRILAZ .....	295
<b>Vukićević, M.</b> STRUKTURA RADA UNIVERZITETSKIH NASTAVNIKA – TEHNIČKE NAUKE – .....	299
<b>Pavićević, Ž., Mićunović, J., Hamzić, D.</b> EVOLUCIJA EFEKTIVNOG SISTEMA MENADŽMENTA ZNANJA.....	303
<b>Pavićević, Ž., Mićunović, J., Hamzić, D.</b> PRELAZAK SA TRADICIONALNOG NA STRATEGIJSKO UPRAVLJANJE PROIZVODNIM SISTEMIMA.....	307
<b>Bračanović, Z.</b> KREIRANJEM ZNANJA FORMIRAMO TRŽIŠNO USMERENA PREDUZEĆA .....	311
<b>Romić, L.</b> PROCENA NOVČANIH TOKOVA PROJEKTA U MAŠINSTVU .....	315
<b>Milanović, D., Misita, M., Karić, M.</b> PRIMENA AHP METODE ZA IZBOR ERP REŠENJA.....	317
<b>Komadinić, V., Trgovčević, S.</b> PRILOG IZBORU SOFTVERA ZA UPRAVLJANJE ODRŽAVANJEM.....	321
<b>Mircheski, I., Sidorenko, S.</b> SYNCHRONIZATION OF FOUR BASIC ERGONOMIC PARAMETERS FOR THE DRIVER'S COMFORT IN VEHICLES .....	323
<b>Kheifetz, M., Kusakin, N., Prement, G.</b> TECHNOLOGICAL AND OPERATIONAL INHERITANCE OF PARAMETERS OF QUALITY AT RESTORATION OF DETAILS OF THE ENGINE.....	327
<b>Stefanović, M., Aleksandrović, S., Stanojević, M., Adamović, D.</b> EKOLOŠKI PRIHVATLJIVE TEHNOLOGIJE OBRADE METALA DEFORMISANJEM.....	331
<b>Avakumović, Č., Jović, N., Skorup, S.</b> EKONOMSKI ZNAČAJ UPRAVLJANJA KVALITETOM U MALIM I SREDNJIM METALOPRERAĐIVAČKIM PREDUZEĆIMA.....	335
<b>INDEX AUTORA / AUTHOR INDEX .....</b>	<b>341</b>





## Sadržaj Contents

### UVODNI RADOVI / PLENNARY PRESENTATIONS:

<b>Jovičić, M., Mandić, D., Milačić, V., Nikolić, D.</b> ПРОФ. ДР ПАВЛЕ П. СТАНКОВИЋ, ПЕДАГОШКИ И НАУЧНИ ДОПРИНОСИ У ОБЛАСТИ ПРОИЗВОДНОГ МАШИЊСТВА.....	3
<b>Nedeljković, M.</b> МЕЂУНАРОДНА АКРЕДИТАЦИЈА ИНЖЕЊЕРСКИХ СТУДИЈА - ИЗЛАЗАК НА МЕЂУНАРОДНО ТРЖИШТЕ УНИВЕРЗИТЕТСКОГ ОБРАЗОВАЊА.....	4
<b>Tanović, L.</b> МЕТАЛОПРЕРАЂИВАЧКА ИНДУСТРИЈА РЕПУБЛИКЕ СРБИЈЕ.....	5
<b>Milačić, V.</b> MISTERIJA EKONOMSKOG RASTA I PROPADANJA DRŽAVA - DOBA MEGA KRIZA.....	9

### SEKCIJA A / SECTION A:

<b>Stamenković, D., Bojović, B., Miljković, Z., Babić, B., Kojić, D.</b> ТЕХНОЛОГИЈА МАШИЊСКЕ ОБРАДЕ И БИОКОМПАТИБILНОСТ ПОЛИМЕРА.....	13
<b>Sovilj Nikić, I., Radonjić, S., Sovilj, B., Deljanin, L.</b> ANALIZA EKSPLOATACIONIH KARAKTERISTIKA PROFILNIH ALATA ZA OZUBLJENJE U INDUSTRJI IMK „14 OKTOBAR“.....	17
<b>Sovilj Nikić, I., Radonjić, S., Sovilj, B.</b> ANALIZA PRIMENE KRIVE ZA LEĐNU OBRADU ZUBA PROFILNIH GLODALA.....	21
<b>Sekulić, S.</b> PREGLED IZRAZA ZA OCENU PEREFORMANSI REZNOG ALATA.....	25
<b>Antić, A., Petrović, P., Zeljković, M.</b> UTICAJ POHABANOSTI ALATA NA MEHANIZAM FORMIRANJA I OBLIK STRUGOTINE PRI OBRADI STRUGANJEM.....	27
<b>Borojević, S., Sredanović, B., Globočki Lakić, G., Nedić, B., Čiča, Đ.</b> ANALIZA INDEKSA OBRADIVOSTI ALUMINIJUMSKIH LEGURA PRIMJENOM APLIKATIVNOG PROGRAMSKOG RJEŠENJA.....	31
<b>Rančić, B., Lazarević, A., Lazarević, D.</b> ANALIZA ENERGETSKOG BILANSA KOD SEČENJA PLAZMOM.....	35
<b>Janković, P., Lazarević, A., Lazarević, D.</b> REZANJE PLAZMOM I UNAPREĐENJE KVALITETA PRESEČNE POVRŠINE.....	39
<b>Клименко, С., Копекина, М., Тановић, ЈБ.</b> ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ – ОСНОВА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ.....	43
<b>Мельничук, П., Лоев, Е., Кравчук, О.</b> ЧИСТОВЕ ТОРЦЕВЕ ФРЕЗЕРУВАННЯ ШИРОКИХ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ НЕЖОРСКИХ ДЕТАЛЕЙ. АНАЛІЗ УТВОРЕННЯ ПОХИБОК І ПОПЕРЕДНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЇХ МІНІМІЗАЦІЇ.....	47
<b>Adamović, D., Devedžić, G., Ristić, B., Ivanović, L.</b> IZBOR MATERIJALA ZA IMPLANTATE.....	51
<b>Pejović, B., Todić, A., Mičić, V.</b> PRIMENA METODE DEFORMACIJSKOG RADA KOD PROJEKTOVANJA NOSAČA ALATA PRI UNUTRAŠNJEM STRUGANJU DUGAČKIH OBRADAKA.....	61
<b>Vilotić, D., Plančak, M., Movrin, D., Trbojević, I., Milutinović, M.</b> NUMERIČKA ANALIZA PROCESA SABIJANJA ( <i>Rad po pozivu / Invited Paper</i> ).....	67
<b>Marinković, V.</b> PRILOG ODREĐIVANJU SILE SLOBODNOG SAVIJANJA LIMOVA.....	71

<b>Vukčević, M., Janjić, M., Šibalić, N.</b> MJERENJA SILA KOD PROCESA ZAVARIVANJA TRENJEM .....	75
<b>Baralić, J., Radonjić, S., Nedić, B., Kovač, P.</b> HABANJE CEVI ZA USMERAVANJE MLAZA.....	79
<b>Krašnik, M., Šljivić, M., Trifković, S.</b> NEKI ASPEKTI DEFORMABILNOSTI POROZNIH MATERIJALA DOBIJENIH POSTUPCIMA METALURGIJE PRAHA.....	83
<b>Mohieldeen, A.R., Raddad, B.</b> DEFORMATION OF HIGH PURITY COPPER SPECIMENS IN COMPRESSION BETWEEN FLAT AND GROOVED DIES.....	87
<b>Mohieldeen, A.R., Raddad, B.</b> EXPANDING OF HOLES IN 0.08% C STEEL SHEETS USED FOR WATER HEATERS USING A HEMISPHERICAL PUNCH .....	93
<b>Marković, S., Josifović, D., Tanasijević, S., Jovičić, S.</b> TEHNOLOŠKI ISPRAVNO OBLIKOVANJE DELOVA OD PLASTIČNIH MASA .....	101
<b>Marković, S., Veličković, D., Erić, D.</b> TEHNOLOGIČNOST OBLIKOVANJA LIVENIH MAŠINSKIH DELOVA.....	105
<b>Adamović, D., Stefanović, M., Živković, M., Devedžić, G.</b> UTICAJ PARAMETARA DUBOKOG IZVLAČENJA SA STANJENJEM DEBLJINE NA NAPON ZATEZANJA ZIDA IZVLAČENOG ČELIČNOG DELA .....	109

## SEKCIJA B / SECTION B:

<b>Bojanić, P.</b> GENERISANJE PUTANJE ALATA PRI OBRADI SKULPTORSKIH POVRŠINA NA 3-OSNIM CNC MAŠINAMA LOPTASTIM GLODALOM ( <i>Rad po pozivu / Invited Paper</i> ) .....	115
<b>Tabaković, S., Živković, A., Gatalo, R., Zeljković, M., Mijušković, M.</b> UNAPREĐENJE KARAKTERISTIKA UNIVERZALNOG ZGLOBA OPTIMIZACIJOM GEOMETRIJE POJEDINIH NJEGOVIH ELEMENATA .....	119
<b>Kosec, B., Karpe, B., Ličen, M., Soković, M., Kosec, L.</b> TEMPERATURE FIELD ANALYSIS AT INDUCTIVE HEATING AND QUENCHING OF PLANETARY SHAFTS.....	123
<b>Todić, V., Milošević, M., Lukić, D.</b> PODLOGE ZA RAZVOJ STANDARDNIH TEHNOLOŠKIH PROCESA PROIZVODNJE KOTRLJAJNIH LEŽAJA.....	127
<b>Živković, A., Zeljković, M., Borojev, L.</b> NELINEARNI MATEMATIČKI MODEL ZA ANALIZU STATIČKOG PONAŠANJA KUGLIČNIH LEŽAJEVA.....	131
<b>Đukanović, V., Todić, M., Miletić, O.</b> NAPONSKO - DEFORMACIONO STANJE NOSEĆE STRUKTURE ČETVEROSTUBNE HIDRAULIČNE PRESE .....	135
<b>Sovilj, B., Seuček, I., Radonjić, S., Bughart, D., Sovilj Nikić, I., Borenović, M.</b> PROJEKTOVANJE PROFILNOG GLODALA ZA IZRADU NAVOJA PRIMENOM PROGRAMSKOG SISTEMA CATIA .....	139
<b>Sovilj, B., Seuček, I., Kovač, P., Bera, R., Milenković, Đ., Sovilj Nikić, I.</b> PROJEKTOVANJE PRAVOG ZUPČASTOG NOŽA PRIMENOM SAVREMENIH PROGRASKIH SISTEMA .....	143
<b>Babić, A., Pljakić, M., Ilić, N., Petrović, A.</b> POVEZIVANJE PROCESA PROJEKTOVANJA PROIZVODA U CAD-U SA MONTAŽNIM OPERACIJAMA U CAM-U NA PRIMERU GLODAČKIH GLAVA.....	147
<b>Milutinović, D., Glavonjić, M., Živanović, S., Dimić, Z., Slavković, N.</b> RAZVOJ REKONFIGURABILNOG OBRADNOG SISTEMA NA BAZI ROBOTA ( <i>Rad po pozivu / Invited Paper</i> ) .....	151
<b>Nedić, B., Kaplarević, M.</b> NOVI PRISTUP PROJEKTOVANJU FLEKSIBILNI PRIBORA ZA IZRADU SLOŽENIH PROSTORNIH DELOVA.....	157
<b>Ćirković, B., Todić, T., Todić, A.</b> ПРОЈЕКТОВАЊЕ И ИЗБОР МОДЕЛА НОСЕЋЕ СТРУКТУРЕ МАШИНА ОД КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА .....	161

<b>Čiča, Đ., Zeljković, M., Golubović, V., Globočki Lakić, G.</b> IDENTIFIKACIJA PARAMETARA VEZE DINAMIČKIH SISTEMA KORIŠĆENJEM FUNKCIJE FREKVENTNOG ODZIVA .....	165
<b>Simonović, S.</b> KONSTRUISANJE ZA FLEKSIBILNU MASOVNU PROIZVODNJU .....	169
<b>Kheifetz, M., Koukhta, S., Liakhovich, A., Alekseeva, T.</b> DESIGNING OF MANUFACTURING PROCESSES ON THE BASIS OF USE STRUCTURAL ANALYSIS .....	173
<b>Pejović, B., Todić, A., Mičić, V.</b> ANALIZA DINAMIČKOG OPTEREĆENJA KOD PRENOSNIKA MAŠINA ALATKI U PRELAZNOM PERIODU .....	177
<b>Janković, M., Munćan, J.</b> ANALIZA ČVRSTOĆE VRATILA I OSOVINA I TENDENCIJA NJENOG USAVRŠAVANJA .....	183

## SEKCIJA C / SECTION C:

<b>Pilipović, M., Spasić, Ž.</b> VIRTUELNA PROIZVODNJA-VIRTUELNO PROIZVODNO MAŠINSTVO? ( <i>Rad po pozivu / Invited Paper</i> )	189
<b>Dimić, Z., Kvirgić, V., Živanović, S., Krošnjarić, A.</b> KONCEPT UPRAVLJANJA PETOOSNOG VERTIKALNOG STRUGARSKOG OBRADNOG CENTRA UPRAVLJAČKIM SISTEMOM OTVORENE ARHITEKTURE .....	195
<b>Jurković, Z., Brezočnik, M., Sekulić, M.</b> MODELIRANJE PROCESA OBRADE REZANJEM PRIMENOM GENETSKIH ALGORITAMA .....	199
<b>Erić, M., Tadić, B., Mitrović, S.</b> MOGUĆI PRAVCI OSTVARIVANJA REINŽENJERINGA TEHNOLOŠKIH PROCESA MALIH PREDUZEĆA .....	203
<b>Sovilj, B., Brezočnik, M., Sovilj Nikić, I., Kovač, P.</b> MODELIRANJE FUNKCIJE POSTOJANOSTI ALATA PRIMENOM GENETSKOG ALGORITMA I PLANA EKSPERIMENTA PRI IZRADI PROFILA .....	207
<b>Drndarević, D., Petrović, S., Milivojević, M., Panić, S.</b> MODELOVANJE PROCESA METALURGIJE PRAHA POMOĆU NEURONSKIH MREŽA.....	211
<b>Jovanović, J., Đukić, R.</b> UPRAVLJANJE PROIZVODNIM PROCESIMA KORIŠĆENJEM APLIKATIVNOG SOFTVERA MS PROJECT.....	215
<b>Petrović, P., Jakovljević, Ž.</b> 3D DIGITALIZACIJA OBJEKATA KOMPLEKSNE GEOMETRIJE INTEGRACIJOM LASERSKOG TRIANGULACIONOG SENZORA I INDUSTRIJSKOG ROBOTA ( <i>Rad po pozivu / Invited Paper</i> ) .....	219
<b>Đukić, R., Bradić, Z., Jovanović, J., Stefanović, M.</b> PLANIRANJE PROIZVODNJE SLOŽENOG PROIZVODA.....	225
<b>Movrin, D., Skakun, P., Vilotić, D., Plančak, M., Maravić, I., Jovičić, R.</b> OPTIMIZACIJA PROCESA KOVANJA PNEUMATSKE STEZALJKE NUMERIČKOM SIMULACIJOM.....	229
<b>Jovišević, V., Jokanović, S., Borojević, S.</b> MODELIRANJE I SIMULACIJA PROIZVODNIH PROCESA PRIMJENOM PROGRAMSKOG SISTEMA TECNOMATIX PLANT SIMULATION .....	233
<b>Cvetković, S.</b> MODELIRANJE SISTEMA TOKOVA MATERIJALA .....	237
<b>Randelović, S., Milosavljević, P., Stanković, B.</b> SIMULACIJA PROCESA ISTISKIVANJA ALUMINIJUMA PRIMENOM FEM ADAPTIVNIH METODA ....	241
<b>Koreshkov, V., Kheifetz, M., Liakhovich, A., Tochilo, V.</b> COMBINED PROCESSING CONTROL ON THE BASIS OF STATISTIC AND STRUCTURAL ANALYSIS.....	245
<b>Brzaković, R., Marjanović, Z.</b> RAČUNARSKI SISTEMI ZA UPRAVLJANJE PROIZVODNOM.....	249

**SEKCIJA D / SECTION D:**

<b>Majstorović, V.</b> PRAKSA MENADŽMENTA KVALITETOM U SRBIJI - REZULTATI ISTRAŽIVANJA ( <i>Rad po pozivu / Invited Paper</i> ) .....	255
<b>Popović, B., Klarin, M., Veljković, Z.</b> PROCES POBOLJŠAVANJA- SISTEM ŠEST SIGMA .....	259
<b>Nuhodžić, S., Bulatović, M.</b> OŠTEĆENJA OSOVINSKIH LEŽAJA ŽELJEZNIČKOG VOZILA .....	263
<b>Jovanović, D., Nedić, B.</b> UTICAJ TEHNOLOGIJE IZRADE NA RADNE KARAKTERISTIKE MAŠINSKIH ELEMENATA .....	267
<b>Živković, P., Makragić, S.</b> RAZARANJA CENTRALNIH ZUPČANIK PLANETARNIH PRENOSNIKA SNAGE .....	271
<b>Stanković, B., Milosavljević, P., Randelović, S.</b> PRILOG UNAPREĐENJA PROCESA ODRŽAVANJA PRIMENOM METODE TPM U INDUSTRIJSKOJ ENERGANI .....	275
<b>Đuričić, M., Ačimović-Pavlović, Z., Milutinović, I., Nenadić, M.</b> NEUTRALISANJE I SAGOREVANJE OPASNOG MEDICINSKOG OTPADA- ZNAČAJNA ŠANSA ODRŽIVOG RAZVOJA.....	279
<b>Janjuš, Z., Petrović, A., Jovović, A., Ilić, P.</b> ПРИЈЕДЛОГ УПРАВЉАЊА ОТПАДНИМ ПАПИРОМ.....	283
<b>Đapić, M., Zeljković, V., Urošević, A., Senkijević, A., Đurić, A.</b> USKLAĐIVANJE MAŠINA ZA SEČENJE METALNIH OJAČANJA SA ZAHTEVIMA EVROPSKIH DIREKTIVA.....	287
<b>Marjanović, Z., Brzaković, R.</b> DIJAGNOSTIČKE METODE ZA ODRŽAVANJE IZOLACIJE ASINHRONOG MOTORA.....	291
<b>Milunović, S., Ječmenica, R.</b> METODA STRUKTURIRANJE FUNKCIJE KVALITETA (QFD) U PLANIRANJU KVALITETA PROIZVODA: TRADICIONALNI I FUZZY PRILAZ.....	295
<b>Vukićević, M.</b> STRUKTURA RADA UNIVERZITETSKIH NASTAVNIKA – TEHNIČKE NAUKE – .....	299
<b>Pavićević, Ž., Mićunović, J., Hamzić, D.</b> EVOLUCIJA EFEKTIVNOG SISTEMA MENADŽMENTA ZNANJA.....	303
<b>Pavićević, Ž., Mićunović, J., Hamzić, D.</b> PRELAZAK SA TRADICIONALNOG NA STRATEGIJSKO UPRAVLJANJE PROIZVODNIM SISTEMIMA.....	307
<b>Bračanović, Z.</b> KREIRANJEM ZNANJA FORMIRAMO TRŽIŠNO USMERENA PREDUZEĆA .....	311
<b>Romić, L.</b> PROCENA NOVČANIH TOKOVA PROJEKTA U MAŠINSTVU .....	315
<b>Milanović, D., Misita, M., Karić, M.</b> PRIMENA AHP METODE ZA IZBOR ERP REŠENJA.....	317
<b>Komadinić, V., Trgovčević, S.</b> PRILOG IZBORU SOFTVERA ZA UPRAVLJANJE ODRŽAVANJEM.....	321
<b>Mircheski, I., Sidorenko, S.</b> SYNCHRONIZATION OF FOUR BASIC ERGONOMIC PARAMETERS FOR THE DRIVER'S COMFORT IN VEHICLES .....	323
<b>Kheifetz, M., Kusakin, N., Prement, G.</b> TECHNOLOGICAL AND OPERATIONAL INHERITANCE OF PARAMETERS OF QUALITY AT RESTORATION OF DETAILS OF THE ENGINE.....	327
<b>Stefanović, M., Aleksandrović, S., Stanojević, M., Adamović, D.</b> EKOLOŠKI PRIHVATLJIVE TEHNOLOGIJE OBRADE METALA DEFORMISANJEM.....	331
<b>Avakumović, Č., Jović, N., Skorup, S.</b> EKONOMSKI ZNAČAJ UPRAVLJANJA KVALITETOM U MALIM I SREDNJIM METALOPRERAĐIVAČKIM PREDUZEĆIMA.....	335
<b>INDEX AUTORA / AUTHOR INDEX .....</b>	<b>341</b>



Тановић, Љ.

## МЕТАЛОПРЕРАЂИВАЧКА ИНДУСТРИЈА РЕПУБЛИКЕ СРБИЈЕ

**Резиме:** Сталан развој технологија производа, услуга и процеса постају императив компанија које усмеравају напоре како би обезбедиле опстанак, раст и развој. То подразумева да домаће компаније морају стварати производ који ће са ценом, квалитетом и роком испоруке бити конкурентан на тржишту. Наша привреда је недовољно конкурентна из више разлога: неефикасна приватизација друштвено-државног капитала, висока монополизација домаћег тржишта, неусклађеност пораста зарада са растом продуктивности рада и др.

У раду је приказана економска позиција индустрије Републике Србије и индустрија суседних земаља како оних које имају статус чланица ЕУ тако и оних које су потенцијални кандидати. Посебна пажња се посвећује металопрерађивачкој индустрији и проблемима са којима је она суочена.

Ради превазилажења постојећег индустријског тренда и бар донекле равномерног укључења у европске и светске токове неопходно је трансформисати индустрију која ће функционисати искључиво на бази знања. При томе треба указати на последице са којима је суочена индустрија Србије као и на промене које је неопходно спровести.

## METALWORKING INDUSTRY OF THE REPUBLIC OF SERBIA

**Abstract:** The permanently development of manufacturing technology, services and processes become imperative for companies focus efforts to ensure the survival, growth and development. This means that domestic companies must create a product that will be, with cost, quality and delivery period, competitive on the market. Our economy is insufficiently competitive for several reasons: inefficient privatization of the social-capital, high monopolized domestic market, mismatching the increase in earnings growth of increasing work productivity and others.

The paper presents the economic position of industry the Republic of Serbia and industry of neighboring countries that are members of the EU and those that are potential candidates. Special attention is devoted to metal industry and the problems that she faced.

In order to overcome the current industry trend and at least somewhat balanced involvement in the European and world trends, it is necessary to transform the industry that will work only on the basis of knowledge. It is necessary to point out the consequences of that industry as well as the changes necessary to implement.

### 1. УВОД

Карактеристике садашње светске и европске привреде могу се дефинисати кроз:

- (1) Глобализацију укупних робних и финансијских токова у свету уз концентрацију моћи глобалног одлучивања у неколико светских центара;
- (2) Либерализацију робних и капиталних токова на глобалној сцени под притисцима најмоћнијих светских економија, уз истовремено задржавање рестрикција за слободно кретање радне снаге;
- (3) Хармонизацију, координацију и регионализацију економских политика земаља чланица различитих економско-политичких групација као што су EU, ASEAN и сл.

Садашња привреда Србије функционише на бази неповољне економске структуре са оскудним ресурсима у домену технологија и финансија. Србија са својим бројем становништва и бруто домаћим производом није земаља значајног тржишта и економског потенцијала, посматрано на европском или светском нивоу. Оно што Србија мора и може, то је да битно побољша релативно неповољну позицију у односу на референтне земље у транзицији, поготову у односу на оне из Југоисточне Европе.

### 2. ЕКОНОМСКИ ИНДИКАТОРИ СРБИЈЕ И МЕЂУНАРОДНОГ ОКРУЖЕЊА

Анализирајући макроекономске показатеље активности Србије у 2008 години, мерене бруто домаћим

производом присутан је раст од 5.6% (2007.- 7.1 %) што је добар показатељ. Други показатељ је ниска стопа раста индустријске производње од 1.8% која је задржана на истом нивоу у односу на предходну годину. Трећи показатељ је висока стопа инфлације 6.8% (2007.- 10.1%) и четврти показатељ је висока стопа незапослености на нивоу од 18.8%, практично задржана на истом нивоу.

У структури БДП Републике Србије је учешће аграра је заступљено са 12.3%, индустрије 24.2% и сервисних услуга 63.5%, а то указује да заједно са БиХ имамо најнижи ниво учешћа индустрије од свих земаља транзиције.

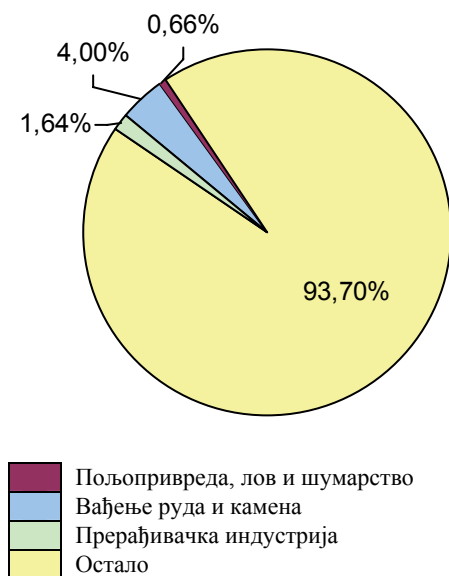
Померање структуре привредне активности од сектора пољопривреде преко сектора прерађивачке индустрије, ка сектору доминације услуга довешће до раста производње, запослености и животног стандарда. За нашу привреду је неприхватљив однос запослених у пољопривреди и индустрији што указује на томе да привреда Србије у садашњем тренутку није базирана на неопходно потребном знању.

Анализирајући биланс спољнотрговинске размене Републике Србије она бележи дефицит на нивоу од 12.1 милијарду \$, што је за око 23.6% више у односу на 2007.г. Негативан тренд је настављен и у 2009. години са оствареним мањим спољнотрговинским дефицитом на нивоу од 1.8 милијарди \$ у прва три месеца, што је последица светске економске кризе и пада привредних активности код нас.

Спољнотрговински дефицит је у порасту и он се покрива ино-дознакама, приходима од приватизације и

спољним задуживањима. Поред наведеног, као велики проблем се појављују мале greenfield стране инвестиције.

Када је реч о учешћу појединих привредних грана у извозу, прерађивачка индустрија обухвата 93.7% а у оквиру ње производња метала и металних производа



(а)

24.7%, производња осталих машина и уређаја 6.55% и производња саобраћајних средстава 3.37% (сл.1).

Целокупни извоз у делу пољопривреде, прехранбених производа, пића и дувана обухвата 19.5%, што је у односу на производњу метала и металних производа мање за око 5.2%.



(б)

Слика 1. Учешће појединих привредних делатности у структури извоза (а) и подсектори (б)

Уколико анализирамо извоз, у 2007 години, главни спољнотрговински партнери су земље из Европе са 96.5% (БиХ, Италија, Немачка, Македонија, Руска федерација и Словенија), Азија 1.6% и Америка 1.2%.

У увозу, у посматраном периоду земље из Европе су учествовале на нивоу 83.3% (Италија, Руска федерација, Немачка, Француска, Словенија), Азија 12.6% (Кина) и Америка 3.4%.

### 3. МЕТАЛОПРЕРАЂИВАЧКА ИНДУСТРИЈА

Сектор производње метала и металних производа остварио је покривеност увоза са извозом уз констатацију да су извезени производи предвиђени за даљу репродукцију, то јест углавном полуфабрикати што говори о недовољном степену финализације производа (сл. 2).

Производња челика и хладно обликованих профила у последњих пет година је повећала извозне резултате за нешто више од шест пута. Прерада алуминијума има извоз већи за око пет пута а производња и прерада бакра за око седам пута. Ово се објашњава повећањем обима производње и повољном ценом метала на светском тржишту.

Производња цистерни, резервоара и судова бележи раст извоза у последње три године и има суфицит у размени што се може објаснити присуством инвестиција у градњи али и отварањем нових производних заваривачких производних погона.

Када је реч о производњи алатних машина и алата резултати су алармантни. Производња машина се реализује у малом обиму а некадашњи гиганти ИЛР, Победа, Потисје, Мајевица, МИН и ЛЖТК постоје такоређи у траговима. Од алатне индустрије остали су ФРА са неизвесном позицијом и Корун у чијем производном програму учествује технологија из деведесетих година са бројем запослених у обе фирме око 600.

Производња трактора и пољопривредних машина у последњих пет година не бележи завидне резултате као ни очекивани раст производње а при томе су на домаће тржиште тржиште увезени трактори из Индије, Белорусије, Румуније и Кине. Позиција ИМТ, ИМП и осталих компанија из овог програма је обележена углавном неуспешним приватизацијама.

Аутомобилска индустрија, индустрија мотора и специјалних возила је суочена са великим проблемима у пословању. У току првих шест месеци 2008.г. произведено је 280 аутобуса од чега је извезено 100 да би затим дошло до прекида већ уговорених послова а као последица светске економске кризе. Позитиван помак је начињен у формирању заједничког предузећа Заставе и Фијата који ће обезбедити трансфер нових технологија на наше тржиште.

Предузећа данас искључиво зависе од примене науке, односно систематизованог знања и њиховог повезивања, тако да њихово повећање једино може подићи ниво конкурентности привреде.

### 4. ИНДУСТРИЈА ЗАСНОВАНА НА ЗНАЊУ

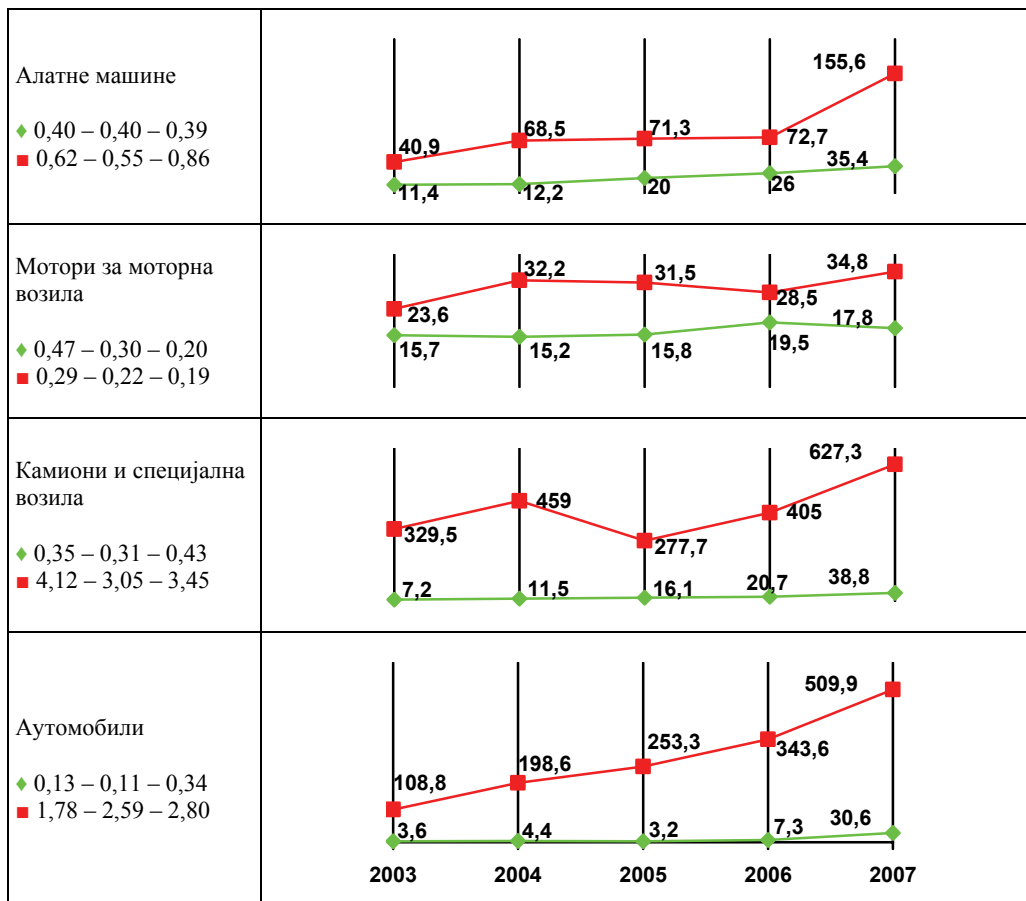
Република Србија бар за сада није трасирала стратегију привредног развоја а тиме ни стратегију образовања и технолошког развоја. Додатни проблем представља недовољна интегрисаност домаће економије (индустрије) у економско-финансијске токове (европску и светску привреду).

Стратегија развоја Србије у наредном периоду мора бити оријентисана ка уласку у круг земаља који свој развој креирају на знању, иновацијама и савременим технологијама.

Технолошки развој је кључна полуга економског раста и просперитета земље и повезана је са иновационом стратегијом земље и предузећа. Познато је да се иновациона стратегија предузећа у основи остварује са два приступа.

производња	ИЗВОЗ/УВОЗ																		
Производња челика и хладно обликовање профила ◆ 11,8 – 13 – 11,3 % ■ 2,4 – 3,05 – 3,85 %	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Period</th> <th>ИЗВОЗ</th> <th>УВОЗ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>6</td> <td>12,8</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>8,5</td> <td>22,6</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>15,5</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>50,5</td> <td>26</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>75</td> <td>33</td> </tr> </tbody> </table>	Period	ИЗВОЗ	УВОЗ	1	6	12,8	2	8,5	22,6	3	15,5	23	4	50,5	26	5	75	33
Period	ИЗВОЗ	УВОЗ																	
1	6	12,8																	
2	8,5	22,6																	
3	15,5	23																	
4	50,5	26																	
5	75	33																	
Прерада алуминијума ◆ 2,10 – 2,54 – 2,71 ■ 0,78 – 0,90 – 0,92	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Period</th> <th>ИЗВОЗ</th> <th>УВОЗ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>50</td> <td>53,3</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>86,8</td> <td>77,6</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>118</td> <td>83,2</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>164,3</td> <td>119,8</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>245</td> <td>167,9</td> </tr> </tbody> </table>	Period	ИЗВОЗ	УВОЗ	1	50	53,3	2	86,8	77,6	3	118	83,2	4	164,3	119,8	5	245	167,9
Period	ИЗВОЗ	УВОЗ																	
1	50	53,3																	
2	86,8	77,6																	
3	118	83,2																	
4	164,3	119,8																	
5	245	167,9																	
Производња и прерада бакра ◆ 3,20 – 4,44 – 5,36 ■ 1,45 – 1,18 – 1,52	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Period</th> <th>ИЗВОЗ</th> <th>УВОЗ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>58,7</td> <td>21</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>117,8</td> <td>28,2</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>228,4</td> <td>158,6</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>346,5</td> <td>156,4</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>404,8</td> <td>276,5</td> </tr> </tbody> </table>	Period	ИЗВОЗ	УВОЗ	1	58,7	21	2	117,8	28,2	3	228,4	158,6	4	346,5	156,4	5	404,8	276,5
Period	ИЗВОЗ	УВОЗ																	
1	58,7	21																	
2	117,8	28,2																	
3	228,4	158,6																	
4	346,5	156,4																	
5	404,8	276,5																	
Цистерне, резервоари, судови ◆ 0,25 – 0,78 – 0,83 ■ 0,07 – 0,20 – 0,19	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Period</th> <th>ИЗВОЗ</th> <th>УВОЗ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>6</td> <td>12,8</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>8,5</td> <td>22,6</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>15,5</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>50,5</td> <td>26</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>75</td> <td>33</td> </tr> </tbody> </table>	Period	ИЗВОЗ	УВОЗ	1	6	12,8	2	8,5	22,6	3	15,5	23	4	50,5	26	5	75	33
Period	ИЗВОЗ	УВОЗ																	
1	6	12,8																	
2	8,5	22,6																	
3	15,5	23																	
4	50,5	26																	
5	75	33																	
Алати ◆ 0,37 – 0,27 – 0,31 ■ 0,39 – 0,48 – 0,52	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Period</th> <th>ИЗВОЗ</th> <th>УВОЗ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>8,5</td> <td>31,6</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>12</td> <td>38,6</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>11,5</td> <td>45,5</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>18</td> <td>64</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>27,8</td> <td>95</td> </tr> </tbody> </table>	Period	ИЗВОЗ	УВОЗ	1	8,5	31,6	2	12	38,6	3	11,5	45,5	4	18	64	5	27,8	95
Period	ИЗВОЗ	УВОЗ																	
1	8,5	31,6																	
2	12	38,6																	
3	11,5	45,5																	
4	18	64																	
5	27,8	95																	
Лежајеви, зупчаници и сл. ◆ 0,44 – 0,40 – 0,42 ■ 0,32 – 0,35 – 0,34	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Period</th> <th>ИЗВОЗ</th> <th>УВОЗ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>10,8</td> <td>21,9</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>13,8</td> <td>35,9</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>35,6</td> <td>37,6</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>26</td> <td>47</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>38</td> <td>61,6</td> </tr> </tbody> </table>	Period	ИЗВОЗ	УВОЗ	1	10,8	21,9	2	13,8	35,9	3	35,6	37,6	4	26	47	5	38	61,6
Period	ИЗВОЗ	УВОЗ																	
1	10,8	21,9																	
2	13,8	35,9																	
3	35,6	37,6																	
4	26	47																	
5	38	61,6																	
Трактори ◆ 0,32 – 0,15 – 0,12 ■ 0,33 – 0,27 – 0,26	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Period</th> <th>ИЗВОЗ</th> <th>УВОЗ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>16,8</td> <td>15,7</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>10,9</td> <td>36,9</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>16,9</td> <td>25,4</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>11,8</td> <td>35,6</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>10,6</td> <td>46,4</td> </tr> </tbody> </table>	Period	ИЗВОЗ	УВОЗ	1	16,8	15,7	2	10,9	36,9	3	16,9	25,4	4	11,8	35,6	5	10,6	46,4
Period	ИЗВОЗ	УВОЗ																	
1	16,8	15,7																	
2	10,9	36,9																	
3	16,9	25,4																	
4	11,8	35,6																	
5	10,6	46,4																	





Слика 2. Извоз/увоз производа металопрерађивачке индустрије

Данас нема ниједне европски развијене земље света која нема своју политику или стратегију подстицања економије засноване на знању. Предузећа данас све више зависе од примењене науке, односно систематизованог знања и његовог повезаног деловања. Индустрија заснована на знању подразумева трансформацију металопрерађивачке и других индустрија која ће обухватити нов концепт и последице које ће проистећи из промена.

Примена економије засновање на знању захтева неопходне промене које се огледају у процесима:

- Модерног образовања и перманентног усавршавања у областима које су атрактивне у окружењу: информационе и телекомуникационе технологије, биомедицина и биотехнологије, наноматеријали, нови материјали, нова енергија и екологија;
- Обезбеђење неопходних средстава за истраживање и развој, посебно улагања у модерне технологије
- Обезбеђења степена заштите власничких права и посебно интелектуалне својине.;
- Повезивање са међународним економским и технолошким мрежама;
- Веће отварање према светској привреди које доноси размену знања.

При томе треба указати на последице са којима је суочена привреда републике Србије које се дефинишу кроз:

- Структуру буџетских прихода, односно чињеницу да је готово занемарљиво присуство greenfield инвестиција у односу на приватизацију постојећих предузећа а и недовољни прилив СДИ;
- Приходима од приватизације се назире крај;

- Издаци за образовање су на нивоу 3.5% БДП а за заштиту животне средине 0.3% БДП, што је скоро дупло мање од европског просека;
- Експанзија увоза и даље продубљава трговински и платни дефицит због високе домаће потрошње и недовољне конкурентности српске привреде .

## 5. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Deming W.E., Out of the Crisis, Deming Institute, Washington, 1986
- [2] Drucker P.F., Managing for the Future, Truman Talley Books, New York, 1992
- [3] Народна банка Србије, Македоније, БиХ, Словеније, Хрватске
- [4] Републички завод за статистику
- [5] Тановић Љ, Бојанић П., Индустрија прераде метала Републике Србије – неопходне промене, Трансфер технологије за европску Србију, Зборник радова, Машински факултет, Београд, 2005, 196-202
- [6] Тановић Љ., Привреда Републике Србије – стање и перспектива, 32. ЈУПИТЕР конференција, Златибор, 2006, ТФ1-ТФ6
- [7] Тановић Љ., Одрживост индустрије Републике Србије, 34. ЈУПИТЕР конференција, Београд, 2008, ТФ1.1-ТФ1.5
- [8] Танович Л., СОХРАНЕНИЕ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕСПУБЛИКИ СЕРБИИ В ЕВРОПЕЙСКИХ РАМКАХ, Progressive Equipment and Technology 2008, Kiev, 2008, pp. 71-78
- [9] [www.odrzivi-razvoj.sr.gov.yu](http://www.odrzivi-razvoj.sr.gov.yu)

**Аутор:** Проф. др Љубодраг Тановић, Универзитет у Београду – Машински факултет, Краљице Марије 16, 11120 Београд 35, ltanovic@mas.bg.ac.rs



Stamenković, D., Bojović, B., Miljković, Z., Babić, B., Kojić, D.

## TEHNOLOGIJA MAŠINSKE OBRADNE I BIOKOMPATIBILNOST POLIMERA

**Rezime:** Kontaktno sočivo mora da obezbedi: odgovarajuću optičku moć izraženu u dioptrijama, udobnost nošenja, prolaz kiseonika do rožnjače u dovoljnoj meri i dobro ovlaživanje između sočiva i suza što sprečava da sočivo ne padne sa rožnjače, tj. odgovarajuću adhezivnu silu. Izborom adekvatnog biopolimera postiže se zadovoljavajući prolaz kiseonika i vlaženje. Dobrom konstrukcijom se ostvaruje biokompatibilnost kontaktnog sočiva u smislu najboljeg naleganja. Takođe se postiže i najbolja optička moć. Kvalitet obrađene površine predstavljen površinskom hrapavošću, utiče ne samo na udobnost nošenja, stvaranje proteinskih i lipidnih naslaga, već i na ostvarenje adhezivne sile, kojom se sočivo održava na rožnjači.

**Ključne reči:** biokompatibilnost, tehnologija mašinske obrade, tehnologija površina, kontaktna sočiva

## MANUFACTURING TECHNOLOGY AND POLIMER BIOCOMPATIBILITY

**Abstract:** Contact lens has to provide following: proper optical power expressed in diopters, wearing comfort, passing sufficient amount of oxygen to cornea and good wettability between lens and tears that prevents lens to fall of cornea (suitable adhesion force). By choosing adequate biopolymer we reach satisfactory passing of oxygen and wettability. Good design provides biocompatibility of contact lens in sense of best fit. It also provides best optical power. Quality of manufactured surface represented by surface roughness effects not only comfort of wear, formation of protein and lipid debris, but also it effects adhesion force that keep lens on cornea.

**Key words:** biocompatibility, manufacturing technology, surface technology, contact lenses

### 1. UVOD

Tehnologija materijala, tehnologija mašinske obrade i tehnologija površina učestvuju u stvaranju kontaktnog sočiva, kao jednog od najpopularnijih sredstava za korekciju vida. Hemijski sastav i struktura polimera predstavljaju osnovu tehnologije materijala, obradni proces osnovu tehnologije mašinske obrade, a hrapavost osnovu tehnologije površina. Radi što bolje biokompatibilnosti kontaktnog sočiva, potrebno je ostvariti napredak u tehnologijama mašinske obrade i tehnologiji površina.

Obradom priprema od biopolimera, preuzimaju se sva svojstva zagarantovana od strane isporučioaca. Uloga proizvođača kontaktnih sočiva, nije samo u obezbeđenju geometrije za zahtevane optičke parametre, koja je patentiranim konstrukcijom preporučena, već i u postizanju što boljeg kvaliteta obrađene površine. Kvalitet obrađene površine predstavljen površinskom hrapavošću, u konkretnom slučaju, utiče ne samo na udobnost nošenja, stvaranje proteinskih i lipidnih naslaga, već i na ostvarenje adhezivne sile, kojom se sočivo održava na oku. Utvrđivanje parametra hrapavosti je korisno i radi određivanja optimalnih vrednosti režima završne obrade, pri kojima se postiže adekvatna adhezija.

U ovom radu se razmatraju mogućnosti poboljšanja biokompatibilnosti, kroz aspekt mašinske obrade, radi boljeg naleganja kontaktnih sočiva na rožnjaču, kao i postizanjem adekvatne adhezivne sile kojom se obezbeđuje prijanjanje istog.

### 2. POSTAVKA PROBLEMA

Kontaktne sočiva su optički elementi koji se koriste za korekciju refrakcionih anomalija oka [1]: miopije (kratkovidosti), hipermetropije (dalekovidosti), astigmatizma, prezbiopije (staračke dalekovidosti), afakije i dr. Uloga kontaktnog sočiva je da na odgovarajući način skrene (konvergira ili divergira) svetlosne snopove i time omogućiti formiranje lika na makuli (žutoj mrlji). Mera tog skretanja se definiše kao optička moć. Kontaktne sočivo se postavlja na rožnjaču i mora da obezbedi:

- odgovarajuću optičku moć izraženu u dioptrijama,
- udobnost nošenja,
- prolaz kiseonika i hranljivih materija do rožnjače u dovoljnoj meri i
- dobro ovlaživanje između sočiva i suza što sprečava da sočivo ne padne sa rožnjače, tj. odgovarajuću adhezivnu silu.

Većina ljudske populacije (oko 80%) ima osno simetričnu rožnjaču složene geometrije: u centralnoj optičkoj zoni ona je najbliža sferi tj. *elipsa prolata* (sa koeficijentom ekscentričnosti  $p \approx 0.8$ ). Ka periferiji, ona je sve ravnija i ima oblik parabole ili hiperbole. Preostalih 20% populacije ima tzv. "astigmatsku rožnjaču" (oblik kašike za supu, lopte za ragbi, ...). U jednom meridijanu, najčešće vertikalnom, rožnjača je najstrmija (najviše zakrivljena), a u horizontalnom najblaža (najmanje zakrivljena), što je na slici 1. prikazano. Konstrukcija sočiva mora da obezbedi što bolje naleganje na rožnjaču.

Rožnjača nije prokrvljena i snabdeva se kiseonikom isključivo preko vazduha. Stoga, materijal kontaktnih sočiva mora biti biokompatibilan u smislu propuštanja kiseonika.

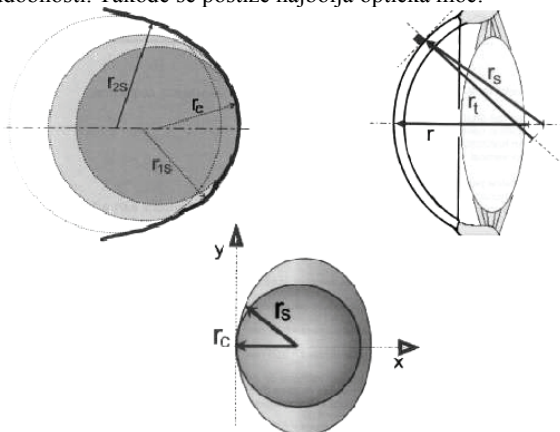


Slika 1. Oblik "astigmatske rožnjače" [2]

### 3. KONSTRUKCIJA KONTAKTNIH SOČIVA

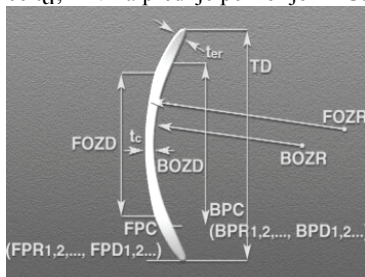
Na slici 2. je predstavljeno oko sa karakterističnim poluprečnicima, koji se moraju uzeti u obzir prilikom dizajniranja sočiva u cilju što boljeg "fitovanja" predstavljenog punom linijom. Dobrom konstrukcijom (dizajnom) se ostvaruje biokompatibilnost kontaktnog

sočiva u smislu najboljeg naleganja, a samim tim i udobnosti. Takođe se postiže najbolja optička moć.



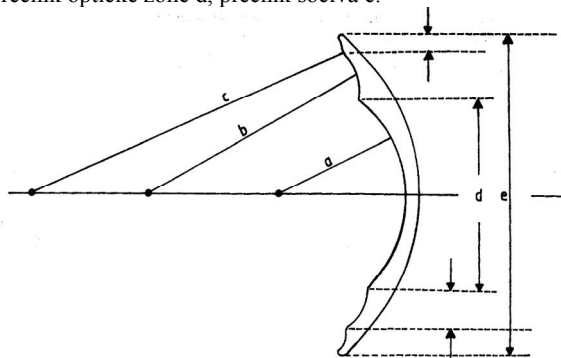
Slika 2. Oko sa karakterističnim veličinama [3]

U konstrukciji kontaktnog sočiva razlikujemo prednju (frontalnu) površinu, koja definiše optičku snagu sočiva (dioptriju) i zadnju (baznu) površinu, koja naleže (fituje) na rožnjaču. Potrebno je da sočivo ima tanku i zaobljenu ivicu zbog interakcije sa očnim kaptcima, čime se poboljšava udobnost nošenja. Sve ovo čini konstrukciju kontaktnog sočiva dosta složenom. Pod konstrukcijom se podrazumeva određivanje karakterističnih mera, zadatih na slici 3. To su: prečnik sočiva **TD**, poluprečnika zadnje optičke zone **BOZR**, prečnik zadnje optičke zone **BOZD**, krivina zadnje periferije **BPC**, centralna debljina  $t_c$ , poluprečnik prednje optičke zone **FOZR**, prečnik prednje optičke zone **FOZD**, debljina ivice  $t_{er}$ , krivina prednje periferije **FPC**.



Slika 3. Konstrukcija kontaktnog sočiva [2]

Referentni konstruktori i proizvođači kontaktnih sočiva preporučuju različit dizajn: sferni, asferični, torični, progresivni, progresivno torični. Za fitovanje osno simetričnih rožnjača koriste se višekrivinska sferična ili asferična kontaktna sočiva. Njihova optička zona je najčešće sfera ili elipsa, a periferija se sastoji od više sferičnih ili asferičnih površi progresivno sve ravnijih (manje zakrivljenih). Na slici 4. je prikazano sočivo sa tri krivine: poluprečnik bazne krivine  $a$ , poluprečnik intermedijalne krivine  $b$ , poluprečnik perifernog krivine  $c$ , prečnik optičke zone  $d$ , prečnik sočiva  $e$ .



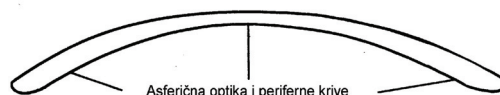
Slika 4. Konstrukcija sferičnih sočiva [4]

Za fitovanje astigmatičkih rožnjača koriste se tzv. torična kontaktna sočiva. To su sočiva čija je, najčešće bazna, a ponekad i frontalna površina, astigmatička. Za korekciju prezbiopije u kombinaciji sa miopijom, hipermetropijom ili astigmatizmom, koriste se progresivne ili progresivno torične geometrije. Kod takvih kontaktnih sočiva, najčešće je frontalna površina definisana kao složena kombinacija asferičnih (koničnih) površi različitih koeficijenata ekscentričnosti.

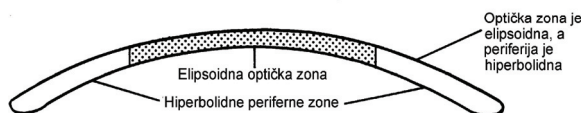
Zavisno od dizajna, ali i tipa kontaktnog sočiva (meka, gas-propusna RGP ili tvrda PMMA), dimenzije mogu biti:

- bazni poluprečnik od 5-10 mm (korak 0.05mm)
- prečnik od 8-15 mm (korak 0.1mm)
- debljina u centru od 0.1-1 mm (korak 0.05mm)

Realizovati navedena konstrukciona rešenja je izazov koji stoji pred tehnologijom mašinske obrade kontaktnih sočiva.



Boston Envision dizajn



Slika 5. Konstrukcija asferičnih sočiva [4]

#### 4. MATERIJALI ZA IZRADU KONTAKTNIH SOČIVA

Kontaktne sočiva se izrađuju od biopolimera različitog sastava. Biopolimere proizvode kompanije: CONTAMAC, VISTA (UK) i POLYMER TECHNOLOGY, BENZ, PARAGON (USA) i dr. Pripremak (slika 6) se nabavlja u obliku cilindra dimenzija  $\varnothing 12.8 \times 5.5$  mm u više različitih boja.



Slika 6. Pripremaci za kontaktna sočiva [2]

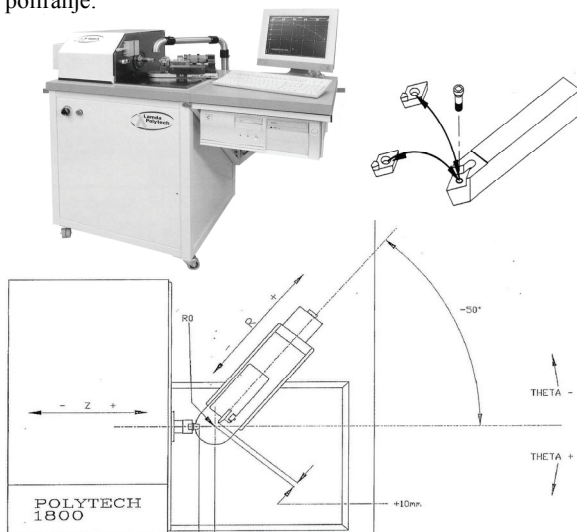
Tvrda kontaktna sočiva se izrađuju od poli-metil-meta akrilata (PMMA). To su materijali koji ne propuštaju kiseonik. Gas-propusna kontaktna sočiva se proizvode od sledećih materijala: silikon akrilata, fluoro-silikon akrilata, fleksibilnih fluoropolimera i silikon elastomera. Osnovni parametri ovih materijala su definisani kao: propustljivost za kiseonik (Dk-broj) transmisivnost za kiseonik (Dk/L), ugao vlaženja, tvrdoća i modul elastičnosti. Meka (hidrofilna) kontaktna sočiva se proizvode od sledećih materijala: 2-hidroksil-etil metakrilata (HEMA), N-vinil pirolidona (NVP) i glicerol metakrilata (GMA). U fazi mašinske obrade (rezanjem) ovo su čvrsti materijali koji, posle hidratacije u fiziološkom rastvoru, postaju meka kontaktna sočiva. Osnovne karakteristike i kvalitet mekih kontaktnih sočiva direktno zavise od stepena hidrofilnosti materijala, odnosno od sadržaja vode u sočivu koji se kreće od 25% do 80%. Propustljivost za kiseonik mekih kontaktnih sočiva (Dk) određen je sadržajem vode u sočivu i debljinom mekog sočiva (L).

Svojstvima zagarantovanim od strane proizvođača postiže se određena biokompatibilnost u smislu očuvanja zdravlja rožnjače i udobnosti nošenja sočiva.

## 5. MAŠINSKA OBRADA KONTAKTNIH SOČIVA

### 5.1 Obradni sistem

Kontaktna sočiva se obrađuju na CNC dvoosnim ili troosnim strugovima dvostranim rezanjem dijamantskim alatima. U ovom radu biće predstavljen troosni CNC strug POLITECH 1800 Aspheric - Toric proizvođača LAMDA POLITECH iz Engleske, prikazan na slici 7. Ovo je kompjuterski upravljani strug, visoke tačnosti, sa aero pinolom i zatvorenim sistemom upravljanja translatorskim (linearnim) i obrtnim osama. Strug koristi DC servo motor, sub-mikronske rezolucije i glavno vreteno sa aerostatičkim ležištima i vakuumskim priborom za pripremak na svom kraju, za rezanje složenih oblika kontaktnih sočiva uz visok kvalitet obrađene površine koja zahteva minimalno poliranje.



Slika 7. CNC strug POLITECH 1800 Aspheric – Toric sa radnim prostorom [5]

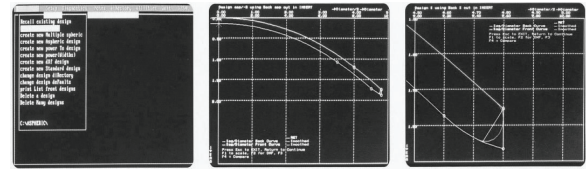
Specifikacija troosnog CNC struga POLITECH 1800 Aspheric – Toric:

- R osa: 50mm radnog hoda; DC servo motor sa enkoderom; rezolucija 0.02 $\mu$ m
- Z osa: 70mm radnog hoda; DC servo motor sa enkoderom; rezolucija 0.1 $\mu$ m
- Teta osa: 185° radnog ugla; DC servo motor sa enkoderom; rezolucija 0.00045° (1.62'')
- Napajanje: 6A, 220-240V; 50-60Hz
- Vreteno sa mogućim brojem obrta: 0, 6500, 8000, 9500 i 11000°/min. Neophodan je komprimovani vazduh od minimalno 8.5m<sup>3</sup>/h, na 7.5bar sa hlađenjem vazduha i filterom, sa rezervoarom od 1.500l vazduha. Filteri su postavljeni u dva nivoa. Prvi je za otklanjanje čestica prašine većih od 25 $\mu$ m, a drugi za otklanjanje sub-mikronskih čestica 0.01 $\mu$ m. Vazduh mora biti suv. Zato se primenjuje hladnjak (na 1-2°C) pri čemu se sva vlaga iz vazduha pretvara u tečnost, a zatim drenira.
- Radna sredina: 20-22°C, 40-50% relativne vlažnosti
- Veličina i masa: 1220mm x 730mm x 1200mm; 272 kg

Za rezanje se koriste dijamantski alati za generisanje sferičnih i/ili asferičnih baznih i frontalnih površina na hidrofilnim, gas-propusnim kontaktnim i intraokularnim sočivima. Koristi se "insert" sistem gde se vrši zamena ili oštrenje samo dijamantskog vrha.

Specijalni softver (slika 8.), pridružen upravljačkoj jedinici struga, omogućava fleksibilnost obrade sočiva i obezbeđuje upravljanje obradom optičkih i perifernih zona kod sferičnih i kod asferičnih sočiva. On takođe olakšava

profilisanje ivice, realizaciju tzv. "ski" ivice i redukciju ivice.



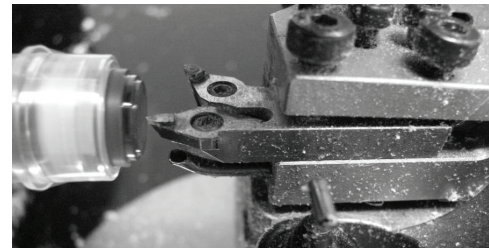
Slika 8. Ekranski prikaz softvera, geometrija kontaktnog sočiva, izgled ivice [5]

### 5.2 Parametri obrade

Rezanje kontaktnih sočiva (tvrdih i mekih) obavlja se u više faza: rezanjem bazne površine, rezanjem ivice i rezanjem frontalne površine (slika 9.). Pri rezanju frontalne i bazne površine, predobrada (gruba obrada) se vrši nožem sa dijamantskim vrhom čiji je poluprečnik zaobljenja vrha alata  $r=0.5$ mm. Završna, fina obrada, se vrši nožem čiji je poluprečnik zaobljenja vrha alata  $r=0.2$ mm. Tokom rezanja strugotina se uklanja usisivačem.

Vrednosti elemenata režima obrade su:

- Gruba obrada: dubina rezanja  $a=0.2\pm 0.4$ mm, ugaona brzina 6°/s, broj obrta  $n=6500\div 8000$ °/min
- Fina obrada: dubina rezanja  $a=0.03\pm 0.06$ mm, ugaona brzina 2°/s, broj obrta  $n=8000\div 9500$ °/min
- Obrada ivice: po režimu grube obrade reže se nožem poluprečnika zaobljenja vrha alata  $r=0.2$ mm.



Slika 9. Obrada sočiva rezanjem [6]

### 5.3 Poliranje

Poliranje bazne i frontalne površine, kao i ivice, vrši se na polir mašinama sa više vretena (slika 10.), fiber krpicom postavljenom na odgovarajuće alate od kaučuka. Kao sredstvo za poliranje koristi se pasta i to: za gas-propusna kontaktna sočiva aluminijum oksid rastvoren u vodi granulacije 0.3 $\div$ 0.5 $\mu$ m; za meka kontaktna sočiva aluminijum oksid rastvoren u petroleju granulacije 0.3 $\div$ 0.5 $\mu$ m. Vreme poliranja je 20 $\div$ 30s, a broj obrta vretena je 80 $\div$ 100°/min.



Slika 10. Viševretene mašine za poliranje [6]

### 5.4 Završna kontrola

Tokom završne kontrole proverava se najpre kompletna geometrija sočiva: bazni i frontalni poluprečnici na uređaju pod nazivom radijuskop (slika 11-gore levo), debljina u



centru, prečnik, debljina i oblik ivice na šedografu (slika 11-gore desno). Zatim se kontroliše optička snaga na fokometru (slika 11-dole levo). Na kraju se vrši parna sterilizacija sočiva (slika 11-dole desno).

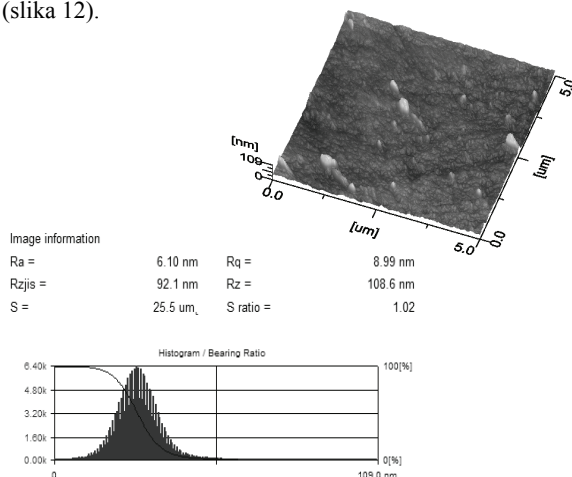


Slika 11. Radijuskop (gore levo), fokometar (gore desno), šedograf (dole levo) i parna sterilizacija sočiva (dole desno)

## 6.0 FRAKTALNA ANALIZA HRAPAVOSTI

Kvalitet obradene površine kontaktnog sočiva utiče na udobnost nošenja, te bi tako posmatrano biokompatibilna površina trebala da bude glatka. Ipak previše ispolirana površina nije dobra jer ne obezbeđuje dovoljno prijanjanje sočiva uz rožnjaču, s obzirom da intenzitet adhezije sile zavisi od hrapavosti površine. Ostvarenje biokompatibilnosti podrazumeva istovremeno zadovoljavanje oba zahteva: da površina bude glatka i da se dobro prilagođava rožnjači. Prilikom izrade sočiva poštuje se preporučeno vreme poliranja u okviru intervala. Postizanje adekvatne hrapavosti je, uglavnom, stvar iskustva.

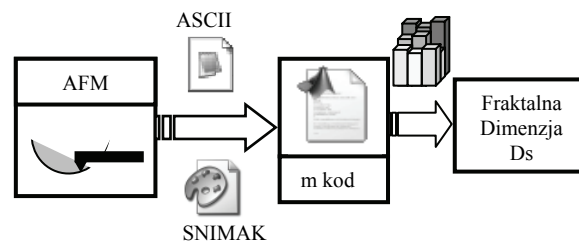
Konvencionalnom analizom se dobijaju standardni parametri hrapavosti, kojima se može kvantifikovati stanje površine, ali ne i predvideti njeno funkcionalno ponašanje (slika 12).



Slika 12. AFM snimak hrapave površine sočiva i standardni parametri hrapavosti

Fraktalnom analizom obradene površine moguće je utvrditi optimalno trajanje poliranja na osnovu fraktalne dimenzije snimka površine kontaktnog sočiva, koja je alternativna mera hrapavosti. Skenirajućom mikroskopijom primenom atomskih sila hrapava površina može se snimiti,

a zatim obraditi u Matlab-u. Navedeno podrazumeva primenu modifikovanog metoda "neboda" (slika 13) za koji je razvijen čitav niz procedura, prikazanih u [7].



Slika 13. Metodologija određivanja fraktalne dimenzije hrapave površine

Na ovaj način sračunata fraktalna dimenzija se može primeniti za karakterizaciju i komparaciju obradene površine, ali i za pojašnjenje njene funkcionalnosti. Od ranije je poznata činjenica da je optimalna vrednost fraktalne dimenzije u pogledu funkcionalnog ponašanja 2.5. Stoga će, inženjerska površina čija je vrednost fraktalne dimenzije bliska 2.5 pokazati najbolja adhezionna svojstva.

## 7.0 ZAKLJUČAK

U ovom radu se posebno ističe tehnologija mašinske obrade biopolimera na primeru kontaktnih sočiva. Opisani su: konstruktivno rešenje, koje obezbeđuje dobro naleganje sočiva na rožnjaču; svojstva biopolimera, koja pružaju dobro vlaženje površina suzama i propusnost kiseonika; obrada rezanjem kojom se generiše projektovani oblik, ali i postiže dobar kvalitet obradene površine; analiza hrapavosti obradene površine od koje zavisi prilagođavanje sočiva rožnjači. Pokazano je kako tehnologije materijala, obrade i površina, uz dobro konstruktivno rešenje, dodatno unapređuju biokompatibilnost okularnih pomagala.

## LITERATURA

- [1] Parunović, A., *Upoznajte svoje oči*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1997.
- [2] Fitting GP lenses, Institute for eye research, Polymer Technology, 2001.
- [3] Barthelemy, B., Thiebaut T., *Contactologie*, Lavoisier, 2004.
- [4] Parunović, A., Cvetković, D. i dr., *Korekcija refrakcionih anomalija oka*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1995.
- [5] Instruction manual for Polytech 1800A aspheric toric lathe, Lamda Polytech UK, 1992.
- [6] Stamenković D., Interna prezentacija, Optix d.o.o. Zemun, 2006.
- [7] Bojović, B., Miljković, Z., Babić, B., Fractal analysis of AFM images of worn-out contact lens inner surface, FME Transactions 36 /4 (2008) 175-180

*Autori:* mr Dragomir Stamenković, dipl.maš.inž., direktor d.o.o OPTIX, Oračka 13. 11080 Zemun, 011/3163302, e-mail: [dstamenkovic@optix.com](mailto:dstamenkovic@optix.com);

mr Božica Bojović asistent, dr Zoran Miljković vanredni profesor, dr Bojan Babić, redovni profesor, Katedra za proizvodno mašinstvo, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16. 11120 Beograd 35, 011/3302236, e-mail: [bbojovic@mas.bg.ac.rs](mailto:bbojovic@mas.bg.ac.rs), [zmiljkovic@mas.bg.ac.rs](mailto:zmiljkovic@mas.bg.ac.rs), [bbabic@mas.bg.ac.rs](mailto:bbabic@mas.bg.ac.rs); Dušan Kojić, dipl. maš. inž., Nanolab, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16. 11120 Beograd 35, 011/3370384, e-mail: [dkojic@mas.bg.ac.rs](mailto:dkojic@mas.bg.ac.rs)

Sovilj- Nikić I., Radonjić S., Sovilj B., Deljanin Lj.

## ANALIZA EKSPLOATACIONIH KARAKTERISTIKA PROFILNIH ALATA ZA OZUBLJENJE U INDUSTRIJI IMK "14.OKTOBAR"

*Reime: U radu je data analiza primene profilnih modulnih glodala za ozubljenje u fabrici "14.oktobar" Kruševac. Kroz praktični primer date su eksploatacione karakteristike odvalnih glodala u procesima ozubljenja. Date su karakteristike alata: proizvođač, geometrija, materijal alata i oštrenje alata, kao i karakteristike obradaka: materijal, dimenzije, složenost, kvalitet izrade i veličina serije.*

*Gljučne reči: profilna modulna glodala, ozubljenje, eksploatacija alata, oštrenje alata.*

## ANALYSIS OF THE EXPLOITATION CHARACTERISTICS OF PROFILED SERRATION TOOLS IN THE COMPANY '14. OKTOBAR'

*Summary: In this paper the analysis of profiled gear milling cutters for serration in the company '14. Oktobar', Kruševac is given. Some characteristics of exploitation of gear hobs involved in the serration processes have been demonstrated through the practical example.*

*The paper includes some tool-related issues, i.e. producer, geometry, tool materials and tool sharpening as well as workpiece-related ones, i.e. material, dimensions, complexity, quality of manufacture and scale of production.*

*Key words: profiled gear milling cutters, serration, tool exploitation, tool sharpening.*

### 1. UVOD

Velika ekonomska kriza koja danas vlada nemilosrdno uzima danak u svim oblastima života pa i u industijama različitih profila, gde spada i IMK "14. oktobar". Bez obzira na teško ekonomsko stanje čine se veliki napor da se zadrži rejting ovog giganta, kao najvećeg proizvođača građevinskih mašina na Balkanu.

U ratnim i posleratnim godinama proizvodnja zupčanika je više nego prepolovljena. Fabrika je bila bombardovana u svojim vitalnim delovima, što je uslovlilo proizvodnju samo neophodnih mašinskih delova. Međutim, neke pozicije, što se tiče proizvodnje zupčanika u 2006. i u 2007. godini imale su maksimalan proizveden broj jer se radilo o većem izvoznom poslu.

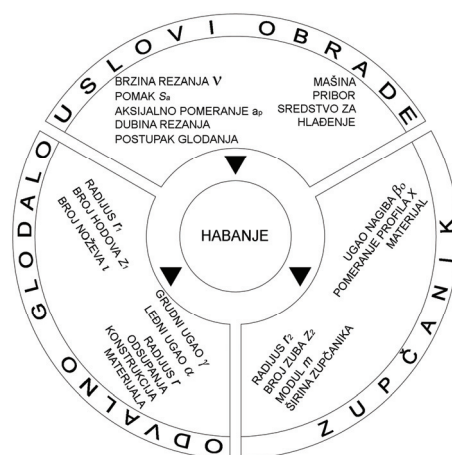
U sektoru "Transmisija" koji čini okosnicu tehničko-tehnoloških mogućnosti fabrike komponenata i cele IMK "14. oktobar" u delu mašinske obrade, termičke obrade i galvansko-hemijske površinske zaštite nalazi se proizvodnja zupčanika.

### 2. TEHNOLOŠKE KARAKTERISTIKE MAŠINE ZA OZUBLJENJE, EKSPLOATACIONE KARAKTERISTIKE ODVALNOG GLODALA I ZUPČANIK

Odvalno glodanje, kao jedan od najsloženijih procesa obrade rezanjem, nalazi najširu primenu pri obradi ozubljenja cilindričnih zupčanika zahvaljujući visokoj proizvodnosti procesa. Komplikovane kinematske i geometrijske veze između odvalnog glodala i obratka stvaraju niz teškoća i problema, koji sprečavaju optimalno korišćenje alata i mašine, kao na primer: određivanje optimalne brzine rezanja i pomaka, utvrđivanje racionalne postojanosti odvalnog glodala, maksimalno i ravnomerno korišćenje što većeg broja zuba alata, utvrđivanje što produktivnije geometrije odvalnog glodala itd. [1].

Unapređenje procesa odvalnog glodanja značajno je i korisno kako za proizvođače zupčanika, tako i za proizvođače odvalnih glodala. Zbog komplikovanosti procesa, visoke vrednosti zupčanika, a osobito alata istraživanja podloga za optimizaciju procesa odvalnog glodanja i optimizaciju geometrijskih parametara zahtevaju znatna finansijska sredstva i značajne napore istraživača. Postoje mnogobrojni faktori koji utiču na proces odvalnog glodanja. Mnogobrojni faktori, kao i njihovi međusobni uticaji čine proces habanja teškim za proučavanje.

Na slici 1. prikazani su faktori koji utiču na habanje tokom procesa odvalnog glodanja.



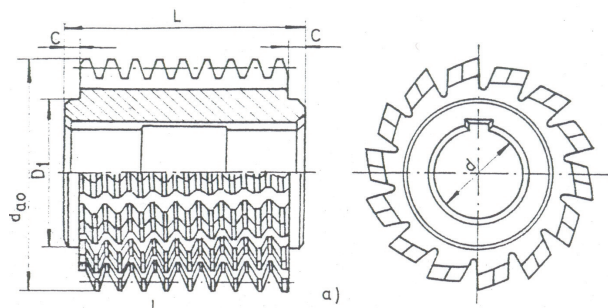
Slika 1. Veličine koje utiču na habanje

Proces odvalnog glodanja je jedna od najznačajnijih karika u lancu mehaničke obrade jer od njega u velikoj meri zavisi produktivnost, završna geometrijska tačnost i kvalitet površine ozubljenja. Razvojem tehnologije odvalnog glodanja, odvalno glodanje se uspešno primenjuje kako u gruboj obradi, tako i u završnoj obradi ozubljenja. Zbog toga je porastao zahtev za optimizaciju procesa, kako sa stanovišta

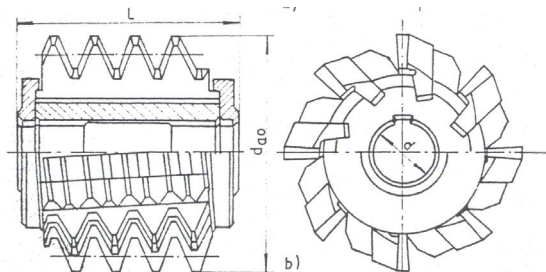
kvaliteta površine, tako i sa stanovišta produktivnosti. Preduslov za uspešnu optimizaciju i adaptivno upravljanje procesom jeste njegova identifikacija, odnosno identifikacija pojava nastalih pri odvalnom glodanju. Zato istraživačka aktivnost na ovom polju razvija pored novih odvalnih glodala i tehnoloških poboljšanja na mašinama i potpuno nove identifikacione metode za verodostojan opis procesa i pojava nastalih pri odvalnom glodanju [6].

Odvalna glodala se upotrebljavaju za izradu ozubljenja zupčanika sa pravim, kosim i zavojnim zubima kao i za izradu pužastih točkova za spoljnje sprezanje sa evolentnim profilom (Slika 2).

Odvalna glodala se najčešće izrađuju kao jednodarna naročito ako se koriste za završnu obradu. Za grubu i prethodnu obradu izrađuju se sa dva ili više hodova, zbog brže i kraće obrade. Prave se do modula 5,5mm iz jednog komada, (6 – 15)mm bilo iz jednog dela ili sa umetnutim zubima, a od modula 16mm najracijonalnija je izrada sa umetnutim zubima (slici 3.). U poslednje vreme izrađuju se odvalna glodala sa umetnutim zubima i za manje vrednosti modula.



Slika 2. Integralno odvalno glodalo



Slika 3. Odvalno glodalo sa umetnutim zubima

Konstrukcija odvalnog glodala sa umetnutim zubima omogućava uštedu u troškovima materijala preko 50%, postojanost alata je veća za preko 60%, smanjenje troškova ozubljenja za preko 25%, a proizvodnost procesa povećana za 1,5 puta u odnosu na integralna odvalna glodala.

Za ozubljenje i ožljebljenje se koriste sledeće mašine i alati:

Odvalne glodalice za izradu cilindričnih zupčanika sa pravim i kosim zupcima:

- modul zuba min. 0,75 mm, max. 20 mm,
- prečnik zupčanika min. Ø30 mm, max. Ø630 mm,
- širina zuba max. 600 mm,
- kvalitet izrade: IT 8.

Alati za obradu rezanjem:

- odvalna glodala (DIN 8002, DIN 858, ...) za prave i kose zube zupčanika;
- modulna pločasta glodala (G500) za prave i kose zube zupčanika;
- odvalna glodala za lančanike (DIN 2315);

- pločasta glodala za lančanike (DIN 8198),
- odvalna glodala za ožljebljena vratila sa bradicom i bez bradice (G 580, G 581, G 582, G 583);
- odvalna glodala sa i bez drške za izradu pužnih zupčanika (točkova).

Najčešće korišćen materijal za izradu odvalnih glodala su brzorezni čelici. Karakteristično područje upotrebe brzorezних čelika visokog sadržaja kobalta je gruba obrada pod najtežim uslovima (Č 6980, Č9682). Vanadijumovi čelici sa visokim sadržajem ugljenika odlikuju se specijalnim reznim svojstvima, a posebno povećanjem trajnosti rezne oštrice. Pri finoj obradi materijala najveće čvrstoće za odvalna glodala najviše se koristi Č 7680 i Č 9683 kao i Č 9680.

Zupčanici reduktora u većini slučajeva izrađuju se od konstruktivnih ugljeničnih ili legiranih čelika sa sadržajem ugljenika od 0,1 do 0,6% a pri većim gabaritima (zupčanici prečnika  $\geq 500$  mm) često se primenjuje čelični liv.

Zupčanik od čeličnog liva obično radi u paru sa kovanim zupčanikom. Legirani čelični liv se primenjuje znatno ređe.

Za zupčanike za sporohodne i maloopterećene prenosnike često se primenjuje liveno gvožđe. Pri izradi livenog gvožđa za relativno jako opterećene prenosnike, a takođe i za zupčanike reduktora primenjuje se sivi liv.

Pri manjim opterećenjima i srednjim brzinama ponekad se primenjuju plastične mase (tekstolit ili druge mase).

Prema tvrdoći radnih površina i u vezi sa tehnologijom rezanja i konačne obrade zuba razlikuju se dve grupe zupčanika od čelika:

- a) sa obradom ozubljenja posle termičke obrade i
- b) sa obradom ozubljenja pre termičke obrade.

Tvrdoća zupčanika prve grupe je  $HB < 350$ . Pri ovome tvrdoća reda  $HB = 320-350$  po pravilu se označava, osim za zupčanike manjeg prečnika. Određene vrednosti tvrdoće su granične i obično ovi zupčanici imaju tvrdoću u granicama  $HB = 200-280$ . Za dobijanje ovakve tvrdoće zupčanika od ugljeničnog ili legiranog (sa sadržajem ugljenika 0,3-0,6%) podvrgavaju se normalizaciji ili poboljšanju (kaljenje sa visokotemperaturnim otpuštanjem).

Primena zupčanika velike tvrdoće ( $HRC = 40-63$ ) radnih površina zuba dozvoljava znatno povećanje izdržljivosti prenosnika. Zato termička obrada koja se vrši posle konačnog ozubljenja može dovesti do vitoperivosti zuba što je nedostatak grupe obrade.

Cementirani prenosnici izrađuju se od čelika Č1220, Č1320, Č1221 (nelegirani ugljenični čelici za cementaciju). Za veoma odgovorne zupčanike primenjuju se legirani čelici za cementaciju.

Konačna obrada zuba, posle cementacije i kaljenja vrši se brušenjem.

Tvrdoća cementiranih površina zupčanika se kreće  $HRC = 56-63$ .

Potpuno kaljenje, kojem se mogu podvrgnuti zupčanici od ugljeničnog i legiranog čelika sa sadržajem ugljenika od 0,35 do 0,5%, obezbeđuje tvrdoću  $HRC = 40-60$  (u zavisnosti od veličine poprečnog preseka).

Površinsko kaljenje strujom visoke učestanosti ili plameno kaljenje može se primenjivati pri izradi zupčanika od ugljeničnog i legiranog čelika sa sadržajem ugljenika od 0,35 do 0,5%. Ova metoda termičke obrade naročito je bitna za zupčanike sa većim merama poprečnog preseka.

Visoka tvrdoća radnih površina zuba takođe se obezbeđuje pri cijanovanju, azotiranju, nitrocementaciji. Nedostatak ovih metoda je mala debljina tvrdog površinskog sloja, usled čega je zupčanik sasvim osetljiv na preopterećenja. Pri izboru vrste čelika sa tvrdoćom  $HB \leq 350$  za zupčanike reduktora i otvorenih prenosa neophodno je imati u vidu da materijal manjeg zupčanika po svojim mehaničkim svojstvima mora biti nešto bolji od materijala većeg zupčanika, što je vezano sa manjom čvrstoćom zuba



manjeg zupčanika na savijanje u poređenju sa zubima većeg zupčanika, i većim brojem ciklusa opterećenja.

Osim toga moguća je izrada oba zupčanika od iste vrste čelika, ali sa različitim termičkom obradom. Na primer manji zupčanik od čelika Č1530 poboljšan, a veći zupčanik od Č1530 normalizovan.

Kroz jedan reprezentativan primer izrade zupčanika u proizvodnim uslovima date su osnovne karakteristike bitne za proces obrade ozubljenja zupčanika, odnosno eksploataciju alata.

Na slici 4. prikazana je obrada ozubljenja pužnog točka sa geometrijskim karakteristikama:  $m=6$  mm,  $z=92$ ,  $\alpha=20^\circ$ , ugao zavojnice  $\gamma=4^\circ 23' 55''$ , smer spirale: desni, materijal pužnog točka: ČL 0501.

Dati pužni točak izrađen je posredstvom specijalnog odvalnog glodala čija je osa horizontalna i leži u ravni simetrije pužnog točka. Sam rad odvalnog glodala sa obradkom (pužnim točkom) pri rezanju istovetan je kasnijem radu puža i pužnog točka. Osnovne geometrijske karakteristike odvalnog glodala su: ugao spirale:  $\gamma=4^\circ 23' 55''$ , osnovni ugao  $\alpha=20^\circ$ , modul  $m=6$  mm, SP 3346, devet reda zuba glodala, proizvođač: JUGOALAT.



Slika 4. Ozubljenje pužnog točka odvalnim glodalom na mašini PFAUTER 630

Operacija ozubljenja se izvodi na mašini za odvalno glodanje tipa PFAUTER 630. Na ovoj mašini izvode se operacije za izradu cilindričnog ozubljenja (sa pravim i kosim zubima, ožljebljenja, lančanici, ozubljenje pužnih točkova (zupčanika) različitih profila do maksimalnog spoljnog prečnika  $\varnothing 630$  mm.

Na odvalnoj glodalici PFAUTER 630 radi se i metoda radijalnog pužnog ozubljenja. Kod ove metode obradak se radijalno primiče odvalnom glodalu uz istovremeno glavno, obrtno kretanje odvalnog glodala i pomoćno obrtno kretanje obradka. Ova metoda (radijalna) primenjuje se pri izradi pužastih točkova čiji je ugao nagiba zubaca manji od  $12^\circ$ .

Osnovni radni parametri podešeni na mašini PFAUTER pri izradi pužnog točka:

- dubina ulaska (nulovanje) - ručnim "opipavanjem" sa zadavanjem vrednosti visine zuba pužnog točka  $h=13,5$  mm i sa podešavanjem mikroprekidača obezbeđuje se siguran rad laganog ulaska odvalnog glodala u obradak (pužni točak),
- aksijalni pomak: 0,01 mm/obrtaj (broj ulaza automatski zadat),
- broj obrtaja odvalnog glodala: 56 o/min,
- hlađenje: režno ulje.

## 2.1. Habanje i oštrenje odvalnog glodala

Na proces habanja odvalnih glodala utiču mnogobrojni faktori (slika 1.). Povećano habanje odvalnog glodala prvi uočava rukovaoc mašine. vizuelno se primećuju pohabane rezne ivice zuba odvalnog glodala, a karakterističan je tupi zvuk pri glodanju koji takođe privlači pažnju. U konkretnom

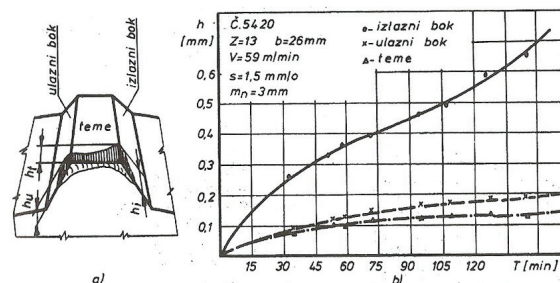
primeru posle trećeg obrađenog ozubljenja pužnog točka zbog oštećenja na zubima odvalnog glodala, glodalo je podvrgnuto operaciji oštrenja.

U ovom slučaju uzročnik zatupljenja na oštricama glodala je pojava peska u odlivku pužnog točka. Drugi česti razlozi habanja odvalnih glodala su: tvrdoća zupčanika i pojava sjajne strugotine, naslaga strugotine na odvalnom glodalu, neusklađena brzina alata (odvalnog glodala) i obradka, krzanje sečiva usled periodičnog promenljivog opterećenja pri pojedinim fazama stvaranja strugotine, odvaljivanje pojedinih delova alata pri periodičnom odvajanju naslage sa alata, (slika 5.). Na slici 6. je dat opšti oblik habanja i razvoj procesa habanja reznog elementa odvalnog glodala.

Operacija oštrenja ovog zatupljenog odvalnog glodala izvodi se na mašini "KLINGELNBERG AGW-230" slika 7. Oštrenje se izvodi po grudnoj površini uz učešće i pažljivo profilisanje tocila kako bi se dobio pravilan oblik grudne površine.



Slika 5. Detalj pohabanih zuba odvalnog glodala



Slika 6.: Opšti oblik habanja (a) i razvoj procesa habanja (b) reznog elementa odvalnog glodala



Slika 7. Oštrenje odvalnog glodala na mašini KLINGELNBERG

## 2.2 Kontrola odvalnih glodala posle oštrenja

Kod prosečnih (ukopanih) odvalnih glodala moguće je da se greške, uslovljene načinom izrade, koriguju, uzimajući u obzir ugao podsećanja. Mada se procesnom kontrolom pri

obradi ozubljenja zupčanika mogu otkriti sve greške koje potiču od nepravilno izvedenog oštrenja, potrebno je izvršiti vrlo pažljivo kontrolu odvalnih glodala posle oštrenja, (slika 8.) Time se eliminiše mogućnost pojave škarta u procesu proizvodnje, koji nastaje kao posledica nepravilno oštrenog alata, kao i vremenski gubci usled zastoja mašine alatke.

Kao i u većini drugih slučajeva, kontrolni postupci posle oštrenja odvalnih glodala obuhvataju:

- kontrolu geometrije,
- kontrolu hrapavosti brušenih površina i
- kontrolu mikrotvrdoće.

Elementi geometrije reznih elemenata odvalnog glodala koji se kontrolišu posle oštrenja kao i pri izradi novog odvalnog glodala, obuhvaćeni su standardom DIN 3968.

Kontrola se izvodi na specijalnim uređajima, kao što je uređaj firme "KLINGELNBERG" prikazan na sledećim slikama. Kontrola hrapavosti brušenih površina, a posebno oblik i izgled sečiva, vrši se najčešće vizuelno. Isprekidanost linije sečiva koja nastaje usled prisustva mikro prskotina nastalih u procesu završnog oštrenja nije dozvoljena, jer ostavlja tragove na bokovima zubaca zupčanika, koji se u pojedinim slučajevima ne mogu odstraniti završnom obradom.

### 2.3 Najčešći proizvođači neophodnih alata za potrebe IMK "14 oktobar"

Paleta proizvođača neophodnih alata u zavisnosti od vrste obrade je široka. Najčešći proizvođači od kojih fabrika IMK "14 oktobar" naručuje alate su:

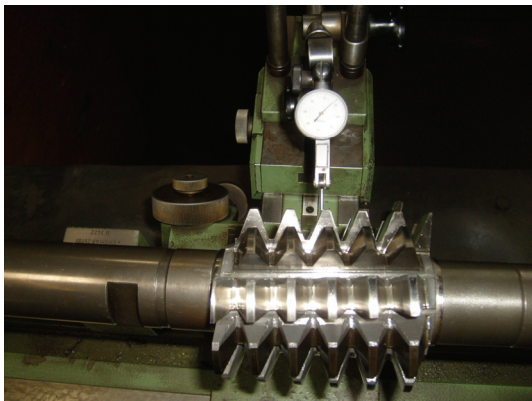
FRA – Čačak: alati za ozubljenje, glodanje,...

JUGOALAT- Novi Sad: alati za ozubljenje, glodala svih profila, ...

LORENZ- Italija, alati za ozubljenje (FELLOW noževi),

IBA-ADA - Vojvodina: alati za brušenje (razni profili tocila),

SWATTY- Maribor - Slovenija: razni profili tocila za brušenje,



Slika 8. Uređaj za kontrolu odvalnih glodala

### 3. ZAKLJUČAK

U radu je data analiza tehnološkog procesa obrade ozubljenja zupčanika sa aspekta praćenja eksploatacionih karakteristika alata – odvalnog glodala u proizvodnim uslovima fabrike IMK "14. oktobar". Ono što je trebalo da se pokaže ovim radom, je, da se kod nas još uvek u velikoj meri

koriste profilni modulni alati za obradu ozubljenja zupčanika, a isti su veoma skupi, jer je njihova proizvodnja skupa. To govori u prilogu realizacije predmetnog projekta "Razvoj progresivne tehnologije za lednu obradu profilnih alata na CNC mašinama".

### 4. LITERATURA

- [1] Kimer, J.: Tehnološki postupci i alati, I deo-Alati za obradu rezanjem, Novi Sad, 1973.
- [2] Nikić, Z., Radonjić, S., Jugović, V., Jovanović, B.: *Eksploracione karakteristike PFAUTER glodala presvučenih slojem TiN*, Zbornik radova, 24. Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Redni broj strane 127-133, Novi Sad, 1992.,
- [3] Nikić, Z., Radonjić, S.: *Exploiting characteristics of Pfauter Milling cutte coated with TiN layers*, 12th ICPR – International Conference on Production Research Preliminary Programme, Finland, 1993.
- [4] Radonjić, S., Nikić, Z., Jovanović, B.: *Taylorovi izrazi pri ozubljenju Pfauter glodalom*, 25. Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Redni broj strane 45-50 Beograd, 1994.
- [5] Radonjić, S., Sovilj, B., Sovilj-Nikić, I., Analiza lednog struganja zuba odvalnih glodala klasičnim postupkom, 32. Savetovanje proizvodnog mašinstva Srbije sa međunarodnim učećem, Novi Sad, 18.-20. septembra 2008.
- [6] Sovilj, B.: *Identifikacija triboloških procesa pri odvalnom glodanju*, Novi Sad, IPM, FTN, 1988.
- [7] Sovilj, B., Prapotnik, B., Mitrović, R., Todić, V.: *Influence of gearing process on the occurrence of cutting edge break by hob milling tools*, Tribology in industry, Vol. 21, No. 2, Redni broj strane 53- 58, 1999.

**Autori:** Ivan Sovilj-Nikić Phd student Prof.dr Bogdan Sovilj, , Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel.: +381 21 485-2343, Fax.: +381 21 458-133

**Prof. dr Snežana Radonjić**, Univerzitet u Kragujevcu, Tehnički Fakultet u Čačku, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Tel.: +381 32 302-763 Fax.: +381 32342-101  
Ljiljana Deljanin, inž.maš., "14.oktobar" Kruševac, 3700 Kruševac, Srbija, Tel:+38137421502

E-mail

[diomed17@gmail.com](mailto:diomed17@gmail.com)

: [snezar@tfc.kg.ac.yu](mailto:snezar@tfc.kg.ac.yu)

[bsovilj@uns.ns.ac.yu](mailto:bsovilj@uns.ns.ac.yu)

Rad je nastao u okviru projekta "Razvoj progresivne tehnologije za lednu obradu profilnih alata na CNC mašinama", broj TR 14059 Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj, Republike Srbije, 2008.



Sovilj- Nikić I., Radonjić S., Sovilj B.

## ANALZA PRIMENE KRIVE ZA LEĐNU OBRADU ZUBA PROFILNIH GLODALA

*Reime:* U radu su date krive za leđno struganje zuba modulnih glodala, i to: prava, logaritamska spirala, Arhimedova spirala i krug. Od nabrojanih krivih u praksi do danas se najčešće primenjuje Arhimedova spirala koja ima malo odstupanje leđnog ugla, kao i jednostavan postupak izrade. To je veoma stari postupak. Radi unapređenja procesa proizvodnje potrebno je izvršiti matematičko modeliranje svih navedenih oblika leđne površine zuba, čime bi bila omogućena obrada leđnih površina na CNC mašinama.

*Gljučne reči:* leđno struganje, profilna modulna glodala, krive za leđno struganje.

## ANALYSIS OF APPLICATION OF DIFFERENT CURVES FOR RELIEVING OF TOOTH OF GEAR MILLING CUTTERS

*Summary:* In this paper curves for relieving of tooth of gear milling cutters are given. Theses curves are straight line, logarithmic spiral, Archimedes spiral and circle. From the above mentioned curves, Archimedes spiral is the most often applied one in the practice. It has a little deviation of the radial relief-angle, as well as simple process of manufacture. This is a very old process. To improve the process of production, it is necessary to make the mathematical modeling of all the above mentioned forms of the teeth back surface, which would have enabled processing of back surfaces on the CNC machines.

*Key words:* relieving, profiled gear milling cutters, relieving curves

### 1. UVOD

Za obradu ozubljenja zupčanika i drugih profilnih delova koriste se profilna glodala sa leđno obrađenim zubima. Tu spadaju: odvalna glodala za obradu zupčanika, ožljebljenih vratila pravolinijskog profila, glodala za glodanje navoja, ispupčena i izdubljena polukružna glodala, kao i glodala za specijalne namene predviđena za obradu najsloženijih profila. Prednost profilnih glodala dolazi do izražaja pri obradi delova sa većom dužinom prema širini profilne površine.

Odvalno glodalo, mora da ima oblik evolventnog puža čiji se oblik oblikuje na bazi profila osnovne zupčaste letve. Sečiva odvalnih glodala moraju da leže na bočnim površinama osnovnog evolventnog puža. Za formiranje alata moraju da se na pužu urezuju uzdužni žljebovi za odvod strugotine, a isto tako da se leđnim podstrugivanjem formiraju elementi geometrije sečiva na boku i u leđnoj površini.

U ovom radu je data analiza krive leđno obrađenih zuba glodala.

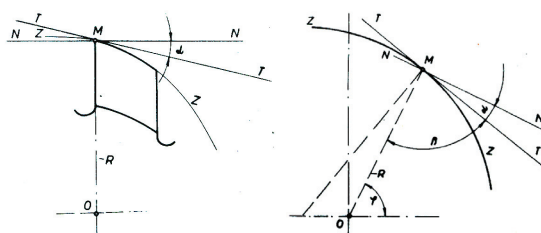
### 2. VRSTE KRIVIH ZA LEĐNO STRUGANJE ZUBA PROFILNIH MODULNIH GLODALA

Profilna glodala imaju svoje geometrijske parametre, uglove rezanja ( grudni i leđni ugao). Leđni ugao se formira na bazi krive na leđnoj površini zupca koja se dobija leđnom obradom. Svakom obrađivanom materijalu odgovara i određena veličina leđnog ugla  $\alpha$ .

On prilikom oštrenja zuba ne bi smeo da se menja ili, ako se već menja da ta promena bude neznatna. Postoje krive liije kod kojih se ne menja veličina leđnog ugla. Na

slici 1. prikazan je leđni ugao  $\alpha$  u različitim tačkama leđne površine određene krivom Z-Z

Kod izbora krive leđne površine s obzirom na njenu dvostruku ulogu polazi se od kriterijuma ostvarivanja leđnog ugla i ostvarivanja stalnog profila.



Slika 1. Leđni ugao  $\alpha$  u različitim tačkama leđne površine određene krivom Z-Z

Krive leđne površine mogu da imaju sledeći oblik:

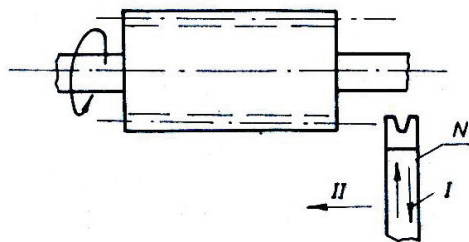
1. prava, deo jedne prave, sastavljena od više prava, poligon
2. do arhimedove spirale
3. deo kruga
4. deo logaritamske spirale, itd.

Leđna obrada zuba najčešće se primenjuje kod profilnih glodala. Osnovni zahtevi koji se postavljaju pri obradi leđne površine tj. Pri izboru oblika krive su:

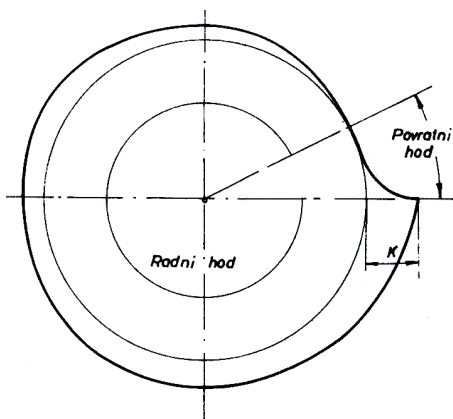
- a) obezbeđenje postojanosti profila tj. nepromenjenost visina profila u radijalnom preseku pri oštrenju po grudnoj površini
- b) obezbeđenje postojanosti (konstantnosti) leđnog ugla u svakoj tački leđne površine.
- c) jednostavnost leđne obrade

Treba istaći da veličina grudnog ugla ne bi smela da se menja pri oštrenju glodala po grudnoj površini. Naime to bi uticalo negativno na uslove rada i režim obrade.

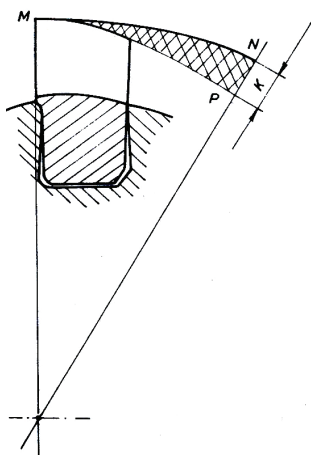
U toku obrade zuba nož N ( slika 2) dobija kretanje preko odgovarajućeg mehanizma ploče. Na slici 3. je dat, približni, opšti oblik ploče. Obim ploče podeljen je na radni i povratni hod. Kriva pomoću koje je definisan obim radnog hoda, identičan je lednoj površini zuba glodala. Povratni hod služi da nož povrati u početni položaj i time ga spremi za lednu obradu sledećeg zuba glodala. Prema tome površina MNP biva obrađena za jedan obrt ploče. Nož N u toku obrade izvodi kretanje I koje dobija od ploče, takođe i kretanje II, koje dobija od zavojnog vretena. Na taj način se vrši obrada ledne površine glodala. Ovaj način obrade je u stvari metod radi-aksijalne obrade.



Slika 2. Obrada ledne površine



Slika 3. Krivulja sa radnim i povratnim hodom

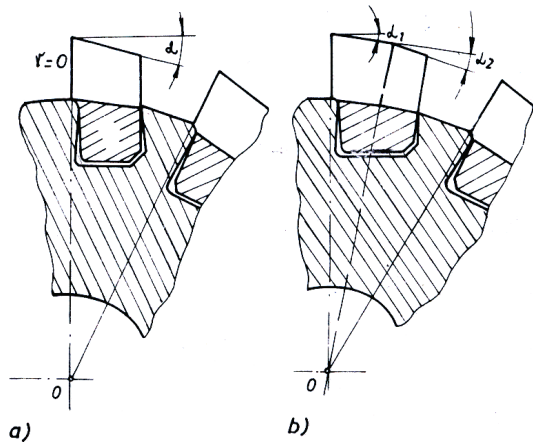


Slika 4. Veličina ledne obrade K

Kriva ledne površine glodala formira ledni ugao, koji bitno utiče na kvalitet obrađene površine. Veličina lednog ugla direktno zavisi od veličine lednog pada K ( slika 4 ).

## 2.1. Kriva ledne površine ima oblik prave

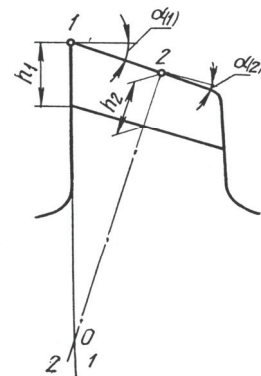
Na slici 5. je dat izgled zuba za slučaj kada kriva ledne površine ima oblik prave. Grudni ugao  $\gamma$  može biti jednak ili veći od nule. Kriva ledne površine definisana je dvema pravama ( sl. 5.b).



Slika 5. Projekcija ledne površine ima oblik prave (a), dve prave (b)

Dobra strana krive ledne površine po pravoj je smanjeno trenje između obrađivane površine i ledne površine glodala. Sem toga ova kriva ledne obrade nije teška za izradu. Oštrenjem glodala po grudnoj površini, vrednost ugla  $\alpha$  se menja. Kao nedostatak smatra se da se time smanjuje ugao klina  $\beta$  (naročito kod glodala gde je  $\gamma > 0$  ). Prema tome kod ovakvog oblika ledne površine nisu zadovoljena prva dva predhodno nabrojana zahteva, koja se postavljaju pri izboru oblika krive ledne površine.

U preseku 1-1 (slika 6.)  $\alpha_{(1)}$  i visina profila su značajno veći od istih parametara u preseku 2-2



Slika 6. Ledni uglovi u tačkama 1-2 kada je ledna obrada zuba glodala izvedena kao ravna površina

## 2.2. Kriva ledne površine je deo Arhimedove spirale

Arhimedova spirala nastaje kada se prava obrće ravnomerno oko nepokretne tačke 0 a pokretna tačka M se kreće ravnomerno duž prave.

Jednačina Arhimedove spirale u polarnim kordinatama (slika 8.) može se napisati u obliku:

$$\rho = b \cdot \theta \quad (1)$$

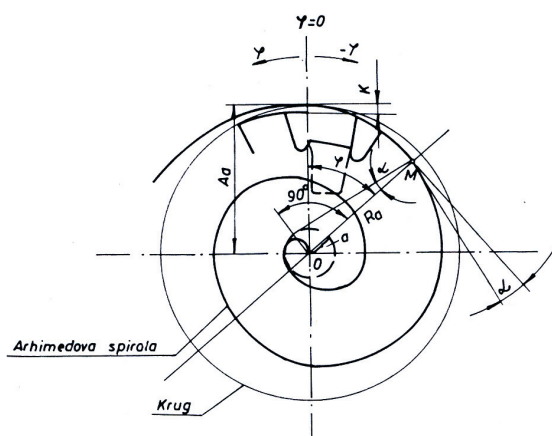
Gde je:  $\rho$  - radijus vektor

$b$  - konstantni koficijent

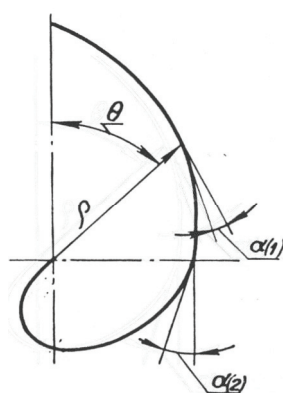
$\theta$  - tekući polarni ugao u radijanima

Tangens lednog ugla je:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\rho'}{\rho} = \frac{b}{b \cdot \theta} = \frac{1}{\theta} = \frac{b}{\rho} \neq \text{const} \quad (2)$$



Slika 7. Kriva ledne površine je deo Arhimedove spirale



Slika 8. Arhimedova spirala

Osnovna svojstva Arhimedove spirale su:

1) ledni ugao  $\alpha$  je u različitim preseccima različit tj.

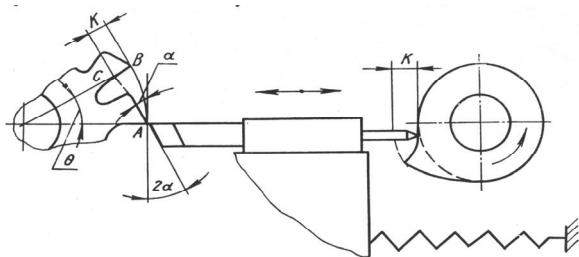
$$\alpha_{(1)} \neq \alpha_{(2)} \quad (3)$$

Što je lako uočljivo na slici 8.

2) promena lednog ugla ne više od dva stepena

3) zakon kretanja jednostavan. Tačka ravnomerno (sa konstantnom brzinom) kreće se po radijus vektoru

4) jednostavnost izrade brega



Slika 9. Šema ledne obrade zuba glodala na strugu za lednu obradu

Na slici 9. data šema ledne obrade zuba glodala po arhimedovoj spirali na strugu za lednu obradu. Veličina ledne obrade  $K$  određuje veličinu lednog ugla  $\alpha$ . Za određivanje veličina  $K$  i  $\alpha$  potrebno je uočiti krivoliniski trougao ABC iz kog sledi:

$$K = \overline{AB} \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (4)$$

a kako je:

$$\overline{AB} = \frac{\pi D}{z} \quad (5)$$

to je:

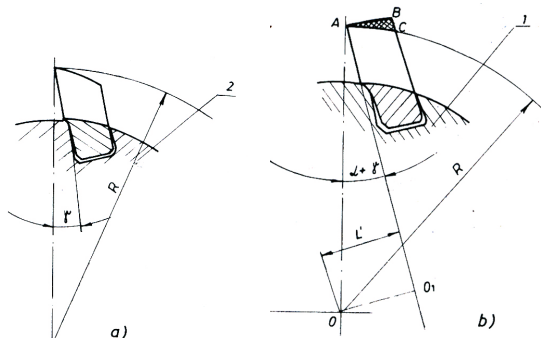
$$K = \frac{\pi D}{z} \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (6)$$

U ptaksi veličinu  $K$  određujemo na osnovu jednačine (6) posle izbora lednog ugla  $\alpha$ , a koji zavisi od uslova rada.

Na bregu za lednu obradu obavezno stoji oznaka za koju veličinu  $K$  je on predviđen.

### 2.3. Kriva ledne površine je deo kruga

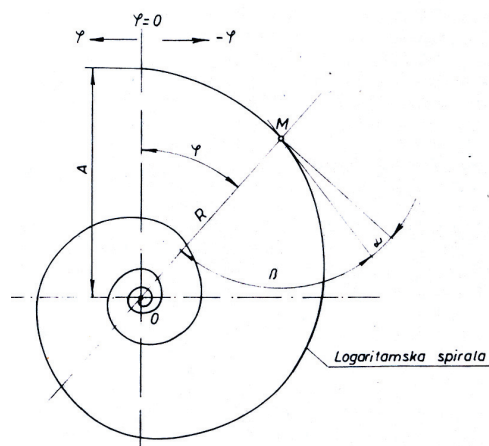
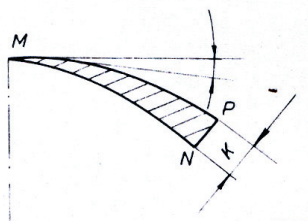
U ovom slučaju obrada ledne površine zupčaste letve izvodi se u specijalnom priboru. U priboru se obrađuje površina ABC i na taj način formira se ledna površina zuba glodala.



Slika 10. Kriva ledne površine je deo kruga

### 2.4. Kriva ledne površine je deo logaritamske spirale

Površina MNP predstavlja veličinu koju bi trebalo skinuti da bi se ostvario ledni pad.



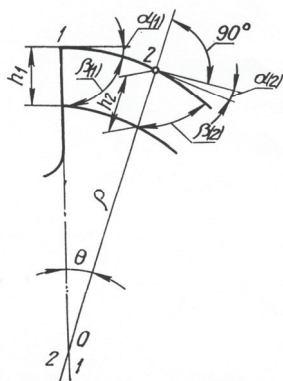
Slika 11. Kriva ledne površine je deo logaritamske spirale

Ploča koja služi kao polazni element za ostvarenje lednog pada zuba glodala po logaritamskoj spirali mora biti

izrađena tako da po svom obimu ima logaritamsku krivu koja nastaje na taj način što prava i tačka M izvode takvo kretanje da se prava obrće oko nepokretne tačke O, a tačka M kreće se oko nepokretnog centra brzinom proporcionalnom rastojanju OM.

Zahteve odnosno uslove obezbeđenja postojanosti profila i lednog ugla  $\alpha$  ledno obrađenog zuba u svim tačkama preseka zadovoljava jedino logaritamska spirala.

Za dokaz rečenog posmatrajmo u polarnom kordinatnom sistemu logaritamsku krivu (slika 12.). Na kojoj uočavamo dve tačke 1 i 2.



Slika 12. Ledni uglovi u tačkama 1-2 kada je ledna obrada zuba glodala izvedena po logaritamskoj spirali

Sa slike vidimo da su uglovi  $\alpha_{(1)}$  i  $\alpha_{(2)}$  jednaki, a takođe su uglovi klina  $\beta_{(1)}$  i  $\beta_{(2)}$  jednaki iz analitičke geometrije izvesno je da tangens ugla  $\beta$  je jednak odnosu radijus vektora i njegovog prvog izvoda tj.:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{\rho'}{\rho}, \quad (7)$$

Gde je:

$$\rho = a \cdot e^{m\theta} \quad (8)$$

jednačina logaritamske spirale.

Tangens lednog ugla  $\alpha$  je :

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{1}{\operatorname{tg}\beta} = \operatorname{ctg}\beta, \quad (9)$$

a kako je:

$$\alpha + \beta = 90^\circ, \quad (10)$$

proizilazi da je

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{\rho'}{\rho} = \frac{a \cdot m \cdot e^{m\theta}}{a \cdot e^{m\theta}}, \quad (11)$$

odnosno

$$\operatorname{tg}\alpha = m = \operatorname{const} \quad (12)$$

### 3. ZAKLJUČAK

U radu su dati oblici ledne površine zuba modulnih glodala.

Do sada se u praksi uglavnom primenjuje Arhimedova spirala kod koje ima malog odstupanja lednog ugla.

Logaritamska spirala nije našla primenu kod izrade zuba profilnih glodala jer je izrada ekscentra koji služi za ledno struganje po logaritamskoj spirali složen.

S obzirom da je sadašnja tehnologija lednog struganja zuba zastarela, radi unapređenja procesa proizvodnje potrebno je izvršiti matematičko modeliranje svih navedenih oblika ledne površine zuba, čime bi bila omogućena obrada lednih površina na CNC mašinama. Na ovaj način bi se skratio postupak lednog struganja i poboljšao kvalitet obrađene površine.

### 4. LITERATURA

- [1] Kimer, J.: Tehnološki postupci i alati, I deo-Alati za obradu rezanjem, Novi Sad, 1973.
- [2] Nikić, Z., Radonjić, S., Jugović, V., Jovanović, B.: *Eksplotacione karakteristike PFAUTER glodala presvučenih slojem TiN*, Zbornik radova, 24. Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Redni broj strane 127-133, Novi Sad, 1992,.
- [3] Nikić, Z., Radonjić, S.: *Exploiting characteristics of Pfafter Milling cutte coated with TiN layers*, 12th ICPR – International Conference on Production Research Preliminary Programme, Finland, 1993.
- [4] Radonjić, S., Nikić, Z., Jovanović, B.: *Taylorovi izrazi pri ozubljenju Pfafter glodalom*, 25. Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Redni broj strane 45-50 Beograd, 1994.
- [5] Radonjić, S., Sovilj, B., Sovilj-Nikić, I., Analiza lednog struganja zuba odvalnih glodala klasičnim postupkom, 32. Savetovanje proizvodnog mašinstva Srbije sa međunarodnim učecem, Novi Sad, 18.-20. septembra 2008.
- [6] Sovilj, B.: *Identifikacija triboloških procesa pri odvalnom glodanju*, Novi Sad, IPM, FTN, 1988.
- [7] Sovilj, B., Prapotnik, B., Mitrović, R., Todić, V.: *Influence of gearing process on the occurrence of cutting edge break by hob milling tools*, Tribology in industry, Vol. 21, No. 2, Redni broj strane 53- 58, 1999.

**Autori: Prof. dr Snežana Radonjić**, Univerzitet u Kragujevcu, Tehnički Fakultet u Čačku, Svetog Save 65, 32000 Čačak,

Tel.: +381 32 302-763 Fax.: +381 32342-101

**Prof.dr Bogdan Sovilj, Ivan Sovilj-Nikić Phd student**, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel.: +381 21 485-2343, Fax.: +381 21 458-133

E-mail: [snezar@tfc.kg.ac.yu](mailto:snezar@tfc.kg.ac.yu)  
[bsovilj@uns.ns.ac.yu](mailto:bsovilj@uns.ns.ac.yu)  
[diomed17@gmail.com](mailto:diomed17@gmail.com)

Rad je nastao u okviru projekta "Razvoj progresivne tehnologije za lednu obradu profilnih alata na CNC mašinama", broj TR 14059 Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj, Republike Srbije, 2008.





Sekulić St. Sava

## PREGLED IZRAZA ZA OCENU PERFORMANSI REZNOG ALATA

**Rezime:** Za nešto više od sto prošlih godina postoje brojne relacije između postojanosti ili srednjeg vremena bezotkaznog rada reznog alata u funkciji elemenata režima obrade. Prikupljanje podataka može se realizovati u laboratorijskim i proizvodnim uslovima. Kako je proces rezanja tipičan stohastički proces, na njega se primenjuje verovatnosni prilaz. Za većinu relacija u radu dat je komentar. U novije vreme u relacije za performanse reznog alata uvodi se verovatnosni pristup.

**Cljučne reči:** Rezni alat, Postojanost, Srednje vreme bezotkaznog rada, Pererformanse.

## REVIEW OF RELATIONSHIPS FOR ESTIMATION OF CUTTING TOOL PERFORMANCES

**Abstract:** For some more than hundred followed year exist numerous relations between tool life, or mean time to failure, and cutting condition elements. Data collection, in laboratory or in production conditions, can be realised. As the cutting process is a typical stochastic one, recent literature contain an approach from the probability aspect. The determined number relationships needed comments, in the paper are given. In nowely time in relations for cutting tool performances probability approach was established.

**Key words:** Cutting tool, Time life, Mean time to failure, Performances.

### 1. UVOD

U savremenim proizvodnim uslovima pitanje izbora optimalnih režima obrade predstavlja značajan zadatak vezan za izbor optimalne varijante obrade.

Razvijeni matematički modeli za njihove proračune zahtevaju posedovanje pouzdanih podataka o performansama reznog alata. Kao što je poznato oni se mogu dobiti: 1. laboratorijskim ispitivanjima, pri čemu se održavaju, strogi, kontrolisani, uslovi, koji se odnose na obradak i alat, kao i druge prateće uticaje i 2. praćenjem ponašanja alata u proizvodnim uslovima.

Ispitivanje postojanosti u laboratorijskim uslovima, ukazuje da se za iste uslove pri rezanju dobijaju značajna rasipanja postojanosti kao posledica neujednačenih triboloških uslova pri rezanju. Iz tih razloga obično se vrše preliminarna ispitivanja sa većim brojem alata pri čemu se eliminišu alati sa ekstremnim vrednostima postojanosti, a sa preostalim vrše sistematska ispitivanja. Posmatrajući ovakav način izbora reprezentativnih alata za ispitivanje funkcija postojanosti sa verovatnosnih pozicija možemo zaključiti da on nema nikakve podloge i opravdanja.

Prikupljanjem podataka o otkazima alata svih vrsta, u proizvodnim uslovima, uočava se vrlo veliko rasipanje, koje je posledica manje kontrolisanih uslova vezanih, pre svega, za obradak i alat, a i ostale uslove koji prate proces. Pored toga, u realnim uslovima obrade, do otkaza alata ne dolazi samo usled triboloških pojava u zoni rezanja već i kao posledica drugih, slučajnih poremećaja.

Na osnovu napred izloženog potrebno je razlikovati pojam postojanosti i vremena bezotkaznog rada alata, i za oba pojma dati tačnije definicije obzirom da je obrada rezanjem tipičan stohastički proces. Tako se za postojanost alata može reći da predstavlja srednje vreme efektivnog rezanja do pojave zatupljenja definisanog merodavnim kriterijumom habanja, dok vreme bezotkaznog rada, u proizvodnim uslovima predstavlja srednje vreme efektivnog rezanja do pojave otkaza alata. Na osnovu napred izloženog može se zaključiti da je srednje vreme bezotkaznog rada manje od postojanosti alata. Razlikovanje gore navedena dva pojma je

vrlo značajno obzirom da se prvi odnosi na tribološke karakteristike materijala obratka i alata, pri ostalim istim uslovima, a drugi i na ostale slučajne poremećaje koji prate realne proizvodne uslove.

U proizvodnim uslovima zavisno od veličine serija koje se obrađuju, broj registrovanih vrednosti otkaza alata može biti različit. Ako je broj registrovanih vrednosti  $N > 50$  on predstavlja reprezentativan uzorak, a ukoliko je  $N < 50$  on to više nije. Za obe gore navedena slučaja treba primeniti odgovarajuće metodologije obrade podataka, koje omogućuju određivanje funkcije raspodele otkaza, pouzdanosti, frekvence i intenziteta i srednje vrednosti bezotkaznog rada alata [1,2,3].

Za nešto više od sto godina mogu se, u literaturi naći veliki broj obrazaca koji povezuju postojanost sa elementima režima rezanja. Ovi obrasci mogu biti sa jednim, dva ili tri parametra režima. Broj radova koji se odnose na određivanje postojanosti reznog alata u funkciji elemenata režima obrade je vrlo veliki.

Što se tiče primene verovatnosnog prilaza, prognoza performansi reznog alata se prvenstveno odnosi na određivanje srednjeg vremena bezotkaznog rada za određeni režim obrade ( $A = \delta \cdot s = \text{const.}$  i  $v = \text{const.}$ ). U tom cilju, pri obradi podataka, kao funkcija cilja raspodele otkaza primenjivana je: normalna, log-normalna, eksponencijalna i, najčešće, Weibull-ova raspodela. Broj ovakvih radova je vrlo mali [9]. Broj radova koji se odnose na prognozu srednjeg vremena bezotkaznog rada reznog alata u funkciji elemenata režima obrade je vrlo mali.

### 2. OBRASCI ZA ODREĐIVANJE POSTOJANOSTI REZNOG ALATA

Bez pretenzija na sveobuhvatni prikaz u nastavku su hronološki dati najvažniji izrazi [1-8]

$$\text{Taylor (1907)} \quad v T^m = C_T; T = C_v v^k \quad (1)$$

$$\text{Kronenberg (1927)} \quad v_{60} = C_v A^{-1/\epsilon v} \quad (2)$$

$$\text{Walichs (1930)} \quad v_{60} = C_v / (\delta^x s^y) ; T = 60 \text{ min} \quad (3)$$

$$\text{Woxen (1932)} \quad (T^r/T)^n = c (q + q_n) \quad (4)$$

$$\text{Shvach (1948) by milling} \quad v T = \pi / \{ (\delta/s) [c_1 s_1 ((\delta/s) + c_2)^{1/2}] \}^{1/2} \quad (5)$$

$$\text{Gilbert (1950)} \quad v T^n = c / (\delta^x s^y) \quad (6)$$

$$\text{Kronenberg (1954)} \quad v = (T^r/T) c (\delta/s)^k / (\delta s)^{-1} \\ v_{60} = C_v g^\alpha A^{-f} \quad v_{60} = C_{vs} (g/5)^\alpha A^{-f} \quad g = \delta/s \quad (7)$$

$$\text{Weber (1954)} \quad b = K t^\beta \quad K = f(v) \quad \text{and} \\ \beta = \text{const.} \quad A = \delta \cdot s = \text{const.} \quad (8)$$

$$\text{Colding (1958)} \quad k+ax+cy-z+kxz=0 \\ k+ax+bx^2+cy+dy^2-z+ez^2=0 \\ x = \ln q \quad y = \ln v \quad z = \ln I \quad (9)$$

$$\text{Colding (1960)} \quad k+ax+bx^2+cy+dy^2-z+ez^2+fx+gyz+hxy=0 \\ x = \ln q \quad y = \ln v \quad z = \ln I \quad (10)$$

$$\text{Matthijensen (1965)} \quad v(e + T)^m = c \quad (11)$$

$$\text{Sekulic (1967)} \quad b = C \delta^x s^y v^r t^{P(v)} \\ P(v) = a_0 + a_1 v + a_2 v^2 + a_3 v^3 + \dots + a_n v^n \quad (12)$$

$$T = (C \delta^x s^y v^r B^{-1})^{-1/P(v)} \quad \text{for } b = B \text{ is } t = T \quad (12')$$

$$\text{Kronengerg (1968)} \quad (v + k) T^n = c \quad (13)$$

$$\text{N. N. (1968)} \quad T = T_0 \exp \{ k_1 [1 - (1 - k_2 \ln (v/v_0))^{1/2}] \} \quad (14)$$

$$\text{Hasch (1969)} \quad v T^n = \delta^x s^y b^z c \quad (15)$$

$$\text{Koenig-Dipiereux (1969)} \quad T = \exp[-(k_v/m)v^m - (i_s/n)^n + c] \quad (16)$$

$$\text{Sekulić-Nikolić (2001)} \quad T_m = a s^p v^{b+cs} \quad (19)$$

$$T_m = d v^q s^{e+fv} \quad (20)$$

### 3. KOMENTAR

Svih 18 navedenih obrazaca za postojanost reznog alata mogu se svrstati prema broju parametara režima rezanja na:

- jednoparametarske ( $T = f_1(v)$ ) i
- višeparametarske sa
  - dva, ( $T = f_2(s, v)$ )
  - tri i ( $T = f_3(\delta, s, v)$ )
  - četiri parametra ( $T = \delta, s, v, b$ )

Po jedan parametar sadrže obrasci (1), (2), (4), (8), (11), (13), (14), po dva (3), (7), (9), (10), (16), a po tri (5) i (6), četiri parametra sadrže izrazi (12) i (15).

Međusobno poređenje između pojedinih izraza ukazuje da iz onih novijih, sa više parametara, proističu, takodje, nastali ranije sa manjim brojem parametara.

Tako iz obrazaca (12) i (13) za  $b = B = \text{const.}$ ,  $\delta = \text{const.}$  i  $s = \text{const.}$  ( $i P_{(v)} = P_{(1)}$ ) sledi izraz (1) a izraz (3) za  $b = B = \text{const.}$  i  $T = 60 \text{ min.}$  dok obrazac (6) sledi za  $b = B = \text{const.}$  Izraz (7) idnetičan je sa (3) uzimajući u obzir da je  $\delta = (A/g)^{1/2}$  i  $s = (A/g)^{1/2}$  (uvođenjem koeficijenta vitkosti strugotine  $g = \delta s = 5$  omogućuje direktno određivanje koeficijenta  $C_{vs}$  za presek strugotine  $A = 1 \text{ mm}^2$  pa je  $\delta = 2,24 \text{ mm}$  i  $s = 0,44 \text{ mm}$ ). I Weber-ova jednačina (8) sledi iz (12) i (15) za  $b = B = \text{const.}$ ,  $\delta = \text{const.}$  i  $v = \text{const.}$  i  $K_v = c v^q$  pa je  $T = k_v v^q$  odn.  $T v^{-q} = k_v = \text{const.}$ , što predstavlja izraz (1). Izrazi (11), (13) i (14) su parabole ili hiperbole. Jednačine (9), (10) i (16) Colding-a i Koenig-Dipiereux-a su jednačine višeg reda.

Pojedini izrazi u koordinatama log T-log v predstavljaju: pravu liniju (1), snop paralelnih pravih za  $s = \text{const.}$  (15), krivu liniju (13) i familiju krivih linija za  $s = \text{const.}$  (16). Prema strukturi jednačina (17), je rešiva po brzini rezanja  $v$

$$v = (T_m a^{-1} s^{-p})^{1/(b+cs)} \quad (17')$$

a (18) po pomaku  $s$

$$s = (T_m d^{-1} v^{-q})^{1/(e+fv)} \quad (18')$$

Na osnovu analize izvedenih izraza, možemo konstatovati da oni ukazuju na svu složenost i delikatnost korišćenja podataka pri određivanju merodavnih režima obrade, pri čemu unošenje pouzdanosti kao elementa obezbeđuje veću sigurnost

### 4. ZAKLJUČAK

Na osnovu napred izloženog mogu se doneti sledeći zaključci:

- na osnovu analize navedenih izraza, možemo konstatovati da oni ukazuju na svu složenost i delikatnost korišćenja podataka pri određivanju merodavnih režima obrade, pri čemu unošenje pouzdanosti kao elementa obezbeđuje veću sigurnost,
- u eksponencijalnim zavisnostima za postojanost alata eksponenti nisu konstante već zavise od elemenata režima obrade,
- za prognoziranje srednjeg vremena bezotkaznog rada reznog alata verovatnosni pristup ima puno opravdanje,
- navedene dve ravnopravne zavisnosti (17) i (18), obe u eksponencijalnom obliku koje mogu biti korisne pri rešavanju najrazličitijih zadataka vezanih za optimizaciju procesa rezanja.

### 5. LITERATURA

- [1] Taylor, F.W. On the Art of Cutting metals, Trans. ASME, Vol. 28, 1907.
- [2] Taylor, F.V., Iskustvo rezat metally, (Russkij perevod Pankina A.V. i Levenshtajna L.A.), Moskva 1922.
- [3] Kronenberg, M., Grunzuge der Zerspanungslehre, Springer-Verlag, Berlin, 1954.
- [4] Weber, G., Die beziehung zweiehung zwischen Spanentstehung Verschleissformung und Zerspanbarkeit beim Drechen von Stahl, Dissertation TH Aachen, 1954.
- [5] Colding, B., Koenig, W., Validity of the Taylor Equation in Metal Cutting, Annals of the C.I.R.P., Vol. XXIV, 1971. pp 739-812.
- [6] Essel, K., Hansel, W., Analyse der Standzeitgleichungen, Industrie Anzeiger 94, Ig. Nr 5 v, HGF 1321, Ferrtigungsverfahren, HGF 72/3. 1972.
- [7] Sekulić, S., Pohabanost alata u funkciji režima obrade, Strojniški vestnik, XIII, 1967, 3.
- [8] Sekulić, S., Nikolić, B., Influence of Cutting Tool Condition Elements on Cutting Tool Reliability Function Parameters in Turning, Proceeding CD-ROM 16<sup>th</sup> International Conference on Production Research ICPR – 16, July 2001., Prague, Czech republic, 2001, Contribution no 0019, P017. i
- [9] Sekulić, S., Nikolić, B., Uticaj elemenata re`ima obrade na parametre funkcije pouzdanosti pri obradi na strugu, Zbornik radova CD-ROM XXIX Savetovanja proizvodnog mašinstva Jugoslavije, sept., 2002, Beograd, 2002., 218-222

**Autor: Prof. dr Sava St. Sekulić**, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za industrijsko inženjerstvo i inženjerski menadžment, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel.: +381 21 485-2153, +381 21 485-2146, Fax: +381 21 459-740. E-mail: [taske@uns.ac.rs](mailto:taske@uns.ac.rs)

Antić, A., Petrović, P., Zeljković, M.

## UTICAJ POHABANOSTI ALATA NA MEHANIZAM FORMIRANJA I OBLIK STRUGOTINE PRI OBRADI STRUGANJEM

### Rezime:

U radu je prikazano eksperimentalno istraživanje vezano za mehanizam formiranja i oblik strugotine u zavisnosti od procesa habanja alata pri obradi struganjem. Na osnovu eksperimentalnih ispitivanja analiziran je uticaj pohabanosti alata na morfologiju i mikrostrukturne promene u strugotini. U zavisnosti od pohabanosti alata praćena je promena strukture strugotine i karakter vibracija koje nastaju pri određenoj veličini srednje širine pojasa habanja alata i mehanizma formiranja segmentata strugotine za definisane uslove obrade. Istraživanja sprovedena u okviru rada imaju za cilj da daju doprinos boljem razumevanju mehanizma, oblika i formiranja lamela strugotine u zavisnosti od veličine srednje širine pojasa habanja alata pri obradi struganjem.

**Ključne reči:** habanje alata, mehanizam habanja, formiranje strugotine, segmentacija lamela strugotine

## THE INFLUENCE OF TOOL WEAR ON THE CHIP MECHANISM AND APPEARANCE TYPE IN TURNING

### Abstract:

The paper shows the experimental research in relation to the mechanism of chip forming, as well as chip type and shape in dependence to the tool wear process in turning. The experimental research deals with the influence of tool wear on the morphology and micro-structure changes in a chip. Depending on the tool wear degree, the change in chip structure and in the character of the vibration appearing in a certain degree of tool wear, as well as the chip segmentation type in defined cutting conditions, have been investigated. The research in the paper aims at the contribution to better understanding of the chip mechanism, shape type and segmentation appearing in relation to the tool wear degree in turning.

**Key words:** tool wear, wearing mechanism, chip forming, chip segmentation

### 1. UVOD

U cilju postizanja zadovoljavajuće postojanosti alata u uslovima savremene proizvodnje, istraživanja nisu usmerena samo na ostvarivanje boljih reznih karakteristika alat na povišenim temperaturama u smislu otpornosti na povišene temperature i habanje. Razumevanje korelacije mehanizama formiranja strugotine i habanja alata u procesu obrade tvrdih i poboljšanih materijala ima važnu ulogu u otkrivanju uticaja trenja na kritičnim mestima tokom procesa rezanja, kao i određivanje optimalnih uslova rezanja. Generalno, pri konvencionalnim (manjim) brzinama rezanja dominantan mehanizam habanja uključuje abrazivno i adheziono habanje, a pri visokim brzinama, uticaji difuzije i oksidacije imaju najznačajniju ulogu u nastanku habanja alata. Kopač i saradnici [2] su naznačili da rezanje pri nižim temperaturama proizvodi veliki pritisak usled čega se javlja zavarivanje koje rezultira naslagama na reznj ivici, dok povišene temperature rezanja, koje su posledica visoke brzine rezanja, povećavaju rasprostranjenost procesa oksidacija na veću površinu alata. Proces difuzije koji se odvija između strugotine i grudne površine alata rezultira kraterskim habanjem, dok reakcije oksidacije s okolinom proizvode promene na reznj ivici [2]. U uslovima „agresivnog“ rezanja, sa velikim brzinama obrade i brzinama pomoćnog kretanja, na mestu kontakta alat/strugotina javlja se spajanje materijala u pojedinim zonama na grudnoj površini, koje mogu da zauzmu celu površinu s obzirom na veliki kontakt i na brzo širenje. U ovom slučaju, sredstvo za hladjenje i podmazivanje teško može dopreti do mesta kontakta alat/strugotina. Povećanje

klizanja tj. smanjenja koeficijenta trenja na mestu kontakta alat/strugotina, može da se reši primenom određenih vrsta prevlaka [1].

U okviru rada se želi odrediti uticaj habanja alata na mehanizam formiranja strugotine, tj. u kojoj meri se habanje alata odražava na oblik strugotine nastao u procesu rezanja.

### 2. ZAVISNOST MECHANIZAMA FORMIRANJA STRUGOTINE OD HABANJA ALATA

Nekoliko zadnjih decenija, pa čak i ceo jedan vek, rađene se studije o procesu formiranja strugotine ali i dalje taj problem ostaje u centru pažnje. Strugotina koja nastaje u toku obrade može biti klasifikovana kao kontinualna, diskontinualna, kontinualna sa naboranim ivicama (testarasta), smicana i segmentna (kontinualna sa periodičnim varijacijama u debljini) [4]. Uopšteno, strugotina koja se formira pri obradi tvrdih i poboljšanih materijala u većini slučajeva je kontinualna sa naboranim ivicama i smicana. Trenutno prema dostupnim literaturnim podacima postoje dve teorije koje razjašnjavaju nastanak i stvaranje strugotine testarastog oblika (sa naboranim ivicama). Jedna teorija „teorija loma“ i naprslina po kojoj se početak nastajanja strugotine dešava sa pojavom jedne pukotine na slobodnoj površini obradka, koja se ubrzano širi prema reznj ivici alata do određene dužine gde naprslina prestaje usled jakih plastičnih deformacije u materijalu pod dejstvom visokih pritisnih napona alata za obradu. Segment, lamela strugotine nastala između grudne površine alata i pukotine se pomera napred u pravcu kretanja alata, dok je materijal u regionu



ispod plastične deformacije inicijalne pukotine razvučen uzduž grudne površine alata, tako da formira testerasti oblik strugotine [1, 3, 4, 5]. Druga teorija nastanka smicanja u primarnoj zoni rezanja je „adijabatska teorija formiranja strugotine“. Po ovoj teoriji se javlja termoplastična nestabilnost materijala, unutar primarne zone smicanja, na osnovu koje je mehanizam deformisanja materijala posledica toplotnog omekšavanja što dovodi do smicanja lamele materijala dejstvom sila koje se javljaju termoplastičnim ojačanjem materija izvan te zone (kao posledica velikih naprezanja materijala u zoni smicanja) [4, 5]. Adijabatsko smicanje može prethoditi začetku inicijalne pukotine i njenom širenju unutar ne naprslog područja primarne zone smicanja, u zavisnosti od uslova obrade. Beri i Gerald [4] su razmatrali mehanizme formiranja strugotine pri obradnici poboljšanih čelika i zaključili da je nestabilnost unutar primarne zone smicanja, tokom formiranja strugotine testerastog oblika, inicirana adijabatskom teorijom formiranja strugotine, gde su dominantni naponi na smicanje i njihovo širenje ka slobodnoj površini materijala obradka. Deformacije gornjeg regiona primarne zone blizu slobodne površine strugotine posledica su obe teorije „teorija loma“ i „adijabatska teorije“, zavisno od uslova obrade. Teški uslovi obrade, kao što su obrada materijala visoke tvrdoće velikim brzinama rezanja, izaziva degradaciju materijala nastankom strugotine tzv. „daktilnim“ lomom; pod dejstvom velikih plastičnih deformacija. Povećanje tvrdoće materijala obradka, brzine rezanja, dubine rezanja (nedeformisane debljine strugotine) i širine pojasa pohabanosti alata, kao i povećanje negativne vrednosti grudnog ugla, može rezultirati nastankom strugotine testerastog oblika lamela [1]. Istraživanjima je pokazano da se deformisani deo na površini poprečnog preseka strugotine smanjuje sa povećanjem brzine rezanja.

Vibracije alata za rezanje tokom obrade nastaju zbog trenja na grudnoj i lednoj površini alata, usled habanja na reznjoj ivici alata, valovitosti obrađene površine a takođe su povezane i sa spregnutim zupčanicima u kinemtskom lancu mašine. Istraživanja su pokazala da najveći izvor vibracija strugarskog noža, pri stabilnoj obradi, uglavnom nastaje zbog trenja lednog dela alata i obradka. Osnovna frekvencija vibracija alata je rezonantna frekvencija sistema izazvana trenjem na reznjoj ivici. Ubrzanje vibracija je najbolja mera vibracija koje se pojavljuju na visokim frekvencijama. S obzirom da su vibracije alata vibracije visoke frekvencije (tj. iznad 1 kHz), kao parametar za nadzor habanja alata je odabrano ubrzanje [3].

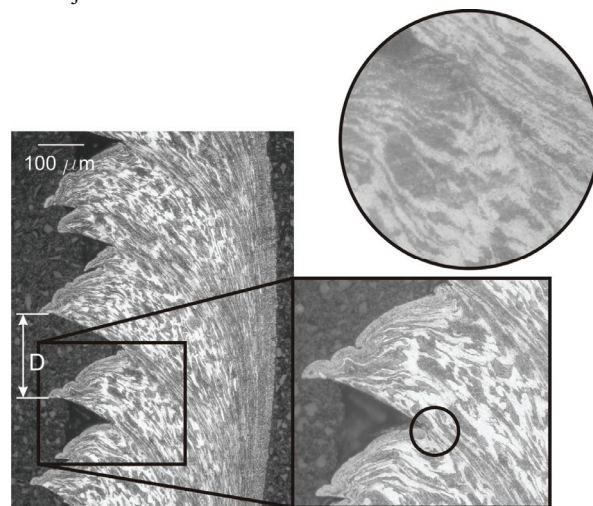
### 3. PRIKAZ EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

#### 3.1 Segmentacija strugotine testerastog oblika

Eksperimentalna ispitivanja predstavljena u radu daju jasan uvid u osnovu metalurške nestabilnosti odgovorne za nastanak strugotine testerastog oblika lamela na slobodnoj površini. Na slici 1 je prikazan mikroskopski snimak strugotine nastale pri obradi niskolegiranog ugljeničkog čelika, termički obrađenog na tvrdoću 45 HRC sa brzinom rezanja 200 m/min. Jasno se vidi da su zupci lamela u procesu rezanja ciklični počev od početnog segmenta koji ima znatne promene usled fizičkog dejstva alata (ili deformacije usled velikog pritiska vrha alata). Takođe, izduženja zrna, koja se usled velikog izduženja i pritiska sabijaju u liniji, a koja se produžava iz primarne zone smicanja. Isto se jasno vidi na poprečnom preseku nastale strugotine (slika 1). Da takav oblik nije rezultat trenja klizanja preko površine loma, evidentno je iz činjenice da je na mestu klizanja sila loma maksimalna [4]. Umesto širenja pukotine loma na dole kroz primarnu zonu smicanja, nastali pojas deformacija je lokalizovan kao pojas koji je formiran usled adijabatskog

klizanja materijala. Ovaj zaključak se temelji na činjenici da je njegova debljina vezana za tip tj. geometriju i oblik alata, što pretpostavlja nastanak smicanja usled dejstva sile rezanja i širenja inicijalne pukotine prema reznjoj ivici alata. Odsustvo izraženog smicanja u gornjem delu primarne zone smicanja materijala, pokazuje da postoji deformacija i pad napona usled uticaja termičkog ojačanja osnovnog materijala tj. stanja obrađivanog materijala.

Pojas strugotine koja je bila u kontaktu sa grudnom površinom alata pokazuje smicanje uz ivicu koje je nastalo usled sekundarne zone rezanja. Preostali tragovi izduženih zrna u strukturi materijala su formirani u okviru primarne zone. Međutim, jasno je da svaka pojavu naprslina i inicijalnih lamela strugotine u osnovnoj zoni smicanja formira diskretni segment. Za uslove pod kojima je formiran uzorak na slici 1, vodi se smanjenje u napretku i prostiranju inicijalne pukotine u donjem delu primarne zone smicanja (gde se dešava lokalizacija smicanja lamela). U okviru posmatranog segmenta strugotine mogu se identifikovati dva mehanizma formiranja strugotine u okviru primarne zone smicanja. Pri formiranju zubaca lamela testerastog oblika strugotine, koji mogu biti pripisani oštrim uslovima obrade, što se manifestuje kroz veći utrošeni rad na skidanje materijala i veću brzinu rezanja, zbog termički obrađenog materijala.



Slika 1 Strugotina sa jako izraženim lamelama

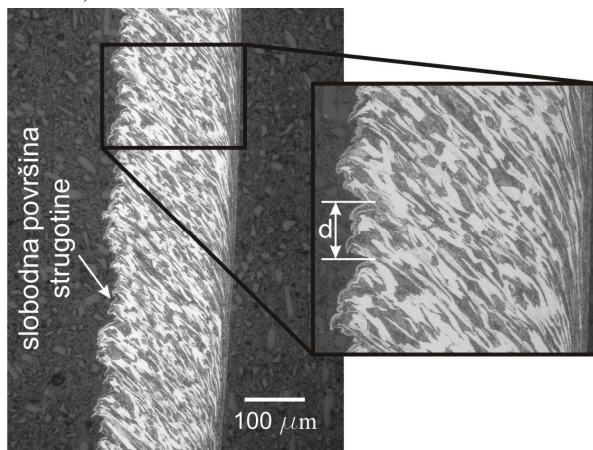
#### 3.2 Segmentacija strugotine kontinualnog oblika

Poznato je da se kontinualnom strugotinom ispoljavaju očiti dokazi nastanka smicanja lamela u primarnoj zoni rezanja na slobodnoj površini. Posmatrano na skali učestanosti, frekvencija je za jedan red veličine manja nego kada se formira strugotina testerastog oblika [4]. Mnogo važnije razlika u prirodi definisanja smicanja lamela kod segmentacije strugotine kontinualnog i testerastog oblika je odnos između rastojanja reznog fronta „D“ prikazanog na slici 1 i „d“ na slici 2 u odnosu na nedeformisanu debljinu strugotine (dubinu rezanja). Na slobodnoj površini strugotine kontinualnog oblika, razmak lamela reznog fronta (ekvivalentan je debljini lamela i u velikoj meri je nezavisan od nedeformisane debljine strugotine), je obično 7 do 12 μm. Razmak između lamela kod strugotine testerastog oblika, je sličan po veličini kao debljina nedeformisane strugotine i uopšteno posmatrano kreće se unutar 50% te debljine.

Slika 2 prikazuje lamela koje karakterišu slobodnu površinu strugotine kontinualnog oblika. Ovaj tip strugotine se formirao pri ortogonalnom rezanju niskolegiranog alatnog čelika tvrdoće 45 HRC sa brzinom rezanja, 200 m/min i pomakom,  $f = 200 \mu\text{m/o}$ . Ako se poveća tvrdoća materijala obradka i/ili brzina rezanja i debljina nedeformisane strugotine (dubina rezanja), može da dođe do toga da početak

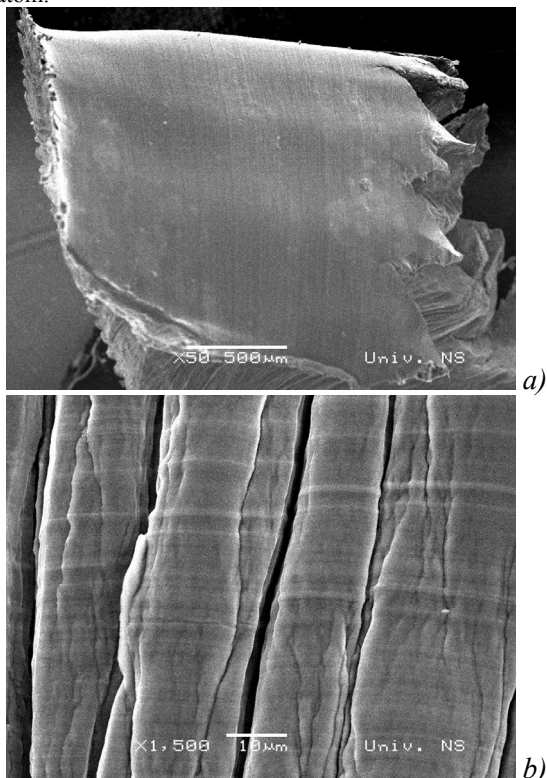


širenja loma za formiranje zubaca testere strugotine bude blizak tranziciji slobodne površine lamela u strukturu lamela strugotine kontinualnog oblika (strugotina sa naborim ivicama).



Slika 2 Segmentacija strugotine kontinualnog oblika

U poređenju sa slobodnom površinom strugotine testerastog oblika (slici 3 b), jasno je da su mehanizmi smicanja u gornjem području primarne zone smicanja (na slobodnoj površini strugotine) isti za oba tipa nastajanja strugotine. Zavojci strugotine sa glatkom donjom površinom su posmatrani u početnom stadijumu habanja (slika 3a). U ovoj fazi, osnovni način tečenja strugotine preko grudne površine alata je klizanje. Nakon određenog vremena i rezanja pločica se pohabala, oblik strugotine se počeo menjati i postajati ravniji, a donja površina strugotine je postajala valovita i neravna u odnosu na onu koje su dobijena ostrim alatom.



Slika 3 Prikaz površine strugotine koja klizi po grudnoj površini alata a), slobodne površine strugotine b)

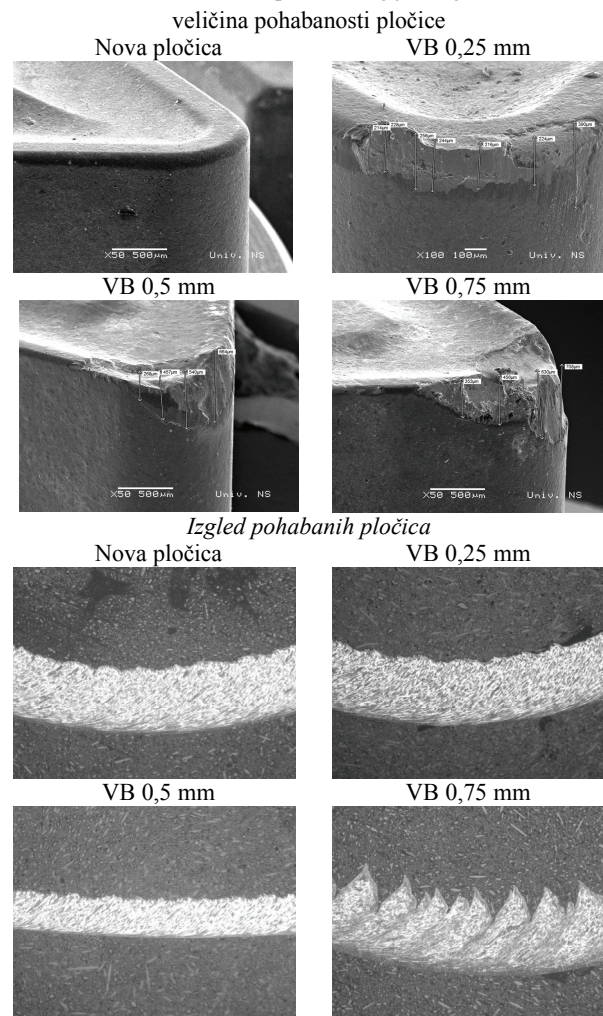
#### 4. PONAŠANJE SIGNALA VIBRACIJA TOKOM FORMIRANJA STRUGOTINE

Stvaranje inicijalne pukotine unutar primarne zone

smicanja tokom nastanka lamela strugotine testerastog oblika rezultira brzim ispuštanjem elastične energije i unutrašnjih napona, dok kod strugotine kontinualnog oblika ta energija ostaje zarobljena između lamela strugotine i rezultira povećanjem energiji deformacije i adijabatskim smicanjem materijala. Međutim, važna razlika između ovih oblika strugotine se odnosi na širinu zone smicanja, područje na kome se lokalizuje i rasprostire inicijalna pukotina.

Prethodno je navedeno da se prosečna debljina lamela na slobodnoj površini strugotine kontinualnog oblika povećava sa nedeformisanom debljinom strugotine, do granične vrednosti 7-12 μm, što sugeriše na formiranje inicijalne pukotine između lamela i da se inicijalna pukotina ne širi preko cele debljine strugotine do grudne površine alata (slika 1). U blizini slobodne površine, pukotine se mogu inicirati kao kratki rascepi usled nižih normalnih napona, dok se širenje pukotine prema alatu sprečava zbog rasta normalnog napona gledano od površine klizanja.

Ako su formirane pukotine i mikro lomovi, odgovorni za formiranje lamela koje se mogu širiti samo na konačnoj udaljenosti u pravcu ravni smicanja, sledi da se samo pukotine oko vrha alata mogu širiti duž celog kontakta grudne površine i alata. Konstatovano je da pri stvaranja lamela nastaje značajan izvor vibracija i akustične emisije za slučaj kada je debljina strugotine dovoljno mala. U tom slučaju je napredovanje inicijalne pukotine i širenje ka grudnoj površini alata tako da se elastični naponi i energija mogu i meriti.



Slika 4 Oblik segmenata strugotine u zavisnosti od veličine pohabanosti alata

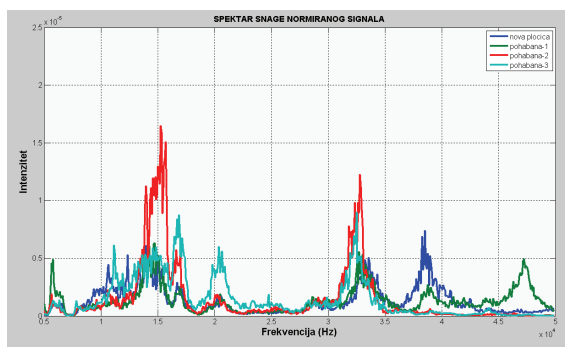
Sprovedena istraživanja pokazuju da gornji deo spektra ubrzanja vibracija izmerenih na dršci strugarskog noža u zoni bliskoj reznom klinu omogućavaju indirektnu identifikaciju

promena stanja procesa formiranja strugotine izazvanih promenama stanja pohabanosti reznog alata, odnosno degradacijom njegove rezne ivice habanjem. U opsegu od 1 kHz do 50 kHz nalazi se veći broj sopstvenih frekvencija alata, što stvara prostor za pojavu rezonance pod dejstvom pobudne sile koja nastaje segmentacijom lamela pri nastajanju strugotine kontinualnog oblika. Formiranje segmentirane strugotine testerastog oblika se može posmatrati kao proces diskretne pobude obradnog sistema nizom energetskih paketa čija frekvencija se može izračunati sa prihvatljivom greškom i ta pobuda se može prepoznati u odzivu obradnog sistema, posebno drške alata. Odziv obradnog sistema je sasvim drugačiji kada se pobuda ostvaruje procesom formiranja lamela strugotine kontinualnog oblika. Unutar bilo kog ciklusa formiranja segmenta, ponekad identifikaciju rezanja destabilizuje i sama primarna zona smicanja, promenama u svom gornjem delu, što rezultira izdavanjem elastične energije i napona. Učestalost formiranja segmenata obično je veća od 10 kHz, što je iznad nivoa odziva klasičnih (konvencionalnih) davača ubrzanja. Izdavanjem energije smicanja lamela uočen je daleko dominantniji izvor pikova u signalu vibracija kada su stvara segmentacija strugotina testerastog oblika. Ovo je ilustrovano u podacima iz sprovedenih eksperimentalnih ispitivanja (slika 4).

Analizom izvedenih eksperimentalnih istraživanja može se zaključiti da na oblik strugotine u procesu rezanja dominantan uticaj nema samo stanje i karakteristike materijala i brzina rezanja nego i stanje pohabanosti rezne pločice tj. geometrija alata. Uočeno je da pri održavanju konstantnih režima obrade: brzine, pomaka i dubine rezanja, kao i karakteristika materijala, promenom širine pohabanosti alata u određenom trenutku dolazi do prelaska iz jednog oblika segmentacije strugotine u drugi za što je direktno odgovorna rezna geometrija koja se menja sa habanjem alata. Promena rezne geometrije, a time i tipa strugotine, direktno se odražava na posmatranim parametrima u analiziranom području visokofrekventnog dela spektra vibracija.

Slika 5 prikazuje, u linearnoj razmeri, spektar snage signala za pojedine prikazane pohabane pločice. Ovakav prikaz mnogo ilustrativnije pokazuje veliku dinamiku signala po pojedinim frekvencijama, što nije slučaj kada se isti signal iskazuje u dB.

Frekventni spektar je ograničen na 50kHz. Korišćena instrumentacija realno može da garantuje verodostojnost merenja i za širi frekventni spektar, do 100kHz, ali zbog karakteristika korišćenog senzora nije razmatran širi frekventni spektar.



Slika 5 Spektar snage signala prikazan u linearnoj razmeri

#### 4. ZAKLJUČAK

Istraživanje prikazano u ovom radu, vezano za progresivno formiranje strugotine, definiše mehanizam procesa formiranja strugotine u odnosu na habanje alata po leđnoj površini i proces rezanja. Strugotina nastala u početnoj fazi je izduženog oblika sa glatkim donjim delom koji je u

kontakta sa grudnom površinom alata. Napredovanjem pojasa habanja, i kraterskog habanja alata strugotina menja oblik, postaje grublja, valovitija i krzana. Segmentacijom strugotine nastaje testerasti oblik sa jako izraženim zubima na slobodnoj površini. Povećavanjem habanja alata na leđnoj površini segmentacija strugotine se smanjivala, tj. učestalost formiranja lamela, a plastične deformacije u primarnoj zoni rezanja su postale veće i izraženije. U preseku strugotine sa izraženim zubima testerastog oblika se može videti nekoliko različitih zona deformacije, kao što su zone trenja koja se nalazi uz ivicu alata, primarna zona smicanja, zona u kojoj je izražena inicijalna pukotina i zona smanjene deformacije materijala. Sva ta zapažanja ukazuju na kombinovano dejstvo naponskog ojačavanja i toplotnog omekšavanja, tj. postojanje kombinovanog načina formiranja strugotine. Kod mehanizama formiranja strugotine testerastog oblika, za primenjene uslove rezanja, može se zaključiti da je termoplastična deformacija usled dejstva alata dominantna do početka inicijalne pukotine i da se u tom delu rezanje odvija po „adijabskoj teoriji smicanja“, dok se pukotine u gornjem području na slobodnoj površini primarne zone rezanja formiraju po drugom mehanizmu tzv. „teoriji loma“.

#### 5. NAPOMENA

Rad predstavlja deo istraživanja na projektima „Istraživanje i razvoj kotrljajnih ležajnih sklopova i njihovih komponenti“ ev. broj 14048 i projekta „Primena inteligentnih senzorskih sistema u razvoju integrisane automatizacije realnih i virtuelnih procesa proizvodnog preduzeća“ ev. broj 14035 (Istraživanja u oblasti tehnološkog razvoja za period 2008. - 2010.) koje finansira Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

#### 6. LITERATURA

- [1] Ning, L., Veldhuis, S.C., Yamamoto, K.: *Investigation of wear behavior and chip formation for cutting tools with nano-multilayered TiAlCrN/NbN PVD coating*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 48, 656–665, 2008.
- [2] Kopač, J., Soković, M., Dolinšek, S.: *Tribology of coated tools in conventional and HSC machining*, Journal of Materials Processing Technology 118, 377–384, 2001.
- [3] Antić, A., Petrović, P., Zeljković, M.: *Dinamika obradnog sistema i njena implementacija na indirektno prepoznavanje stanja reznog alata*, 32. Savetovanje proizvodnog mašinstva Srbije sa međunarodnim učešćem, Novi Sad: Fakultet tehničkih nauka, 18-20 septembar, 2008, 341- 346, ISBN 978-86-7892-131-5.
- [4] Davies, M.A., Burns, T.J., Schmitz, T.L.: *High-Speed Machining Processes: Dynamics on Multiple Scales*, Available at: [http://www.mm.bme.hu/COST\\_P4\\_WG2/ws99/paper01.pdf](http://www.mm.bme.hu/COST_P4_WG2/ws99/paper01.pdf) [Accessed 27 May, 2004].
- [5] Burns, T. J., Davies, M. A.: *On repeated adiabatic shear band formation during high-speed machining*, International Journal of Plasticity 18, 487–506, 2002.

**Autori:** Prof. dr Milan Zeljković, Mr Aco Antić, asistent, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Tel.: +381 21 485-2351, Prof. dr Petar Petrović, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, +381 11 337 0341.

E-mail: [antica@uns.ac.rs](mailto:antica@uns.ac.rs);  
[pbpetrovic@mas.bg.ac.rs](mailto:pbpetrovic@mas.bg.ac.rs);  
[milanz@uns.ac.rs](mailto:milanz@uns.ac.rs)





S. Borojević, B. Sredanović, G. Globočki-Lakić, B. Nedić, Đ. Čiča

## ANALIZA INDEKSA OBRADIVOSTI ALUMINIJUMSKIH LEGURA PRIMJENOM APLIKATIVNOG PROGRAMSKOG RJEŠENJA

**Rezime:** Neprekidan i ubrzan razvoj industrije diktira razvoj novih i usavršavanje postojećih materijala koji mogu da odgovore specifičnim zahtjevima u eksploataciji. Ovaj razvoj neminovno prati i razvoj novih obradnih sistema, alata, SHP ali i podstiče istraživanja u oblasti obradivosti materijala. Obradivost materijala predstavlja važnu kategoriju, koja bitno određuje pravce buduće primjene novih materijala. Obradivost materijala zavisi od niza faktora koji se mogu posmatrati sa tribološkog i energetskog aspekta kao i sa aspekta kvaliteta obrade. U ovom radu poređenje materijala i definisanje indeksa obradivosti izvršeno je na osnovu realnih uslova rezanja aluminijumskih legura na strugu, eksperimentalnih istraživanja na tribometru „Block on Disk“ kao i primjenom teorijskih modela za proračun sve tri komponente rezultujuće sile rezanja. U tu svrhu razvijeno je aplikativno programsko rješenje koje se sastoji od nekoliko baza podataka, modula za proračun sila rezanja i definisanje indeksa obradivosti kao i grafičkih modula za predstavljanje rezultata. Aplikacija nudi mogućnosti uporedne analize rezultata ispitivanja prema razvijenim pristupima.

**Cljučne reči:** Al legure, indeksi obradivosti, aplikativno programsko rješenje

## ANALYSIS OF MACHINABILITY INDEX OF ALUMINIUM ALLOYS WITH APPLICATION SOFTWARE

**Abstract:** Continuous and rapid development of industry dictate the development of new and improve existing materials that can respond to specific requirements in the exploitation. This development inevitably follows the development of new and processing system, tools, SHP and encourages research in the field of machinability. Machinability is an important category, which determines directions of future application of new materials. Machinability depends on a number of factors that can be viewed with tribological and the energy aspect and the aspect of quality. In this paper, the comparison of materials and the definition of machinability index is made based on the real conditions of aluminum alloy cutting lathe, the experimental research on tribometru "Block on Disk" and the application of theoretical models for calculation of all three components resulting cutting force. For this purpose, the developed application software solution that consists of several databases, modules for calculation of cutting force and the definition of machinability index and graphical representation of module results. The application offers the possibility of comparative analysis of the results developed to test approaches.

**Key words:** Al alloys, machinability index, application software solution.

### 1. UVOD

Nagli razvoj industrije u zadnje tri decenije stavlja poseban akcenat na razvoj novih, superiornijih materijala, kao i poboljšanje postojećih materijala. Razvoj i poboljšanje takvih materijala postiče razvoj novih alata i tehnologija za njihovu obradu. Da bi se jedan novi materijal stavio u konvencionalnu upotrebu, potrebno je ispitati, kako njegove mehaničke osobine, tako i njegove tehnološke karakteristike u koje spada i obradivost. Obradivost materijala je kompleksna kategorija koja zavisi od niza parametara kao što su: mehaničke, strukturne i termičke osobine obradivanog materijala, osobine alata i svojstava SHP koji se koristi pri obradi. Kriterijumi za ocjenu obradivosti materijala predmeta obrade mogu se formirati na osnovu: otpora rezanja, postojanosti alata, parametara hrapavosti obradene površine, temperature rezanja i dr. Kao mjera obradivosti materijala, prema nekom od pomenutih kriterijuma, koristi se indeks obradivosti. Ispitivanje materijala sa stanovišta obradivosti ima za cilj iznalaženje optimalnih tehnološko-geometrijskih uslova obrade, odnosno efektivnije upravljanjem procesom obrade.

Aluminijske legure su materijali koji su se počeli masovno upotrebljavati naglim razvojem automobilske i aeronautičke industrije. Aluminijske legure su, zbog svojih osobina, nesumljivo i budućnost metalske industrije, pa je s toga vrlo važno poznavanje obradivosti ovih materijala.

U ovom radu će se razmatrati obradivost aluminijumskih

legura definisana preko indeksa obradivosti sa više aspekata i u različitim uslovima obrade.

### 2. OBRADIVOST MATERIJALA

#### 2.1 Definicija obradivosti

Obradivost materijala predstavlja sposobnost materijala da se, pri obradi rezanjem, dobije zahtijevani kvalitet obrade i visoka efikasnost procesa uz što manje narušavanje entropijskog aspekta procesa obrade i što je moguće manje narušavanje upotrebljivosti sredstava rada. Do podataka o obradivosti se dolazi putem eksperimentalnih ispitivanja.

Problematika definisanja obradivosti je vrlo složen zadatak, jer je prisutno mnogo uticajnih faktora i njihovih interakcija. Ispitivanje obradivosti se obično odvija sa promjenom ulaznih parametara u uskom spektru, te je nemoguće jednoznačno definisati opštu obradivost pojedinog materijala za sve uslove obrade. Kompleksnost zadatka nezaobilazno zahtijeva i uključivanje računara i najsavremenih tehnologija u proces definisanja obradivosti.

Ulazni parametri za definisanje obradivosti materijala su:

- materijal obratka,
- materijal i geometrija alata,
- sredstvo za hlađenje i podmazivanje,
- režimi obrade,
- vrsta obrade,
- mašina na kojoj se vrši obrada.

## 2.2 Indeks obradivosti

Indeks obradivosti je mjera obradivosti materijala definisana prema nekom od kriterijuma:

- otpori rezanja,
- postojanost alata,
- temperatura rezanja,
- parametri hrapavosti obrađene površine,
- ekonomična brzina rezanja,
- troškovi obrade.

Indeks obradivosti nekog materijala se može predstaviti izrazom:

$$I_i = \left( \frac{p_i}{p_r} \right)^{\pm 1} \cdot 100\% \quad (1)$$

gdje je:

$I_i$  – indeks obradivosti i-tog materijala

$I_r$  – indeks obradivosti referentnog materijala

$p_i$  – veličina parametra usvojenog za ocjenu obradivosti i-tog materijala

$p_r$  – veličina parametra usvojenog za ocjenu obradivosti r-tog materijala (referentnog)

Eksponent odnosa ( $p_i/p_r$ ) ima vrijednost +1 ako porast izabranog parametra ima pozitivan efekat na »lakoću« odvijanja procesa obrade. U obrnutom slučaju eksponent ima vrijednost -1.

Analiza energetskog bilansa obrade je najčešći način ispitivanja obradivosti materijala. Poređenje materijala sa aspekta energije potrebne za njihovu obradu daje značajan pokazatelj obradivosti koji je često i najmjerodavniji. Analiza koeficijenta trenja na kontaktnim površinama alata, kao i definisanje veličine habanja alata predstavlja analizu sa tribološkog aspekta. U ovom radu je analizirana obradivost legura aluminijuma sa aspekta:

- glavnog otpora rezanja,
- koeficijenta trenja na lednoj površini alata i
- širine traga habanja na bloku iz tribometrijskih ispitiv.

Na osnovu navedenog, izraz (1) se može predstaviti:

$$I_i^{F_1} = \frac{F_1^r}{F_1^i} \cdot 100\%$$

$$I_i^{\mu} = \frac{\mu_r}{\mu_i} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$I_i^b = \frac{b_r}{b_i} \cdot 100\%$$

gdje su:

$F_1^r, F_1^i$  – glavni otpori rezanja referentnog, odnosno i-tog materijala, izmjerenih pri datim režimima obrade, na dinamometru

$\mu_r, \mu_i$  – srednje vrijednosti koeficijenta trenja referentnog, odnosno i-tog materijala, izmjerenih na tribometru "Block on Disk".

$b_r, b_i$  – srednja širina traga habanja referentnog, odnosno i-tog materijala, izmjereni nakon ispitivanja na tribometru "Block on Disk".

## 3. OBRADIVOST AL LEGURA

U posljednje vrijeme primjena aluminijuma i njegovih legura se širi u svim oblastima (automobilska i aero industrija, građevinarstvo) zahvaljujući tome što mu je gustoća manja od čelika, što ima dobru korozionu otpornost,

dobre mehaničke karakteristike i dobru recikličnost. Smatara se da će se sadašnje legure aluminijuma koje se koriste u automobilskoj industriji narednih godina zamijeniti sa legurama AlMgLi i AlCuLiMg jer ove legure imaju manju gustinu i veći modul elastičnosti. Poznavanje obradivosti aluminijuma i njegovih legura je stoga od posebne važnosti.

Niska vrijednost specifične gustine Al legura omogućava obradu sa velikim brzinama rezanja. Otpori rezanja koje se javljaju prilikom obrade su manji nego prilikom obrade čelika. Dobra toplotna provodljivost i visoka brzina odvođenja strugotine omogućava odvođenje toplote sa mjesta obrade, tako da toplota ne utiče mnogo na proces obrade. Niži modul elastičnosti onemogućava dovoljno dobro stezanje i samim tim preciznu obradu.

Glavna problematika obrade Al legura je postizanje visokog kvaliteta obrađenih površina. Naslaga na alatu koje se javljaju prilikom obrade, mijenja geometriju obrade, a time i kvalitet obrađenih površina. Uslijed visokih specifičnih pritisaka naslaga se »zavaruje« na površine alata, a uslijed njihovog naglog odvajanja, odvajaju se i dijelovi alata, te ostaju na obrađenoj površini. Poboljšanje osobina aluminijumskih legura postiže se legiranjem sa drugim elementima (Si, Mn, Cu, Mg, Ni, Fe, Cr).

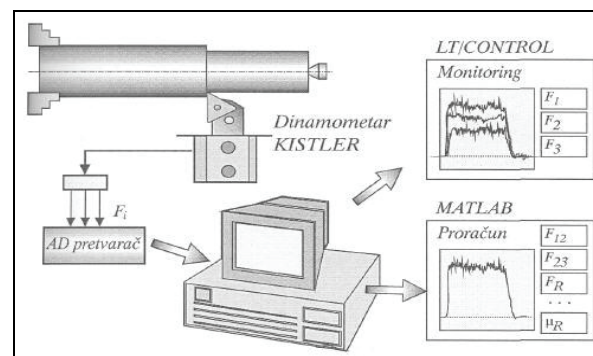
## 4. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Prva grupa eksperimentalnih ispitivanja odnosi se na ispitivanje otpora rezanja na strugu u realnim uslovima. Drugu grupu čine tribološka ispitivanja. Sva eksperimentalna ispitivanja su realizovana na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu. Legure aluminijuma koje su korištene u eksperimentalnim ispitivanjima su AISi12CuMgNi i AISi128CuMgNi (tabela 1). Ove legure imaju dobru korozionu postojanost, zavarljivost i zadovoljavajuću čvrstoću, jer pri radu na povišenim temperaturama upijaju gasove što dovodi do snižavanja čvrstoće. Najviše koriste za izradu klipova SUS motora.

Oznaka legure (sastav)	Mehaničke karakteristike	
	Zatezna čvrstoća $R_m$ [MPa]	Tvrdoća legure HB
AISi12CuMgNi	220	132
AISi12CuMgNi	190	140

Tabela 1. Mehaničke karakteristike ispitivanih Al-Si legura

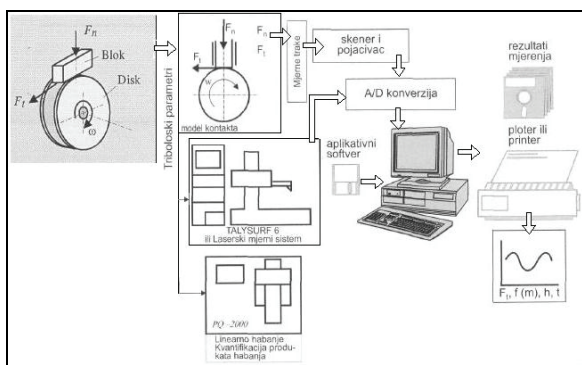
Ispitivanje Al legura sa aspekta otpora rezanja izvršena su na univerzalnom strugu, gdje su mjerene sve tri komponente rezultujućeg otpora rezanja ( $F_1, F_2, F_3$ ). Ispitivanja su vršena u realnim uslovima obrade sa alatima od brzoreznog čelika (HSS) i alatima sa umetnutim pločicama od tvrdog metala (TM) sa i bez upotrebe SHP. Režimi obrade su izabrani u skladu sa ispitivanim materijalima, snagom mašine, stabilnošću sistema predmet obrade-pribor-alat-mašina.



Slika 1. Mjerni lanac za mjerenje otpora rezanja

Mjerni lanac sastoji se od trokomponentnog dinamometra KISTLER, uređaja za pojačavanje signala, uređaja za A/D konverziju signala i PC računara (slika 1). Za akviziciju signala korišten je softver LT/CONTROL. Obrada snimljenih signala izvršena je u programskom paketu STATISTICA.

Eksperimentalna ispitivanja na tribometru »Block on Disk« su realizovana pri različitim vrijednostima brzina klizanja, za različite vrijednosti normalnog opterećenja i u uslovima graničnog podmazivanja čistim uljem za rezanje. Disk je izrađen od ispitivanih Al legura, dok je blok izrađen od materijala alata. U toku ispitivanja na tribometru mjereni su normalno opterećenje, sila trenja i vršen zapis trenutne vrijednosti koeficijenta trenja, srednje vrijednosti koeficijenta trenja i širine traga habanja na bloku. Mjerni lanac za tribološka ispitivanja prikazan je na slici 2. Obrada podataka je izvršena u softveru LT/CONTROL.



Slika 2. Mjerni lanac za tribološka ispitivanja

Na osnovu realizovanih eksperimentalnih ispitivanja definisani su indeksi obradivosti prema relaciji (2).

## 5. AUTOMATSKA OBRADA REZULTATA

### 5.1. Aplikativni softver "AMI 1.1"

Veliki broj podataka, brojni zahtjevi za proračunom i analizom indeksa obradivosti, višestrukost osnova i kriterijuma po kojima se vrši analiza indeksa obradivosti dovele su do razvoja prve verzije aplikativnog softvera pod nazivom AMI 1.1 (*Application For Analysis Machinability Indexes*). AMI 1.1 je razvijen na Mašinskom fakultetu u Banjoj Luci za potrebe analize indeksa obradivosti sa različitim aspektata, pomoću objektno orijentisanog programskog sistema sa *Visual Basic* sintaksom.

AMI 1.1 je razvijen tako da pri proračunu i analizi indeksa obradivosti koristi podatke koji su dobijeni na osnovu:

- teorijskih proračuna i
- eksperimentalnih ispitivanja.

Svaki navedeni pristup proračuna indeksa obradivosti u aplikaciji egzistira zasebno, te predstavlja zaseban modul u proračunskom kodu aplikacije.

Na osnovu eksperimentalnih ispitivanja u realnim uslovima rezanja na strugu i dobijenih korelativnih zavisnosti otpora rezanja i parametara režima obrade, izračunate su srednje vrijednosti otpora rezanja korištenjem trostrukog integrala. U cilju poređenja obradivosti materijala za određenu oblast variranih režima, definisani su indeksi obradivosti sa aspekta sve tri komponente otpora rezanja, pri čemu su uzeti u obzir sljedeći parametri obrade: debljina i širina rezanja, brzina obrade, mehaničko-termičke osobine obrađivanog materijala, mehaničko-termičke osobine materijala alata i geometrija alata. Poređenje materijala je izvršeno i prema koeficijentu trenja izmjenjenom na tribometru, kao i sa aspekta širine traga habanja na bloku i na osnovu toga su formirani indeksi materijala predstavljeni

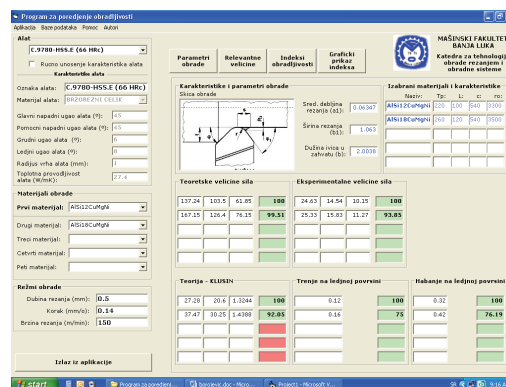
relacijom (2).

Poređenje materijala i definisanje indeksa obradivosti izvršeno je i na osnovu teorijskih pristupa za proračun sve tri komponente rezultujuće sile rezanja [4,5]. Pri tome su uzeti u obzir sljedeći parametri obrade: debljina i širina rezanja, radijus vrha alata, čvrstoća materijala predmeta obrade, koef. sabijanja strugotine, brzina rezanja, geometrija alata. Drugi teorijski pristup [6] za određivanje obradivosti materijala zasnovan je na poznatim vrijednostima ugla smicanja, ugla trenja i veličinama normalne sile ( $N_3$ ) i sile trenje na lednoj površini alata sila ( $T_3$ ) koje su definisane u funkciji čvrstoće obrađivanog materijala i ugla rezanja. Iz odnosa sila na lednoj površini alata određen je koeficijent trenja na lednoj površini alata i izvršeno je poređenje ispitivanih materijala preko indeksa obradivosti datih relacijom (2).

AMI 1.1 ima za cilj za određivanje indeksa obradivosti materijala prema predhodno pomenutim teorijskim modelima i na osnovu eksperimentalnih ispitivanja u realnim uslovima rezanja i tribološkim ispitivanjima. Aplikacija se sastoji od baze podataka za ispitivane materijale, baze podataka alata sa mogućnošću unošenja odgovarajuće geometrije alata, baze znanja za izbor karakterističnih modela struganja za slučaj kosog rezanja i modula za proračun indeksa obradivosti. Karakteristični modeli struganja su važni za određivanje širine i debljine strugotine i ostalih parametara bitnih za definisanje sila rezanja prema teorijskom modelu [4,5].

Aplikacija AMI 1.1 (slika 3) se sastoji iz nekoliko modula i to:

- ulaznog modula za izbor alata,
- ulaznog modula za izbor materijala,
- ulaznog modula za unos tehnoloških parametara,
- izlaznog modula za prikaz karakteristika i parametara obrade,
- izlaznog modula karakteristika materijala,
- izlaznih modula analitičkih vrijednosti indeksa obradivosti,
- izlaznog modula za grafičku komparaciju indeksa obradivosti, i
- izlaznog modula za zbirnu grafičku analizu indeksa obradivosti.

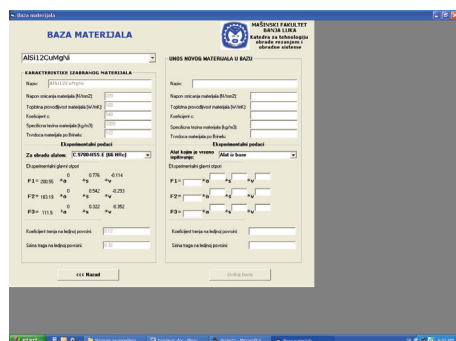


Slika 3. Korisnički interfejs AMI 1.1

Korisnički interfejs je pregledan i jednostavan za rukovanje. Iz padajućih menija se jednostavno biraju ulazni parametri (alat, materijali obrade), dok se u tekstualna polja unose brojčane vrijednosti (režimi obrade). Brojčane vrijednosti režima obrade su aplikativno ograničene prema preporukama za obradu datih materijala. Proces definisanja indeksa obradivosti se odvija u više zasebnih koraka kao što je proračun parametara obrade, proračun karakterističnih veličina, proračun indeksa obradivosti i njihov grafički uporedni prikaz. U svakom koraku je omogućeno naknadno mijenjanje ulaznih parametara za sljedeći korak, a sve u cilju potpunije analize.

Za određivanje indeksa obradivosti sa aspekta otpora rezanja na osnovu eksperimentalnih ispitivanja, u aplikaciju je predhodno potrebno unijeti regresione jednačine za proračun otpora rezanja.

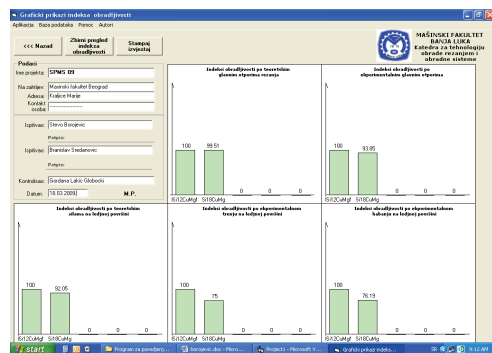
Upravljanje bazama materijala, bazom alata i bazom znanja u aplikaciji lako se izvršava u samom softveru (slika 4).



Slika 4. Upravljanje bazom materijala

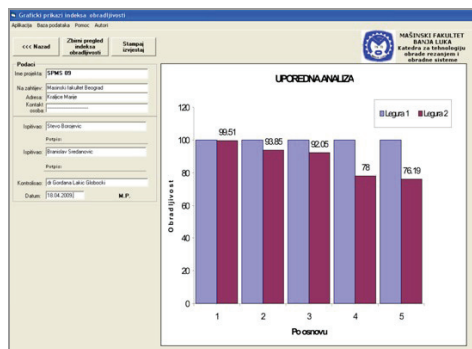
## 5.2. Izlazni rezultati

Aplikacija AMI 1.1 kao izlaz nudi analitički i grafički pregled indeksa obradivosti putem histograma po svakoj osnovi analize i proračuna. Rezultati ispitivanja indeksa obradivosti primjenom teorijskih i eksperimentalnih modela, predstavljeni su na slici 5.



Slika 5. Histogrami indeksa obradivosti

Uporedna analiza indeksa obradivosti određenih prema različitim teorijskim ili ekperimentalnim modelima takođe je data kao izlaz iz aplikacije (slika 6). Histogramski stupci predstavljaju pojedine modele po kojima je vršena analiza. Iz navedenog se zaključuje da ne postoje velika odstupanja između indeksa obradivosti dobijenih teorijskim i eksperimentalnim metodama.



Slika 6. Uporedna analiza indeksa obradivosti

Analizom histograma se zaključuje da Al legura sa manjim procentom silicijuma ima bolju obradivost. Procent silicijuma značajno utiče na trenje na lednoj površini i

povećava habanje alata.

Pojava razlike između teorijskih i eksperimentalnih modela se javlja uslijed nemogućnosti potpune podudarnosti teorijskih modela sa realnim uslovima obrade i uslijed činjenice da teorijski modeli imaju mogućnost variranja šireg spektra ulaznih parametara. Vrijednosti indeksa obradivosti dobijeni na osnovu eksperimentalnih ispitivanja su realniji, te ih treba uzeti kao relevantne. Sigurno da bi se detaljnije analize mogle uraditi i izvršiti poređenja materijala prema različitim kriterijumima ako je eksperimentalnim ispitivanjima obuhvaćen veći broj legura aluminijuma različitog hemijskog sastava što predstavlja pravac naših daljih istraživanja.

## 6. ZAKLJUČAK

Prednost aplikacije je u tome što omogućava široku oblast poređenja ispitivanih materijala sa različitim aspektima i na različitim nivoima. Razvijena aplikacija omogućava povećanje broja ispitivanih materijala i njihovo poređenje prema obradivosti na osnovu manjeg broja eksperimentalnih ispitivanja. Eksperimentalna ispitivanja treba da omogućе što veće približavanje realnih uslova obrade uslovima koji su definisani teorijskim modelima. Pravci daljih istraživanja su: stvaranje baze znanja o ispitivanim materijalima, što bi moglo da doprinese upravljanju i optimizaciji procesa obrade, proširenje aplikacije na proračun indeksa obradivosti materijala koji je zasnovan na definisanju koeficijenta trenja na grudnoj površini alata, razvoj teorijskih modela za proračun habanja alata, mogućnost direktnog povezivanja aplikacije i softverske podrške u mjerni lanac.

## 7. LITERATURA

- [1] Globočki-Lakić, G, Borojević, S., Čiča, Đ., Sredanović, B.: *Development of Application for Analysis of Machinability Index*, Tribology in industry, Vol. 31, pages 57 - 60, N<sup>o</sup>. 1&2 2009.
- [2] Globočki-Lakić, G., Nedić, B., Ivković, B., Golubović Bugarski, V., Čiča, Đ.: *Possibility of Determination of Material Machinability Over Tribological Parameters by Use of Tribometer "Block on Disk"*, 9<sup>th</sup> CIRP International Workshop on Modelling of Machining Operations, Bled, Slovenia, 2006.
- [3] Nedić B., Globočki-Lakić, G.: *Friction Coefficient for Al Alloys and Tool Materials Contact Pairs*, "Tribology in industry", Volume 27, N<sup>o</sup> 3&4, str. 53-56. 2005.
- [4] С.С.Силин: *Метод подоби́я при резании материалов МАШИНОСТРОЕНИЕ*, Москва, 1979.
- [5] В.Ф. Безъязычий, и др.: *Оптимизация технологических условий механической обработки деталей авиационных двигателей*, МАИ, Москва, 1993
- [6] Вулф А.М. и др. *Резание металов*, Машгиз, Москва-Ленинград, 1963

**Autori:** Stevo Borojević dipl.inž.maš.<sup>1</sup>, Branislav Sredanović dipl.inž.maš.<sup>1</sup>, doc. dr Gordana Lakić-Globočki dipl.inž.maš.<sup>1</sup>, prof. dr Bogdan Nedić dipl.inž.maš.<sup>2</sup>, mr Đorđe Čiča dipl.inž.maš.<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Vojvode Stepe Stepanovića 75, 78000 Banja Luka, Republika Srpska (B&H), Tel.: +387 (0)51 462 400,

<sup>2</sup>Mašinski fakultet Kragujevac, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac, Srbija, Tel.. +381 (0)34 335 990

E-mail: [stevoborojevic@hotmail.com](mailto:stevoborojevic@hotmail.com)  
[sredanovic@gmail.com](mailto:sredanovic@gmail.com)  
[gnm@urc.bl.ac.yu](mailto:gnm@urc.bl.ac.yu)  
[ciled@blic.net](mailto:ciled@blic.net)



Rančić, B., Lazarević, A., Lazarević, D.

## ANALIZA ENERGETSKOG BILANSA KOD SEČENJA PLAZMOM\*)

**Rezime:** U poslednjim godinama došlo je do porasta interesovanja za industrijsku primenu procesa sečenja plazmom. Pojava finijih mlaznica i korišćenje kiseonika kao gasa za sečenje omogućili su da se uređajima sa plazmom postiže bolji kvalitet sečenja od onog, koji se po tačnosti i ceni zahteva u industriji. Zbog ovoga, sečenje plazmom može da bude konkurentno sečenju pomoću lasera (koje je znatno tačnije, ali i znatno skuplje) i autogenom sečenju kiseonikom (koje je jeftinije, ali i netačnije). Nasuprot industrijskom razvoju, postoji samo manji broj naučnih publikacija o samom procesu sečenja plazmom.

Da bi se proces sečenja plazmom učinio jeftinijim, treba smanjiti energetske gubitke. Zbog toga su u radu, najpre, date opšte karakteristike plazma luka sečenja u realnoj konfiguraciji sečenja, a zatim je izvršena teorijska analiza raspoložive energije, energije koja se troši na sečenje, kao i različitih energetskih gubitaka (deo energije koji se gubi zračenjem, deo energije koji se gubi provođenjem kroz metal, deo energije koji se gubi ispod metalne ploče). Dat je i osvrt na slučaj sečenja kiseoničkom plazmom kada se stepen korisnog dejstva povećava zbog energije oslobođene egzotermnom reakcijom oksidacije.

**Ključne reči:** plazma, sečenje, energetski bilans

## ANALYSIS OF ENERGY CONSIDERATION IN PLASMA CUTTING

**Abstract:** In recent years, metal plasma cutting processes have increasingly attracted the attention of industry. The appearance of finer nozzles and the use of oxygen as cutting gas have allowed plasma devices to offer a better cutting quality that can satisfy industrial requirements of precision and costs. The plasma technique can therefore rival with laser cutting (which is more precise but also more expensive) and oxygen cutting (which is less expensive but less accurate). In spite of its industrial development, not many scientific publications exist on the plasma cutting process.

Minor energy losses define lower costs of production. Therefore, in this article are presented general characteristics of a plasma arc in real cutting configuration. Also, theoretical analysis of the total power available in the hole, the power partition used for fusion and different power losses (the power given by radiation, the power given by convection and conduction through a metal plate, the power under the metal plate) are given. Plasma cutting with a oxygen as cutting gas are represented. The exothermic reaction of oxygen in the plasma gas with the iron in steel enables more effective energy.

**Key words:** plasma, cutting, energy consideration

### 1. UVOD

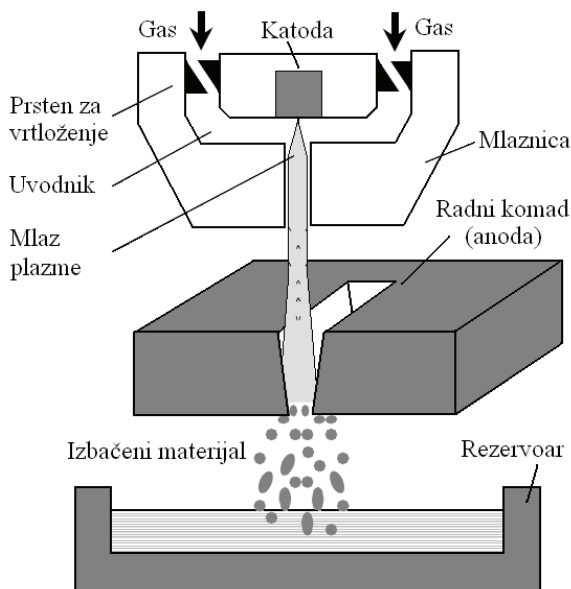
Ranih 50-ih godina prošlog veka otkriveno je da se osobine otvorenog mlaza plazme mogu izuzetno izmeniti usmeravanjem električnog luka kroz bakarnu mlaznicu, koja se nalazi između elektrode (katode) i radnog materijala (anode). Umesto rasipanja u otvoren luk, mlaznica vrši sužavanje mlaza u mali poprečni presek. Ovo značajno povećava otporno zagrevanje mlaza, tako da se i temperatura i napon mlaza uvećavaju. Nakon što prođe kroz mlaznicu, plazma izlazi u obliku dobro usmerenog i intenzivno vreloug mlaza plazme velike brzine, [1], [2], [3], [4].

Karakteristike mlaza plazme se mogu znatno promeniti menjanjem tipa gasa, brzine protoka gasa, napona luka i veličine mlaznice. Na primer, ako se koristi nizak protok gasa male brzine, mlaz plazme će biti izuzetno koncentrisani izvor toplote, idealan za zavarivanje. Nasuprot, ako se brzina protoka gasa dovoljno uveća, mlaz plazme će preseći put kroz radni materijal; a brzina mlaza plazme će biti dovoljna da raznese rastopljen metal koji nastaje zbog luka plazme. U ovom radu će se razmatrati samo proces sečenja plazmom uz korišćenje mlaza plazme koji je nastao pod uslovima visokoug napona i velike brzine protoka gasa, [3], [5], [6], [7].

Unutrašnje komponente gorionika imaju bitan uticaj na sposobnost i kvalitet sečenja, pa su zbog toga važne. Komponente gorionika su: katoda, prsten za vrtloženje i mlaznica, na koju može da se doda i zaštitna čaura (slika 1). Gas plazme teče kroz mlaznicu i vrtloži se pomoću prstena za vrtloženje. Moguć je i tok drugoug gasa, koji se naziva zaštitni gas i odvija se između mlaznice i zaštitne čaure (nije prikazana na slici 1). Elektroni se pomoću termjonske emisije dovode u luk iz dodatoug refraktornoug metalnoug umetka (hafnijumska katoda).

Sečenje plazmom se najčešće ostvaruje sa vazduhom, kiseonikom ili azotom kao plazma gasom. Kada se sečenje vrši kiseonikom ili vazduhom, najčešće se koristi hafnijum kao emiter (katoda), zato što može da podnese oksidacionu atmosferu. Mlaz plazme se sužava mlaznicom, koja vrtloži gas plazme, i strujom zaštitnoug gasa (ako se koristi). Ovo suženje povećava gustinu električne struje, toplotu i brzinu mlaza plazme. Mlaz plazme se može koristiti ili u transfer modu (napajanje je između elektrode i radnoug komada), ili u ne-transfer modu (napajanje je između elektrode i mlaznice). Transfer mod se gotovo uvek koristi pri sečenju plazmom, jer se dovedena toplota najefikasnije primenjuje kada je luk u električnoug kontaktu sa radnim komadom.

\*) Ovaj rad je sastavni deo projekta 'Modeliranje i korelacija parametara procesa rezanja plazmom metodama veštačke inteligencije', koji finansira Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije



Slika 1. Shematski prikaz sečenja plazmom

## 2. ENERGETSKI BILANS PRI SEČENJU

Toplota se u mlazu plazme prenosi snažnom konvekcijom (provodenjem) plazma gasa, čiji tok je direktno aksijalno naniže. U toku rezanja, mlaz plazme prati konturu površine čela reza, a toplota se iz jezgra mlaza plazme prenosi na površinu za topljenje površine čela mlaza i super zagrevanje istopljenog metala. Dakle, neka toplota, prenetna na površinu čela reza, difunduje kroz ploču i povišuje joj temperaturu. Ako plazma gas sadrži kiseonik, dolazi i do hemijske reakcije između plazma gasa i tek istopljenog metala i ostvaruje se dodatno zagrevanje zbog oksidacije.

Procenat ulazne električne snage, koja je raspoloživa za rezanje, zavisi od količine električne energije pretvorene u toplotnu energiju u visokotemperaturskom jezgru mlaza plazme. Količina toplote koja se gubi iz luka unutar mlaznice je mala, a zbog otežanog pristupa hladnijeg plazma gasa u jezgro mlaza. U oblasti ispod komore mlaznice je, isto tako, malo prodiranje gasa u jezgro mlaza, kao što je i malo širenje mlaza sa povećanjem rastojanja. Većina električne energije, koja uđe u oblast mlaza ispod mlaznice, se gubi iz mlaza, tj. predaje se okolini, [7].

Treba naglasiti da je oblast čela reza deo okoline za oblast razvijenog mlaza plazme. Osim toga, kada se plazma kreće da bi se ostvario rez, jedino vodeća strana mlaza formira površinu čela reza. Dakle, samo 50% raspoložive termičke energije mlaza plazme u oblasti reza može da se prenese površini čela reza.

### 2.1 Bilans snaga iznad ploče

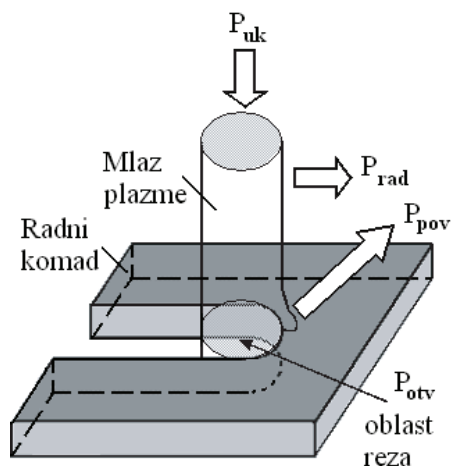
U studiji energetskog bilansa javljaju se tri veličine: ukupna snaga data procesu ( $P_{uk}$ ), snaga dovedena u oblast reza ( $P_{otv}$ ) i snaga rasipana zračenjem, tj. radijacijom ( $P_{rad}$ ). U toku rezanja samo deo unete snage ( $P_{uk}$ ) prolazi kroz radni komad kroz oblast reza ( $P_{otv}$ ), dok se drugi deo gubi radijacijom ( $P_{rad}$ ) a deo se zadržava u ploči ( $P_{pov}$ ), sl. 2. Uneta snaga  $P_{uk}$  je jednaka, [7]:

$$P_{uk} = U \cdot I = P_{otv} + P_{rad} + P_{pov} \quad (1)$$

gde je  $U$  - napon luka, a  $I$  - intenzitet struje.

Poznavanjem ukupno unete snage i sračunavanjem  $P_{otv}$  i  $P_{rad}$  može da se odredi i  $P_{pov}$ . Snaga transportovana kroz

oblast reza  $P_{otv}$  iznosi nešto preko 70% ukupnog ulaza, dok na snagu koja se gubi u ploči ( $P_{pov}$ ) otpada oko 20%, [3]

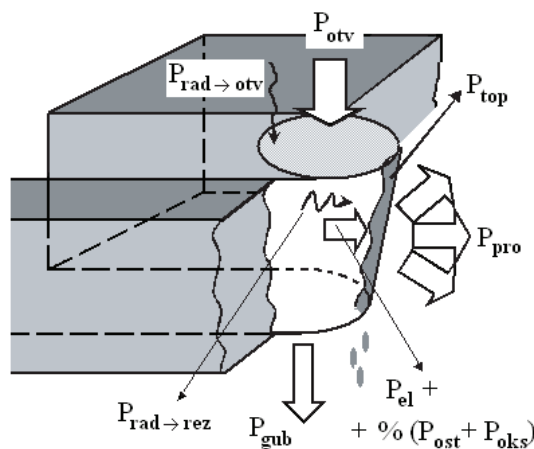


Slika 2. Raspodela snage iznad metalne ploče

### 2.2 Bilans snaga u oblasti reza

Snaga oslobođena u oblasti reza  $P_{otv}$  sastoji se od četiri ulaza (slika 3): električne snage transportovane plazmom ( $P_{el}$ ), snage oslobođene konvekcijom (provodenjem) kroz oblast reza ( $P_{cv}$ ), snage dobijene kondukcijom (prenosom) kroz oblast reza ( $P_{cd}$ ) i snaga zračenja kroz oblast reza ( $P_{rad \rightarrow otv}$ ). [3], tj.

$$P_{otv} = P_{el} + P_{cv} + P_{cd} + P_{rad \rightarrow otv} \quad (2)$$



Slika 3. Raspodela energije (snage) za sečenje

Očekuje se, da se u prenosnim, slobodno-gorućim lukovima, približno 70% ulazne električne snage pretvori u plazma snagu u vrelom jezgru. U stvarnosti, termička snaga mlaza plazme, koja je raspoloživa za rezanje na površini čela reza, iznosi samo 35% od ulazne električne snage, jer je samo 50% površine plazme u oblasti reza iskorišćeno za površinu čela reza. Dakle, termička energija na čelu reza  $P_{otv}$  raspoloživa samo od plazme, iznosi približno  $0.5 \times 0.7 \cdot P_{uk} = 0.35 \cdot P_{uk}$ , tj. 35% od ulazne električne energije.

Ipak, ova termička energija može da se poveća energijom oksidacije gvožđa, kada se kao plazma gas koristi gas koji sadrži kiseonik.

Raspoloživa snaga  $P_{ras}$  se sastoji od snage direktno primljene kroz oblast reza ( $P_{otv}$ ) i snage reakcije oksidacije koja se odvija u rezu ( $P_{oks}$ ), [3]:



$$P_{ras} = P_{otv} + P_{oks} \quad (3)$$

U proračunu treba usvojiti da samo nedisocirani kiseonik (temperature disocijacije kiseonika iznosi 3800 K) može da reaguje sa metalnom pločom. Na osnovu ove pretpostavke, zavisno od rastojanja mlaznice od ploče lima i prečnika otvora mlaznice, menja se i količina kiseonika koja može da reaguje sa metalom i kreće se u granicama od 35% do samo 12%. Gornja granica odgovara manjim prečnicima otvora mlaznice i manjem rastojanju mlaznice od lima. Ove razlike se mogu objasniti upumpavanjem okolnog vazduha sa porastom rastojanja  $d$  i prečnikom otvora (funkciji od  $l_g$ ).

Dakle, ukupna snaga raspoloživa u otvoru ( $P_{ras}$ ) predstavlja sumu snaga dobijenih od entalpijskog fluksa elektrona ( $P_{el}$ ), od konvekcije ( $P_{cv}$ ), kondukcije ( $P_{cd}$ ) i radijacije ( $P_{rad \rightarrow rez}$ ) i od snage koja se dobija reakcijom oksidacije ( $P_{oks}$ ):

$$P_{ras} = P_{el} + P_{cv} + P_{cd} + P_{rad \rightarrow rez} + P_{oks} \quad (4)$$

Snaga izračena plazmom na čelo reza ( $P_{rad \rightarrow rez}$ ) je veoma mala u odnosu na ostale komponente, pa se zanemaruje, ali nedvosmisleno potvrđuje činjenicu da na frontu (čelu) reza postoje metalne pare, koje nisu uzete u obzir.

### 2.3 Odnos snage utrošene za topljenje prema raspoloživoj snazi

U ovom poglavlju je izvršeno teorijsko određivanje snage potrebne za topljenje metala ( $P_{top}$ ) i upoređivanje sa raspoloživom snagom ( $P_{ras}$ ), nađenom prema izrazu (4). Snaga potrebna za topljenje metala ( $P_{top}$ ) se obezbeđuje snagom koja plazmom dospeva u oblast reza ( $P_{otv}$ ), kao i snagom oslobođenom egzotermnom reakcijom oksidacije ( $P_{oks}$ ):  $O_2 + 2Fe \rightleftharpoons 2FeO$ . Prečnik oblasti reza jednak je  $l_g$ . Sva raspoloživa snaga se ne koristi za proces topljenja, deo se gubi provođenjem kroz metala ( $P_{pro}$ ), a deo ispod metalne ploče ( $P_{gub}$ ).

U cilju određivanja snage (energije), upotrebljene za topljenje materijala ploče, najpre je potrebno odrediti  $E_{top}$ , tj. energiju koja je potrebna za topljenje  $1 \text{ m}^3$  metala (čelika):

$$E_{top} = \left[ \int_{T_p}^{T_i} C_p(T) dT \right] + L_t \cdot \rho_{(300K)} \quad (5)$$

gde su:  $L_t = 272 \text{ kJ/kg}$  - latentna toplota topljenja,  
 $\rho = 7870 \text{ kg/m}^3$  - specifična gustina gvožđa,  
 $C_p(T) = 449 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$  - specifična toplota gvožđa i  
 $T_i = 1810 \text{ K}$  - temperatura topljenja gvožđa.

Obično se usvaja da je temperatura ploče  $T_p = 500 \text{ K}$ , zbog pretpostavke da je radni komad predgrejan (zagrejan) energetskim gubicima plazme iznad ploče i snagom  $P_{pro}$ , tako da se dobija da je energija potrebna za topljenje  $1 \text{ m}^3$  čelika  $E_{top} = 12800 \text{ MJ/m}^3$ .

Snaga potrebna za topljenje materijala ploče  $P_{top}$  sada može da se odredi kao, [3]

$$P_{top} = E_{top} \cdot s \cdot \left( \frac{l_g + l_d}{2} \right) \cdot v_{gor} \quad (6)$$

gde su:  $l_g$  i  $l_d$  - širina reza sa gornje i donje strane ploče, respektivno,  
 $s$  - debljina ploče i  
 $v_{gor}$  - brzina kretanja gorionika).

Napominje se, da se energija potrebna za topljenje metala može da izrazi i kao energija po dužnom metru reza ( $E_{topm}$ ) i sračunava se prema izrazu:

$$E_{topm} = M \cdot \left[ C_p(T) \cdot (T_i - T_{ok}) + L_t \right] \cdot [J/m] \quad (7)$$

gde su:  $M$  - masa istopljenog materijala po dužnom metru reza (u  $\text{kg/m}$ ),  
 $T_{ok} = 300 \text{ K}$  - temperatura okoline,  
a ostale oznake imaju isto značenje i vrednosti kao u jednačini (5) i važe za niskouglenični čelik.

Masa istopljenog i uklonjenog metala iz reza po dužnom metru reza može se posmatrati kao funkcija rastojanja  $x$  duž reza i određena je izrazom:

$$M = \rho_{(300K)} \cdot \int_{-s}^0 l(z) dz \cdot [kg/m] \quad (8)$$

gde je:  $l(z)$  - širina reza u  $[m]$  na bilo kom položaju po debljini ploče  $z$ .

Integraljenje se vrši po debljini ploče  $s$  od dna prema vrhu reza.

Pri velikim brzinama rezanja, veće topljenje metala blizu dna ploče od niskougleničnog čelika ostvaruje se vazdušnom plazmom u odnosu na kiseoničku plazmu.

Kada se kiseonik koristi kao plazma gas, tada energija oslobođena oksidacijom iznosi približno 25% od ulazne električne energije. Količina energije oslobođena oksidacijom je skoro jednaka energiji, potrebnoj za topljenje metala u rezu. Kada se kao plazma gas koristi vazduh, tada je energija oksidacije samo oko 5% od ukupne energije, [7]. Ovim je potvrđeno da funkcija kiseonika u plazmi nije da oslobađa više energije za topljenje (kao kod autogenog rezanja, tj. sečenja kiseonikom), već pre da ima ulogu pri izbacivanju šljake, jer fluidizuje sloj tečnog metala.

Značajna količina raspoložive termičke energije se troši na topljenje materijala da bi se dobio rez. Ipak, deo energije odlazi na super zagrevanje istopljenog metala, koji je izbačen sa dna ploče. Isto tako, deo raspoložive toplote difunduje u ploču i povišuje joj temperaturu.

Snaga korišćena za topljenje metala ploče može, sa aspekta komponenata koje sadrži, da se odredi prema izrazu:

$$P_{top} = P_{el} + P_{ost} + P_{oks} \quad (9)$$

Kod prethodne jednačine je usvojeno da se sva električna snaga ( $P_{el}$ ), sva snaga koja se dobija reakcijom oksidacije ( $P_{oks}$ ) i sva ostala snaga ( $P_{ost}$ ) [od konvekcije ( $P_{cv}$ ), kondukcije ( $P_{cd}$ ) i radijacije ( $P_{rad \rightarrow rez}$ )] troši na topljenje. Praksa je pokazala, [6], da se sva električna snaga ( $P_{el}$ ) troši na topljenje, ukoliko koren mlaza deluje na čelo reza. Međutim, snage dobijene od drugih izvora i iskorišćene za topljenje ne koriste se u potpunosti. Zbog toga treba da se odrede procenti učešća ovih snaga, pa izraz za određivanje snage za topljenje metala dobija oblik:

$$P_{top} = P_{el} + x\% (P_{ost} + P_{oks}) \quad (10)$$

odnosno

$$P_{top} = P_{el} + \% (P_{cv} + P_{cd} + P_{rad \rightarrow otv} + P_{oks}) \quad (11)$$

$P_{ost}$  predstavlja glavnu komponentu, na koju otpada i više od 60%, dok energija oksidacije iznosi oko 12% ukupne ulazne energije. Kod povećanja debljine ploča opada komponenta  $P_{el}$  (sa 35% na 20%).

Nekoliko istraživačkih radova, koji su se bavili količinom toplote koja difunduje sa površine čela reza u ploču pokazala su da se energija izgubljena u ploči (kao deo energije upotrebljene za topljenje) povećava sa brzinom rezanja. Pri manjim brzinama rezanja, energija izgubljena u ploči može da bude i veća od 30% energije, potrebne za topljenje. Ostatak energije u plazmi može da se provede ispod ploče i da postane izgubljena energija. Kvantitativna procena koliko se raspoložive energije troši na različite procese rezanja plazmom nije moguća. U slučaju sečenja sa plazma gasovima koji oksidišu nisu saopštene čak ni približne procene o energiji oslobođenoj oksidacijom.

U proračunima za vazduh i kiseonik, a u cilju određivanja raspoložive energije za sečenje 1 m reza, raspoloživoj energiji plazme se dodaje i energija nastala oksidacijom. Razlika između raspoložive termičke energije i energije procenjene za topljenje metala je višak energije, koji je suma energije izgubljene na zagrevanje ploče, energije utrošene na super zagrevanje istopljenog metala i energije koja se gubi kao suvišna energija.

Pod pretpostavkom da je 45% (jer samo jedna polovina mlaza plazme učestvuje u rezanju) od ukupnog masenog protoka kiseonika raspoloživo za reakciju oksidacije na površini čela reza, može da se odredi maksimalna količina materijala po jedinici dužine reza koja može da oksidiše, s timda je veća oksidacija moguća na manjim brzinama rezanja.

U slučaju azotne plazme kao raspoloživa energija javlja se samo energija plazme i može da se usvoji da je jednaka 35% od električne energije. Količina toplote koja je difundovala u ploču može da bude značajna. Deo energije pomaže u super zagrevanju istopljenog metala, koji treba da se izbaciti tokom rezanja. Rezanje u azotu nije moguće pri većim brzinama, uprkos raspoloživosti više energije, nego što je potrebno za topljenje metala.

Neke procene pokazuju da, pri rezanju kiseonikom, raspoloživa energija iznosi ~60% od ulazne električne energije. Energija koja se koristi za topljenje nalazi se u opsegu od oko 15% (pri manjim brzinama rezanja) i oko 40% (pri velikim brzinama rezanja, na primer oko 4 m/min). Ukupno raspoloživa energija (plazme i oksidacije) za rezanje kao dela električnog ulaza iznosi 35% i 40% za azot i vazduh, respektivno. Energija za topljenje kreće se od 14.5% do 25% za azot i od 16% do 40% za vazduh, [3], [6], [7].

Energija, koja je veća od energije potrebne za topljenje, najmanja je za vazduh u blizini granice rezanja. Takođe, energija raspoloživa za rezanje u kiseoniku je u višku u odnosu na energiju potrebnu za topljenje, jer se značajan deo raspoložive energije oslobađa oksidacijom. Raspoloživi višak energije u kiseoniku pri velikim brzinama rezanja ne omogućava topljenje reza blizu dna ploče, što uslovljava manju graničnu brzinu rezanja za kiseonik u odnosu na vazduh.

## 10. ZAKLJUČAK

Nastajanje reza pri rezanju plazmom određeno je dinamičkom ravnotežom između brzine kojom se toplota predaje od plazme prema čeonj površini reza i brzine difuzije toplote u metalnu ploču, kojom se podiže temperatura metala na čeonj površini reza do stanja topljenja. Primarna razmena toplote od mlaza plazme prema čeonj površini reza je transferzalna u odnosu na mlaz plazme, koji prati konturu čeonj površine plazme. Razmena toplote je praćena odgovarajućim zračenjem luka plazme i termičkom difuzijom toplote kroz granični sloj između luka plazme i čeonj površine reza. Osim toga, ako se oksidirajući gasovi koriste za rezanje, tada (pored dotoka toplote iz luka plazme) i oksidacija gvožđa može da utiče na razmenu toplote na čeonj površini reza.

## 11. LITERATURA

- [1] Esmaeli, A., Li, S., Ke, H.: *Conducted EMI Suppression in Plasma Cutting Power Supply*, Plasma Science & Technology, Vol.7, No.6, 3170-3173, December 2005.
- [2] Fan, Q., Wang, L., Wang, F.: *3D simulation of the plasma jet in thermal plasma spraying*, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 166, 224-229, 2005.
- [3] Freton, P., Gonzalez, J.J., Gleizes, A., Camy-Peyret, F., Caillibotte, G., Dellzene, M.: *Numerical and experimental study of a plasma cutting torch*, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 35, 115-131, 2002.
- [4] Freton, P., Gonzalez, J.J., Gleizes, A.: *Temperature measurements in a shock wave created by a cutting plasma torch*, International Conference on Phenomena in Ionized Gases [26th], Proceedings, Volume 4, 153-154, Held in Greifswald, Germany on 15-20 July 2003.
- [5] Girard, L., Teulet, Ph., Razafinimanana, M., Gleizes, A., Camy-Peyret, F., Baillot, E., Richard, F.: *Experimental study of an oxygen plasma cutting torch: I. Spectroscopic analysis of the plasma jet*, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 39, 1543-1556, 2006.
- [6] McKelliget, J. W.: *Numerical computation of coupled heat transfer, fluid flow, and electromagnetism: the inductively coupled plasma torch*, Advanced Computational Methods in Heat Transfer, Vol. 3, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York, 1990.
- [7] Ramakrishnan, S., Shrinet, V., Polivka, F. B., Kearney, T. N., Koltun, P.: *Influence of gas composition on plasma arc cutting of mild steel*, Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 33, 2288-2299, 2000.

**Autori: Prof. dr Bojan Rančić, Prof. dr Dragoljub Lazarević**, Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno-informacione tehnologije i menadžment, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš, Srbija, Tel.: +381 18 500-687,

**mr Anđela Lazarević**, Ministarstvo za energetiku i rudarstvo, 11000 Beograd, Srbija.

E-mail: [brancic@masfak.ni.ac.rs](mailto:brancic@masfak.ni.ac.rs)  
[dlazarevic@masfak.ni.ac.rs](mailto:dlazarevic@masfak.ni.ac.rs)  
[andjela.lazarevic@mre.gov.rs](mailto:andjela.lazarevic@mre.gov.rs)



Janković, P., Lazarević, A., Lazarević, D.

## REZANJE PLAZMOM I UNAPREĐENJE KVALITETA PRESEČNE POVRŠINE\*

**Rezime:** Rezanje plazmom predstavlja jednu od nekonvencionalnih metoda obrade, koje se karakterišu time što nema direktnog kontakta alata i obratka, odnosno, kod kojih se obrada zasniva na korišćenju fizičkih i hemijskih procesa, odnosno različitih vrsta energije. Sam proces rezanja plazmom zasnovan je na korišćenju mlaza jonizovanog gasa - plazme, koji udara u površinu obratka, zagreva ja i topi materijal obratka.

Proces rezanja plazmom razvijen je u zadnjih nekoliko decenija, prvenstveno za rezanje nerđajućeg čelika i aluminijuma. U početku, dominantan metod rezanja, bio je termičko sečenje vazdušnom plazmom. Proces se, pored niza očiglednih prednosti, odlikovao i nizom problema, kao na primer brzo trošenje elektrode rezne glave, oksidacija površine reza i loš kvalitet reza.

**Ključne reči:** nekonvencionalni postupci obrade, rezanje plazmom, kvalitet presečne površine

## PLASMA ARC CUTTING AND IMPROVEMENT IN CUT QUALITY

**Abstract:** Plasma arc cutting was developed 20 years ago primarily for cutting stainless steel and aluminium. Although favourable economically, mild steel was seldom cut with this process because of three fundamental limitations: relatively poor cut quality, equipment reliability, and inability of the earlier cutting machines to handle plasma cutting speeds.

Today, because of advances in equipment design and improvement in cut quality, previously unheard of applications, such as multiple torch cutting of mild steel, are becoming commonplace.

**Key words:** Non-conventional technology, Plasma arc cutting, Cut quality

### 1. UVOD

Sam proces rezanja plazmom razvijen je pedesetih godina prošlog veka i zasnovan je na korišćenju mlaza jonizovanog gasa - plazme, koji udara o površinu obratka, zagreva ga u zoni rezanja, topi materijal obratka i delimično ga isparava. Mlaz plazme reže materijal tako što udarom o površinu obratka oslobađa energiju, koja je bila utrošena na jonizaciju plazma gasa. Udaljavanje rastopljenog materijala iz zone rezanja, vrši se dejstvom kinetičke energije mlaza plazme. Primenom plazma uređaja ekonomično je rešen problem rezanja metala kao što su nerđajući čelici i vatrootporni čelici, obojeni metali (aluminijum, bakar i td.) i njihove legure. Ova obrada je značajno unapređena kroz godine praktične primene i razvoja različitih proizvoda, obezbeđujući dobar kvalitet kod rezanja, graviranja i probijanja, sa velikim brzinama sečenja i niskim troškovima rada.

Obradak, određenog kvaliteta, predstavlja izlaz iz procesa rezanja plazmom, na osnovu koga se donose zaključci o korektnosti izabranih radnih parametara i podesivosti procesa rezanja. Kvalitet obrade radnog predmeta se odnosi na tačnost obrade, koja obuhvata tačnost oblika i tačnost mera i na kvalitet reza. Kvalitet reza obuhvata geometriju reza, kvalitet površine reza i fizičko-mehaničke karakteristike materijala u oblasti reza [5].

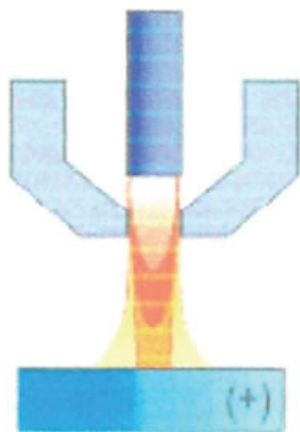
### 2. PREGLED ISTORIJSKOG RAZVOJA REZANJA PLAZMOM

Godine 1941. američka vojna industrija je pokušala da pronade bolji način spajanja lakih metala, za potrebe proizvodnje vojnih aviona. Električni luk je korišćen za topljenje metala, a zaštitni inertni gas oko luka, sprečavao je

da istopljeni metal reaguje sa kiseonikom iz vazduha. Ova nova metoda obrade - TIG obrada (Tungsetn Inert Gas) predstavljala je odlično rešenje za potrebe vrlo specifičnih zahteva visoko kvalitetnog zavarivanja. Ovim je označen početak značajnije primene gasova, kao što su argon i helijum [1].

Do 1951. godine TIG obrada je prvenstveno korišćena kao novi metod zavarivanja, za dobijanje visoko kvalitetnih zavarenih spojeva kod specijalnih materijala. Tokom usavršavanja procesa TIG obrade otkriveno je da se sa smanjenjem poprečnog preseka otvora mlaznice, koja usmerava inertni gas od TIG elektrode rezne glave do obratka, svojstva otvorenog TIG luka mogu značajno unaprediti. Smanjenjem otvora mlaznice sužava se plazma luk, povećavajući time brzinu gasa, temperaturu i napon luka, dok impuls jonizovanog i nejonizovanog gasa udaljava rastopljeni materijal iz zone rezanja, usled velike brzine mlaza. Ovim je stvorena mogućnost korišćenja plazma luka za rezanje materijala, umesto dotadašnje njegove primene samo za zavarivanje. Na slici 1. je prikazan plazma luk, za čije se formiranje koristi argon, kao plazma gas.

\* U radu je prikazan deo istraživanja projekta iz oblasti Tehnološki razvoj, pod naslovom "Modeliranje i korelacija parametara procesa rezanja plazmom metodama veštačke inteligencije", koji finansira Ministarstvo za nauku i tehnologiju Republike Srbije

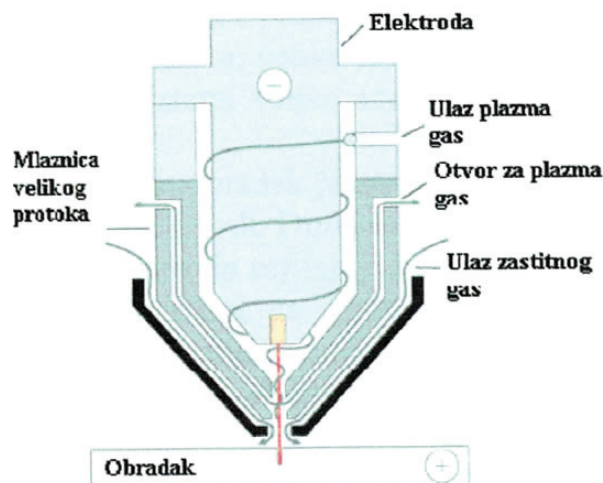


Slika 1. Plazma luk

Godine 1957. predstavljena je komercijalna verzija tehnologije rezanja plazmom. Takav sistem, kasnije nazvan konvencionalno rezanje plazmom, preovladavao je u periodu između 1957. i 1970. godine. Ovaj postupak je bio težak za primenu, ukoliko bi korisnik trebalo da reže različite vrste materijala različitih debljina. Na primer, ako se konvencionalno rezanje plazmom koristilo za rezanje nerđajućeg čelika i aluminijuma, neophodno je bilo koristiti različite vrste gasova, različitih protoka, da bi se postigao optimalni kvalitet reza. Često je bilo neophodno koristiti veoma skupe smeše gasova, kao što je argon sa vodonikom.

S obzirom da se kod tradicionalnog metoda rezanja čelika koristi kiseonik, logično je da su inženjeri od samog početka pokušavali da razviju korišćenje kiseonika kao plazma gasa. Tako je, 1983. godine, nastalo rezanje kiseoničkom plazmom (Oxygen Plasma Cutting). Međutim, veoma visoke temperature na vrhu elektrode i prisustvo čistog kiseonika, prouzrokovali bi brzo oštećenje materijala elektrode, usled čega je dolazilo do nemogućnosti formiranja reza ili je rezanje trajalo suviše kratko. Razvojem metalurgije omogućena je primena materijala za elektrode koji imaju veću postojanost. Zahvaljujući tome, vazduh i kiseonik, kao plazma gasovi, sve se više koriste u industriji. Rezanje kiseoničkom plazmom pruža širok opseg brzina rezanja uz povećanje od 30% u odnosu na konvencionalno rezanje plazmom. Tokom rezanja se dobijao kvalitetan i pravougaon rez.

Na početku poslednje decenije prošlog veka, predstavljen je prvi plazma uređaj velike preciznosti, koji je davao pravougani rez i smanjivao širinu reza, uz istovremeno povećanje brzine rezanja. Na slici 2. predstavljena je rezna glava za precizno sečenje plazmom.



Slika 2. Rezna glava za precizno sečenje plazmom

Očekivanja su da će kvalitet reza kod plazma sečenja biti isti kao i kod laserskog sečenja.

### 3. KVALITET OBRADNE KOD PLAZMA SEČENJA

Kvalitet obrade radnog predmeta kod rezanja plazmom se odnosi na:

1. Tačnost obrade, koja obuhvata tačnost oblika i tačnost mera.
2. Kvalitet reza se odnosi na geometriju reza, kvalitet površine reza i na fizičko-hemijske karakteristike materijala u oblasti reza. Treba imati u vidu da je teško napraviti jasnu granicu između pojedinih elemenata kvaliteta reza, koji se odnose na geometriju reza, kvalitet površine reza i td, odnosno neki elementi se mogu svrstati u više navedenih grupa [1,3].

#### 3.1 Tačnost obrade plazma sečenja

Tačnost obrade plazma sečenja obuhvata tačnost oblika i tačnost mera, na koje pre svega utiču karakteristike koordinatne mašine, tj. tačnost pozicioniranja, tačnost držanja pozicije i udaljenost rezne glave od radnog predmeta (obratka).

Tačnost mera definisana je standardom ISO 9013:1998, kojim se definišu granična odstupanja nazivnih mera (mera datih na crtežu) u odnosu na stvarne mere (mere izmerene na očišćenim površinama dobijenih sečenjem). Granične mere navedene u ovom standardu važe za mere bez naznačenih tolerancija, a za određene debljine i odnose dužina/širina radnog predmeta [2].

#### 3.2 Kvalitet reza

Kvalitet reza se odnosi na geometriju reza, kvalitet površine reza i fizičko-hemijske karakteristike materijala u oblasti reza. To su, takođe, i veličine na čije se vrednosti može uticati regulisanjem toka procesa plazma sečenja.

#### 3.3 Geometrija reza

Geometrija reza je, pored osnovnih elemenata reza (gornja i donja ivica reza, leva i desna površina reza), određena elementima kvaliteta reza, koji se mogu sistematizovati na sledeći način: širina reza, ugao nagiba reza, topljenje ivice reza i troska. Na dimenzije dela najviše utiču: širina reza i ugao nagiba reza.

Širina reza je značajna za tačnost dimenzija obratka. Opšte pravilo za procenu širine reza, kod plazma sečenja, je da je širina reza okvirno jedan do dva puta veća od prečnika otvora mlaznice. Faktori koji utiču na širinu reza su: veličina mlaznice, brzina sečenja, jačina struje i udaljenost rezne glave od obratka.

Odstupanje ugla reza je zakošenje stranice reza, u odnosu na prav ugao. Na odstupanje ugla reza utiče i smer kretanja rezne glave, upravnost rezne glave, udaljenost rezne glave od obratka (što je ova udaljenost manja, manje je odstupanje ugla reza i obrnuto) i brzina sečenja (odstupanje ugla reza smanjuje se sa smanjenjem brzine sečenja).

Topljenje ivice reza dovodi do zaobljavanja obratka duž gornje ivice reza. Do ovoga dolazi zato što je temperatura plazma luka veća u blizini gornje ivice reza, pa je ovo zaobljenje izrazitije kod obradaka manjih debljina. Na zaobljenje ivice reza najviše utiče debljina materijala i izbor plazma gasa.

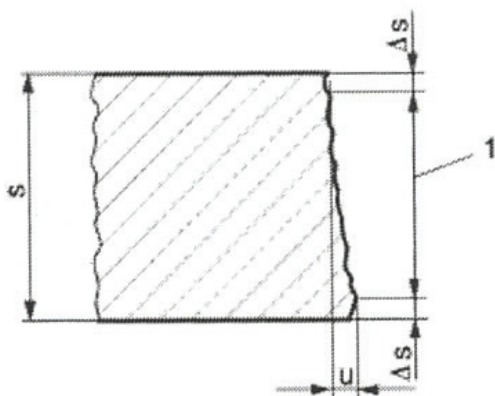
Troska je rastopljeni materijal, koji se zadržava najčešće na donjoj ivici reza. Troska se obično javlja u vidu malih, čvrstih kapljica ili velikih mehuruća. Formiranje troske zavisi od brzine sečenja, jačine struje, izbora gasa i debljine obratka.



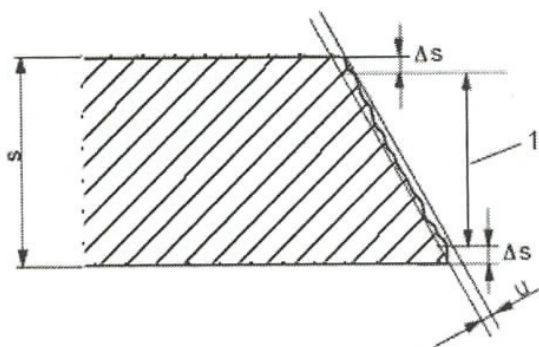
### 3.4 Kvalitet površine reza

Kvalitet površine reza je definisan standardom ISO 9013:1998, pri čemu se za razvrstavanje kvaliteta površina primenjuju sledeći kriterijumi: tolerancija upravnosti ili tolerancija ugla, srednja visina neravnina Rz, širina brazde i radijus zaobljenja ivice reza.

Tolerancija upravnosti (slika 3) ili tolerancija ugla (slika 4) predstavlja rastojenje između dveju paralelnih ravni koje ograničavaju profil dobijene rezanjem i teorijski tačnog ugla. Dodirne linije se nalaze u ravni upravnoj na površinu obratka.



Slika 3. Tolerancija upravnosti



Slika 4. Tolerancija ugla

## 4. FAKTORI KOJI UTIČU NA KVALITET PRESEČNE POVRŠINE

Tokom procesa plazma sečenja postoje velične čije vrednosti možemo i one čije vrednosti ne možemo menjati tokom rada. Dva uticajna faktora na kvalitet presečne površine čije vrednosti ne mogu da se menjaju tokom procesa plazma sečenja su vrsta i debljina materijala. S druge strane može se uticati na izbor rezne glave (sklop, potrošni delovi, veličina), izbor plazma gasa i njegova čistoća, jačina struje i brzina sečenja [4].

Rezna glava mora biti proizvedena od visoko kvalitetnog materijala, propisno obrađena sa dobrom završnom površinskom obradom. Od ključnog značaja je adekvatan sklop rezne glave. Delovi unutar rezne glave moraju biti na odgovarajući način poravnati i da besprekorno naležu jedan na drugi. Značajna je koncentričnost otvora mlaznice i elektrode unutar mlaznice. Odgovarajući sklop obezbeđuje dobar električni kontakt i ispravan protok plazma gasa i fluida za hlađenje kroz reznju glavu.

Da bi se postigla veća brzina sečenja i produktivnost potrebno je koristiti najveću moguću veličinu mlaznice i jačinu struje rezanja, iz opsega mogućih jačina struje datog plazma uređaja. Međutim, ukoliko se koristi prevelika jačina struje, u mlaznici je teško, ili čak nemoguće, obezbediti adekvatno sužavanje plazma luka. Ovo dovodi do kratkog

radnog veka potrošnih delova, male gustine energije i lošeg kvaliteta reza.

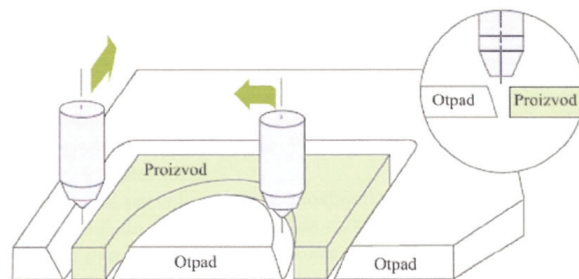
Iz prethodno navedenog sledi da se mora napraviti optimalan balans između brzine sečenja, tj. produktivnosti i kvaliteta reza, a vezano za izbor jačine struje rezanja, pa samim tim i veličine mlaznice.

Izbor plazma gasa zavisi uglavnom od tri faktora: kvaliteta reza, produktivnosti i ekonomičnosti. S toga se bira na osnovu vrste i debljine materijala obratka i konstrukcije sistema. Takođe je važna i čistoća gasa. Kvalitet plazma gasa mora biti isti ili bolji od onog koji se primenjuje za zavarivanje. Važno je proveriti pritisak gasa i protok gasa kroz mlaznicu. Vazduh je najčešće primenjivan plazma gas, koji prilikom rezanja čelika srednje čvrstoće, neradajućih čelika i aluminijuma proizvodi dobar kvalitet reza pri zadovoljavajućoj brzini sečenja. Vazduh, takođe, utiče na smanjenje troškova obrade, s obzirom da se ne kupuje, već se prethodno pročišćava u uređaju za pripremu. Međutim, prilikom korišćenja vazduha kao plazma gasa dolazi do nitriranja i oksidacije površine reza.

Kiseonik je postao industrijski standard za rezanje ugljeničnih čelika, s obzirom da obezbeđuje najbolji kvalitet reza i najbolje brzine rezanja, u odnosu na sve ostale plazma gasove. Kiseonik nije preporučljiv za rezanje neradajućih čelika i aluminijuma. Nedostatak korišćenja kiseonika kao plazma gasa je visoka cena i kratak radni vek potrošnih delova.

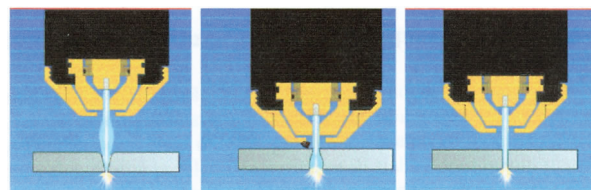
Rezna glava mora uvek biti upravna na obradak, što omogućava pravougaon rez. Ukoliko se rezna glava nalazi pod nekim uglom dolazi do pojave nedopustivo velikih uglova odstupanja. Upravnost rezne glave se proverava u dva pravca.

Smer kretanja rezne glave utiče na pravougaonost reza, a vezano za vrtloženje plazma gasa u reznoj glavi. Smer kretanja rezne glave i vrtloženje gasa plazme određuju "dobru" i "lošu" stranu reza. Dobra strana reza je u odnosu na lošu stranu reza ona čiji je ugao nagiba reza bliži idealnom uglu nagiba reza od nula stepeni (slika 5).



Slika 5. Uticaj smera kretanja rezne glave na ugao nagiba reza

Uticaj udaljenosti rezne glave od obratka na oblik reza prikazan je na slici 6. U slučaju kada je udaljenost rezne glave od obratka suviše velika, dolazi do većih gubitaka jačine mlaza, tako da u donjim delovima obratka stvara rez manje širine, odnosno javlja se konusnost reza. Ako je udaljenost previše mala, usled širenja mlaza plazme dolazi do stvaranje reza velike širine. Izborom optimalne udaljenosti rezne glave od obratka želja je da se dobije rez sa što je više moguće upravnim ivicama u odnosu na površinu obratka.



Slika 6. Uticaj udaljenosti rezne glave od obratka na izgled reza

Veliki uticaj na kvalitet reza ima brzina sečenja. Ukoliko je brzina prevelika, plazma luk će zaostajati unazad i javiće se njegovo oscilovanje. To dovodi do formiranja brazdi na površini reza, velikog ugla nagiba reza i formiranja visokobrzinske trske na donjoj ivici reza. Ako je brzina sečenja previše mala oblast reza će se širiti i mlaz plazme koji izlazi sa donje strane obratka prouzrokuje pojavu niskobrzinske šljake.

## 5. ZAKLJUČAK

Tehnologija plazma sečenja se, dugo vremena, smatrala suviše kompleksnom, sa velikim broje pravila i ograničenja, tako da je ovaj proces mogao da vodi samo dobro obučeni stručni kadar, ali i pored toga kvalitet reza nije bio uvek zadovoljavajući.

Na kvalitet obrade kod plazma sečenja utiče veliki broj

faktora. U radu je prikazan jedan broj faktora procesa, sa posebnim osvrtom na njihov uticaj na kvalitet reza.

## 6. LITERATURA

- [1] Cook, D.: *Plasma Arc Cutting - Cut Quality Problems*, Welding Design and Fabrication, 1998.
- [2] ISO 9013 *Nivoi kvaliteta i tolerancije mera površina dobijenih termičkim rezanjem*, Institut za standardizaciju Srbije, 1998.
- [3] Lazarević D., Rančić B., Lazravić A.: *Experimental research of the quality of processing by plasma cutting*, 4th International Conference RaDMI 2004, 208-215.
- [4] Lazarević, A., Radovanović M., Lazarević D.: *Mathematical Modelling of Plasma arc Cutting process*, 5th International Conference "RaDMI 2005.
- [5] Lazarević, D, Radovanović, M.: *Nekonvencionalne metode obrade materijala odnošenjem.*, Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu, Niš1994.

Клименко С.А., Копейкина М.Ю., Танович Л.

ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О КОНТАКТНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В ЗОНЕ РЕЗАНИЯ –  
ОСНОВА СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

*It is shown the results of researches of contact interaction in cutting zone as well as possibilities of new cutting tool material creation on example of cutters made of cubic boron nitride.*

Совершенствование технологий механической обработки с использованием инструментов, оснащенных поликристаллическими сверхтвёрдыми материалами (ПСТМ) нуждается в объединении материаловедческих представлений об эффективных структурах и оптимальных свойствах инструментальных и обрабатываемых материалов с выявлением закономерностей процессов обработки резанием. Основу такого подхода составляют современные представления о механике, теплофизике, кинетике, термодинамике и физико-химии контактного взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов с учетом действия окружающей среды. Они базируются на положениях теории резания, высокотемпературного структурообразования с учетом силового воздействия, вычислительной термодинамики, представлениях о возможностях управления технологическими параметрами, диагностики *in situ*, анализе состояния поверхностного слоя обработанных изделий. К анализу целесообразно привлечь современные синергетические представления о сложных процессах в открытых системах.

В основе современных «высокие технологии» механической обработки лежит комплекс исследований в области процесса резания, материаловедения явлений в зоне резания, их диагностирования, компьютерного моделирования и сочетающийся с исследованиями в области станкостроения, являющихся базой для создания нового поколения оборудования, для которого требуется специальный инструмент, обладающий особым комплексом физико-механических и химических свойств.

Количественное описание текущего физико-химического и механического состояния инструментального и обрабатываемого материалов в контактной зоне для конкретных условий процесса механической обработки, изучение эволюции структуры и возможной трансформации свойств поверхностного слоя инструмента в контактной зоне под действием термобарических условий процесса резания, составляет фундаментальную основу совершенствования режущих инструментов и процессов механической обработки, используется в мотивации выбора или создания инструментальных материалов.

Рассмотрим отмеченное на примере инструмента, оснащенного поликристаллическими сверхтвёрдыми материалами (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора (КНБ), для условия обработки которым характерны высокие давления (до 7 ГПа) и температуры (более 2000 К на пятнах вспышки [1]).

Контактное взаимодействие в зоне резания обусловлено комплексом дополняющих друг друга процессов адгезии, диффузии, микро- и макродеформирования и разрушения, химического взаимодействия, включающего окисление, азотирование, контактно-реактивное плавление и др. Эти процессы определяют механизм изнашивания поверхности режущих инструментов, возможности инструментов по эффективной обработке и формированию заданного состояния поверхностного слоя изделий.

Как отмечено в [2], в качестве основных физико-механических параметров инструментальных материалов выбирают: – предел прочности при растяжении и сжатии; – зависимость твердости материала от температуры; – температурная зависимость предела выносливости материала; – деформационные характеристики пластичности, упругости, коэффициент интенсивности напряжений; – модули упругости, сдвига; – коэффициент Пуассона; – коэффициенты тепло- и температуропроводности, линейного расширения.

В таблице представлены зависимости [2] для расчета механических характеристик материала режущего инструмента, обеспечивающих предотвращение хрупкого разрушения, появление макропластических деформации и образования трещин в поверхностном слое инструмента.

Нужно отметить, что твердость инструментального материала, определенная в соответствии с приведенными зависимостями, достаточна для осуществления процесса резания, но не определяет период стойкости инструмента.

Таблица. Механические свойства материала режущего инструмента

Хрупкое разрушение	Пластическое разрушение
– при переднем угле инструмента $\gamma = 0^\circ$ $\sigma_{сж} \geq 2,6\tau_\phi$ ,	– граничное условие прочности режущей части инструмента $HV_n/HV_{ст} \geq 1$ ,
– при переднем угле инструмента $\gamma \neq 0^\circ$ $\sigma_{сж} \geq (1,3+\gamma)\tau_\phi$ ,	
где $\tau_\phi$ – касательные напряжения в плоскости сдвига.	– твердость материала инструмента $HV_\epsilon = 6n_1 \sqrt{\tau_\phi^2 + \tau_\epsilon^2}$ (при больших $v - HV_n = 6n_m\tau_\phi$ ), $HV_0 = HV_n e^{\alpha T}$ , где $HV_n$ , $HV_0$ , $HV_{ст}$ – твердость инструментального материала при температуре резания и при комнатной температуре, твердость стружки при температуре резания соответственно, $\tau_\epsilon$ – касательные напряжения в контактном слое стружки; $n_m$ – коэффициент запаса прочности по ресурсу пластичности инструментального материала; $T$ – температура резания; $\alpha$ – коэффициент.

Опыт практического использования режущих инструментов, оснащенный различными материалами, свидетельствует, что усредненные по объему механические характеристики материалов далеко не всегда определяют работоспособность изготовленных из них режущих инструментов. При выборе материала по критерию износостойкости необходимо учитывать совокупность деформационных и прочностных свойств поверхностных слоев. В процессе резания материалы инструмента и обрабатываемого изделия представляют собой пару трения и в рассмотрении следует принимать

свойства обоих материалов. Так, поведение контактирующих материалов в паре трения можно оценить по соотношению параметров распределения силы контактного взаимодействия между исследуемыми материалами и алмазным индентором, которым они нагружаются в условиях упруго-пластического деформирования – по величинам их энергетической спектральной плотности. В частности, для выбора условий точения напыленных покрытий системы Ni-Cr-B-Si инструментом, оснащенным ПСТМ на основе КНБ марки «киборит», отвечающих максимальной стойкости инструмента, получено соотношение

$$v = 2,14(S_n / S_o)^{1,404} e^{-0,024(S_n / S_o)},$$

где  $v$  – скорость резания, соответствующая минимальному износу инструмента;  $S_n$  и  $S_o$  – максимальная величина энергетической спектральной плотности распределения силы контактного взаимодействия с индентором для инструментального и обрабатываемого материалов соответственно.

Анализ физико-механических свойств материалов, результаты сравнительных стойкостных испытаний инструментов при обработке сталей и сплавов высокой твердости позволяют сформулировать перечень требований к физико-механическим характеристикам ПСТМ на основе КНБ: – граница прочности при растяжении  $R_m > 0,3$  ГПа; – граница прочности при изгибе  $R_{bm} > 0,6$  ГПа; – модуль упругости  $E \approx 800$  ГПа; – коэффициент трещиностойкости  $K_{Ic} > 7$  МПа·м<sup>1/2</sup>; – коэффициент теплопроводности  $\lambda \geq 50$  Вт/м·К; – компоненты инструментального материала должны иметь близкие коэффициенты линейного расширения; – математическое ожидание силы контактного взаимодействия с алмазным индентором  $m_{200нН}$  до 3 Н; – максимальная величина энергетической спектральной плотности распределения силы контактного взаимодействия  $S_{200нН} \geq 2000$  Н<sup>2</sup>/Гц.

Результаты исследований и анализ микрофотографий поверхности изношенной части инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, позволяет заключить, что наряду со взаимным переносом обрабатываемого и инструментального материалов и изменением химического состава поверхностных слоев локальных зон контактных поверхностей инструмента, имеет место изменение состава поверхностного слоя и на неконтактных участках (рис. 1).

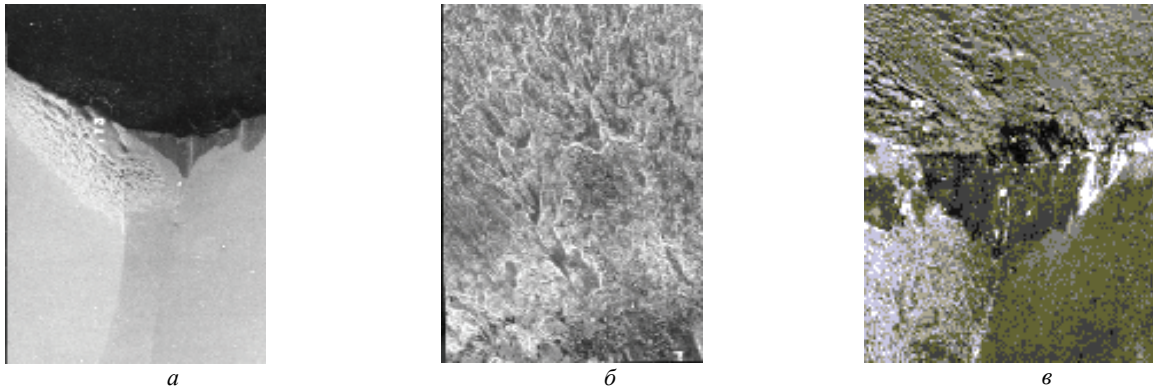


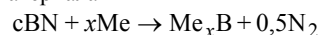
Рис. 1. Налет на инструменте из ПСТМ на основе КНБ, сформировавшийся при точении стали ШХ 15:  $a - v = 0,5$  м/с,  $h_3 = 0,24$  мм; ( $\times 180$ );  $b - v = 1,25$  м/с,  $h_3 = 0,24$  мм; ( $\times 700$ );  $c - v = 1,25$  м/с,  $h_3 = 0,24$  мм; ( $\times 200$ )

Такая картина наблюдается в широком диапазоне изменения условий резания. При малых скоростях резания налет формируется в непосредственной близости к контактным поверхностям инструмента (рис. 1, *a*), особенно на вспомогательной задней поверхности. В этом месте налет имеет значительную толщину, представляет собой рыхлую массу, относительно слабо сцепленную с основным материалом поликристалла, и с ростом износа инструмента может отслоиться. На передней поверхности резца налет располагается неравномерным слоем, занимая все большую площадь с ростом износа инструмента. Внешне он выглядит как рыхлое, чешуйчатое образование (рис. 1, *b*). С повышением скорости резания налет занимает все большую площадь на передней и задней поверхностях инструмента. На микрофотографиях отчетливо видно веерообразное расположение чешуек налета на передней поверхности инструмента с эпицентром на поверхности контакта.

Химический анализ показал, что налет на поверхностях инструмента, состоит из соединений элементов, входящих в состав контактирующих материалов, а также из продуктов их взаимодействия и взаимодействия с кислородом воздуха.

Полученные результаты показывают, что в процессе резания на участках контакта инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, с обрабатываемыми материалами на основе Fe и Ni реализуется механизм контактно-реактивного плавления, что обуславливает появление на рабочих поверхностях инструмента жидкой фазы из продуктов взаимодействия. Частицы расплавленного материала, попадая в воздух, принимают под действием сил гравитации и поверхностного натяжения правильную сферическую форму и кристаллизуются в таком виде с дендритной структурой.

Возможность протекания химической реакции между КНБ – основой материала инструментального композита – и основным элементов М обрабатываемого материала



при нагревании определяется величиной термодинамического потенциала Гиббса реакции

$$\Delta G_r(T) = G(Me_xB + 0,5N_2) - G(cBN + xMe).$$

Расчетные зависимости свободной энергии Гиббса реакции образования боридов железа и никеля от температуры представлены на рис. 2. Расчеты, выполненные с учетом наличия в контактной зоне повышенного парциального давления азота (100 Па) и давления в контакте между инструментальным и обрабатываемым материалами (5 ГПа), подтверждают возможность протекания химического взаимодействия в системе «КНБ-Fe, Ni» при температурах в области 1500 К, что соответствует экспериментальным данным [3].

В соответствии с принципом Ла-Шателье, создание в зоне обработки азотной газовой среды, должно способствовать увеличению температуры, при которой реализуются указанные реакции химического взаимодействия инструментального и обрабатываемого материалов.



В диапазоне практически используемых скоростей резания на износ инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ, оказывает влияние химическое взаимодействие инструментального материала с обрабатываемым и элементами окружающей среды в зоне резания, приводящее к образованию на контактных участках инструмента соединений типа  $Me_xB_y$ ,  $Me_xB_yO_z$ , формированию на их основе и контактному плавлению эвтектик типа  $Me-Me_xB_y$ ,  $Me-Me_xB_yO_z$  с последующим удалением жидкой фазы из зон контакта. При значительных скоростях резания химическое взаимодействие контактирующих материалов и окисление инструментального материала может иметь решающее значение для износа инструмента, определяя его период стойкости.

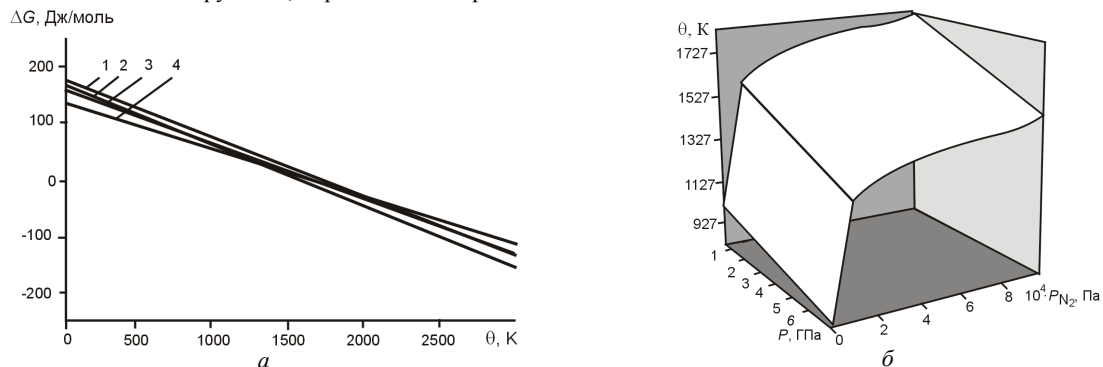


Рис. 2. Зависимость свободной энергии Гиббса от температуры (при парциальном давлении азота 100 Па и давлении в контакте 5 ГПа) для FeB (1), Fe<sub>2</sub>B (2), Ni<sub>2</sub>B (3), Ni<sub>3</sub>B (4) (а) и зависимость температуры, соответствующей ΔG = 0, от величины парциального давления азота и контактного давления (б)

Таким образом, для полного учета различных механизмов контактного взаимодействия в зоне резания, комплекс требований, предъявляемых к материалам режущих инструментов, необходимо дополнить показателями их химических свойств, такими как термостойкость на воздухе (> 1500 К), растворимость и интенсивность взаимодействия с Fe, Ni, Co и другими компонентами обрабатываемых материалов.

Авторы [4] предлагают при создании инструментального материала использовать зависимость, учитывающую одновременное механическое и химическое взаимодействие контактирующих материалов

$$W = W_{\text{мех}} + W_{\text{хим}} = \left( \frac{1}{K_{1c}^{3/4} H^{1/2}} + C_e \right)$$

где  $W$ ,  $W_{\text{мех}}$ ,  $W_{\text{хим}}$  – износ (мкм или мг) соответственно полный, обусловленный механическим и химическим взаимодействием;  $K_{1c}$ ,  $H$  – соответственно трещиностойкость (в МПа·м<sup>1/2</sup>) и твердость (в МПа) инструментально материала;  $C_e$  – растворимость инструментального материала в обрабатываемом.

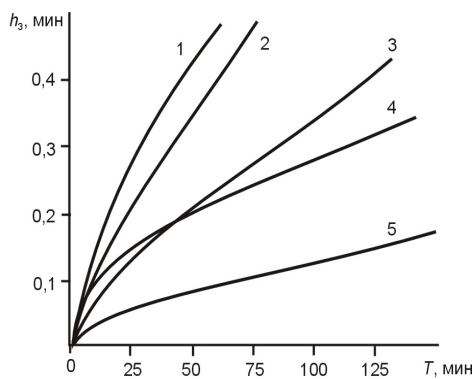


Рис. 3. Соотношение между износом инструментов из композита «КНБ-соединения Al» (1–3, 5) и композита «КНБ-SiO<sub>2</sub>» (4) и временем течения наплавки Нп-10Р2М8 и твердости материала реза: 1 – 24; 2 – 28; 3 – 32; 4 – 25; 5 – 36 ГПа

В подтверждение вышеизложенного, на рис. 3 приведена временная зависимость износа инструмента из ПСТМ на основе композиции «КНБ-соединения Al» с различной твердостью, а также ПСТМ на основе композиции «КНБ-SiO<sub>2</sub>». Все материалы имели одинаковое процентное содержание КНБ. Как видно, при определенных условиях резания, инструмент, оснащенный композитом «КНБ-SiO<sub>2</sub>» твердостью 25 ГПа, имеет износостойкость выше, чем инструмент с ПСТМ на основе композиции «КНБ-соединения Al» твердостью 28 ГПа. Большая работоспособность первого инструмента в рассматриваемом диапазоне условий обработки объясняется меньшей интенсивностью химического взаимодействия в зоне резания.

Учет отмеченного механизма изнашивания позволяет предложить несколько направлений повышения эффективности процесса обработки

Первое направление связано с направленным изменением химического состава композиционного инструментального материала на основе КНБ во всем объеме поликристалла.

В состав поликристалла или технологической среды вводятся вещества, являющиеся ингибиторами реакций взаимодействия инструментального материала с обрабатываемым и элементами

окружающей среды или сдвигающие протекание указанных реакций в более высокотемпературную область, что позволяет увеличить производительность обработки изделий за счет роста скорости резания и повысить стойкость режущего инструмента.

Учитывая это, повышение работоспособности режущего инструмента из ПСТМ на основе КНБ может быть достигнуто за счет введения в состав композита составляющих, которые без снижения механических свойств материала под действием термобарических условий процесса обработки обеспечивают формирование в зоне резания повышенного парциального давления азота. При температуре резания взаимодействие добавки с элементами обрабатываемого материала с выделением азота должно происходить при температурах более низких, чем температуры, характерные для взаимодействия с элементами обрабатываемого материала основы инструментального композита – КНБ. Анализ свойств гаммы нитридов позволяет предложить в качестве такой добавки нитрид кремния Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>.

Стойкостные эксперименты показали, что точение никелевых сплавов инструментом, оснащенный композитом системы КНБ-Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, эффективно выполняется с производительностью 2,8–3,0 см<sup>3</sup>/мин.

Второе направление совершенствования технологий механической обработки связано с нанесением на поверхности режущего элемента слоя защитного покрытия.

Наличие на контактных поверхностях инструмента вакуумных покрытий приводит к коренному изменению механики и физико-химии контактного взаимодействия инструмента и обрабатываемого изделия. Первое предопределяется перераспределением напряжений на поверхностях инструмента за счет изменения коэффициента трения и, как следствие, сил и температуры резания. Второе связано с тем, что для оптимизации условий работы режущего инструмента в каждом случае должно выбираться покрытие, обеспечивающее минимизацию или отсутствие эффектов, оказывающих наибольшее отрицательное влияние на его работоспособность. Материалы покрытий на режущих инструментах должны оказывать сопротивление абразивному и адгезионному воздействию фрагментов состава обрабатываемого материала, препятствовать диффузии и растворению элементов материала покрытия в обрабатываемом материале, химическому взаимодействию инструментального и обрабатываемого материалов, окислению материала инструмента, быть достаточно вязкими, чтобы противостоять скалыванию и разрушению режущих кромок. Для минимизации адгезионного и химического взаимодействия КНБ с элементами обрабатываемого материала целесообразно применять покрытие на основе NbN, для минимизации изнашивания инструментов за счет окислительных процессов – покрытие на основе  $Al_2O_3$  (рис. 4).

Как видно из представленных фотографий, на контактных поверхностях инструмента без покрытий имеет место интенсивный массоперенос (рис. 5, а), связанный с налипанием обрабатываемого материала. Анализ фотографий, полученных в режиме фазового контраста, выявил интенсивное формирование налета на неконтактных поверхностях инструмента. На рабочих поверхностях инструментов с защитными покрытиями наблюдается износ как по задней, так и по передней поверхностям. Отчетливо видна лунка на передней поверхности инструментов. В тоже время, адгезионные эффекты на контактных участках инструмента существенно минимизировались (рис. 5, б).

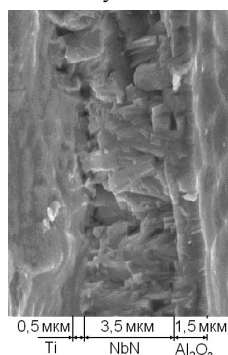


Рис. 4. Архитектура покрытия на режущем инструменте

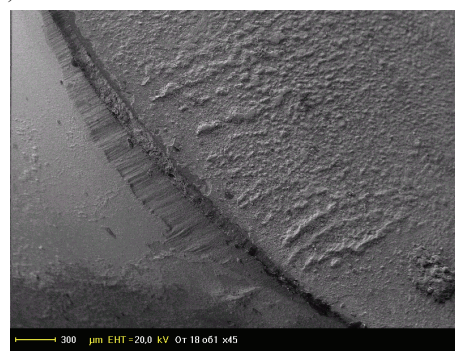
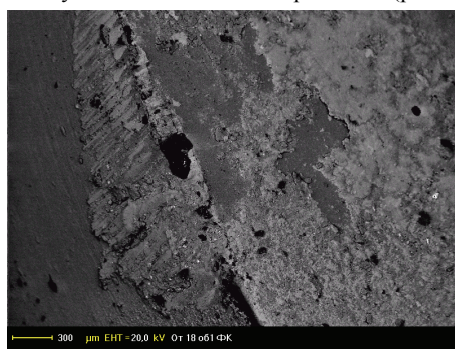


Рис. 5. Вид изношенных участков инструментов: а – без покрытия; б – с покрытием  $Al_2O_3$ -NbN-Ti

Анализ результатов численного моделирования напряженного состояния режущих инструментов, оснащенных ПСТМ без покрытия и с покрытием, обусловленного силовым нагружением, показывает, что нанесение покрытия  $Al_2O_3$ -NbN-Ti снижает нормальные и касательные напряжения на передней поверхности инструмента до 25 %.

Результаты моделирования позволяют сделать вывод о том, что инструменты, оснащенные ПСТМ с покрытиями, являются более надежными в условиях резания с высокими динамическими нагрузками, а также в условиях приработки при чистовой обработке деталей из закаленных сталей (55–62 HRC), легированного чугуна, с наплавленным покрытием из никелевого сплава 08X18H9Г7Т, арматуры прокатных валков из твердых сплавов ВК15, ВК20, ВНК25, ВК30.

Экспериментальные исследования контактного взаимодействия в зоне резания должны выполняться на учитывающих технологическую среду моделях с использованием современной программной базы. Это позволяет оптимизировать условия механической обработки, обеспечивая высокую производительность удаления материала припуска, сохраняя заданную стойкость режущих инструментов. При этом учитываются представления о технологической наследственности, характеристики состояния поверхностного слоя изделий, конкретные условия эксплуатации.

Отмеченные представления составляют базу для создания «интеллектуальных инструментов», элементам которых присущи способность к самодиагностике механического состояния, адаптации к внешним условиям эксплуатации, прогнозированию остаточного ресурса эксплуатации и т.д. Такие инструменты являются синтезом собственно инструмента и специализированной информационно-измерительной системы, оснащенной сенсорными и исполнительными устройствами, системой управления на основе микропроцессорной техники.

Обобщая сказанное выше, в заключение нужно отметить следующее: технологии механической обработки – неотъемлемая часть промышленного производства, использование потенциальных возможностей которой непрерывно расширяется. Зная основные закономерности процессов, реализуемых в зоне обработки, следует, используя принципы технологического обеспечения качества и технологической наследственности, усилить высокие потенциальные свойства современных конструкционных материалов, обеспечивая тем самым требуемые свойства деталей машин. Для этого, прежде всего, нужно отказаться от рассмотрения задач обработки по «остаточному принципу», и приложить усилия для того, чтобы процессы механической обработки получили признание на уровне современных материаловедческих задач.

#### Литература:

1. Miller-Hummel P., Lahres M. Temperature measurement on diamond-coated tools during machining // Ind. Diam. Rev. – 1995. – Vol. 55, № 2. – P.78–83.
2. Лоладзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. – М.: Машиностроение, 1980. – 320 с.
3. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6-и т. / Под общей ред. Н.В. Новикова. – Т.5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С.А. Клименко. – Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля, 2006. – 316 с.
4. Buljan S.T., Wayne S.T. Wear and design of ceramic cutting tool materials // Wear. – 1989. – Vol. 133. – P. 545–554.

**Авторы: Клименко С.А., Копейкина М.Ю.,** Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев, **Танович Л.,** Машиностроительный факультет Белградского университета

## ЧИСТОВЕ ТОРЦЕВЕ ФРЕЗЕРУВАННЯ ШИРОКИХ ПЛОСКИХ ПОВЕРХОНЬ НЕЖОРСКИХ ДЕТАЛЕЙ. АНАЛІЗ УТВОРЕННЯ ПОХИБОК І ПОПЕРЕДНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ЇХ МІНІМІЗАЦІЇ

*В статті проведено аналіз причин виникнення похибок при обробці плоских поверхонь нежорстких деталей торцевими фрезами з метою визначення шляхів удосконалення процесу і його інструментального забезпечення.*

Удосконалення функціонально-технологічних і вагових параметрів конструкцій виробів знижує жорсткість деталей за рахунок невідповідності стінок, тобто, диспропорцій конструктивних параметрів, з одночасним підвищенням точнісних вимог до їх виготовлення і збирання.

Поняття нежорстких деталей (заготовок) чітко визначено для тіл обертання.

Переважна більшість науково-дослідних робіт, здійснених вченими, стосується саме токарної і шліфувальної обробки нежорстких деталей типу валів. Навіть розроблена класифікація способів управління точністю формоутворення таких деталей.

В роботі [1] наведена таблиця №1 аналізу технологічних способів управління точністю формоутворення нежорстких деталей, проведеного провідними фахівцями в області металообробки у вигляді публікацій за 22<sup>ма</sup> ознаками. Як свідчить приведена інформація, практично до 1988 року не було жодної публікації з дослідження обробки фрезеруванням нежорстких деталей типу балок, плит, пластин і корпусів.

Слід зазначити, що на сьогоднішній день взагалі відсутнє визначення співвідношень параметрів “нежорсткої” деталі або заготовки, що відрізняється за формою від валів і труб.

Поділ площинних деталей (заготовок) за ступенем жорсткості є складною проблемою і має умовний характер, хоча в певній мірі, так само, як і для валів, має дати відповідь на питання, що стосується пружних деформацій під час закріплення і обробки, сумірних з допустимими відхиленнями від точності і площинності оброблюваної поверхні.

Існує ще один критерій для визначення ступенів жорсткості заготовки – це співставлення з характеристикою жорсткості верстата, на якому відбувається обробка, і яка повинна бути вищою порівняно з жорсткістю заготовки з пристосуванням для закріплення в разі її віднесення до нежорстких деталей.

Узагальнено можливо відносити до технологічно нежорстких деталей ті, які при базуванні і затисканні їх заготовок, а також від сил різання пружно деформуються на величину, що перевищує допустимі відхилення від площинності або відносного положення поверхонь. Саме розробка технологічних процесів, вибір способу базування і закріплення заготовок, призначення режимів обробки і траєкторії руху формоутворюючих елементів, особливо на фінішних операціях, визначають якість деталей.

Варто підкреслити, що одна і та ж деталь (заготовка) при різному розташуванні точок базування і прикладання зусиль затиску може рахуватися жорсткою або нежорсткою, характеризуючи кваліфікацію розробника пристосування.

Переважна більшість наукових публікацій, присвячених проблемі обробки широких плоских поверхонь деталей машин і механізмів методом торцевого фрезерування, закінчується висновками і рекомендаціями щодо однопрохідного методу фрезерування [2, 3]. В роботі [2] наведено приклад вирішення проблеми обробки широкої поверхні корпусу ножа на Роменському заводі поліграфічних машин (розміри оброблюваної плоскої поверхні 324×1148 мм). Констатовано, що в результаті декількох проходів утворюється межа-смуга між сусідніми проходами, нерівномірний (місцевий) нагрів деталі при тепловиділенні у процесі різання викликає її жолоблення вже після попереднього старіння. Щоб усунути можливий брак, були вимушені збільшувати припуск під шліфування, що в свою чергу привело до зниження продуктивності і підвищення витрат.

Як відмічають автори, вихід було знайдено за рахунок проектування торцевої фрези, діаметр якої перевищував ширину оброблюваної поверхні. Це в свою чергу викликає необхідність виготовлення торцевого інструменту значних діаметрів, і як наслідок, великої ваги. Так, при діаметрі торцевої фрези  $D_{фр} = 250$  мм її вага складає 22...25 кг, при  $D_{фр} = 315$  мм – 30...40 кг, при  $D_{фр} = 630$  мм – 65...100 кг.

Значні діаметри торцевих фрез призводять до зменшення їх жорсткості через пружну деформацію корпусу під дією складової сили різання  $P_y$ . Збільшення товщини корпусу фрези значно підвищує її масу, що в свою чергу викликає необхідність використання для обробки більш потужного обладнання.

Надані в роботі [3] рекомендації щодо збільшення поверхні осевого базування фрези за рахунок застосування агрегатних фрезерних головок з базуванням торця корпусу на упорному підшипнику кочення великого діаметра або за периферійними поверхнями радіальних підшипників кочення не завжди можуть бути використані на машинобудівних підприємствах.

По-перше. Великі діаметри упорних підшипників суттєво знижують можливість застосування необхідних швидкостей різання (обмежена допустима кількість обертів). Так, для підшипник № 8164 особливо легкої серії розмірами  $\varnothing 320 \times \varnothing 400 \times 63$  максимальна кількість обертів допускається не більша 400 об/хв., що неприйнятно для інструменту з надтвердих матеріалів.

По-друге. Суттєво збільшений момент інерції шпиндельної групи (шпиндель, підшипники шпинделя, фреза, шестерні або шків приводу тощо), неможливість уникнення дисбалансу сприяють зниженню працездатності верстату і збільшенню енерговитрат.

По-третє. Збільшення діаметру фрези можливе до певних меж через ряд конструктивних обмежень, серед яких відстань осі шпинделя до корпусних деталей, потужності приводів головного руху, виготовлення та налагодження інструменту тощо. Наприклад, для обробки рам фільтрпресів на ВАТ «Проград», які мають зовнішні розміри площин,

що підлягають обробці, 800×1000 мм або 1200×1500 мм та інші. Такі ж розміри мають плоскі поверхні станин і основ верстатобудівних підприємств: ВАТ «Беверс», ВАТ «Верстатоніверсалмаш», Київський завод «Веркон» та велика кількість інших машинобудівних підприємств. В той же час ці поверхні вимагають високих параметрів з площинності і шорсткості. Виготовлення торцевих фрез діаметром, що перевищує 1000 мм, а також придбання відповідних верстатів є нереальним і економічно недоцільним.

В сучасних умовах такі поверхні обробляються за декілька проходів способом «маятникової подачі», коли різання здійснюється у напрямку поздовжньої подачі, а установочне переміщення фрези (або стола з заготовкою) – в напрямку поперечної подачі, або фрезеруванням за контуром. При цьому практично неможливо забезпечити потрібну точність і форму плоскої поверхні. В разі застосування першого способу на стику сусідніх проходів можуть утворюватися східці через відхилення від перпендикулярності осі обертання шпинделя до поздовжнього переміщення стола з заготовкою.

Відхилення від перпендикулярності осі шпинделя відносно поперечного переміщення фрези або стола з заготовкою відносно фрези викликає похибку номінальної плоскої поверхні у вигляді різновисотності країв утворюваної западини при поздовжньому робочому ході стола або фрези і при установочному поперечному їх переміщенні.

В разі поперечного робочого ходу фрези або стола з заготовкою картина утворення похибки площинності оброблюваної поверхні змінюється на протилежну.

При контурному способі обробки в місця зміни напрямку руху фрези відносно заготовки (чи заготовки відносно фрези) відбувається короткочасова зупинка процесу обробки, яка сприяє зняттю навантаження між шпинделем і столом верстата, що в свою чергу призводить до появи слідів на вже обробленій поверхні, погіршуючи шорсткість і навіть точність обробки. Крім того, як показує досвід обробки таким способом, ніколи не можливо повернутися до місця початку обробки без утворення певних розмірів сходинок, яка, як ми покажемо нижче, залежить від параметрів жорсткості системи і коливальних процесів в ній.

До попередньо визначених проблем обробки широких поверхонь деталей слід додати ще й проблему зношування формоутворюючих елементів торцевого інструменту, пов'язане не тільки зі значними площинами обробки, але і з забезпеченням сприятливих умов при врізанні і виході інструменту.

З попередніх досліджень, виконаних різними фахівцями в області фрезерування, відомо, що при врізанні і виході торцевої фрези з оброблюваної поверхні, неможливо забезпечити високу якість на цих ділянках порівняно з поверхнею, де зберігається незмінною дуги контакту фрези з заготовкою на всій довжині проходу. Також доведено [4], що сколи ріжучої кромки інструменту і її викришування залежать від кутів виходу зубців фрези з різання.

Як правило, торцеве фрезерування (так само й фрезерування канавок, чи карманів кінцевими фрезами) проводять з врізанням у напрямку перпендикулярному до бокової кромки заготовки.

При врізанні в момент виходу зуба фрези з контакту з заготовкою товщина зрізу завжди не дорівнює нулю, що утворює напруження розтягу, особливо небезпечні для твердих сплавів і в певній мірі для НТМ. Такі несприятливі умови супроводжують процес врізання до моменту, коли центр фрези (кінцевої або торцевої при  $B \geq D_{фр.}$ ) не буде співпадати з кромкою заготовки. Уникнути це явище можливо за рахунок зміни траєкторії руху фрези відносно оброблюваної заготовки.

З умовою забезпечення мінімальної товщини стружки при виході леза з оброблюваної поверхні ця траєкторія буде коловою.

Дослідження, проведені вченими Житомирського державного технологічного університету, підтвердили, що при обробці плоских поверхонь деталей зі сталей і чавунів (у тому числі загартованих) торцевим інструментом, оснащеним надтвердим матеріалом (НТМ), викришування і інтенсивне зношування різальних елементів відбувається при збільшеній товщині стружки на виході ніж на вході в оброблювану поверхню. Можливо також стверджувати, що при виборі траєкторії руху інструменту відносно оброблюваної поверхні деталі (чи її рух відносно інструменту), слід дотримуватись наступних критеріїв:

- уникати різких змін навантажень в технологічній оброблюючій системі. Зусилля в разі необхідності мають змінюватись плавно;
- траєкторія руху має бути без зупинок і різких змін напрямків;
- передбачати вільне сходження (видалення) стружки, запобігаючи її попадання в зону обробки;
- передбачати довгі траєкторії знаходження інструменту у процесі різання порівняно з короткими;
- обробка має проходити обов'язково з утворенням стружки, що складно забезпечувати при обробці за способом «маятникової подачі».

Однак врахування наведених вище рекомендацій не може забезпечити якісну обробку широких поверхонь через зміни жорсткісних і динамічних параметрів верстата при зміні взаємного положення, векторів руху і навантажень вузлів системи.

Для оцінки динамічної якості фрезерних верстатів іноді застосовують випробування різанням. В разі проведення таких випробувань для певного взаємного розташування вузлів верстату ширини (або) глибини різання збільшуються доки поки не виникнуть вібрації і або поки не буде повністю використана потужність електродвигуна головного приводу. Граничні режими різання можуть бути використані в якості оцінки динамічної якості верстату. При проведенні досліджень змінюють напрямки подач так, щоб кут контакту фрези з оброблюваною поверхнею знаходився у різних квадрантах, тобто виникаючі сили різання діють в двох протилежних напрямках при поздовжній і поперечній подачах.

Слід звернути увагу також на те, що на динамічні якості верстату суттєво впливає взаємне розташування вузлів і, в першу чергу, стола з закріпленою на ньому заготовкою.

Під час обробки має місце відносне зміщення фрези і заготовки, що викликає різні деформації в пружній системі верстата.

В роботі [5], розділи 6,7, і 8, проведений геометричний аналіз системи «шпиндель-інструмент» верстату мод. ГФ 2171С6, визначені зміни положення фрези і заготовки в процесі обробки, а також статичні деформації при згині шпинделя під дією сил різання.

Ретельний аналіз всіх складових процесу обробки площин торцевими фрезами косокутного різання і, як наслідок, розроблена математична модель використана авторами для здійснення чисельних експериментів, метою яких



було встановлення впливу основних параметрів верстата і інструмента, а також режимів обробки на якість обробленої поверхні.

Встановлені залежності шорсткості поверхні від подачі на зуб фрези, швидкості різання, биття передньої опори шпинделя, а також його відносної жорсткості стосуються однопрохідного циклу обробки.

Як підкреслено в наведеній роботі, під час обробки має місце відносне зміщення фрези і заготовки, що викликає різні деформації в пружній системі верстата. Деформується окремо пружна система шпинделя та пружна система стола, що представляє собою складну просторову механічну систему.

Дослідженнями встановлені співвідношення пружних переміщень вузлів консольних вертикально-фрезерних верстатів [6]: стійка – до 10%, стіл – до 70...85%, шпиндель – 15...30%.

Пружні деформації впливають на точність обробки в наслідок змінності сил різання і жорсткості системи в межах робочого простору верстата. При переміщенні робочих органів верстата і оброблюваних деталей координати точки прикладання ваги змінюється, що суттєво впливає на похибки обробки деталей.

В лабораторії ЖДТУ проведені дослідження схеми деформації шпиндельного вузла при дії статичних зусиль, прикладених до торцевої фрези Ø250 мм, закріпленої на торці шпинделя верстату мод. 6P12. Такі ж дослідження проведені на верстаті ГФ2171С6 ВАТ «Беверс».

Визначена середня питома вага деформації кожного зі складових елементів шпиндельної бабки верстата при прикладанні різних статичних зусиль до торцевої фрези.

Поворот шпиндельної бабки склав в загальній деформації 10...13%, згин пінолі – 35...38%, згин шпинделя – 48...52%.

Враховуючи вищенаведене, розроблено блок-схему взаємних зв'язків між товщиною шару, що видаляється, жорсткістю різання і динамікою верстата, наведену на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема взаємних зв'язків між товщиною шару, що видаляється, жорсткістю різання і динамікою верстату

В разі деформації металорізального верстату (збільшення відстані між інструментом і заготовкою) миттєво змінюється товщина зрізаемого шару матеріалу, у наслідок чого на оброблюваній поверхні залишається виступ. Змінюється сила різання, що може викликати додаткову деформацію. Таким чином створюються умови для інтенсивних автоколивань при різанні.

Саме зміна траєкторії взаємного руху і положення заготовки відносно торцевої фрези призводить до зміни динамічних характеристик і деформації верстата, що в свою чергу впливає на зміну фактичної товщини шару, який видаляється.

Приведені дослідження і аналіз результатів експериментів дали можливість визначити і конкретизувати виникнення складових похибки обробки плоских широких поверхонь деталей, починаючи з процесу врізання торцевої фрези. Траєкторія руху заготовки відносно інструменту, яка супроводжується зміною відносного положення вузлів верстата, призводить не тільки до перерозподілу контактних деформацій, але є й джерелом утворення відхилення від площинності оброблюваної поверхні, а також супроводжується зміною динамічних характеристик верстата, що впливає на її точність і шорсткість. Ще до завершення проведення всього запланованого комплексу експериментально-дослідницьких робіт можливо навести попередні рекомендації щодо підвищення якості обробки плоских поверхонь торцевим інструментом, діаметр яких менший загальної ширини цих поверхонь:

- 1) При програмуванні траєкторії руху заготовки відносно інструменту на вертикально-фрезерних та інших верстатах слід повністю уникати зупинок або різких змін напрямків руху.



- 2) При врізанні інструмента в оброблювану поверхню і на протязі всього процесу обробки широких поверхонь необхідно забезпечувати більшу товщину зрізу стружки при вході кожного з ріжучих елементів і значно меншу при його виході з процесу різання, а також плавність цих процесів
- 3) В разі використання верстатів з ЧПУ при плавній зміні траєкторії взаємного руху фрези і заготовки слід використовувати також можливість зміни величини подачі в процесі обробки широких поверхонь, що є одним з напрямків подальших досліджень.
- 4) Доцільно провести модернізацію верстатів, що використовуються для обробки широких плоских поверхонь торцевим фрезеруванням, з застосуванням пристроїв для закріплення рухомих вузлів, що мають установочне переміщення, з одностороннім зусиллям затиску за аналогією з механізмами затиску вузлів горизонтально-розточувальних і координатно-розточувальних верстатів провідних фірм ФРН, США та інших [7]. Кількість затискних механізмів, місце розташування і систему їх адаптивного управління передбачено визначити при подальших дослідженнях.

Різноманітність конструкцій нежорстких деталей, що визначають обробки плоских поверхонь не дають можливість застосовувати якийсь один універсальний метод торцевого фрезерування на відміну від плоского шліфування. тому автори цієї роботи розглядають низку способів і їх комбінації (рис. 2) з метою забезпечення високопродуктивної і якісної обробки плоских поверхонь деталей торцевим фрезеруванням з використанням НТМ замість абразивної обробки з загальновідомими недоліками.

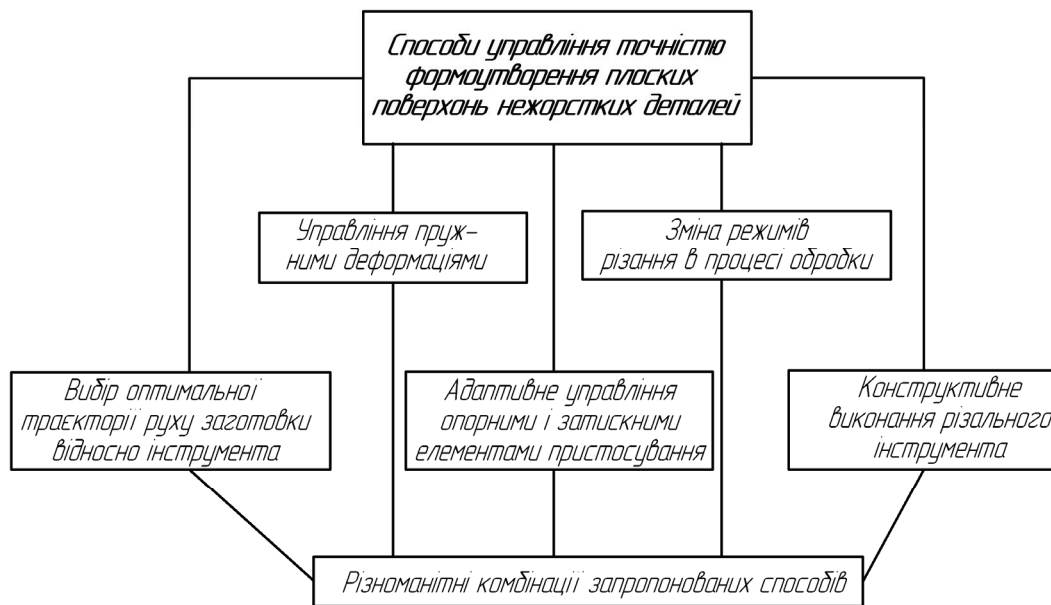


Рис. 2. Напрямки удосконалення обробки плоских поверхонь нежорстких деталей торцевим фрезеруванням

Суттєво підвищити точність обробки, а також оптимізувати процес різання можливо лише вивченням закономірностей виникнення і зміни похибок обробки, що пов'язані з характеристиками і умовами експлуатації обладнання (верстат–пристосування) та інструменту з обов'язковим врахуванням жорсткісних параметрів заготовки.

Для вирішення цієї задачі необхідно розробити методологію визначення оптимальних режимів різання, параметрів інструменту і пристосувань, динамічної характеристики і умов функціонування технологічної системи, що гарантують задану точність і продуктивність обробки.

#### Література

1. Тараненко В.А. Моделирование технологических систем формообразование нежестких деталей. М.:ВНИИТЭМР вып. 2, 1988-72с.
2. Залого В.А., Швец С.В., Иванин А.Д., Парфененко С.Г., Стрельцов Г.И. Прогрессивный инструмент для окончательной обработки широких поверхностей деталей из чугуна // Резание и инструмент, Харьков, вып. 25, 1981. – С. 49-51
3. Кушниров П.В., Захаров Н.В. Агрегатные головки для фрезерования широких плоских поверхностей. //СТИН 1996. №2, С 29-31.
4. Дрожжин В.И., Корожченко В.Л. Влияние условий врезания зуба фрезы из гексanita на стойкость при торцевом фрезеровании закалённой стали и чугуна. // Резание и инструмент. Республиканский межведомственный научно-технический сборник. Выпуск 25. Харьков «Вища школа» – 1981. – С. 44-46.
5. Струтинський В.Б., Мельничук П.П. Математичне моделювання металорізальних верстатів: Монографія. – Житомир: ЖІПІ, 2002. – 570 с.
6. Каминская В.В., Левина З.М., Расчёт жесткости станков. М. Машиностроение. 1983. - 47с.
7. Титов В.П., Колчин О.М. Повышение точности закрепления подвижных исполнительных органов прецизионных станков с ЧПУ. – М.: ВНИИТЭМР, 1985,-40 с.

**Автори:** д.т.н., проф. Мельничук П.П., к.т.н., проф. Лосєв В.Ю., асп. Кравчук О.М., Житомирський державний технологічний університет, 262005 Житомир, Україна



Adamović, D., Devedžić, G., Ristić, B., Ivanović, L.

## IZBOR MATERIJALA ZA IMPLANTATE

**Rezime:** Način na koji se bira pogodan materijal u prvom redu zavisi od broja i važnosti postavljenih zahteva i kriterijuma. U slučaju malog broja zahteva velike važnosti težište je na kvalitativnoj i kvantitativnoj analizi svojstava i ponašanja manjeg broja materijala koji dolaze u uži izbor, putem informisanja ili iskustva. Primena kvantitativnih metoda odlučivanja dolazi u obzir najpre kod velikog broja traženih svojstava, jer se očekuje relativno velik broj prihvatljivih materijala.

Biomaterijali služe kao zamena za mnoge prirodne materijale u ljudskom telu. Broj materijala u primeni za implantate sve je veći, a uključeni su metalni, polimerni, keramički i kompozitni materijali, gelovi i pene.

U ovom radu biće prikazana primena jedne kvantitativne metode odlučivanja na primeru poređenja više vrsta materijala za femoralni deo proteze veštačkog kuka. Preferirani materijali odgovaraju onim od kojih se uobičajeno rade ovi implantati.

**Cljučne reči:** Izbor materijala, biomaterijali, implantati, veštački kuk

## IMPLANT MATERIALS SELECTION

**Abstract:** The way in which suitable material is selected in the first place depends on the number and importance of demands and criteria. In the case of a small number of a great importance the focus is on the qualitative and quantitative analysis of properties and behavior of a small number of materials that come in the desirable choice, using available information or empirical data. The application of quantitative methods of decision-making is the first when analyze a large number of required properties, because relatively large number of acceptable materials is expected.

Biomaterials serve as a substitute for many natural materials in the human body. Number of materials in the application for the implant nowadays is getting larger, including metal, polymer, ceramic and composite materials, gels and foams.

The paper describes the application of one of a quantitative methods for implant material selection based on comparison of many types of materials for femoral part of artificial hip prosthesis. The preferred materials match those of the usually applied for these implants.

**Key words:** Materials selection, biomaterials, implants, artificial hip

### 1. UVOD

Konstruktivno oblikovanje, izbor materijala i izbor načina proizvodnje osnovne su i povezane aktivnosti pri razvoju novih proizvoda. Često se do novih rešenja dolazi inovativnom primenom novih materijala. Subjektivnost, iskustvo iz prethodnih rešenja, ograničen i nepotpun broj kriterijuma poređenja osnovna su obeležja načina izbora materijala u praksi.

U težnji ka što objektivnijem i kompjuterski podržanom odlučivanju uz ekspertna znanja sve se više primenjuju kvantitativne metode izbora materijala. One doprinose objektivnosti, ali njihova primena pretpostavlja postojanje brojčanih podataka, kao i što realniju procenu faktora važnosti za tražena svojstva. U slučajevima nepotpunih informacija, ili nepostojanja podataka za tražena svojstva i ponašanje materijala, u odlučivanje se dodatno uključuje strukturno znanje u obliku pravila, relacija između svojstava, modela za vrednovanje i predviđanje svojstava materijala, iskustva iz proizvodnje i eksploatacije i sl. U specifičnim, užim područjima primene materijala ovi oblici znanja su osnova za razvoj ekspertnih sistema.

Način na koji se bira pogodan materijal u prvom redu zavisi od broja i važnosti postavljenih zahteva i kriterijuma. U slučaju malog broja zahteva velike važnosti težište je na kvalitativnoj i kvantitativnoj analizi svojstava i ponašanja manjeg broja materijala koji dolaze u uži izbor, putem informisanja ili iskustva. Primena kvantitativnih metoda odlučivanja dolazi u obzir najpre kod velikog broja traženih svojstava, jer se očekuje relativno velik broj prihvatljivih materijala.

Biomaterijali služe kao zamena za mnoge prirodne

materijale u ljudskom telu. Broj materijala u primeni za implantate sve je veći, a uključeni su metalni, polimerni, keramički i kompozitni materijali, gelovi i pene. Tako se npr. nerđajući čelici, kobaltove legure, titan i titanove legure, keramika i kompozitni materijali koriste za fiksiranje ili zamenu kostiju, pene i gelovi za meko tkivo, dok elastični materijali zamenjuju kožu i krvne sudove.

### 2. KONSTRUISANJE I IZBOR MATERIJALA

Zadatak svake proizvodnje je proizvesti kvalitetnije, uz što bolja upotrebnost svojstva, dopadljiviji izgled i nižu cenu, i ostvarenje što veće dobiti. To je moguće postići unapređenjem proizvodnih postupaka izrade i konstrukcijskih rešenja, ali i pravilnim izborom materijala. Na taj način izbor optimalnog materijala postaje bitan sastavni deo procesa razvoja proizvoda [1].

Izbor materijala izvodi se najpre u fazi projektovanja i konstruisanja proizvoda. Rede se to događa u fazi izrade ili nabavke, i to uglavnom kao rezultat nepredvidljivih kasnijih promena u konstrukcijsko-tehnološkoj dokumentaciji ili zbog pogrešnih odluka u konstrukciji.

Proces razvoja proizvoda, od koncipiranja pa do konačne detaljne konstrukcijske razrade, određuju četiri osnovne grupe faktora [2]:

1. *tehnički* - funkcijski i eksploatacijski zahtevi i odgovarajuća svojstva proizvoda, proizvodna, energetska svojstva;
2. *ekonomski* - troškovi razvoja i proizvodnje i cena proizvoda, investicijski troškovi, produktivnost i rentabilnost, mogućnosti kooperacije, diverzificiranost proizvoda, zemlje prodaje i dr.;

3. *društveni, humani* - potrebe čoveka i društva, ergonomska svojstva, mogućnost upotrebe, recikliranja i uticaja na okolinu, kulturološka (npr. estetska) i informacijska svojstva i dr.;

4. *pravni* - norme, zakoni, propisi, zaštita izuma, patenta, modela, postupka proizvodnje i dr.

Od mnogih problema koji se javljaju pri konstruisanju, problem realizacije zadate funkcije rešava se na samom početku procesa razvoja neke konstrukcije.

Tako npr. analiza funkcije proizvoda obuhvata razmatranje sledećih grupa faktora [3]:

1. *radne karakteristike*: masa, mere i dimenzije, trajnost, stepen delovanja, potrošnja energije, izvori energije i pogon, sigurnost u radu, održavanje, prenosivost...
2. *uticaji u radu i delovanje okoline*: delujuće sile i naprezanja, učestalost uključivanja, trenje i habanje, vibracije, udarci, temperatura, plamen, vlažnost, zračenje, gasovi, hemikalije, prašina, organizmi, elektricitet, ulja i masti, goriva...
3. *međusobni uticaji*: stanje površine, hrapavost, odstupanja oblika, tolerancije, priključne mere, uticaj grešaka...
4. *delovanja na ljude*: toksičnost, buka i šumovi, zaštita zdravlja, izgled, psihološko stanje, stabilnost, lakoća

čišćenja i održavanja, električna izolovanost i sl.

Bez definisanja uloge proizvoda u eksploataciji, nije moguće rešavanje ostalih problema, među kojima bitno mesto zauzima trajnost, pouzdanost, način održavanja i izgled proizvoda. Danas je estetsko oblikovanje sve važnije pri konstruisanju jer uveliko određuje konkurentnost na tržištu.

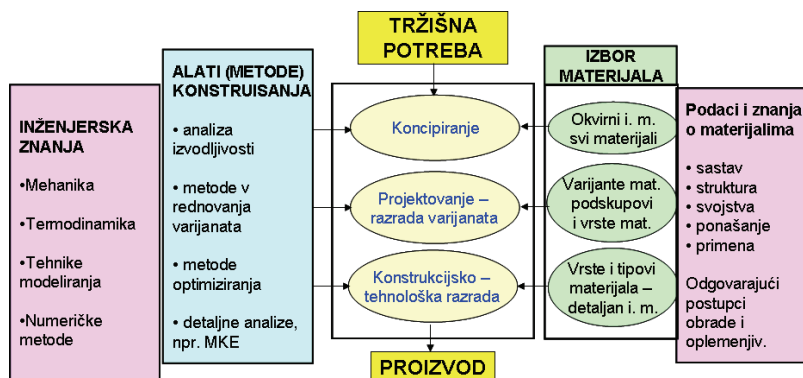
Napokon, treba dobro razraditi postupak proizvodnje, što znači pre svega obezbediti osnove za izradu kvalitetnog proizvoda, ali i za smanjenje ukupnih troškova.

## 2.1 Karakteristike izbora materijala u pojedinim fazama razvoja proizvoda

Postupak konstruisanja može se podeliti u nekoliko karakterističnih međusobno povezanih faza, iako je ceo proces rada iterativan (slika 1) [4]:

1. koncipiranje;
2. projektovanje - razrada varijanti rešenja;
3. konstruisanje delova i tehnološka razrada.

Materijali se biraju u svakoj od navedenih faza, ali unutar različite veličine skupa materijala i s različitim stepenom preciznosti rezultata.

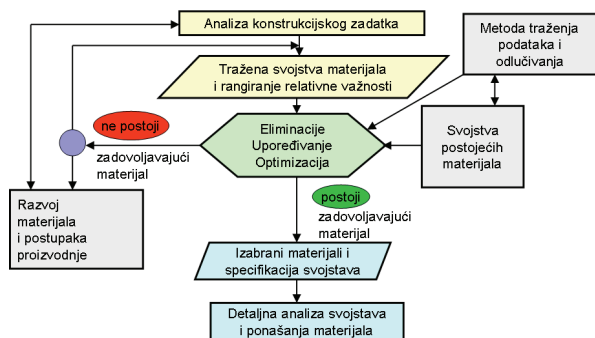


Slika 1. Izbor materijala u pojedinim fazama razvoja proizvoda [4]

## 2.2 Metode odlučivanja i optimalizacije

U težnji ka što objektivnijem i računarski podržanom odlučivanju, uz ekspertna znanja razvijeno je desetak kvantitativnih metoda izbora materijala. Većina njih služi i za vrednovanje konstrukcijskih varijanti celog proizvoda, samo što se u modele uključuju drugi kriterijumi i svojstva.

Pretpostavka upotrebe kvantitativnih metoda je raspolaganje brojčano iskazanim vrednostima svojstava materijala u obliku merenih ili procenjenih vrednosti (ocene). Dakako da i rezultati izbora najviše zavise od pouzdanosti i statističkom rasipanju tih podataka. Stoga kod nepouzdanih podataka treba konsultovati niz izvora, a često prikupljeni podaci podležu statističkom vrednovanju.



Slika 2. Shema toka izbora materijala [2]

Način na koji se bira pogodan materijal najpre zavisi od broja i važnosti postavljenih zahteva i kriterijuma. U slučaju malog broja zahteva velike važnosti, težište je na

kvantitativnoj i kvalitativnoj analizi svojstava i ponašanja manjeg broja materijala koji ulaze u uži izbor, informisanjem ili iskustvom. Primena kvantitativnih metoda odlučivanja dolazi u obzir najpe kod velikog broja traženih svojstava, jer se može očekivati relativno velik broj prihvatljivih materijala. Kod svih načina odlučivanja upoređuju se tražene i postojeće vrednosti svojstava materijala (slika 2) [2].

Prema složenosti, ali i po redosledu odlučivanja razlikujemo tri načina poredjenja [1, 5]:

1. zadovoljenje neke minimalne ili maksimalne tražene vrednosti, ili eliminacija preko nultih-zahteva (kao što su npr. cena, masa, vreme nabavke, toplotna provodnost...) - uglavnom se odnosi na invarijantne zahteve;
2. prekrivanje polja tolerisanih vrednosti zahteva - taj je način poredjenja pogodan za varijantne zahteve;

Rezultati izvedenih poredjenja mogu se predstaviti pomoću tri moguća izlaza:

- a) ni jedan materijal potpuno ne ispunjava zahteve (najnepovoljniji slučaj - ponovo se analiziraju zahtevi ili se razvijaju novi materijali i proizvodni postupci);
- b) jedan materijal potpuno ispunjava sve zahteve (mala verovatnoća);
- c) skup materijala koji potpuno ili delimično ispunjava osnovne zahteve. Takav rezultat je u praksi najčešći.

U tom se slučaju traži *optimalno rešenje* pomoću:

3. minimiziranja ili maksimiziranja vrednosti unapred definisane funkcije cilja ili tzv. parametra vrednovanja.

U opštem obliku funkcija cilja (Fj) je suma odnosa postojećih (Xi) i traženih vrednosti (Yi) svih relevantnih svojstava, pri čemu se svaki odnos množi s faktorom važnosti (Bi) [6]:

$$F_j = \sum_{i=1}^n B_i \cdot \frac{X_i}{Y_i} \quad (1)$$

Da bi se poništio uticaj različitih apsolutnih vrednosti svojstava, treba ih *normalizovati*, tj. svesti na isti red veličina (najčešće u rasponu 1...10 ili 1...100). Normalizacija ili skaliranje pojedinih vrednosti izvodi se u odnosu na minimalnu ili maksimalnu vrednost karakteristika upoređivanih materijala ili prema zahtevanim vrednostima.

*Faktor važnosti (Bi)* određuje relativnu važnost pojedinih zahteva u odnosu na ostale i vrednost je između 0 i 1. Zbir faktora važnosti za sva svojstva obično mora biti jednak 1. Faktori važnosti određuju se na osnovi subjektivne procene važnosti pojedinih svojstava ili pomoću relativno objektivne *digitalno-logičke* metode [1, 4], koja je kao takva opšte prihvaćena.

Kod tog postupka upoređuje se svako svojstvo sa svakim i važnijem se pridružuje 1 a manje važnom 0. Za "n" zahteva, ukupan broj pitanja biće  $n(n-1)/2$ . Faktor važnosti biće jednak odnosu pozitivnih odluka za razmatrano svojstvo i ukupnog broja pitanja.

Ovakvo upoređivanje je logično jer se složeni problem rastavlja na niz pojedinačnih. Zanimljivo je da digitalno-logička metoda daje bolje rezultate, ukoliko je broj zahteva veći. Kod subjektivnih procena to je upravo obrnuto.

U težnji ka što objektivnijem odlučivanju razvijeno je više kvantitativnih metoda izbora materijala. Neke najvažnije od njih jesu [1, 8]:

- Metoda Ashby-jevih karti svojstava,
- Metoda pokazatelja vrednovanja,
- Metoda "cena jedinice svojstava",
- Metoda težinskih svojstava,
- Metoda graničnih vrednosti,
- Metoda najmanjih odstupanja svojstava od traženih
- Metoda određivanja faktora upotrebne vrednost sveden na troškove,
- Pahl-Beitzova metoda ocena.

## 2.2 Metoda graničnih vrednosti

Pretpostavka primene ove metode je preslikavanje zahteva u tražene granične vrednosti svojstava materijala, i to kao [7, 1]:

1. donje granične vrednosti svojstava;
2. gornje granične vrednosti svojstava;
3. ciljane vrednosti svojstava.

Hoće li se na određeno svojstvo postaviti donja ili gornja granična vrednost (tj. minimum ili maksimum) zavisi od željenih karakteristika koje su određene primenom, pa se postojeće vrednosti nazivaju donjim, odnosno gornjim. Tako npr., ako se traži otporan, ali lak materijal, postavlja se donja granica za čvrstoću i gornja za gustinu.

Na taj se način mogu eliminisati svi nepogodni materijali iz baze podataka; dakle, oni kod kojih svojstva izlaze izvan postavljenih granica, a preostale treba uključiti u konačno upoređivanje. Zbog toga se metoda graničnih vrednosti svojstava obično primenjuje za optimizaciju pri izboru materijala i proizvodnih postupaka gde je relativno veliki broj mogućih varijanti.

Sužavanjem broja materijala dolazi se do prihvatljivog skupa, pogodnog za dalju analizu. Nakon analize traženih svojstava, bitnih za razmatrani slučaj, svakom se svojstvu pridružuje neki faktor važnosti (digitalno-logičkom metodom) da bi se nakon toga izračunao pokazatelj vrednovanja  $M$  za svaki pojedini materijal. Pokazatelj vrednovanja  $M$  računa se prema izrazu:

$$M = \left[ \sum_{i=1}^{n_d} B_i \cdot \frac{Y_i}{X_i} \right]_d + \left[ \sum_{j=1}^{n_g} B_j \cdot \frac{X_j}{Y_j} \right]_g + \left[ \sum_{k=1}^{n_c} B_k \cdot \left( \frac{Y_k}{X_k} - 1 \right) \right]_c \rightarrow \min \quad (2)$$

gde se d, g i c odnose na donju, gornju i ciljane vrednost

posmatranog svojstva:

$n_d, n_g, n_c$  - označava broj donjih, gornjih i ciljanih vrednosti svojstava;

$B_i, B_j, B_k$  - su faktori važnosti za donju, gornju i ciljane vrednosti svojstava;

$X_i, X_j, X_k$  - su donje, gornje i ciljane vrednosti za razmatrana svojstva materijala;

$Y_i, Y_j, Y_k$  - su specificirane donje, gornje i ciljane vrednosti svojstava

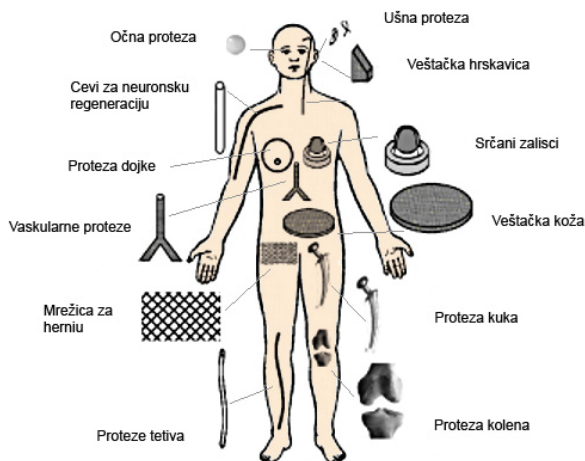
## 3. MATERIJALI ZA PRIMENU U MEDICINI

Biokompatibilni materijali su oni materijali koji se primenjuju u kontaktu sa ćelijama, tkivima ili telesnim tečnostima ljudskog organizma. Najčešće se koriste za zamenu ili nadogradnju strukturnih komponenti ljudskog organizma kako bi se nadomestila oštećenja do kojih dolazi zbog starenja, bolesti ili nesrećnih slučajeva. Zbog izuzetnih mehaničkih karakteristika, biokompatibilni metalni materijali se koriste za izradu medicinskih implantata, kao što su veštački zglobovi, stomatološki implantati, veštački srčani zalisci, pločice i vijci za fiksiranje prelomljenih kostiju, žice i stentovi, veštačko unutrašnje uho, očne i ušne proteze itd. (slika 3), ali i medicinskih elektronskih uređaja, pejsmejker elektroda itd.

Vrsta materijala	Primena
<b>METALI</b>	
Nerdajući čelici <i>Austenitni</i> - AISI 316, 316L, 316LVM, 316Ti, 317, 321 <i>Precipitaciono ojačani</i> - AISI 630 (17-4PH)	Veštački zglobovi, fiksatori preloma kostiju, veštački srčani zalisci, elektrode
Titan i titanove legure Ti Ti-6Al-4V Ti-6Al-7Nb	Veštački zglobovi, zubne proteze i implantati, koronarni stentovi
Kobaltove superlegure Co-Cr Co-Cr-Mo	Veštački zglobovi, fiksatori preloma kostiju
Zlato	Elektrode, zubne krunice i navlake
Srebro	Žice pejsmejker, zubni amalgami
Platina	Elektrode, neurološki stimulacioni uređaji
<b>KERAMIKE</b>	
Aluminijum oksid - $Al_2O_3$	Delovi implanta kuka, zubni implantati
Cirkonijum oksid - $ZrO_2$	Delovi implanta kuka
Kalcijum fosfat	Dodatak za zarastanje kostiju, površinske prevlake za veštačke kukove
Kalcijum sulfat Ugljenik	Dodatak za zarastanje kostiju Prevlake na veštačkim srčanim zaliscima i ortopedskim implantima
Staklo	Dodatak za zarastanje kostiju, dodatak dentalnim materijalima
<b>POLIMERI</b>	
Najlon	Segmenti gastro sistema, trahejne cevčice
Silikon	Veštačka koža, intraokularna sočiva, kateteri, zglobovi prstiju, veštačke grudi
Poliester	Fiksiranje preloma, prekrivanje rana na koži
Polietilen (PE)	Delovi implanta kolena i kuka, veštački ligamenti i tetive, facijalni implantati, sintetičke vaskularne cevčice
Polimetilmetakrilat (PMMA)	Koštani cement, intraokularna sočiva
Polivinil hlorid	Cevčice, facijalne proteze

Tabela 1. Materijali i njihova primena u medicini [10]





Slika 3. Medicinski implantati izrađeni od različitih materijala [11]

### 3.1 Svojstva metalnih materijala za primenu u biomedicinskom inženjerstvu

Biokompatibilni metalni materijali, koji se koriste za izradu medicinskih implantata, moraju da zadovolje određene kriterijume i imaju sledeća svojstva [12]:

**Biokompatibilnost:** Implantni metalni materijali se moraju odlikovati izrazitom biokompatibilnošću, odnosno, izrazitim afinitetom čelija prema površini implantnih metalnih materijala. Postoji veliki broj materijala koji su, sa čisto inženjerskog aspekta, idealni za izradu implantata. Međutim, ukoliko "strano telo" ne može da bude prihvaćeno, od strane tkiva, onda je ono, ma koliko da su njegovi kvaliteti superiorni sa inženjerskog aspekta, neprihvatljivo za izradu implantata.

**Netoksičnost:** Ona je izuzetno bitna karakteristika biomedicinskih materijala s obzirom da oslobađanje metalnih jona i drugih produkata može uticati na pojavu raka, deformiteta, alergija, nekroza, kalcifikacija i zapaljenjskih procesa.

**Otpornost prema koroziji:** U idealnom slučaju biokompatibilni metalni materijali ne bi trebalo uopšte da korodiraju kada se nalaze u dodiru sa živim tkivima.

**Izdržljivost:** Materijali usađeni u ljudski organizam u vidu implantata bi tokom celog svog radnog veka trebalo da funkcionišu bez ikakvih oštećenja, što podrazumeva njihovu izuzetnu zamornu čvrstoću pri koroziji i zamornu čvrstoću pri trenju i koroziji, ali i minimalno oslobađanje čestica prilikom pojave trenja i habanja.

**Čvrstoću i žilavost:** Dimenzije implanata su ograničene i moraju težiti što manjim vrednostima zbog ograničenog prostora u ljudskom organizmu, a vrednosti čvrstoće i žilavosti moraju biti dovoljno visoke.

**Nisku vrednosti modula elastičnosti:** Jangovi moduli biokompatibilnih metalnih materijala, koji se danas koriste u ortopedskoj hirurgiji, su pet do deset puta viši od Jangovog modula kosti, što je izuzetno nepovoljna karakteristika ovih materijala s obzirom da razlika modula elastičnosti metalnog materijala i kosti, koji se nalaze u kontaktu, uslovljava značajno opterećenje kosti i kao rezultat ima smanjenje gustine kostiju.

Implantati imaju komplikovanu konfiguraciju i izrađuju se od legura pogodnih za precizno livenje u vakuumu, kovanje i hladno deformisanje uz neophodnu završnu mehaničku obradu, sa ciljem da se poveća otpornost implantata na lom usled zamora materijala [13].

Danas se u ortopedskoj hirurgiji koriste uglavnom sledeći metalni materijali: nerđajući čelici (austenitni i precipitaciono ojačani), superlegure na bazi kobalta (Co-Cr legure), titan i

njegove legure i veoma retko kompozitni materijali [14].

### 3.2 Nerđajući čelici

Postoji mnogo legura koje se komercijalno identifikuju kao nerđajući čelik. Kao biomaterijal koji se koristi u ortopedskoj hirurgiji, koriste se samo austenitni i precipitaciono ojačani čelici (Tabela 1).

Nelegirano železo, ugljenični čelici i drugi legirani čelici se ne mogu koristiti u ortopedskoj hirurgiji za proizvodnju implantata, pošto su podložni koroziji u agresivnim rastvorima koji sadrže kiseonik.

Uprkos svojoj visokoj otpornosti na koroziju, austenitni čelici tipa Cr-Ni-Fe su izloženi kontaktnoj koroziji, interkristalnoj koroziji, naponskoj koroziji, pojavi ljušpanja (piting). Ovi procesi mogu da dovedu do prelaska metalnih jona u okolna tkiva sa neželjenim biološkim posledicama i dodatno mogu da u velikoj meri smanje mehaničke karakteristike (umanje čvrstoću) legure.

Prisustvo hroma u nerđajućim čelicima dovodi do stvaranja samoregenerativnog oksidnog sloja koji je otporan na perforacije i ima visok stepen elektrotpornosti i time obezbeđuje u najvećoj meri zaštitu od korozije. Nikl, kao legirajući element povećava otpornost na koroziju i obezbeđuje bolju obradivost čelika, naročito kovnost. Molibden, obezbeđuje višu otpornost na ljušpanje (piting), a magnezijum, i silicijum, utiču na poboljšanje obradivosti. Ugljenik, mora biti pod strogom kontrolom jer je njegovo prisustvo nepoželjno; sadržaj ugljeneka ne sme da predje 0,03% pošto sa legirajućim elementima gradi karbide koji su nepovoljni (naročito karbid hroma). Vezivanje hroma stvara zone sa smanjenom otpornošću na koroziju, a kako se karbidi najčešće izdvajaju po granicama zrna kristala, to pospešuje interkristalnu koroziju, kao i nepravilnosti u mikro uslovima kristalne rešetke sa posledicom pogoršanja mehaničkih svojstava [15].



Slika 4. Razni delovi u ortopedskoj hirurgiji napravljeni od nerđajućih čelika

Kontaktna korozija se može pojaviti kod implantata izrađenih od nerđajućeg čelika. Ako su dva dela implantata montirana jedan uz drugi na primer ploča-vijak, zazor između njih ima nižu koncentraciju kiseonika nego u susednim zonama i time se formira tzv. koncentracijska kiseonička čelija sa naponom koji je sposoban da prevaziđe pasivni karakter zaštitnog sloja oksida hroma koji je formiran na površini legure, što omogućuje pojavu lokalne korozije i njeno napredovanje. Ova vrsta korozije se ne očekuje i ne pojavljuje kod monolitnih implantata, kao što je endoproteza kuka.

Kod svih materijala može doći do loma usled zamora ako su izloženi naizmenično promenljivom opterećenju kakvo se očekuje naročito za femoralnu komponentu endoproteze zgloba kuka. Zamorni lom počinje sa malim prslinama usled neke nepravilnosti u kristalnoj rešetki ili greške mehaničke obrade i ta se prslina stalno povećava sa svakim ciklusom promene opterećenja, odnosno naponskog stanja, sve dok ne



dostigne kritičnu veličinu i ne dođe do loma. Da bi se izbeglo prisustvo bilo kakvih uključaka koji mogu da dovedu do greške kristalne rešetke ili pojave inicijalne prsline, nerđajući čelik AISI 316LVM se topi u vakuumu.

### 3.3 Kobaltove superlegure

Super legure se koriste zbog toga jer čisti metali ne mogu da ispune sve zahteve za dobru proizvodnju implantata. Odgovarajući legirajući elementi se dodaju radi poboljšanja: mehaničkih karakteristika, povišenja čvrstoće i otpornosti na koroziju, obradivosti (kovnost) itd.

Razvoj i istraživanje za proizvodnju superlegura na bazi kobalta datira od početka dvadesetog veka, kada je patentirana prva superlegura na bazi kobalta Co-Cr-Mo, pod nazivom "Vitalium dentura", i bila je namenjena za primenu u zubarstvu. Daljim njenim razvojem i modifikacijom razvijene su superlegure pogodne za kovanje i precizno livenje, a koristile su se za izradu visoko termootpornih delova, za turbo kompresore avionskih motora i turbina, kao i za proizvodnju implantata komplikovane konfiguracije. U početku, ovaj materijal bio je poznat pod komercijalnim nazivom BS21 i proizvodio se u obliku granula, a pretapanje je rađeno u indirektnim lučnim pećima [16].



Slika 5. Delovi veštačkog kolena i kuka napravljeni od Co-Cr superlegure

Za proizvodnju delova komplikovane konfiguracije, koristeći uslove i metode koje su razvijene za potrebe zubarstva, razvijen je postupak preciznog livenja, a kada su u pitanju implantati livenje se obavlja u vakuumu. Pogodne za livenje su legure tipa Co-Cr-Mo (ASTM F-175) [17].

U okviru HIP (High Isostatic Pressure) postupka legura Co-Cr-Mo se dovodi do nivoa praha i time se postiže maksimalno zaposedanje kristalne rešetke bez mikroporoznosti, uz dobijanje veoma homogene sitnozrnaste strukture sa visokim mehaničkim karakteristikama.

Legure tipa Co-Cr-Ni-Mo mogu se obrađivati kovanjem u toplom stanju ili hladnim vučenjem. Kovanjem se postiže fina homogena sitnozrnasta kristalna struktura bez prisustva mikroporoziteta što dovodi do povećanja mehaničkih karakteristika. Št o obzirom na veoma dobre mehaničke osobine, koristi se u ortopedskoj hirurgiji kako za proizvodnju femoralne komponente endoproteze zgloba kuka, tako i za elemente interne fiksacije (pločice, vijci, intermodularni klinovi itd.).

### 3.4 Titan i njegove legure

Titan je izuzetno reaktivan element, koji se u zemljinoj kori nalazi u vidu stabilnog oksida, što samo potvrđuje činjenicu da je metalni titan i kiseonik teško razdvojiti. Iz tog razloga je titan tek krajem četvrte decenije prošlog veka ušao u komercijalnu upotrebu u SAD. Iako je titan u medicinske svrhe počeo da se upotrebljava znatno kasnije nego drugi metalni biokompatibilni materijali, njegova upotreba u medicinske svrhe ubrzo je značajno uvećana zahvaljujući njegovim izuzetnim svojstvima kao što su: relativno visoka specifična čvrstoća, nizak modul elastičnosti, velika biokompatibilnost i izuzetno nizak nivo toksičnosti, ali i

lošije tribološke karakteristike pogotovo kada se upoređi sa nerđajućim čelicima i Co-Cr legurama. Na sobnoj temperaturi, zahvaljujući brznoj reakciji titana sa kiseonikom, na površini titana obrazuje veoma stabilan pasivizirajući zaštitni oksidni film [18].

Krajem XX i početkom XXI veka, osnovne komercijalne forme titana u biomedicinskom inženjerstvu postale su komercijalno čist (CP) titan i legura Ti-6Al-4V [19].

Komercijalno čist titan, koji se popularno obeležava kao CP titan, odlikuje se jednofaznom  $\alpha$  mikrostrukturom. CP titan može sadržati izuzetno nisku količinu železa, azota i kiseonika, dok je ukupan sadržaj ostalih elemenata obavezno niži od 0,7%. Zbog neznatnih ali strogo definisanih razlika u sastavu, CP titan se proizvodi u četiri osnovna sastava, koji se obeležavaju brojevima od 1 do 4. Sa porastom broja raste i vrednost zatezne čvrstoće kojom se odlikuju ti sastavi. U odnosu na legure titana, čist titan se karakteriše povećanom otpornošću prema koroziji, dok se  $\alpha$  legure titana odlikuju boljom otpornošću prema povišenim temperaturama i boljom zavarljivošću od  $\beta$  legura, pri čemu im je čvrstoća i mogućnost oblikovanja niža.

Komercijalno čist titan se pre svega koristi u stomatologiji za izradu dentalnih implanata, mada se koristi i u ortopediji u vidu žičanih mrežica, koje služe kao porozne prevlake sinterovane na površini veštačkih zglobova izrađenih od legura titana.

Titan i legure titana, posebno legure  $\alpha + \beta$  tipa kao što je Ti-6Al-4V, smatraju se najprikladnijim biokompatibilnim metalnim materijalima zbog njihove odlične kombinacije mehaničkih karakteristika, otpornosti prema koroziji i biokompatibilnosti. Međutim, vrednost njihovih modula elastičnosti je ipak značajno veća u poređenju sa vrednostima modula elastičnosti ljudske kosti. Pored toga, istraživanja vođena tokom protekle decenije pokazala su da je vanadijum izuzetno toksičan, pa se iz tog razloga intenzivno radi na razvoju novih legura koje sadrže elemente koji ne bi bili toksični za ljudski organizam. Pored toga, za razvoj novih biokompatibilnih legura titana, izuzetno je značajno i da se postignu niže vrednosti modula elastičnosti.

Osnovna ideja u razvoju novih legura za primenu u medicini je, stoga, da se vanadijum i aluminijum zamene niobijumom, tantalom i cirkonijumom, ne bi li se na taj način izbegle negativne karakteristike do sada široko primenjivane Ti-6Al-4V legure, jer se pokazalo da je toksičnost pomenutih elemenata izuzetno niska.

Legura koja pokazuje izuzetna svojstva je Ti-13Nb-13Zr legura, proteklih godina razvijena u SAD. Ova legura je legura titana  $\beta$  tipa i odlikuje se niskim vrednostima modula elastičnosti i čvrstoćom značajno poboljšanom u odnosu na komercijalnu Ti-6Al-4V leguru, zbog čega je izuzetno interesantna za primenu u biomedicinskom inženjerstvu [17].

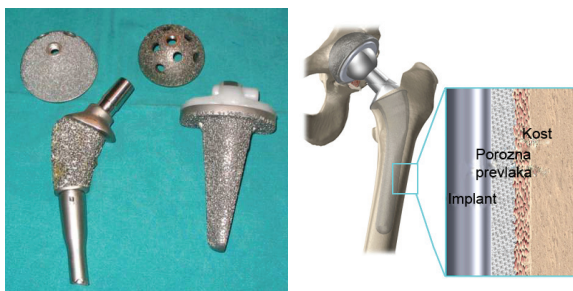


Slika 6. Primena legura titana u ortopediji i zubarstvu

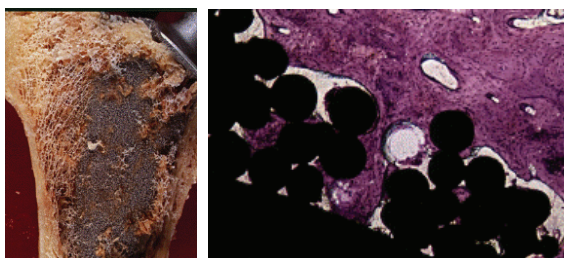
Relativno niska tvrdoća legura titana, međutim, utiče na njihovu slabu otpornost prema habanju, pa se ove legure bez prethodne dodatne površinske obrade, kao što je jonska implementacija, ne mogu koristiti za izradu zglobnih površina.

### 3.5 Porozni materijali

Jedan od najozbiljnijih problema u kliničkoj praksi koji se javlja kod ugradnje endoproteze zgloba kuka jeste otkaz fiksacije, učvršćenja, endoproteze zgloba kuka za kost. Kod cementnih endoproteza koristi se koštani cement za učvršćenje endoproteze za kost, a kod bezcementnih, kao zamena za cement koriste se porozni materijali, koji su nanoseni na endoprotezu i koji omogućuju da kost uraste u poroznu strukturu i time se obezbedi fiksacija, učvršćenje, endoproteze. Postoji čitav niz ovakvih materijala, koji se stalno laboratorijski i klinički ispituju. Razmatra se primena poroznih prevlaka od metala, polimera, keramike i kompozitnih materijala [16].



Slika 7. Izgled proteza kuka i kolena na koje su nanešene porozne prevlake



Slika 8. Makroskopski i mikroskopski izgled urastanja kosti u poroznu prevlaku

Histološki posmatrano, proces urastanja kosti u porozni sloj, osteointegracija, isti je kao i kod zarastanja polomljene kosti. Nakon implantacije, u prvoj fazi, u poroznom sloju su prisutne krvne ćelije, zatim prorasta mlado vezivno tkivo, a zatim urasta kost. Ovo urastanje se odvija progresivno, tako da već nakon tri nedelje može da uraste i do 1500 mikrona. Kada dođe do homogenizacije urasle kosti u porozni sloj i kosti koja je neposredno okružuje, implantat može da preuzme i prenese puno opterećenje.

Prisan kontakt sa protezom, poroznim slojem i adekvatna imobilizacija predstavljaju važne preduslove za uspešno urastanje kosti. Veoma je teško tehnički ostvariti dobar kontakt po celoj površini implantata, ali klinička i eksperimentalna istraživanja pokazala su da u intramedijalnoj šupljini femura kost može da premosti i popuni značajne procepe, ispuni šupljine i uraste u porozni materijal.

Imobilizacija je važna jer se urastanje obavlja uz stalno pokretanje endoproteze. Kod primene endoproteza sa poroznim materijalima, dolazi do značajnog povećanja aktivne kontaktne površine između koštanog tkiva i metala, što obezbeđuje uslove za povećanje mogućnosti difundovanja metalnih jona u okolna tkiva.

### 3.6 Keramički materijali

Keramički materijali koji su predviđeni da se koriste u proizvodnji implantata sadrže čiste i veoma sitne kristale oksida aluminijuma ili cirkonijuma.

Keramički materijali su hemijski i biološki inertni prema svim tečnostima iz organizma, više od svih materijala koji se

koriste za proizvodnju implantata. Poseduju naročito visoku tvrdoću, te su otporni na habanje i oštećenja koja mogu nastupiti ukoliko deliči koštane mase, koštanog cementa ili pak čestica metala dođu u dodir sa površinama delova izrađenih od keramike [20].

Usled visoke krutosti, keramički materijali nisu podložni bilo kakvim deformacijama. Ukoliko naprezanja pređu određene veličine, dolazi do pucanja. Takođe, komponente koje su neposredno u kontaktu sa keramičkim materijalima, moraju biti tačno obrađene, jer svako prinudno prilagođavanje dovodi do pucanja. Keramički materijali imaju izuzetno nizak koeficijent trenja.



Slika 9. Komponente endoproteze od keramičkih materijala

Komponente endoproteze koje se izrađuju od keramičkih materijala su glavica i uložak bescementne acetabularne čašice.

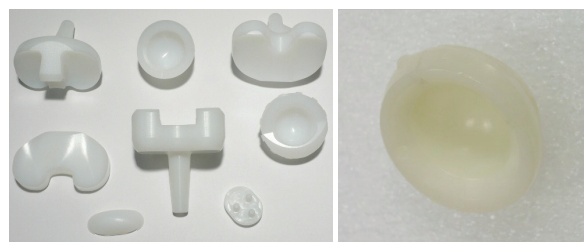
Keramički materijal koji je dobijen od kristala oksida aluminijuma,  $Al_2O_3$ , poznat je pod imenom "biolox". Keramički materijal koji je dobijen od kristala oksida cirkonijuma je znatno jači od keramičkog materijala na bazi oksida aluminijuma i poznat je pod imenom ZTA keramika.

Hidroxyapatite je keramički materijal koji se koristi za oblaganje komponenti bescementne totalne endoproteze zgloba kuka, proksimalni deo femoralne komponente i metalni deo acetabularne komponente. U poroznu oblogu od hidroxyapatita proraste koštano tkivo i tako brže i bolje ankeriše komponente bescementne endoproteze.

### 3.7 Materijali od plastične mase

Za izradu komponenti endoproteze zgloba kuka, materijal mora da ispunjava kako određene mehaničke karakteristike, otpornost na habanje, tako i da poseduje osobinu biokompatibilnosti. Jedini materijal od plastične mase koji je za sada prihvatljiv za izradu implantata je ultrateški visokomolekularni polietilen, UHMWPE, DIN 58834, pod komercijalnim nazivom "chirulen" [17].

Od polietilena koji je u granulama, pod visokim pritiskom na odgovarajućoj temperaturi, proizvode se ploče različitih debljina, od kojih se sečenjem proizvode polufabrikati u obliku šipki, od kojih se mehaničkom obradom izrađuju komponente za endoprotezu zgloba kuka i kolena (Slika 10).



Slika 10. Delovi proteza od polietilena (UHMWPE)

Sterilizacija delova od polietilena nije jednostavna. Nije dozvoljena sterilizacija na visokim temperaturama, jer dolazi



do deformacija i promene mehaničkih karakteristika. Uobičajene sterilizacije su "gama" zracima i etylen oksidom.

### 3.8 Kompozitni materijali

Kompozitni materijal, koji se koristi za izradu proteze kuka je poznat pod nazivom Karbon-Karbon-Kompozit. Koriste se ugljenična vlakna i ugljenik u prahu. Oblikovanje se odvija u kalupima, a zatim sledi sinterovanje. Posедуje odgovarajuću biokompatibilnost, ali zbog neodgovarajućih mehaničkih karakteristika nije našao širu primenu u kliničkoj praksi. Na slici 11 pokazan je stem proteze kuka napravljen od kompozitnog materijala [21].

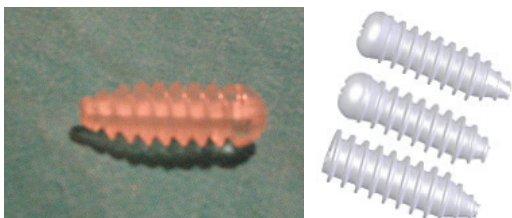


Slika 11. Veštački kuk od kompozitnog materijala

### 3.9 Bioresorptivni materijali

Bioresorptivni materijali imaju osobinu da tokom vremena dođe do resorpcije implantata i njihovo mesto se popuni novim koštanim tkivom. Ovako izrađen implantat održava korektnu repoziciju, dok ne dođe do ostointegracije. Nije povoljno ako je brzina (gradijent) resorpcije veći od brzine stvaranja nove koštane mase. U tom slučaju, može da se pojavi razređenje koštane mase, na mestu gde je bio postavljen implantat, te da se ispravna repozicija oštećenih delova dovede u pitanje [17].

Materijal za izradu bioresorptivnih implantata je na bazi poliglikolaktata. Na slici 12 prikazan je bioresorptivni implantat (vijak) koji se koristi u ortopediji kod ligamentoplastike zgloba kolena.



Slika 12. Bioresorptivni vijci



3 meseca posle operacije



12 meseci posle operacije

Slika 13. Postoperativni RTG snimci kolena gde su korišćeni bioresorptivni vijci (posle 12 meseci vijak je potpuno nestao)

### 3.10 Primena metala i legura u ortopediji

U polju ortopedije, koja se bavi skeletnim poremećajima, kao što su povrede ili oboljenja kosti, zglobova, kičme, mišića i tetiva, legure titana, nerđajući čelici i kobaltove superlegure nalaze široku primenu u stabilizaciji ozleda

potpornih tkiva ili kao zamena za koštano tkivo. Metalni implanti, koji se često koriste u ortopedskoj hirurgiji uključuju zglobne proteze (totalne proteze kuka, kolena, ramena i laktata), delove za fiksaciju preloma (pločice, zavrtnji, eksterni fiksatori) i delove za fiksiranje kičme [22].

Operacije kojima se hirurškim putem zamenjuju zglobovi kuka i kolena su deo uobičajene medicinske prakse. Pomenute hirurške intervencije vrše se kod pacijenata sa osteoartritisom i reumatoidnim artritisom. Implantati u ovom slučaju predstavljaju cevi koje se ubacuju u medularni kanal kosti kako bi stabilisali protezu i delove zgloba. Kad je reč o totalnoj protezi kuka bitno je pomenuti da se glava butne proteze najčešće izrađuje od kobalt-hrom legure ili keramike, dok se komponenta koja zapravo zamenjuje butnu kost (stem) izrađuje od legure titana. Pokretni delovi zgloba, koje se međusobno dodiruju, kao što je čašica butne kosti, se obično izrađuju od kobalt-hrom legure, keramike i polietilena velike gustine kako bi se postiglo značajno smanjenje trenja između kliznih površina zgloba [23].

Na osnovu istraživanja utvrđeno je da su titanove legure u kontaktu sa polietilenom neotporne na habanje, te se kod izrade endoproteze zgloba kuka koristi kombinacija: femoralna komponenta je od legure titana, a glavica (koja je u međusobnom kretanju sa acetabularnom kapicom koja je od polietilena) je izrađena od legure kobalta, čelika ili najčešće od keramike, koja se lako polira i otporna je na habanje (slika 14 i 15).



Slika 14. Različiti materijali kod proteze kuka

Konstrukcije totalnih zglobnih proteza i materijali od kojih se one izrađuju značajno su unapređene poslednjih decenija, ali problem njihovog životnog veka i dalje postoji zbog čega su istraživanja vezana za ovu problematiku od izuzetnog značaja.



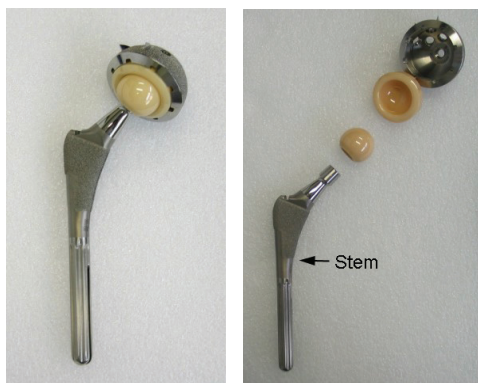
Slika 15. Proteze kuka napravljene od različitih materijala

## 4 PRIMER IZBORA MATERIJALA ZA FEMURALNI DEO PROTEZE VEŠTAČKOG KUKA

Dok je ugradnja implanta s mehaničkog gledišta relativno jednostavna, veći problem čini biokompatibilnost, tj. hoće li organizam prihvatiti strano telo i dolazi li do neželjenih međudelovanja.

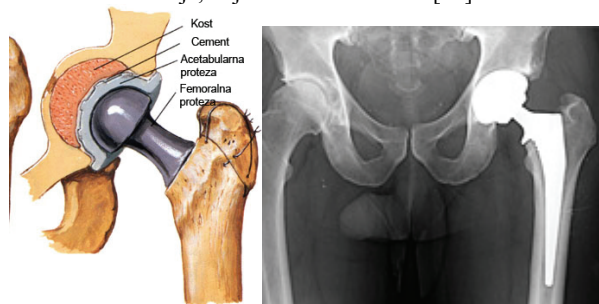
Ovde se kao primer razrađuje izbor materijala samo za stem femuralnog dela veštačkog kuka (slika 16), jer u obzir dolazi niz različitih vrsta materijala, s većom ili manjom trajnošću i cenom. Čašica kuka ("klizni ležaj") ovde nije

analizirana, budući da se ona uglavnom izrađuje samo od polietilena visoke gustine (UHMWPE) ili od keramike od kojih se traži što niži faktor trenja.



Slika 16. Komponente proteze veštačkog kuka napravljene od različitih materijala

Da bi se pravilno izabrao materijal proteze, potrebno je dobro poznavati strukturu kosti i njena svojstva. Treba znati da je kost živo tkivo sastavljeno od anorganskih materija, koje sadrže takve kristale koji čine kost krutom, i organskih, želatinskih materija, koje kost čine žilavom [22].



Slika 17. Skica proteze veštačkog kuka i RTG snimak ugrađene proteze []

Mehaničkih karakteristike kostiju su mnogo lošije, u odnosu na one koje imaju neki metalni i kompozitni materijali. No, pri tome treba znati da zdrava kost sama zarašćuje i ima odličnu otpornost na delovanje naizmeničnog opterećenja. Zbog toga materijal proteze treba da bude mehanički otporniji od kostiju, jer ima sasvim ograničenu trajnost [23].

Zbog opsežnosti cele analize neće se definisati naponi usled statičkog i naizmeničnog opterećenja na kuku, koji se javljaju kao posledica mirovanja ili kretanja.

#### Analiza zahteva za materijale za protezu veštačkog kuka

Osnovni zahtevi koji se postavljaju za materijale za ovaj slučaj jesu [1, 2, 7]:

1. **Prihvataljivost tkiva (PT)** - ukazuje na rizik od odbacivanja implantata i veoma je važan zahtev. Ocene materijala variraju od 1 za najlošiji do 10 za najbolji. Donja granica prihvatljivosti iznosi 7.
2. **Otpornost na koroziju (OK)** je veoma važan zahtev, jer su telesne tečnosti vodeni rastvori soli i veoma su agresivne na materijal implantata. Korozija je štetna jer u kombinaciji s promenljivim opterećenjem može dovesti do loma. Ocene se takođe kreću od 1 do 10, a prihvataju se materijali sa ocenom > 7.
3. **Žilavost loma (KIC)**  
Proračun delova dugo se zasnivao na naponu tečenja i stepenu sigurnosti. Pored toga što su radni naponi bili niži od dozvoljenih dolazilo je do iznenadnih lomova. Lom nastaje zbog rasta inicijalnih prslina na mestima ključaka i drugih diskontinuiteta, na koje su posebno osetljivi metali visokog napona tečenja i velike jačine. Zato je za ovu klasu materijala uveden pojam žilavost

loma, koji se odnosi na otpor širenju prslina.

Donja granica prihvatljivosti je  $K_{Ic} = 40 \text{ MPam}^{1/2}$

4. **Zatezna čvrstoća (Rm)**  
Iz analize naprezanja proizlazi da materijal treba da ima zateznu čvrstoću  $Rm > 95 \text{ MPa}$ .
5. **Dinamička izdržljivost (Rd)**  
Frekvencija opterećenja iznosi od 1 do  $2.5 \cdot 10^6$  ciklusa godišnje, zavisno od fizičke aktivnosti čoveka. Opterećenje na kuk je oko 2.5÷3 težine tela, tj. izračunato promenljivo naprezanje iznosi oko 3.1 MPa. Uz odnos  $Rd/Rm = 0,35$  dobija se minimalna tražena vrednost savojne dinamičke izdržljivosti  $Rd = 33 \text{ MPa}$ .
6. **Otpornost na habanje (OH)**  
Radi što dužeg veka implantata traži se što veća otpornost na adhezijsko habanje, a prihvatljivi se materijali sa ocenom >7.
7. **Modul elastičnosti (E)**  
Elastična kompatibilnost implantata i koštane mase važna je zato da bi se izbegle različite elastične deformacije i postupno odvajanje proteze od kostiju. Nažalost, moduli elastičnosti zamenskih materijala su viši od modula elastičnosti kosti, pa je modul elastičnosti zato ciljana vrednost i iznosi  $17 \text{ kN/mm}^2$ .
8. **Gustina (R)**  
Poželjna je sličnost između gustine nadomestka i kostiju. Ciljana vrednost je gustina kostiju i ona iznosi oko  $1.8 \text{ g/cm}^3$ .
9. **Troškovi (C)**  
Ukupni troškovi uključuju cenu osnovnog materijala, troškove izrade i završne obrade. Kako nije moguća masovna proizvodnja, to troškovi proizvodnje i završne obrade postaju bitni u odnosu na ukupne troškove. Kao najviši iznosi troškova uzimaju se oni koji odgovaraju najskupljem materijalu i iznose 60 GBP/kg.  
Danas primenjivani materijali za stem proteze veštačkog kuka su nerđajući čelici, Ti-legure i Co-Cr-legure. Nova rešenja traže se unutar polimernih kompozita i keramičkih materijala, kao i nanosenih slojeva postupcima modifikovanja površine, ali koji su još u fazi razvoja i ispitivanja.  
Kvantitativno poređenje svojstava materijala izvedeno je metodom graničnih vrednosti, prema vrednosti pokazatelja vrednovanja M (izraz 2). Tražene vrednosti svojstava i faktori važnosti nalaze se u tabeli 2, a vrednosti svojstava kandidovanih materijala i rezultati vrednovanja u tabeli 3.  
Kao što se vidi iz vrednosti pokazatelja vrednovanja M, titanova legura ima malu prednost u odnosu nad livenom i kovanom kobaltovom legurom i nelegiranim titanu. Najbolji među čelicima su austenitni nerđajući čelik AISI 316L i precipitacijski ojačani čelik SAE A286.  
Ako bi se otpornosti na koroziju pridružila manja važnost, a troškovima veća, tada bi za manje trajnije proteze prednost dobili obični austenitni nerđajući čelici.

Svojstvo	Granica	Faktor važnosti
Prihvataljivost tkiva (PT)	donja $Y_i = 7$	0.2222
Otpornost na koroziju (OK)	donja $Y_i = 7$	0.1944
Žilavost loma (KIC)	donja $Y_i = 40 \text{ MPam}^{1/2}$	0.0833
Dinamička izdržljivost (Rd)	donja $Y_i = 33.25 \text{ MPa}$	0.1389
Zatezna čvrstoća (Rm)	donja $Y_i = 95 \text{ MPa}$	0.0833
Otpornost na habanje (OH)	donja $Y_i = 7$	0.0833
Modul elastičnosti (E)	ciljana $Y_k = 17 \text{ MPa}$	0.0833
Gustina (R)	ciljana $Y_k = 2100 \text{ kg/m}^3$	0.0556
Troškovi (C)	gornja $Y_j = 60 \text{ GBP/kg}$	0.0556

Tablela 2. Zahtevana svojstva i faktori važnosti [1]

Vrsta materijala Standard – Hemijski sastav	PT	OK	R <sub>m</sub> , MPa	R <sub>ds</sub> , MPa	E, GPa	K <sub>IC</sub> , MPam <sup>1/2</sup>	OH	R, g/cm <sup>3</sup>	C, GBP/kg	M	Rang
AISI 316L (EN X2 CrNiMo 17 13 2) Fe/<.08C/16-18.5Cr/10-14Ni/2-3Mo/<2Mn/<1Si/<.045P/<.03S	8	7	550	270	198	195	8	7.87	2.8	0.617	5
AISI 317 (EN X2 CrNiMo 18 12 3) Fe/<.08C/17.5-20Cr/11-15Ni/3-4Mo/<2Mn/<1Si/<.045P/<.03S	8	7	570	290	193	170	8.5	7.97	3.2	0.633	8
AISI 321 (EN X10 CrNiTi 18 10) Fe/<.08C/17-19Cr/9-12Ni/<2Mn/<1Si/.3-.7Ti/<.045P/<.03S	8	7	600	265	197	180	8	7.95	2.4	0.632	7
SAE A 286 (DIN X4 NiCrTi 25 15) 54Fe/26Ni/15Cr/2Ti/1.3Mo/1.3Mn/.5Si/.2Al/.05C	8	8	1100	370	201	55	9	7.92	2.3	0.631	6
SAE 17-4 PH (EN X5 CrNiCuNb 17 4) Fe/<.07C/15.5-17.5Cr/3-5Ni/3-5Cu/.15-.45Nb+Ta/<1Mn/<1Si/<.04P/<.03S	8	8	1300	450	202	50	9	7.82	2.3	0.633	9
Co-Cr-Mo (ISO 5832/4) livena 45-65Co/20-30Cr + drugi elem., npr. Fe,Mn,Nb,Ni,Ta,W	9	9	700	350	225	135	10	8.6	22	0.572	2
Co-Cr-Ni-W kovana 40-70Co/19-32Cr + drugi elem, npr. Fe,Mn,Nb,Ta,W	9	9	1070	490	230	135	10	8.6	35	0.577	3
Nelegirani Ti – kovan 99Ti + drugi elem.	10	10	620	380	112	50	7	4.53	20	0.590	4
Ti6Al4V 90Ti/6Al/4V	10	10	1020	625	114	90	7.5	4.42	20	0.544	1
Epoksidna smola + 70% uglj. Vlakna	7	7	580	170	46	45	7	1.55	60	0.736	10
KOST	-	-	130	-	17	12	-	1.8	-	-	-

Tabela 3. Svojstva kandidovanih materijala za protezu veštačkog kuka [1, 9, 20, 24]

## 10. ZAKLJUČAK

Način na koji se bira pogodan materijal u prvom redu zavisi od broja i važnosti zahteva i kriterijuma koji su postavljeni. U slučaju malog broja zahteva velike važnosti težište je na kvalitativnoj i kvantitativnoj analizi svojstava i ponašanja manjeg broja materijala koji dolaze u užu izbor, putem informisanja ili iskustva. Primena kvantitativnih metoda odlučivanja dolazi u obzir kod velikog broja zahteva i kriterijuma, jer se razmatra relativno veliki broj prihvatljivih materijala.

Optimalni materijali biraju se kombinovanjem kvantitativnih metoda odlučivanja i ekspertnih znanja. Step sigurnosti odluka zavisi od prekrivenosti zahteva kvantitativnim pouzdanim vrednostima ili objektivnim procenama.

S obzirom da se biokompatibilni materijali koriste, ne samo u ortopediji, već i u drugim oblastima medicine, gde se nalaze u stalnoj interakciji sa živim tkivima, može se zaključiti da je za razvoj novih materijala za primenu u medicini izuzetno značajno poznavanje i razumevanje pomenutih interakcija, zbog čega biokompatibilnost i netoksičnost materijala postaju kritični faktori daljeg razvoja implantnih metalnih materijala. Takođe, kao osnovna smernica daljeg razvoja biokompatibilnih metalnih materijala izdvaja se i potreba za postizanjem niskih vrednosti modula elastičnosti savremenih biokompatibilnih metalnih legura, koja bi obezbedila što manju razliku između modula elastičnosti kosti i implantnog materijala, a čime bi se sprečilo dalje oštećenje koštanog tkiva i smanjenje gustine kostiju.

Primer izbora materijala za protezu veštačkog kuka pokazuje da se primenom kvantitativne metode odlučivanja dobijaju rešenja u skladu s današnjim primenama materijala u praksi.

## 11. LITERATURA

- [1] Filetin, T.: *Izbor materijala pri razvoju proizvoda*, Sveučilišni udžbenik, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.
- [2] Filetin, T.: "Odlučivanje o materijalima pri konstruiranju", Zbornik radova sa savj. "Modeliranje u znanosti, tehnici i društvu", Rijeka/Zagreb 2000, s. 97-105.
- [3] Filetin, T.: *Izbor materijala kao proces odlučivanja u konstruiranju*, Zbornik radova skupa o konstruiranju, Zagreb, 1984, s. B6-I/1-15.
- [4] Ashby, M.F.: *Materials Selection in Mechanical Design*, 3rd edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK, (2005).
- [5] ASM Handbook Vol. 20, *Materials Selection and Design*, ASM Int., Ohio, 1997.
- [6] Kutz, M., editor: *Handbook of materials selection*, John Wiley & Sons, New York, 2002.
- [7] M.M. Farag: *Selection of Materials and Manufacturing Processes for Engineering Design*, Prentice Hall, London, 1989.
- [8] Filetin, T.: *Usporedba kvantitativnih metoda izbora materijala*, Zbornik radova 4. konferencije iz operacijskih istraživanja - KOI 94, Rab, 1994., s. 119-128.
- [9] *CES software - The CES EduPack 2005* (Cambridge Engineering Selector), Granta Design Ltd., Cambridge, 2005., www.grantadesign.com.
- [10] Enderle, J.D., Bronzino, J.D., Blanchard, S.M., editors: *Introduction to biomedical engineering*, Elsevier Inc. New York, 2005.
- [11] Hiromoto, S.: *Corrosion of Metallic Biomaterials in Cell Culture Environments*, The Electrochemical Society Interface. Vol. 17, No. 2 Summer 2008.
- [12] Cvijović-Alagić, I., Rakin, M.: *Integritet biomedicinskih implanta od legura titana (prvi deo)*, Integritet



- konstrukcija, Vol. 8, br. 1, (2008), str. 31-40
- [13] Bronzino, J.D., editor, *Biomedical Engineering Handbook*, CRC Press, Boca Raton, FL, 2000.
- [14] Park, J.B., Bronzino, J.D., editors: *Biomaterials: principles and applications*. Boca Raton, FL: CRC Press; 2003. p. 1–241.
- [15] Teoh, S.H.: *Engineering Materials for Biomedical Applications*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2004.
- [16] Grujić, J.: *Računarsko Modeliranje i eksperimentalno ispitivanje proteze zgloba kuka*, Magistarska teza - Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2008.
- [17] Ratner, B.D., ... [et al.], editors: *BIOMATERIALS SCIENCE An Introduction to Materials in Medicine*, Elsevier Academic Press, London, 1996.
- [18] Cvijović-Alagić, I., Rakin, M.: *Integritet biomedicinskih implanta od legura titana (drugi deo)*, Integritet konstrukcija, Vol. 8, br. 2, (2008), str. 121-130
- [19] Geetha, M., Singh, A.K., Asokamani, R., Gogia, A.K.: *Ti based biomaterials, the ultimate choice for orthopaedic implants – A review*, Progress in Materials Science 54, 2009. 397–425
- [20] Park, J.B.: *Biomaterials - The Biomedical Engineering Handbook*: Second Edition. Ed. Joseph D. Bronzino Boca Raton: CRC Press LLC, 2000
- [21] Park, J.B., Lakes, R.S.: *Biomaterials - An Introduction* Third Edition, Springer Science+Business Media, LLC, 2007
- [22] Yaszemski, M., ... [et al.] editors, *Biomaterials in Orthopedics*, Marcel Dekker, Inc., New York, 2004
- [23] Sinha, R.K., editor: *HIP REPLACEMENT Current Trends and Controversies*, Marcel Dekker, New York, 2002.
- [24] Black, J., Hastings, G., editors: *Handbook of Biomaterial Properties*, CHAPMAN & HAIL, London, 1998.
- Autori:** Dr Dragan Adamović<sup>1</sup>, dr Goran Devedžić<sup>1</sup>, dr Branko Ristić<sup>2</sup>, dr Lozica Ivanović<sup>1</sup>
- <sup>1</sup> - Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac, Srbija, Tel.: +381 34 330-990, Fax: +381 34 333-192.  
E-mail: [adam@kg.ac.rs](mailto:adam@kg.ac.rs)  
[devedzic@kg.ac.rs](mailto:devedzic@kg.ac.rs)  
[lozica@kg.ac.rs](mailto:lozica@kg.ac.rs)
- <sup>2</sup> - Univerzitet u Kragujevcu, Medicinski fakultet u Kragujevcu, Svetozara Markovića 69, 34000 Kragujevac, Tel./Faks: +381 34 306-800  
E-mail: [branko.ristic@gmail.com](mailto:branko.ristic@gmail.com)

Pejović, B., Todić, A., Mičić, V.

## PRIMENA METODE DEFORMACIJSKOG RADA KOD PROJEKTOVANJA NOSAČA ALATA PRI UNUTRAŠNJEM STRUGANJU DUGAČKIH OBRADAKA

**Rezime:** U radu je, polazeći od proračunske šeme unutrašnje strugarske obrade dugačkih obradaka, izvedena relacija za ukupni deformacijski rad nosača alata, uzimajući u obzir sve normalne i tangencijalne napone. Na bazi izvedene relacije utvrđene su vrednosti najvećeg specifičnog deformacijskog rada za sva prisutna naprezanja, kao i najveća greška obrade usled elastične deformacije. Na kraju rada, kroz praktičan računski primer, prikazana je primena izvedenih relacija kroz kvantitativnu i kvalitativnu analizu, odnosno procenu čvrstoće posmatranog projektovanog elementa, čije su dimenzije bile unapred poznate.

**Ključne reči:** Unutrašnja strugarska obrada, dugački obradci, proračunski model, sile rezanja, složeno naponsko stanje, ukupni i specifični deformacijski rad, elastične deformacije, greška obrade

## USE THE METHOD OF DEFORMATION WORK AT DESIGN TOOLS CARRIERS WITH INTERNAL SCRAPING LONG OBJECT

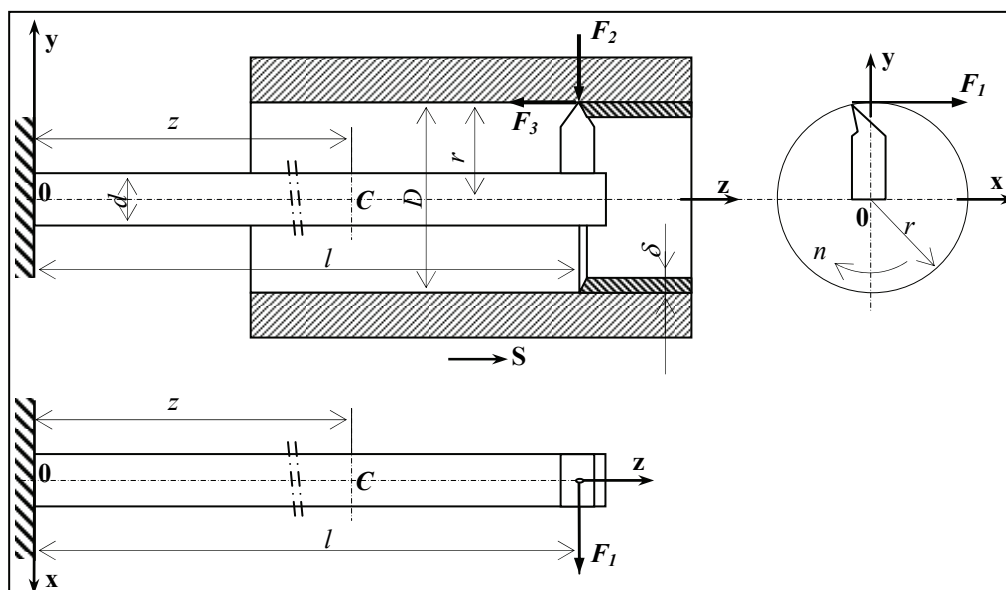
**Abstract:** In the paper for the case of scrapping process on the base of calculating scheme is got relation for total deformation work of tools carriers consideration all normal and tangential tensions. Then, for all tension, the biggest of specific deformation work and error of deformation were calculated. At the end, analyze of obtained relations and approximation of strength tool carrier was performed on work example.

**Key words:** calculation model, complex tension state, total and specific deformation work, error of processing

### 1. UVODNA RAZMATRANJA

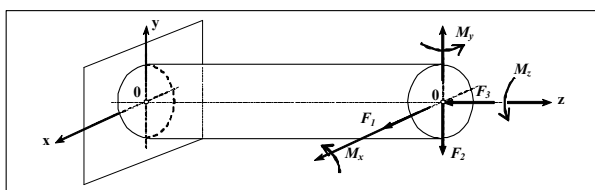
Nosači alata za proširivanje dugačkih otvora, u praksi se primenjuju iz razloga povećanja proizvodnosti kao i povećanja tačnosti izrade. Pri tome, koriste se razne kombinacije alata od kojih su u primeni najčešće poprečni strugarski noževi. Alati se koriste kako za prethodnu tako i za završnu obradu dok nosač alata može biti slobodan ili poduprt /4/, /5/. Telo nosača alata je obično kružnog poprečnog preseka, dok je materijal od koga se izrađuju najčešće konstrukcioni čelik. Ovakvi nosači alata primenjuju se na različitim mašinama alatkama: strugovima bušilicama glodalicama i sl.

Njihovo učvršćivanje na mašini je najčešće morze konusom dok se alati na nosač obično učvršćuju vijcima. Pored cilindričnih obradaka konstantnih unutrašnjih prečnika, često na mašinama imamo i obradu stepenastih prečnika, /6/, /7/. Dimenzije nosača alata pri opisanoj obradi često su ograničene kako prečnikom i dužinom obradka tako i hodom same mašine, kao i drugim tehnološkim razlozima. Dužina nosača mora biti što kraća kako bi njegovo savijanje pri obradi bilo što manje a time smanjen i uticaj vibracija /8/, /9/, /11/.



Slika 1. Proračunska šema nosača alata pri strugarskoj obradi dugačkih obradaka

Na sl. 1 dat je prikaz proračunske šeme, odnosno opšteg modela nosača alata pri unutrašnjoj strugarskoj obradi dugačkih obradaka, sa jednim alatom. Na slobodnom kraju nosača, prečnika  $d$ , učvršćen je porečno nož, dok je na drugom kraju nosač uklješten pomoću morze konusa. Obrada se obavlja na vertikalnom strugu tako da se obradak okreće a nosač alata miruje. U praksi se susreće i slučaj kada obradak miruje dok se nosač alata okreće. Za ovaj slučaj, zbog nesimetričnog položaja alata, javlja se i centrifugalna sila čije dejstvo se ne sme zanemariti. Isto tako, za slučaj postavljanja dva dijametralna alata, dolazi do poništavanja određenih sila rezanja. Alat, odnosno nosač alata, opterećuju komponente sile rezanja  $F_1$ ,  $F_2$  i  $F_3$ , odnosno njihovi momenti u tri ravni, što je dato u prostornom prikazu na sl. 2. Očigledno je da sile i momenti u ovom slučaju izazivaju složeno naponsko stanje nosača alata i to normalne ( $\sigma$ ) i tangencijalne ( $\tau$ ) napone



Sl. 2. Prostorni prikaz opterećenja nosača alata silama rezanja i njihovim momentima

## 2. UKUPNI DEFORMACIJSKI RAD

Ukupni deformacijski rad odnosno ukupna akumulirana energija, sastoji se od radova usled normalnih i tangencijalnih napona. Pri ovome normalni naponi se javljaju usled aksijalne sile  $F_3$  i poprečnih sila  $F_2$  i  $F_1$ , odnosno njihovih momenata savijanja. Tangencijalni naponi se javljaju usled transverzalnih sila  $T$  i momenta uvijanja  $M_u$ .

S obzirom na prethodno, ukupni deformacijski rad biće  $U = U_\sigma + U_\tau$ :

$$U = U_\sigma + U_\tau \quad (1)$$

$$U = \frac{1}{2E} \int \sigma^2 dV + \frac{1}{2G} \int \tau^2 dV \quad (2)$$

Deformacijski rad usled normalnih ( $U_\sigma$ ) i tangencijalnih ( $U_\tau$ ) napona biće:

$$U_\sigma = U_S + U_P \quad (3)$$

$$U_\sigma = \frac{1}{2E} \int_0^l \frac{M^2}{I} dz + \frac{1}{2E} \int_0^l \frac{F^2}{A} dz \quad (4)$$

$$U_\tau = U_{Sm} + U_u \quad (5)$$

$$U_\tau = \frac{k}{2G} \int_0^l \frac{T^2}{A} dz + \frac{1}{2G} \int_0^l \frac{M_u^2}{J_0} dz \quad (6)$$

Deformacijski rad usled savijanja, biće prema (4):

$$U_S = \frac{1}{2J_x E} \int_0^l M_x^2 dz + \frac{1}{2J_y E} \int_0^l M_y^2 dz \quad (7)$$

Ovde je  $J_x = J_y = J$

Moment savijanja, u proizvoljnoj tački C nosača alata, izazivaju sile  $F_2$  i  $F_3$  za x osu, kao i sila  $F_1$  za y osu. Prema (7) biće:

$$U_S = \frac{1}{2JE} \int_0^l [F_2(l-z) - F_3r]^2 dz + \frac{1}{2JE} \int_0^l [F_1(l-z)]^2 dz \quad (8)$$

Integraljenjem izraza (8) biće

$$U_S = \frac{1}{2JE} \left[ -\frac{F_2^2}{3} (l-z)^3 + 2F_2F_3r \frac{(l-z)^2}{2} + F_3^2 r^2 z \right]_0^l - \frac{1}{6JE} F_1^2 [(l-z)^3]_0^l \quad (9)$$

Sređivanjem izraza (9), za deformacijski rad savijanja dobijamo konačni izraz:

$$U_S = \frac{1}{2JE} \left[ \frac{l^3}{3} (F_1^2 + F_2^2) + F_3lr(F_3r - F_2l) \right] \quad (10)$$

Aksijalna sila  $F_3$  izaziva normalni napon pritiska, pa će deformacijski rad biti prema (4):

$$U_P = \frac{1}{2EA} \int_0^l F_3^2 dz = \frac{F_3^2 l}{2EA} \quad (11)$$

Pri savijanju pored normalnog napona usled dejstva transverzalnih (poprečnih) sila  $F_1$  i  $F_2$ , javlja se i tangencijalni napon smicanja, pa će deformacijski rad prema (6) biti:

$$U_T = U_{TF_1} + U_{TF_2} = \frac{k}{2GA} \int_0^l F_1^2 dz + \frac{k}{2GA} \int_0^l F_2^2 dz \quad (12)$$

Posle integraljenja izraza (12) biće konačno

$$U_T = \frac{kl}{2GA} (F_1^2 + F_2^2) \quad (13)$$

U izrazu (13),  $k$  predstavlja smicajni koeficijent koji zavisi od poprečnog preseka elementa koji se proračunava.

Očigledno, tangencijalni napon se ne javlja za slučaj savijanja usled sile  $F_3$  (čisto savijanje).

Uvijanje izaziva moment sile  $F_1$ :

$$M_z = M_u = F_1 r l$$

pa će deformacijski rad biti:

$$U_u = \frac{1}{2GJ_0} \int_0^l M_z^2 dz = \frac{M_z^2 l}{2GJ_0} = \frac{F_1^2 r^2 l}{2GJ_0} \quad (14)$$

Ukupni deformacijski rad prema (1), dobijamo zamenom izvedenih izraza (10), (11), (13) i (14), u obliku opšteg modela

$$U_S = \frac{1}{2JE} \left[ \frac{l^3}{3} (F_1^2 + F_2^2) + F_3lr(F_3r - F_2l) \right] + \quad (15)$$

$$\frac{F_3^2 l}{2EA} + \frac{kl}{2GA} (F_1^2 + F_2^2) + \frac{F_1^2 r^2 l}{2GJ_0}$$

Vidi se da za sve uzvedene deformacijske radove postoji određena analogija.

## 3. SPECIFIČNI DEFORMACIJSKI RAD

Prema hipotezi najvećeg specifičnog deformacijskog rada sledi da do plastične deformacije neće doći ukoliko se ne prekorači energija deformacije koja se može akumulirati u jedinici zapremine materijala. Pri ovome očigledno, napon odnosno deformacije ostaju u elastičnom području, za koje važi Hukov zakon,  $U_1, U_2, U_3$ .

Za sva prisutna naprezanja, biće izvedene relacije za specifični deformacijski rad, prema:

$$u = \frac{U}{V}$$

a) Aksijalna naprezanja (pritiskak i zatezanje)

Maksimalni napona za aksijalno naprezanje biće

$$\sigma_{\max} = \frac{F}{A} = \frac{4F}{d^2 \pi} \quad (16)$$

Rešavanjem relacije (16) po sili F dobijamo

$$F = \frac{\sigma_{\max} d^2 \pi}{4} \quad (17)$$

Eliminisanjem sile prema (17), iz relacije za ukupni deformacijski rad pri pritisku (11), biće:

$$U_p = \frac{F^2 l}{2EA} = \frac{4F^2 l}{2Ed^2 \pi} = \frac{2F^2 l}{Ed^2 \pi} = \frac{2l}{d^2 \pi E} \frac{\sigma_{\max}^2 d^4 \pi^2}{16} = \frac{\sigma_{\max}^2 d^2 \pi l}{8E} \quad (18)$$

Specifični deformacijski rad, po definiciji dobijamo deljenjem ukupnog deformacijskog rada (18) sa ukupnom zapreminom posmatranog elementa:

$$u_p = \frac{U_p}{V} = \frac{\frac{\sigma_{\max}^2 d^2 \pi l}{8E}}{\frac{d^2 \pi l}{4}} = \frac{\sigma_{\max}^2}{2E} \quad (19)$$

Najveća vrednost energije deformacije jedinice zapremine koja se može akumulirati u elementu bez plastične deformacije dobija se ako u relaciji (19) napon  $\sigma_{\max}$  zamenimo sa granicom elastičnosti materijala  $\sigma_E$ :

$$u_{pd} = \frac{\sigma_E^2}{2E} \quad (20)$$

#### b)Smicanje

Na isti način, po analogiji kao kod aksijalnih naprezanja, za naprezanje na smicanje biće:

$$u_{sm} = \frac{U_{sm}}{V} = \frac{\tau_{\max}^2}{2G} \quad (21)$$

odnosno

$$u_{smd} = \frac{\tau_E^2}{2G} \quad (22)$$

#### c)Savijanje

Najveći napon pri savijanju za slučaj konzole biće:

$$\sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_x} = \frac{32M_{\max}}{\pi d^3} = \frac{32Fl}{\pi d^3} \quad (23)$$

Iz relacije (23), sila na kraju konzole biće:

$$F = \frac{\pi d^3 \sigma_{\max}}{32l} \quad (24)$$

Ukupni deformacijski rad za posmatrani slučaj prema relacijama (7) i (24) biće:

$$U_s = \frac{1}{2EI_x} \int_0^l F^2 z^2 dz = \frac{F^2 l^3}{6EI} = \frac{\pi^2 d^6 \sigma_{\max}^2 l^3}{32^2 l^2 6EI} = \frac{\pi^2 d^6 \sigma_{\max}^2 l}{6144EI} \quad (25)$$

Specifični deformacijski rad dobijamo deljenjem relacije (25) sa ukupnom zapreminom elementa:

$$u_s = \frac{U_s}{V} = \frac{\frac{\pi^2 d^6 \sigma_{\max}^2 l}{6144EI}}{\frac{d^2 \pi l}{4}} = \frac{4\sigma_{\max}^2 \pi d^4}{EI_x 96 \cdot 64} = \frac{\sigma_{\max}^2}{24E} \quad (26)$$

Najveća vrednost energije deformisanja jedinice zapremine dobija se ako se  $\sigma_{\max}$  u (26) zameni sa granicom elastičnosti:

$$u_{sd} = \frac{\sigma_E^2}{24E} \quad (27)$$

Poređenjem relacija (19) i (27) zapaža se da je količina energije akumulirane bez stvaranja plastičnih deformacija, za slučaj savijanja, 12 puta manja od energije kod aksijalnog naprezanja.

#### d)Uvijanje

Primenjujući istu proceduru kao kod savijanje biće:

$$\tau_{\max} = \frac{M_u}{W_0} = \frac{16M_u}{\pi d^3} \quad (28)$$

Oдавde je:

$$M_u = \frac{\tau_{\max} \pi d^3}{16} \quad (29)$$

Zamenom relacije (28) u relaciju (14) biće:

$$U_u = \frac{1}{2G} \frac{M_u^2 l}{J_0} = \frac{1}{2G} \frac{32}{\pi d^4} M_u^2 l = \frac{16l}{G \pi d^4} \frac{\tau_{\max}^2 \pi^2 d^6}{16^2} = \frac{\tau_{\max}^2 \pi d^2 l}{16G} \quad (30)$$

Najveća vrednost specifičnog deformacijskog rada biće:

$$u_u = \frac{U_u}{V} = \frac{\frac{\tau_{\max}^2 \pi d^2 l}{16G}}{\frac{d^2 \pi l}{4}} = \frac{\tau_{\max}^2}{4G} \quad (31)$$

Uvođenjem granice  $\tau_E$  u izraz (31) dobijamo najveću vrednost specifičnog deformacijskog rada:

$$u_{ud} = \frac{\tau_E^2}{4G} \quad (32)$$

## 4. ELASTIČNE DEFORMACIJE PRI DELOVANJU SILA REZANJA

Od svih sila, najveći uticaj na tačnost obrade u pravcu normale na obradenu površinu (sl.1) ima sila prodiranja  $F_2$ , koja se po pravcu poklapa sa normalom. U najvećem broju slučajeva uticaj drugih dveju sila  $F_1$  i  $F_3$  na tačnost, praktično je zanemarljiv, /11/, /12/, /13/.

Da bi odredili grešku elastične deformacije pri delovanju sile rezanja  $F_2$ , poči ćemo od relacije za deformacijski rad pri savijanju (10), napisanoj u obliku

$$U_s = \frac{1}{2JE} \left[ F_1^2 \frac{l^3}{3} + F_2^2 \frac{l^3}{3} + F_3^2 l r^2 - F_2 F_3 l^2 r \right] \quad (33)$$

Koristeći Kastiljanovu teoremu po kojoj je pomeranje napadne tačke sile u pravcu dejstva ove sile, jednako parcijalnom izvodu deformacijskog rada po ovoj sili /2/, /3/, biće:

$$y_{F_2} = \frac{\partial U_s}{\partial F_2} = \frac{2F_2 l^3}{6JE} - \frac{F_3 l^2 r}{2JE} = \frac{2F_2 l^3 - 3F_3 l^2 r}{6JE} \quad (34)$$

Očigledno, na pomeranje sile  $F_2$  utiče i sila  $F_3$ .

Na isti način, može se dobiti i pomeranje u pravcu sile  $F_1$ , kao:

$$y_{F_1} = \frac{\partial U}{\partial F_1} = \frac{1}{2JE} \frac{l^3}{3} 2F_1 = \frac{F_1 l^3}{3JE} \quad (35)$$

Pomeranje (35), nema neki veći uticaj na tačnost obrade /7/, /13/, i u praksi se obično zanemaruje.

## 5. RAČUNSKI PRIMER

Za strugarsku obradu prema sl.1 poznate su sledeće veličine:

unutrašnji prečnik obradka  $D = 100\text{mm}$   
 prečnik nosača alata  $d = 50\text{mm}$   
 dužina nosača alata  $l = 400\text{mm}$   
 materijal nosača alata konstrukcioni čelik  
 merodavni materijal obradka nerđajući čelik, valjan  
 i žaren, martenzitni (HB=200)  
 alat nož sa pločicom od TM kvaliteta P30  
 osnovni merodavni režimi rezanja:  
 $v = 70\text{m/min}$ ,  $\delta = 2.5\text{mm}$ ,  $s = 0.3\text{mm/ob}$

funkcija glavnog otpora rezanja:  $F_1 = 2100 \delta^{1.0} s^{0.75}$

modul elastičnosti materijala nosača alata:

$$E = 2.1 \cdot 10^7 \text{ N/cm}^2$$

modul klizanja materijala nosača alata  $G = 8 \cdot 10^6 \text{ N/cm}^2$

Proračun izvodimo po sledećem redosledu:

a) Aksijalni i polarni momenti inercije odnosno površina preseka za nosač alata:

$$J_x = J_y = \frac{\pi d^4}{64} = \frac{\pi 5^4}{64} = 30.68 \text{ cm}^4$$

$$J_o = \frac{\pi d^4}{32} = \frac{\pi 5^4}{32} = 61.36 \text{ cm}^4$$

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{5^2 \pi}{4} = 19.63 \text{ cm}^2$$

b) Sile rezanja prema zadatoj funkciji obradljivosti:

$$F_1 = 2100 \cdot 0.3^{0.75} \cdot 2.5^{1.0} = 2125 \text{ N}$$

$$F_1 : F_2 : F_3 = 5 : 2 : 1$$

$$F_2 = 0.4 F_1 = 850 \text{ N}$$

$$F_3 = 0.2 F_1 = 425 \text{ N}$$

c) Deformacijski rad savijanja prema (10) biće:

$$U_s = \frac{1}{2 \cdot 30.68 \cdot 2.1 \cdot 10^7} \left[ \frac{40^3}{3} (2125^2 + 850^2) + 425 \cdot 40 \cdot 5 (425 \cdot 5 - 850 \cdot 40) \right]$$

$$U_s = 86.7207 \text{ Ncm}$$

d) Deformacijski rad uzdužne sile  $F_3$ , prema (11) biće:

$$U_p = \frac{F_3^2 l}{2EA} = \frac{425^2 \cdot 40}{2 \cdot 2.1 \cdot 10^7 \cdot 19.63} = 0.00876 \text{ Ncm}$$

e) Deformacijski rad usled transverzalnih sila, prema (13) biće:

$$U_T = \frac{k l}{2GA} (F_1^2 + F_2^2) = \frac{10 \cdot 40}{2 \cdot 8 \cdot 10^6 \cdot 19.63} = 0.7412 \text{ Ncm}$$

Gde je  $k = \frac{10}{9}$  smicajni koeficijent za krug.

f) Deformacijski rad usled uvijanja, prema (14) biće:

$$U_u = \frac{F_1^2 r^2 l}{2GJ_o} = \frac{2125^2 \cdot 5^2 \cdot 40}{2 \cdot 8 \cdot 10^6 \cdot 61.36} = 4.5995 \text{ Ncm}$$

g) Ukupni deformacijski rad biće

$$U = U_s + U_p + U_T + U_u =$$

$$86.7207 + 0.00876 + 0.7412 + 4.5995$$

$$U = 92.07016 \text{ Ncm}$$

Očigledno na ukupni deformacijski rad daleko najveći uticaj ima naprezanje na savijanje, dok je uticaj ostalih naprezanja osetno manji.

h) Greška elastične deformacije usled sile  $F_2$ , prema relaciji (34) biće:

$$y_{F_2} = \frac{2F_2 l^3 - 3F_3 l^2 r}{6JE} = \frac{2 \cdot 850 \cdot 40^3 - 3 \cdot 425 \cdot 40^2 \cdot 5}{6 \cdot 30.68 \cdot 2.1 \cdot 10^6} = 0.0255 \text{ cm} = 0.255 \text{ mm}$$

i) Najveća (granična) vrednost specifičnog deformacijskog rada prema relacijama (19) i (27), za aksijalno naprezanje i savijanje biće:

$$u_{Pd} = \frac{\sigma_E^2}{2E} = \frac{(20 \cdot 10^3)^2}{2 \cdot 2.1 \cdot 10^7} = 9.524 \text{ N/cm}^2$$

$$u_{Sd} = \frac{\sigma_E^2}{24E} = \frac{(20 \cdot 10^3)^2}{24 \cdot 2.1 \cdot 10^7} = 0.794 \text{ N/cm}^2$$

Nosači alata za posmatrani slučaj obrade, najčešće se izrađuju od konstrukcionog čelika čija se granica elastičnosti kreće u granicama  $\sigma_E = 200 \div 800 \text{ N/mm}^2$ . U gornjim slučajevima predstavljen je najnepovoljniji slučaj pri najmanjoj granici elastičnosti ( $\sigma_E = 200 \text{ N/mm}^2$ ).

j) Stvarni specifični deformacijski rad:

$$u = \frac{U}{V} = \frac{U}{A \cdot l} = \frac{92.07016}{19.63 \cdot 40} = 0.117 \text{ N/cm}^2$$

Odnos najvećeg dozvoljenog i stvarnog specifičnog deformacijskog rada biće

$$\frac{u_{Sd}}{u} = \frac{0.794}{0.117} = 6.8$$

što s obzirom na najmanju usvojenu vrednost za  $\sigma_E$  zadovoljava. Prema tome, može se smatrati da je nosač alata ispravno dimenzionisan.

U opštem slučaju aksijalna sila  $F_3$  izaziva i izvijanje nosača alata, koje se može proveriti prema Ojlerovoj kritičnoj sili,  $1/1$ ,  $1/2$ . Za posmatrani slučaj, sila  $F_3$  je vrlo mala pa ovu proveru ne treba vršiti.

Za slučaj da prečnik nosača alata  $d$  nije poznat, njegovo dimenzionisanje je moguće izvršiti preko relacija (15) i (27):

$$u_s = \frac{U_s}{V} = \frac{4}{d^2 \pi} \frac{l}{2JE} \left[ \frac{l^3}{3} (F_1^2 + F_2^2) + F_3 l r (F_3 r - F_2 l) \right] = \frac{\sigma_E^2}{24E} \quad (36)$$

Pri ovome sva naprezanja, osim savijanja su zanemarena.

## 6. ZAKLJUČAK

Prikazana metoda deformacijskog rada, razrađena u teoriji elastičnosti, pogodna je za primenu kod datog primera kod koga je zastupljeno prostorno naponsko stanje. U odnosu na klasičnu metodu proračuna preko napona, metoda je brža, jednostavnija a time i efikasnija. Nekih posebnih ograničenja u njenoj primeni nema. Posebno je pogodna za slučaj promenljivih poprečnih preseka nosača alata, dok joj pouzdanost nije manja od klasične metode.

Prikazani opšti model, koji se u praksi može direktno koristiti za mnoge slučajeve unutrašnje obrade, pored ocene čvrstoće



projektovanog nosača alata, može se koristiti i za njegovo dimenzionisanje koristeći kritični specifični deformacijski rad.

Sušтина je u tome da nosač alata treba tako dimenzionisati da može bez oštećenja (plastične deformacije), apsorbovati zadatu količinu energije (deformacijski rad), vodeći računa o njegovoj težini kao i dozvoljenom ugibu (elastičnoj deformaciji).

Kao što je pokazano, najveći uticaj na deformacijski rad ima naprezanje na savijanje. Ostala naprezanja, u mnogim slučajevima mogu se zanemariti, čime se proračun znatno uprošćava.

## LITERATURA

- [1] Timosenko, S.: Strength of materials, part I-II, Nostrand company, New York, 1978.
- [2] Hlitičjev, J.: Teorija elastičnosti sa primenom, Naučna knjiga, Beograd, 1980.
- [3] Rašković, D.: Otpornost materijala, Naučna knjiga, Beograd, 1982.
- [4] Semenčenko, I.I., Matjošin, V.M.: Proektirovanie metallorėžušćih instrumenntov, Mašgiz, Moskva, 1983.
- [5] Schreyer, K.: Werksuckspanner, Springer – Verlag, Berlin, 1989.
- [6] Dubbel, J.: Tacshenbuck fur Maschinenban, I-II Band, Springer – Verlag, Berlin, 1979.
- [7] Zdenković, R.: Obrada metala skidanjem, Sveučilište u zagrebu, Zagreb, 1975.
- [8] Trent, E.M.:Mettal cuting, Butterworths, London – Bochon, 1990.
- [9] Ačerkan, N.S. i dr.: Metallorėžušćie stanki, Tom 1 i 2, Mašinstroenie, Moskva, 1975.
- [10] Kalajdžić, M. i dr.: Tehnologija obrade rezanjem, priručnik, mašinski fakultet, Beograd, 2001.
- [11] Niemann, G.: Maschinenelemente, Erste Band, Springer – Verlag, Berlin, 1983.
- [12] Alekseev, G.A. i dr.: Rasčet i konstruirovanie režušćego instrumenta, Mašgiz, Moskva, 1981.
- [13] Stanić, J.: Upravljanje kvalitetom proizvodnje, metodi I i II, Građevinska knjiga, Beograd, 1985.

**Autori:** Prof. dr Branko Pejović, docent dr Vladan Mićić, Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Tehnološki fakultet Zvornik, mr Aleksandar Todić, Fakultet tehničkih nauka Kosovska Mitrovica  
E-mail: [vlado1@spinter.net](mailto:vlado1@spinter.net)



Rad po pozivu

Vilotić D., Plančak M., Movrin D., Trbojević I., Milutinović M.

## NUMERIČKA ANALIZA PROCESA SABIJANJA

**Rezime:** Poznavanje naponsko-deformacionog stanja po zapremini obratka je osnova za uspešno projektovanje procesa deformisanja, određivanje parametara procesa i analizu deformabilnosti materijala.

U ovom radu prikazani su rezultati analize kontaktnih napona u procesu sabijanja prizmatičnog pripremk cilindričnim alatima primenom različitih metoda: metodom ravnih preseka, metodom merne čivije i metodom konačnih elemenata.

**Cljučne reči:** sabijanje, cilindrični alati, metode analize, MKE

## NUMERICAL ANALYSIS OF UPSETTING PROCESSES

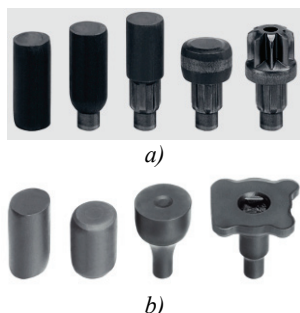
**Abstract:** The knowledge of the stress and strain components within the workpiece volume in metal forming is essential for successful design of such process, including the determination of the forming load and prediction of ductile fracture initiation. To this end, different theoretical, numerical and experimental methods are applied.

In this paper results of contact stress analysis in the process of upsetting of prismatic specimen by cylindrical dies are presented. The analysis of this process has been performed by slab method, Finite Element Method (FEM) and pin load cell method.

**Key words:** upsetting, cylindrical dies, method of analysis, FEM

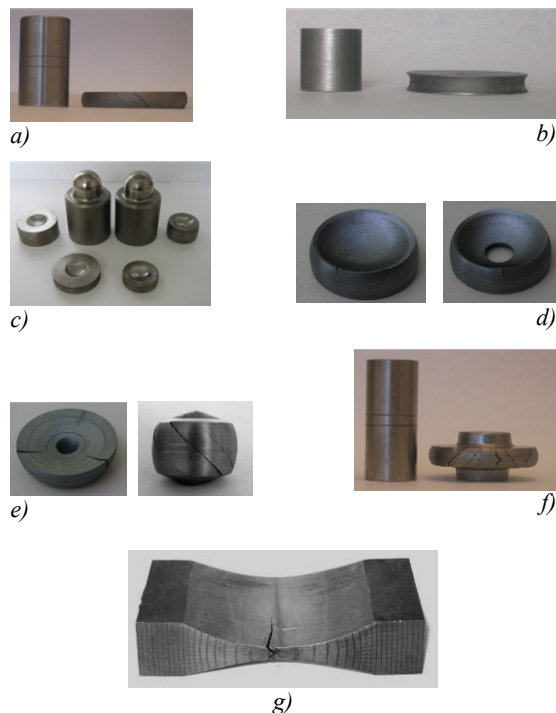
### 1. UVOD

Sabijanje predstavlja elementarnu operaciju zapreminskog deformisanja koja se izvodi pomoću jednostavnih alata na polaznom materijalu cilindričnog, prizmatičnog, ili nekog složenijeg oblika dobijenog u prethodnim operacijama oblikovanja. Radna površina alata je najčešće ravna a može biti i cilindrična, konusna sferična, ispupčena i izdubljena. Ako se ima u vidu još i početni položaj pripremk u alatu, može se zaključiti da postoji značajan broj varijanti sabijanja. Procesi sabijanja imaju poseban značaj za tehnologije hladnog i toplog kovanja i istiskivanja. Osim toga, ovi procesi se koriste za određivanje dijagrama granične deformabilnosti materijala pri zapreminskom deformisanju i za određivanje krive tečenja (Rastegajev test) [4, 7,10].



Slika 1. Sabijanje u procesima višefaznog oblikovanja:  
a) hladno kovanje b) toplo kovanje [14]

Analiza procesa sabijanja u hladnom i toplom stanju podrazumeva identifikaciju naponsko-deformacionog stanja i parametara procesa radi sigurnijeg projektovanja ove tehnologije i mogućnosti provere trenutka pojave razaranja materijala. U tom smislu primenjuju se različite metode koje se dela na teorijske, eksperimentalne i numeričke.



Slika 2. Različiti postupci sabijanja: a) sabijanje valjka ravnim pločama; b) Rastegajev test; c, d) sabijanje valjka sferičnim alatima; e) sabijanje valjka konusnim alatima; f) sabijanje valjka u plitkom kalupu; g) sabijanje prizmatičnog pripremk cilindričnom alatima [3,6,7]

Od teorijskih metoda analize najpoznatija je metoda rešavanja približnih jednačina ravnoteže, čiji je osnovni nedostatak nemogućnost određivanja promene komponenti napona po zapremini radnog komada. Iz grupe teorijskih metoda

svakako treba ukazati na metodu linija klizanja i varijacionu metodu koje su omogućile analizu složenih procesa sabijanja i kovanja [7].

U eksperimentalne metode analize spadaju metoda vizioplastičnosti, metoda merne čivije i metode fizičkog modeliranja procesa deformisanja.

Metoda vizioplastičnosti [7] je razvijena šezdesetih godina prošlog veka i dala je značajne rezultate u oblasti kovanja, istiskivanja i vučenja.

Metoda merne čivije [5,7] omogućuje određivanje kontaktnih napona i koeficijenta trenja u različitim procesima zapreminskog deformisanja i obrade lima.

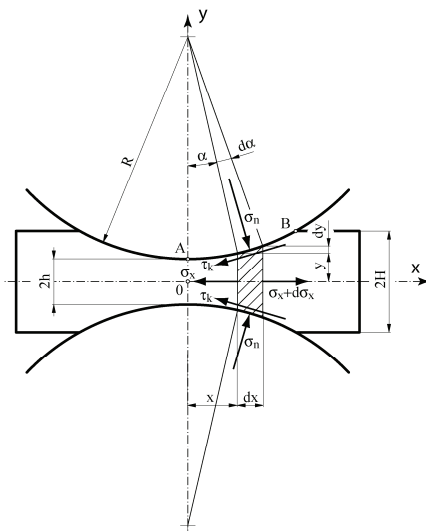
Metoda fizičkog modeliranja se primenjuje za analizu različitih procesa obrade deformisanjem, posebno kovanja u toplom stanju [11].

Numeričke simulacije danas predstavljaju savremeni pristup projektovanju tehnologija plastičnog deformisanja, koje omogućuju kompleksnu analizu najsloženijih procesa obrade lima i zapreminskog oblikovanja [1,10,11]. Numeričke simulacije bazirane su na metodi konačnih elemenata i metodi konačnih zapremina i za njih postoje specijalizovani softverski paketi.

Za ocenu mogućnosti pojedinih metoda, u ovom radu su prikazani rezultati analize procesa sabijanja prizmatičnog priprema pomoću cilindričnih alata, primenom teorijske metode, metode merne čivije i numeričke simulacije.

## 2. ANALZA PROCESA SABIJANJA METODOM REŠEVANJA Približne JEDNAČINE RAVNOTEŽE

Analiza sabijanja prizmatičnog priprema cilindričnim alatima je izvršena uz pretpostavku ravanskog deformacionog stanja ( $\varphi_z = 0$ ), primenom Kulonovog zakona za određivanje tangencijalnog kontaktnog napona -  $\tau_k = \mu \cdot \sigma_n$ , (gde je  $\mu$  - koeficijent trenja,  $\sigma_n$  - normalni kontaktni napon) i uključivanjem promenljivog deformacionog otpora duž zone deformacije [3,7].



Slika 3. Komponente napona [3,7]

Na osnovu šeme opterećenja (slika 3) može se napisati jednačina ravnoteže sila u pravcu ose X:

$$\sigma_x \cdot dy + d\sigma_x \cdot y + \sigma_n \cdot dy - \tau_k \cdot dx = 0 \quad (1)$$

Uvođenjem geometrijskih relacija (slika 3):

$$x = R \cdot \sin \alpha \quad y = h + R \cdot (1 - \cos \alpha) \quad (2)$$

dobija se sledeća jednačina:

$$\sigma_x + \frac{d\sigma_x}{d\alpha} \cdot \frac{a - \cos \alpha}{\sin \alpha} + \sigma_n (1 - \mu \cdot \cot \alpha) = 0 \quad (3)$$

Gde je:  $a = h/R + 1$  - geometrijski faktor,  $h = H - S/2$  - visina u centru obratka,  $S$  - hod alata.

Eliminacija napona  $\sigma_n$  iz gornje jednačine je izvedena primenom Misesovog kriterijuma plastičnog tečenja  $\sigma_e = (2/\sqrt{3}) \cdot K - \sigma_x$ , na osnovu kojeg se dobija finalni oblik diferencijalne jednačine ravnoteže:

$$\frac{d\sigma_x}{d\alpha} + \sigma_x \cdot \frac{\mu \cdot \cos \alpha}{a - \cos \alpha} + \frac{2}{\sqrt{3}} K \cdot \frac{\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha}{a - \cos \alpha} = 0 \quad (4)$$

U gornjoj jednačini  $K$  je napon tečenja koji se određuje na osnovu efektivne deformacije u pojedinim tačkama zone deformacije (slika 3):  $K = K_0 + A \cdot \varphi_e^b$ , gde su  $K_0$ ,  $A$ ,  $b$  faktori materijala koji se određuju eksperimentalno. Efektivna deformacija s obzirom na pretpostavku o ravanskom deformacionom stanju određuje se prema izrazu:

$$\varphi_e = \frac{2}{\sqrt{3}} |\varphi_y| = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \ln \frac{H}{R \cdot (a - \cos \alpha)} \quad (5)$$

Rešavanje jednačine (4) izvedeno je numerički uz granični uslov: za  $\alpha = \alpha_B$   $\sigma_x = 0$ . Konkretna analiza je izvedena za priprema visine  $2H=18$  mm, izrađenog od Č1431 (serija 300), za koji je određena kriva tečenja metodom Rastegajeva i aproksimirana relacijom:

$$K = 369,70 + 668,34 \cdot \varphi_e^{0,37924} \quad [MPa] \quad (6)$$

Ukupna deformaciona sila određena je izrazom:

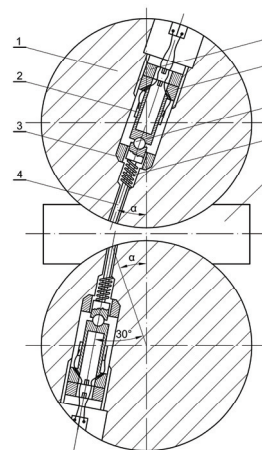
$$F = 2BR \int_0^{\alpha_B} \sigma_n (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) \quad (7)$$

Gde je:  $B$ -dužina obratka,  $R$ -poluprečnik alata

Distribucija napona analiziranog uzorka prikazana je na slici 9a), a dijagram deformacione sile na slici 10 (kriva 2).

## 3. ODREĐIVANJE KONTAKTNIH NAPONA METODOM MERNE ČIVIJE

Metoda merne čivije [5] omogućuje određivanje normalnog i tangencijalnog kontaktnog napona u procesima deformisanja u kojima je moguća ugradnja mernih elemenata.



Slika 4. Alat sa mernim čivijama [5,7]

Na slikama 4 i 5 je prikazana konstrukcija alata za sabijanje prizmatičnog priprema sa ugrađenim mernim elementima. Radijalno postavljena merna čivija 4 (slika 4) omogućuje merenje normalnog kontaktnog napona, dok merna čivija u donjem pritiskivaču omogućuje merenje

tangencijalnog kontaktnog napona i koeficijenta trenja.

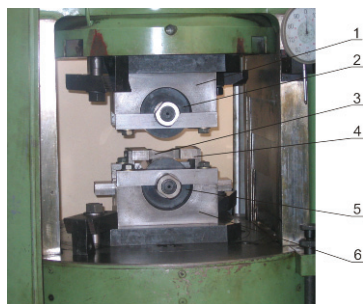
Na osnovu analize sila na mernim čivijama dobijeni su izrazi za kontaktne napone [5]:

$$\sigma_n = \frac{F_1}{A_0}, \quad \tau_k = \sqrt{3} \left( \frac{F_2}{A_0} - \sigma_n \right), \quad \mu = \frac{\tau_k}{\sigma_n} \quad (8)$$

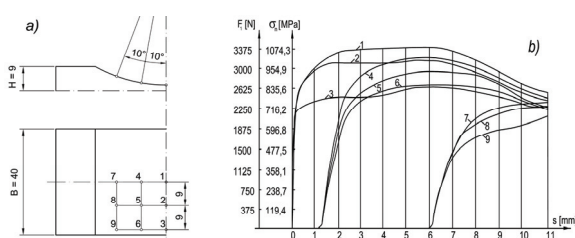
gde je:  $F_1$ -sila na gornjoj mernoj čiviji a  $F_2$ -sila na donjoj mernoj čiviji (slika 4).

Na slici 6 prikazana je promena normalnog kontaktnog napona za uzorak serije 300, koji je analiziran u prethodnom poglavlju na osnovu čega se može izračunati deformaciona sila:

$$F = \int_A \sigma_n \cdot (\cos \alpha + \mu \cdot \sin \alpha) \cdot dA \quad (9)$$



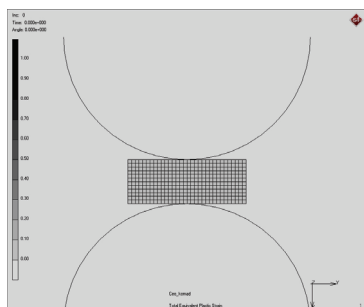
Slika 5. Alat za sabijanje na hidrauličnoj presi: 1,6-nosač pritiskivača; 2,5-cilindrični pritiskivač; 3-radni komad



Slika 6. Promena normalnog kontaktnog napona (b) u mernim tačkama obratka (a) [5,7]

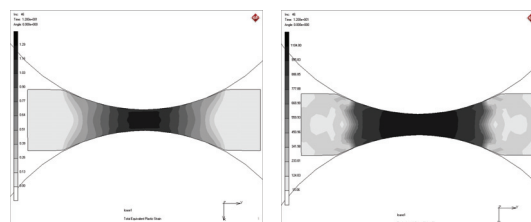
#### 4. NUMERIČKA SIMULACIJA SABIJANJA PRIZMATIČNOG PRIPREMKA CILINDRIČNIM ALATIMA

Simulacija procesa sabijanja je izvršena metodom konačnih elementa (MKE) primenom softverskog paketa Simufact v. 8.1, sa podelom priprema na 384 kvadratna elementa.



Slika 7. Inicijalna mreža konačnih elemenata

U analizi su zanemarene elastične deformacije alata i razmena toplote sa obratkom. Koeficijent trenja je iznosio  $\mu=0.09$ . Deformacioni otpor definisan je relacijom (6). Deo rezultata simulacije prikazan je na slikama 8 i 9.



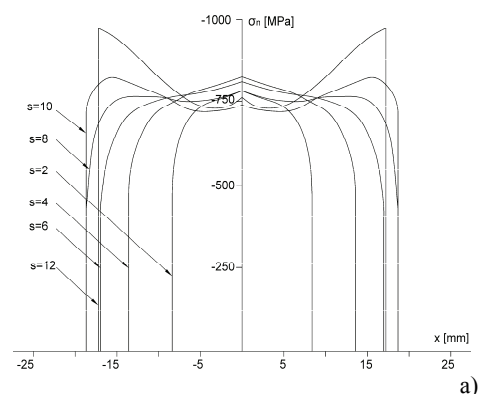
a) efekt. deformacija

b) efekt. napon

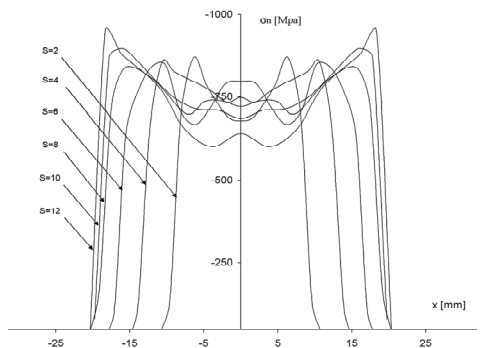
Slika 8. Efektivni napon i efektivna deformacija

#### 5. REZULTATI, ANALIZA I ZAKLJUČAK

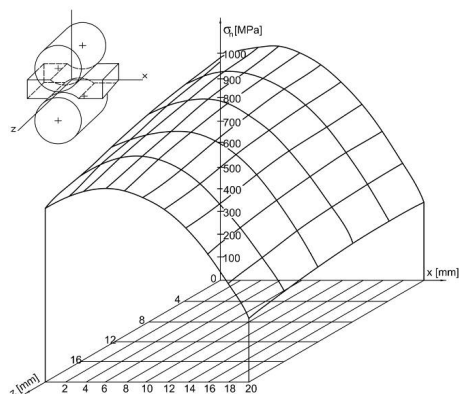
Na slici 9 prikazani su osnovni rezultati izvedenih analiza u procesu sabijanja prizmatičnog priprema visine  $2H=18\text{mm}$  od Č1431, pomoću cilindričnih alata poluprečnika  $R=50\text{mm}$  pri koeficijentu trenja  $\mu=0.09$ .



a)



b)



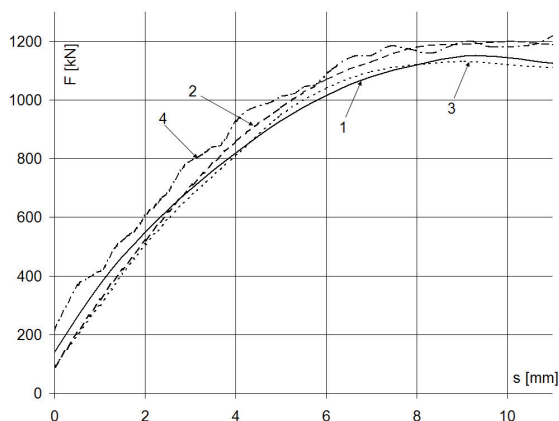
c)

Slika 9. Kontaktne napone određene: a) metodom ravnih preseka, b) numeričkom simulacijom, c) mernom čivijom



Naime, na dijagramima je prikazana promena normalnog kontaktnog napona pri različitim vrednostima hoda alata (slika 9a i 9b), dok je na dijagramu slika 9c prikazana distribucija kontaktnog napona određena eksperimentalno, metodom merne čivije za hod alata  $S=8\text{mm}$ .

Teorijska analiza i numerička simulacija izvedene su uz pretpostavku ravanskog deformacionog stanja te zbog toga i ne postoji promena normalnog kontaktnog napona u pravcu Z-ose, dok metoda merne čivije pokazuje da u pravcu ove ose ipak postoji značajna promena napona (slika 9c). Dijagrami distribucije normalnog kontaktnog napona dobijeni teorijskom analizom i numeričkom simulacijom se u značajnoj meri podudaraju, a takođe postoji i sličnost sa profilom prostornog dijagrama određenog eksperimentalno metodom merne čivije (slika 9c).



Slika 10. Dijagram deformativne sile: 1-eksperiment; 2-teorijsko rešenje; 3-merna čivija; 4-simulacija MKE

U pogledu dijagrama deformativne sile (slika 10) nema značajnijih odstupanja vrednosti dobijenih primenom različitih metoda u odnosu na izmerene vrednosti. Teorijsko rešenje je značajno zbog toga što se dobija jednostavnim procedurom, dok je za numeričku simulaciju potreban odgovarajući softver. Svakako da su rezultati simulacije daleko kvalitetniji i kompleksniji u odnosu na druge rezultate. Eksperimentalno određivanje kontaktnih napona može se uspešno primenjivati u procesima sabijanja, kovanja i drugim postupcima obrade deformisanjem, pod uslovom da je moguća ugradnja mernih elemenata u alat. Ovakav način određivanja kontaktnih napona se preporučuje za slučaj ispitivanja novih procesa obrade deformisanjem.

Prikazane metode analize procesa sabijanja prizmatičnog priprema pomoću cilindričnih alata imaju opšti značaj za većinu metoda sabijanja i kovanja u hladnom i toplom stanju. Savremeni pristupi analize procesa tehnologije plastičnog deformisanja podrazumevaju primenu metoda simulacije koje daju mnoštvo informacija i omogućavaju optimizaciju faza oblikovanja obratka, smanjenje vremena projektovanja i uvođenja u proizvodnju uz smanjenje ukupnih troškova proizvodnje.

#### Napomena:

Rezultati prikazani u ovom radu su deo rezultata istraživanja na projektu "Razvoj i primena savremenih pristupa projektovanja tehnologije kovanja radi povećanja kvaliteta otkovaka i smanjenja troškova proizvodnje", koji finansira Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, evid. broj TR-14050.

#### 5. LITERATURA

[1] Altan T., Ngaile G., Schen G.: *Forging - Fundamentals*

and Applications, ASM International, Materials Park, Ohio, 2005.

- [2] Kolmogorov, V.L.: *Mechanics of technology of plasticity* (in Russian), UPI, Yekaterinburg, 2001.
- [3] Vilotić D. A. Shabaik A.: *Analysis of Upsetting with Profiling Dies*, Transaction of the ASME – Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 107, pp 261-264, 1985.
- [4] Vilotić D., Plančak M., Vujović V., Milutinović M., Gelei S.: *Theoretical Solution of Contact Stresses and Forming Load in Upsetting of Cylinder by Spherical Dies*, Journal for Technology of Plasticity, Vol. 21, No. 1-2, p. 1-10, FTN, Novi Sad, 1996.
- [5] Plančak M., Vilotić D.: *Application of Pin Load Cell for Measuring of Contact Pressure in Extrusion and Compression Processes*, 9<sup>th</sup> International Conference on Experimental Mechanics, Proc. Vol. 1, pp 31-38. Copenhagen, Denmark, 1990.
- [6] Vilotić D., Plančak M., Grbić S., Alexandrov S., Chikanova N.: *An Approach to Determining the Workability Diagram Based on Upsetting Tests*, Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures, Vol.1, No 26, p.305-310, 2003.
- [7] Vilotić, D.: *Ponašanje čeličnih materijala u različitim sistemima hladnog zapreminskog deformisanja*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1987.
- [8] Vilotić D., Plančak M., Kuzman K., Milutinović M., Movrin D., Skakun P., Lužanin O.: *Application of Net Shape and Near-Net Shape Forming Technologies in Manufacture of Roller Bearing Components and Cardan Shafts*, Journal for Technology of Plasticity, ISSN 0354-3870, Vol. 32, pp. 87-104, FTN, Novi Sad, 2007.
- [9] P. Hartley, D. Vilotić, M. Plančak: *Formability Maps in Cold Forging with Conical Dies*, 8<sup>th</sup> ESAFORM Conference on Metal Forming, ESAFORM 2005, Proceedings pp. 527-530, Cluj-Napoca Romania, 2005.
- [10] Vilotić D., Plančak M., Kuzman K., Čupković Đ.: *Finite Element Analysis of Cold Upsetting of Cylinder by Different Dies*, 8<sup>th</sup> International Conference on Technology of Plasticity, Proceedings (CD) ISBN 88-87331-74-X, No. of Paper 414, Verona, Italy, October 2005.
- [11] Mandić V.: *Fizičko modeliranje i numerička simulacija kao osnova novog koncepta projektovanja alata za toplu zapreminsku obradu*, doktorska disertacija, Mašinski Fakultet, Kragujevac, 2002.
- [12] M. Milutinović, Đ. Čupković, D. Vilotić, T. Pepelnjak, M. Plančak: *Stress – strain state of combined backward – radial extrusion process of can – flanged part*, Journal for technology of plasticity, Vol. 31, pp 109-116, Novi Sad, 2006.
- [13] www.schuler.com. (jul, 2008.)
- [14] www.hatebur.com. (jul, 2008.)

**Autori:** Prof. dr Dragiša Vilotić, Prof. dr Miroslav Plančak, mr Ilija Trbojević, mr Mladimir Milutinović, Dejan Movrin dipl.inž., Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, Katedra za tehnologije oblikovanja materijala i inženjerstvo površina, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, tel. ++381214852320, fax: ++38121454495  
E-mail: vilotic@uns.ac.rs  
plancak@uns.ac.rs  
trbojev@uns.ac.rs  
mladomil@uns.ac.rs  
movrin@uns.ac.rs



Velibor Marinković

## PRILOG ODREĐIVANJU SILE SLOBODNOG SAVIJANJA LIMOVA

**Rezime:** Savijanje limova u alatima na presama se može realizovati na dva načina. Prva varijanta predstavlja slobodno savijanje, a druga savijanje u kalupu.

Savijanje limova u posebno projektovanim alatima na presama opšte namene ili u univerzalnim kalupima i presama posebne namene ("abkant" presama) je češći slučaj u praksi, jer se time ostvaruje veća tačnost savijenog profila. Međutim, slobodno savijanje je opštiji slučaj savijanja limova, jer se i savijanje u kalupu u početnoj fazi može tretirati kao slobodno savijanje.

U radu je razmotren slučaj određivanja sile slobodnog savijanja limova (U-profila, V-profila) uzimajući u obzir i sile kontaktnog trenja, koje se obično zanemaruju. Teorijski je utvrđeno da sila slobodnog savijanja ima svoj maksimum i određeni su optimalni parametri. Na određenim primerima je pokazano da postoji generalna saglasnost teorijskog proračuna i eksperimenta.

**Ključne reči:** oblikovanje limova, proces slobodnog savijanja, sila savijanja, optimalni parametri

### CONTRIBUTION TO THE DETERMINATION OF THE AIR SHEET METAL BENDING FORCE

**Abstract:** Sheet metal bending in the tools on the presses can be realized in two ways, namely, the first possibility represents air bending while the second one assumes die bending.

Sheet metal bending in specially designed tools on the general purpose presses or universal tools and special purpose presses ("abkant" presses) is more frequent in practice, since thereby a greater accuracy of the bent profile is ensured. However, air bending is a more general case of sheet metal bending since even the die bending in its initial phase can be treated as air.

The paper is concerned with the determination of air sheet metal bending force (U-profiles, V-profiles), while taking into consideration the forces of contact friction that are usually neglected. It is theoretically confirmed that air bending force has its maximum; the optimal parameters are also determined. Some examples are used to illustrate the general agreement between the theoretical calculation and the experiment.

**Key Words:** Sheet Metal Forming, Air Bending Process, Bending Force, Optimal Parameters

## 1. UVOD

Savijanje limova spada u najznačajnije procese obrade limova deformisanjem i najčešće primenjivane operacije obrade u metaloprerađivačkoj industriji.

U opštem slučaju polazni oblici materijala (priprema) za operaciju savijanja mogu biti limene table/trake, šipke, cevi i profili. Kada je reč o savijanju limova, prema vrsti limenih proizvoda razlikuju se sledeće operacije: fazonsko ili ugaono savijanje (profili), zavijanje (cevi) i kružno savijanje (doboši).

Elementarni oblici profila (L -profil, V -profil, U -profil) se, po pravilu, izrađuju u jednoj operaciji savijanja, dok se složeniji oblici profila dobijaju u više operacija (npr. na tzv. abkant presama, u univerzalnim alatima) [1], [2], [3].

U operacijama izrade limenih profila zona plastičnih deformacija (ZPD) se lokalizuje oko tiskača, dok ostali deo zapremine ne trpi nikakve promene. Kada je širina limene table/trake znatno veća od debljine lima ( $b > 3s$ ), što je najčešći slučaj, u ZPD vlada ravansko deformaciono stanje, što znači da proces savijanja ne proizvodi promenu širine limenog priprema. Drugim rečima, u ovom slučaju ne dolazi do deformacije poprečnog preseka lima; istovremeno, poprečni preseki ostaju ravni i upravni na ravan lima, odnosno na neutralnu liniju i nakon savijanja.

U ovom radu tretiraće se fazonsko savijanje limova, odnosno operacija izrade limenih profila, proizvoljnog ugla savijanja ( $0 < \varphi \leq 180^\circ$ ). Kod fazonskog savijanja limova se podrazumeva da se savijanje obavlja po pravoj liniji (simpe bending/straight flanging). Međutim, za specifične potrebe, na primer u autoindustriji, fazonsko savijanje se može obaviti i na druge načine [4], [5]: po krivoj konkavnoj liniji (stretch flanging), po krivoj konveksnoj liniji (shrink flanging), po izlomljenoj liniji (jogged flanging) itd.

## 2. PROCES SLOBODNOG SAVIJANJA

Kod slobodnog savijanja limova polazi se od pretpostavke da stranice profila ostaju ravne i nedeformisane. Ovakva pretpostavka je u dobroj meri realna za relativno

debele limove. Međutim, zbog prisustva elastičnih deformacija, kod tankih limova se ZPD proširuje znatno izvan čela tiskača, pa se stvarni ugaono savijanje razlikuje od teorijskog.

Kada se insistira na većoj tačnosti savijenog profila, slobodno savijanje se zamenjuje savijanjem u kalupu. Poslednja faza ovakvog procesa savijanja jeste kalibrisanje ("peglanje") profila. Na ovaj način se smanjuje i efekat elastičnog ispravljanja profila, što predstavlja poseban inženjerski problem, koji se i dalje intenzivno izučava teorijski i eksperimentalno [6], [7]. Iz navedenih razloga u nekim operacijama slobodnog savijanja je korisno upotrebiti držač lima.

Odlučujuća prednost pri primeni slobodnog savijanja u odnosu na savijanje u kalupu jeste višestruko manja sila savijanja, koja se može regulisati razmakom stranica alata.

## 3. SILA SLOBODNOG SAVIJANJA

### 3.1. Savijanje V-profila

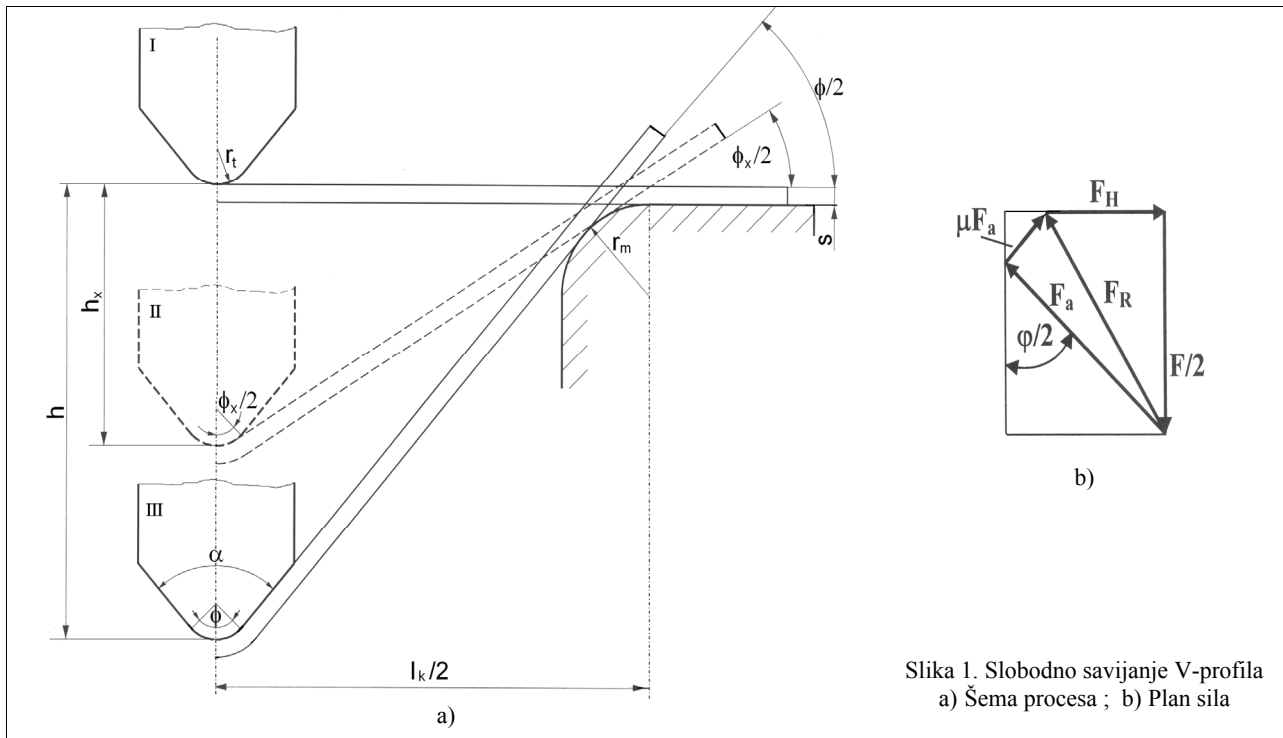
Proces slobodnog savijanja V-profila može se tretirati kao reprezentant procesa slobodnog savijanja limova. Kao što će se pokazati, analiza ovog procesa može se analogno preneti i na ostale operacije savijanja limova.

Pri slobodnom savijanju V-profila sila se prenosi pokretnim delom alata - tiskačem (Sl. 1a). Sila slobodnog savijanja se menja sa hodom tiskača.

Tekući hod tiskača se dobija iz geometrijskih odnosa (Sl. 1a- faza II):

$$h_x = \frac{1}{2} l_k \operatorname{tg} \left( \frac{\varphi_x}{2} \right) + \left[ 1 - \cos \left( \frac{\varphi_x}{2} \right) - \operatorname{tg} \left( \frac{\varphi_x}{2} \right) \sin \left( \frac{\varphi_x}{2} \right) \right] l = \\ = l \left[ n \operatorname{tg} \left( \frac{\varphi_x}{2} \right) + 1 - \cos \left( \frac{\varphi_x}{2} \right) - \operatorname{tg} \left( \frac{\varphi_x}{2} \right) \sin \left( \frac{\varphi_x}{2} \right) \right] \quad (1)$$

gde su:  $n = l_k / 2l = c_1$  - redukovano odstojanje centara savijanja (konstanta za date geometrijske parametre),  $l$  - geometrijski parametar savijanja,  $\varphi_x$  - tekuću ugaono savijanja.



Slika 1. Slobodno savijanje V-profila  
a) Šema procesa ; b) Plan sila

Geometrijski parametar savijanja se definiše relacijom:

$$l = s + r_t + r_m \quad (2)$$

gde su:  $s$  - debljina lima,  $r_t$  - radijus zaobljenja čela tiskača (savijača),  $r_m$  - radijus zaobljenja ivice donjeg dela alata (kalupa).

Između tekućeg ugla savijanja i tekućeg ugla profila postoji sledeća relacija:

$$\alpha_x = 180 - \varphi_x \quad (3)$$

Na osnovu šeme procesa savijanja (Sl. 1a) i plana sila (Sl.1b) mogu se izvesti sledeći obrasci za silu slobodnog savijanja V-profila u tekućoj konstelaciji gornjeg i donjeg dela alata (Sl. 1a- faza II):

a) za  $\mu = 0$ ,

$$F = 4M \frac{\cos^2(\varphi_x/2)}{l_k - 2l \sin(\varphi_x/2)} = 4M \frac{\cos^2(\varphi_x/2)}{2l[n - \sin(\varphi_x/2)]} \quad (4a)$$

b) za  $\mu \neq 0$ ,

$$F = 4M \frac{[\cos(\varphi_x/2) + \mu \sin(\varphi_x/2)] \cos(\varphi_x/2)}{2l[n - \sin(\varphi_x/2)] + \mu s \cos(\varphi_x/2)} \quad (4b)$$

gde je:  $M$  - moment savijanja.

Za proračun momenta savijanja u literaturi se može naći veći broj obrazaca [1], [2], [3], [7], [8]. Na ovom mestu navodi se obrazac koji direktno uzima u obzir ojačavanje materijala i anizotropiju lima [7]:

$$M = R_m \frac{bs^2}{4} \frac{e^n}{1+n} \left(\frac{1}{2}\right)^n \left(\frac{1+\bar{r}}{\sqrt{1+2\bar{r}}}\right)^{(1+n)} \quad (5)$$

gde su:  $R_m$  - zatezna čvrstoća materijala lima,  $b$  - širina limenog priprema,  $\bar{r}$  - srednja vrednost koeficijenta anizotropije,  $n$  - eksponent deformacionog ojačavanja (za krivu ojačavanja tipa  $K = C\varphi^n$ ).

Veličina sile savijanja se može značajno redukovati povećanjem odstojanja centara savijanja  $l_k$ , odnosno

povećanjem parametra  $n$ . Ovde treba napomenuti da se dijagram sile  $F = F(\varphi_x)$  može lako prevesti na dijagram  $F = F(h_x)$ , pošto između hoda tiskača i ugla savijanja postoji jednoznačna veza (v. jed. (1)).

Analizom obrazaca (4) utvrđeno je da funkcija sile ima ekstremum (maksimum), što je očigledno sa slike 2. Optimalni ugao savijanja se nalazi iz uslova  $dF/d\varphi_x = 0$ , odakle se dobija:

b) za  $\mu = 0$ ,

$$\left(\frac{\varphi_x}{2}\right)_{opt} = \arcsin\left(n - \sqrt{n^2 - 1}\right) \quad (6a)$$

b) za  $\mu \neq 0$ ,

$$\mu \sin^3\left(\frac{\varphi_x}{2}\right) + \left(1 + \mu^2 \frac{n}{m}\right) \cos^3\left(\frac{\varphi_x}{2}\right) + 2\sin^2\left(\frac{\varphi_x}{2}\right) \left[\cos\left(\frac{\varphi_x}{2} - \mu n\right)\right] - \sin\left(\frac{\varphi_x}{2}\right) \cos\left(\frac{\varphi_x}{2}\right) \left[2n + \mu \frac{n}{m} \cos\left(\frac{\varphi_x}{2}\right) + \mu n\right] = 0 \quad (6b)$$

gde je:  $m = l_k/s = c_2$  - redukovano odstojanje centara savijanja (konstanta za date geometrijske parametre).

Za uobičajene uslove savijanja je  $m \gg 1$ , pa ovaj parameter praktično ne utiče na rezultat proračuna. Zato se za inženjerske proračune preporučuje korišćenje dijagrama sa slike 3., umesto obrazaca (6).

Ukoliko je  $\varphi < \varphi_{opt}$ , maksimalna sila se pojavljuje na kraju procesa savijanja. U suprotnom slučaju maksimalna sila se dostiže pre okončanja procesa savijanja.

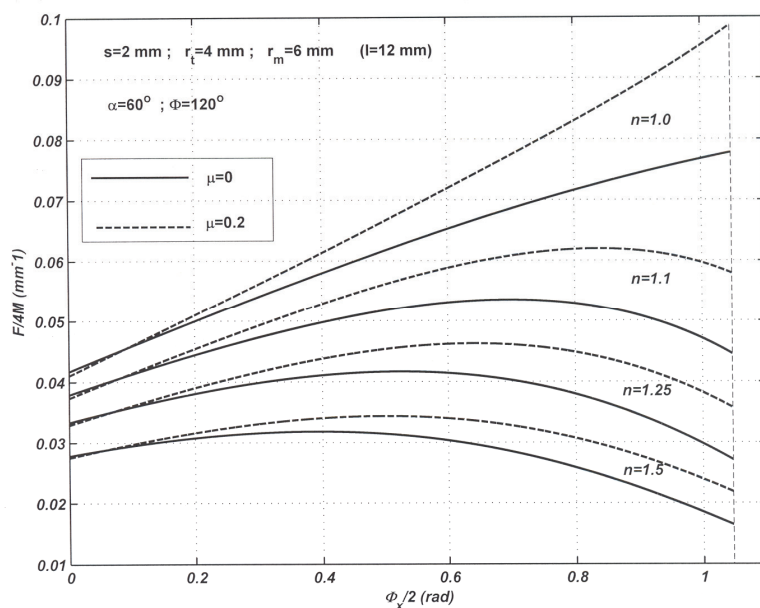
Napomena: Za konkretan V-profil, ugla  $\alpha$ , potrebno je primenom relacije (3) odrediti odgovarajući ugao savijanja  $\varphi$ , a zatim primeniti obrasce (1) i (4).

Radi poredjenja navode se i obrasci E. A. Popova [8]:

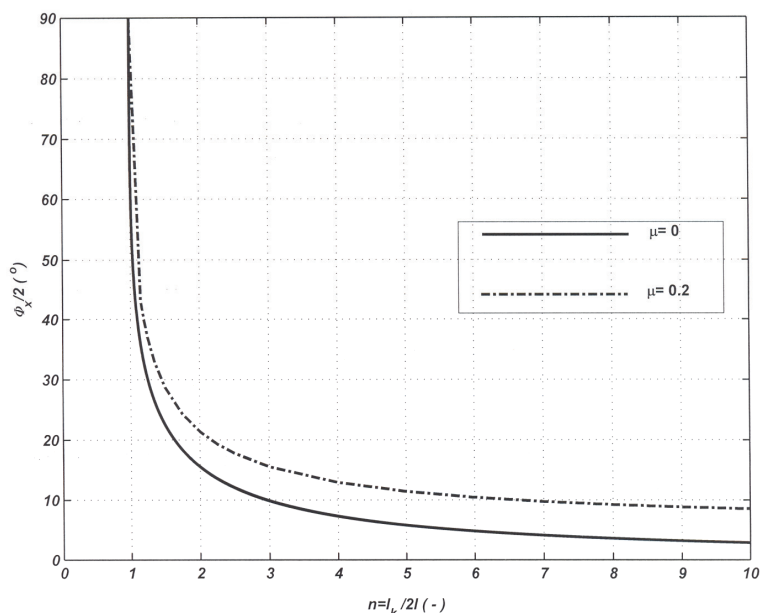
a) za silu savijanja,

$$F = 4M \frac{[\cos(\varphi_x/2) + \mu \sin(\varphi_x/2)] \cos(\varphi_x/2)}{2l[n - \sin(\varphi_x/2)] + 2r_m s} \quad (7)$$

b) za optimalni ugao savijanja,



Slika 2. Dijagram sile slobodnog savijanja V-profila



Slika 3. Optimalni ugao slobodnog savijanja

$$\left(\frac{\varphi_x}{2}\right)_{\text{opt}} \approx \arcsin \frac{2r_t + s}{2l_n + 2r_t + s} \quad (8)$$

Kako je  $(2r_t + s) \gg \mu s \cos(\varphi_x / 2)$ , obrazac (7) daje znatno niže vrednosti za silu savijanja od obrazca (4). Direktno poređenje obrasca (8) i obrazca (6) nije moguće. Na mnogim primerima se pokazuje da obrazac (8), takođe, daje znatno niže vrednosti za optimalni ugao savijanja od obrazca (6).

U svojoj prvoj fazi proces savijanja V-profila u kalupu se može tretirati kao slobodno savijanje, što je potvrđeno eksperimentalno [2], [9], [10], [11]. Prema tome, sve napred rečeno odnosi se i na ovu fazu savijanja u kalupu.

Pri analizi dijagrama sile sa slike 4. [10] treba imati u vidu da je ovde tretiran slučaj slobodnog savijanja V-profila sa dodirnom u "tri tačke".

Dijagram sila sa slike 5. [9] se odnosi na savijanje u kalupu. Kao što je napred rečeno, poslednja faza ovog

procesa predstavlja kalibrisanje profila, što prouzrokuje nagli porast sile.

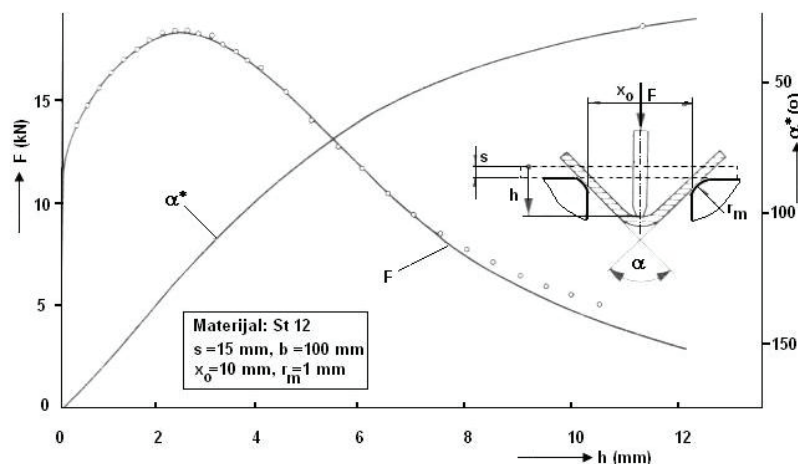
Međutim, na postojanje ekstremuma sile u prvoj fazi slobodnog savijanja ukazuju i eksperimenti i simulacija primenom metoda konačnih elemenata (MKE).

### 3.2. Savijanje U-profila

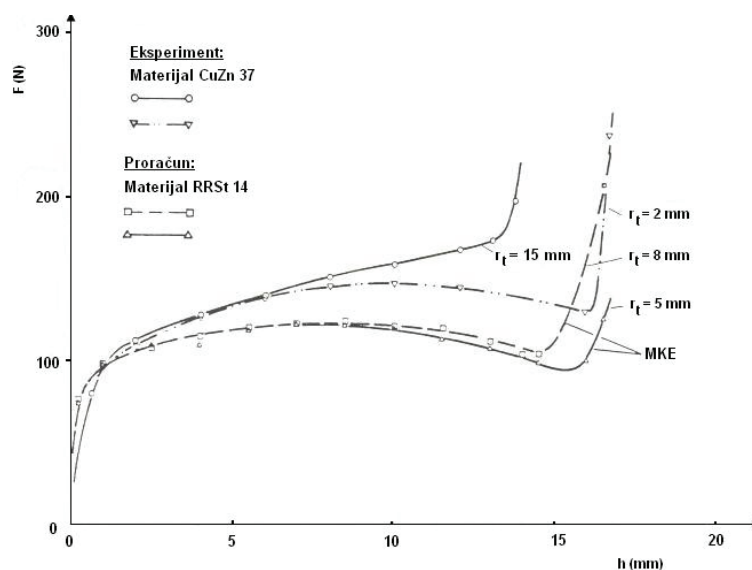
Kod savijanja U-profila važe svi napred izvedeni obrasci, pri čemu treba uzeti u obzir da je u ovom slučaju  $l_k \equiv 2l$ ;  $n \equiv 1$  ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $\varphi = 180^\circ$ ). Kao što se sa slike 2. može zaključiti maksimalna sila se dostiže na kraju procesa savijanja. Tako se za slučaj slobodnog savijanja bez trenja dobija  $F_{\text{max}} = 4M/l$ . Za slobodno savijanje U-profila potreban je minimalan hod za završetak procesa savijanja  $h \equiv l = s + r_t + r_m$ .

Sve što je rečeno važi i za savijanje dvostrukog ugaonika. Razlike ova dva procesa je tehničke i tehnološke prirode.





Slika 4. Dijagrami sile slobodnog savijanja i ugla profila



Slika 5. Dijagrami sile savijanja dobijeni eksperimentalno i numeričkom simulacijom

#### 4. ZAKLJUČAK

U radu je analiziran proces slobodnog savijanja V-profila, koji se može tretirati kao reprezentant svih procesa fazonskog savijanja limova.

Postavljen je obrazac za proračun hoda tiskača, za date geometrijske parametre alata, koji je neophodan za dobijanje profila zadatog ugla i radijusa.

Dat je obrazac za proračun sile slobodnog savijanja koji uzima u obzir i sile trenja. Utvrđeno je da postoji optimalni ugao savijanja, za koji sila slobodnog savijanja dostiže maksimum. Maksimalna sila se može značajno smanjiti povećanjem odstojanja centara savijanja, što je prihvatljivo kod relativno debelih limova, jer ne utiče bitno na tačnost profila. Postojanje maksimuma sile slobodnog savijanja je potvrđeno eksperimentima i numeričkom simulacijom procesa savijanja.

Pokazano je da se prva faza savijanja u kalupu može tretirati kao proces slobodnog savijanja.

#### 5. LITERATURA

[ 1 ] Misafija B.: Obrada materijala plastičnom deformacijom, "Svjetlost", Sarajevo, 1988.  
 [ 2 ] Jahnke H., Retzke R., Weber W.: Umformen und Schneiden, VEB Verlag Technik, Berlin, 1972.  
 [ 3 ] Romanovskij V. P.: Spravočnik po holodnoj šampovke. "Mašinstroenie", Leningrad, 1979.

[ 4 ] Asnafi N.: On stretch and shrink flanging of sheet aluminium by fluid forming. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 96, 1999.  
 [ 5 ] Hu P., Li D.Y., Li Y.X.: Analytical models of stretch and shrink flanging. International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, 2003.  
 [ 6 ] Livatyali H., Altan T.: Prediction and elimination of springback in straight flanging using computer aided design methods, Vol. 117, 2001.  
 [ 7 ] Leu D - K. : A simplified approach for evaluating bendability and springback in plastic bending of anisotropic sheet metals, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 66, 1997.  
 [ 8 ] Popov E.A.: Osnovi teoriji listovoj šampovki, Izd. 2., "Mašinstroenie", Moskva, 1977.  
 [ 9 ] Herrman M., Wilhelm M., Keck P.: Process Simulatioun of Metal-Forming Processes: Some Examples, Annals of the CIRP, Vol. 40, 1991.  
 [ 10 ] Reissner J., Meier M.: Computer-Aided Three-Point Bending of Multiple-Bend Profiles. Annals of the CIRP, Vol. 34, 1985.  
 [ 11 ] Canteli J. A. , Cantero J. L. , Migurelez M. H.: Theoretical analysis of air bending at high temperature, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209, 2009.

Autor: **Velibor Marinković**, Mašinski fakultet u Nišu, A. Medvedeva 14, 18000 Niš



Vukčević, M., Janjić, M., Šibalić, N.

## MJERENJA SILA KOD PROCESA ZAVARIVANJA TRENJEM

**Rezime:** Rad se odnosi na određivanje i mjerenje sile zavarivanja -  $F_z$ , kao i ostale dvije komponente koje imaju manji uticaj na sam proces: bočne sile  $F_y$  i uzdužne sile  $F_x$ . Kod procesa zavarivanja trenjem od velike je važnosti poznavanje sile zavarivanja (vertikalne sile). Njena vrijednost prvenstveno zavisi od debljine lima koji se zavaruje, brzine zavarivanja kao i broja obrtaja alata, dok određani uticaj imaju prečnici trna (pin) i ramena valjka alata (shoulder), kao i vrijednosti za koje se veći dio alata ramena valjka (shoulder) zarije u materija. U radu je izvršen eksperiment zavarivanja lima legure Al debljine 7.8 mm, variranjem navedenih parametara. U radu su dati i crteži dizajniranog pomoćnog pribora koji omogućava mjerenje sila kod procesa zavarivanja trenjem. Pomoćni pribor je dizajniran tako da su napravljeni specijalni nosači, na kojima su nalijepljeni davači (mjerne trake), pomoću kojih dobijamo vrijednosti komponentata sila u tri normalna pravca  $F_x$ ,  $F_y$  i  $F_z$ . Dijagrami sila su dobijeni u programskom paketu GLOBAL-LAB. Eksperiment je realizovan u laboratoriji Mašinskog fakulteta u Podgorici.

**Ključne reči:** Zavarivanje trenjem - FSW, rame valjka, trn, sila zavarivanja  $F_z$ , bočna sila  $F_y$ , uzdužna sila  $F_x$ .

## MEASUREMENT OF FORCES IN A FRICTION STIR WELDING PROCESS

**Abstract:** This paper refers on the determination and measurement of down force -  $F_z$ , as well as the other two components that have less impact on the process itself: the side force  $F_y$  and traverse force  $F_x$ . In the process of friction stir welding, the knowledge of welding force is of great importance. Its value mainly depends on the thickness of the welded plate, welding speed and the number of tool rotations, while significant influence have diameters of pin and shoulder, as well as region affected by the tool shoulder impact on the material. This paper includes the experiment of plate welding of Al alloy with the thickness of 7.8 mm, with variations on the mentioned parameters. This paper includes the drawings of designed support equipment that enables measuring of forces in the process of friction stir welding. Support equipment is designed with special carriers, with the transmitters (measuring tape) glued on, providing the values of the components of forces in three normal directions of  $F_x$ ,  $F_y$  and  $F_z$ . Force diagrams are obtained in the software package GLOBAL-LAB. The experiment was performed in the laboratory of the Faculty of Mechanical Engineering in Podgorica.

**Key words:** Friction stir welding - FSW, shoulder, pin, welding force  $F_z$ , side force  $F_y$ , traverse force  $F_x$ .

### 1. UVOD

Devedesetih godina prošlog vijeka razvijen je novi metod spajanja istorodnih i raznorodnih materijala koji se izvodi u čvrstom toplom stanju bez topljenja materijala poznatiji pod imenom Zavarivanje trenjem sa miješanjem (*Friction Stir Welding - FSW*). Proces je patentiran od strane Instituta za zavarivanje (*The Welding Institute - TWI*) iz Engleske 1991. godine, a pronašao ga je Wayne M. Thomas koji je uspješno spojio limove legure aluminijuma [6]. Prvenstveno se koristi za spajanje limova veće debljine. Alat koji se koristi u procesu zavarivanja trenjem je cilindričnog oblika i sastoji se iz dva koncentrična dijela koja rotiraju velikom brzinom. Dio alata većeg prečnika naziva se rame valjka (*shoulder*) dok se dio manjeg prečnika naziva trn (*pin*). Rotirajući alat prilazi lagano liniji spoja i zariva se u materijal, pri čemu se stvara toplota. Na ovaj način se povećava temperatura do tople plastične obrade kada se vrši mahaničko miješanje i spajanje materijala, a pri tome se omogućava da se alat kreće u uzdužnom pravcu odnosno duž linije spajanja. Nakon prolaska alata duž linije spajanja ostaje čvrsta faza šava (spoja), gdje gornja ravan ostaje glatka i ravna zahvaljujući ramenu valjka (*shoulder*) alata, dok se donja ravan radnog predmeta formira od podloge na kojoj radni predmet stoji i ona je takođe glatka i ravna. Metoda zavarivanja trenjem - FSW je vrlo brzo pronašla svoju primjenu u brodogradnji, avio i svemirskoj industriji, željezničkoj i drugim industrijama [5,3,2].

### 2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

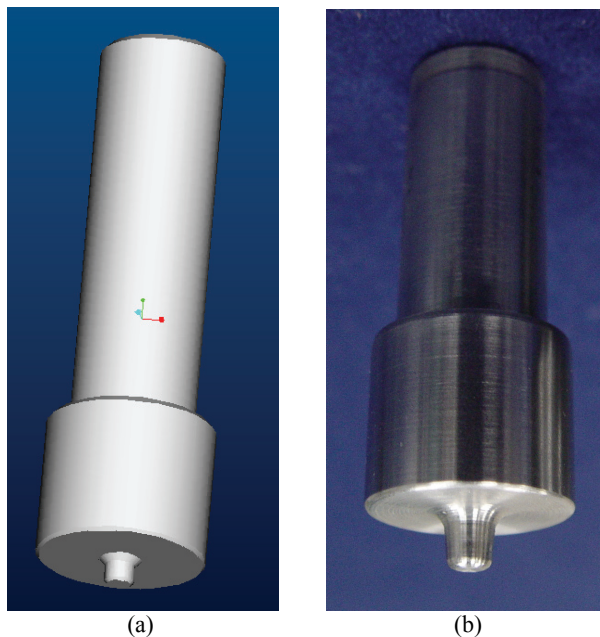
Na osnovu preliminarnih istraživanja usvojen je plan eksperimenta i definisani su svi potrebni parametri za izvođenje eksperimenta. Za izvođenje eksperimentalnih istraživanja korišćena je vertikalna glodalica, a zavarivanje trenjem se izvodi u laboratorijskim uslovima, koji su slični proizvodnim. Materijal koji se koristi u eksperimentu je lim legure aluminijuma čiji je hemijski sastav dat u Tabeli 1. Radni komadi dimenzija  $2000 \times 50 \text{ mm}$ , su dobijeni rezanjem iz tabli lima debljine 7.8 mm.

Hemijski sastav u %					
1.	2.	3.	4.	5.	6.
% Al	% Fe	% Si	% Ti	% Cu	% Zn
98.29	0.21	0.83	0.01	0.002	0.060
7.	8.	9.	10.	11.	
% V	% Cr	% Mn	% Mg	% Na	
0.006	0.001	0.15	0.43	0.001	

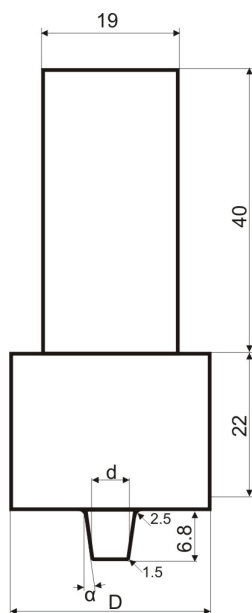
Tabela 1. Hemijski sastav korišćenog lima legure Al

Alat koji se koristi u ekperimentalnim istraživanjima je napravljen od tzv. utopa - alatnog čelika za rad u toplom stanju č.4327 i termički je obraden. Alat je dizajniran u Pro/Engineer-u, Slika 1.a. Prečnik ramena valjka alata (*shoulder*) je  $D=28 \text{ mm}$ , dok je prečnik trna (*pin*)  $d=7 \text{ mm}$ . Ugao nagiba kod trna (*pin*) je  $\alpha=5^\circ$ . Prikaz alata sa dimenzijama dat je na Slici 2. Brzina obrtaja alata je 1000 o/min, dok je brzina zavarivanja 200 mm/min. Prilikom procesa zavarivanja trenjem vršeno je snimanje sila,

temperature i signala akustičke emisije.



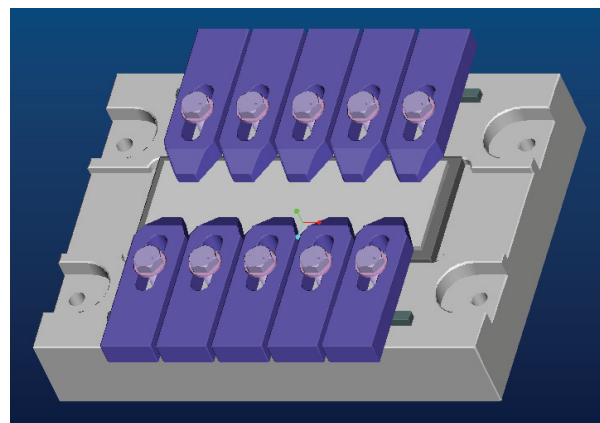
Slika 1. a - 3D prikaz alata, b - Izrađen alat od čelika č.4327



Slika 2. Alat: Prečnik ramena valjka (*shoulder*)  $D=28\text{ mm}$ , prečnik trna (*pin*)  $d=7\text{ mm}$  i ugao nagiba trna (*pin*)  $\alpha=5^\circ$

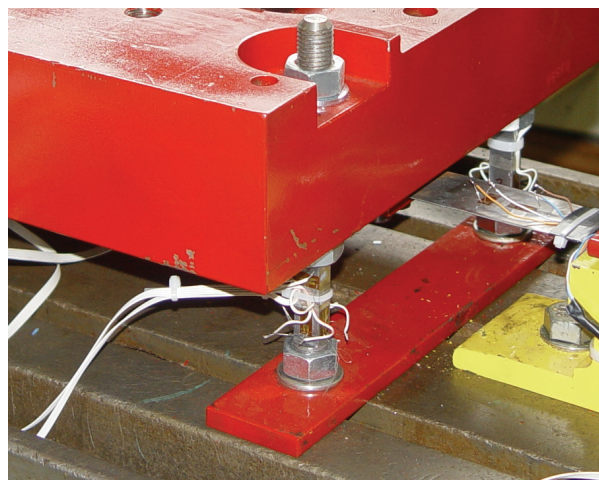
## 2.1 Izrada pomoćnog pribora

Za izvođenje procesa zavarivanja trenjem, kao i za mjerenje traženih parametara, bilo je neophodno napraviti pomoćni pribor, na koji će se montirati mjerna oprema kao i sprovesti sam proces zavarivanja. Na radni sto vertikalne glodalice postavljen je, pomoćni pribor koji se sastoji od osnovne ploče, pomoćne ploče i stezača priprema. Kompletan sklop pomoćnog pribora je dizajniran u programu Pro/Engineer. Njegov izgled je dat na Slici 3. Pomoćna ploča dimenzija  $300 \times 120 \times 12\text{ mm}$  urađena je od čelika č.5432. Ploča je termički obrađena (kaljena) na 47 HRC, a zatim fino brušena i služi kao podloga za zavarene spojeve. Kakav će biti spoj (var) sa donje strane radnog predmeta, uglavnom zavisi od kvaliteta površine pomoćne ploče, kao i njene tvrdoće.



Slika 3. Pomoćni pribor: 1 - Osnovna ploča, 2 - Pomoćna ploča, 3 - Stezač priprema, 4 - Radni komad

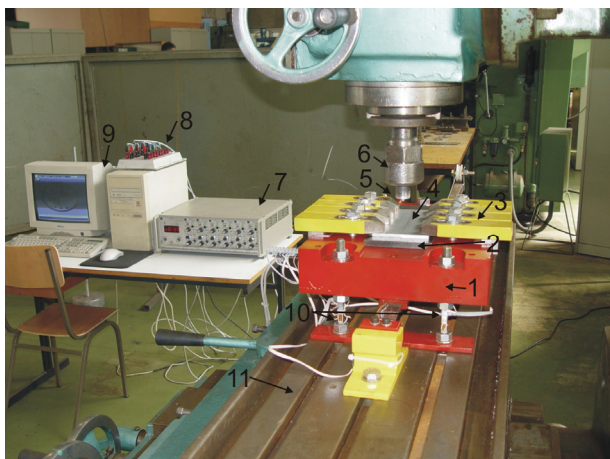
Da bi se moglo izvršiti mjerenje sila, napravljena su četiri specijalna nosača osnovne ploče, na koje se nalijepljene mjerne trake, a sama osnovna ploča je izdignuta od stola glodalice. Na mjestu lijepljena mjernih traka specijalni nosač osnovne ploče je pravougaonog poprečnog presjeka. To nam omogućava da mjerimo savijanja specijalnih nosača u x ili uzdužnom pravcu i y ili bočnom pravcu. Za mjerenje sile u z vertikalnom pravcu, takođe se koriste mjerne trake koje su opterećene na pritisak. Sve mjerne trake su tipa: HBN 6/120LY11. Mjerne trake su povezane u pune Vitston-ve mostove, koji daju promjenu električnog signala na osnovu elastične deformacije specijalnih nosača koji su opterećeni na pritisak i savijanje. Izgled specijalnog nosača, osnovne ploče dat je na Slici 4.



Slika 4. Nosači ploče pravougaonog poprečnog presjeka na koji su postavljeni davači (mjerne trake)

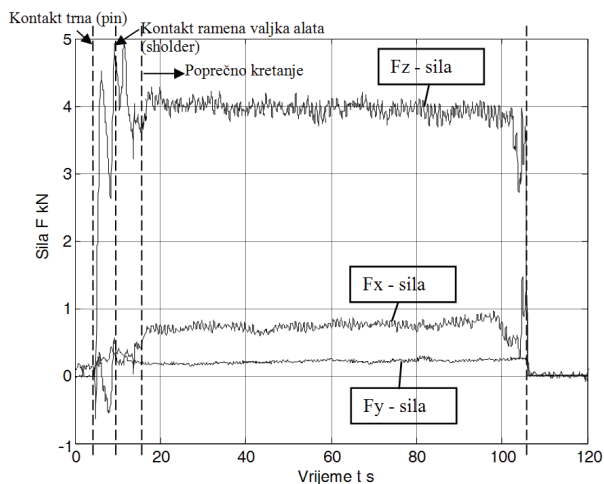
## 2.2 Mjerenje sila i realizacija eksperimenta

Mjerenje sila je izvršeno korišćenjem precizne analognog digitalne mjernog opreme, povezane u informacijski mjerni sistem. Analogni signal sa senzorskih jedinica (mjernih traka) se preko digitalnog šestokanalnog pojačivača - mjernog mosta i prenosne jedinice dovodi do AD/DA kartice, gdje se konvertuje u digitalni i memoriše se na PC računaru sa instalisanim softverskim paketom za akviziciju podataka GLOBAL-LAB. Dijagrami dobijeni na ovaj način su u funkciji napona struje (V) i vremena (s), koji se na osnovu poznatih relacija i vrijednosti baždarenja mjernog opreme dobijaju dijagrami sila (N) u funkciji vremena (s). Na slici 5. dat je prikaz istraživačkog mjesta.



Slika 5. Istraživačko mjesto: 1 - Osnovna ploča, 2 - Pomoćna (kaljena) ploča, 3 - Stežak pripremača, 4 - Radni komad od legure Al, 5 - Alat za FSW, 6 - Stezna glava glodalice, 7 - Mjerni most, 8 - BAS, 9 - PC računara sa A/D karticom i programom GLOBAL LAB, 10 - Specijalni nosač sa nalijepljenim mjernim trakama, 11 - Radni sto glodalice

Sila zavarivanja  $F_z$  ima najveće vrijednosti kada se rotirajući alat sa svojim trnom (*pin*) ukopava u materijal. Tom prilikom radni komad se zagrijeva usled dejstva trenja trna (*pin*) alata od radni komad. Tada sila  $F_z$  opada do momenta kontakta većeg dijela ramena valjka alata (*shoulder*) i površine radnog komada, kada sila  $F_z$  dostiže svoju najveću vrijednost, jer velika površina ramena valjka (*shoulder*) počinje ukopavanje u radni komad. Radni komad se još više zagrijeva usled dejstva tranja nastalog od ramena valjka (*shoulder*) i trna (*pin*) istovremeno. Kada se na glodalici zada poprečno kretanje radnog stola odnosno zada izabrana brzina zavarivanja, sile  $F_x$ ,  $F_y$  i  $F_z$  zadržavaju konstantne vrijednosti, sve do trenutka kada alat izađe iz radnog komada. Dijagram sile zavarivanja  $F_z$ , kao i dijagram sile  $F_x$  i  $F_y$  dati su na slici 6.



Slika 6. Dijagrami sile  $F_x$ ,  $F_y$  i  $F_z$  dobijeni korišćenjem davača (mjernih traka)

### 3. ZAKLJUČAK

Zavarivanje trenjem FSW (friction stir welding) je relativno nova i aktuelna tehnologija koja još nije dovoljno istražena. Karakterišu je složeni procesi koji se odvijaju u zoni zavarivanja, uslovljeni dejstvom mnogobrojnih uticajnih i međusobno povezanih faktora, kao što su geometrija alata, faktori režima zavarivanja, materijal priprema itd.

Preliminarnim istraživanjima je utvrđeno da na kvalitet vara veliki uticaj imaju dimenzije alata i režim rezanja (brzina zavarivanja i broj obrtaja).

U cilju istraživanja FSW i utvrđivanja zavisnosti ulaznih i izlaznih veličina procesa napravljeni su eksperimentalni alat i pomoćni pribor. U radu je prezentirano mjerenje sile koja je definisana preko komponenti u x, y i z pravcu. Mjerenje sile je izvršeno korišćenjem precizne analognog digitalne mjerne opreme povezane u informaciono mjerni sistem.

Na osnovu eksperimentalnih rezultata FSW zavarivanja spojeva od legure aluminijuma, može se zaključiti da se ovim postupkom uz primenu optimalnih parametara zavarivanja, mogu dobiti zavareni spojevi dobrih karakteristika.

Proces je složen, stohastičan sa malo do sada poznatih egzaktnih rezultata. Stvorena je dobra eksperimentalna, mjerna i informaciona osnova, koja obećava značajne rezultate u istraživanjima koja slijede.

### 4. LITERATURA

- [1] Li Y., Murr L., McClure J.: *Solid-state flow visualization in the friction stir welding of 2024 al to 6061 al*, Scripta materialia 40 (9) (1999) 1041-1046.
- [2] Panneerselvam K., Aravindan S., Noorul Haq A., Karthikeyan: *Investigation and analysis of friction stir welding parameters on metal matrix composite (Al-SiC)*, International Conference on Advanced Materials and Composites (ICAMC-2007), Oct 24-26, 2007. Organized by National Institute for interdisciplinary Science & Technology, CSIR, Trivandrum.
- [3] Stahl A., Sorensen C.: *Experimental Measurements of Load Distributions on Friction Stir Weld Pin Tools*. Friction Stir Welding and Processing III. A Publication TMS 2005. ISBN 0-87339-584-0
- [4] Tweedy B., Arbogast W., Allen C.: *Friction Stir Welding of Ferrous Alloys Using Induction Preheating*. Friction Stir Welding and Processing III. A Publication TMS 2005. ISBN 0-87339-584-0
- [5] Vukčević M., Janjić M., Šibalić N.: *Zavarivanje trenjem (FSW) - suština procesa, terminologija i pregled istraživanja*. Tehnika. 2/2008. Beograd.
- [6] Wayne M.T.: et al 1991 Friction Stir Butt Welding international Patent Application No PCT/GB92/02203. Wayne M.T. et al 1995 Friction Stir Butt Welding GP Patent Application No 9125978.8. Wayne M.T. et al 1995 Friction Stir Butt Welding UP Patent 5.460 317.

**Autori: Prof. dr Milan Vukčević, Doc. dr Mileta Janjić, Mr Nikola Šibalić**, Univerzitet Crne Gore, Mašinski fakultet, Cetinjski put bb, 81000 Podgorica, Crna Gora.

E-mail: [milanvu@t-com.me](mailto:milanvu@t-com.me)  
[mileta@ac.me](mailto:mileta@ac.me)  
[nics@cg.yu](mailto:nics@cg.yu)





Baralić J., Radonjić S., Nedić B., Kovač P.

## HABANJE CEVI ZA USMERAVANJE MLAZA

**Rezime:** Habanje cevi za usmeravanje mlaza je karakteristično za proces obrade abrazivnim vodenim mlazom. Od svih cevi za usmeravanje mlaza koje se izbacuju iz upotrebe, 85% se odbacuju iz dalje upotrebe jer su pohabane. Na proces habanja cevi za usmeravanje mlaza utiču brojni faktori. Najveći uticaj imaju karakteristike materijala cevi za usmeravanje mlaza i vrsta abraziva, odnosno odnos njihovih tvrdoća. U ovom radu su prikazani karakteristični oblici habanja cevi za usmeravanje mlaza, kao i izgled pohabanih cevi za usmeravanje mlaza nakon eksploatacije u realnim uslovima – u proizvodnji.

**Ključne reči:** habanje, cev za usmeravanje mlaza

## FOCUSING TUBE WEAR

**Abstract:** The wear of the focusing tube is a very important feature of the abrasive water jet machining. Of all rejected focusing nozzles, 85% are worn. Many parameters influences the process of focusing tube wear. Biggest influence has focusing tube material and the type of abrasive. The most typical wear trends and wear patterns of focusing tube are shown in this paper. Also, wear pattern of focusing tube exploited in operating conditions is shown.

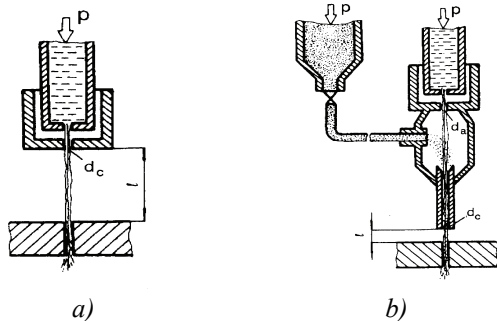
**Key words:** wear, focusing nozzle

### 1. UVOD

Obrada vodenim mlazom pripada grupi nekonvencionalnih postupaka obrade, i već duže vreme se koristi u industriji. Postoje dve metode obrade vodenim mlazom, obrada čistim vodenim mlazom i obrada abrazivnim vodenim mlazom.

Do prve komercijalne upotrebe vodenog mlaza došlo je 1972. godine. Proizvođač prve mašine za obradu vodenim mlazom je bila Mc Cartney Manufacturing Company i instalirana je u Alto Boxboard. Od tada se vodeni mlaz visokog pritiska sve više koristi za obradu mekih materijala kao što su drvo i koža.

Dalja istraživanja su dovela do otkrića abrazivnog vodenog mlaza 1980. godine i njegove prve komercijalne primene 1983. godine. Dodatkom abraziva u vodeni mlaz znatno se proširio spektar materijala koji se mogu na ovaj način obrađivati. Takođe je omogućena i veća brzina obrade, veća tačnost obrade i bolji kvalitet obrađene površine. Najčešće operacije koje se ovom vrstom obrade mogu izvoditi su: sečenje, poliranje površina, čišćenje površina itd.



Slika 1. Šematski prikaz obrade vodenim mlazom bez abraziva a) i sa abrazivom b)

U svim slučajevima mehanizam obrade se zasniva na eroziji. Velika prednost ovog postupka obrade je činjenica da u zoni obrade ne dolazi do značajnog porasta temperature. Obrada abrazivnim vodenim mlazom je naročito pogodna za

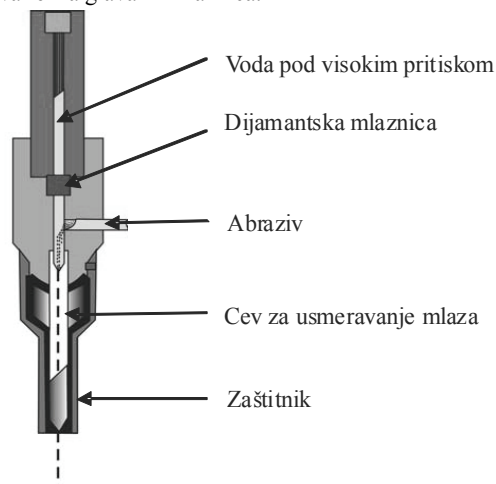
obradu krutih materijala (staklo, keramika, kamen itd.) i kompozitnih materijala.

Šematski prikaz obrade vodenim mlazom bez abraziva dat je na slici 1.a), a abrazivne obrade vodenim mlazom na slici 1.b).

Savremene instalacije za obradu abrazivnim vodenim mlazom rade sa pritiskom vode i preko 5000 bar, pri čemu vodeni mlaz dostiže brzine i do 1400 m/s.

### 2. CEV ZA USMERAVANJE MLAZA

Na slici 2. je prikazan izvršni deo jedne instalacije za obradu abrazivnim vodenim mlazom. Taj izvršni deo se češće naziva rezna glava ili mlaznica.

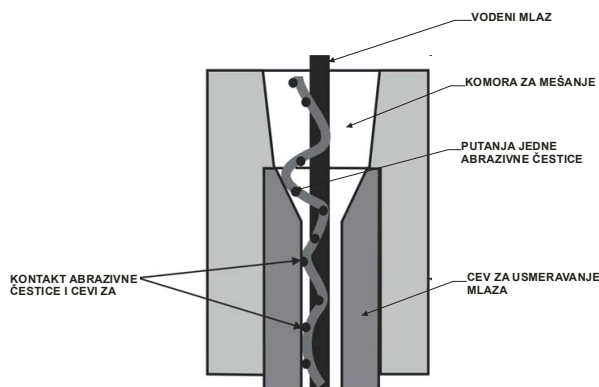


Slika 2. Rezna glava (mlaznica), šematski prikaz

Voda koja dolazi u reznu glavu (mlaznicu) je najčešće pod pritiskom od 1300÷4000 bar i prolazi kroz dijamantsku mlaznicu. Prečnik otvora dijamantske mlaznice se kreće u granicama od 0.08÷0.4mm. Zbog ovako malog prečnika mlaznice vodeni mlaz dostiže veoma velike brzine, čak i do 1400m/s. Ovaj mlaz dalje stiže u komoru za mešanje koja je najčešće prečnika 6mm i dužine 10mm. U ovoj komori se



usled Venturijevog efekta stvara vakuum koji je dovoljan da usisa određenu količinu abraziva. Količina abraziva koji se na ovaj način usisa zavisi od prečnika abrazivne mlaznice. Vodeni mlaz ubrzava čestice abraziva i zajedno sa njima prolazi kroz dugačku cilindričnu cev za usmeravanje mlaza. Mešavina vode i abrazivnih čestica izlazi iz cevi za usmeravanje kao koherentni mlaz i vrši obradu. Na slici 3. je šematski prikazan ovaj proces.



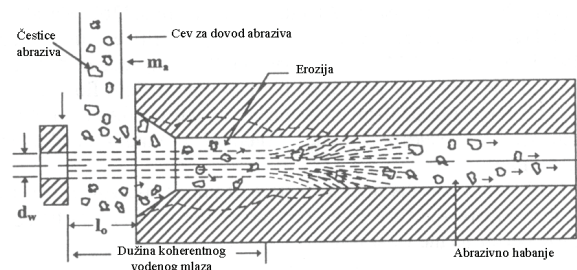
Slika 3. Šematski prikaz procesa mešanja

### 3. HABANJE CEVI ZA USMERAVANJE MLAZA

Novi trendovi u obradi abrazivnim vodenim mlazom su što veća preciznost obrade i veća postojanost cevi za usmeravanje mlaza. Kao što je već objašnjeno, u cevi za usmeravanje mlaza se vrši prenos kinetičke energije sa vodenog mlaza na čestice abraziva. Ovaj proces se odvija u jednoj dugačkoj i uskoj cevi gde je odnos dužine i prečnika oko 100 ( $l/d = 100$ ). Ova cev ujedno služi i kao kolimator za rezultujući vodeni abrazivni mlaz. Značajan napredak je postignut kada je došlo do upotrebe novog kompozitno-karbidnog materijala R-100 (Doty i Groven, 1989), a u novije vreme i R-500 za izradu ovih cevi za usmeravanje mlaza. Upotreba ovih materijala je dovela do znatno veće postojanosti cevi za usmeravanje mlaza, pa samim tim i do većeg prihvatanja ovog novog postupka obrade na tržištu.

Habanje cevi za usmeravanje mlaza je veoma kompleksan proces. Abrazivni vodeni mlaz se kreće veoma velikom brzinom, i najčešće se sastoji iz tri faze: tečnost (voda), abraziv i vazduh. Takođe, postoji više mehanizama habanja cevi za usmeravanje mlaza. Osnovni su eroziono habanje i abrazivno habanje. Eroziono habanje se javlja pri većim uglovima udara abrazivnih čestica (većim od  $20^\circ$ ), dok se kod manjih uglova javlja abrazivno habanje u kombinaciji sa erozionim habanjem.

Na slici 4. je prikazan opšti model habanja cevi za usmeravanje mlaza. Na ulasku u cev, čestice abraziva udaraju u njen unutrašnji zid pod različitim i dosta velikim uglovima, tako da u ovoj oblasti dolazi do erozionog habanja. Dalje niz cev, abrazivne čestice udaraju u zid cevi pod sve manjim uglom, tako da se u ovoj oblasti javlja abrazivno habanje. Kada je cev za usmeravanje mlaza dovoljne dužine, čestice abraziva se pri kraju kreću paralelno sa unutrašnjim zidom cevi. Tvrđi, kruti materijali su manje otporni na eroziono habanje u odnosu na žilave materijale. Kada je u pitanju abrazivno habanje, tvrdi materijali su otporniji u odnosu na žilave materijale. Idealna kombinacija materijala za cev za usmeravanje mlaza bi bila da je na ulaznom delu cevi materijal žilav, a na izlaznom delu cevi tvrd materijal.



Slika 4. Opšti model habanja cevi za usmeravanje mlaza

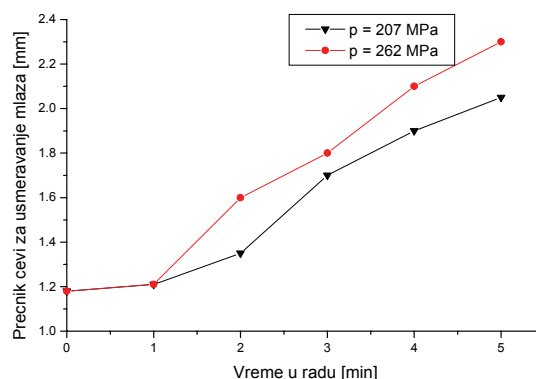
Kada je u pitanju vrsta abrazivnog materijala, garnet i aluminijum oksid imaju sličnu gustinu i veličinu i oblik abrazivnih čestica, tako da je njihov doprinos erozionom habanju sličan. Čestice aluminijum oksida imaju veću tvrdoću, pa je pri obradi sa ovom vrstom abraziva znatno veće abrazivno habanje izlaznog dela cevi za usmeravanje mlaza, nego pri obradi sa garnetom.

Pojam habanja cevi za usmeravanje mlaza podrazumeva više pojava kao što su:

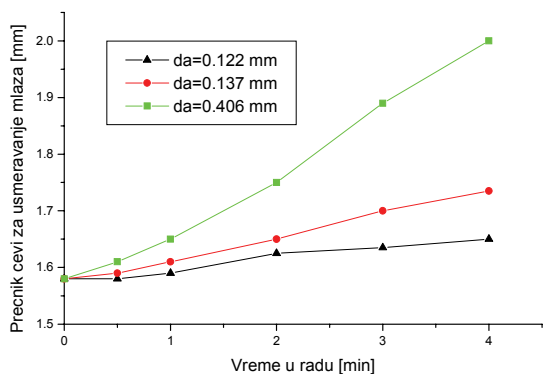
- Gubitak mase
- Stvaranje karakterističnih kanala duž unutrašnjeg otvora
- Promena geometrije izlaznog otvora
- Povećanje izlaznog prečnika.

Početno habanje cevi za usmeravanje mlaza se najlakše identifikuje praćenjem gubitka mase cevi. Cev se meri pre početka obrade i u određenim intervalima tokom obrade. Gubitak mase je posledica erozionog habanja unutrašnjeg zida cevi za usmeravanje mlaza. Usled erozionog habanja dolazi i do pojave stvaranja karakterističnih kanala duž unutrašnjeg otvora cevi. Tokom vremena, dolazi i do promene geometrije izlaznog otvora cevi za usmeravanje mlaza, odnosno do pojave ekscentričnosti otvora. Ova ekscentričnost se definiše odnosom najmanje i najveće dimenzije na izlaznom otvoru cevi.

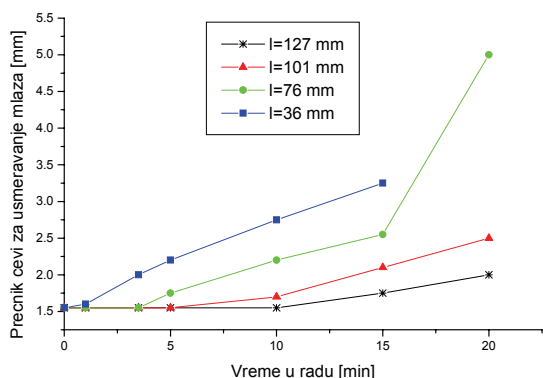
Najčešći metod za praćenje stanja pohabanosti cevi za usmeravanje mlaza je praćenje promene izlaznog prečnika. Na povećanje izlaznog prečnika cevi za usmeravanje mlaza utiču različiti parametri procesa obrade, kao što su radni pritisak, veličina abrazivnih čestica, dužina cevi za usmeravanje mlaza i td. Na sledećim slikama je prikazan uticaj ovih parametara na habanje cevi za usmeravanje mlaza.



Slika 5. Uticaj radnog pritiska na habanje cevi za usmeravanje mlaza



Slika 6. Uticaj prečnika abrazivnih čestica na habanje cevi za usmeravanje mlaza



Slika 7. Uticaj dužine cevi za usmeravanje mlaza na njeno habanje

Na slici 5. je prikazan uticaj radnog pritiska na habanje cevi za usmeravanje mlaza. Sa slike se vidi da sa povećanjem radnog pritiska pumpe, raste i intenzitet habanja cevi za usmeravanje mlaza. Povećanje radnog pritiska pumpe ima za posledicu veću energiju abrazivnih čestica, čime se povećava i intenzitet habanja.

Slika 6. prikazuje uticaj veličine abrazivnih čestica na habanje cevi za usmeravanje mlaza. Neki autori su pokazali da cevi za usmeravanje mlaza izrađene od mekših materijala nisu osetljive na promenu veličine abrazivnih čestica, dok cevi za usmeravanje mlaza izrađene od tungsten-karbida pokazuju jaku zavisnost intenziteta habanja od veličine abrazivnih čestica. U takvim slučajevima, intenzitet habanja se znatno smanjuje sa smanjenjem veličine abrazivnih čestica. Ovakvi rezultati potkrepljuju pretpostavku da su cevi za usmeravanje mlaza izrađene od mekših materijala osetljivije na karakteristike abrazivnog mlaza.

Slika 7. pokazuje uticaj dužine cevi za usmeravanje mlaza na intenzitet njenog habanja. Sa slike se vidi da je kod dužih cevi za usmeravanje mlaza slabiji intenzitet habanja. Objašnjenje ove pojave je da su kod dužih cevi za usmeravanje mlaza putanje abrazivnih čestica gotovo paralelne sa unutrašnjim zidovima cevi, tako da je intenzitet habanja u ovom slučaju dosta niži.

### 3.1 Karakteristični oblici habanja cevi za usmeravanje mlaza

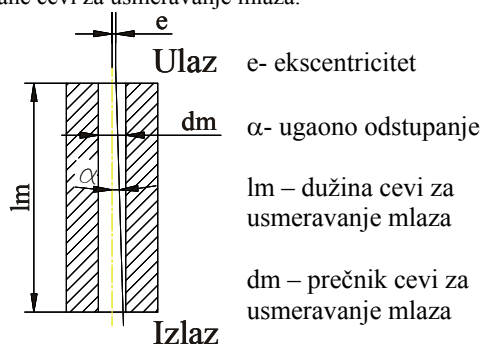
Na slici 8. je prikazan karakterističan izgled uzdužnog preseka pohabanih cevi za usmeravanje mlaza. Na prve dve cevi za usmeravanje mlaza se uočava nepravilno habanje po dužini cevi, što se dešava u slučaju kada dijamantska mlaznica i cev za usmeravanje mlaza nisu dobro centrirane. Tada dolazi do značajnijeg habanja na ulaznom delu cevi jer

čestice abraziva udaraju direktno u zid cevi za usmeravanje mlaza. To dovodi do bržeg habanja cevi i lošijeg kvaliteta obrađene površine. Na trećoj cevi za usmeravanje mlaza je prikazan slučaj kada su dijamantska mlaznica i cev dobro centrirane.



Slika 8. Karakterističan izgled habanja cevi za usmeravanje mlaza-uzdužni presek

Karakteristični oblici habanja cevi za usmeravanje mlaza u uzdužnom preseku mogu biti klasifikovani u četiri osnovne grupe: divergentno habanje, konvergentno habanje, valoviti habanje i pojava izbočina (bulging). Na slici 9. su prikazani geometrijski parametri koji utiču na izgled pohabane cevi za usmeravanje mlaza.



Slika 9. Geometrijski parametri cevi za usmeravanje mlaza

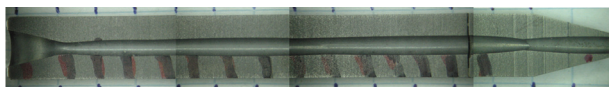
Divergentno habanje se javlja kada su abrazivne čestice znatno veće tvrdoće od materijala cevi za usmeravanje mlaza, na primer kada kao abrazivni materijal koristimo garnet, a cev za usmeravanje mlaza je od volfram-karbida. Drugi primer je kada koristimo silikon-karbid kao abrazivni materijal, a cev za usmeravanje mlaza je od keramičkih materijala ili R-100. Nakon dužeg rada, unutrašnji otvor cevi za usmeravanje mlaza poprima oblik mlaza koji se širi.

Kod pojave konvergentnog habanja, intenzitet habanja cevi za usmeravanje mlaza je veći na ulazu u cev nego na izlazu. Ovakvo habanje se javlja kod cevi za usmeravanje mlaza koje su uzrađene od materijala koji imaju veliku tvrdoću, a malu žilavost. Otpornost na eroziono habanje ovakvih materijala je veoma mala.

Pojava talasa u uzdužnom preseku cevi (valovito habanje) za usmeravanje mlaza se najčešće javljaju kada abrazivni vodeni mlaz ima ugaono odstupanje i ekscentričan je u odnosu na unutrašnji otvor cevi za usmeravanje mlaza. U ovakvim slučajevima dolazi do intenzivnijeg udaranja abrazivnih čestica u zid cevi za usmeravanje mlaza i njihovog odbijanja od zida. Ovakvo kretanje abrazivnih čestica prouzrokuje stvaranje talasa na uzdužnom preseku cevi za usmeravanje mlaza. Iako ovi talasi deluju kao nepravilni, poprečni presek unutrašnjeg otvora cevi za usmeravanje mlaza veoma malo odstupa od kružnice.

Pojava izbočina (bulging) se najčešće javlja na cevima za usmeravanje mlaza koje se koriste u sistemima sa direktnim ubrizgavanjem abrazivnog vodenog mlaza. Kod ovakvih sistema, abrazivne čestice imaju samo aksijalnu komponentu brzine. Razni poremećaji ili diskontinuitet (najčešće pojava mikropukotina) u materijalu cevi za usmeravanje mlaza mogu da izazovu vrtloge koji dovode do ovakvog habanja.

Na slici 10. je prikazan presek cevi za usmeravanje mlaza koja je korišćena u realnim uslovima (u proizvodnji). Na ovoj cevi za usmeravanje mlaza se uočava pojava talasa u uzdužnom preseku i izraženo divergentno habanje na izlaznom delu cevi. Abrazivni materijal koji je korišćen u toku rada je garnet, mash 80, a materijal cevi za usmeravanje mlaza je R-100.



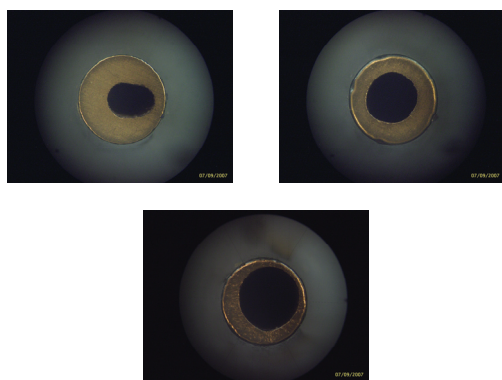
Slika 10. Uzdužni presek cevi za usmeravanje mlaza

Pored praćenja promena u uzdužnom preseku cevi za usmeravanje mlaza, dosta podataka o procesu habanja možemo dobiti i posmatranjem geometrije izlaznog otvora cevi za usmeravanje mlaza.

Nakon izvesnog vremena provedenog u radu, izlazni otvor cevi za usmeravanje mlaza postaje nepravilnog oblika. Nepravilnosti u obliku su posledica tri faktora: ekscentriciteta, ugaonog odstupanja i raspodele abrazivnih čestica unutar abrazivnog vodenog mlaza. Posledica ekscentričnog abrazivnog vodenog mlaza je ekscentrično habanje izlaznog otvora. Ova pojava je prisutna celom dužinom cevi za usmeravanje mlaza. Kada abrazivni vodeni mlaz ima ugaono odstupanje, izlazni otvor cevi za usmeravanje mlaza se neravnomerno haba po obimu, tako da izlazni otvor nema pravilnu geometriju. Ovo je posledica odbijanja abrazivnih čestica od zida cevi za usmeravanje mlaza. Ukoliko je odnos  $l/dm < 25$  ova nepravilnost je još izraženija, jer abrazivne čestice još uvek poseduju aksijalnu i radijalnu komponentu brzine.

Najveći uticaj na geometriju izlaznog otvora cevi za usmeravanje mlaza imaju ekscentricitet i ugaono odstupanje. Uticaj ova dva parametra je još izraženiji kada se obrada vrši sa abrazivnim materijalima velike tvrdoće, kao što je silicijum-karbid. Kada je abrazivni materijal garnet, čija je tvrdoća znatno manja, materijal cevi za usmeravanje mlaza je otporan na udarce abrazivnih čestica. Ipak, pri udaru abrazivnih čestica u zid cevi za usmeravanje mlaza dolazi do njihovog loma, tako da ona gube na efikasnosti.

Izgled izlaznog otvora pohabanih cevi za usmeravanje mlaza je prikazan na slici 11.



Slika 11. Izgled izlaznog otvora pohabanih cevi za usmeravanje mlaza

Na prvoj slici je izražena pojava ekscentrično pohabanog izlaznog otvora cevi za usmeravanje mlaza, dok se na drugoj slici uočava nepravilno habanje izlaznog otvora. Treća slika predstavlja kombinaciju prethodna dva slučaja. To nam ukazuje da su u prvom slučaju abrazivni vodeni mlaz i cev za usmeravanje mlaza bili ekscentrični, dok je u drugom slučaju abrazivni vodeni mlaz imao ugaono odstupanje. Treći slučaj je kada je abrazivni vodeni mlaz bio ekscentričan u

odnosu na cev za usmeravanje mlaza i imao je ugaono odstupanje.

#### 4. ZAKLJUČAK

Pored parametara procesa obrade, na proces habanja cevi za usmeravanje mlaza veliki uticaj imaju i geometrijski parametri kao što su ekscentricitet, ugaono odstupanje, dužina i prečnik cevi. Uticaj svih ovih parametara je prikazan i opisan u ovom radu.

Materijal cevi za usmeravanje mlaza takođe ima veliku ulogu u procesu habanja cevi za usmeravanje mlaza. Kao što smo već istakli, žilavi materijali su otporni na erozivno habanje, dok su materijali velike tvrdoće otporni na abrazivno habanje. Erozivno habanje je osnovni mehanizam habanja u ulaznoj zoni cevi za usmeravanje mlaza, dok je to u izlaznoj zoni abrazivno habanje.

Razvoj cevi za usmeravanje mlaza koje bi u ulaznoj zoni imale veliku žilavost, a u izlaznoj zoni veliku tvrdoću bi bio od velikog značaja za razvoj obrade abrazivnim vodenim mlazom. Postoji i nekoliko oblika habanja cevi za usmeravanje mlaza koji su karakteristični za poremećaj pojedinih parametara procesa obrade. Rano otkrivanje ovih karakterističnih oblika habanja, može da nam ukaže na ove poremećaje, tako da pravovremeno možemo pristupiti njihovom otklanjanju.

#### 7. LITERATURA

- [1] Momber A.W., Kovacevic R., *Principles of Abrasive Waterjet Machining*, Springer, London, 1998.
- [2] Hashish M., *Mixing Tube Material Effects and Wear Patterns*, Proceedings of the 9<sup>th</sup> American Waterjet Conference-Volume I, 211-222, Dearborn, Michigan, WTA, St. Louis, August 1997
- [3] Baralić J., Radonjić S., Nedić B., Uticaj habanja cevi za usmeravanje mlaza na kvalitet obrađene površine, 32. Savetovanje proizvodnog mašinstva Srbije, 39-42, Novi Sad, FTN, Novi Sad, septembar 2008
- [4] Nanduri M., Taggart D., Kim T., *Effect of the Inlet Taper Angle on AWJ Nozzle Wear*, Proceedings of the 9<sup>th</sup> American Waterjet Conference-Volume I, 223-238, Dearborn, Michigan, WTA, St. Louis, August 1997
- [5] Hashish M., *Visualization of the abrasive waterjet cutting process*, Exp. Mech. 28 (1988) 159-169.
- [6] KENNAMETAL, katalogi proizvođača

Autori:

Mr Jelena Baralić, Prof. dr Snežana Radonjić, Univerzitet u Kragujevcu, Tehnički fakultet, Čačak,

032 /302-773

Prof. dr Bogdan Nedić, Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet, Kragujevac,

034/335-990

Prof. dr Pavel Kovač, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad,

021/485-2351

E-mail: [jbaralic@tfc.kg.ac.rs](mailto:jbaralic@tfc.kg.ac.rs)

[snezar@tfc.kg.ac.rs](mailto:snezar@tfc.kg.ac.rs)

[nedic@kg.ac.rs](mailto:nedic@kg.ac.rs)

[pkovac@uns.ns.ac.rs](mailto:pkovac@uns.ns.ac.rs)

Kraišnik, M., Šljivić, M., Trifković, S.

## NEKI ASPEKTI DEFORMABILNOSTI POROZNIH MATERIJALA DOBIJENIH POSTUPCIMA METALURGIJE PRAHA

**Rezime:** Izvanredni ekonomski i tehnički potencijali P/M konstrukcionih komponenti kontinuirano utiču na povećanje njihove produkcije i oblasti primene. Mehaničke osobine P/M delova su jednake, ili čak i bolje od delova istog hemijskog sastava dobijenih, npr. valjanjem ili kovanjem, dok visok stepen geometrijske složenosti prevazilazi mogućnosti dobijanja istih proizvoda konvencionalnim metodama plastičnog deformisanja.

Generalno, plastično deformisanje poroznih materijala je proces sličan konvencionalnim postupcima plastičnog deformisanja, ali zbog bitnog uticaja dela slobodne zapremine (pora) na vrednost granične deformacije pri istraživanju deformabilnosti materijala ne mogu da se koriste iste teorije i metode. Zbog velike komercijalne primene P/M delova, a za potrebe optimalnog projektovanja tehnološkog procesa plastičnog deformisanja, u ovom radu analizirani su neki aspekti deformabilnosti poroznih materijala sa osvrtom na uticaj pojedinih faktora u pogledu vrednosti granične deformacije u promenljivim uslovima obrade.

**Ključne reči:** Deformabilnost, Porozni materijal, Naponsko-deformaciono stanje, Metalurgija praha.

## SOME ASPECTS OF WORKABILITY ON POROUS MATERIALS GAINED THROUGH THE PROCESSES OF POWDER METALLURGY

**Abstract:** Excellent economic and technical potentials of P/M constructional components continuously increase their production and application fields. Mechanical properties of parts are the same, or even better than the parts of the same chemical composition gained through the processes of e.g. rolling or forging, while a high degree of geometric complexity exceeds the availability of these products using the conventional methods of plastic deformation.

Generally, plastic deformation of porous material is a process similar to conventional plastic deformation, but due to important influence of a part of free volume (pores) on the value of the marginal deformation, the research of workability can not use the same theories and methods. Due to large commercial application of P/M parts, and for the purpose of optimal design of technological processes of plastic deformation, this paper has analyzed some aspects of workability of porous materials with regard to the influence of certain factors regarding the value of the marginal deformation in the changing conditions of processing.

**Key words:** Workability, Porous material, Stress-strain state, Powder metallurgy.

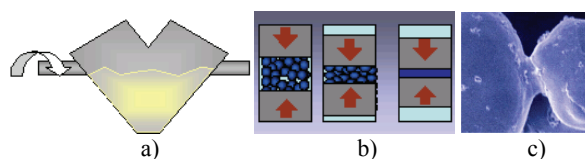
### 1. UVOD

Na nivou sadašnjeg tehnološkog razvoja, zahtevane karakteristike tehničkih sistema moguće je postići sintezom hemijskog sastava i mikrostrukture materijala. U pogledu ostvarivanja takvog koncepta proizvodnje materijala, metalurgija praha (eng. Powder Metallurgy – P/M) pruža velike mogućnosti. Generalno, P/M je visokorazvijena tehnologija za proizvodnju preciznih metalnih delova vrlo kompleksnih oblika sa izvanrednim eksploatacionim karakteristikama, čiji je spektar primene veoma širok.

Brži razvoj dobijanja delova postupcima metalurgije praha počeo je proizvodnjom i korišćenjem „tvrdih metala“, a u poslednje vreme doživljava izuzetno visok uspon.

Raznovrsne mogućnosti P/M proizvoda iskazane su kroz njihovu primenu u automobilske i avionske industriji (delovi motora i tehnička oprema), elektrotehnici (kontaktni spojevi), zatim u sektoru proizvodnje komercijalnih mašina i komponenti hidrauličnih sistema (delovi pumpi, razvodnika i sl.)

P/M tehnologija sastoji se iz tri osnovna koraka (sl. 1): a) mešanje praha (željezni, aluminijski, bakarni i dr.), b) sabijanje praha u kalupu u željeni oblik na sobnoj temperaturi i c) sinterovanje ili zagrevanje sabijenog praha u pećima sa kontrolisanom atmosferom u cilju povezivanja čestica praha u kompaktnu metalnu celinu. Gubici praha u ovim procesima su manji od 3 %.



Slika 1. Tri osnovna koraka P/M tehnologije

Procesi metalurgije praha obezbeđuju dobre ekonomske i tehničke pogodnosti koje se manifestuju kroz:

- korišćenje različitih materijala za dostizanje zahtevanih karakteristika proizvoda;
- povećanje industrijske produktivnosti;
- eliminisanje troškova sekundarne mašinske obrade kroz projektovanje net shape i near-net shape tehnologije;
- mogućnost dobijanja proizvoda vrlo složenih geometrijskih konfiguracija;
- fleksibilnost pri projektovanju i proizvodnji materijala;
- jedini način oblikovanja nekih veoma bitnih materijala (volframovi karbidi, superlegure, disperzioni čvrsti metali i sl.);
- očuvanje prirodne sredine reciklažom sirovina.

Radi ilustracije mogućnosti dobijanja različitih oblika, na sl. 2 dat je prikaz P/M delova koji se uglavnom koriste u



automobilskoj industriji.



Slika 2. Proizvodi dobijeni P/M postupcima

Interesovanje za proizvodnju Net Shape i Near Net Shape P/M komponenti je veliko i ovakav način proizvodnje je konkurentan masovnoj proizvodnji delova konvencionalnim metodama. Godišnja proizvodnja P/M materijala na svetskom nivou iznosi preko 1000000 tona, polovina od toga je u SAD, a promet prahovima i P/M delovima u SAD procenjuje se na oko 5 milijardi dolara godišnje [14].

Zbog velike komercijalne primene P/M delova, a za potrebe optimalnog projektovanja procesa deformisanja, u ovom radu analizirani su neki aspekti deformabilnosti poroznih materijala sa osvrtom na uticaj pojedinih faktora u pogledu vrednosti granične deformacije u promenljivim uslovima obrade.

## 2. NAPONSKO-DEFORMACIONI ODNOSI PRI SABIJANJU CILINDRIČNIH UZORAKA OD POROZNIH MATERIJALA

Istraživanje ponašanja materijala u različitim uslovima obrade sa aspekta ostvarivanja maksimalnog iznosa efektivne deformacije nije moguće bez identifikacije naponsko-deformacionog stanja u zoni razaranja uzorka. Za rešavanje postavljenog zadatka pri sabijanju cilindričnih uzoraka izrađenih od kompaktnih materijala veoma uspešno se koristi deformaciona teorija. Analitički izrazi koji definišu pojedine komponente napona na slobodnoj površini ekvatorijalnog preseka uzorka (mesto pojave pukotina) date su u [12].

Međutim, pri analizi procesa sabijanja cilindričnih uzoraka izrađenih od poroznih materijala ne mogu se koristiti isti obrasci za definisanje generisanih naponsko-deformacionih komponenti u zoni razaranja. Osnovni razlog za to je bitan uticaj relativne gustine uzorka na ponašanje materijala u toku obrade.

Za opisivanje uticaja relativne gustine poroznih materijala na vrednost naponsko-deformacionih komponenti koriste se različiti prilazi.

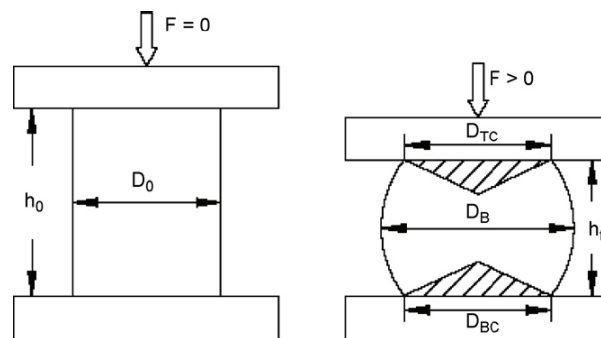
Prema teoriji Kuhn-a i Downey-a efekat poroznosti materijala na vrednost efektivnog napona može biti zapisana u sledećem obliku [1]:

$$\sigma_{ef} = [3J_2 - (1/3)(1-2\nu)(J_2 - J_1^2/3)]^{0.5} \quad (1)$$

Kada je Poisson-ov koeficijent  $\nu = 0,5$ , što je svojstvo za čvrste, kompaktne materijale, izraz (1) postaje Misses-ov uslov plastičnog tečenja  $\sigma_e = \sqrt{3|J_2|}$ .

U radovima Narayanasamy-e i ostalih [4-6] razvijena je matematička teorija plastičnosti na osnovu koje se definišu

komponente napona i deformacija u procesu sabijanja P/M cilindričnih uzoraka uzimajući u obzir uticaj promenu relativne gustine materijala u toku deformisanja.



Slika 3. Šematski prikaz sabijanja cilindričnog uzorka izrađenog od poroznog materijala [7]

Na osnovu jednačina koje definišu vezu između napona i deformacija za porozne materijale [4], odnos priraštaja cirkularne i aksijalne komponente deformacije može se definisati na sledeći način [8]:

$$\alpha = \frac{d\varepsilon_\theta}{d\varepsilon_z} = \left[ \frac{(2+R^2)\sigma_\theta - R^2(\sigma_z + 2\sigma_\theta)}{(2+R^2)\sigma_z - R^2(\sigma_z + 2\sigma_\theta)} \right] \quad (2)$$

Ovde je R relativna gustina materijala i u funkciji je odnosa gustine poroznog materijala posle deformisanja ( $\rho_f$ ) i teorijske gustine kompaktnog materijala ( $\rho_{th}$ ).

Izraz (2) omogućava uspostavljanje zavisnost između cirkularne i aksijalne komponente napona:

$$\sigma_\theta = \left[ \frac{2\alpha + R^2}{2 - R^2 + 2\alpha R^2} \right] \cdot \sigma_z \quad (3)$$

Srednji hidrostaticki napon se definiše preko prve invarijante tenzora napona, a kada se uzmu u obzir uslovi aksijalno-simetričnog sabijanja cilindričnih uzoraka ( $\sigma_r = \sigma_\theta$ ) sledi da je:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_z + 2\sigma_\theta}{3} \quad (4)$$

Efektivni napon za porozne materijale, prema [7-9], je određen izrazom (5):

$$\sigma_{ef}^2 = \frac{\sigma_z^2 + \sigma_\theta^2 + \sigma_r^2 - R^2(\sigma_z\sigma_\theta + \sigma_\theta\sigma_r + \sigma_r\sigma_z)}{2R^2 - 1} \quad (5)$$

U aksijalno-simetričnim uslovima sabijanja cilindričnih uzoraka izraz (5) transformiše u sledeći oblik:

$$\sigma_{ef} = \left( \frac{\sigma_z^2 + 2\sigma_\theta^2 - R^2(\sigma_z + 2\sigma_\theta)}{2R^2 - 1} \right)^{1/2} \quad (6)$$

Aksijalna deformacija u pravcu ose sabijanja definisana je sledećim obrascem [1, 7-9]:

$$\varepsilon_z = \ln \left( \frac{h_0}{h_f} \right) \quad (7)$$

Deformacija u cirkularnom pravcu je određena preko prethodno definisanog faktora geometrijskog oblika [8]:

$$\varepsilon_\theta = \ln \left( \frac{2D_B^2 + D_C^2}{3D_0^2} \right) \quad (8)$$

Efektivna deformacija je definisana u zavisnosti od relativne gustine materijala preko izraza (9), [9]:

$$\varepsilon_{ef} = \left\{ \left( \frac{2}{3(2+R)} \right) [(\varepsilon_z - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)^2] + \left[ \frac{(\varepsilon_z + 2\varepsilon_\theta)^2}{3} (1-R^2) \right] \right\}^{1/2} \quad (9)$$

Komponente deformacija (7) i (8) su definisane na osnovu geometrijskih veličina prikazanih na sl. 3, pri čemu je



$D_C$  srednja vrednost prečnika uzorka na kontaktnim površinama posle deformisanja.

### 3. UTICAJ NEKIH FAKTORI NA DEFORMABILNOST POROZNIH MATERIJALA

Deformabilnost je osobina materijala koja predstavlja mogućnost trajne promene oblika i dimenzija postupcima plastičnog deformisanja u realnim uslovima obrade bez pojave pukotine, lokalizacije deformacije ili nekog drugog neželjenog oblika oštećenja površine ili unutrašnje strukture obratka. Zbog kompleksnog uticaja većeg broja faktora na vrednost granične deformacije (hemijski sastav, strukturno stanje, brzina deformacije, temperatura obrade, generisano naponsko stanje) funkciju deformabilnosti je moguće definisati samo u implicitnom obliku (9):

$$D_M(\varphi_c^g) = \left( H_M, S_M, T_O, \varphi, T_\sigma \right) \quad (9)$$

Generalno, deformabilnost materijala je jedan od najvažnijih parametara koji se mora uzeti u razmatranje prilikom optimalnog projektovanja tehnologije plastičnog deformisanja. Shodno tome neophodno je analizirati uticaj pojedinih faktora na ponašanje poroznih materijala u različitim uslovima obrade sa aspekta maksimalnog iskorišćenja potencijala deformabilnosti.

Zbog niza specifičnosti u ponašanju poroznih materijala, koje su rezultat njihove mikrostrukture, istraživanje uticaja pojedinih faktora na graničnu deformabilnost zahteva multidisciplinarni pristup.

U odnosu na kompaktnu materijale, pri istraživanju deformabilnosti poroznih materijala, pored generisanog naponskog stanja u zoni deformisanja, vema snažan uticaj na vrednost granične deformacije, kao numeričkog pokazatelja deformabilnosti, ima relativna gustina P/M materijala. Naime, sa promenom zapremine uzorka menja se poroznost materijala, koja nije neosetljiva na uticaj hidrostatičkog napona. Jasno je da plastično deformisanje delova sa višom relativnom gustinom zahteva veće parametre procesa, dok je proces deformisanja delova sa nižom relativnom gustinom realizuje sa manjim vrednostima radnih parametara. Sa druge strane, pritiskujuće komponente hidrostatičkog napona smanjuju i zatvaraju pore u materijalu, pri čemu relativna gustina materijala raste, dok se generisanjem zateznih komponenti hidrostatičkog napona u zoni deformisanja radnog komada postižu sasvim suprotni efekti.

Delovi izrađeni od materijala dobijenih postupcima metalurgije praha, tokom plastičnog deformisanja, su skloni pojavi pukotina ili lomu. Ovakvo ponašanje materijala uslovljeno je prisustvom pora (20 – 30 % ukupne zapremine dela čine pore [1-3]) koje izazivaju koncentraciju napona. Tokom procesa sabijanja poroznih materijala lomovi se uglavnom pojavljuju na slobodnoj površini uzorka, mada se mogu pojaviti i slobodnim razvijanjem oko uključaka, ili drugih nehomogenih delova strukture.

U opštem slučaju, povećanje poroznosti materijala pogoršava uslove obrade, što se odražava na smanjuje čvrstoće P/M komponente i deformabilnost materijala.

Geometrija pripremljena, koja je u procesima sabijanja cilindričnih uzoraka definisana odnosom  $H_0 / D_0$ , može ispoljiti značajan uticaj na deformabilnost materijala. Prema rezultatima istraživanja [2,7], povećanje odnosa početnih dimenzija P/M uzorka dovodi do proporcionalnog povećanja graničnih deformacija  $\varepsilon_0$  i  $\varepsilon_z$ .

Zbog činjenice da su tehnički čisto željezo i niskouglenični čelik bazni materijali za dobijanje P/M delova istraživanja uticaja količine ugljenika na deformabilnost poroznih materijala mogu biti veoma

značajna. Rezultati studije [7] ukazuju na povećanje deformabilnosti sa povećanjem % C. U slučaju korišćenja čistog željeznog praha (0 % C) zapremina šupljina je veća u odnosu na niskouglenični čelik, što se neminovno odražava na kompaktnost materijala i vodi ka nižim iznosima graničnih deformacija.

### 4. PRILAZI U DEFINISANJU DGD ZA POROZNE MATERIJALE

Načelno postoje dva prilaza pri definisanju dijagrama granične deformabilnosti (DGD) u području zapremskog deformisanja kompaktnih materijala [12]. Prvi se odnosi na određivanje zavisnosti graničnih vrednosti dveju glavnih deformacija u trenutku razaranja materijala. Drugi prilaz je uopšteniji, jer uzima u obzir uslove obrade kroz istraživanje zavisnosti između naponskog stanja i granične deformacije.

Literaturni izvori [1-3, 8] potvrđuju oba navedena prilaza mogu uspešno koristiti i za definisanje DGD poroznih materijala. Pri tome je jasno istaknuto da granična deformacija P/M uzorka u velikoj meri zavisi od relativne gustine.

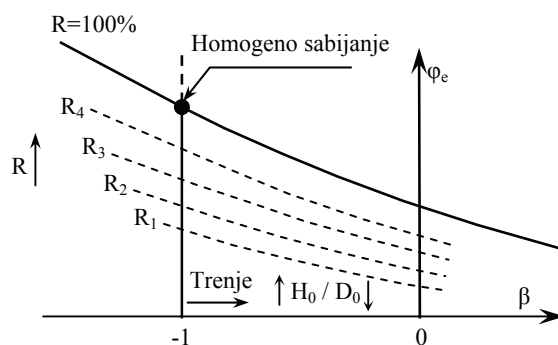
Za očekivati je da naponski indeks deformabilnosti, kao što su ga definisali Vujović i Shabaik [13], bude pogodan da opiše pojavu pukotine ili loma pri sabijanju poroznih uzoraka.

$$\beta_p = \frac{3\sigma_m}{\sigma_{ef}} \quad (10)$$

Uzimajući u obzir stanje pre i za vreme deformisanja poroznih delova, ali i potpuno različito ponašanje poroznih u odnosu na kompaktnu materijale, pri razmatranju problematike definisanja DGD za porozne materijale uvode se određene hipoteze [1]:

1. Predpostavlja se da će, pri sabijanju cilindričnih uzoraka od poroznih materijala, naponski indeks deformabilnosti  $\beta_p$  imati manje vrednosti u odnosu na naponski indeks deformabilnosti  $\beta$  kod sabijanja uzoraka od kompaktnih materijala. Takođe, očekuje se da će pri istom odnosu početnih dimenzija uzorka  $H_0 / D_0$  i pri istim tribološkim uslovima, vrednost granične deformacije biti manja kod uzoraka izrađenih od poroznih u odnosu na iste izrađene od kompaktnih materijala.
2. Predpostavlja se da će vrednost  $\beta_p$  imati isti trend promene kao i kod neporoznih materijala, tj. da će manje vrednosti  $\beta_p$  omogućavati ostvarivanje većih vrednosti graničnih deformacija  $\varphi_{eg}$ . Dakle, negativne vrednosti  $\beta_p$  su posledica povećanja hidrostatičkog pritiska, dok pozitivne vrednosti  $\beta_p$  odgovaraju povećanju hidrostatičkog zatezanja. Prva promena usporava pojavu pukotina na uzorku, dok druga povećava osetljivost uzorka na pojavu loma.

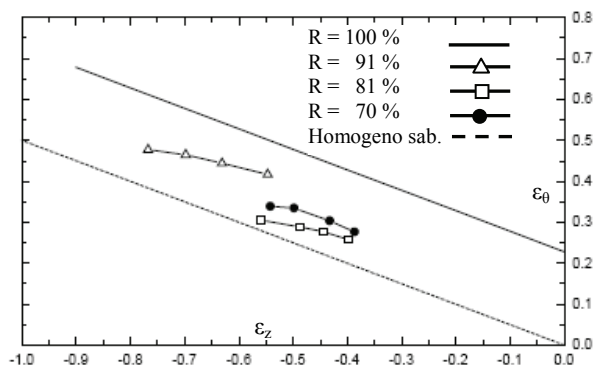
Osnovni prilaz pri određivanju  $\beta$ -faktora za porozne materijale grafički je prikazan na sl. 4.



Slika 4. Osnovni prilaz pri određivanju  $\beta$ -faktora za porozne materijale [1]

Očigledno je da će karakteristična kriva granične deformabilnosti ( $\varphi_e = f(\beta)$ ) menjati svoj položaj u zavisnosti od odnosa polaznih dimenzija uzorka  $H_0/D_0$  (uticaj geometrije priprema) i uslova kontaktnog trenja, ali ovakve promene ne mogu biti identično tretirane kao za procese deformisanja kompaktnih materijala, jer su u ovom slučaju efektivni napon i efektivna deformacija zavisni od relativne gustine materijala R.

U radu [2] za definisanje dijagrama granične deformabilnosti korišćen je prilaz koji povezuje dve glavne deformacije u trenutku razaranja poroznog materijala ( $\varepsilon_\theta = f(\varepsilon_z)$ ). Rezultati istraživanja (sl. 5) generalno pokazuju opšti trend smanjenja graničnih iznosa deformacija kod uzoraka sa većim stepenom poroznosti.



Slika 5. Lokacije tačaka - granične deformacije ( $\varepsilon_z^g, \varepsilon_\theta^g$ ) za P/M cilindrične uzorke [2]

Na osnovu vrednosti deformacija u trenutku razaranja uzorka definisan je kriterijum deformabilnosti za porozne materijale [2]:

$$(11) \quad \varepsilon_\theta^g = -0.5 \cdot \varepsilon_z^g + \varepsilon_{\theta 0} \cdot e^{-m \cdot \varepsilon_z^g}$$

Ovde su:

$\varepsilon_\theta^g$  i  $\varepsilon_z^g$  - granični iznosi cirkularne i aksialne deformacije  
 $\varepsilon_{\theta 0}$  - iznos deformacije  $\varepsilon_\theta$  na mestu preseka krive deformabilnosti kompaktnog materijala ( $R = 100\%$ ) sa ordinatnom osom (sl. 5.)

$f_c$  - poroznost uzorka na mestu pojave pukotina  
 $m$  - konstanta koja zavisi od materijala.

Prema ovom kriterijumu, uticaj poroznosti na vrednost granične deformacije opisan je preko eksponencijalno-padajuće funkcije, što upućuje na zaključak da će se pukotine na uzorcima pojavljivati ranije sa povećanjem poroznosti, tj, sa smanjenjem relativne gustine materijala.

#### 4. ZAKLJUČAK

Kontinuirano povećanje obima proizvodnje i oblasti primene P/M delova nameće potrebu sveobuhvatnog istraživanja ponašanja poroznih materijala u procesima plastičnog deformisanja.

Efekti ispoljeni u pogledu ponašanja materijala u različitim uslovima obrade, a koji su posledica relativne gustine P/M uzorka suštinski određuju razlike u prilazu istraživanja deformabilnosti poroznih u odnosu na kompaktne materijale.

Generalno, veća poroznost materijala pogoršava uslove deformisanja, promovise lom uzorka i bitno doprinosi ostvarivanju nižih vrednosti graničnih deformacija.

Izloženi prilaz (sl. 4) omogućava uspostavljanje veze između granične deformacije  $\varphi_e$  i naponskog indeksa deformabilnosti  $\beta_p$  i predstavlja koristan doprinos u metodologiji definisanja DGD za porozne materijale.

Bez obzira na odvojeno istraživanje deformabilnosti za

kompaktne i porozne materijale, uticaji uslova deformisanja na vrednost granične deformacije poroznih materijala još uvek izbegavaju potpuna uopštenja.

#### 5. LITERATURA

- [1] Abdel-Rahman M., El-Sheikh M. N.: *Workability in forging of powder metallurgy compacts*, Journal of Materials Processing Technology 54, pp. 97-102, 1995.
- [2] Huang C. C., Cheng J. H.: *An investigation into the forming limits of sintered porous materials under different operational conditions*, Journal of Materials Processing Technology 148, pp. 382-393, 2004.
- [3] Huang C. C., Cheng J. H.: *A new forming limit criterion and ductile fracture prediction in the forging of sintered powder preforms*, Department of mechanical engineering, National Taiwan University.
- [4] Narayanasamy R., Ponalagusamy R.: *A mathematical theory of plasticity for compressible P/M materials*, Journal of Materials Processing Technology 86, pp. 159-162, 1999.
- [5] Narayanasamy R., Ponalagusamy R.: *A mathematical theory of plasticity for compressible powder metallurgy materials – Part II*, Journal of Materials Processing Technology 97, pp. 110-113, 2000.
- [6] Narayanasamy R., Ponalagusamy R.: *A mathematical theory of plasticity for compressible powder metallurgy materials – Part III*, Journal of Materials Processing Technology 100, pp. 262-265, 2000.
- [7] Narayanasamy R., Anandakrishnan V., Pandey K. S.: *Effect of carbon on content on workability of powder metallurgy steels*, Materials Science and Engineering A 494, pp. 337-342, 2008.
- [8] Narayanasamy R., Ramesh T., Pandey K. S.: *Some aspects on cold forging of aluminium-iron powder metallurgy composite under triaxial stress state condition*, Materials and Design 29, pp. 891-903, 2008.
- [9] Narayanasamy R., Anandakrishnan V., Pandey K. S.: *Comparison of workability strain and stress parameters of powder metallurgy steels AISI 9840 and AISI 9845 during cold upsetting*, Materials and Design 29, pp. 1919-1925, 2008.
- [10] Park C. W., Park J. O., Kim Y. H.: *A study on the effect of powder forging for cup-shaped product*, International Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 3, No 4., pp. 37-42, 2002.
- [11] Šljivić M.: *Tehnologija plastičnosti I*, Univerzitet u Banja Luci, Mašinski fakultet, Banja Luka, 1998.
- [12] Vilotić D.: *Ponašanje čeličnih materijala u različitim obradnim sistemima hladnog zapreminskog deformisanja*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1987.
- [13] Vujović V., Shabaik A.: *A new workability criteria for ductile fracture*, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 108, 1986., pp. 245-249.
- [14] www.mpif.org: *A growth industry vital to many products*, Powder metallurgy 2008 facts

**Autori: Mr Milija Kraišnik, Ass. Spasoje Trifković**, Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Mašinski fakultet, Vuka Karadžića 30. 71123 Istočno Sarajevo, Republika Srpska, BiH, Tel.: +387 57 340-847, Fax: +387 57 320-841, **Prof. dr Milan Šljivić**, Univerzitet u Banja Luci, Mašinski fakultet, Stepe Stepanovića 75, 78000 Banja Luka, Republika Srpska, BiH, Tel.: +387 51 488-320, Fax: +387 51 468-696.  
 E-mail: [milijakraisnik@yahoo.com](mailto:milijakraisnik@yahoo.com)  
[slivicm@urc.bl.ac.yu](mailto:slivicm@urc.bl.ac.yu)  
[spasoje.trifkovic@maf.unssa.rs.ba](mailto:spasoje.trifkovic@maf.unssa.rs.ba)

Mohiudeen Abdel-Rahman, Bashir Raddad

## DEFORMATION OF HIGH PURITY COPPER SPECIMENS IN COMPRESSION BETWEEN FLAT AND GROOVED DIES

### ABSTRACT

Experiments were carried out to generate data on cold compression of high purity copper specimens having different height-to-diameter (Ho/Do) ratios (0.5 to 1.5) between two flat dies having various degrees of surface condition (knurled, dry and lubricated) and between grooved dies having different groove numbers (1 to 3). Different Ho/Do ratios die surface conditions and number of grooved resulted in different loading characteristics and also different modes of deformation. The latter case resulted forward and backward extrusion modes plus the radial flow resulting from ordinary compression. Three shapes of deformed specimen were obtained according to the number of grooves. Load values decreased as Ho/Do increased and friction condition improved. For a fixed load, displacement increased for higher Ho/Do ratio. For a fixed displacement, however, load level decreased as Ho/Do increased. Surface strains were apparently affected by the above variables. In case of compression between grooved dies, in spite of the different mode of deformation, the same trends were obtained.

**KEYWORDS:** Compression - flat dies- grooved dies- surface strains- mode of deformation

### 1. INTRODUCTION

Axial compression between two flat dies, which results in radial flow of the specimen, gives different modes of deformation due to the different friction constraints at contacting surfaces, but details in loading and geometry of the barreled surfaces may vary. The case of compression between grooved dies results in forward and backward extrusion modes of flow, along with the radial flow. Frictional conditions at the interface affect the metal flow, total deformation load and the final product properties. Such factors can cause energy losses and premature die wear. Friction directly affects the planes of principal stresses and is therefore considered to be a major variable in actual metal forming processes where the metal undergoes large plastic deformations. The interface friction has to be understood, modeled and accurately measured. In the analysis of metal forming process, a realistic frictional condition should be specified at the die/work piece interface [1]. Friction at contact interfaces contributes to the non-uniformity of deformation. Different coefficients of friction, however, have little effect on the forging loads during the process [2]. A frictional model is one of the key input boundary conditions in the simulation, controlling the accuracy of the output results [3-9]. The concept of frictional constraint was extended to many sheet forming processes, as bulk ones [10 and 11].

In this work, Experiments were carried out to generate data on cold compression of solid copper specimens having different height-to-diameter (Ho/Do) ratios between two flat dies having various degrees of surface condition (knurled, dry and lubricated) and between grooved dies having different groove numbers. Different Ho/Do ratios die surface conditions and number of grooved created different loading characteristics and also different modes of deformation.

### 2. EXPERIMENTAL WORK

High purity copper specimens having the following composition were used:

Sn	Pb	Zn	P	Mn
0.0008	0.0005	0.001	0.0003	0.0004
Fe	Mg	Cr	Al	Cu
0.0149	0.0002	0.001	0.0003	Bal.

Cylindrical specimens were prepared on the lathe- from an original bar having 1" (25.4 mm)

diameter- to a diameter of 22 mm (Do) and height-to-diameter (Ho/Do) ratios of 0.5, 0.75, 1.0, 1.25 and 1.5. Corresponding initial heights were 11, 16.5, 22, 27.5 and 33 mm respectively. Steel flat platens, 80 mm diameter, 60 mm height and 55 RC hardness, were prepared. Three die sets (each of 2 dies) were used to reflect the effect of three surface conditions: knurled/knurled, dry/dry and lubricated/lubricated. Other three sets of platens were prepared to investigate the effect of the presence of grooves (one, two and three grooves) on the loading characteristics and the flow behavior. Die geometries are presented in Fig. 1. Special fixture was used to ensure coaxiality of dies and specimens on the machine. A computer-controlled Zwick/Roell universal testing machine, maximum load of 1000 KN and maximum displacement of 100 mm, was used for the compression experiments. Cross head speed was 5 mm/min. Grease was used as a lubricant in lubricated experiments. Dimension measurements were carried out by a Vernier caliper, 0.01 mm accuracy and hardness measurements were taken in a Vicker's hardness tester.

Experimental program was as follows: first, specimens were compressed between 2 flat platens with 5 different Ho/Do ratios in 3 different surface conditions. 3 sets were tried for each case. Second, specimens were compressed between grooved dies with different Ho/Do ratios. 3 sets of specimens were tried for each case. The mean value of the results of the three specimens was taken. Compression was carried out at room temperature till 50% height reduction of each specimen. i.e., 0.69 natural strain.

### 3. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSIONS

#### 3.1. Compression between flat dies with different surface conditions (2-knurled, 2-dry, 1-dry and 1-lubricated and 2-lubricated)

##### 3.1.1. Compressed specimen

Samples of the formed specimens compressed between flat dies having different surface conditions and different Ho/Do ratios. Up to 50 % height reduction (natural strain of 0.69), no surface cracks were obtained. Outer surface had the bulged contour, the typical form in compression between flat dies. The dimensions of the bulged surface were different according to the surface condition of the dies



### 3.1.2. Load / displacement curves.

Fig. 2 shows sample load/displacement curves for compressed copper specimens. Load is increased as displacement increases due to strain hardening. But the slope of the second stage of the curve (after yielding) is changed with Ho/Do ratio. As this ratio increases, it is noticed that the slope of the curve decreases. The first stage is almost the same for all specimens. At the same displacement, the load is decreased as Ho/Do increases. This is due to the increase of strain value in (hf/ho) when Ho/Do decreases. It is clear that the Ho/Do ratio affects the slope of the second stage, but this effect is different for various die surface conditions. In general, Load values proved to decrease as the surface condition improves (2-knurled) condition improves (2-knurled) condition is the highest and 2- lubricated condition is the lowest value.

### 3.1.3. Comparison of displacement level at fixed load

A comparison of displacement achieved a fixed load level of 216 KN for different Ho/Do ratios were made and the results are presented in Fig. 3. Level of displacement is shown to be increased as Ho/Do ratio increases. Such level of displacement at 216 KN is decreased as the axial strain increases; the trend is similar to that for a fixed displacement level, shown in Fig. 4.

### 3.1.4- Dimensions of the compressed specimens

Figs. 5, 6, 7, and 8 show samples of the change in the specimen dimensions illustrated in the accompanied specimen geometry. For the different specimen groups and Ho/Do ratios. Generally, as Ho/Do ratio increases, it is clear that the specimen dimensions increase for all conditions of die surface. The largest increase was recorded for the lubricated condition. This seems logic because lubrication decreases the coefficient of friction to the least value which allows easier deformation at the contact surfaces, leading to higher values of specimen dimensions.

Surface strains achieved in compressing between flat dies for different die surface. Generally, it is noticed that values increases as the lubrication improves (in the 2- lubricated dies). On the other hand, such values decreases as the surface between more rough (2-knurled) dies recorded the least values followed by 2- dry). Also Ho/Do ratio affected the strain values. As this ratio increases the values of strains tend to.

## 3.2. Compression between grooved dies: Two - directional extrusion

### 3.2.1 Photos of the formed specimens.

Fig. 9 shows photos of formed specimens by compressing between grooved dies. All these experiments were carried out without lubrication. No surface cracks were obtained up to 50 % height reduction. In this process, the flow is different (in nature) from the case of compressing between 2 flat dies. In the first case, the flow of material is in the radial and circumferential directions (direction  $r, \theta$ ) as a result of compressing (height reduction) in the axial one-groove die specimen, Fig. (9A) the geometry is the typical bulged specimen, similar to the specimen compressed between the 2- flat dies. This may be because the amount of forward and backward extrusion is very small. As this amount increases, the deformation mode is different. Two parts (up and down) from, giving bulge contours. The bulge contour is also present the volume consumed in the backward and forward extrusion causes this (separation) of the free volumes up and down the specimen. If this volume increases, the metal is withdrawn from the middle causing a largest diameter values lie up and down contacting the die.

### 3.2.2 Load/ displacement curves

Fig. 10A, shows sample load/displacement curves of compressing copper specimens having different Ho/Do ratios between one-grooved dies. The curves are similar to these for compression between 2 flat platens but load values here are less than these for knurled dies. In the last Case, friction forces are high due to rough surfaces resulted from knurling marks. Ho/Do ratios affected the slope of the second stage of deformation. As such ratio increased, the slope became smaller. At certain displacement, the load is decreased. This is clear in Fig.10 load/displacement curves for copper specimens compressed between (one grooves) two dies, at which all the five specimen curves are gathered. Fig. 10 B, C, give the gathered curves for the two types. It can be observed that the curves are closer to these in Fig. 14A. The reason for that is the similarity in flow behavior, but the values of load are different becomes two metal regions are formed (up and down). But the nature of metal flow is the same in the three regions: bulging occurs in the middle.

The reason for bulge forming is the friction in the sided (up and down) and also the formation of a material sides for the central region. In Fig. 10C, it can be noticed that the shapes of the curves are different. This is due to the metal withdrawn in the grooves, and this causes the central region to have minimum diameter than the up and down diameters. As before, Ho/Do ratio affected the curve shape. This may subject the specimen to a possibility of an internal crack in the middle of the specimen caused by the depression of the material in the flange (middle) region.

### 3.2.3. Effect of Ho/Do ratio on the load at fixed displacement and the displacement at fixed load and surface strains

A comparison was made to investigate the effect of the Ho/Do ratio on the load at fixed displacement level (5.1 mm), see Fig. 11. It was noticed that the load is increased as the ratio is decreased. At constant load level of 220 KN, the displacement increases as the ratio increases, Fig. 12. The effect is opposite to that for the load at fixed displacement. However the two effects are similar to those obtained in compression between two flat dies in spite of the difference in nature in the two cases.

## CONCLUSIONS

1- Friction condition at the specimen /die interface affected the load, shape, and mode of flow. The height to diameter (Ho/Do) ratio also had the some effect.

2- For similar (Ho/Do) ratio, surface condition prove to affect the load values, which was lowered as the condition is improved.

3- At constant displacement, the load level is decreased as the (Ho/Do) ratio increase. At the contrary, for a fixed load, the displacement a chived increased as the (Ho/Do) ratio increases. Surface strains were affected by the (Ho/Do) level and surface conditions.

4- In compression between grooved specimens the number of grooves and (Ho/Do) ratio proved to affect the load, shape and mode of flow.

The same trends for load at fixed displacement level and displacement at fixed load level were obtained similar to compression between 2 flat dies.

## REFERENCES

[1], S. H. Zhang, Z. R. Wang, Z. T. Tang , Y. Xu and K. B. Chen, " Some new features in the development of metal forming technology", Journal of Materials Processing

Technology, Vol. 151, issues 1-3, September 2004, pp 39-47.

[2], C. C. Huang and J. H. , “Forging simulation of Sintered Powder Compacts under various frictional conditions”, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 44, issue 3, March 2002, pp 489-507

[3], Xincal Tan, “Comparison of Friction models in Bulk Metal Forming”, Tribology International, vol. 35, issue 6, June 2002, pp 385-393

[4], D. R. Hayhurst and M. W. Chan, “Determination of friction models for Metallic die/workpiece interfaces”, International Journal of Mechanical Sciences, vol. 47, issue 1, January 2005, pp 1-25

[5], K. Manisekar and R. Narayanasamy, “Effect of friction on barrelling in square and rectangular billets of Aluminum during cold upset forging” , Materials and Design, vol. 28, issue 2, 2007, pp 592-598

[6], Ming-Chang Wu and Wei-Ching Yeh, “Effect of natural boundary conditions on the upper bound analysis of upset forging of rings and disks” , Materials and Design, vol. 28, issue 4, 2007, pp 1245-1256

[7], M. Gariety, G. Ngaile and T. Altan, “Evaluation of new cold forging lubricants without zinc phosphate precoat” , International Journal of Machine Tool and Manufacture, vol. 47, issue 3-4, March 2007, pp 673-681

[8], H. Darendeller , M. Akkok and C Ali, “Effect of variable friction coefficient on sheet metal drawing” , Tribology International, vol. 35, issue 2, February 2002, pp 97-104

[9], M. Gierznska-Dolna and P. Lacki, “ Some aspects of Modelling of metal forming processes”, Computers and Structures, vol. 81, issues 8-11, May 2003, pp 605-613

[10], A. G. Mamalis, “Mathematical modelling of plastic deformation process of bimetallic tubes with porous internal layer in conical dies”

, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 172, issue 2, 28 February 2006, pp 243 -248.

[11], J. M. Allwood and H. Utsunomiya, “ A survey of flexible forming processes in Japan” , International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 46, December 2006, issue 15, pp 1939- 1960

**Authors: Mohiudeen Abdel-Rahman**, Professor, Production Eng. And Design Dept., Faculty of Engineering, Minia University, Minia, EGYPT, 61111, E-mail: drmohe@yahoo.com

**Bashir Raddad**, Assistant Professor, Mech. and Industrial Engineering Dept., Faculty of Engineering, El- Fateh University, Tripoli, Libya, E-mail: b\_raddad2001@yahoo.com

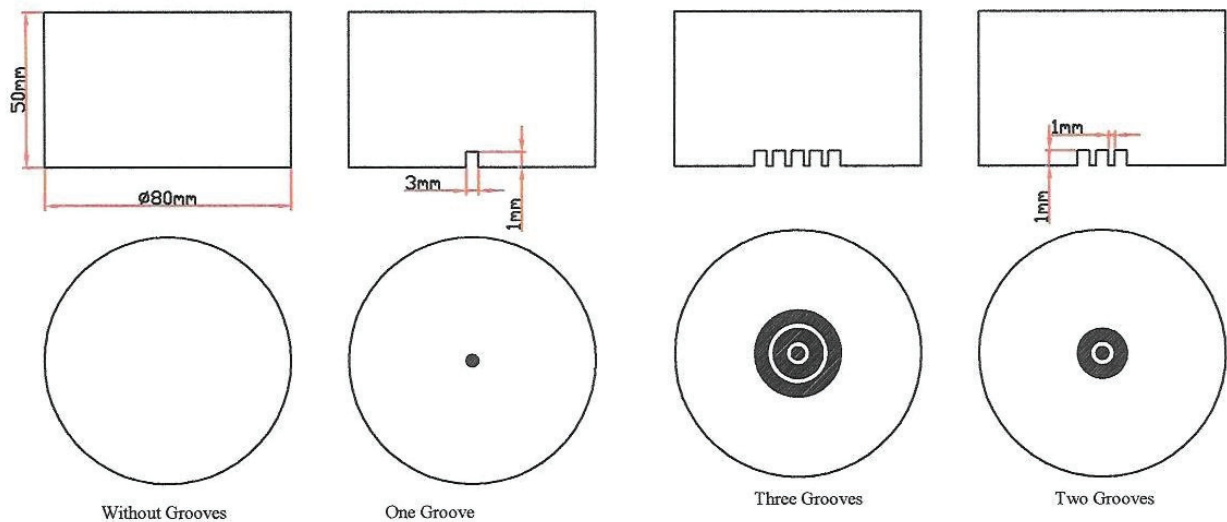
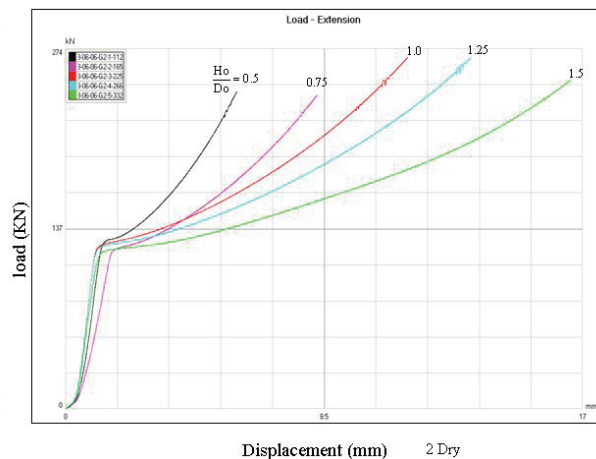
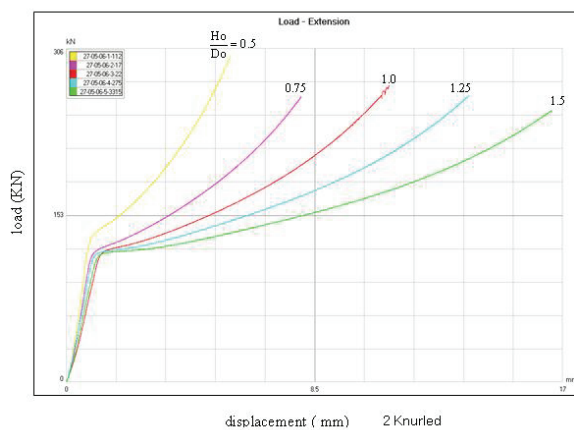
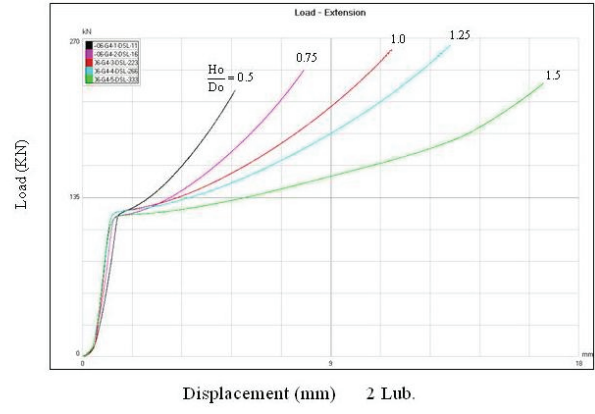
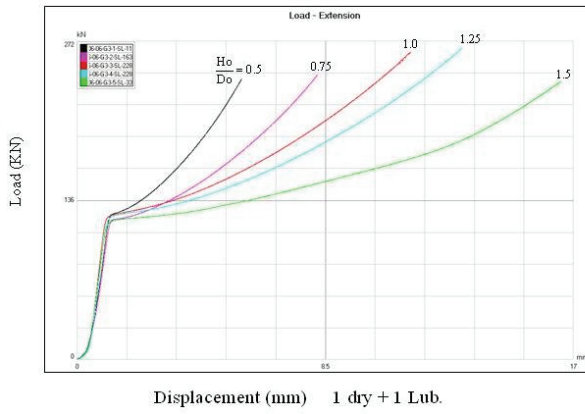


Fig.1, Die geometries







Displacement (mm) 1 dry + 1 Lub.

Displacement (mm) 2 Lub.

Fig.2, Samples Load/Displacement curves for compressed copper specimens

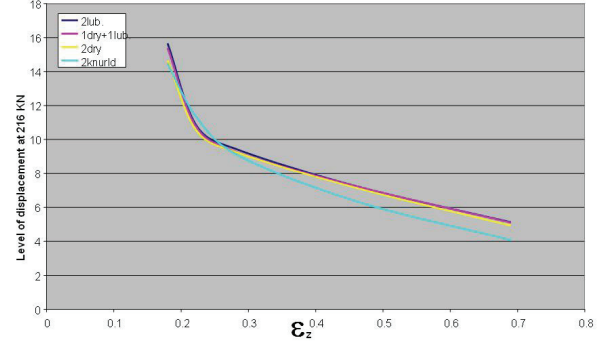
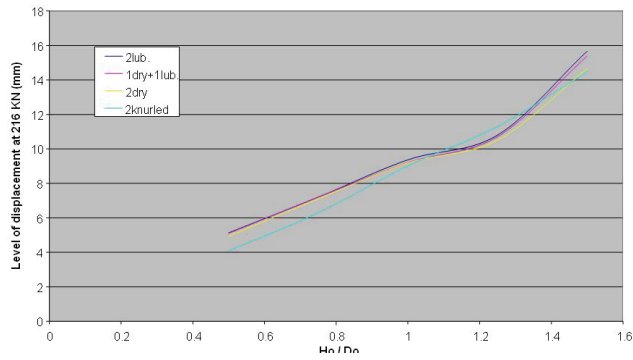


Fig.3, Comparison of level of displacement achieved at constant load level (216 kN) for different (Ho / Do) ratio

Fig 4, Comparison of  $\epsilon_z$  and load for different (Ho / Do) ratio at 216 kN load

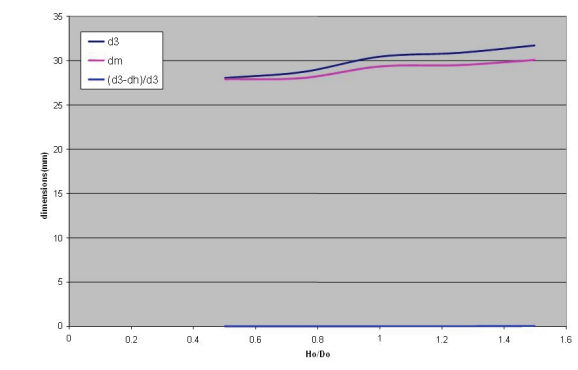
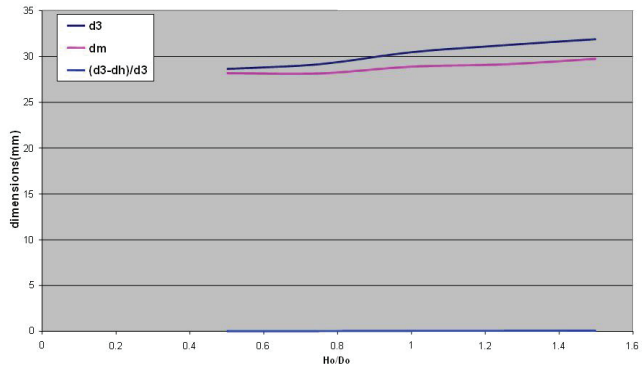


Fig.5, Effect of (Ho/Do) on deformed specimens dimensions (d3, dm, (d3-dh)/d3) in compressed between (2Knurled) dies.

Fig.6, Effect of (Ho/Do) on deformed specimens dimensions (d3, dm, (d3-dh)/d3) in compressed between (2dry) dies.

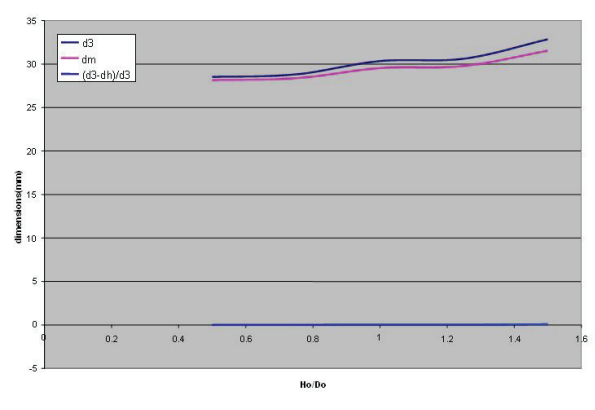
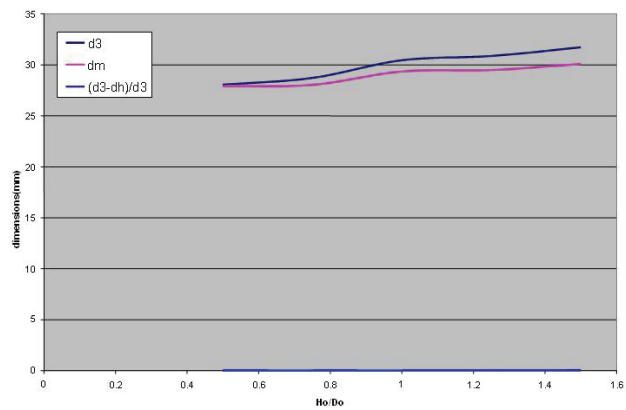


Fig.7, Effect of (Ho/Do) on deformed specimens dimensions (d3, dm, (d3-dh)/d3) in compressed between (1dry and 1lub.) dies.

Fig.8, Effect of (Ho/Do) on deformed specimens dimensions (d3, dm, (d3-dh)/d3) in compressed between (2lubricated) dies



Fig.9, Photo of deformed specimens

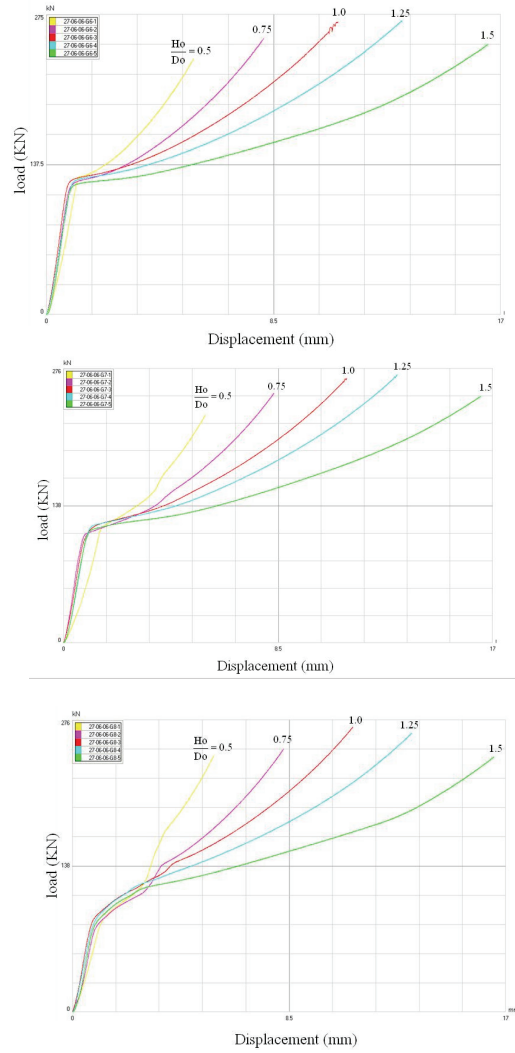
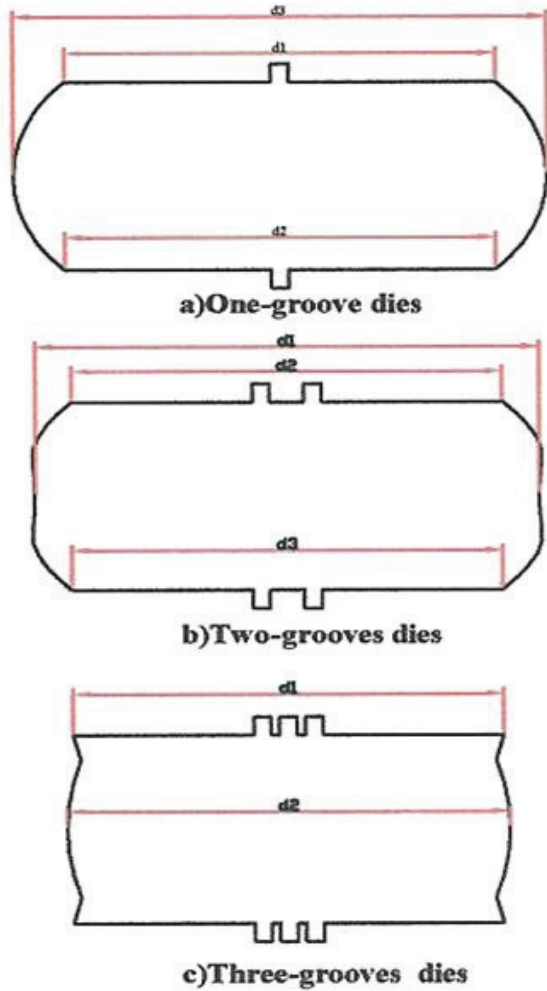


Fig. 10, load/displacement curves for copper specimens compressed between;  
(a) (One grooves) two dies. (b) (Two grooves) two dies. (c) (Three grooves) two dies.

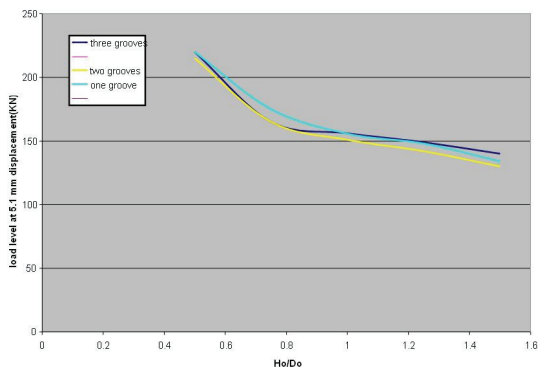


Fig. 11, Comparison of load at 5.1 mm displacement for different (Ho/Do) ratios.

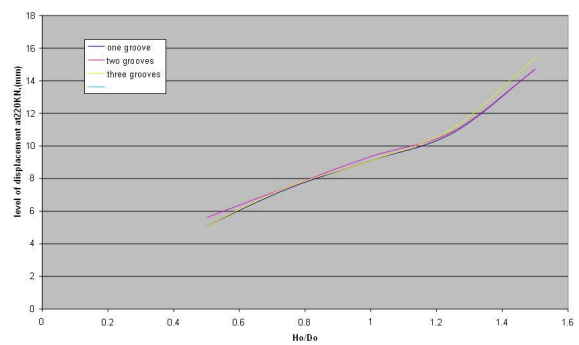


Fig.12, Comparison of level of displacement achieved at constant load level (220kN) for different (Ho/Do) ratios.





Mohieldeen Abdel-Rahman, Bashir Raddad

## EXPANDING OF HOLES IN 0.08% C STEEL SHEETS USED FOR WATER HEATERS USING A HEMISPHERICAL PUNCH

### ABSTRACT

*Steel sheets have an increasing importance in many industrial applications. Besides bending, stretch forming and deep drawing, the hole expansion process is of considerable importance. In this work, expanding of holes in 0.08% C steel sheet specimens is investigated. Expansion of solid sheet specimens was carried out using the Erickson test and hemispherical punch on a compression testing machine. Specimens having holes in the middle were prepared and expanded on both the two tests. Results showed that the diameter of hole and punch affected the hole expansion ratio. The limiting expansion ratio, LER, was also affected by these two parameters. Incremental loading affected the LER and the thickness strain at the deformed sheet. Using the approximate equations gave good lip dimension results compared to the obtained experimental results with an accuracy of 15% and 10% for the height and the final thickness respectively.*

**Keywords:** Expanding of holes- steel sheets- Erickson test- hemispherical punch

### 1. INTRODUCTION

If a hole smaller than the punch diameter is first pierced in the sheet, the punch can be pushed through the sheet to raise a lip, Fig. 1 [1]. The edge of the hole will be stretched and splitting will limit the height of the lip. Hole expanded products are to provide additional support for press fits for bolts, providing greater area for soldering in connection with tubes, sub-assembly parts in which machining is difficult due to small thickness. Applications also include high strength connections, threads in thin wall tubing, threaded pushes, supports for brazing bearing fittings.

Applications may extend to connections in construction and building, toy parts, lighting industry, bicycles and steel furniture. During the hole expansion process, the sheet metal is bent twice: once around the punch radius and again around the die radius. The greatest strains are in the periphery of the expanded hole. This means that the major deformation increases the diameter of the initial hole while the wall thickness is being reduced. However, the tensile stress in the circumferential direction at the edge of the flanged hole is the main cause of the failures (cracking or tearing). In their work, Huang and Chien [2] proposed deformed geometrical configurations of a holed blank. As it is well-known, In the case of stretching, both circumferential and axial stresses are positive. Stress state differs from uni axial tension at the hole edge to equi-biaxial tension on the circumference. The circumferential stress is almost constant. In a blank with a smaller initial hole than the limiting forming ratio (LFR), hole will result in fractures along the periphery of the expanded hole. As the punch is displaced local thinning begins due to extension. The phenomenon of the blank being bent over the die

corner (profile) occurs and subsequent deformation acts primarily to increase the hole diameter as a stretching process. Therefore the greatest strain occurs along the periphery of the expanded hole. Approximate equations of the lip height and thickness, Fig. 2, can be given as [1]:

$$h = R + t - r_c + 2 r_d - p/4(r_c + t/2) \quad (1)$$

$$\text{and} \quad t_e = t_0 (r_c/R)^{1/2} \quad (2)$$

Many sheet forming operations can be modeled as the deformation of circular (axi-symmetric) shells. Examples are: stretching a sheet over a domed punch, drawing a circular disc to form a cylindrical cup and tube forming processes such as flaring and necking. In spite of the simplifying assumptions, the analysis gives fairly good results. From approximate analytical model, useful information about forming loads and strains can be obtained.

Many of sheet forming processes are complex [3]. In fact, all consist of combinations (or sequences) of the basic operations: bending, stretching, deep drawing and coining [4]. Deep drawing of square cups for example requires drawing in the corners, biaxial stretching in the dome, bending, straightening, plane strain stretching in the wall and bending and plane strain stretching at the top and wall bottoms [3]. The major problems encountered in sheet forming are fracturing, buckling and wrinkling, shape distortion, loose metal and undesirable surface textures. The occurrence of any one or a combination of these conditions can render the sheet metal part un-usable. Most current formability tests are concerned with fracturing in stretching operation [3- and 5].

There are two basic types of tests: intrinsic and simulative. The first type of tests measures the basic characteristic properties of materials related to their formability. The second type subjects the material to deformation that closely resembles the deformation occurring in a particular forming operation. Simulative tests provide limited and specific information that is usually sensitive to thickness, surface conditions, lubrication and geometry and type of loading. Such information relates to only one type of forming operations [6]. Many such type tests e.g., Olsen and Swift cup test have been extensively used for many years with good correlation to production in specific cases. Quantitative correlation between the results of the simulative tests and selective tensile properties have been determined for many tests, the best correlation was proved to be for the Olsen cup test, reaching 0.925. In the Olsen and Erickson test, stretch forming is simulated by pressing a ball-punch penetrator into a metal sheet clamped over a cup. The end point of the test is indicated by a drop in load indicating necking in the specimen. Maximum cup height is measured when necking occurs. It is worth to say that getting a lip without fracture will depend on the expansion ratio added to the punch geometry and friction conditions. In some cases, especially when the hole diameter is small the expansion process may not exist. Fracture occurs in the wall region. If the expansion ratio is lowered, the lip is formed but it may be split. Reaching the limiting expansion ratio (LER) depends on the nature of the hole edge. Shearing of the edge is the major defect. Good finish, however, may lead to enlarge the LER. **Fig. 3** gives the typical fracture types. Other tests are found giving many degrees of accuracy [7-9]. In this work, expanding of holes in 0.08% C steel sheet specimens is investigated using the Erickson testing machine and hemispherical punch on a compression testing machine. Solid specimens and specimens having holes in the middle were investigated in the hole expansion process

## 2. EXPERIMENTAL WORK

0.08%C steel sheet specimens, supplied from the Libyan-Water Heaters Manufacturing Plant, Tajouraa, Tripoli, Libya, were used as work material. Specimens having outer diameter of 69 mm and initial thickness of 0.6 mm were prepared. The holed specimens were prepared so that holes in the center of the circular specimens having holes of 8, 10, 12, 14, 16 and 18 mm can be obtained. Dies with opening having diameters of 12, 20 and 28 mm were prepared. Hemispherical punches with 10, 12, 14, 16, 18, 20 and 21 mm were prepared. **Figs. 4 and 5** show the geometry of specimens and dies. Blanks were prepared according the specified dimensions and an initial hole was machined at the center using a CNC lathe. Die set assembled and put on the hydraulic testing machine (press), 500 kN capacity, 5mm/min cross head speed. Blanks were carefully centered. Load extension curves were obtained directly from the machine. A digital vernier having an accuracy of 0.01 mm was used to measure the dimensions. The limiting forming ratio is

determined by the punch diameter divided by the hole diameter at the case beginning of fracture.

Two machines were used: the Erickson testing machine and the hydraulic press. For the Erickson machine, the ball diameter was 20 mm and die diameter was 28 mm. Holding load was about 998 kg. When testing with a punch on the hydraulic press, no hold down was applied.

## 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

### 3.1. Solid specimens

#### 3.1.1. Forming with a punch

Typical load/displacement curves in forming solid specimens with a punch having different diameters (10, 12, 14, 16 and 18 mm) and die diameter 20 mm are shown in **Fig. 6 (a)**. It can be observed that as the punch diameter increases, this leads to an increase in the forming load. This is referred to the increase in the contact area between the punch and the workpiece. This leads to an increase in the friction force. Also, the displaced volume is increased as the punch diameter increases. Thinning strain was calculated from the measured dimensions at every loading step using a digital thickness measuring device and the results are given in **Fig. 6(b)**. Thinning increases with displacement due to the advance in the deformation process. An increase in the circumferential stress in this case leads to a decrease in the thickness. Such thinning also increases as the punch diameter increases. The path ABC in **Fig. 2** would be smaller for smaller punch diameter. Also the final arc ABC would be smaller. This leads to less thinning because the material would move to a close point in this case displacing less volume, which means less thinning. **Fig. 7** shows photos of beginning and propagation of fractures in forming with a 10 mm diameter punch and 20 mm diameter die. Beginnings of fracture could be detected with necked eye at 5 mm displacement and a typical corner fracture can be observed. **Figs. 8, 9, 10 and 11** show the beginning and propagation of fractures in forming with punch diameters 12, 14, 16 and 18 mm respectively in a 20 mm diameter die. Values of displacement at which fracture begins were close for different punch diameters and no clear trend was present.

#### 3.1.2. Forming on Erickson testing machine

Forming load was increased when using the Erickson test and this is referred to the hold down force (estimated as 998 kg) encountered in this test. In forming of solid test specimen with punch, no holding was applied. Also when using the Erickson testing machine, the thinning strain was increased. Also, displacement at which fracture begins proved to increase due to the hold down. **Figs. 12 and 13** show the typical fractures in forming with the Erickson testing machine.

In a trial to investigate the effect of die diameter, two experiments were carried out, fixing the punch diameter at 10 mm and varying the die diameter as 12 and 20 mm. Load/displacement curves and thickness strain are given in **Fig. 14**. As the die diameter decreases, the required forming load is increased. This



may be due to the increase in the friction force when the difference between the punch and die diameters is small. Thinning at fracture also increases as die diameter decreases due to the severity of deformation. Photos of the fractures are given in **Fig. 15**.

### **3.2. Specimens with centered holes**

#### **3.2.1. Erickson Testing**

A preliminary experiment of gradual loading on Erickson testing machine using standard 20 mm diameter ball and 28 mm diameter die. The specimen hole diameter was 8 mm. The edge length was measured at every step of deformation and presented vs. the forming load at **Fig. 16**. The load required to form the holed specimen is almost about 0.5 of that required to form the solid specimen. This is due to the less volume displaced in the present case. **Fig. 17** shows the last three specimens showing the initiation (recorded at 5.7 mm displacement) and propagation of lip fractures. Typical lip fracture (splitting) can be observed.

**Fig 18** shows the load vs the edge length in forming of holed specimens on Erickson testing machine using different hole diameters of 8, 10, 12, 14, 16 and 18 mm. The load values are decreased as the hole diameter increased, this is due to the less material volume to be displaced and also due to less friction forces from contact. One specimen only showed split fracture at the lip edge. This was with the hole diameter of 8 mm, giving a limiting expansion ratio (LER) of 2.5 (since the Erickson ball size is 20 mm). Beginning and propagation of fracture were at 7.65 and 8 mm lip height respectively.

#### **3.2.2. Forming with Punch**

Development of load with lip (edge length) when forming holed specimens (8, 10, 12 and 14) with punches 10 and 12 mm diameters in a 20 mm die is shown in **Figs. 19 and 20** respectively. It can be shown that increasing the hole diameter leads to a decrease in the forming load. All the specimens were safe till the forming ration of 2.25 and no fracture initiations were observed at the lip edges.

**Figs. 21** shows the development of load with the edge length when forming holed specimens of 8 and ,10 mm respectively with punches (10, 12,14,16,18 and 20 mm). One specimen was fractured giving LER of 2.5 while the other specimens were safe. Increasing the hole diameter leads to an increase in the forming load. At the same edge length, the load was less compared to that achieved in die of 20 mm diameter. Compared to Erickson, the load values are less in the present case. **Fig. 22** shows the typical lip fractures in forming with punch 20 and die 28mm. As the punch diameter is increased, rapid fracture could result. A typical fracture when enlarging with 21 mm punch is shown in **Fig. 23**.

## **CONCLUSIONS**

1-Hole expansion process can be utilized to extrude a push through a pre-pierced hole from the displaced material volume. Push length can be many times of the initial material thickness without failure in the lip edge.

2-In investigation of forming solid specimens with a punch, an increase in the forming load and thinning were detected as the punch diameter increases.

3-For holed specimens, in forming with both punch and Erickson tester, increasing the hole diameter has led to a decrease in the forming load. All the specimens were safe till the forming ratio of 2.25 and no fracture initiations were observed at the lip edges. The LFR was 2.5 and typical lip fracture was obtained. The load required to form the holed specimen is almost about 0.5 of that required to form the solid specimen.

4-Results showed that the diameter of hole and punch affected the hole expansion ratio. The limiting expansion ratio, LER, was also affected by these two parameters. Incremental loading affected the LER and the thickness strain at the deformed sheet.

## **REFERENCES**

- [1] Z. Marciniak, J. L. Duncan and S. J. Hu. *Mechanics of Sheet Metal Forming*, 2<sup>nd</sup> edition, Butterworth Heinemann, Oxford, 2002
- [2] Y. M. Huang and K. H. Chien, The formability limitations of the hole flanging process, *Journal of Materials Processing Technology*, 117, (2001), pp 43-51
- [3] *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, vol 2: Forming, 4<sup>th</sup> edition, SME, MI, 1984
- [4] T. Altan, S. I. Oh and H. Gegel, *Metal Forming Fundamentals and Applications*, ASM, 1983
- [5] L. Shuoben, and L. Chunfeng, "A Study on Deformation Mechanisms in the Curved forming", *Advanced Technology of Plasticity*, 1990, Proceedings of the 4<sup>th</sup> Int. Conf. on the Tech. of Plasticity, Beijing, China, September 5-9. 1993, Z. R. Wang and H. Yuxin (Eds.), Int Academic Publishers, 1993
- [6] R. H. Wagner, W. Wang and S. Sriram, "Development of OSU Formability Test and OSU Friction Test", *J. Mater. Process. Technol.*, 45 (1994), 13-18
- [7] S. S. Hecker, "Forming of Aluminum Alloy Sheets", *Transactions of the ASME, J. Eng. Mater. And Technol.*, Jan., 1975, pp 66-73
- [8] Y. Fukui and K. Nakanishi, "A Study on the Formability of Sheet Steel", *JSME Int. J.*, Series 1, vol. 32, No 1, 1989, pp 142-148
- [9] M. A. H. Mohamed, M. G. El-Sebaie and K. Yamaguchi, "An Improved Punch Friction Test in Sheet Metal Forming", *J. of the JSTP*, vol. 42, no. 480, (2001-1) pp 31-37

**Authors: Mohieldeen Abdel-Rahman**, Prod. Eng. and Design Dept., Faculty of Eng., Minia Univ., Minia, EGYPT, 61111, e-mail: [Drmohie@yahoo.com](mailto:Drmohie@yahoo.com) and **Bashir Raddad**, Mech. and Ind. Eng. Dep., Faculty of Eng., El-Fateh University, Tripoli, Libya, [B\\_raddad2001@yahoo.com](mailto:B_raddad2001@yahoo.com)

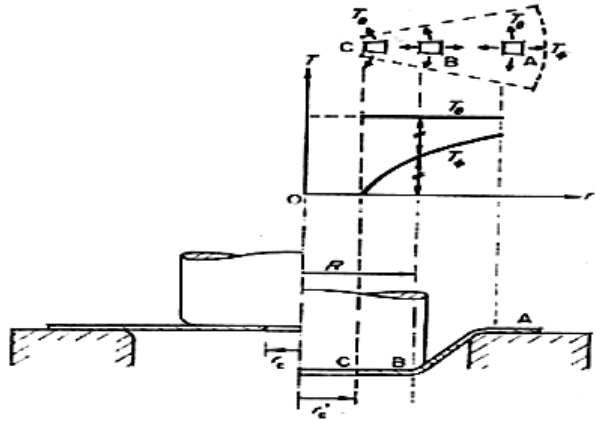


Fig. 1: The method of hole expansion

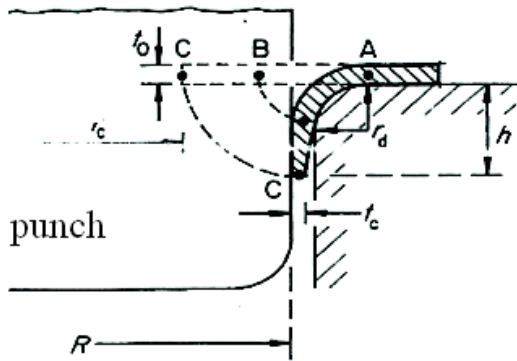


Fig. 2: Lip dimensions

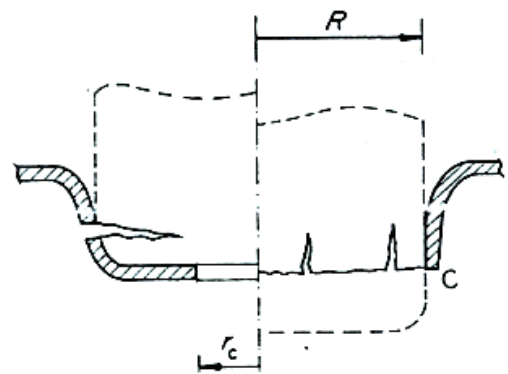


Fig. 3: Failure patterns

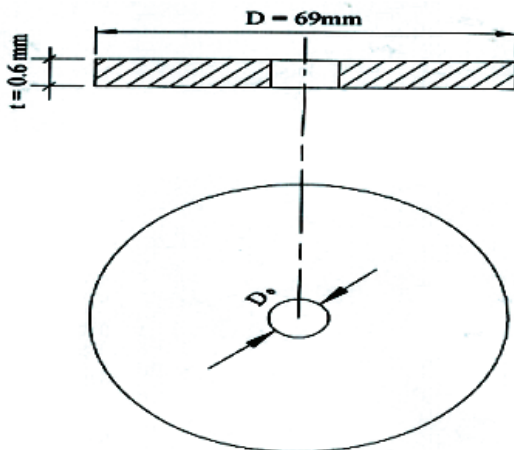


Fig. 4: specimen dimensions

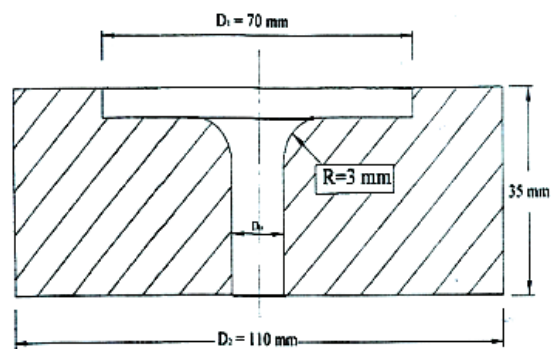
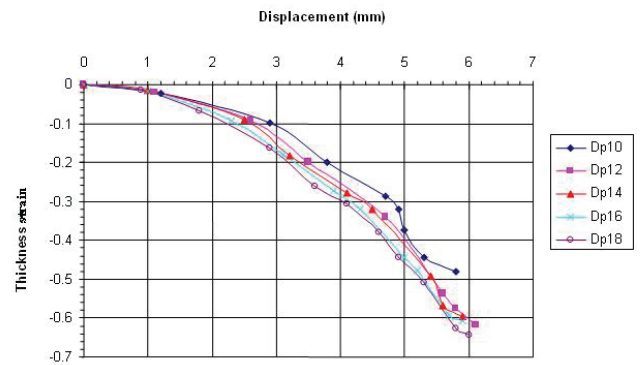
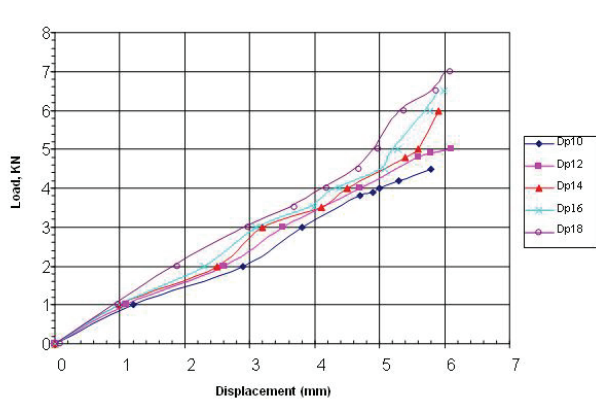


Fig. 5: die dimensions



(a)

(b)

**Fig 6: . Load/displacement curves (a) and thickness strain/displacement curves for 0.08%C steel solid specimens Die diameter 20 mm with different punch diameters (Dp) of 10 to 18 mm.**



**Fig. 7: Photos of beginning and propagation of fractures in forming with a 10 mm diameter punch and 20 mm diameter die**



**Fig. 8: Same as Fig. 7 but punch diameter 12**



**Fig. 9: Same as Fig. 7 but punch diameter 14**



**Fig. 10: Same as Fig. 7 but punch diameter 16**



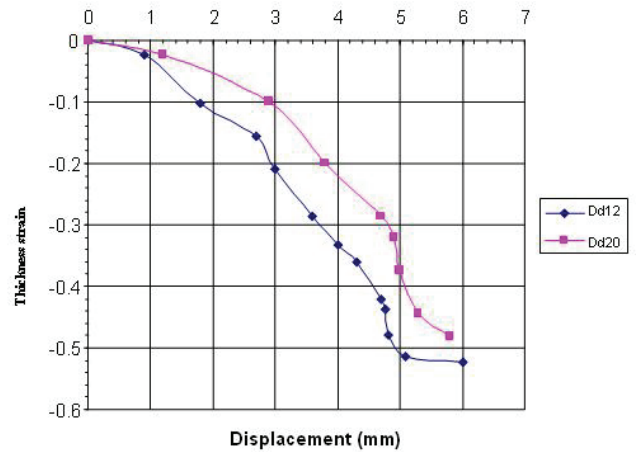
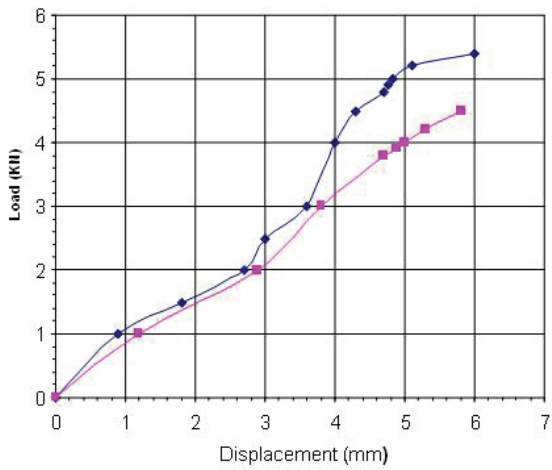
Fig. 11: Same as Fig. 7 but punch diameter 18



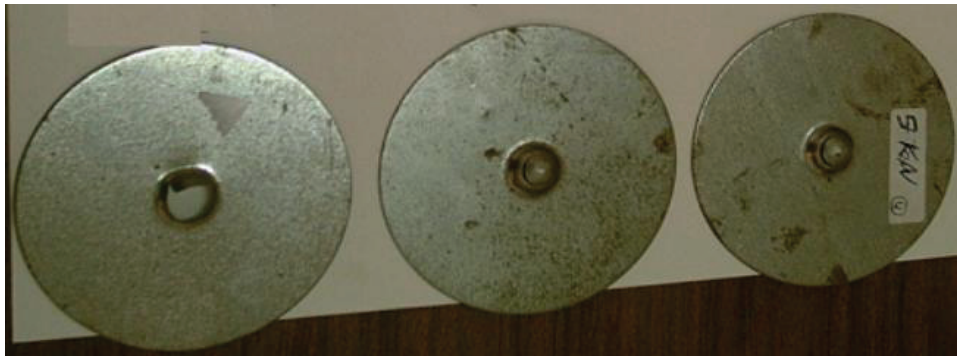
Fig 12: Fractures in Erickson test



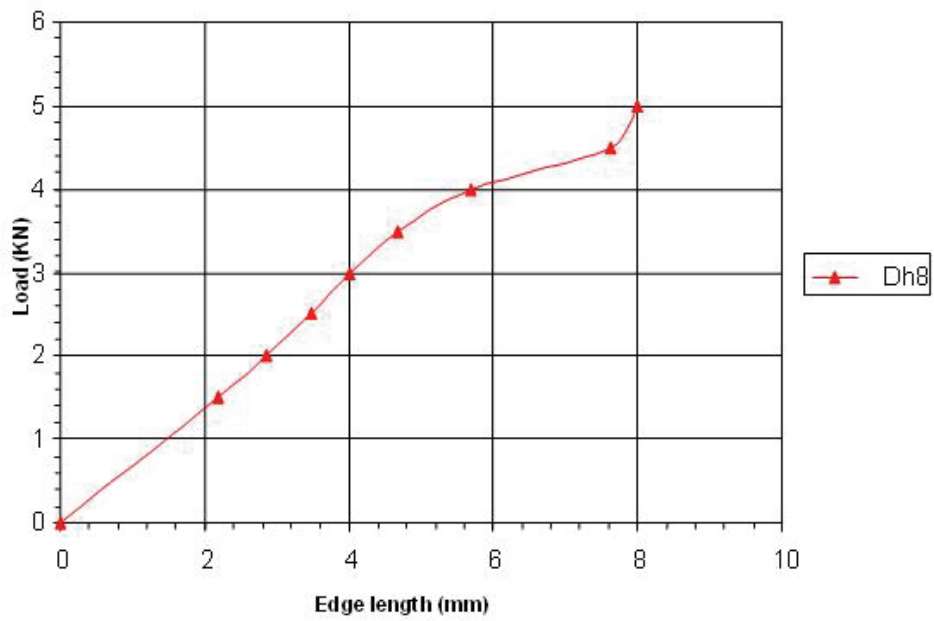
Fig. 13: Fractures on Erickson test



(a) (b)  
 Fig 14: Effect of die diameter on the load/displacement curves (a) and thickness strain/displacement (b) curves for 0.08%C steel solid specimens.  
 Die diameters (Dd) of 12 and 20 mm with punch diameter (Dp) of 10 mm



**Fig. 15: Typical fractures for the last 3 specimens**

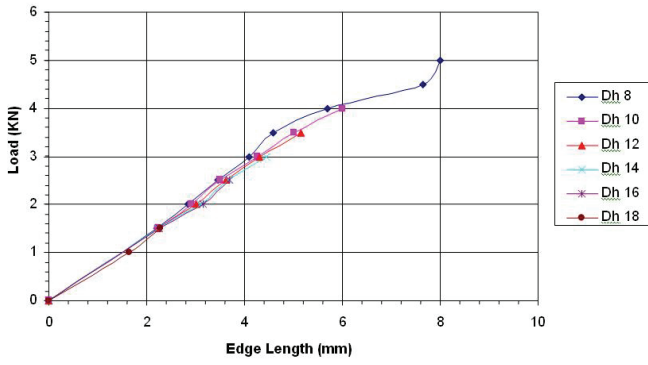


**Fig 16: Edge length/displacement curves (a) and thickness strain/displacement curves for 0.08%C steel hollow specimens, hole dia. 8 mm, on Erickson tester (Dball 20 and Ddie 28 mm)**

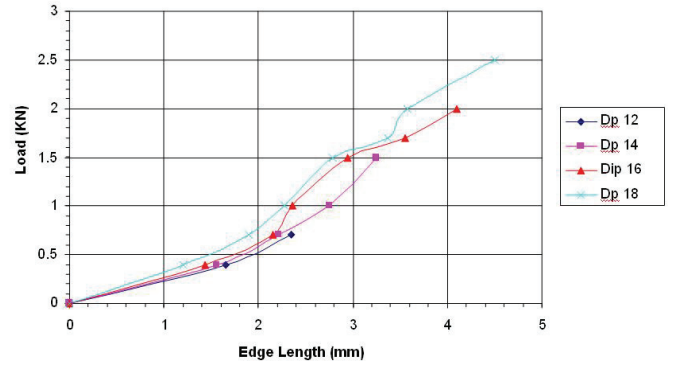


**Fig. 17: Typical fractures in the last 3 specimens**

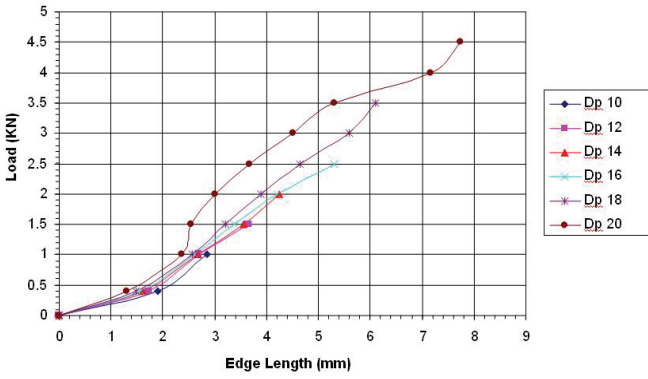




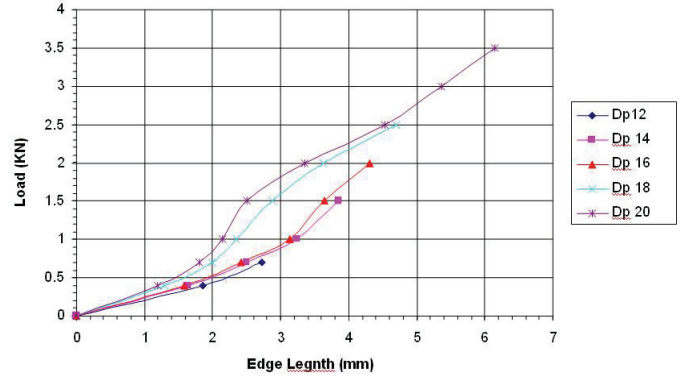
**Fig 18: Edge length/displacement curves (a) and thickness strain/displacement curves for 0.08%C steel hollow specimens, Erickson tester, hole diameters of 8 to 18 mm and Ddie of 20 mm**



**Fig 19: Edge length/displacement curves (a) and thickness strain/displacement curves for 0.08%C steel hollow specimens, hole dia. 10 mm, punch diameters of 12 to 18 mm and Ddie of 20 mm**



**Fig 20: Edge length/load curves for 0.08%C steel, hole dia. 8 mm, punch diameters of 10 to 20 mm and Ddie of 28 mm**



**Fig 21: Edge length/load curves for 0.08%C steel, hole dia. 10 mm, and punch diameters of 12 to 20 mm, die of 28 mm**



**Fig. 22: typical fractures, punch 20 and die 28**



**Fig. 23: enlarging with punch 21 mm**

Dr Svetislav Lj. MARKOVIĆ, profesor, Visoka škola tehničkih strukovnih studija,  
32000 Čačak, Svetog Save 65, Srbija, E-mail: svetom@nadlanu.com  
Prof. dr Danica JOSIFOVIĆ, E-mail: danaj@kg.ac.yu,  
Prof. dr Slobodan TANASIJEVIĆ, E-mail: irmes2004@kg.ac.yu,  
Prof. dr Svetislav JOVIČIĆ, E-mail: jsveta@kg.ac.yu Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet,  
Sestre Janjic 6, 34000 Kragujevac, Srbija,

## TEHNOLOŠKI ISPRAVNO OBLIKOVANJE DELOVA OD PLASTIČNIH MASA

**Rezime:** U okviru ovog rada istaknuta su pojedina pravila o kojima treba voditi računa prilikom oblikovanja delova od plastičnih masa. Prikazani su konkretni primeri dobrih i loših oblika delova od plastičnih masa, uz analizu njihovih osobina.

**Ključne reči:** oblikovanje, plastične mase, mašinski delovi, odlivci.

## TECHNOLOGICALLY CORRECT SHAPING OF THE PLASTIC PARTS

**Abstract:** This paper makes emphasis on some rules which should be taken into account during shaping parts made of plastic masses. The actual examples of good and bad shapes of the parts made of plastic masses have been shown and their characteristic analyzed. **Key words:** shaping, plastic masses, machinery parts, castings.

### 1. UVOD

Plastične mase predstavljaju materijale napravljene na bazi polimera. Među najznačajnije karakteristike plastičnih materijala spadaju:

- *Veoma mala gustina*, koja direktno utiče na manju težinu gotovih proizvoda, nižu cenu po jedinici zapremine, kao i na manje inercijalne sile prilikom pokretanja delova napravljenih od plastike.
- *Niže vrednosti pojedinih mehaničkih osobina u poređenju sa metalnim materijalima*. Ova osobina se može znatno poboljšati ojačavanjem plastičnih materijala staklenim ili nekim drugim vlaknima.
- *Izvanredne elektroizolacione osobine*, koje opravdavaju ogromnu primenu ovih materijala u elektroindustriji. Nedostatak polimera, u pogledu električnih osobina, je što se usled velikog površinskog otpora stvara elektrostatički elektricitet, koji utiče na skupljanje čestica prašine na površini polimera, prenošenje varnica...
- *Lošije termičke osobine u poređenju sa metalnim materijalima*. Plastični materijali imaju nisku maksimalnu temperaturu eksploatacije, nisku termopostojanost, malu toplotnu provodljivost.
- *Starenje plastičnih materijala*, što predstavlja fizičke i hemijske promene nastale na plastičnim masama u toku eksploatacije, prerade ili skladištenja.
- *Lakoća prerade, mogućnost štampanja, bojenja i drugih načina estetskog oblikovanja*, velike su prednosti plastičnih masa u poređenju sa drugim materijalima. U cilju poboljšanja određenih fizičkih i mehaničkih osobina, u plastične mase se ubacuju određene materije: kalcijum karbonat, silicijum dioksid, vlaknasti materijali... Ovako dobijeni materijali se nazivaju i *kompozitni materijali – kompoziti*.
- *Jednostavna reciklaža*, zahvaljujući kojoj se ovi materijali svrstavaju u ekološki povoljne.

S obzirom na širok opseg fizičko-hemijskih, mehaničkih i drugih osobina, plastični materijali su našli veoma široku primenu u savremenom mašinstvu.

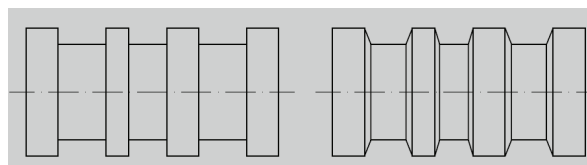
### 2. OBLIKOVANJE DELOVA OD PLASTIČNIH MASA

U fazi oblikovanja delova od plastičnih masa naročitu pažnju treba posvetiti:

- ♦ pravilnom oblikovanju konture dela (sa predviđanjem nagiba unutrašnjih i spoljnih površina),
- ♦ postizanju ravnomernosti debljine zidova,
- ♦ pravilnom rasporedu rebara,
- ♦ oblikovanju oslonih površina,
- ♦ definisanju oblika i dimenzija šupljina i otvora,
- ♦ zaobljenju ivica i prelaza,
- ♦ pravilnom izboru elemenata sa navojem, kao i elemenata sa armaturom i drugim karakteristikama delova.

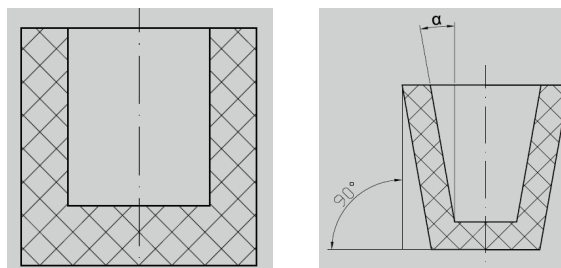
#### 2.1. Oblikovanje s obzirom na koničnost odlivka

Konfiguracija spoljašnje i unutrašnje konture treba da je takva da obezbedi mogućnost lakog vadenja (izbacivanja) odlivka iz alata. Pri tome je neophodno da bočne površine imaju odgovarajuće nagibe (koničnost), a radi karaktera skupljanja materijala nagibi unutrašnjih površina treba da su veći od nagiba spoljašnjih površina. Primeri lošeg i dobrog oblikovanja odlivka dati su na slikama 1 i 2.



Slika 1. Nepravilan (levo) i pravilan (desno) oblik odlivka

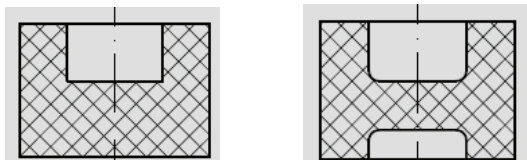
Ukoliko je moguće koničnost plastičnih odlivaka treba da bude najmanje 1°, odnosno 1,7%. Za male i niske odlivke koničnost može iznositi 0,2÷1%, a za velike odlivke i do 5%.



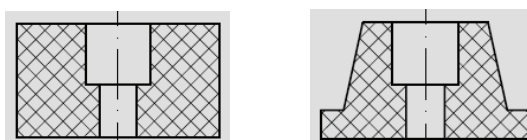
Slika 2. Nepravilan (levo) i pravilan (desno) oblik odlivka

## 2.2. Oblikovanje sa stanovišta debljine zidova

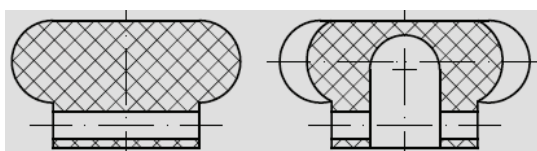
Debljina zidova treba da je što ravnomernija, pošto se na mestima zadebljanja javljaju defekti (poroznost i nehomogena struktura), a nejednakost debljine zidova dovodi do krivljenja odlivka. Krivljenju su najviše podvrgnuti pljosnati zidovi. Za sprečavanje krivljenja treba koristiti rebra za ojačanje ili zameniti ravne površine sferičnim. Na slikama 3÷8 dato je nekoliko primera netehnoloških i tehnoloških konstrukcija plastičnih delova s obzirom na ravnomernost debljine zidova odlivka.



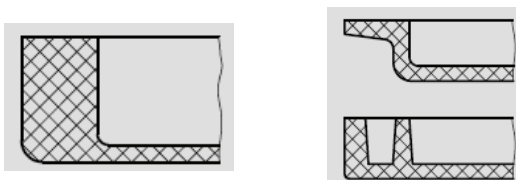
Slika 3. Netehnološki (levo) i tehnološki (desno) oblik odlivka s obzirom na debljinu zida



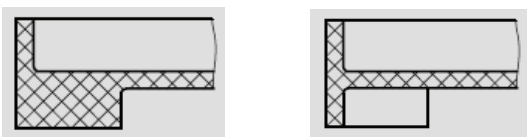
Slika 4. Netehnološki (levo) i tehnološki (desno) oblik odlivka sa stanovišta debljine zida



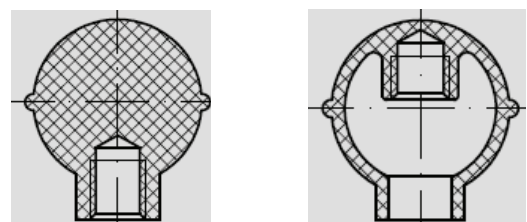
Slika 5. Netehnološki (levo) i tehnološki (desno) oblik odlivka sa aspekta debljine zida



Slika 6. Netehnološki (levo) i tehnološki (desno) oblik odlivka s obzirom na debljinu zida



Slika 7. Netehnološki (levo) i tehnološki (desno) oblik odlivka sa stanovišta debljine zida

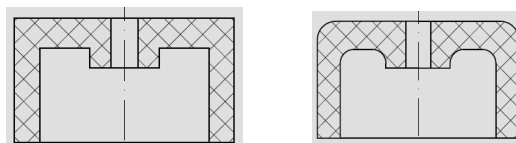


Slika 8. Netehnološki (levo) i tehnološki (desno) oblik odlivka sa aspekta debljine zida

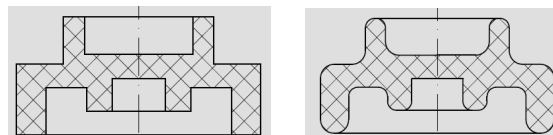
Debljine zidova zavise od gabaritnih dimenzija odlivaka: za delove veličine do 150 mm preporučljiva debljina zidova je 0,5÷2 mm, a kod plastičnih delova većih dimenzija zidovi treba da imaju debljinu 2÷3 mm.

## 2.3. Oblikovanje sa aspekta radijusa zaobljenja

Zaobljenja delova predviđaju se kod svih oštih ivica i na prelazima površina. Oštre ivice otežavaju izradu šupljina alata, ometaju tečenje materijala pri popunjavanju alata i snižavaju čvrstoću dela. Primeri loših i dobrih konstruktivnih rešenja po pitanju zaobljenja dati su na slikama 9 i 10.



Slika 9. Primer lošeg (levo) i dobrog (desno) oblika po pitanju zaobljenja



Slika 10. Primer lošeg (a) i dobrog (b) oblika sa stanovišta zaobljenja

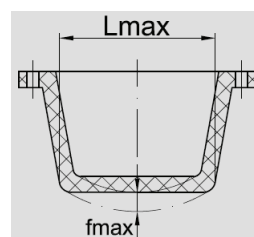
Preporučuju se najmanje veličine radijusa zaobljenja: za poliamidne mase 0,5÷1 mm, fenoplaste i amonoplaste 0,5÷1,5 mm, za polistirolne mase 1÷1,5 mm.

## 2.4. Oblikovanje plastičnih delova sa rebrima za ojačanje

Rebra kod delova od plastičnih masa znatno povećavaju čvrstoću i umanjuju pojavu deformisanja delova. Na slikama 11÷16 prikazani su primeri oblikovanja delova sa rebrima za ojačanje.

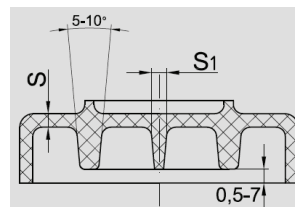
Kod delova bez rebara moguća je pojava ugiba dna, što je prikazano na slici 11. Ugib dna se računa po obrascu:

$$f_{\max} = 0,016 \cdot L_{\max} + 0,1.$$



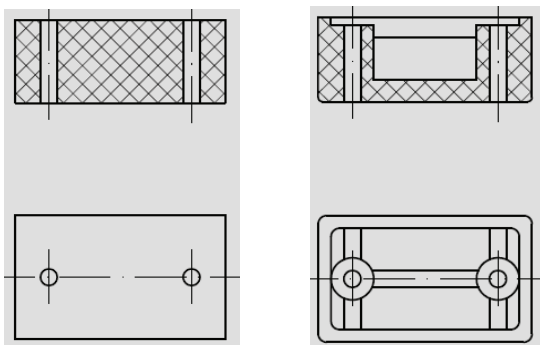
Slika 11. Primer oblika dela bez rebara kod koga može doći do pojave ugiba dna

Da bi se izbegla pojava savijanja dna, plastični delovi se oblikuju sa rebrima za ukrucenje. Ovakva rebra ne treba izvoditi do nivoa oslone površine (slika 12).

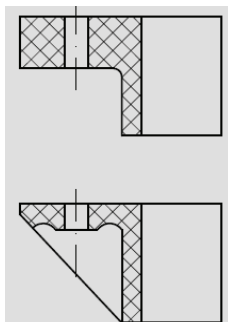


Slika 12. Oblik rebara za ukrucenje dna koja se ne izvode do nivoa oslone površine

Kada se želi preći na manju debljinu zida, kod delova sa velikom debljinom zidova, ili zadebljanjem, (slike 13-levo i 14-gore), oni se oblikuju sa rebrima, koja obezbeđuju dovoljnu čvrstoću (slike 13-desno i 14-dole).

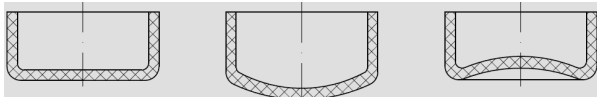


Slika 13. Oblik dela sa debelim zidom (neracionalan – levo) i sa rebrima za ukrućenje dna koja se ne izvode do nivoa oslone površine (racionalan – desno)



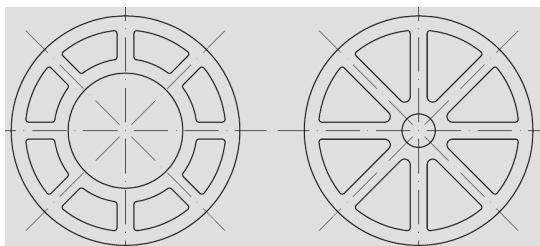
Slika 14. Oblik dela sa debelim zidom (gore) i sa rebrom za ukrućenje (dole)

Kod plastičnih delova manje veličine (slika 15-levo), umesto rebara oblikovanje se izvodi sa konkavnim (slika 15-desno) ili konveksnim dnom (slika 15-u sredini).



Slika 15. Oblici dna plastičnog dela: ravan (levo), konveksan (u sredini) i konkavan (desno)

Prilikom oblikovanja delova sa radijalnim rebrima (slika 16-levo), treba predvideti da rebra dosežu bliže osi dela čime bi se otežalo skupljanje materijala (slika 16-desno).

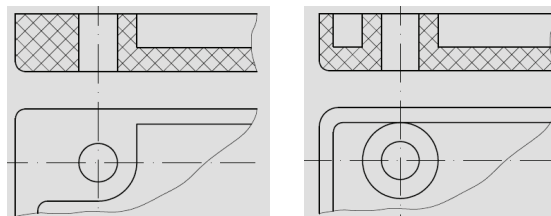


Slika 16. Oblici delova od plastične mase sa rebrima za ojačanje: neracionalno (levo) i racionalno (desno)

Rebra za ojačanje treba da imaju debljinu  $s_1$  približno jednaku debljini zida  $s$ , sa nagibom bočnih površina  $5 \div 10^\circ$ .

## 2.5. Oblikovanje plastičnih delova sa otvorima

Otvori kod delova od plastičnih masa izazivaju unutrašnja naprezanja usled ometanog skupljanja materijala na zidovima jezgra. Od položaja otvora zavisi njihova tačnost, kao i tačnost dimenzija gotovog dela. Prolazne otvore ne treba postavljati na zadebljanjima (slika 17-levo), već na mestima sa jednakom debljinom zida (slika 17-desno).



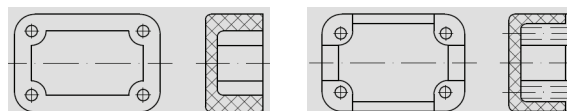
Slika 17. Primeri položaja otvora: nepreporučljivo (levo) i preporučeno (desno)

Otvori se mogu formirati na nekoliko načina, što zavisi od odnosa njihovog prečnika i dužine. Minimalni razmak između zidova dva susedna otvora zavisi od prečnika, i može se uzeti da je:  $b = (1/3 - 1/4) \cdot d$

Preporučuje se da odstojanje zida otvora od ivice dela iznosi  $2 \div 5$  mm.

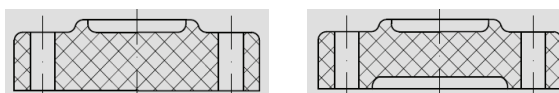
## 2.6. Oblikovanje oslonih površina plastičnih odlivaka

Pravilan izbor površina za oslanjanje dela znatno utiče na umanjeње pojave deformisanja, što je naročito važno kod delova oblika kućišta. Velike oslone površine treba izvoditi u vidu površina sa ispuštima, vencem i sličnim elementima. Na slikama 18÷22 dati su primeri izvođenja oslonih površina plastičnih delova. Pri spajanju zavrtnjima moguća je pojava unutrašnjih napona u odlivku i njegovo pucanje (slika 18-levo). Odlivke treba konstruisati tako da se oslanjaju samo na četiri ojačanja po uglovima, a mesta gde se oslanjaju moraju imati rubove iznad ojačanja (slika 18-desno).

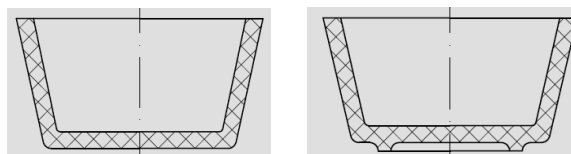


Slika 18. Oblikovanje oslonih površina: nepreporučljivo (levo) i preporučeno (desno)

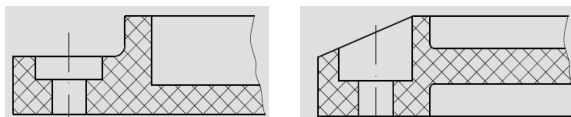
Na slikama 19÷22 prikazane su nepravilno (levo) i pravilno izvedene oslone površine delova (desno).



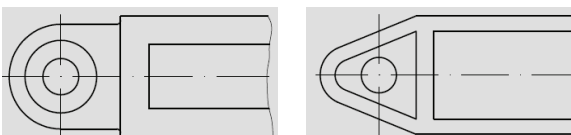
Slika 19. Oblikovanje oslonih površina: nepravilno (levo) i pravilno (desno)



Slika 20. Oblikovanje oslonih površina: nepravilno (levo) i pravilno (desno)



Slika 21. Oblikovanje oslonih površina: nepravilno (levo) i pravilno (desno)



Slika 22. Oblikovanje oslonih površina: nepravilno (levo) i pravilno (desno)



## 2.7. Oblikovanje površina plastičnih delova nareckivanjem

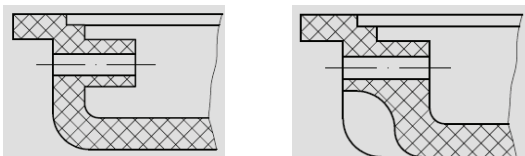
Nareckivanje se primenjuje za olakšano okretanje nekih predmeta (ručica, poluga i drugih). Izvodi se na spoljnim zidovima predmeta cilindričnih ili koničnih oblika. Nareckivanja se javljaju kao isturena rebra čije mere zavise od radijusa odlivka. Minimalna širina rebra treba da bude 0,6 mm dok visina ne treba da prelazi širinu. Presek rebra ima oblik polukruga, trougla ili trapeza. Oblik nareckivanih površina treba da bude u skladu sa ergonomskim zahtevima korisnika, jer su to površine koje su u direktnom kontaktu sa rukom.

## 2.8. Oblikovanje delova sa natpisima

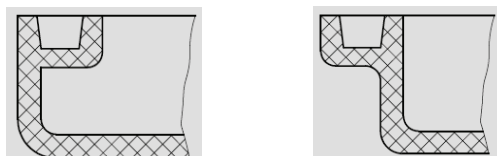
Natpisi na delovima od plastičnih masa mogu se dobiti livenjem ili graviranjem, ali treba dati prednost livenju radi estetike i jeftinije izrade. Po mogućnosti, natpisi na odlivcima treba da budu ispupčeni. Najmanja visina natpisa treba da bude  $0,3 \div 0,5$  mm. Na plastičnim delovima natpisi se mogu izraditi i štampanjem.

## 2.9. Oblikovanje otvora normalnih na osu šupljine odlivka

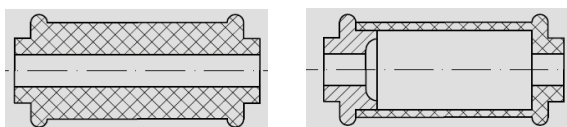
Pri oblikovanju delova od plastičnih masa treba izbegavati otvore normalne na ose šupljine odlivka. Ukoliko su, ipak, potrebni ovakvi otvori, onda takve delove razložiti na više elemenata, što je ilustrativno prikazano na slikama 23÷25. Na levim stranama ovih slika prikazana se nepravilna rešenja, a na desnim – pravilni oblici.



Slika 23. Oblikovanje otvora normalnih na osu šupljine odlivka: nepravilno (levo) i pravilno (desno)



Slika 24. Oblikovanje otvora normalnih na osu šupljine odlivka: nepravilno (levo) i pravilno (desno)



Slika 25. Oblikovanje otvora normalnih na osu šupljine odlivka: nepravilno (levo) i pravilno (desno)

## 2.10. Oblikovanje delova sa navojem

Kod delova od plastičnih masa navoji se mogu izraditi livenjem pod pritiskom, bez naknadne mehaničke obrade (dorade). Za ojačanje profila navoja treba predvideti upuste:

- na početku navoja:  $L = 0,2 \div 0,5$  mm i
- na završetku navoja:  $L_1 = 1$  mm .

Ovo su minimalne vrednosti. Dužina navoja treba da je za najmanje 1,5 mm veća od prečnika navoja. Ukoliko na delu postoji više navoja različitog prečnika, potrebno je da svi imaju isti korak radi istovremenog izvlačenja jezgra.

## 2.11. Oblikovanje plastičnih delova sa metalnim umecima

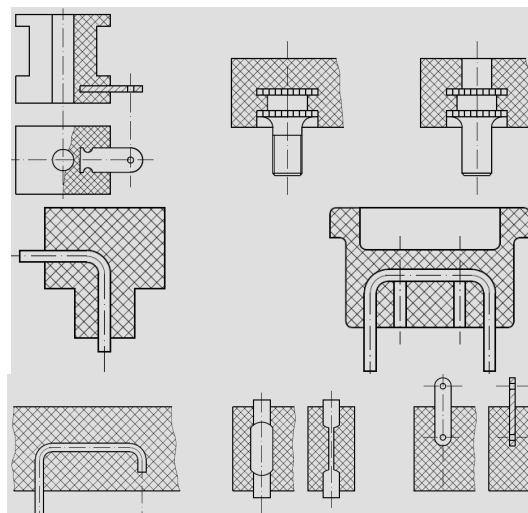
Delovi sa armaturom (metalnim umecima) znatno proširuju primenu delova od plastičnih masa. Primenom umetaka

obebeđuje se ravnomernija debljina zidova i olakšava montaža ovih delova. Za armiranje se primenjuju različiti materijali, kako metali tako i nemetali. Spajanje armature zasniiva se na različitosti toplotnog koeficijenta linearnog širenja plastične mase i materijala za armiranje. Postoje tri načina vezivanja armature za plastične mase:

- ♦ spajanjem armature odmah posle izvlačenja predmeta iz kalupa,
- ♦ neposrednim spajanjem za vreme livenja,
- ♦ vezivanjem, posle livenja, raznim lepilima.

Delovi armature, koji se ulivaju u plastičnu masu, narekavaju se po njihovoj spoljnoj površini ili izvode prstenasti kanali kružnog oblika.

Na slici 26 prikazano je osam varijanti umetaka: sa glavom ili vencem, savijenih, umetaka sa otvorima.



Slika 26. Načini učvršćivanja umetaka

## 3. ZAKLJUČAK

Zahvaljujući svojim karakteristikama delovi izradeni od plastičnih masa našli su ogromnu primenu u svim industrijskim granama, medicini, poljoprivredi, izradi ambalaže... U ovom radu su istaknuti zahtevi vezani za: koničnost i ravnomernost debljine zidova odlivaka, radijuse zaobljenja, raspored rebra za ukrucenje, pozicioniranje oslonih površina odlivaka, nareckivanje i natpise, izradu navoja i postavljanje metalnih umetaka.

## LITERATURA

- [1] Perošević B.: *Kalupi za injekciono presovanje plastomera (termoplasti)*, „Naučna knjiga“, Beograd, 1995.
- [2] Vidaković B.: *Alati za plastične mase*, „Tehnička knjiga“, Beograd, 1975.
- [3] Čatić M.: *Konstrukcija i proizvodnja kalupa za preradu plastičnih masa, I i II*, Zagreb, 1969.
- [4] Marković S.: *The influence of constructing upon suitability for maintenance*, „Machine design“, Faculty of technical sciences Novi Sad, ADEKO – Association for design, elements and constructions, Novi Sad, 2007.
- [5] Marković S., Tanasijević S., Jovičić S., Josifović D.: *Improving the process of constructing lead to more quality in maintaining*, 34. Nacionalna konferencija o kvalitetu „Festival kvaliteta 2007“, Zbornik radova, Kragujevac, 2007.
- [6] Marković S., Krsmanović I.: *Technological adaptability of mechanical parts*, 12<sup>th</sup> International research/expert conference TMT 2008, Proceedings, Istanbul, Turkey, 2008.
- [7] Marković S.: *Technologicality of shaping plastic parts*, „Machine design“, Faculty of technical sciences Novi Sad, ADEKO – Association for design, elements and constructions, Novi Sad, 2008.
- [8] Marković S.: *Razvoj oblika mašinskih proizvoda u zavisnosti od tehnologije izrade*, Zbornik radova sa 32. savetovanja proizvodnog mašinstva Srbije sa međunarodnim učešćem, Novi Sad, 2008.





Dr Svetislav Lj. MARKOVIĆ, profesor, Visoka škola tehničkih strukovnih studija, 32000 Čačak, Svetog Save 65, Srbija, E-mail: svetom@nadlanu.com

Mr Dragoljub VELIČKOVIĆ, REIK „Kolubara“, Dimitrija Tucovića 7/2, Lazarevac, Srbija

Mr Dragan ERIC, Kompanija „Sloboda“ Čačak, Ratka Mitrovića bb, 32000 Čačak, Srbija,  
E-mail: ericmdragan@yahoo.com

## TEHNOLOGIČNOST OBLIKOVANJA LIVENIH MAŠINSKIH DELOVA

**Rezime:** Livenne predmete treba oblikovati tako da budu tehnološki pogodni u proizvodnji, da osiguravaju najmanji utrošak rada i materijala, a isto tako i da omogućavaju da im se proizvodnja maksimalno mehanizuje i automatizuje.

**Ključne reči:** odlivci, oblikovanje, tehnologičnost.

## TECHNOLOGICAL SUITABILITY OF SHAPING CAST MACHINERY PARTS

**Abstract:** The cast objects should be shaped as to be technologically suitable for production, to ensure the least labour and material costs and to allow the maximum automatization and mechanization of their production.

**Key words:** castings, shaping, technological suitability.

### 1. UVOD

Livenje je postupak prerade metala u tečnom stanju. Predstavlja najstariji način izrade predmeta od metala i vezuje se za same početke civilizacije, nastanak prvih država i pojavu prvog (*livenog*) novca. Livenjem metala čovek je pre više od 5000 godina počeo da izrađuje delove oružja, oruđa za rad, posuđe, nakit i druge upotrebne predmete. Kasnije je tehnologija livenja dostigla zanatski nivo, počeli su se raditi odlivci različite namene, od onih postavljenih u urbanoj sredini do upotrebnih predmeta u domaćinstvu. Već tada najveći deo tih predmeta imao je na sebi ukrase (*ornamente*) koji su predmetu davali estetski izgled. Tako se dizajn razvijao zajedno sa tehnologijom livenja, još dok je ova bila na zanatskom nivou.

Oblikovanje metala livenjem daje mogućnosti izrade delova najsloženijih oblika. Veliki broj mašinskih delova ne bi mogao da se proizvede drugim tehnologijama obrade metala (*blok, glava motora SUS*), a i izrada velikog broja delova drugim tehnologijama bila bi skupa.

Savremena oprema u oblasti tehnologije livenja omogućava izradu odlivaka vrlo složenih oblika, visokog kvaliteta površine i dimenzione tačnosti i može da ispuni sve tehničke uslove koji se postavljaju pred mašinski deo, od eksploatacionih uslova do estetskih. Tehnologija livenja kao tehnološka disciplina pogodna je za masovnu i serijsku proizvodnju.

### 2. MOGUĆNOSTI OBLIKOVANJA I DIZAJNA

Pojam forme (*oblika*) u industrijskom dizajnu znači krajnji i ukupan spoljni izgled određenog proizvoda nastalog putem serijske proizvodnje. Oblik je jedan od elemenata industrijskog dizajna proizvoda, a određen je:

- materijalom,
- načinom izrade – tehnološkim postupkom,
- bojom,
- ornamentom.

Skup ovih elemenata forme doprinosi estetskoj vrednosti proizvoda, a ona zavisi od uspostavljene harmonije među navedenim elementima.

Spoljni oblik – izgled nekog proizvoda predstavlja neposredan izraz vizuelnog odnosa, ali nije prvenstveni cilj industrijskog dizajna.

Cilj industrijskog dizajna kao stvaralačke delatnosti nije da proizvod izgleda lepo, već da zadovolji zahteve kao što su:

- funkcionalnost,
- ekonomičnost,
- psihološka prilagodljivost čoveka i drugi zahtevi među kojima su i estetski,
- industrijski dizajn treba da kreira i osigura harmoničnu vezu između proizvoda i čoveka kao korisnika.

Tehnologija livenja može u potpunosti da zadovolji zahteve oblikovanja i dizajna, a da pri tom zadovolji i druge zahteve koji se postavljaju pred neki proizvod. Prilikom izrade industrijskog proizvoda, konstruktoru je na raspolaganju veliki broj legura različite namene, na primer, konstrukcionih vrsta sivog liva (*oko 100*), različitih čelika (*preko 70*), legura aluminijuma (*više od 30*), veći broj legura magnezijuma, bakra (*bronzna, mesing*) i legura cinka. Pri izboru legura treba imati u vidu kompleks faktora od kojih zavisi dobijanje kvalitetnog odlivka sa zadatim svojstvima i minimalnim troškovima izrade, kao:

- tehnologičnost konstrukcije,
- tehnologičnost legure,
- serijnost,
- eksploatacioni zahtevi,
- mogućnost izrade dela u određenom pogonu i drugo.

Tehnologijom livenja može se postići vrlo složena konfiguracija dela, a s obzirom na vizuelne zahteve, spoljni izgled može biti poboljšan izražajnim materijalom (na primer, točkovi automobila izrađeni od legure aluminijuma), bojom i dimenzijama elemenata dela.

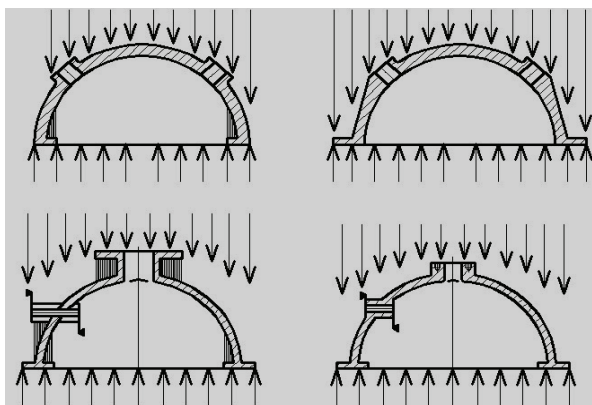
### 3. OSNOVNI PRINCIPI OBLIKOVANJA LIVENIH PREDMETA

Pri oblikovanju predmeta treba uzeti u obzir:

- standardizaciju,
- unifikaciju,
- normalizaciju,
- podesnost u eksploataciji,
- sposobnost za transport železnicom.

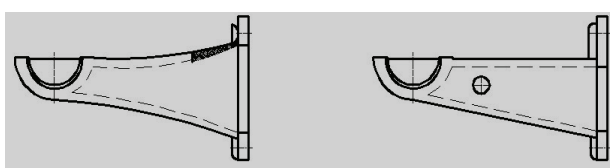
#### 3.1. Oblikovanje spoljašnje konture odlivaka

Spoljašnji izgled odlivka je potrebno što više uprostiti da bi se obezbedilo kalupovanje i osiguralo lako vađenje modela iz kalupa. Model ne treba da ima u svojim elementima takozvane zasenčene zone (slika 1), čije uklanjanje isključuje primenu odbojnih delova na modelima, dopunskih jezgara, oznaka jezgara, čime se smanjuje tačnost izrade odlivaka.



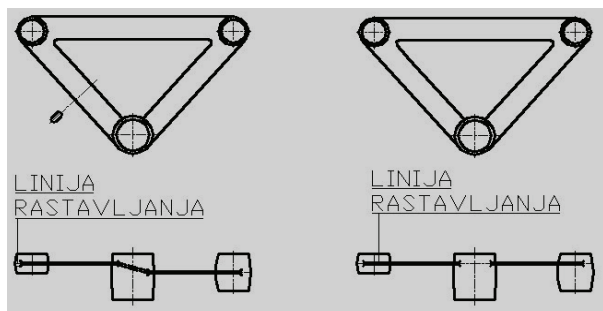
Slika 1. Livena konstrukcija: levo: sa zasenčenim zonama; desno: bez zasenčenih zona

Odlivak treba da ima što manje krivolinijskih kontura (slika 2).



Slika 2. Kontura modela konzole: levo: krivolinijska; desno: pravolinijska (pravilna)

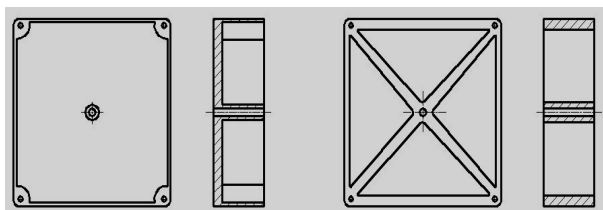
Elementi konstrukcija po spoljašnjoj konturi treba da se razmeste u jednoj ravni (slika 3).



Slika 3. Konstrukcija poluge: levo: sa kracima u raznim ravnima; desno: izmenjena sa kracima u jednoj ravni

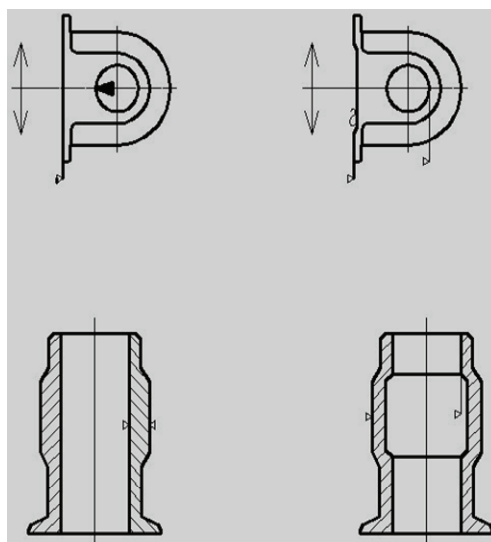
Predmete koji imaju jaka izbočenja, koja se brzo habaju, treba raščlaniti i zatim spojiti zavarivanjem ili zavrtnjima. Ponekad je, obrnuto, svrsishodnije da se odvojeni čvorovi ujedine u jednu livenu celinu. Takva izmena dopušta da se znatno skрати proces izrade i da se poboljšaju eksploatacione karakteristike konstrukcije.

Gornjim izduženim površinama predmeta (posle ulivanja) treba dati neku krivinu, donju ravan treba preseći rebrima (slika 4.desno). Razvijene površine služe kao ekrani toplote zračenja pri livenju. Grebeni, rebra i nagibi površina čuvaju liven predmet da ne bude odbačen usled krivljenja.



Slika 4. Livena konstrukcija: levo: nepravilna; desno: poboljšana sa rebrima

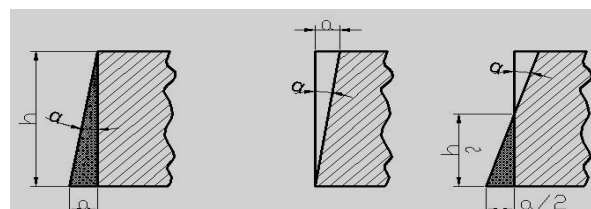
U livenom predmetu ne treba dozvoliti mehaničku obradu sa obe strane, naročito onih površina na koje deluju najveće sile opterećenja (slika 5.levo).



Slika 5. Livena konstrukcije: levo: mehanička obrada sa obe strane u opasnom preseku; desno: obrada s jedne strane

Sve površine livene konstrukcije koje su raspoređene upravno na površinu rastavljanja modela pri kalupovanju, moraju da imaju nagib radi slobodnog vadenja modela iz kalupa i jezgra iz sanduka. Nagibi u kalupu mogu da se izrade na tri načina (slika 6). Veličina nagiba zavisi od visine (dužine) zida i izražava se u stepenima (*minutima*). Pri izboru nagiba po visini zida potrebno je imati na umu način kalupovanja (*ručni ili mašinski*) ili materijal modela (*metalni, drveni*).

Ako se vertikalni zidovi odlivka obrađuju ili je njihova debljina manja od 8 mm predviđa se nagib, po pravilu, „u plusu“; pri debljini zida 8–12 mm i visini zida manjoj od 100 mm – „u minusu“ i pri visini zida većoj od 100 mm – „u plus-minusu“.



Slika 6. Nagibi za kalupe: levo: povećanje debljine zida (nagib „u plusu“); u sredini: smanjenje debljine zida (nagib „u minusu“); desno: istovremeno smanjenje i povećanje debljine zida

### 3.2. Oblikovanje zidova

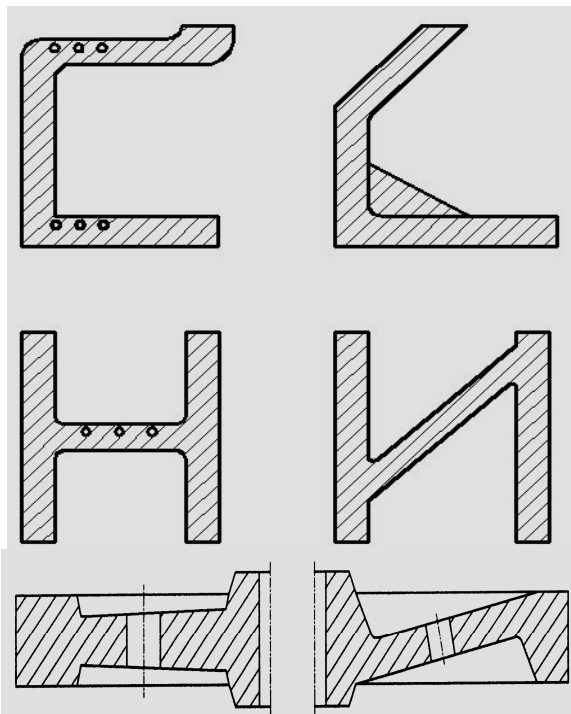
**Izbor minimalne debljine zidova.** Pri izboru minimalnih debljina zidova livenih konstrukcija neophodno je uzeti u obzir:

- njihovu namenu,
- mere,
- težinu,
- način izrade predmeta.

**Konstruisanje spojenih zidova.** Neophodno je izjednačiti debljinu spojenih zidova da bi se odstranila unutrašnja naprezanja i šupljine usled skupljanja.

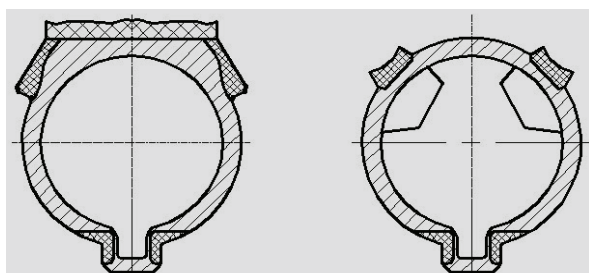
Pri sjedinjavanju zidova neophodno je izbegavati oštre uglove u kojima usled brzog hlađenja nastaju naprezanja i mikroprrsline. Zaokrugljenja treba izabrati tako da bi osigurala ujednačen prelaz i odstranila mestimično skupljanje metala.

Pri oblikovanju zidova potrebno je imati u vidu njihov raspored pri livenju (slika 7). Treba izbegavati velike horizontalne površine okrenute pri livenju naviše, pošto na njima mogu da se zadrže gasovi, troska i druge nemetalne primese, koje se obrazuju u kalupu i izdvajaju iz metala. Šeme na slici 7. desno osim toga osiguravaju lokalizaciju unutrašnjih naprezanja i otklanjaju otpad usled prslina, zbog njihovog slobodnog deformisanja pri hlađenju.



Slika 7. Šeme livenih konstrukcija: levo: nepravilne, ne osiguravaju isplivavanje gasova i nemetalnih primesa; desno: pravilne

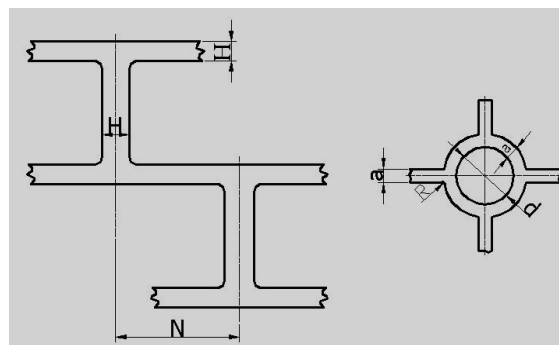
Konstrukcija livenih predmeta treba da odgovara jednovremenom ili usmerenom stvrdnjavanju odlivka. Kod jednovremenog stvrdnjavanja poželjna je najveća ravnomernost preseka, a kod usmerenog - postepeno povećanje debljine zidova u pretpostavljenom smeru stvrdnjavanja (slika 8).



Slika 8. Livena konstrukcija: levo: sa nalivkom i usmerenim stvrdnjavanjem metala odozgo na gore; desno: sa hladnjacima, ravnomerno stvrdnjavanje

### 3.3. Oblikovanje rebara

Debljina rebara, koja uobličavaju spoljašnje konture ne treba da pređe 0,8 najmanje debljine zida, na koji se priključuju, a debljina rebara unutrašnje šupljine – 0,5 do 0,6 debljine zida. Visina rebara ne treba da bude veća od petostruke debljine zida. Preporučuje se da se primeni šahovski ili prstenasti presek rebara i pregrada (slika 9).

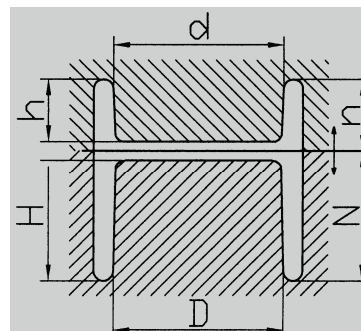


Slika 9. Šema oblikovanja rebara i pregrada ( $N \geq 2H$ ,  $d \geq 4a$ )

Rebra za ukrućenje treba rasporediti upravno na razdelnu ravan kalupa i sanduka jezgra (radi uprošćenja kalupovanja) i simetrično (radi ravnomerne raspodele unutrašnjih naprezanja). U cilju smanjenja krivljenja na mestima spajanja treba predvideti livene otvore. Spoljašnji kraj rebara treba uobličiti po krivoj liniji da bi se olakšale deformacije pri skupljanju metala.

### 3.4. Oblikovanje unutrašnjih površina i otvora

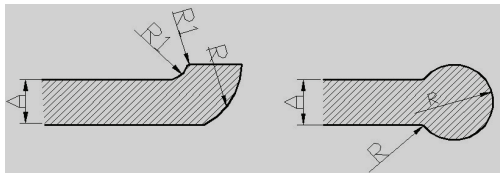
Izrada gotovo svih raznovrsnih šupljina odlivaka skopčana je sa primenom pešćanih jezgara, čiji proces izrade zahteva mnogo rada, treba primeniti skupe učvršćivače (*armaturu*), dugotrajna sušenja, jezgra je teško ukloniti iz odlivaka. Zato ih treba zameniti sa ispupčenim masivima – „gredastog“ oblika. Preporučuje se da se pridržava uzajamnog odnosa  $H < N$  i  $h < n$ , odnosno, ni jedna od „greda“ ne treba da štrči iznad šupljine razdelne ravni kalupa (slika 10).



Slika 10. Mere unutrašnjih šupljina obrazovanih ispupčenim masivima kalupa

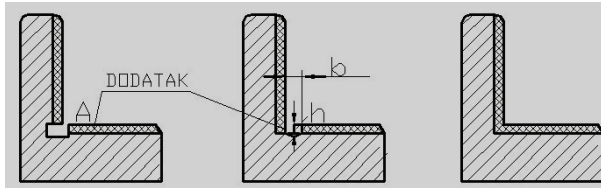
Unutrašnja šupljina treba da ima izlazne otvore, neophodne za nameštanje podupirača u jezgru. Ovi otvori treba da budu dosta prošireni i po mogućnosti treba da budu produžetak šupljine. Pri proširenim otvorima za podupirače ili oknima osigurava se za potrebno učvršćenje jezgra u kalupu i olakšava se njihovo vađenje iz odlivka. Ako u šupljini postoji samo jedan izlazni otvor i jedan znak, treba radi pouzdanog podupiranja jezgra upotrebiti metalne podupirače, koji pogoršavaju kvalitet odlivka, kvare kompaknost zidova. Preporučuje se da se ispod podupirača načine mestimična zadebljanja zidova (ako je njihova debljina nedovoljna), da bi tečan metal istopio podupirač. Treba imati na uma da gornji podupirač jezgra lako odvodi gasove u trenutku ulivanja. Pri većem broju jezgara treba ih unificirati, predvideti jednu ravnu stranu, da bi se izbegle deformacije jezgra pri sušenju. Poprečni presek šupljine ne treba da bude manji od debljine zida uvećane za polovinu, da se jezgra ne bi lomila usled pritiska tečnog metala kao i da bi se omogućilo njihovo dovoljno učvršćivanje krutom armaturom.

Okna i otvore većih razmera treba učvrstiti rubovima (slika 11), koji sprečavaju nastajanje vrelih i hladnih prslina.



Slika 11. Šeme rubova livenih predmeta: levo: sa duplim zidom; desno: sa jednostrukim zidom

Želja konstruktora da načini slobodni izlaz za alat dovodi ponekad do nepravilne konstrukcije sa tehnološki nepogodnim livenim udubljenjem A (slika 12.levo). U tom slučaju bolje je odreći se udubljenja izabравši jednu od varijanti, prikazanih na slici 12.desno. Mera  $b$  ne treba da bude veća od  $h$  i ne manja od 6 mm.



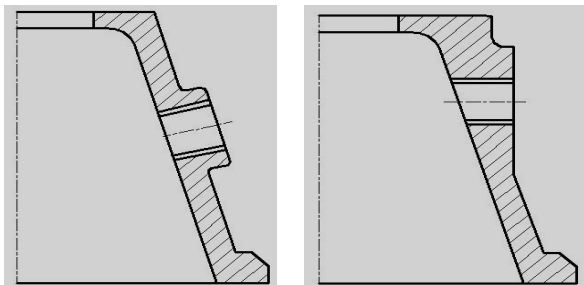
Slika 12. Konstrukcija livenih predmeta: levo: s udubljenjem A, ne preporučuje se; u sredini i desno: preporučeno konstruktivno uoblčavanje

### 3.5. Oblikovanje sa stanovišta finaliziranja i mašinske obrade

Pri oblikovanju kontura odlivaka treba naročitu pažnju obratiti baznim površinama (služe kao oslonac pri mehaničkoj obradi). Poželjno je da livena konstrukcija ima jednu te istu baznu površinu za izradu i proveravanje modela, za livenje i mehaničku obradu. Baznu površinu na dugim odlivcima treba izvesti na račun ojačanja, podmetača, ispučenja, koji pri krivljenju odlivaka ne izazivaju njeno veće kvarenje. Vrlo je važno da bazne površine budu minimalnih mera i raspoređene na jednakom rastojanju od svih tačaka konture. To smanjuje tolerancije svih dimenzija. Baznu površinu treba namerno smestiti na stranu gde treba postići najmanja odstupanja od mera. Bazna površina ne treba da seče površinu rastavljanja kalupa.

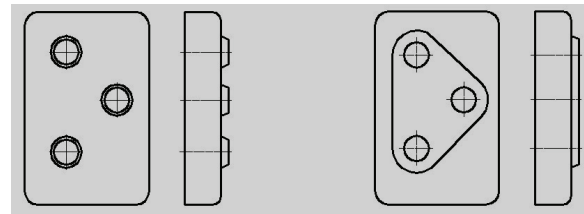
Za livene konstrukcije koje se obrađuju treba da budu predviđeni dodaci za obradu. Pri izboru dodataka za obradu potrebno je uzeti u obzir:

- vrstu legure,
- veličinu odlivka,
- raspored obradivih površina u kalupu.



Slika 13. Nepravilan (levo) i pravilan (desno) položaj navojnog otvora sa aspekta mehaničke obrade

Predloženi oblik odlivka nije prihvatljiv (slika 13.levo), zbog složenog kalupa i nešto složenije mašinske obrade. Ako posle livenja treba bušiti rupu koso, često dolazi do loma alata. Zato u takvim slučajevima treba predvideti poseban ispust ili zid na tom mestu izvesti deblje da bi se čeonim glodalom dobila normalna površina, kao što je prikazano na slici 13.desno.



Slika 14. Nepravilan (levo) i pravilan (desno) oblik odlivka sa aspekta mehaničke obrade

Predloženo rešenje (slika 14.levo) ima **puno detalja na maloj površini**, zbog čega nije prihvatljivo i treba ga izmeniti, pa međusobno bliska ispučenja treba spojiti, jer je tako za doradu povoljnije, a model je jeftiniji (slika 14.desno).

## 4. ZAKLJUČAK

Oblikovanje delova mašina i uređaja livenjem daje velike prednosti:

- velika sloboda oblika,
- smanjenje utroška materijala,
- velika proizvodnost oblika i druge.

Produktivnost u izradi odlivaka neposredno zavisi od oblika odlivaka. Oblikovanje se vrši na osnovu:

- traženog kvaliteta,
- veličine serije,
- raspoložive opreme i drugih faktora.

Da bi se odlivci pravilno oblikovali neophodno je voditi računa o:

- složenosti kalupa,
- debljini zidova,
- rebrima (*ojačanjima*),
- unutrašnjim površinama i otvorima,
- koncentraciji materijala,
- izradi i postavljanju nalivaka i odušaka,
- skupljanju materijala,
- montaži i demontaži,
- finaliziranju i mašinskoj obradi.

Tehnologija livenja u velikom broju slučajeva predstavlja pravi, a često i jedini izbor koji omogućuje ostvarenje početne ideje dizajnera. Delovi izrađeni tehnologijom livenja mogu se dodatno podvrgnuti tehnologijama površinske obrade radi dekoracije livenog dela, što dodatno pojačava ukupan estetski utisak.

## LITERATURA

- [1] Galtin, N. M.: *Otlivki v točnom mašinostrojeniji*, Mašinostrojenije, Moskva, 1983.
- [2] *Inžinjersko mašinski priručnik*, grupa autora, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Beograd, 1992.
- [3] *Ljevački priručnik*, grupa autora, Savez ljevača Hrvatske, Zagreb, 1985.
- [4] Marković S.: *The influence of constructing upon suitability for maintenance*, "Machine design", Faculty of technical sciences Novi Sad, ADEKO – Association for design, elements and constructions, Novi Sad, 2007.
- [5] Marković S., Tanasijević S., Jovičić S., Josifović D.: *Improving the process of constructing lead to more quality in maintaining*, 34. Nacionalna konferencija o kvalitetu "Festival kvaliteta 2007", Zbornik radova, Kragujevac, 2007.
- [6] Marković S., Jovičić S., Tanasijević S., Josifović D.: *The technologicality of shaping the castings*, Simpozijum sa međunarodnim učešćem "Konstruisanje, oblikovanje i dizajn KOD 2008", Zbornik radova, Novi Sad, 2008.
- [7] Marković S., Krsmanović I.: *Technological adaptability of mechanical parts*, 12<sup>th</sup> International research/expert conference TMT 2008, Proceedings, Istanbul, Turkey, 2008.
- [8] Marković S.: *Razvoj oblika mašinskih proizvoda u zavisnosti od tehnologije izrade*, Zbornik radova sa 32. savetovanja proizvodnog mašinstva Srbije sa međunarodnim učešćem, Novi Sad, 2008.



Adamović, D., Stefanović, M., Živković, M., Devedžić, G.

## UTICAJ PARAMETARA DUBOKOG IZVLAČENJA SA STANJENJEM DEBLJINE NA NAPON ZATEZANJA ZIDA IZVLAČENOG ČELIČNOG DELA

**Rezime:** Od veličine i raspodele kontaktnih napona u zoni deformacije zavisi naponsko-deformaciono stanje plastično deformisanog komada, mogućnost uspešnog deformisanja, kao i potrebna sila za izvodjenje deformisanja. Dejstvo sila trenja u zoni deformisanja je različito; na spoljašnjoj površini (između komada i matrice) ove sile ( $F_{trM}$ ) povećavaju napone zatezanja, a na unutrašnjoj (između komada i izvlačača, sile  $F_{tri}$ ) rasterećuju kritičan presek, umanjujući napone u zidu dela koji se izvlači. To je glavni razlog za postizanje visokih stepena deformacije i ostvarivanje znatnih priraštaja relativne dubine pri izvlačenju. Povećanje trenja na strani izvlačača umanjuje kritični zatežući napon, ali se ukupna sila izvlačenja povećava. Pri tome sila  $F_{tri}$  ne sme toliko da poraste da se na kontaktnoj površini komada pojave gruba zadiranja i mikro privarivanja (ili nalepljivanja) čestica metala radnog komada na alat, što bi dovelo do oštećenja radnog komada i alata i otežalo skidanje radnog komada sa izvlačača.

U ovom radu napravljena je analiza uticaja različitih parametara (ugao nagiba matrice, mazivo na matrici i izvlačaču, hrapavost izvlačača, materijal alata itd.) na napon zatezanja zida izvlačenog dela.

**Ključne reči:** duboko izvlačenje sa stanjenjem debljine zida, napon zatezanja zida, tribološki uslovi, parametri deformisanja)

## UTICAJ PARAMETARA DUBOKOG IZVLAČENJA SA STANJENJEM DEBLJINE NA NAPON ZATEZANJA ZIDA IZVLAČENOG ČELIČNOG DELA

**Rezime:** Od veličine i raspodele kontaktnih napona u zoni deformacije zavisi naponsko-deformaciono stanje plastično deformisanog komada, mogućnost uspešnog deformisanja, kao i potrebna sila za izvodjenje deformisanja. Dejstvo sila trenja u zoni deformisanja je različito; na spoljašnjoj površini (između komada i matrice) ove sile ( $F_{trM}$ ) povećavaju napone zatezanja, a na unutrašnjoj (između komada i izvlačača, sile  $F_{tri}$ ) rasterećuju kritičan presek, umanjujući napone u zidu dela koji se izvlači. To je glavni razlog za postizanje visokih stepena deformacije i ostvarivanje znatnih priraštaja relativne dubine pri izvlačenju.

Povećanje trenja na strani izvlačača umanjuje kritični zatežući napon, ali se ukupna sila izvlačenja povećava. Pri tome sila  $F_{tri}$  ne sme toliko da poraste da se na kontaktnoj površini komada pojave gruba zadiranja i mikro privarivanja (ili nalepljivanja) čestica metala radnog komada na alat, što bi dovelo do oštećenja radnog komada i alata i otežalo skidanje radnog komada sa izvlačača.

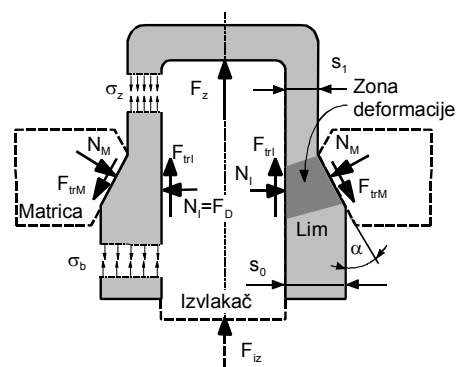
U ovom radu napravljena je analiza uticaja različitih parametara (ugao nagiba matrice, mazivo na matrici i izvlačaču, hrapavost izvlačača, materijal alata itd.) na napon zatezanja zida izvlačenog dela.

**Ključne reči:** duboko izvlačenje sa stanjenjem debljine zida, napon zatezanja zida, tribološki uslovi, parametri deformisanja)

### 1. UVOD

Karakteristično je da se pri dubokom izvlačenju sa stanjenjem debljine zida javljaju značajno visoki normalni naponi na kontaktnim površinama, kao i različiti smerovi sila trenja koje deluju na spoljašnjoj i unutrašnjoj strani dela koji se obradjuje. Smerovi sila trenja su suprotni zbog toga što se deo pri izvlačenju kreće niz matricu, a samim tim sila trenja na spoljašnjoj površini ima smer suprotan od smera izvlačenja. U isto vreme, na račun stanjenja, deo se produžava i u zoni deformacije kliza po izvlačaču u smeru suprotnom od smera izvlačenja, pa samim tim, sila trenja na unutrašnjoj površini dela biće usmerena u smeru izvlačenja.

Duboko izvlačenje sa stanjenjem debljine zida izvodi se u uslovima zapreminske šeme deformisanja, pri čemu su sve tri glavne deformacije u opštem slučaju različite od nule. Međutim bez velike pogrešnosti može se smatrati, da se izvlačenje sa stanjenjem zida izvodi u uslovima ravanskog deformacionog stanja, gde glavne deformacije predstavljaju: deformacija sabijanja u radijalnom pravcu (smanjenje debljine) i deformacija u pravcu ose izvlačenja (povećanje dužine dela). Deformacija u tangencijalnom pravcu može se smatrati da je jednaka nuli, budući da je zazor između izvlačača i matrice obično mali u poredjenju sa prečnikom izvlačača.



Slika 1. Shema delovanja sila na lim

Shema spoljašnjih sila i karakter deformisanja dela omogućuje zaključak da je osno naprezanje zatežuće, a radijalno naprezanje pritiskujuće, pri čemu osno naprezanje raste od nule na ulazu u zonu deformisanja i dostiže maksimum na izlasku iz zone deformisanja (na granici između zone deformisanja i zida dela, koji je prošao deformisanje).

Sila  $F_z$  koja deluje na dno dela, izaziva pojavu zateznih napona u zidu radnog komada, kako u provučenom delu tako i u zoni deformacije. Ti zatezni naponi imaju maksimalnu



vrednost na izlazu radnog dela iz matrice i smanjuju se do neke minimalne vrednosti koju imaju na ulazu radnog dela u zonu deformacije. Minimalna vrednost napona na ulaznom delu matrice ( $\sigma_b$ ) može da bude [1]:

- jednaka nuli ( $\sigma_b = 0$ ), ukoliko se izvlačenje izvodi sa jednom matricom,
- veća od nule ( $\sigma_b > 0$ ), ukoliko se izvlačenje izvodi kroz više matrica i onda je ta vrednost napona jednaka maksimalnoj vrednosti napona zatezanja zida na izlazu iz prethodne matrice i
- manja od nule ( $\sigma_b < 0$ ), ukoliko se radni deo gura sa zadnje strane.

Napon zatezanja zida u provučenom delu radnog komada pored ostalog zavisi i od triboloških uslova na kontaktnim površinama između matrice i izvlakača, sa jedne strane, i radnog dela sa druge strane.

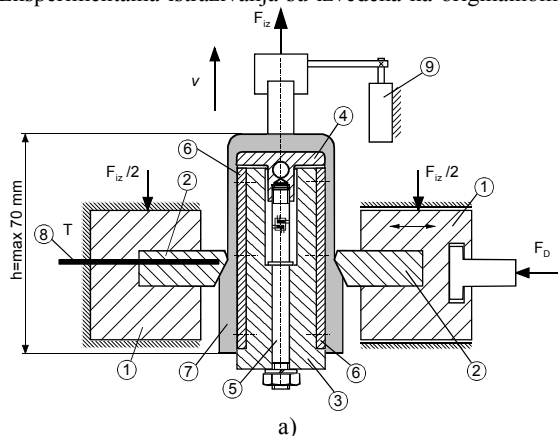
Koeficijenti trenja na strani matrice i izvlakača međusobno se razlikuju usled različitosti materijala i kvaliteta površina izvlakača i matrice.

Ako se koeficijent trenja na strani matrice ( $\mu_M$ ) razlikuje od koeficijenta trenja na strani izvlakača ( $\mu_I$ ), onda se odgovarajućim odnosima između tih koeficijenata može uticati na veličinu zateznog napona  $\sigma_z$ .

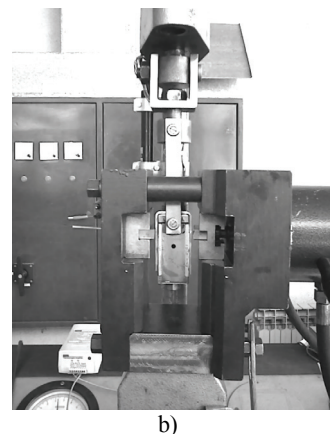
Uticao na veličinu  $\sigma_z$ , značajnim povećanjem koeficijenta trenja  $\mu_I$ , praktično je nedopustivo, budući da se pri tome značajno smanjuje postojanost izvlakača [2].

## 2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

Ekspperimentalna istraživanja su izvedena na originalnom



- 1 - Nosač matrice
- 2 - "Matrica"
- 3 - Telo "izvlakača"
- 4 - Čelo "izvlakača"
- 5 - Davač sa mernim trakama
- 6 - Pločice
- 7 - Traka lima (Epruveta)
- 8 - Termopar
- 9 - Potencijometrijski davač hoda



Slika 2. Shema (a) i izgled modela (b) korišćenog u ovom radu

Na proces izrade delova dubokim izvlačenjem sa stanjenjem debljine zida utiče jako veliki broj činilaca.

Na osnovu analize dosadašnjih istraživanja i preliminarnih ispitivanja, izvršen je izbor sledećih faktora koji će biti predmet eksperimentalnih istraživanja:

- Vrsta ispitivanog materijala - Č0148P3,
- Ugao nagiba matrice -  $\alpha = 5^\circ; 10^\circ; 15^\circ; 20^\circ$ ,
- Materijal alata (matrice/izvlakača) - AČ/AČ; Cr/Cr; TiN/TiN; TM/AČ (AČ – alatni čelik, Cr – tvrdo hromirana prevlaka, TiN – prevlaka titan nitrida, TM – tvrdi metal),
- Hrapavost izvlakača, izražena preko srednje visine neravnina -  $Ra = 0.01; 0.09; 0.4 \mu m$ , što odgovara kvalitetima površina N1; N3; N5 respektivno,
- Vrsta maziva na strani matrice - M1 (Li + MoS2 - mast); M2 (mineralno emulgirajuće vodorastvorivo ulje sa EP dodacima); M3 (neemulgirajuće sredstvo

- pasta),

- Vrsta maziva na strani izvlakača - M4 (neemulgirajuće mineralno ulje sa blagim EP svojstvima),
- Sila držanja -  $F_D = 8.7; 17.4; 26.1 \text{ kN}$ ,
- Brzina deformisanja -  $v = 20 \text{ mm/min}$ .

Pored navedenih uticajnih parametara postoji još čitav niz drugih kao što su: visina zone glačanja, radijus izvlakača, debljina dna radnog komada, broj matrica za izvlačenje, odnos unutrašnjeg i spoljašnjeg prečnika dela, odnos prečnika matrica u višestepenom alatu, odnos visine i prečnika dela itd. [4], a koji u ovom eksperimentu, iz objektivnih razloga, nisu uzeti u obzir.

Mehaničke karakteristike ispitivanog materijala date su u tabeli 1.

Materijal	Ugao, °	$R_p, \text{MPa}$	$R_m, \text{MPa}$	$R_p/R_m, -$	A, %	n, -	r, -	E, $\text{MPa}$
Č0148P3	0°	186.2	283.4	0.657	37.3	0.21860	1.31915	$1.957 \times 10^5$

Tabela 1. Mehaničke karakteristike ispitivanih materijala

tribo-modelu dubokog izvlačenja sa stanjenjem debljine zida, koji dvostrano simetrično oponaša zonu kontakta sa matricom i izvlakačem [3]. Ovaj model omogućava ostvarivanje visokih kontaktnih pritisaka i uvažava fizičke i geometrijske uslove realnog procesa (materijal matrice i izvlakača, topografiju kontaktnih površina, ugao konusa matrice -  $\alpha$  i dr.). Shema pomenutog tribo-modela data je na slici 2a, a izgled uređaja na slici 2b.

Uređaj za izvlačenje sa stanjenjem debljine zida instaliran je na specijalnoj mašini za ispitivanje limova ERICHSEN 142/12.

Ukupna sila izvlačenja  $F_{iz}$  predstavlja zbir sile trenja između izvlakača i radnog dela,  $F_{tr}$ , i sile koja deluje na dno epruvete,  $F_z$  (slika 1), tj.:

$$F_{iz} = F_{tr} + F_z, \quad (1)$$

Sila  $F_{iz}$  se meri na samoj mašini, a sila trenja na strani izvlakača  $F_{tr}$ , se registruje pomoću davača sa mernim trakama.

Iz prethodne jednačine sledi da je:

$$F_z = F_{iz} - F_{tr}, \quad (2)$$

Sila  $F_z$  koja deluje na dno trake (epruvete) opterećuje zidove trake naponom  $\sigma_z$  koji može da se sračuna na osnovu sledećeg izraza:

$$\sigma_z = \frac{F_z}{2 \cdot b \cdot s_1}, \quad (3)$$

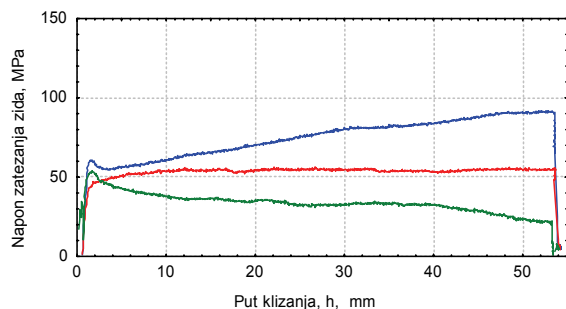
pri čemu je: b - širina epruvete,

$s_1$  - debljina epruvete posle stanjenja.

### 3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U zavisnosti od odnosa izmedju sile izvlačenja i sile trenja na izvlačkaču, sila koja deluje na dno radnog dela  $F_z$  može da se kreće u granicama od  $F_z = 0$ , kada je  $F_{tr1} = F_{iz}$ , pa do  $F_z = F_{iz}$ , kada je  $F_{tr1} = 0$ . Samim tim i napon zatezanja zida se nalazi u granicama od  $\sigma_z = 0$  pa do  $\sigma_z = F_{iz}/(2s_1b)$ . Ako napon  $\sigma_z$  prekorači stvarni napon tečenja onda će doći do razaranja zida radnog dela. Stoga je potrebno da napon zatezanja zida  $\sigma_z$  ima što manju vrednost, odnosno kontaktne uslove treba izabrati tako da se dobije što manje  $\sigma_z$ .

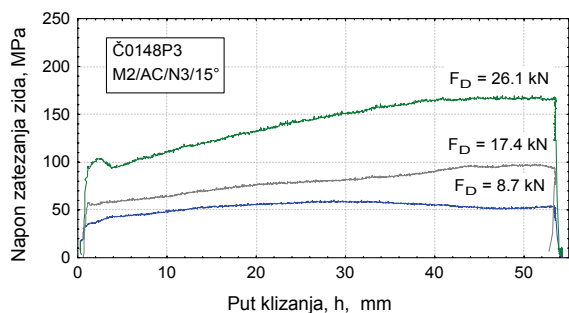
Trendovi promena sile izvlačenja i sile trenja na izvlačkaču na putu klizanja diktiraju promenu napona zatezanja, koji može da bude: konstantan, rastući ili opadajući (slika 3).



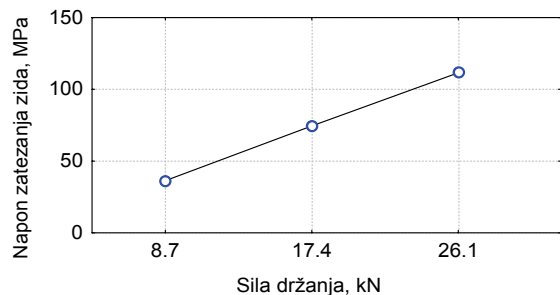
Slika 3. Promena napona zatezanja zida na putu klizanja

Kako u izrazu za napon zatezanja figurišu sila izvlačenja i sila trenja na izvlačkaču, koje u velikoj meri zavise od sile držanja i ugla nagiba matrice, to je logično očekivati da će dejstvo ovih faktora biti takodje veoma izraženo i na napon zatezanja zida [3].

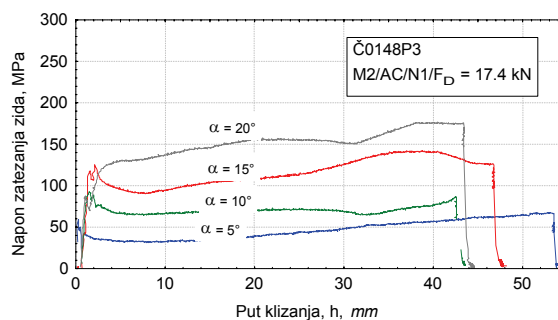
Na slici 4 je pokazana zavisnost napona zatezanja zida od puta klizanja pri različitim silama držanja. Sa povećanjem sile držanja raste i napon zatezanja zida. Srednje vrednosti napona  $\sigma_z$  za različite sile držanja i sve nivoe ispitivanih faktora prikazane su na slici 5. Pri povećanju sile držanja dolazi do povećanja napona zatezanja zida.



Slika 4. Promena napona zatezanja zida na putu klizanja za različite sile držanja

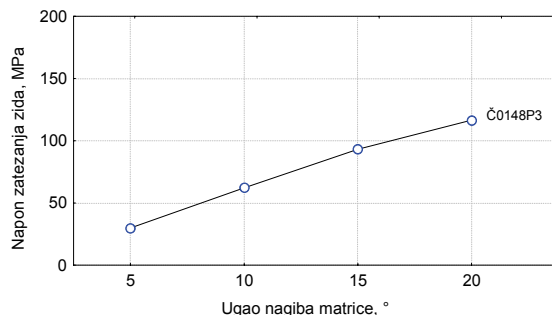


Slika 5. Promena napona zatezanja zida od sile držanja

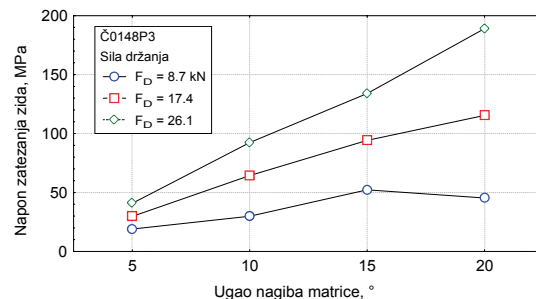


Slika 6. Promena napona zatezanja zida od puta klizanja za različite uglove nagiba matrice

Promena napona  $\sigma_z$  od puta klizanja za različite uglove nagiba matrice data je na slici 6. Sa povećanjem ugla nagiba matrice dolazi i do povećanja napona zatezanja zida  $\sigma_z$ . Zavisnost srednjih vrednosti napona  $\sigma_z$  od ugla nagiba matrice, data je na slici 7. Pri povećanju ugla nagiba matrice raste napon zatezanja zida za sve nivoe drugih analiziranih faktora.

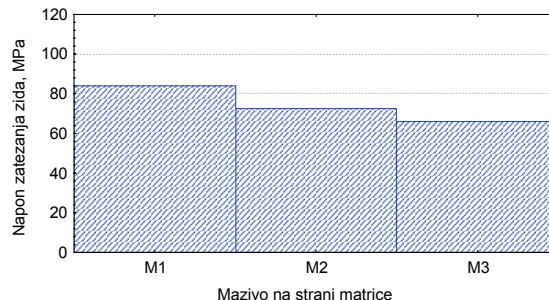


Slika 7. Promena napona zatezanja zida od ugla nagiba matrice

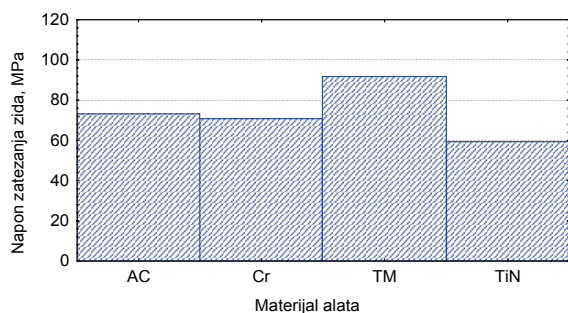


Slika 8. Promena napona zatezanja zida od ugla nagiba matrice pri različitim silama držanja

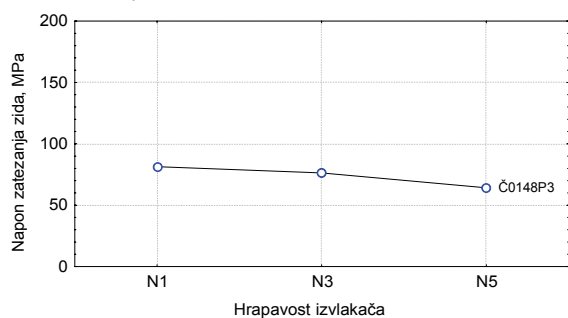
Zavisnost napona zatezanja zida od ugla nagiba matrice pri različitim nivoima sile držanja data je na slici 8. Interesantno je da, kada je sila držanja 8.7 kN, maksimalni napon zatezanja zida postiže pri uglu nagiba matrice od 15°, dok u svim drugim slučajevima napon  $\sigma_z$  raste sa povećanjem ugla  $\alpha$ .



Slika 9. Srednje vrednosti napona zatezanja zida za različita maziva na matrici



Slika 10. Srednje vrednosti napona zatezanja zida za različite materijale alata



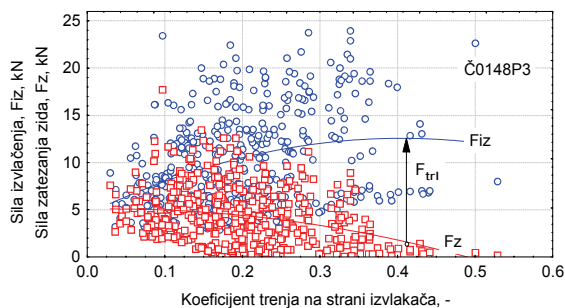
Slika 11. Srednje vrednosti napona zatezanja zida za različite hrapavosti izvlakača

Srednje vrednosti napona zatezanja zida pri korišćenju različitih maziva, prikazane su na slici 9. Najmanji napon se dobija korišćenjem maziva M3 a najveći sa mazivom M1.

Napon  $\sigma_z$  (srednje vrednosti) za različite materijale alata dat je na slici 10. Najmanje vrednosti napona  $\sigma_z$  se dobijaju sa alatima sa prevlakom od TiN, a najveće sa alatima od TM.

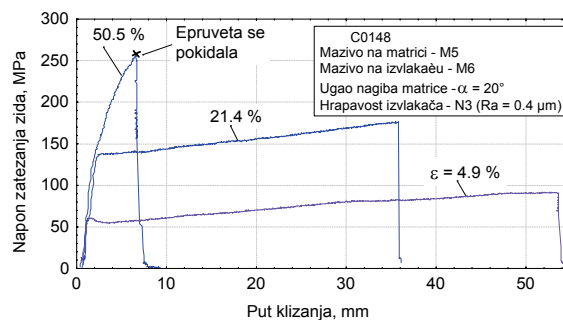
Budući da hrapavost izvlakača ima jako veliki uticaj na vrednost sile trenja na izvlakaču (sa povećanjem hrapavosti raste sila trenja na izvlakaču), logično je da povećanje hrapavosti izvlakača dovodi do sniženja napona zatezanja zida što je i pokazano na slici 11.

Većim vrednostima koeficijenta trenja na strani izvlakača odgovaraju i veće vrednosti sile trenja između izvlakača i dela. U isto vreme, sa povećanjem koeficijenta trenja na izvlakaču, sila kojom se zateže zid dela opada. Zbog znatno većeg porasta sile trenja na izvlakaču u odnosu na pad sile zatezanja zida, sila izvlačenja raste. Prethodno tvrdjenje prikazano je na slici 12. Do sličnih rezultata došlo se u radu [5] ispitivanjem uzoraka od tehnički čistog aluminijuma kutijastog oblika.



Slika 12. Zavisnost sile izvlačenja (Fiz) i sile zatezanja zida (Fz) od koeficijenta trenja na strani izvlakača

Napon zatezanja zida na putu klizanja se menja u zavisnosti od toga kako se menjaju sila izvlačenja i sila trenja na izvlakaču. Pri prekoračenju vrednosti napona koje zid dela ne može više da izdrži dolazi do razaranja zida. Karakterističan primer promene napona zatezanja zida, kada je došlo do razaranja uzorka, prikazan je na slici 13.



Slika 13. Promena napona zatezanja zida pri različitim stepenima deformacije

#### 4. ZAKLJUČAK

Ako napon zatezanja zida prekorači stvarni napon tečenja onda dolazi do razaranja zida radnog dela. Stoga je potrebno da napon zatezanja zida ima što manju vrednost, odnosno kontaktne uslove treba izabrati tako da se dobije što manje  $\sigma_z$ .

Trendovi promena sile izvlačenja i sile trenja na izvlakaču na putu klizanja diktiraju promenu napona zatezanja, koji može da bude: konstantan, rastući ili opadajući.

Povećanjem koeficijenta trenja na izvlakaču može se smanjiti napon zatezanja zida, ali istovremeno sila izvlačenja će da raste. S druge strane, promena sile izvlačenja ne svedoči jednoznačno o odgovarajućoj izmeni zatežućih napona u kritičnom preseku dela. Pri malim silama izvlačenja redovno se dobijaju mali naponi zatezanja zida, dok pri velikim silama izvlačenja, u zavisnosti od ostvarenih kontaktnih uslova, moguće je dobiti, kako velike vrednosti napona zatezanja zida tako i male.

#### 5. LITERATURA

- [1] Avitzur, B.: *Handbook of Metal-Forming processes*, JOHN WILEY & SONS Inc., New York, 1983.
- [2] Adamović D. (1999), Stefanović M., Vujinović T.: *Analiza uticaja trenja na naponsko-deformacione karakteristike dubokog izvlačenja sa stanjenjem zida metodom gornje procene*, YUTRIB99, Kragujevac, 1999.
- [3] Adamović, D.: *Ponašanje materijala u kontaktu pri procesima hladnog plastičnog oblikovanja sa visokim radnim pritiscima*, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac, 2002.
- [4] Adamović, D., Stefanović, M., Lazić, V.: *Istraživanje uticajnih parametara na proces dubokog izvlačenja sa stanjenjem debljine zida*, DEMI 2002, Banja Luka, str. 166-171.
- [5] Saito, M., Saiki, H., Kawai, N.: *Experimental Analysis of Ironing of Thin Metal Cups*, Trans. ASME, J. Eng. Ind., Vol. 111, 1989., 56-62

**Autori:** Prof. dr Dragan Adamović, Prof. dr Milentije Stefanović, Prof. dr Miroslav Živković, Prof. dr Goran Devedžić, Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac, Srbija, Tel.: +381 34 330-990, Fax: +381 34 333-192.

E-mail: [adam@kg.ac.rs](mailto:adam@kg.ac.rs)  
[stefan@kg.ac.rs](mailto:stefan@kg.ac.rs)  
[zile@kg.ac.rs](mailto:zile@kg.ac.rs)  
[devedzic@kg.ac.rs](mailto:devedzic@kg.ac.rs)

## GENERISANJE PUTANJE ALATA PRI OBRADI SKULPTORSKIH POVRŠINA NA 3-OSNIM CNC MAŠINAMA LOPTASTIM GLODALOM

### Rezime

Kod obrade radnih predmeta sa skulptorskim površinama na 3-osnim CNC mašinama alatima, putanja alata je ključni element za kvalitet obrađene površine i za vreme obrade. U radu se daje postupak generisanja putanje alata pri obradi skulptorskih površina za glodalo sa loptastim završetkom za slučaj izo-ravanskog kretanja alata u funkciji kvaliteta obrađene površine.

*Ključne reči:* Obrad skulptorskih površina, izo-ravanska, generisanje putanje alata

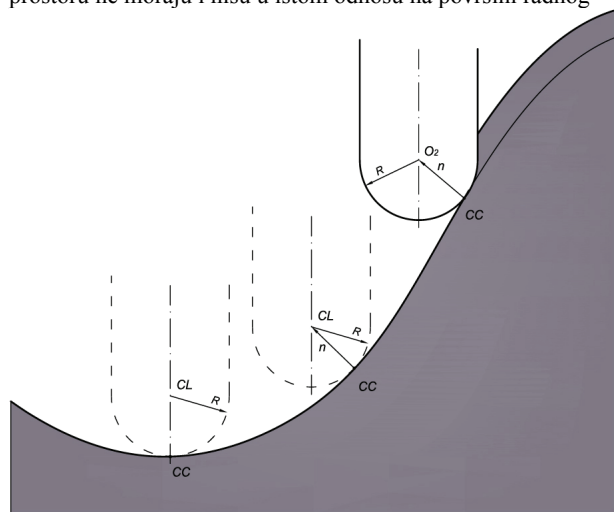
### 1. UVOD

Za jednostavne obrade NC program može da uradi i verifikuje sam operator na mašini. Međutim u slučaju obrade skulptorskih površina neizostavno se mora koristiti CAD/CAM sistem kako bi se u suštini površina definisala analitički a na osnovu toga i generisala odgovarajuća putanja alata. U većini slučajeva broj podataka koji se odnosi na putanju alata kod obrade skulptorskih površina eksponencijalno zavisi od vrednosti zahtevane tolerancije. Kontrolna jedinica mašine mora da ima veliku memoriju da bi se smestila tako velika količina podataka odjednom ili da se sekvencijalno šalje što pak ima svoje nedostatke.

Uobičajeno je da se skulptorske površine predstavljaju u parametarskom obliku. Najprostiji metod definisanja putanje alata za obradu ovakvih površina podrazumeva da se i putanja alata generiše u parametarskom prostoru. Međutim stvarna obrada se izvršava u Kartezijevom prostoru. Različitost prostora prouzrokuje niz problema koji proizilaze iz činjenice da je nepoznata funkcija preslikavanja iz jednog u drugi prostor. Alat nije opisan u parametarskom prostoru pa je vrlo teško odrediti interferenciju radnog predmeta i alata. Tačke koje su na jednakom rastojanju u parametarskom prostoru ne moraju i nisu u istom odnosu na površini radnog

Alat putuje od tačke kontakta (CC) pravoj liniji. Položaj alata (CL) je određen položajem centra lopte čiji je poluprečnik R, sl.1.

Problemi obrade skulptorskih površina postali su predmet mnogih istraživačkih centara još 80-tih godina a još uvek se ulažu istraživački naponi da se razviju novi pristupi i novi algoritmi u cilju povećanja tačnosti obrađene površine i povećanja produktivnosti obrade. Posebnu pažnju privlače postupci obrade sa glodalima sa sfernim završetkom na 3-osnim CNC mašinama [1,2]. Troosne CNC mašine alatke su najzastupljenije u proizvodnim pogonima sa NC opremom a njihovo programiranje ne predstavlja naročiti problem. Glodalo sa sfernim završetkom nije baš najbolji izbor jer su parametri obrade promenjivi a postoje slučajevi kada je brzina rezanja jednaka nuli što se odražava na proces rezanja i kvalitet obrađene površine. Sa druge strane, ovaj oblik glodala je vrlo jednostavan za određivanje putanje alata i kontrolu kolizije alata i površine radnog predmeta. U prethodnom periodu definisan su tri osnovna pristupa u obradi sfernih površina: izo-parametarski, izo-ravanski i izo-hrapavi [3,4]. Većina metoda se bazira na aproksimaciji skulptorskih površina sa poligonalnim površinama. Na tako formiranom skupu se definiše ili redefiniše putanja alata [5] a postoje naponi da se u realnom vremenu preko interneta generiše i prenosi putanja alata [6].



Slika 1 Kontaktna tačka i tačka položaja alata

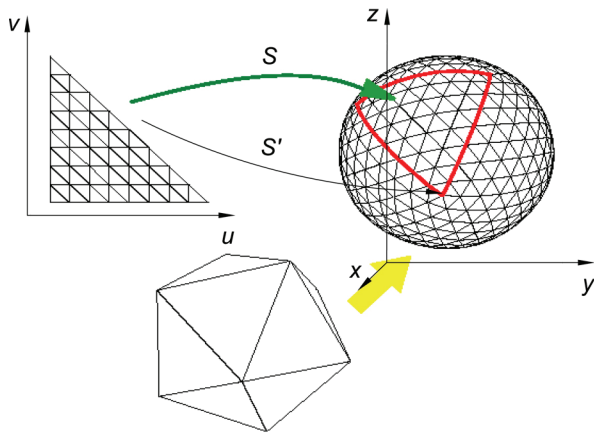
predmeta u koordinatnom sistemu mašine.

### 2. TRIANGULACIJA SKULPTORSKIH POVRŠINA

Skulptorska površina je obično predstavljena u obliku bikubne, Bezier-ove ili B-splajn površine. Svaka od pomenutih površina je predstavljena u funkciji dva parametra, u i v. Da bi se obezbedili kontinuitet prelazi između delova površina potrebno je da kontinuitet drugog reda bude raličit od nule.

Da bi se iz domena parametarskog definisanja putanje alata prešlo u domen Kartezijevog prostora potrebno je skulptorsku površinu aproksimirati skupom ravnih truglastih površina, sl. 2. Svaki trugao je definisan koordinatama svoja tri temena. Pri aproksimaciji skulptorskih površina ravnim trouglastim površinama, veličina trouglova se menja u zavisnosti od





Slika 2 Triangulacija skulptorske površine

radijusa krivine u cilju minimizacije potreba za memorisanjem podataka o aproksimiranoj površini.

Neka su  $\langle u_1, v_1 \rangle$ ,  $\langle u_2, v_2 \rangle$  i  $\langle u_3, v_3 \rangle$  tri para parametar za neku površinu  $S(u, v)$ . Odgovarajući trouglasti deo površine je definisan nad pomenutim skupom parametara, sl. 2:

$T = \text{trougao}(\langle u_1, v_1 \rangle, \langle u_2, v_2 \rangle \text{ i } \langle u_3, v_3 \rangle)$

Slika 2 Triangulacija skulptorske površine

Za tačku  $u$  u zoni trouglaste površine, čiji su parametru  $u$  i  $v$ , važi relacija

$$u = au_1 + bu_2 + cu_3$$

$$v = av_1 + bv_2 + cv_3$$

gde je

$$a + b + c = 1 \text{ i } a, b, c \geq 0$$

Triangulacija površi  $S(u, v)$  je tada afina funkcija  $S'$  nad  $T$  tako da je:

$$S'(u, v) = aS(u_1, v_1) + bS(u_2, v_2) + cS(u_3, v_3).$$

Saglasno osobinama B-splajn krivih i B-splajn površina površina pri segmentaciji  $S'$  i  $S$  će se poklapati u temenima trougla.

### 3. ODREĐIVANJE PUTANJE ALATA

Oblik skulptorskih površina se kontroliše preko kontrolnih tačaka a opisane su u funkciju dva parametra  $u$  i  $v$ . Osobina ovih površina je da zadržavaju kontinuitet drugog reda  $C^2$ . Zadajući vrednost jednog parametra možemo odrediti krivu u funkciju drugog parametra čime se može generisati mreža površine. Te iste krive se mogu iskoristiti za generisanje putanje alata da se po njima vodi alat pri izradi površina. Tako generisane putanje alata zovemo izo-parametarske.

Medjutim ovaj metod nije baš najpovoljniji za generisanje putanje alata u Dekartovim koordinatama. Zbog toga se češće koriste ravni kretanja paralelne ravnima koordinatog sistema. Tako definisane putanje alata su izo-ravanske. U našem razmatranju pretpostavićemo da se alat kreće u ravnima  $x=L$ ,

Putanja alata se nalazi u vodećoj ravni, i u slučaju 3-osne obrade i loptastog vrha glodala, je određena položajem centra lopte. Tačka kontakta glodala i površine koja se obrađuje je promenjiva i zavisi od normale na površinu u tački dodira (CC). Ako je vektor položaja neke tačke  $r$  na površini  $S(u, v)$ , normala u toj tački je određena jednačinom:

$$n = \frac{(r_u \times r_v)}{|r_u \times r_v|}$$

gde je

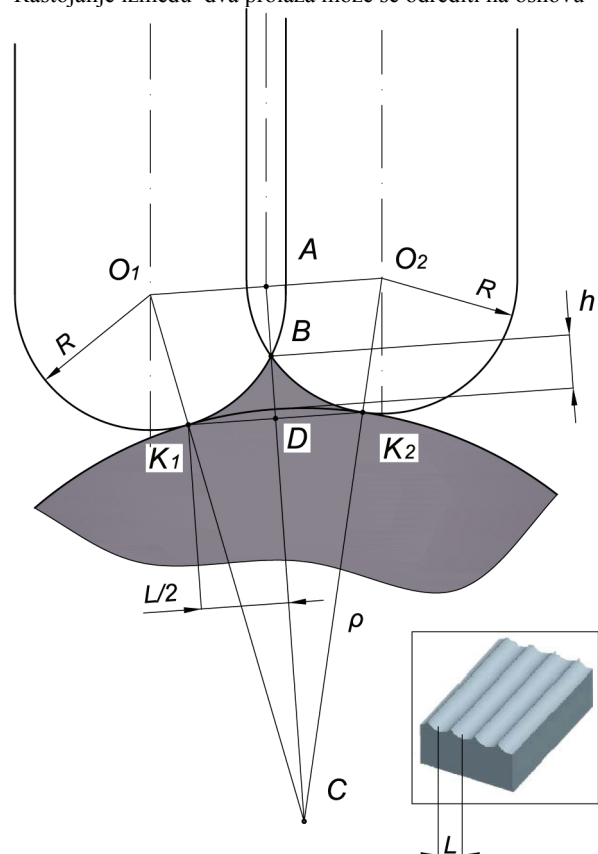
$$r_u = \lim_{du \rightarrow 0} \frac{S(u + du, v) - S(u, v)}{du}$$

$$r_v = \lim_{dv \rightarrow 0} \frac{S(u, v + dv) - S(u, v)}{dv}$$

Da bi se primenio ovaj metod, potrebno je generisati tačke iz parametarskog domena u domen dekartovih koordinata. Izračunavajući normalu u svakoj tački i pomerajući centar glodala u pravcu normale za radijus, dobija se novi skup tačaka koji predstavlja položaj alata. U sledećem koraku je potrebno proveriti koliziju alata i površine radnog predmeta.

### 4. UTVRĐIVANJE RASTOJANJA IZMEĐU UZASTOPNIH PROLAZA

Pri izradi skulptorskih površina alat uklanja materijal duž svoje putanje. Da bi se obradila cela površina alat se kreće po nizu putanja koje su na nekom međusobnom rastojanju. Rastojanje između dva prolaza može se odrediti na osnovu



Slika 3 Rastojanje između dva prolaza alata



više kriterijuma. Jedan od kriterijuma može da bude maksimalno dozvoljena hrapavost obradene površine koja je određena visinom neskinutog sloja marejiala između dva prolaza alata. Rastojanje između dve putanje alata može se izraziti u funkciji maksimalne hrapavosti  $h$ , radijusa loptastog glodala  $R$  i radijusa krivine  $\rho$ , sl.3 .

Posmatrajući sliku mogu se izvesti sledeće jednakosti:

$$\overline{O_1C} = \rho + R$$

$$\overline{AC} = \rho + h + \overline{AB}$$

Iz pravouglog trougla  $O_1AB$  može se uspostaviti

$$\text{zavisnost: } \overline{AB}^2 = R^2 - \overline{O_1A}^2$$

Iz trougla  $O_1AC$  sledi:

$$\overline{O_1C}^2 = \overline{O_1A}^2 + \overline{AC}^2$$

$$(\rho + R)^2 = \overline{O_1A}^2 + (\rho + h + \overline{AB})^2$$

$$(\rho + R)^2 = \overline{O_1A}^2 + (\rho + h)^2 + 2[(\rho + h) \overline{AB} + \overline{AB}^2]$$

$$(\rho + R)^2 = \overline{O_1A}^2 + (\rho + h)^2 + 2[(\rho + h) \overline{AB} + R^2 - \overline{O_1A}^2]$$

odnosno

$$\overline{AB} = [(\rho + R)^2 - R^2 - (\rho + h)^2] / 2(\rho + h) \quad (1)$$

Iz sličnosti trougla  $O_1AC$  i trougla  $K_1DC$  sledi:

$$\frac{\overline{O_1A}}{L/2} = \frac{\overline{O_1C}}{\rho}$$

$$L = 2\rho \frac{\overline{O_1A}}{\overline{O_1C}} = \frac{2\rho}{(\rho + R)} \overline{O_1A}$$

$$L^2 = \frac{4\rho^2}{(\rho + R)^2} \overline{O_1A}^2$$

$$L^2 = \frac{4\rho^2}{(\rho + R)^2} (R^2 - \overline{AB}^2) =$$

$$= \frac{4\rho^2 R^2}{(\rho + R)^2} - \frac{4\rho^2}{(\rho + R)^2} \overline{AB}^2 \quad (2)$$

Uvrštavajući vrednost za  $\overline{AB}$  iz jednačine (1) dobijamo

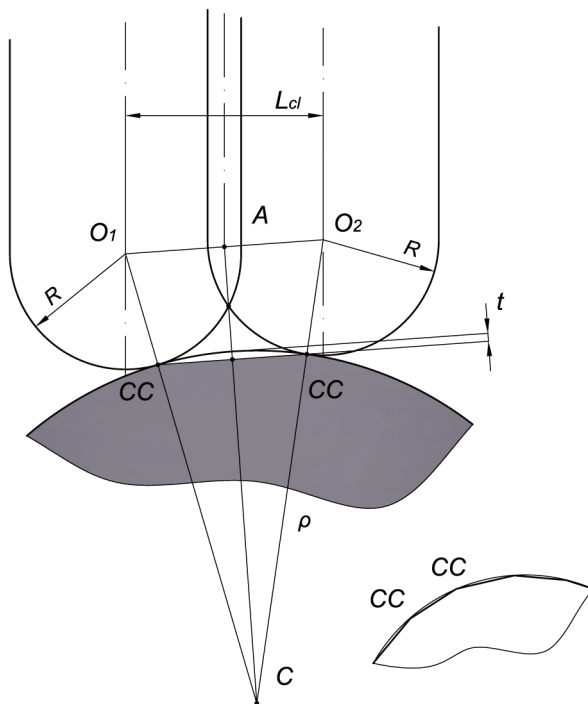
$$L^2 = \frac{4\rho^2 R^2}{(\rho + R)^2} - \frac{4\rho^2}{(\rho + R)^2} \frac{[(\rho + R)^2 - R^2 - (\rho + h)^2]^2}{4(\rho + h)^2}$$

$L =$

$$\frac{\rho \left\{ 4R^2(\rho + h)^2 - [(\rho + R)^2 - (\rho + h)^2 - R^2] \right\}^{1/2}}{(\rho + R)(\rho + h)}$$

#### 4. ODREĐIVANJE DUŽINE PRAVOLINIJSKE PUTANJE PREMA DOZVOLJENOJ TOLERANCIJI

Alat se kreće po pravoj liniji između dve susedne CC tačke. Odstupanje putanje alata od definisane površine odnosno krive preseka površine i ravni kretanja alata definiše grešku u longitudinalnom pravcu kretanja alata. Maksimalno odstupanje mora biti manje od dozvoljene tolerancije  $t$ .



Slika 4 Pravolinijska putanja alata

Posmatrajući trougao  $O_1AC$  na slici 4, mogu se uspostaviti sledeće relacije:

$$\overline{O_1C} = \rho + R$$

$$\overline{AC} = \rho - t + R$$

$$(L_{cl}/2)^2 = \overline{O_1C}^2 - \overline{AC}^2$$

$$(L_{cl}/2)^2 = (\rho + R)^2 - (\rho - t + R)^2 \quad (3)$$

Sređivanjem gore datog izraza dobijamo izraz za dužinu putanje alata u obliku:

$$L_{cl} = 2 [ 2t(R+t) - t^2 ]^{1/2} \quad (4)$$

#### 5. GENERISANJE SEGMENTA PUTANJE ALATA

Podrazumevajući da se alat kreće u vodećim ravnima koje su međusobno paralelne, npr u ravnima  $x = \text{const}$ , počev od  $X_{st}$ . Za obradu samo jednog trougla potrebno je definisati nekoliko pravih linija različite dužine koje će ležati u ravni paralelnoj ravni trougla na rastojanju od vrednosti poluprečnika. Kontaktne tačke na trouglu su na ivicama

trougla a putanja centra alata je paralelna putanji između dve kontaktne tačke. Ako se ima u vidu da smo skulptorsku površinu aproksimirali sa skupom truglastih površina, to se ista procedura sprovodi na svim truglovima. Gore pomenuti opis se može definisati kroz sledeće korake:

1. Temena truglova se sortiraju po veličini x koordinate, i označe se indikatorima: min, sr, max.

2. Izračuna se vektor normale trougla  $v(a,b,c)$ .

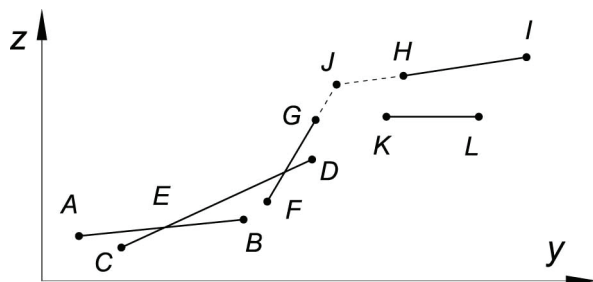
3. Procedura pod 4 i 5 se ponavlja za svako n,  $X_{\min} < X_{st} + nL + a < X_{\max}$

4. Nađi tačku u kojoj ravan  $x = X_{st} + nL + a$  seče ivice trougla. Neka su to sad tačke sa koordinatama  $(X_{st} + nL + a, Y_{n1}, Z_{n1})$ ,  $(X_{st} + nL + a, Y_{n2}, Z_{n2})$

5. Transliraj kontaktne tačke na ivicama trougla u pravcu normale da bi se dobio položaj alata. Segment kontakta alata i površine je određen tačkama  $(X_{st} + nL, Y_{n1-b}, Z_{n1-c})$  i  $(X_{st} + nL, Y_{n2-b}, Z_{n2-c})$ .

## 6. POVEZIVANJE SEGMENTA PUTANJE ALATA

Pretpostavimo da smo dobili pravolinijske segmente putanje alata AB, CD, FG, HI i KL, kao na sl. 5. Segmenti putanje AB i CD se seku a presečna tačka je E. Sad je stvarna putanja AED. Segmenti CE i BE se brišu. Kada su segmenti međusobno udaljeni kao što je to slučaj sa segmentima FG i HI putanja alata je FJI. Tačka J je presečna tačka produženih segmenata FG i HI. Ako ima segmenta koji se ne seku a imaju različite z koordinate, kao što je to slučaj sa segmentima HI i KL, segment sa većim z koordinatama se uzima za putanju dok se segment KL odbacuje. Ukoliko bismo uzeli za putanju KL, alat bi uklonio trougao iz kojeg je generisan segment HI.



Slika 5. Povezivanje segmenata putanje alata

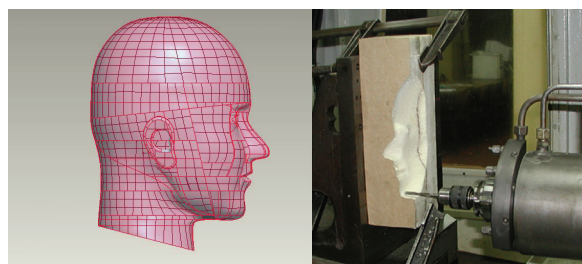
Primer obrade predmeta sa skulptorskim površinama prikazan je naprimera modela ljudske glave, sl.6.

## 7. ZAKLJUČAK

Kod obrade skulptorskih površina veoma je važno kako se generiše putanja alata jer to direktno utiče na kvalitet obrašene površine i na vreme obrade. Aproksimacija skulptorske površine truglastim ravnim površinicama pruža mogućnost jednostavnog generisanja putanje alata ali zahteva intenzivne matematičke operacije što nameće zahteve za performansma računara odnosno upravljačke jedinice ukoliko se određivanje putanje alata određuje u realnom vremenu. Analitička zavisnost između kvaliteta obrašene površine i broja prolaza alata i dužine pravolinijski odsečaka na jednoj putanji iskoršćena je u algoritmu za generisanje putanje alata u slučaju 3-osne obrade glodalom sa sfernim završetkom.

## 8. LITERATURA

- [1] Z. C. Chen, D. Song: **A Practical Approach to Generating Accurate Iso-Cusped Tool Paths for Three-Ad's CNC Milling of Sculptured Surface Parts**. Journal of Manufacturing Processes Vol. 8/No. 1, 2006, 30 – 38
- [2] T. Chen, Zhiliang, **A tool path generation strategy for three-ad's ball-end milling of free-form surfaces**, 2008
- [3] J. A. Carter<sup>1</sup>, T. M. Tucker and T. R. Kurfess: **3-Ad's CNC Path Planning Using Depth Buffer and Fragment Shader**. Computer-Aided Design & Applications, 5(5), 2008, 612-621
- [4] Y. Rena, H. T. Yaub, Y.-S. Leea: **Clean-up tool path generation by contraction tool method formachining compled' polyhedral models**. Computers in Industry 54 (2004) 17–33
- [5] L. P. Zhang, J. Y. H. Fuh and A. Y. C. Nee: **Tool path regeneration for mold design modification**. Computer Aided Design, Volume 35, Issue 9, 2003
- [6] A. J.Álvares J. C. E. Ferreira: **NjebTurnig: Tele operation of a CNC turning center through the Internet**. Journal of Materials Processing Technology Volume 179, Issues 1-3, 2006, Pages 251-259
- [7] P Bojanic, R. Ivanović: **Pristup izgradnji funkcionalnog deformabilnog geometrijskog modela ljudske glave**. Zbornik radova 32. Jupiter konferencije, 2006



Slika 6 Primer skulptorske površine

## A TOOL PATH GENERATION FOR THREE-AXIS BALL-END MILLING OF SCULPTURED SURFACES

Pavao Bojanić, Mechanical Engineering Faculty Belgrade

### Summary

*In three-axis computer numerically controlled (CNC) machining of sculptured surfaces parts, the tool path is crucial to surface quality and machining time. The paper gives the procedure of tool path generation for milling sculptured surfaces with the ball-end cutter in case of iso-planar tool driv. Generated tool path is function of quality of machined surfaces.*

*Kay words: Sculptured Surface Machining, Iso-planar, Tool path*

Tabaković, S., Živković, A., Gatalo, R., Zeljković, M., Mijušković, M.

## UNAPREĐENJE KARAKTERISTIKA UNIVERZALNOG ZGLOBA OPTIMIZACIJOM GEOMETRIJE POJEDINIH NJEGOVIH ELEMENATA

### Rezime:

Široka rasprostranjenost mehatroničkih sistema kod kojih se kretanje između elemenata prenosi primenom kardanskog vratila uticala je da svako unapređenje njihovih karakteristika. To je rezultovalo sprovođenjem brojnih istraživanja u cilju unapređenja svih pojedinačnih elemenata kardanskih vratila.

U radu je prikazan deo rezultata istraživanja sprovedenih u cilju unapređenja karakteristika univerzalnih zglobova koji predstavljaju jedan od najvažnijih elemenata ovih vratila. To se prvenstveno odnosi na modifikaciju geometrijskog profila kardanske viljuške i krstastog elementa, gde je uvođenjem matematički definisanih profila omogućeno povećanje ugla nagiba, a zatim i povećanje eksploatacionog veka krstastog elementa. univerzalnog zgloba

**Cljučne reči:** univerzalni zglob, optimizacija, ugao nagiba

## IMPROVEMENT CHARACTERISTICS OF A UNIVERSAL JOINT WITH OPTIMIZATION OF GEOMETRY OF ITS ELEMENTS

### Abstract:

Widespread of mechatronic systems where the movement of elements are returned with cardane shaft caused to any improvement of characteristic of the joints, which are an integral part of its significant influence on the characteristics of these systems.

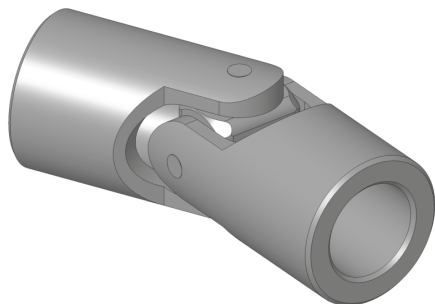
This paper presents the results of the research conducted for the purpose of improving the characteristics of universal joints. This primarily refers to the modification of the geometric profile of forks of universal joints and cross element, where the introduction of mathematics defined profile available to increase the angle of inclination universal joints, and then increase its working life.

**Key words:** universal joint, optimisation, slope angle

### 1. UVODNA RAZMATRANJA

Zahvaljujući razvoju industrije motornih vozila, poslednjih decenija se sprovode intenzivna brojna istraživanja u cilju usavršavanja zglobova, čiji osnovni zadatak je ostvarivanje veze između komponenata u mehaničkim sistemima kao i različitim tipovima mehanizama. To se odnosi i na različite tipove zglobova.

Univerzalni zglobovi predstavljaju elemente veze sa dva rotaciona stepena slobode kretanja. Njihovu ulogu u različitim tipovima mehanizama svodi se na prenos obrtnog kretanja i opterećenja između nesaosnih vratila. Izvorni tip univerzalnih zglobova je zasnovan na konstrukciji koju čine krstasti spojni element i dva elementa oblika viljuške (slika 1).



Slika 1. Univerzalni zglob

U periodu od svog nastanka, pa do danas je razvijen veći broj tehničkih rešenja univerzalnih zglobova koji imaju veliku ulogu u transportnim sredstvima kao što su putnička i teretna sredstva. I pored toga, do danas je kao najzastupljenija varijanta u primeni konstrukcija nastala na izvornoj koncepciji univerzalnog zgloba.

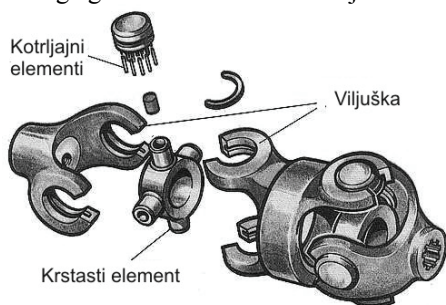
Analiza problematike razvoja i usavršavanja univerzalnih zglobova ukazuje na činjenicu da su savremena istraživanja usmerena ka povećanju maksimalnog ugla nagiba, produženja veka eksploatacije i smanjenju trenja na kontaktnim površinama.

Imajući u vidu njihovu zastupljenost u području mašinstva, rezultati istraživanja koja su prezentovana u ovom radu imaju za cilj da daju određen doprinos usavršavanju univerzalnih zglobova primenom optimizacije geometrije pojedinih elemenata.

### 2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE UNIVERZALNOG ZGLOBA

Poslednjih godina je kao rezultat usavršavanja razvijen veći broj rešenja univerzalnih zglobova koja su, u odnosu na izvorno rešenje, unapređena uvođenjem kotrljajnih elemenata između kontaktnih površina i modifikacijom konstrukcije u cilju

ispunjenja pojedinih zahteva kao npr. povećanje krutosti. Na slici 2. su prikazani osnovni elementi univerzalnog zgloba ovakve konstrukcije.



Slika 2. Struktura dvostrukog univerzalnog zgloba

Na osnovu slike 2 se može uočiti da vitalne elemente univerzalnog zgloba predstavljaju: viljuške, krstasti element kao i ležaj sa kotrljajnim elementima koji ostvaruje vezu između njih. Može se uočiti da na ugao nagiba samog sklopa najveći uticaj imaju oblik i geometrija viljuške zgloba imajući u vidu da od njenog oblika zavisi maksimalni ugao rotacije koji po dve ose može da ostvari zglob. Sa druge strane analizom ponašanja univerzalnih zglobova u eksploataciji je uočeno da je najčešći uzrok otkaza lom krsta zgloba usled koncentracije napona u pojedinim zonama.

### 3. ANALIZA I OPTIMIZACIJA ELEMENATA ZGLOBOVA

Istraživanje sprovedeno sa ciljem unapređenja postojećih rešenja univerzalnih zglobova je ukazalo na pravce istraživanja zasnovane na ekonomičnosti izrade elemenata zgloba. To su:

- Ka povećanju ugla nagiba univerzalnih zglobova kroz optimizaciju oblika viljuške univerzalnog zgloba
- Ka povećanju eksploatacionog veka zgloba, a samim tim i kardanskog vratila, kroz smanjenje napona na krstastom elementu zgloba i elementima ležaja

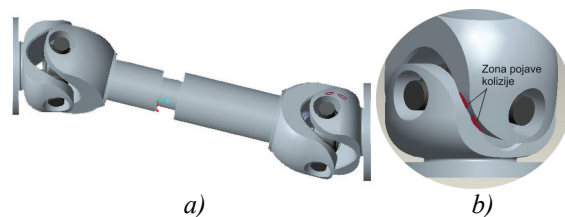
Ovakav tip ispitivanja podrazumeva primenu matematičkih procedura koje se najefikasnije sprovode primenom računarskog modeliranja i savremenih CAD/CAE/CAM programskih sistema. U sprovedenim istraživanjima su korišćeni programski sistemi koji se smatraju najkompetentnijim u ovoj oblasti.

#### 3.1 Optimizacija oblika viljuške univerzalnog zgloba

Kao što se na slici 2. može uočiti element viljuške ima profil kruznog oblika što je i slučaj kod najvećeg broja izvedenih rešenja. Ova činjenica se najčešće opravdava jednostavnošću izrade same viljuške. Kinematske analize univerzalnih zglobova se uočava da je ograničavajući faktor maksimalnog ugla nagiba zglobova oblik profila viljuške koji pri maksimalnim uglovima uzrokuje koliziju.

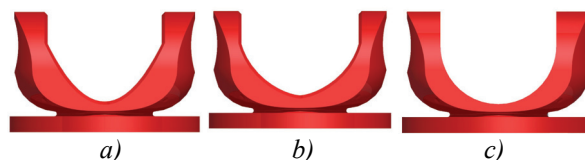
U cilju optimizacije oblika viljuške izvršeno je vrednovanje njenog uticaja na maksimalni ugao pri

kome se nesmetano ostvaruje prenos kretanja. Na osnovu toga je zaključeno da se na ugao pri kome nastaje kolizija između dve viljuške zgloba može uticati izborom oblika profila viljuške. Na slici 3. je prikazan nastanak kolizije u univerzalnom zglobu.



Slika 3. Model kardanskog vratila

Prva faza istraživanja je obuhvatila analizu univerzalnih zglobova sa tri varijante viljuške, i to sa: paraboličnim (slika 4.a), evolventnim (b) i kružnim (c) (uzet kao referentni) profilom.



Slika 4. Različiti profili viljuške univerzalnog zgloba

Analize sprovedene na računarskim modelima ukazuju na činjenicu da promena geometrije profila viljuške zgloba ne utiče značajno na njenu konstrukciju. Osim toga i promene u masi i momentima inercije ovih elemenata su zanemarljive. Kao rezultat ovakvih modifikacija uočeno je da primena evolventnog profila u oblik šupljine viljuške zgloba omogućava značajno povećanje maksimalnog ugla nagiba univerzalnog zgloba (slika 5.).



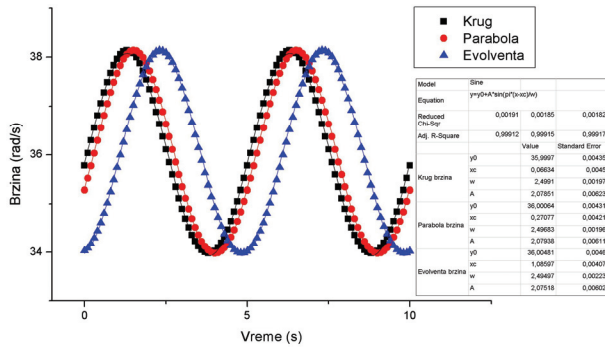
Slika 5. Funkcionalna zavisnost parametara viljuške univerzalnog zgloba i zone pojave kolizije za različite tipove krivih

Uticaj oblika viljuške je prikazan u zavisnosti od maksimalnog rastojanja između osa zglobova koji se nalaze u kardanskom vratilu, imajući u vidu da je to rezultat maksimalnog nagiba pojedinih zglobova.

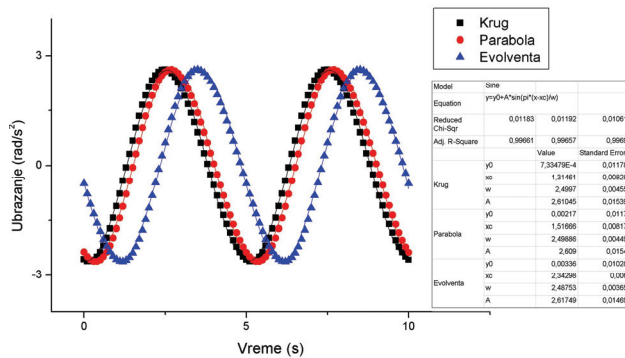
Ovakvo povećanje maksimalnog ugla nagiba univerzalnog zgloba omogućava izradu kardanskih vratila kod kojih se prenos kretanja ostvaruje na značajno većim međuosnim rastojanjima. Zbog ocene dobijenih rešenja u toku istraživanja je izvršena i analiza zakonitosti promene brzine i ubrzanja na približnici izlazne viljuške kao segmentu kardanskog vratila. Dobijeni rezultati su prikazani na slikama 6



(raspored brzina) i 7 (ubrzanja).



Slika 6. Zavisnosti brzine na izlaznim elementima kardanskog vratila za tri varijante profila

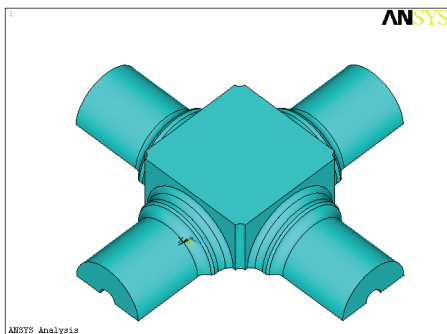


Slika 7. Zavisnosti ubrzanja na izlaznim elementima kardanskog vratila za tri varijante profila

Uporednom analizom matematičkih zakonitosti kojima su definisani brzina i ubrzanje se uočava da se promenom profila viljuške amplituda i frakvencija ovih zakonitosti ne menjaju, iz čega se zaključuje da kinematske karakteristike kardanskog vratila u potpunosti ostaju iste.

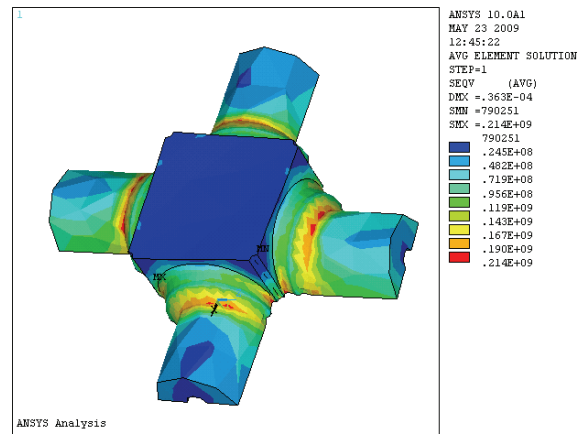
### 3.2 Optimizacija oblika krstastog elementa univerzalnog zgloba

Drugi, karakterističan, element univerzalnog zgloba predstavlja krstasti element koji prenosi kretanje sa jedne na drugu viljušku. Pri eksploatacije zglobova uočeno je da krstasti element, valjčići i spoljašnji prsten ležaja predstavljaju elemente sklopa zgloba koji usled opterećenja najčešće trpe elastične i plastične deformacije. Krstasti elementi univerzalnih zglobova koji se primenjuju u transportnim sredstvima su u većini slučajeva bazirani na rešenju za koje je karakterističan veći broj prelaza na kojima nastaju koncentracije napona (slika 8).



Slika 8. Model krstastog elementa univerzalnog zgloba

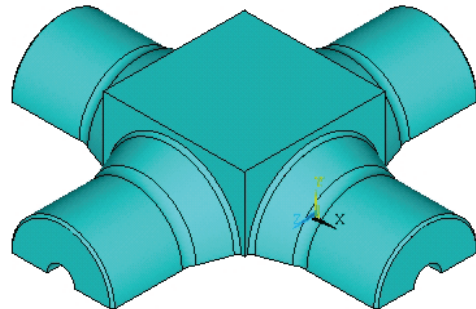
Na slici 9 je prikazan raspored napona na klasičnom rešenju krstastog elementa.



Slika 9. Raspored napona na klasičnom rešenju krstastog elementa

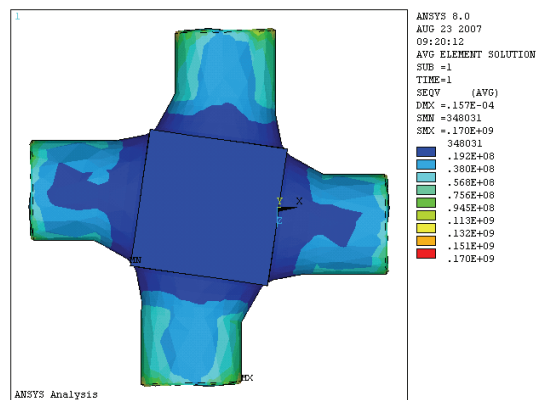
Sa slike 9 se može zaključiti da se maksimalna koncentracija napona (214 Mpa) javlja na prelasku s većeg na manji prečnik, dok se minimalni naponi javljaju na kraju krsta i iznose oko 0,2 do 0,4 MPa

U cilju usvaršavanja ovog elementa izvršena je modifikacija profila krstastog elementa. Višestruki prelazi su zamenjeni sa konusnim prelazom. Na slici 10 je prikazan modifikovani model krstastog elementa.



Slika 10. Modifikovani model krstastog elementa

Raspored napona na modifikovanom krstastom elementu dobijen primenom programskog sistema ANSYS prikazan je na slici 11.



Slika 11. Raspored napona na modifikovanom krstastom elementu



Promenom profila krsta dobijena je bolja koncentracija napona. Maksimalni naponi (170 Mpa) se javljaju na krajevima krsta, dok se minimalni naponi javljaju na prelasku s većeg na manji prečnik i iznose od 0,1 do 0,3 MPa.

#### 4. ZAKLJUČAK

Na osnovu dosadašnjih rezultata dobijenih istraživanjem univerzalnih zglobova može se zaključiti da se optimizacijom oblika viljuške i krstastih elemenata zgloba, može značajno uticati na njihove karakteristike i funkcionalnost. Konkretno, promena profila viljuške zgloba omogućava poboljšanje karakteristika kardanskog vratila sa stanovišta kolizije omogućujući nesmetani prenos kretanja pri značajno većem nagibu vratila.

Sa druge strane modifikacijom oblika krstastog elementa su značajno smanjeni naponi koji nastaju u pojedinim zonama, čime je produžen vek eksploatacije univerzalnog zgloba, a samim tim i kardanskog vratila. Ovakvim unapređenjem krstastog elementa se utiče i na smanjenje napona i elemenata kotrljajnog ležaja na zglobu: valjčica i spoljašnjeg prstena.

Na ovaj način, primenom savremenih metoda projektovanja i inženjerske analize sklopova, se poboljšavaju eksploatacione karakteristike univerzalnih zglobova.

#### 5. LITERATURA

[1] Hesselbach, J., Bier, C., Pietsch, I., Plitea N., Buttgenbach, S., Wogersien A., Guttler, J.: Passive-joint sensors for parallel robots,

Mechatronics, Vol. 15, pp 43–65, Elsevier, 2005, ISSN: 0957-4158

- [2] Reimund Neugebauer, R.: Parallelkinematische Maschinen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 10 3-540-20991-3, 2006
- [3] Shammass, E., Wolf, A., Brown, B., Choset, H.: New Joint Design for Three-dimensional Hyper Redundant Robots, Proceedings of the IEEE/RSJ, Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, Nevada, 2003, ISBN: 078037861X
- [4] Seherr-Thoss, H., Schmelz, F., Aucktor, E.: Universal Joints and Driveshafts, Analysis, Design, Applications, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN-10 3-540-30169-0, 2006

**Napomena:** Rad predstavlja deo istraživanja na projektu "Istraživanje i razvoj kotrljajnih ležajnih sklopova i njihovih komponenti" TR 14048, podržanom od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

**Autori:** Doc. dr Slobodan Tabaković, mr Aleksandar Živković, Prof. dr Ratko Gatalo, redovni profesor u penziji, Prof. dr Milan Zeljković, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Tel.: +381 21 485 2320

Milivoje Mijušković, dipl. ing., „FKL“ a.d., Industrijska zona bb, 21235 Temerin,

E-mail: tabak@uns.ac.rs

acoz@uns.ac.rs

gatalora@uns.ac.rs

milanz@uns.ac.rs

Kosec, B., Karpe, B., Ličen, M., Soković, M., Kosec, L.

## TEMPERATURE FIELD ANALYSIS AT INDUCTIVE HEATING AND QUENCHING OF PLANETARY SHAFTS

**Abstract:** In the frame of our work, we discuss a complex process of inductive heating and quenching of carbon steel planetary shafts for diesel engine starters.

Planetary shafts assembled in starters are subjected to high mechanical and thermal loads during their exploitation.

Surface temperature measurements during the induction spin hardening process were realized in the industrial environment of Slovenian company ISKRA Avtoelektrika d.d.

The intensity and homogeneity of temperature fields on the surface of the planetary shafts were measured by thermographic camera.

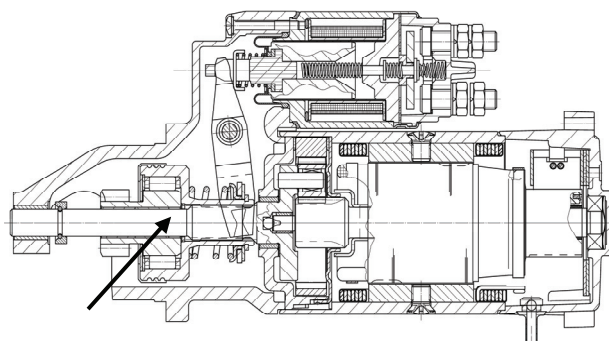
On the measurements base and theoretical knowledge, a mathematical model for temperature conditions determination in the shaft during the entire process of heating and quenching was carried out. On the basis of developed mathematical model a computer program was developed, and used for analyses and induction hardening process optimization of planetary shaft.

**Key words:** planetary shaft, carbon steel, temperature field, inductive heating, quenching

### 1. INTRODUCTION

Slovenian company ISKRA Avtoelektrika d.d. is one of the largest European producers of electrical components and equipment for automotive, construction, transport and agriculture mechanization industry.

High mechanical and temperature cyclic loading of the final product, during its exploitation, demands sufficient mechanical properties of all of its components. Majority of the components is made from steel, by different cold forming processes [1]. Their main demanded characteristics are surface wear resistance and fatigue strength under pulsating stress in combination with cyclic temperature loading, which could be achieved only by appropriate heat treatment [2,3]. Combination of inductive heating and water quenching is the most effective heat treatment process [4,5] of carbon steel planetary shafts for the diesel engine starters (see Figure 1).



PLANETARY SHAFT

Figure 1. Starter of diesel engine with planetary shaft. Dimensions of the shaft are  $\varnothing 14 (60) \times 155 (10)$  mm.

### 2. MATERIAL

The planetary shaft is made from the well known CK 45 [6] steel (W. Nr. 1.1191), which is the most applied material for this kind of mechanical parts. The chemical composition of the steel is given in the Table 1.

Table 1. Chemical composition of CK 45 steel [6]

Element	Standard (mass. %)	Measurements (mass. %)
C	0.47 – 0.50	0.48
Si	$\leq 0,40$	0.24
Mn	0.70 – 0.80	0.71
P	$\leq 0035$	0.020
S	0.02 – 0.04	0.026
Cr	0.17 – 0.25	0.17
Mo	$\leq 0.10$	0.009
Ni	$\leq 0.40$	0.004
(Cr+Mo+Ni)	$\leq 0.63$	0.183

### 3. DEVICE DESCRIPTION

The inductive spin-hardening device 3KTC (100 kW; 100 kHz) (Figure 2), which is used in Slovenian company ISKRA Avtoelektrika d.d. for induction spin-hardening thermal treatment of different mechanical parts and components was made by Italian company SAET from Turin.

Device is designed for spin case-hardening treatment of cylindrical shape products from 12 to 32 mm in diameter and 100 to 500 mm length, respectively (Figure 3).



Figure 2. The spin case-hardening device 3KTC.

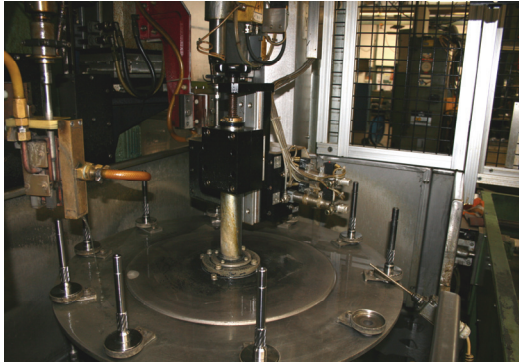


Figure 3. Device 3KTC - Inductor and manipulation system detail.

#### 4. TEMPERATURE MEASUREMENTS

During induction heat treatment process the planetary shaft turns around its axis, which ensures uniform heating all over the surface and through the cross section. Temperature of the surface changes extremely rapidly between room temperature and 1120 °C. Rotational speed is approximately 10 rev/sec. Optimal heating time for required properties of planetary shaft is 2.5 seconds followed by 1.5 second quenching period with water emulsion. After that, planetary shaft is ejected from manipulating system and cooled down in surrounding air.



Figure 4. Thermographic camera ThermoCAM PM675.

For planetary shaft surface temperature determination we used thermographic camera ThermoCAM PM675 FLIR System (Figure 4). Our measurements were made in cooperation with TERMING d.o.o. company from Ljubljana.

Because automatic predetermination of emissivity in thermographic camera as thermal black body ( $\epsilon=1$ ), real emissivity value must be determined before temperature measurements. As is well known, emissivity is dependent upon material, surface condition and temperature [7]. According to literature data for CK 45 steel, its value varies between 0.6 and 0.9, according to temperature and surface condition [8].

In our case of induction heating process, surface temperature varies between room temperature and 1120 °C. Furthermore, quality of surface changes from polished to heavily oxidized, which has significant influence on emissivity value. Because induction heating is a very fast

process, we had to determine emissivity as engineering correct constant for the whole temperature range and surface mutation.

For determination of real value of emissivity, we made comparative temperature measurements with Isotech T.T.I.-7 thermograph and thermographic camera of the same planetary shaft, heated in electro-resistance furnace. Best fitting emissivity value for thermographic camera was 0.7.

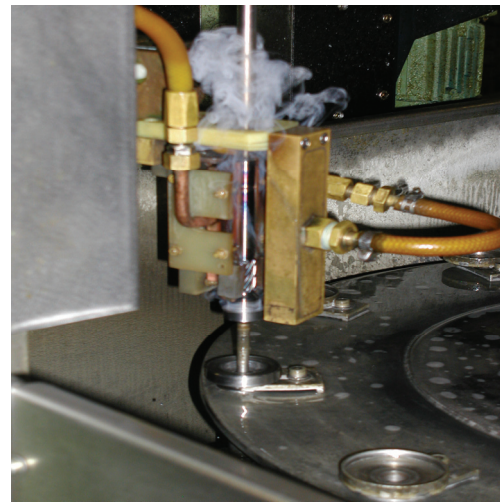
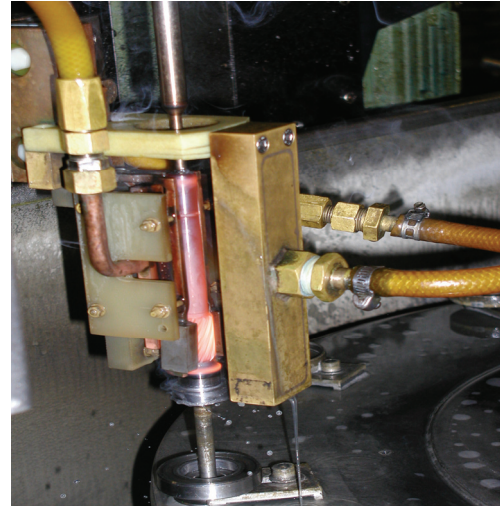


Figure 5. Chronological review of induction case-hardening process.



Several thermographic snaps (Figure 6) were recorded at regular intervals of induction heating (entire heating time is approximately 2.5sec.) Thermographic record (Figure 6 - above) is showing temperature profile on a surface of planetary shaft after 0.5 second and thermographic record (Figure 6 - below) after 2.5 second of induction heating. Maximum measured temperature on bevel gear surface was 1120°C.

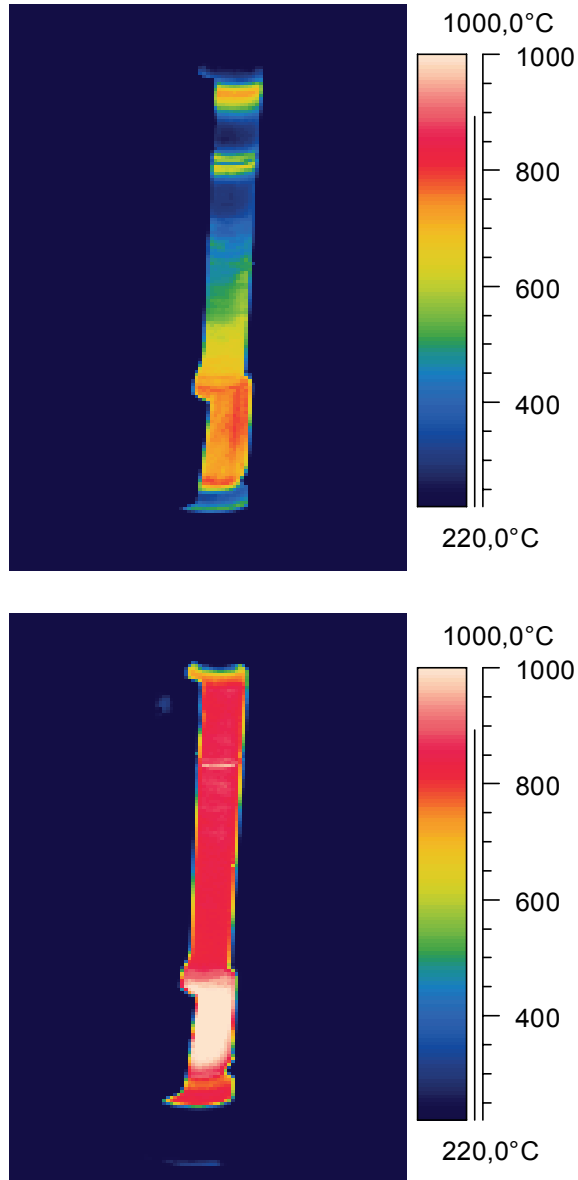


Figure 6. Thermograph records: Above: At the beginning of induction heating (0.5 sec). Below: At the end of induction heating (2.5 sec).

## 5. MATHEMATICAL MODEL

Primary task of our work was to develop a mathematical model for thermal field calculation inside the planetary shaft during inductive heating and quenching, which would enable examination of temperature distribution at any time of induction heat treatment. Mathematical model is based upon different assumptions and boundary conditions:

- planetary shaft is approximated as constant cross section cylinder
- material of the shaft is homogeneous and isotropic

- starting temperature field in the shaft is homogeneous and equal to the of the surrounding temperature
- mathematical model doesn't consider released or consumed latent heat at the allotropic phase changes
- because a "skin effect" phenomenon at the inductive heating, temperature at 0.2 mm below the surface has the same temperature as surface
- surface temperature during induction heating is determined with thermographic camera measurements
- during induction heating period, surface temperature rises between separate intervals monotonically to the measured temperatures for those particular intervals
- average heat transfer coefficient in quenching period with water-emulsion is determined backwards, after microstructure observations of trial precursors
- thermal properties are temperature dependant
- density is assumed as a constant during entire induction spin case-hardening process.

Temperature field in any solid body is monotonous function of time and space. For temperature distribution calculation inside planetary shaft we used cylindrical coordinate system. General form of heat conduction equation in cylindrical coordinate system in three dimensional (3D) forms is given by:

$$\frac{1}{r} \cdot (\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial r} \cdot (\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{1}{r^2} \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \cdot (\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial \varphi}) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot (\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z}) + q''' = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

where:

- $r, \varphi, z$  ..... cylindrical coordinate system [m; rad; m]
- $T$  ..... temperature [K]
- $\rho = \rho(T)$  ..... density [kg/m<sup>3</sup>]
- $\lambda = \lambda(T)$  ..... thermal conductivity [W/mK]
- $c = c(T)$  ..... specific heat [J/kgK]
- $q'''$  ..... volumetric heat generation rate [W/m<sup>3</sup>].

Because planetary shaft turns around its axis during entire induction spin case-hardening process, surface temperature is homogenous ( $\frac{\partial T}{\partial \varphi} = 0$ ), and we could make an assumption

of two-dimensional (2D) transient heat transfer. Assuming 2D transient heat transfer with variable thermal properties and no internal heat generation or consumption, general partial differential equation reduces to:

$$\frac{1}{r} \cdot (\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial r} \cdot (\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} \cdot (\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial z}) = \rho \cdot c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

For calculation of temperature distribution inside planetary shaft we used explicit finite difference method (FDM), where thermal properties ( $\lambda, c$ ) at given temperature are calculated for every time step with Lagrange interpolation.

## 6. RESULTS

Figure 7 shows numerical results of temperature distribution through the cross section 5 mm beneath upper groove for the case of induction heating (2.5 second) and quenching (1.5 second) with water-emulsion. Average heat transfer coefficient in quenching period was determined on the basis of microstructure observation of trial precursors. Best fit value was 35000 W/m<sup>2</sup>K.



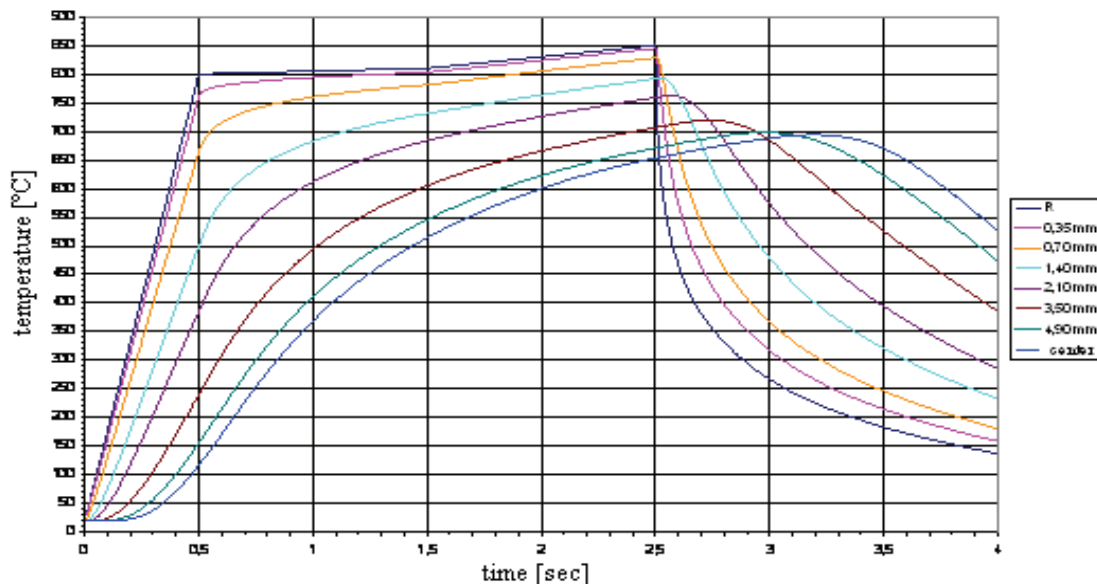


Figure 7. Temperature field in planetary shaft during induction hardening process ( $htc = 35000 \text{ W/m}^2\text{K}$ )



Figure 8. Heat treated shaft (left). Longitudinal cross-section of planetary shaft. Cutting was made with water jet cutting machine. Thickness of hardened case is approximately 1.4 mm (right).

## 7. CONCLUSIONS

In our research work, we analysed induction spin hardening process of carbon steel planetary shafts for diesel engine starters. Surface temperature thermographic camera measurements of planetary shaft during induction spin-heating period were carried out in industrial environment of Slovenian company Iskra Avtoelektrika d.d.. For accurate temperature measurement with thermographic camera, we made comparative temperature measurements with thermograph and thermographic camera of the same planetary shaft, heated in electro-resistant furnace. Best fit emissivity value for thermographic camera was 0.7.

On the basis of our mathematical model we developed a computer program for temperature distribution calculation inside planetary shaft. Boundary condition for numerical calculations ( $htc = 35000 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) was determined backwards, after microstructure observation of test precursors. On the basis of the numerical results we optimized heating and quenching time for induction hardening process of planetary shaft. Induction spin hardened planetary shaft was substantially deformed during water jet cutting. Therefore

next reasonable step would be calculation of stress-strain state in planetary shaft.

## 8. REFERENCES

- [1] Kosec, B., Brezigar, M., Kosec, G., Bernetič, J., Bizjak, M.: *Heat Treatment of Cold Formed Steel Forgings for the Automotive Industry*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, Vol. 22, No. 2, 87 – 90, 2007.
- [2] Totten, G.E., Howes, M.A.H: *Steel Heat Treatment*, Marcel Dekker, New York, 1997.
- [3] Cannale, M.L.C.F., Mesquita, R.A., Totten, G.E.: *Failure Analysis of Heat Treated Steel Components*, ASM International, Materials Park, Ohio, 2008.
- [4] Brooks, C.R: *The Metallurgy of Induction Surface Hardening*, Advanced Materials & Processes, Vol. 5, No. 12, 19 – 23, 2000.
- [5] Rudnev, V.: *Handbook of Induction Heating*, Marcel Dekker, New York – Basel, 2003.
- [6] Jocić, B.: *Steels and Cast Irons*, BIO-TOP, Dobja Vas, 2008.
- [7] Machalski, L., Eckersdorf, K., McGhee, K.: *Temperature Measurement*, John Wiley and Sons, Chichester, 1991.
- [8] Kaviany, M.: *Principles of Heat Transfer*, John Wiley & Sons, New York, 2002.
- [9] Kosec, B., Kolenko, T.: *Temperature Field in the Working Rolls at Continuous Roll Casting of Aluminium Strips*, Metallurgy, Vol. 36, No.4, 215 - 218, 1997.

**Authors: Prof. dr. Borut Kosec, Assist. Blaž Karpe, Prof. dr. Ladislav Kosec**, University of Ljubljana, Faculty of Natural Sciences and Engineering, Aškerčeva c. 12, SI-1000 Ljubljana, Slovenia, Tel.: +386 1 2000 410, Fax: +386 1 4704 560. **M.Sc. Metod Ličen**, ISKRA Avtoelektrika d.d., Polje 15, SI-5290 Šempeter, Slovenia, Tel.: +386 5 3393 000, Fax: +386 5 3393 801. **Prof. dr. Mirko Sokovič**, University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Aškerčeva c. 6, SI-1000 Ljubljana, Slovenia, Tel.: +386 1 4771 214, Fax: +386 1 2518 567.

E-mail: [borut.kosec@ntf.uni-lj.si](mailto:borut.kosec@ntf.uni-lj.si)  
[blaz.karpe@ntf.uni-lj.si](mailto:blaz.karpe@ntf.uni-lj.si)  
[metod.licen@iskra-ae.com](mailto:metod.licen@iskra-ae.com)  
[mirko.sokovic@fs.uni-lj.si](mailto:mirko.sokovic@fs.uni-lj.si)  
[ladislav.kosec@ntf.uni-lj.si](mailto:ladislav.kosec@ntf.uni-lj.si)

Todić, V., Milošević, M., Lukić, D.

## PODLOGE ZA RAZVOJ STANDARDNIH TEHNOLOŠKIH PROCESA PROIZVODNJE KOTRLJAJNIH LEŽAJA

*Rezime:* Standardni tehnološki procesi proizvodnje kotrljajnih ležaja čine osnovu za organizaciju i efikasnu realizaciju procesa serijske i masovne proizvodnje ovih proizvoda.

U radu su prikazane podloge za razvoj standardnih tehnoloških procesa izrade kugličnih, valjkastih, buričastih i igličastih ležaja, raznih tipiziranih konstrukcionih rešenja, koji se proizvode u uslovima posmatranog proizvodnog sistema.

**Cljučne reči:** Ležaji, Standardni tehnološki proces, Podloge

## FOUNDATION FOR DEVELOPMENT OF THE STANDARD PROCESS PLANS FOR ROLLING BEARINGS MANUFACTURING

*Abstract:* Standard process plans for rolling bearings manufacturing are fundament of organization of manufacturing of these products.

This paper introduces basic information about standard process plans for manufacturing of ball, cylindrical roller, spherical roller and needle roller bearings, and also typical design solutions of products from this manufacturing systems.

**Keywords:** Rolling bearings, Standard process plans, Foundation

### 1. UVOD

Serijska i masovna proizvodnja širokog asortimana kotrljajnih ležaja, kao što su valjkasti, buričasti, kuglični i igličasti, sa brojnim tipiziranim konstrukcionim rešenjima u okviru pomenutih grupa, zahteva razvoj tehnoloških procesa njihove proizvodnje sa visokim stepenom standardizacije, zasnovane na principima tipske i grupne tehnologije.

Pri razvoju standardnih tehnoloških procesa, osim asortimana proizvodnje kotrljajnih ležaja i obima proizvodnje, neophodno je uzeti u obzir i instalisanu tehnološku opremu za proizvodnju ležaja.

Razvojem standardnih tehnoloških procesa proizvodnje kotrljajnih ležaja obezbediće se sledeći, najvažniji ciljevi:

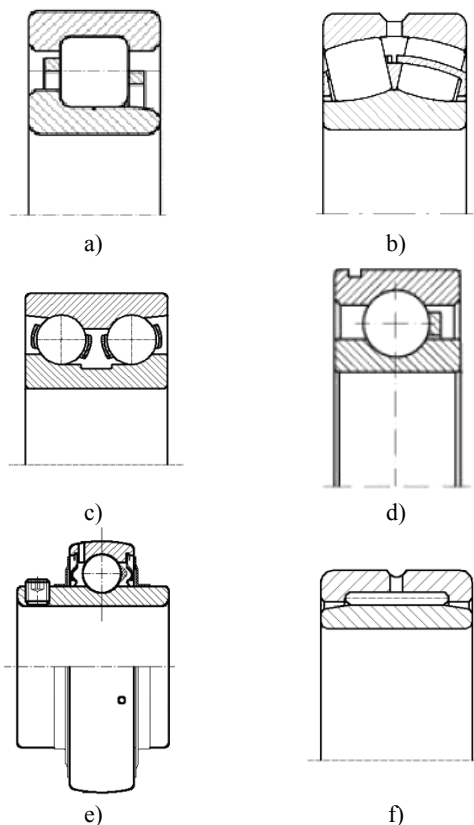
- Efikasnija organizacija i realizacija tehnoloških i proizvodnih procesa,
- Kvalitetnije planiranje i upravljanje proizvodnjom,
- Smanjenje broja tehnoloških tokova,
- Bolje planiranje i kontrola korišćenja tehnoloških kapaciteta,
- Povećana fleksibilnost prema zahtevima tržišta,
- Efikasniji rad tehnološke pripreme proizvodnje, itd.

Razvoj standardnih tehnoloških procesa proizvodnje kotrljajnih ležaja u posmatranom proizvodnom sistemu, kao predmet istraživanja u ovom radu, odnosi se na standardne tehnološke procese izrade prstenova pojedinih ležaja, dok se ostale pozicije ovde neće razmatrati.

### 2. KRATKI PRIKAZ PROGRAMA PROIZVODNJE KOTRLJAJNIH LEŽAJA

Prikaz i određena analiza programa proizvodnje izvršena je na osnovu odgovarajućih podataka za 2008. godinu.

U okviru ove analize utvrđene su realizovane količine proizvodnje za pomenute vrste ležaja, a primenom ABC analize određeni su i proizvodi predstavnici za pojedine grupe ležaja [1], koji su prikazani na slici 1.



Slika 1. Proizvodi-predstavnici formiranih grupa kotrljajnih ležaja: a) valjkasti, b) buričasti, c) radialni kuglični dvoredni, d) radialni kuglični jednoredni i radialni kuglični jednoredi podešljivi, e) radialni kuglični jednoredi podešljivi sa vijkom za pritezanje, f) igličasti

Na osnovu analize programa proizvodnje kotrljajnih ležaja za 2008. godinu, utvrđene su količine, odnosno realizovani obimi proizvodnje, kako za pojedine ležaje, tako i ukupni obim proizvodnje za formirane grupe, a rezultati te analize dati su u tabeli 1.

OZNAKA GRUPE	GRUPA LEŽAJA	BROJ TIPIZIRANIH LEŽAJA U GRUPI	UKUPNI OBIM PROIZVODNJE
			(kom/god)
A	Valjkasti	8	401619
B	Buričasti	7	294
C	Radijalni kuglični dvoredni	2	29335
D	Radijalni kuglični jednoredni	12	353455
	Radijalni kuglični jednoredni podešljivi	10	
E	Radijalni kuglični jednoredni podešljivi sa vijkom za pritezanje	7	352674
F	Igličasti	1	669

Tabela 1. Program proizvodnje kotrljajnih ležaja za 2008. god

Geometrijska sličnost spoljašnjih i unutrašnjih prstenova kotrljajnih ležaja, a posebno geometrijska istovetnost tipiziranih konstrukcionih rešenja u okviru formiranih grupa, omogućuju da se definišu podloge za razvoj standardnih tehnoloških procesa proizvodnje, zasnovanih na principima tipske i grupne tehnologije.

Formirane grupe kotrljajnih ležaja, koje čine brojna tipizirana konstrukciona rešenja sa širokim opsegom dimenzija [5], zadani obim proizvodnje pojedinih ležaja i intalisana tehnološka oprema, čine osnovu za definisanje podloga za razvoj standardnih tehnoloških procesa proizvodnje.

### 3. PODLOGE ZA RAZVOJ STANDARDNIH TEHNOLOŠKIH PROCESA

U uslovima posmatranog proizvodnog sistema za proizvodnju prikazanog programa proizvodnje kotrljajnih

ležaja može se definisati grupni tehnološki proces, sa sledećim sadržajem:

- *Odsecanje*
- *Struganje*
- *Bušenje*
- *Urezivanje navoja*
- *Termička obrada*
- *Brušenje strana*
- *Brušenje spolja*
- *Brušenje staze kotrljanja*
- *Brušenje otvora*
- *Superfinsiširanje*
- *Demagnetizacija*
- *Završna kontrola*

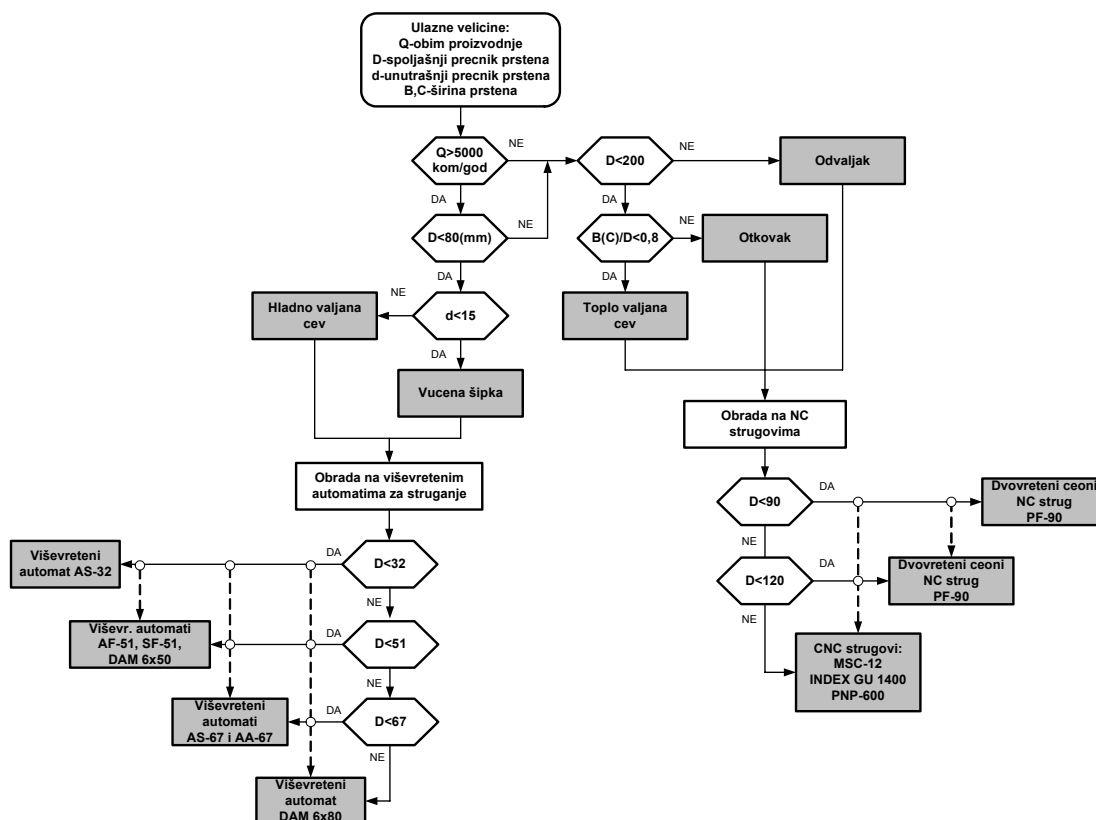
Za proizvodnju spoljašnjih i unutrašnjih prstenova kotrljajnih ležaja u posmatranom proizvodnom sistemu koriste se različite vrste priprema, što zavisi od obima proizvodnje i dimenzija prstenova.

Vrste priprema, obim proizvodnje i dimenzije prstenova posmatranih grupa kotrljajnih ležaja zahtevaju alternativna tehnološka rešenja na ključnim operacijama obrade, kao što su obrada struganjem i brušenjem.

Definisanjem pravila za izbor odgovarajućih tehnoloških rešenja, odnosno, izbor obradnih sistema na ovim operacijama obrade, stvorene su podloge za razvoj standardnih tehnoloških procesa proizvodnje, jer druge operacije koje čine grupni tehnološki proces ostaju iste.

#### 3.1 Podloge za izbor obradnih sistema za struganje prstenova

U zavisnosti od obima proizvodnje i dimenzija prstenova ležaja, na slici 2 su definisane podloge za izbor obradnih sistema za operacije obrade struganjem, sa odgovarajućim internim nazivima i oznakama.



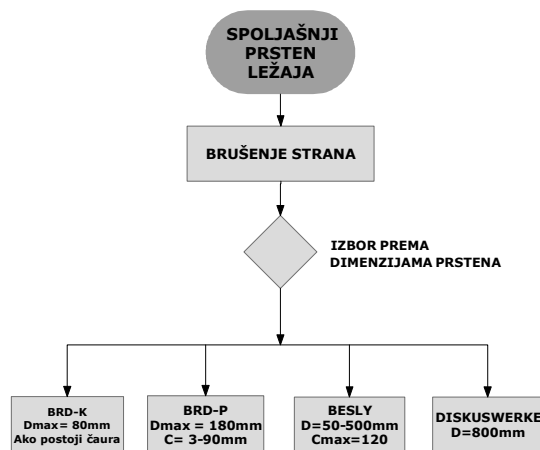
Slika 2. Podloge za izbor obradnih sistema za obradu struganjem prstenova kotrljajnih ležaja

### 3.2 Podloge za izbor obradnih sistema za brušenje spoljašnjih prstenova

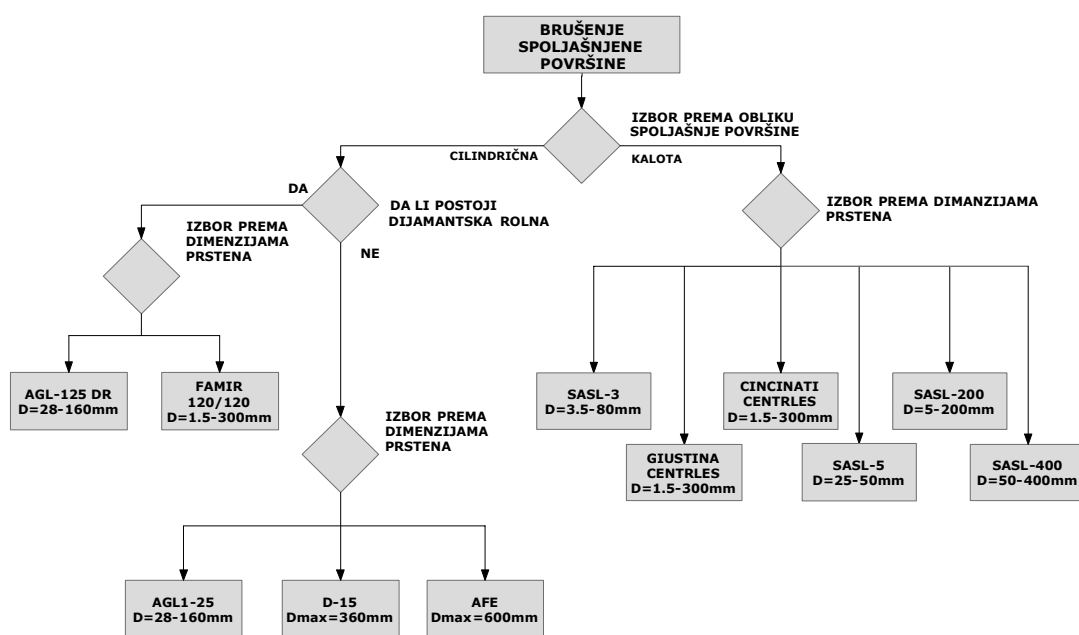
Brušenje spoljašnjih prstenova obuhvata tri operacije obrade, odnosno brušenje čeonih površina, spoljašnjeg prečnika i staze kotrljanja.

Izbor obradnih sistema za brušenje ravnih, odnosno čeonih površina, vrši se na osnovu spoljašnjeg prečnika (D) i širine (C), slika 3.

Izbor obradnih sistema za brušenje spoljašnjeg prečnika spoljašnjeg prstena vrši se na osnovu podloga koje su date na slici 4, u zavisnosti od oblika i prečnika spoljašnje površine

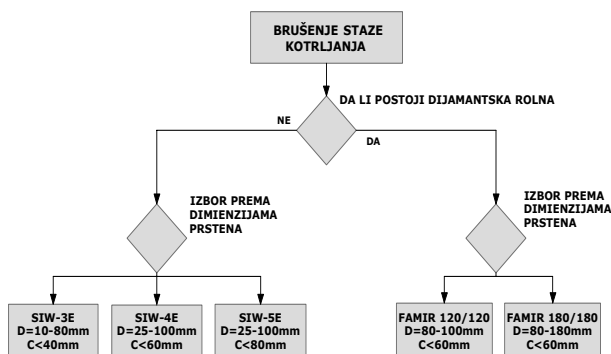


Slika 3. Podloge za izbor obradnih sistema za brušenje čeonih površina spoljašnjih prstenova



Slika 4. Podloge za izbor obradnih sistema za brušenje spoljašnje površine spoljašnjih prstenova

Za brušenje staza kotrljanja, kao profilnih površina spoljašnjeg prstena, mogu se izabrati obradni sistemi na osnovu podloga koje su date na slici 5.

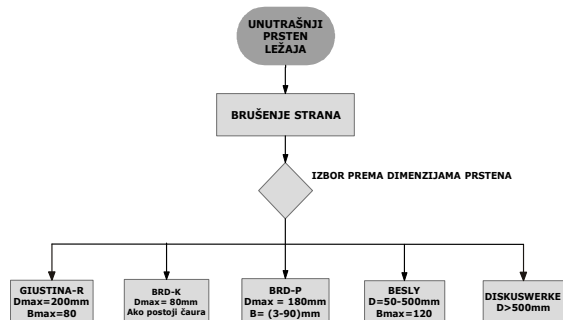


Slika 5. Podloge za izbor obradnih sistema za brušenje staze kotrljanja spoljašnjih prstenova

### 3.3 Podloge za izbor obradnih sistema za brušenje unutrašnjih prstenova

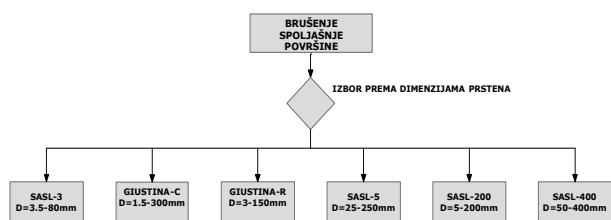
Brušenje unutrašnjih prstenova obuhvata brušenje čeonih površina, staza kotrljanja i brušenje otvora.

Izbor obradnih sistema za ravno brušenje čeonih površina unutrašnjih prstenova, prema slici 6, vrši se na osnovu prečnika i širine prstena, a za brušenje staze kotrljanja izbor obradnih sistema vrši se na osnovu spoljašnjeg prečnika unutrašnjeg prstena, slika 7.



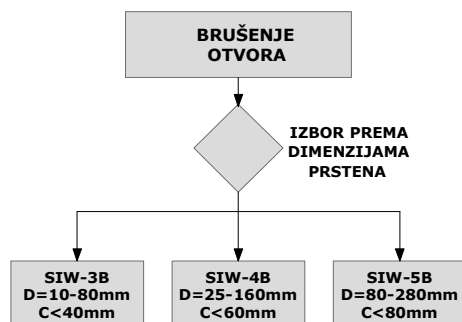
Slika 6. Podloge za izbor obradnih sistema za brušenje čeonih površina unutrašnjih prstenova





Slika 7. Podloge za brušenje staze kotrljanja unutrašnjih prstenova

Izbor obradnih sistema za brušenje otvora unutrašnjeg prstena vrši se, prema slici 8, na osnovu prečnika (D) i širine prstena (C).

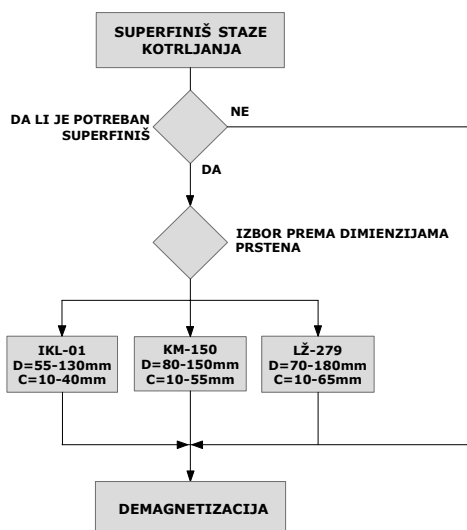


Slika 8. Podloge za izbor obradnih sistema za brušenje otvora unutrašnji prstenova

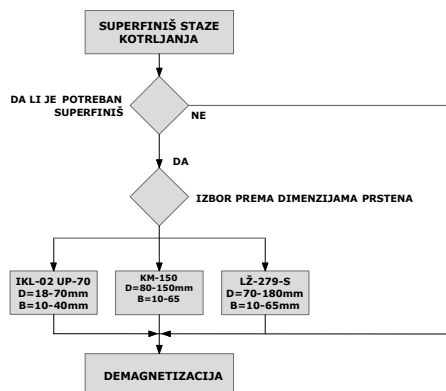
### 3.4 Podloge za izbor obradnih sistema za superfiniš staza kotrljanja

Izbor obradnih sistema za obradu staza kotrljanja superfinišom, vrši se, za spoljašnje prstenove na osnovu podloga koje su date na slici 9, a za unutrašnje prstenove na osnovu podloga koje su date na slici 10.

U oba slučaja izbor obradnih sistema vrši se na osnovu spoljašnjeg prečnika (D) i širine prstena (C), odnosno (B).



Slika 9. Podloge za izbor obradnih sistema za superfiniš staze kotrljanja spoljašnjih prstenova



Slika 10. Podloge za izbor obradnih sistema za superfiniš staze kotrljanja unutrašnjih prstenova

Ovako definisane podloge za izbor obradnih sistema za operacije obrade struganjem, brušenjem i superfinišom, omogućuju da se za sve kotrljajne ležaje obuhvaćene predmetnom analizom efikasno definišu odgovarajući standardni tehnološki procesi proizvodnje.

## 4. ZAKLJUČCI

Razvijene podloge za izbor obradnih sistema za operacije obrade struganjem, brušenjem i superfiniširanjem prstenova ležaja omogućuju razvoj standardnih tehnoloških procesa proizvodnje ovih proizvoda u posmatranom proizvodnom sistemu.

Standardni tehnološki procesi proizvodnje ležaja, koji su razvijeni primenom koncepta tipske i grupne tehnologije, kao i podloge za izbor obradnih sistema na pomenutim ključnim operacijama, čine čvrstu osnovu za razvoj CAPP sistema za projektovanje tehnoloških procesa proizvodnje ovih proizvoda.

## 5. LITERATURA

- [1] Mitrofanov, P. S.: *Naučnaja organizacija mašinstroiteljnoga proizvodstva*, Mašinstrojenje, Lenjingrad, 1976.
- [2] Eversheim, W., Schneewind, J.: *Computer-Aided Process Planning – State of the Art and Future Development*, Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, Vol.10, No1/2, pp 65-70, 1993.
- [3] Todić, V., Lukić, D., Milošević M.: *Analiza tehnoloških procesa izrade kotrljajnih ležaja*, 9. Međunarodno savetovanje o dostignućima elektro i mašinske industrije - DEMI 2009, Mašinski Fakultet Banja Luka, maj 2009.
- [4] Todić, V., Mijušković, M., Milošević, M., Živković, A.: *Prikaz i analiza konstrukcionih rešenja HUB integrisanih ležaja*, 8. Međunarodno savetovanje o dostignućima elektro i mašinske industrije - DEMI 2007, str. 107-114, Mašinski fakultet, Banja Luka, 2007. ISBN 978-99938-39-15-6.
- [5] FKL Kotrljajući ležaji, katalog, Novi Sad, 2004.

**Autori:** Prof. dr Velimir Todić, mr Mijodrag Milošević, mr Dejan Lukić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel.: +381 21 485-2346, Fax: +381 21 454-495.

E-mail: [todvel@uns.ns.ac.yu](mailto:todvel@uns.ns.ac.yu)  
[mido@uns.ns.ac.yu](mailto:mido@uns.ns.ac.yu)  
[lukicd@uns.ns.ac.yu](mailto:lukicd@uns.ns.ac.yu)

*Napomena:* Rad predstavlja deo istraživanja na projektu "Razvoj tipskih tehnoloških procesa izrade kotrljajnih ležaja", ev. broj projekta TR 14053 koji finansira Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.

Živković, A., Zeljković, M., Borojev, Lj.

## NELINEARNI MATEMATIČKI MODEL ZA ANALIZU STATIČKOG PONAŠANJA KUGLIČNIH LEŽAJEVA

**Rezime:** U radu je prikazan matematički model za određivanje deformacija i ugla kontakta visokobrzinskih kugličnih ležajeva sa kosim dodirom, pod dejstvom sile prednapreznja. Analiza takođe uključuje dejstvo centrifugalne sile i nelinearnu zavisnost između opterećenja i deformacija. Deformacije ležaja i ugao kontakta između kotrljajnih tela i staza kotrljanja se menja u zavisnosti od prednapreznja, zone opterećenja i brzine kaveza. Deformacije i promena ugla kontakta su određene na bazi geometrije kotrljajnih tela i staza kotrljanja, Hertz-ove teorije kontakta, uslova statičke ravnoteže i John-Harris-ove metode raspodele opterećenja. Sistemi nelinearnih jednačina se rešavaju primenom Newton-ove metode. Rezultati analize dobijeni postavljenim matematičkim modelom su poređeni sa rezultatima dobijenim metodom konačnih elemenata i Palmgren-ovim empirijskim relacijama.

**Ključne reči:** Ugao kontakta, kontaktno opterećenje, aksijalne deformacije

## NONLINEAR MATHEMATICAL MODEL FOR THE ANALYSIS OF STATIC BEHAVIOUR BALL BEARING

**Abstract:** The paper presents a mathematical model for determining the deformations and the angle of contact high-speed ball bearing with contact angle, under the influence of preload and external load. The analysis also includes the effect of centrifugal force and non-linear relationship between load and deformation. Deformation of bearing and the contact angle between the ball and raceway changes depending on the preload, zone load and speed cage. Deformations and changes in contact angle were determined on the basis of geometry ball and raceways, Hertz's contact theory, conditions of static equilibrium and John-Harris's methods of distribution of loads. Systems of nonlinear equations are solved by applying Newton's method. Results of analysis obtained by the established mathematical model of the compare with the results obtain finite element method and Palmgren empirical equation.

**Keywords:** Contact angle, contact load, axial deformation

### 1. UVOD

Promena ugla kontakta ima značajan uticaj na deformacije i aksijalnu krutost ležajeva, što za posledicu ima promenu statičkog i dinamičkog ponašanja samog ležaja. Povećanjem broja obrtaja raste centrifugalna sila. Pod njenim dejstvom se smanjuje površina kontakta između unutrašnjeg prstena i kotrljajnog tela. Sa druge strane povećanjem centrifugalne sile smanjuje se ugao kontakta prema spoljašnjoj stazi kotrljanja ležaja, što za posledicu ima smanjenje sila kontakta i povećanje ugla kontakta na unutrašnjem prstenu. Povećanje razlike ugla kontakta između kotrljajnog tela, unutrašnjeg i spoljašnjeg prstena, smanjuje krutost ležaja. Iz prethodnog se može zaključiti da se povećanjem broja obrtaja, mora povećavati i sila prednapreznja u ležaju da bi se obezbedio kontakt između kotrljajnih tela i staza kotrljanja.

Analiza raspodele opterećenja na ležaju treba da uključi i nelinearno dejstvo sila kontakta između kotrljajnih tela i staza kotrljanja preko Hertz-ove teorije kontakta.

Danas se veći broj autora bavi razmatranjem kontaktnih sila i deformacija na bazi Hertz-ove teorije kontakta [8], [9], [10], [11], ili na bazi eliptičnih integrala [2], [4]. Adams i Nosonovsky [1] su napravili presek dosadašnjih istraživanja sila kontakta i deformacija.

Analitički pristup određivanja veze između sila i deformacija je prikazan u radu [3] i delimično se bazira na kinematici kugličnih ležaja pri delovanju sila usled obrtanja kotrljajnih tela. Mnogi autori su probleme ponašanja kugličnih ležaja, kao što su opterećenja [7], matrice krutosti [5] ili promene ugla kontakta [10], [2] rešavali numeričim

metodama.

U prvom delu ovog rada je korišćena Hertz-ova teorija kontakta za određivanje veze između deformacija i opterećenja. U drugom delu rada se razmatra uticaj prednapreznja na promenu ugla kontakta i deformacija ležaja. Ovaj ugao kontakta je određen analitičkim putem na bazi John-Harris-ove raspodele opterećenja. U nastavku drugog dela je prikazan matematički model za određivanje promene ugla kontakta između kotrljajnog tela i spoljašnje/unutrašnje staze kotrljanja. usled dejstva sile prednapreznja, centrifugalne sile, giroskopskog momenta i brzine obrtanja.

### 2. MATEMATIČKI MODEL KONTAKTA

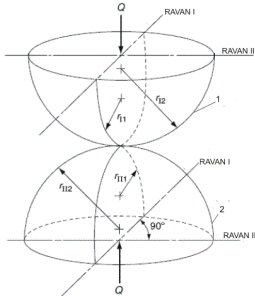
U zonama dodira kotrljajnih tela i staza kotrljanja već pri normalnim silama nastaju naponi u glavnim pravcima koji su daleko iznad uobičajenih kod ostalih mašinskih elemenata. Statički posmatrano, oslonac staza kotrljanja-kotrljano tela-staza kotrljanja, predstavlja neodređeni sistem. Takav sistem je teško rešiv uobičajenim metodama, i postaje veoma kompleksan kada se u obzir uzmu i uticaji zazora u ležaju kao i promena ugla kontakta usled dejstva kako statičkih sila tako i centrifugalnih sila i giroskopskog momenta.

Da bi se u potpunosti odredile statičke karakteristike ležaja kao što su raspored opterećenja u ležaju, elastične deformacije, krutost i promena ugla kontakta, moraju se postaviti jednačine ravnoteže koje su nelinearne. Rešavanje tako postavljenih jednačina zahteva poznavanje unutrašnje geometrije ležaja.

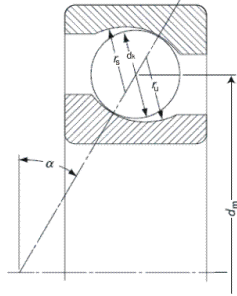
## 2.1 Geometrija ležaja

Dodir dva zakrivljena tela je definisan Hertz-ovom teorijom kontakta [7], [8], [9] slika 1.

Za proračun dodira dva tela i površinskih pritisaka koji pri tome nastaju, znatnu ulogu imaju radijusi zakrivljenosti ( $r_{11}$ ,  $r_{12}$ ,  $r_{111}$ ,  $r_{112}$ ) koji se kod kotrljajnih ležajeva uvek poklapaju sa glavnom ravni krivina (slika 2). Ako se posmatra aksijalni presek ležaja, vidi se da je profil konveksnog kotrljajnog tela više zakrivljen od profila konkavne staze, što znači da kotrljajno telo i staza kotrljanja ostvaruju kontakt u jednoj tački. Ovakav tip kontakta postoji kod svih kugličnih ležaja.



Slika 1 Šematski prikaz kontakta dva tela [8]



Slika 2. Šematski prikaz kugličnog ležaja [9]

Pod pretpostavkom da oba tela u tački kontakta imaju zajedničku tangentnu ravan i zajedničku normalu u kojoj leži sila opterećenja kontakt između kotrljajnog tela i staza kod kugličnih ležaja sa kosim dodirnom se definiše preko:

1. Zbira radijusa zakrivljenosti

$$\Sigma \rho_u = \frac{1}{d_k} \left( 4 - \frac{1}{r_s} - \frac{2\gamma}{1-\gamma} \right) \quad (1)$$

2. Razlike zakrivljenosti

$$F_{(\rho)u} = \frac{\frac{1}{r_s} - \frac{2\gamma}{1-\gamma}}{4 - \frac{1}{r_s} - \frac{2\gamma}{1-\gamma}} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{d_k \cos \alpha_0}{d_m} \quad (3)$$

gde je:  $d_k$ -prečnik kuglice,  $r_u$  i  $r_s$  radijusi unutrašnje odnosno spoljašnje staze kotrljanja,  $d_m$  srednji prečnik ležaja,  $\alpha_0$  nazivni ugao kontakta.

## 2.2 Veza između deformacija i opterećenja

Na osnovu Hertz-ove teorije kontakta [8] može se definisati kontaktno opterećenje ležaja kao:

$$Q = K_n \delta_n^{1,5} \quad (4)$$

Normalno pomeranje između staza kotrljanja koje su pod opterećenjem je zbir pomeranja između kotrljajnog tela i staza kotrljanja. Odatle sledi [9]:

$$\delta_n = \delta_u + \delta_s \quad (5)$$

pa je krutost ležaja duž linije kontakta  $K_n$ , u funkciji kontaktne krutosti kotrljajnog tela i staza kotrljanja:

$$K_n = \left( \left( \frac{1}{K_s} \right)^{2/3} + \left( \frac{1}{K_u} \right)^{2/3} \right)^{-3/2} \quad (6)$$

U prethodnom izrazu  $K_s$  i  $K_u$  su kontaktne krutosti između kotrljajnog tela, spoljašnje odnosno unutrašnje staze kotrljanja.

Kontaktne krutosti dva tela zavisi od geometrije i mehaničkih karakteristika materijala ležaja i može se odrediti iz relacije [7], [8]:

$$K_{s/u} = 1,6568 \cdot \left( \frac{\Sigma \rho_{s/u}}{\delta_{s/u}^*} \right)^{-1/2} \cdot \left[ \frac{1-\nu_k}{E_k} + \frac{1-\nu_{s/u}}{E_{s/u}} \right]^{-1} \quad (7)$$

## 2.3 Određivanje aksijalnih deformacija i ugla kontakta ležaja usled sile prednaprezanja

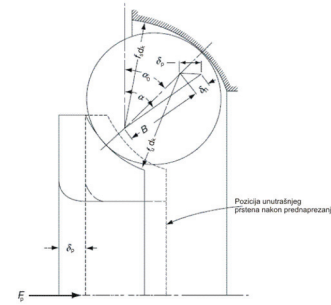
Kod kugličnih ležaja pod dejstvom aksijalnog opterećenja, opterećenje se raspoređuje jednako na sve kotrljajne elemente [9]. Dakle:

$$Q = \frac{F_a}{Z \sin \alpha}; \text{ gde } Z \text{ broj kotrljajnih tela} \quad (8)$$

Ukoliko se zanemari dejstvo centrifugalne sile ugao kontakta  $\alpha$  između kotrljanog tela, spoljašnje i unutrašnje staze kotrljanja je isti. Prema tome on je veći nakon delovanja sile prednaprezanja (slika 2). Sila prednaprezanja na unutrašnjem prstenu izaziva aksijalno pomeranje  $\delta_a$ . Aksijalno pomeranje je komponentna normalnog pomeranja  $\delta_n$  kotrljajnog tela duž linije kontakta (slika 2) [8].

$$\delta_n = B \cdot d_k \left( \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha} - 1 \right) \quad (9)$$

pri čemu je B ukupna zakrivljenost staza kotrljanja.



Slika 3 Šematski prikaz ležaja sa kosim dodirnom nakon delovanja sile prednaprezanja [8]

Uzimajući u obzir relaciju (4) i (9) dobija se kontaktno opterećenje kao [8], [9]:

$$Q = K_n A^{3/2} \left( \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha} - 1 \right) \quad (10)$$

Zamenom relacije (9) u relaciju (10) dobija se:

$$\frac{F_a}{Z K_n A^{3/2}} = \sin \alpha \left( \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha} - 1 \right) \quad (11)$$

Međutim, upotreba ove relacije za određivanje ugla kontakta može biti problematična obzirom da iterativno izračunavanje prouzrokuje beskonačnu vrednost za  $\cos \alpha$ . Stabilnost i konvergencija funkcije u mnogome zavisi od početnog ugla. Da bi pretpostavljeni ugao bio jednak nazivnom uglu kontakta relacija (11) se mora izraziti preko  $\cos \alpha$ :

$$\cos \alpha = \cos \alpha_0 \left[ 1 + \left( \frac{F_a}{Z K_n A^{3/2} \sqrt{1 - \cos^2 \alpha}} \right)^{2/3} \right]^{-1} \quad (12)$$

Relacija (12) se rešava numeričkom metodom za uslov  $\alpha(0) = \alpha_0$ .

Aksijalno pomeranje  $\delta_a$  je u vezi sa  $\delta_n$  i prema slici 3 određuje se kao:

$$\delta_a = (A + \delta_n) \sin \alpha - A \sin \alpha_0 \quad (12a)$$

ili

$$\delta_a = \frac{A \sin(\alpha - \alpha_0)}{\cos \alpha} \quad (12b)$$

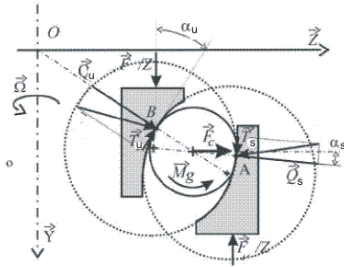
## 2.3 Određivanje aksijalnih deformacija i promene ugla kontakta ležaja usled centrifugalne sile i girokopskog momenta

Sa povećanjem brzine obrtanja raste centrifugalna sila koja nastaje usle obrtanja kotrljajnog tela oko sopstvene ose i ose ležaja. Pri ovome dolazi do smanjenja ugla kontakta prema spoljašnjoj stazi kotrljanja i povećanja prema unutrašnjoj stazi kotrljanja uz smanjenje sila kontakta.

Sa slike 4 iz ravnoteže sila proizilazi da je [2]:

$$-Q_s \cos \alpha_s - T_s \sin \alpha_s + Q_u \cos \alpha_u + T_u \sin \alpha_u + F_c = 0 \quad (13)$$

gde je  $Q_{s,u}$  kontaktno opterećenje na spoljašnjim, odnosno unutrašnjim pretnom,  $T_{s,u}$  sile trenja kotrljajnog tela sa spoljašnjim/unutrašnjim prstenom,  $F_c$  centrifugalna sila.



Slika 4 Šematski prikaz kugličnog ležaja pri delovanju centrifugalne sile [2]

Na isti način, projekcije sila unutrašnjeg i spoljašnjeg prstena na Y osu daju:

$$-\frac{F_p}{Z} + Q_s \sin \alpha_s - T_s \cos \alpha_s = 0 \quad (14)$$

$$-\frac{F_p}{Z} + Q_u \sin \alpha_u - T_u \cos \alpha_u = 0 \quad (15)$$

S druge strane prema [4] giroskopski moment je potpuno uravnotežen sa silama trenja na unutrašnjoj i spoljašnjoj stazi kotrljanja ( $T_u$  i  $T_s$ ). Iz čega sledi:

$$T_s = \lambda_s \frac{M_g}{d_k} \quad (16)$$

$$T_u = \lambda_u \frac{M_g}{d_k} \quad (17)$$

gde su  $\lambda_s$  i  $\lambda_u$  dimenzioni koeficijenti [2]. Pod pretpostavkom da su deformacije staza i kuglica zanemarljivo male u poređenju sa prečnikom kuglicom može se napisati da je:

$$\frac{d_k}{2} T_s + \frac{d_k}{2} T_u = M_g \quad (18)$$

Odakle je:

$$\lambda_u + \lambda_s = 2 \quad (19)$$

Prethodna relacija je dobijena pod pretpostavkom da je giroskopski moment ( $M_g$ ) uravnotežen silom trenja na spoljašnjoj stazi kotrljanja [4]. Prema tome  $\lambda_s=2$  i  $\lambda_u=0$ . Zamenom relacija (18) i (19) u relacije (15) dobija se:

$$Q_s = \frac{F_a}{Z \sin \alpha_s} + \lambda_s \frac{M_g \cos \alpha_s}{d_k \sin \alpha_s} \quad (20)$$

Na osnovu [8] sila kontakta na unutrašnjem prstenu je:

$$Q_u = \frac{F_a}{Z \sin \alpha_u} \quad (21)$$

Zamenom prethodnih relacija i relacije (19) u (13) dobija se:

$$\frac{F_a}{Z \tan \alpha_s} - \frac{F_a}{Z \tan \alpha_u} + \frac{2M_g}{d_k \sin \alpha_s} = F_c \quad (22)$$

pri čemu je:

$$F_c = \frac{d_m}{2} m_k \omega_c^2 \quad (23)$$

gde je  $\omega_c$  ugaona brzina kaveza.

Relacija (22) [2] se može napisati u implicitnom obliku kao:

$$\frac{1}{\tan \alpha_s} - \frac{1}{\tan \alpha_u} = \frac{7ZF_c}{5F_a} \quad (24)$$

Promena ugla kontakta sa spoljašnjom odnosno unutrašnjom stazom kotrljanja je i u zavisnosti od aksijalnih deformacija. Prema tome potrebna je uspostaviti relaciju zavisnosti deformacija i promene ugla kontakta. Ova zavisnost se prema [2], [4] dobija iz pretpostavke da čisto aksijalno opterećenje izaziva čisto aksijalno pomeranje duž Y

ose.:

$$(A + \delta_s) \cos \alpha_s + (A + \delta_u) \cos \alpha_u = A \cos \alpha_0 \quad (25)$$

$$(A + \delta_s) \sin \alpha_s + (A + \delta_u) \sin \alpha_u = A \sin \alpha_0 + \delta_a \quad (26)$$

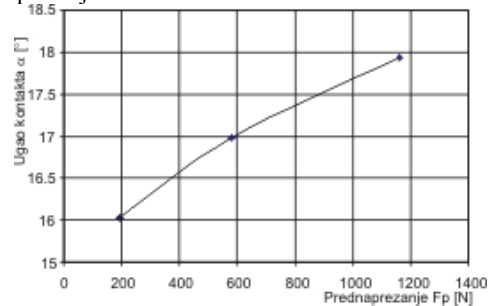
Relacije (24), (25) i (26) predstavljaju nelinearni sistem jedančina za određivanje promene ugla kontakta i aksijalnih deformacija.

### 3. VERIFIKACIJA MATEMATIČKOG MODELA

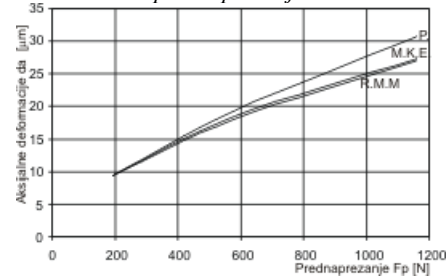
Matematički model (R.M.M.) za analizu statičkog ponašanja kugličnih ležajeva je razvijen primenom programskog sistema MatLab, pri čemu je za rešavanje sistema nelinearnih jednačina korišćena Newton metoda. Model je verifikovan na ležajevima sa kosim dodirom serije 7011 za tri veličine prednapreznja (malo, srednje i veliko) i pet vrednosti brojeva obrtaja (5000, 10000, 15000, 20000 i 25000 [o/min]). Dobijeni rezultati deformacija usled statičke promene ugla kontakta, poređeni su sa rezultatima dobijenim metodom konačnih elemenata (M.K.E.) i Palmorgan-ovim empirijskim relacijama (P.).

#### 3.1 Analiza rezultata promene ugla kontakta i deformacija usled sile prednapreznja

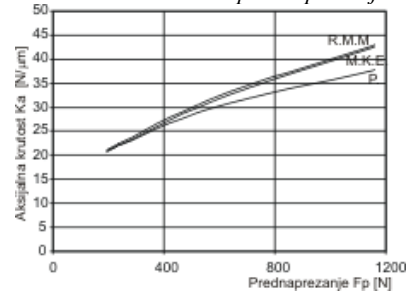
Na slici 5 je prikazana promena ugla kontakta kugličnih ležaja sa kosim dodirom usled dejstva sile prednapreznja, dok je na slikama 6 i 7 prikazana promena aksijalnih deformacija, odnosno krutosti u zavisnosti od sile prednapreznja.



Slika 5 Promena ugla kontakta usled delovanja sile prednapreznja



Slika 6. Promena aksijalnih deformacija ležaja u zavisnosti od sile prednapreznja



Slika 7 Promena aksijalne krutosti ležaja u zavisnosti od sile prednapreznja

Na osnovu prethodnih slika se može konstatovati da se povećanjem sile prednapreznja povećava ugao kontakta između kotrljajnih tela i staza kotrljanja. Povećanje ugla kontakta dovodi do povećanja deformacija usled sile



prednaprežanja, ali i do povećanja aksijalne krutosti ležaja. Odstupanje rezultata dobijenih primenom razvijenog matematičkog modela od rezultata dobijenih metodom konačnih elemenata iznose oko 1%. Ovakvo mala greška je posledica sličnog pristupa pri definisanju modela i rešavanja nelinearnih zavisnosti. S druge strane ove dve metode su približno slične stanovišta rešavanja nelinearnih jednačina. Rezultati dobijeni Palmgren-ovm empirijskim relacima daju nešto veće rezultate nego prethodne dve metode. Ovo se i moglo očekivati jer ova metoda ne uzima u obzir unutrašnju geometriju ležaja kao što su prečnici i radijusi zakrivljenosti staza kotrljanja.

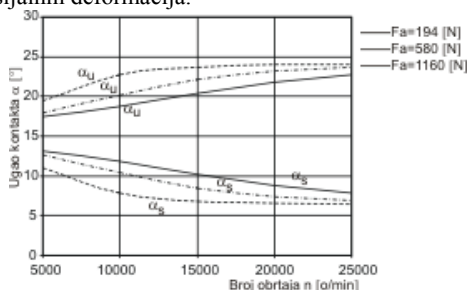
### 3.2 Analiza rezultata promene ugla kontakta i deformacija usled centrifugalne sile i giroskopskog momenta

Na slici 8 je prikazana promena ugla kontakta kotrljajnog tela sa unutrašnjom, odnosno spoljašnjom stazom kotrljanja u zavisnosti od broja obrtaja, za različite vrednosti sile prednaprežanja, dok je na slici 9 prikazana promena aksijalnih deformacija, u zavisnosti od broja obrtaja, za različite vrednosti sile prednaprežanja.

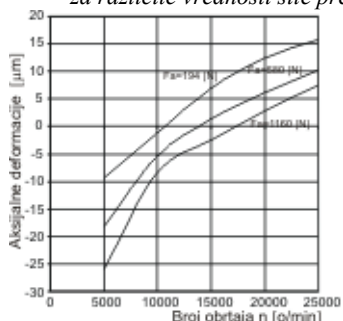
Ugao kontakta između kotrljajnog tela i unutrašnje staze se povećava, sa povećanjem broja obrtaja, ali se takođe ugao kontakta sa spoljašnjom stazom smanjuje. Povećanje broja obrtaja, takođe izaziva povećanje razlike između ugla kontakta unutrašnje i spoljašnje staze.

Poređenjem rezultata dobijenih pri analizi promene ugla kontakta, može se zaključiti da centrifugalna sila i giroskopski moment značajno utiču na deformacije ležaja pri višim brojevima obrtaja (kod visokobrzinskih ležaja)

Ponašanje ležaja u slučaju negativnih aksijalnih deformacija je suprotno u odnosu kada se javljaju pozitivne aksijalne deformacije. Sa slike 9 se vidi da u delu kada su aksijalne deformacije negativne dolazi do povećanja aksijalne krutosti. Obrnuto, aksijalna krutost je manja sa povećanjem broja obrtaja, odnosno u delu kada dolazi do pozitivnih aksijalnih deformacija.



Slika 8. Promena ugla kontakta u zavisnosti od broja obrtaja za različite vrednosti sile prednaprežanja



Slika 9 Promena aksijalnih deformacija u zavisnosti od broja obrtaja za različite vrednosti sile prednaprežanja

## 4 ZAKLJUČAK

U radu je prikazan matematički model za određivanje promene ugla kontakta usled dejstava aksijalnog opterećenja, centrifugalne sile i giroskopskog momenta. Poređenjem rezultata dobijenih primenom tri različita prilaza može se

konstatovati da razvijeni matematički model pruža zadovoljavajuće rezultate.

Prednosti rešavanja statičkog problema, prikazanom metodom se ogleda u činjenici da se zahtevani rezultati nakon definisanja geometrije ležaja i mehaničkih osobina materijala mogu veoma brzo dobiti. S druge strane metoda konačnih elemenata zahteva modeliranje tačne geometrije ležaja i to prvo geometrijski model pa onda diskretizovanje modela, zadavanje opterećenja i ograničenja pa tek onda rešavanje sistema jednačina.

Na kraju treba istaći da rezultati prikazani u ovom radu predstavljaju samo deo širih istraživanja vezanih za eksperimentalno ispitivanje i računarsko modeliranje statičkog, dinamičkog i toplotnog ponašanja ležajnih sklopova.

## 5. LITERATURA

- [1] Adams, G.G., Nosonovsky, M.: Contact modeling — forces, Tribology International, Vol. 33 ISSN: 0301-679X, 2000, Pages 431–442.
- [2] Antoine, J -F., Abba, G., Molinari, A.: A New Proposal for Explicit Angle Calculation in Angular Contact Ball Bearing, Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, Vol. 128, ISSN: 1050-0472, 2006, Pages 468-478.
- [3] Bourdon, A., Rigal, J. Play, F., D.: Static Rolling Bearing Models in a CAD. Environment for the Study of Complex Mechanisms: Part I—Rolling Bearing Model, Journal of Tribology, Transactions of the ASME, Vol. 121, ISSN: 0742-4787, 1999, Pages 205-214.
- [4] Crawford, R. M., Long, T.: Ball Bearing Dynamic Analysis Using Computer Methods— Part I: Analysis, Journal of Tribology, Transactions of the ASME, Vol. 118, ISSN: 0742-4787, 1996, Pages 52-58.
- [5] Houpert, L.: An Engineering Approach to Hertzian Contact Elasticity—Part I, Journal of Tribology, Transactions of the ASME, ISSN: 0742-4787, 2001, Vol. 123, Pages 582-588.
- [6] Kang, Y., Shen, P.-C., Huang, C.-C., Shyr S.-S., Chang Y.-P.: A modification of the Jones-Harris method for deep-groove ball bearings, Tribology International, Vol. 39, ISSN: 0301-679X, 2006, Pages 1413–1420.
- [7] Lin, C.-M.: Analysis for the Stiffness of Ball Bearings, Master's thesis, Chung Yuan Christian University Department of Mechanical Engineering, 2002.
- [8] Mullick, A.: An Investigation in Stiffness of Rolling Contact, Ph.D dissertation, Chung Yuan Christian University University Department of mechanical Engineering, 1990.
- [9] Tedric, A. H., Michael, N. K.: Rolling bearing analysis: Essential Concepts of Bearing Technology, Fifth edition, Taylor & Francis Group, ISBN: 0-8493-7183-X, 2007
- [10] Tung, L., N., Lin, J., F.: Ball bearing skidding under radial and axial loads, Mechanism and Machine Theory, Vol. 37, ISSN 0094-114X, 2002, Pages 91-113..

**Autori: Prof. dr Zeljović Milan, Prof. dr Ljubomir Borojev, Mr Aleksandar Živković,** Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel.: +381 21 485-2351, Fax: +381 21 454-4  
E-mail: milanaz@uns.ns.ac.yu ; borojevlj@uns.ns.ac.yu  
aco@uns.ns.ac.yu

**Napomena:** Rad predstavlja deo istraživanja na projektu "Istraživanje i razvoj kotrljajnih ležajnih sklopova i njihovih komponenti" TR 14048, podržanom od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije.



Veso Đukanović, Mladen Todić, Ostoja Miletić

## NAPONSKO-DEFORMACIONO STANJE NOSEĆE STRUKTURE ČETVEROSTUBNE HIDRAULIČNE PRESE

*Rezime:* u radu je dat prikaz identifikacije naponsko-deformacionog stanja u nosećoj strukturi hidraulične prese pri statičkom opterećenju. noseća struktura prese je izrađena od limova koji su međusobno spojeni zavarivanjem i termički tretirani. identifikacija deformacija vršena je mke unutar programskog paketa catia v5. eksperimentalna identifikacije vršena je tenzometrijskom metodom u određenim karakterističnim tačkama. upoređivanjem dobivenih rezultata, odstupanja su manja od 5%.

**Ključne riječi:** naponsko-deformaciono stanje, noseća struktura, mke, mjerne trake

## STRESS-STRAIN STATE OF CARRYING STRUCTURE OF FOUR COLUMNS HYDRAULIC PRESS

*Abstract:* This paper gives the overview of the identification of stress - strain state in carrying structure of hydraulic press, through the static working load. Carrying structure of the press has been built of plates, which are welded to each other and thermally treated. Identification of deformation has been accomplished by FEM (MKE), inside the software pack of Catia V5. Experimental identification has been done by tension – metrical method, on certain characteristic points. After comparison of the results, the tolerance is 10%.

*Key word:* stress-strain state, carrying structure, FEM, strain gage

### 1. UVOD

Kod konstruisanja presa, najsloženiji zahtjevi se postavljaju kod konstruisanja noseće strukture. Naime, za maksimalno predviđeno opterećenje potrebno je identifikovati naponsko-deformaciono stanje, koje neće narušavati integritet konstrukcije i kvalitet obratka na presi. Postojeće metode identifikacije naponsko-deformacionog stanja dijele se u tri grupe:

- teorijske
- teorijsko-eksperimentalne i
- eksperimentalne.

Pojava mikroracunara dala je naročito veliki posticaj razvoju i primjeni MKE ( metoda konačnih elemenata). Ova teorijska metoda primjenjuje se u mehanici kontinuuma za rješavanje veoma kompleksnih problema.

### 2. METODA KONAČNIH ELEMENATA

MKE je metoda numeričke analize zasnovana na fizičkoj diskretizaciji kontinuuma. Fizička diskretizacija predstavlja zamjenu realnog modela sa diskretizovanim modelom koji ima „odgovarajući“ broj konačnih elemenata „odgovarajućeg“ oblika, tipa i rasporeda. Pojam „odgovarajući“ ima poseban značaj u analizi metodom konačnih elemenata i njenih rješenja, s obzirom na veliki broj prihvatljivih modela. Da bi se obezbijedio „najbolji“ MKE model, što nije jednoznačno rješiv zadatak, potrebno je prije

svega, poznavanje prirode problema, poznavanje suštine MKE, kao i kreativni inženjerski pristup.

Napredak na polju grafičkih mogućnosti mikroracunara, doprinio je razvoju MKE softvera, zasnovanog na grafički orjentisanom formiranju modela i predstavljanju rezultata analize. Aktuelni MKE softver zasnovan je na kombinaciji tri cjeline:

- preprocesor ( skup modula za grafički orjentisano generisanje MKE modela diskretizacijom i aproksimaciju konturnih i prelaznih uslova, dejstava, ponašanje materijala i sklopova konstrukcijskog sistema )
- solver ( skup modula za numeričko rješavanje jednačina sistema KE i proračun uticaja sistema KE )
- postprocesor (skup modula za grafički orjentisani prikaz i analizu rezultata proračuna MKE modela ).

### 3. SIMPLIFICIRANI MODEL NOSEĆE STRUKTURE HIDRAULIČNE PRESE

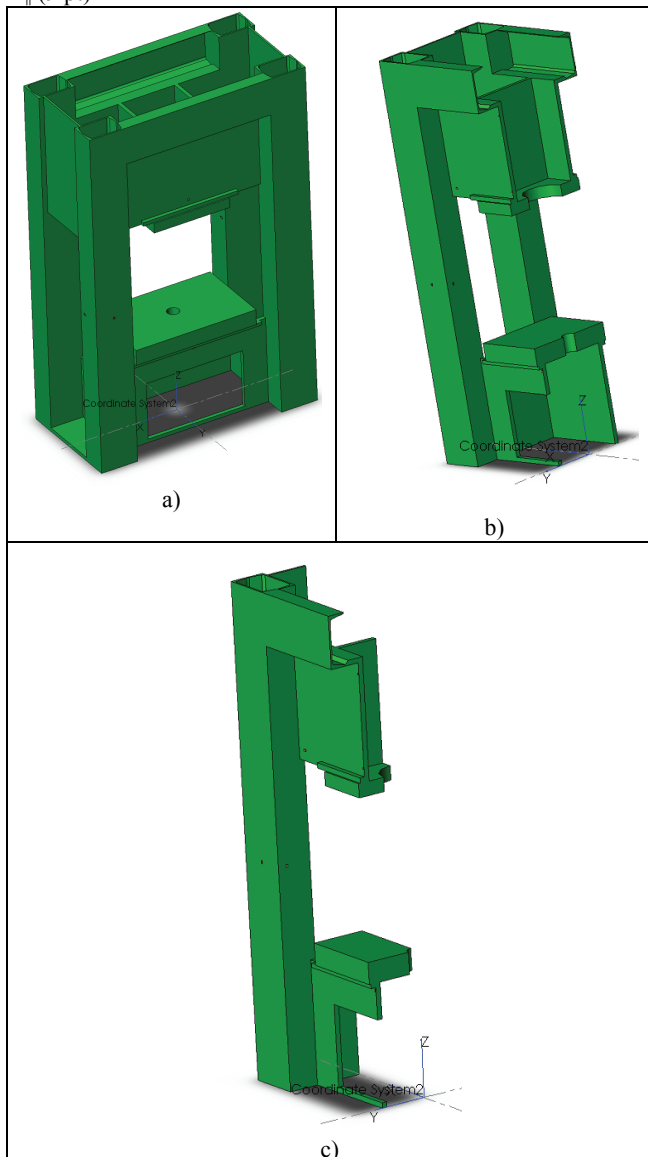
Prilikom modeliranja noseće strukture prese ( sl. 1a ) zanemareni su revizioni otvori kao i T-žljebovi na stolovima.

Dobijeni 3D model zbog svoje simetričnosti u odnosu na ravan YZ može se dalje uprostiti tako što se posmatra samo jedna njegova polovina ( sl. 1 b ). Ovaj simplificirani model i dalje ima velike dimenzije te ga je potrebno još uprostiti. Simetričnost modela u odnosu na ravan XZ nije potpuna u donjem dijelu prese. Naime, sa prednje strane prese postoji veliki otvor ispod radnog stola kog nema sa zadnje strane prese. Ovdje se može pretpostaviti simetričnost tako što se pretpostavi da ovaj otvor postoji i na zadnjoj strani prese. Ako ovaj dio prese, koji ima lošiju konfiguraciju (sl. 1c ), zadovolji kod ispitivanja onda onaj drugi, sa povoljnijom

konfiguracijom, mora zadovoljiti.

Male dimenzije simplificiranog modela na kojem se vrši identifikacija noseće strukture prese zauzima manje resursa računara i omogućuje da se diskretizacija izvrši sa mnogo većim brojem konačnih elemenata.

¶ (9 pt)



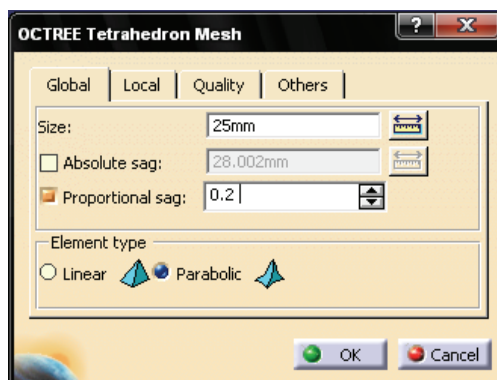
Slika 1. Uprošćavanje modela prese

#### 4. DISKRETIZOVANI MODEL

Simplificirani model posmatra se kao 3D tijelo pa se i njegova diskretizacija vrši podjelom na 3D konačne elemente. Catia u svom modu za analizu metodom konačnih elemenata ima na raspolaganju dva tipa konačnih elemenata oblika tetraedra i to:

- TE4 - osnovni tetraedarski konačni element s 4 čvora i 12 stepeni slobode kretanja ili
- TE10 - tetraedarski konačni element drugog reda s 10 čvorova i 30 stepeni slobode kretanja.

U ovom radu korišteni su konačni elementi tipa TE10 sa veličinom stranice 25 mm (sl. 2).



Slika 2. Izbor tipa i veličine konačnog elementa

#### 5. OPTEREĆENJA, OSLONCI I OGRANIČENJA

Simplificirani model (slika 1 c) služi kao model za identifikaciju napona i deformacija na presi. Kako je on četvrtina stvarnog modela prese, onda će i opterećenje koje će djelovati biti četvrtina od stvarnog opterećenja na presi.

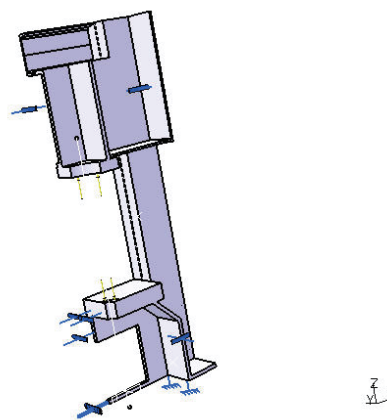
Presu se oslanja na četiri ploče dimenzija 100 x 100 mm koje su vezane za betonski temelj prese. Za svaku ploču presa je vezana vijkom.

Ovo oslanjanje prese može se u Catia predstaviti na dva načina:

- Na mjesto oslanjanja prese na te ploče postaviti uklještenje. Ono bi u ovom slučaju djelovalo samo na površini dodirivanja prese sa pločom ili
- Na kompletnu donju površinu prese postaviti uklještenje.

Izabrana je druga mogućnost iako nije tako dosljedna kao prva. Ovo bitno ne utiče na rezultate napona i deformacija.

Površine simplificiranog modele koje su dobijene odvajanjem od ostalog dijela prese, moraju dobiti ograničenje. Ovo ograničenje onemogućava da se čvorovi konačnih elemenata, koji se nalaze na tim površinama, pomjere van presječnih površina.

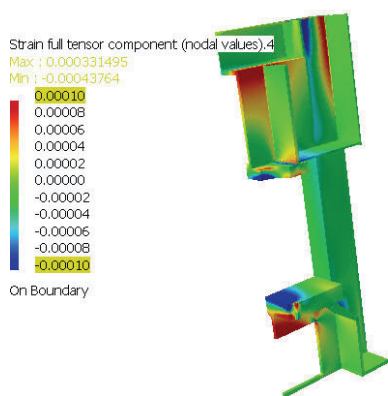


Slika 3. Uprošćavanje modela prese

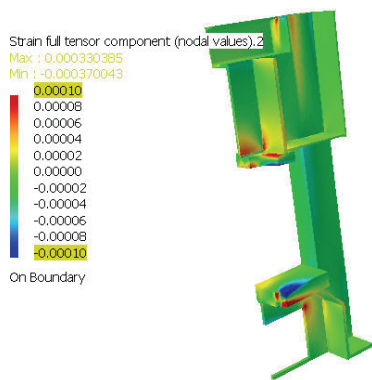
#### 6. REZULTATI

Deformacije koje su posljedica djelovanja maksimalnog opterećenja od 630 kN date su na slici 3. Ove deformacije predstavljaju komponente tenzora deformacije u pravcu osa x, y i z. Rezultati deformacija upoređeni su sa rezultatima mjerenja deformacija na presi pomoću

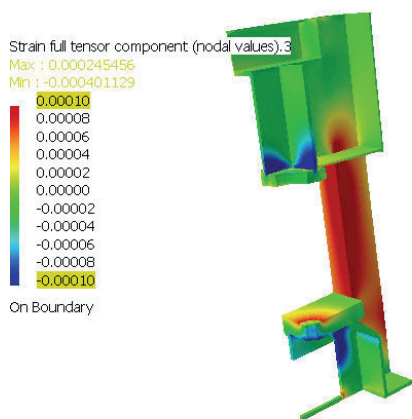
tenzometrijskih traka i opreme (davač impulsa, pretvarač impulsa, prijemnik i registrator ). Eksperimentalnim ispitivanjem obuhvaćen je veći broj meritornih tačaka za presu, a u ovom radu dati su podaci za dvije mjerne tačke (čvorne tačke ) koje se nalaze na stubu prese.



a) Deformacije u pravcu ose x



b) Deformacije u pravcu ose y

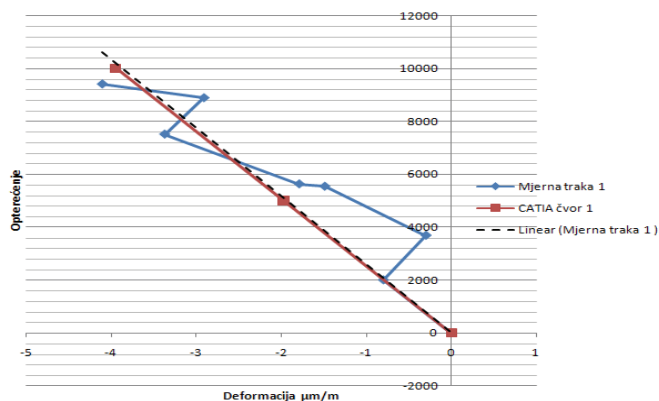


c) Deformacije u pravcu ose z

Slika 4. Deformacije

Opterećenje N	Deformacija $\mu\text{m/m}$			Odstupanje %
	Mjerna traka 1	Trend	CATIA čvor 1	
0	0	0.000	0.000	
19950	-0.800	-0.772	-0.788	-2.068
36820	-0.299	-1.425	-1.454	-2.068
55360	-1.490	-2.142	-2.187	-2.068
56250	-1.790	-2.177	-2.222	-2.068
75050	-3.373	-2.904	-2.964	-2.068
88800	-2.910	-3.437	-3.508	-2.068
94000	-4.106	-3.638	-3.713	-2.068

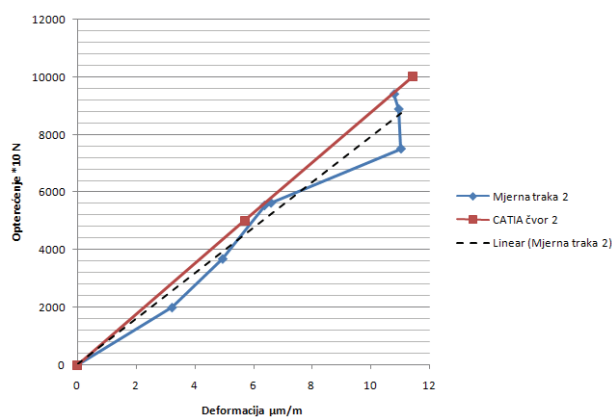
Tabela 1. Mjerna traka 1 i čvor 1



Slika 5. Mjerna traka 1 i čvor 1

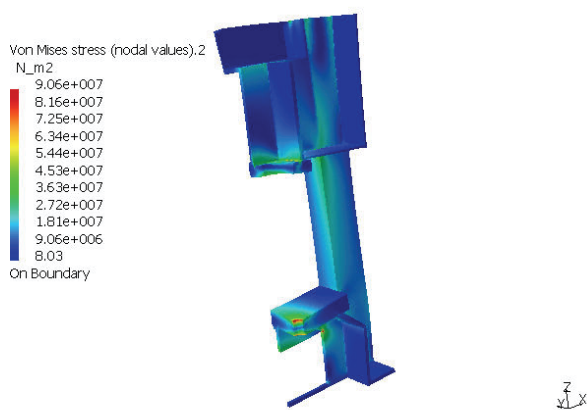
Opterećenje N	Deformacija $\mu\text{m/m}$			Odstupanje %
	Mjerna traka 2	Trend	CATIA čvor 2	
0	0	0.000	0.000	
1995	3.226	2.515	2.277	9.460
3682	4.951	4.643	4.203	9.460
5536	6.377	6.980	6.320	9.460
5625	6.600	7.092	6.422	9.460
7505	11.028	9.463	8.568	9.460
8880	10.953	11.197	10.137	9.460
9400	10.803	11.852	10.731	9.460

Tabela 2. Mjerna traka 2 i čvor 2



Slika 6. Mjerna traka 2 i čvor 2





Slika 7. Naponsko stanje u nosećoj strukturi po Von Mises

#### **Autori:**

Veso Đukanović, dipl. ing. maš, Teslić, MŠ „ Nikola Tesla“, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina  
 Doc. Dr Mladen Todić, Banja Luka, Mašinski fakultet, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina  
 Prof. Dr Ostoja Miletić, Banja Luka, Mašinski fakultet, Republika Srpska, Bosna i Hercegovina

E-mail ([vesod@teol.net](mailto:vesod@teol.net))  
[todic@urc.bl.ac.yu](mailto:todic@urc.bl.ac.yu)  
[miletic@urc.bl.ac.yu](mailto:miletic@urc.bl.ac.yu))

## **6. REZULTATI**

Prikazan je mogući način analize noseće strukture kao i rezultati. Poređenjem dovoljnog broja rezultata deformacija dobijenih uz pomoć softverskog paketa CATIA sa rezultatima eksperimenta omogućava da:

- ocjeni kvalitet rezultata dobijenih pomoću metode MKE i
- ocjena izvedenog rješenja noseće strukture.

S obzirom da se rezultati deformacija ne razlikuju više od  $\pm 5\%$  to upućuje na zaključak da izvršena simplifikacija noseće strukture, tip i veličina konačnih elemenata je zadovoljavajuća.

U postupku analize konačnim elementima u CATIA može se analizirati i naponsko stanje u nosećoj strukturi (slika 7). Ovom analizom detektuju se kritična mjesta u nosećoj strukturi. Vršanjem određenih korekcija na kritičnim mjestima dolazi se do optimalne noseće strukture prese.

## **5. LITERATURA**

- [1] O.Miletić, M. Todić: Noseće strkture mašina i uređaja, Univerzitetaska knjiga, Mašinski fakultet Banja Luka, 2004.
- [2] O.Miletić, M. Todić: Ispitivanje noseće strukture hidraulične prese, DEMI 2007, Banja Luka, 2007.
- [3] CATIA V5 Help
- [4] Popović P., Temeljkovski P.: Mašine za obradu deformisanjem-noseća struktura, Mašinski fakultet, NiŠ, 1991.
- [5] Đurić M., Jovanović P.: Teorija okvirnih konstrukcija, III izdanje, Građevinska knjiga, Beograd, 1981.
- [6] Zienkiewicz O.C.: The FiniteElement Method in Engineering Science, Me Graw-Hall, 1971.



Sovilj, B., Seucek, I., Radonjić, S., Bughart, D., Sovilj-Nikić, I., Borenović, M.

## PROJEKTOVANJE PROFILNOG GLODALA ZA IZRADU NAVOJA PRIMENOM PROGRAMSKOG SISTEMA CATIA

**Rezime:** Projektovanje i konstruisanje proizvoda je složena inženjerska razvojno – istraživačka delatnost od posebnog značaja kako za proizvođače, tako i za neposredne korisnike proizvoda. U savremenim proizvodnim sistemima, sa automatizovanom proizvodnjom i automatizovanim projektovanjem i konstruisanjem proizvoda i tehnoloških procesa njihove izrade, ističe se potreba za automatizovanim projektovanjem i konstruisanjem i automatizovanim izborom alata za obradu rezanjem. Rad sadrži automatizovani proračun profilnog glodala za izradu navoja izvršen u programskom jeziku Visual Basic. Na osnovu ovog proračuna, urađen je 3D model i tehnička dokumentacija profilnog glodala za izradu navoja u programskom sistemu CATIA.  
**Cljučne reči:** Alati za obradu rezanjem, profilna glodala za izradu navoja, projektovanje, konstruisanje, programski sistemi

## DESIGN OF PROFILED MILLING CUTTER FOR MANUFACTURE OF SCREW THREAD BY APPLYING THE CATIA PROGRAMMING SYSTEM

**Summary:** Design and construction of products is a complex engineering development - research activity of special importance, both for manufacturers and users. In modern manufacturing systems with automated production and automated design and construction of products and technological processes, the need for automated design and construction and automated selection of cutting tools is. In this paper contains automated calculation of profiled milling cutter for screw thread manufacture, made in Visual Basic programming language. On the basis of this calculation, the 3D model and technical documentation of profiled milling cutter for screw thread manufacture was done in the CATIA programming system.

**Keywords:** cutting tools, profiled milling cutters for screw thread manufacture, design, construction, programming systems

### 1. UVOD

Projektovanje, konstruisanje i tehnologija je sistematska i praktična primena raznih naučnih saznanja. Projektant, konstruktor i tehnolog znanju da je njihov rad neprestan izazov njihovom znanju, veštini i organizacionoj sposobnosti. Zadatak konstruktora-tehnologa je da na najpogodniji način približi naučna otkrića cilju. Često se dešava da teorijska i primenjena nauka napreduju zajedno: uzajamno se dopunjuju i razvijaju. Granice nauke se neprestano pomeraju, a projektanti-tehnolozi nastoje da nova znanja uvedu u praktičnu primenu.

Upotreba računara u projektovanju i konstruisanju alata za obradu rezanjem, dobila je veću ulogu od očekivane. Obrazloženje nalazimo u sledećem: dve trećine svetske proizvodnje u mašinstvu čini maloserijska proizvodnja. Baš u takvim vidovima proizvodnje i razvijenim CNC mašinama, u istu svrhu, koristi se velika paleta alata koji svojim geometrijskim i tehnološkim parametrima moraju zadovoljiti tražene tehničke, ekonomske i estetske zahteve. U savremenoj proizvodnji, u mašinstvu, koja je većinom maloserijska, lako uvodimo proširenje asortimana proizvoda, visoku frekvenciju promene programa proizvodnje sa stalno postavljenim zahtevima za poboljšanjem kvaliteta proizvoda, smanjenjem rokova izrade i smanjenjem troškova izrade. Usled ovakvih zahteva i daljeg razvoja novih tehnologija i trenda razvoja i projektovanja alata za obradu rezanjem upotreba računara je gotovo nezamenljiva.

### 2. PROJEKTOVANJE I KONSTRUISANJE PROFILNOG GLODALA ZA IZRADU NAVOJA

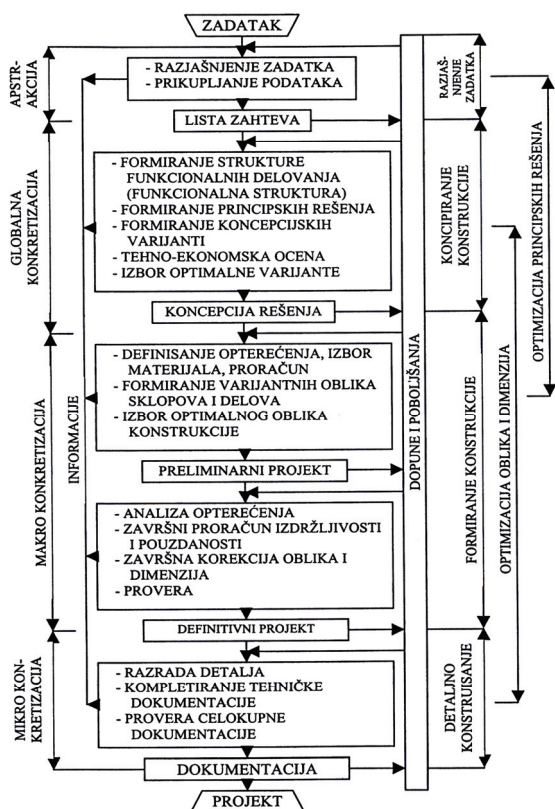
Brz razvoj metaloprerađivačke industrije proteklih godina kod nas i u svetu doveo je do velike konkurencije, u kojoj racionalizacija i povećanje produktivnosti postaju imperativ. Osnovne tendencije u metaloprerađivačkoj industriji u

uslovima serijske i masovne proizvodnje na proizvodnim operacijama obrade rezanjem, zasnivaju se na primeni visokoproduktivne opreme i alatima za obradu rezanjem visoke postojanosti. Osim ovog, sve se veća sredstva ulažu za pronalaženje zamene za sadašnje materijale alata, zbog deficitarnosti nekih ruda, te u fundamentalna i primenjena istraživanja na području obrade metala skidanjem strugotine i novijih postupaka obrade. Postojanje mnoštva različitih konstrukcija i svojevrsna originalnost svake konstrukcije ponaosob, utemeljena na različitim stepenima složenosti i principima funkcionisanja, omogućavaju i odstupanje od metodike, procedure i redosleda faza projektovanja i konstruisanja prikazanih na slici 1. U pojedinim slučajevima moguće je i preskakanje pojedinih faza ili aktivnosti, ili obrnuto, uključivanje dodatnih aktivnosti u pojedinim fazama procesa projektovanja i konstruisanja. Tako se često pri kombinovanju, variranju, izboru i odlučivanju poseže za dodatnim aktivnostima (modeliranje, simuliranje, eksperiment,...), a sve u cilju najoptimalnijih rešenja.

Neslućeni razvoj računara doveo je do faze projektovanja i konstruisanja podržanog računarom. Pouzdano arhiviranje informacija, sa dovoljno velikim kapacitetom memorije i brzinom pouzdanih manipulacija informacijama, odredili su veoma značajno mesto računarima u procesu projektovanja i konstruisanja. Razvoj CAD (*eng. Computer Aided Design*) tehnologije, razvoj sredstava i alata CAD tehnologije, primenjenih u procesu projektovanja i konstruisanja značajna su mogućnost automatizacije samog procesa. Razvoj metodičkog konstruisanja i razvoj računara stvorili su sisteme tehnologija za automatizovano projektovanje i konstruisanje primenom računara (CAD, CAM, CIM, Ekspertni sistem i drugi). Konačni cilj ovih sistema jeste objedinjenje i automatizacija svih inženjerskih aktivnosti u CAE (*eng. Computer Aided Engineering*).

Modelovanje podržano računarom kao naredna faza integriše zajedničko razmatranje funkcije, geometrije i

tehnologije kao i interaktivne veze koje između njih postoje. Korisnički modul sa interaktivnom konstrukcionom logikom omogućuje konstruktoru automatsko generisanje geometrije.

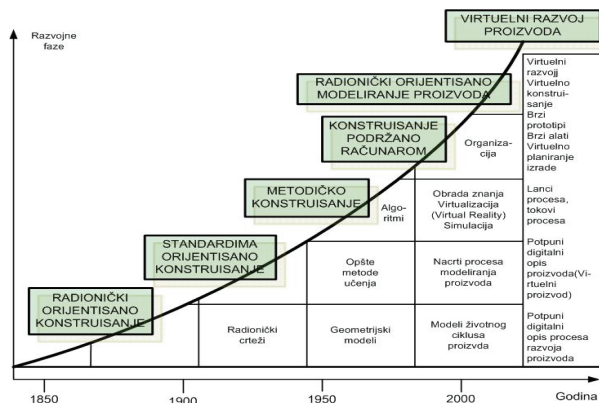


Slika 1. Faze projektovanja i konstruisanja

Proces modeliranja proizvoda i dobijeni podaci o modelu su osnova za razvoj virtuelnih proizvoda. To i nije tako daleka budućnost u kojoj će se od virtuelnog konstruisanja, preko brzog prototipa stizati do potpuno digitalnog opisa procesa razvoja proizvoda.

Sa širenjem svesti o realnim sposobnostima čoveka i njegovim potencijalnim mogućnostima dolazilo je do razvoja i suštinski značajnih izmena u oblasti projektovanja i konstruisanja. Razvojne faze projektovanja i konstruisanja u proteklih dve stotine godina prikazane su na slici 2. [7].

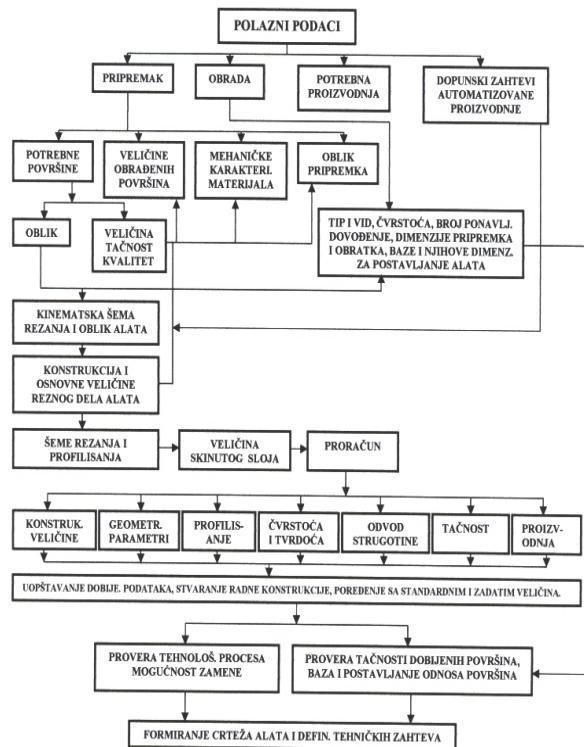
Alati za obradu rezanjem visokog kvaliteta su neophodni za ekonomičnu proizvodnju. Proizvodnja ovih alata zahteva detaljno proučavanje, projektovanje i konstruisanje za svaki pojedinačni slučaj.



Slika 2. Razvojne faze konstruisanja

Proces projektovanja alata za obradu rezanjem uz pomoć računara moguć je samo pod uslovom da je zadatak pravilno

postavljen, tj. pri odgovarajućoj formalizaciji i postavljanju algoritma. Projektovanje alata za obradu rezanjem najčešće se vrši redosledom prikazanim na slici 3.



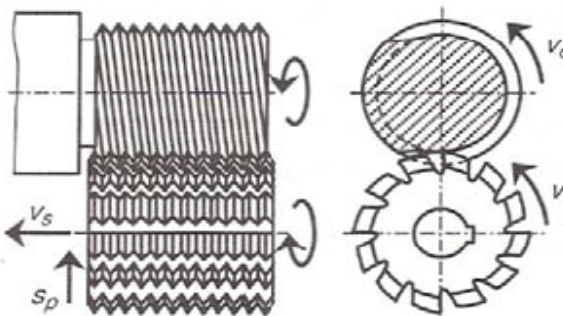
Slika 3. Uopštena šema projektovanja alata za obradu rezanjem

Operacija ozubljenja, ožljebljenja, izrada lančanika, zavojnica, navoja i sl. najčešće predstavljaju usko grlo proizvodnje, i to naročito u višim tipovima proizvodnje. Zbog toga je stalno prisutna i očigledna neophodnost istraživanja i razvoja optimalnih konstrukcija alata za obradu, ali i optimalnih uslova tih procesa.

Optimizacija proizvodnih uslova obrade u najvećoj meri zavisi od pravilnosti izbora i održavanja alata za obradu rezanjem, kao i od izbora odgovarajućih režima rezanja.

U ovom radu biće prikazano projektovanje i konstruisanje glodala za navoj. Navoj se vrlo često pojavljuje u mašinskoj proizvodnji na radnim predmetima kod kojih je potrebno izvršiti njihovo spajanje. Postoje razne metode za izradu navoja u zavisnosti od vrste alata, oblika i položaja navoja (trouglasti, trapezni, spoljašnji, unutrašnji), dimenzija, tačnosti obrade, kvaliteta površina, tipa proizvodnje (pojedinačna, serijska, masovna) i od stanja materijala priprema (poboljšano, kaljeno).

Višeprofilna glodala se koriste za izradu kratkih trouglastih navoja kod serijske proizvodnje. (sl. 4.)



Slika 4. Šema glodanja navoja višeprofilnim glodalom.



#### 4. PRIMENA PROGRAMA VISUAL BASIC 6.0 ZA PRORAČUN PROFILNOG GLODALA ZA IZRADU NAVOJA

Visual Basic razvio se iz originalnog programskog jezika BASIC i sada koristi više stotina izraza, naredbi i funkcija, od kojih je najveći deo direktno povezan sa Windows okruženjem.

Programski jezik koristi se u svim Microsoft-ovim programskim jezicima i sistemima i uključen je i u programski sistem CATIA.

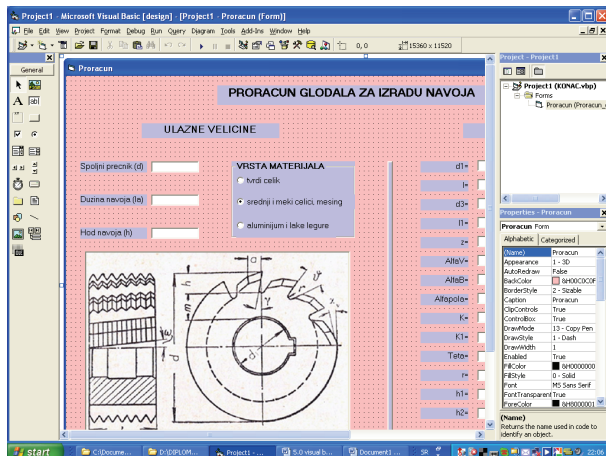
Visual Basic obezbeđuje relativno lak način stvaranja aplikacija.

Program za proračun profilnog glodala za izradu navoja u programskom jeziku Visual Basic 6.0. urađen je na osnovu procedure i ručnog proračuna, pri čemu su proračun i tabele prilagođeni za automatizaciju.

Tok proračuna predstavlja polaznu osnovu za projektovanje i konstruisanje profilnih modulnih glodala u programskom sistemu CATIA.

U radu je konstruisano profilno glodalo za izradu navoja. Ako bi se radio „ručni“ proračun za veliki broj različitih dimenzija navoja imali bi veliki broj podataka, dugo bi trajao proračun i bio bi prikazan na prilično velikom broju strana. A sam tok bi zapravo tekao prilično slično za sve dimenzije.

Počevši rad ručnog proračuna sa prethodno pomenuta dva generalna uopštenja nazire se prednost projektovanja i konstruisanja uz pomoć PC računara. Pri čemu je sam proračun usled sličnosti kod svih dimenzija pogodan za automatizaciju.



Slika 5. View Object form



Slika 6. Izvršna verzija programa u radnom okruženju

Nakon unosa ulaznih veličina dobijaju se traženi podaci za konstrukciju profilnog glodala na izvršnoj verziji urađenog programa što je prikazano na slici 6.

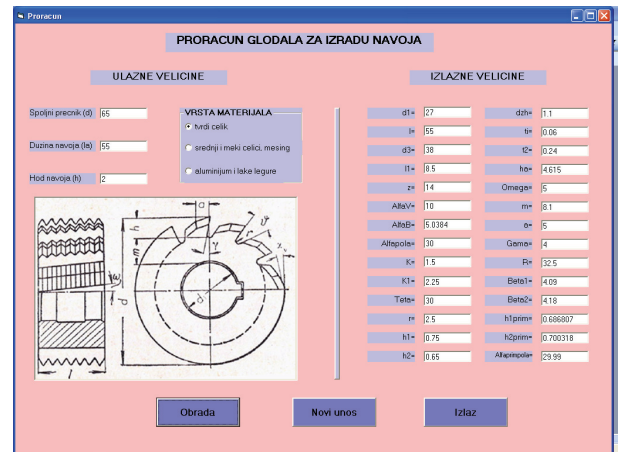
Unošenjem ulaznih veličina mogu se dobiti traženi podaci za profino glodalo za izradu navoja.

Može se veoma brzo dobiti ceo dijapazon konstrukcionih podataka u trenutku posle unošenja ulaznih podataka. Kao i za ulaznu formu, tako su raspoređeni konstrukcioni podaci u izlaznoj formi. Ovo u mnogome olakšava rad i onima koji nisu stručnjaci za konstruisanje glodala za izradu navoja. Program se izvršava skoro trenutno.

Za projektovanje i konstruisanje podržano programskim jezikom VB uspešno može da se izvršiti zadatak automatizacije celog postupka, iako spada u programske jezike starije generacije. Kod većih proizvođača alata kod nas, nailazimo na slična rešenja. Uglavnom su to programi koji automatizuju proces konstruisanja, ali su integrisani sa programima koji daju podatke za NU mašine alatke.

Pomoću programa za proračun profilnog nasadnog glodala za izradu navoja izvršen je proračun prema sledećim ulaznim podacima:

- spoljašnji prečnik glodala  $d=65$  mm
- dužina navoja  $l_a=55$  mm
- hod navoja koji se izrađuje  $h=2$  mm
- material obratka tvrdi čelik



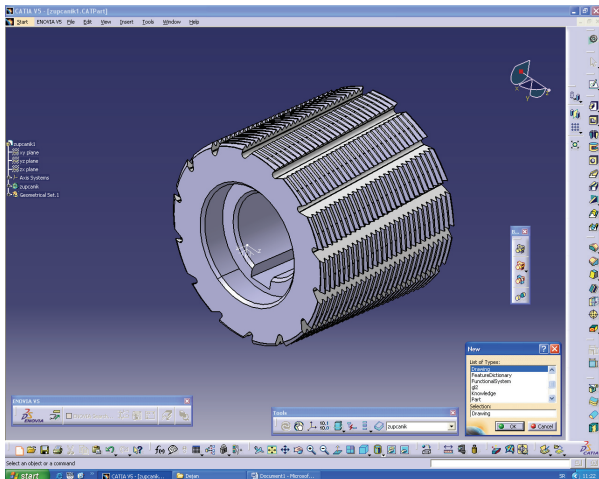
Slika 7. Konačni izlaz iz proračuna glodala za izradu navoja

#### 5. PRIMENA PROGRAMSKOG SISTEMA CATIA V5 U PROJEKTOVANJU I KONSTRUISANJU PROFILNOG MODULNOG KOTURASTOG GLODALA

CATIA je vodeći svetski integrisani CAD/CAM/CAE programski sistem. CATIA V4 je najzastupljeniji CAD/CAM/CAE programski sistem u automobilskoj i vazduhoplovnoj industriji i koriste ga najveće i najpoznatije svetske kompanije i njihovi kooperanti. Osim u velikim kompanijama, CATIA se koristi i u brojnim malim i srednje razvijenim firmama, koje takođe imaju potrebe za kvalitetnim i pouzdanim rešenjem za sve svoje proizvodne i poslovne procese. CATIA V5 je programski sistem nove generacije koji integriše sve aspekte procesa razvoja proizvoda. To znači da obuhvata simultanu upotrebu podataka i geometrijskih informacija, od koncepta proizvoda, do definicije proizvodnog procesa. CATIA je razvijena na takvoj arhitekturi koja je okrenuta ka interakciji između korisnika i programa. Radno okruženje programskog sistema CATIA V5 je prilagođeno prirodnom okruženju operativnog sistema Windows, što je bio glavni cilj pri razvoju CATIA V5 kombinovanje lakoće rada u Windows okruženju sa jezgrom za zapreminsko projektovanje industrijske snage.



Na slici 7. dat je izgled profinog glodala za izradu navoja modularanog u programskom paketu CATIA V5. Za projektovanje i konstruisanje u programskom sistemu CATIA V5 potrebno je znati i neki od programskih jezika, matematički orjentisanih, a CATIA podržava Microsoft Visual Studio 6.0 iz koga je za ovaj rad izabran najčešće i najšire korišćen programski jezik Visual Basic. Nakon završenog 3D modeliranja vrši se izrada radioničke dokumentacije



Slika 8. 3D model profinog glodala za izradu navoja

## ZAKLJUČAK

Savremen prilaz projektovanju i konstruisanju alata za obradu rezanjem zahteva širok spektar znanja projektanta-konstruktora alata za obradu rezanjem. Pored širokog znanja o geometriji alata i materijalima za izradu alata, projektant alata mora posedovati znanje o kinematici i geometriji mašine na kojoj će se projektovani alat koristiti, obradljivosti materijala priprema, i sl., i dobro poznavati programske sisteme namenjene za automatizaciju projektovanja i konstruisanja alata za obradu rezanjem i proizvoda mašinske industrije uopšte.

U radu je projektovano profilno glodalo za izradu navoja u programskom jeziku Visual Basic i programskom sistemu CATIA V5. U programu urađenom u Visual Basic-u dobijeni su konstruktivni podaci za celu paletu profilnih glodala za izradu navoja. Kao primer projektovanja u programskom sistemu CATIA izabrano je profilno glodalo za izradu navoja.

Razvijeno programsko rešenje omogućava efikasan izbor profilnih glodala za izradu navoja.

## 5. LITERATURA

- [1] Borenović M.: Projektovanje i konstruisanje kružnog zupčastog noža primenom programskog jezika Visual Basic i programskog sistema CATIA 5, FTN Novi Sad, 2005.
- [2] Bughart D.,: Primena programa za automatizaciju projektovanja glodala za izradu navoja, FTN Novi Sad, 2005.

- [3] Čvokić, A.: *Analiza kinematske geometrije alata za obradu rezanjem*, diplomski rad, FTN Novi Sad, 2000.
- [4] Ящерицын, П.И., Ерененко, М.Л., Жигалко, Н.И. : Основы резания материалов и режущий инструмент, Минск, 1981.
- [5] Karam ,F. : CATIA V5, Kompjuter biblioteka, Čačak 2005
- [6] Miltenović, V., Ognjanović, M.: *Mašinski elementi 2*, Mašinski fakultet Niš, 2005
- [7] Ординарцев, И.А., Сергеев, А.К. , Онишко, А.В., Филипов, Г.В., Шевченко, А.Н. : *Справочник инструментальщика*, Ленинград, 1987.
- [8] Родин, П.Р. : *Металлорежущие инструменты*, Киев, 1974.
- [9] Sovilj, B., Rudić, I., Jaščur, M. i dr. : *Razvoj i unapređenje proizvodnje alata za ozubljenje*, FTN Novi Sad, 1986.
- [10] Tanasijević, S.: *Tribološki ispravno konstruisanje*, Mašinski fakultet Kragujevac, 2004.
- [11] Trifunčević, G.: *Projektovanje i konstruisanje modulnog koturastog glodala primenom programskog sistema CATIA V5*, FTN Novi Sad, 2006.
- [12] Wallace, W. : *Visual Basic 6*, Mikro Knjiga, Beograd.

**Autori: Prof.dr Bogdan Sovilj, Ivan Sovilj-Nikić Phd student,** Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija,

Tel.: +381 21 485-2343. , Fax.: +381 21 485-133

**Izv. Prof. dr Ivan Seucek,** Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb, Hrvatska, Tel.: +385 1 616-8336, Fax.: +385 1 615-7123

**Prof. dr Snežana Radonjić,** Univerzitet u Kragujevcu, Tehnički Fakultet u Čačku, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Tel.: +381 32 302-763 Fax.: +381 32342-101

**Dejan Bughart, dipl.ing.,** Le Belier Kikinda, Miloševacki put 34, 23300 Kikinda, Srbija, Tel: 0230 411 119, Fax: 0230 411 120

**Milan Borenović, dipl.ing.,** NIS-Naftagas-u, OD Proizvodnja, Pogon „Severni Banat“ Kikinda, Trg Srpskih dobrovoljaca 27, 23100 Kikinda, Srbija, Tel.:0230-28-21.7

E-mail: [bsovilj@uns.ns.ac.yu](mailto:bsovilj@uns.ns.ac.yu)

[ivan.seucek@fsb.hr](mailto:ivan.seucek@fsb.hr)

[snezar@tfc.kg.ac.yu](mailto:snezar@tfc.kg.ac.yu)

[dejan.bunghart@lebelier.rs](mailto:dejan.bunghart@lebelier.rs)

[diomed17@gmail.com](mailto:diomed17@gmail.com)

[borm@sezapro.yu](mailto:borm@sezapro.yu)

*Rad je nastao u okviru projekta "Razvoj progresivne tehnologije za leđnu obradu profilnih alata na CNC mašinama", broj TR 14059 Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj, Republike Srbije, 2008*

Sovilj, B., Seuček, I., Kovač, P., Bera, R., Milenković, Đ., Sovilj-Nikić, I.

## PROJEKTOVANJE PRAVOG ZUPČASTOG NOŽA PRIMENOM SAVREMENIH PROGRAMSKIH SISTEMA

**Rezime:** Pravi zupčasti noževi upotrebljavaju se za obradu ozubljenja cilindričnih zupčanika srednjih i viših klasa tačnosti. Teorija konstrukcije pravih zupčastih noževa vrlo je komplikovana i obimna. U radu je predstavljen deo neophodne teorije, kao i projektovanje i konstruisanje pravog zupčastog noža u programskom sistemu CATIA V5.

**Cljučne reči:** alati za obradu rezanjem, prav zupčasti nož, projektovanje, konstruisanje, programski sistemi

## DESIGN AND CONSTRUCTION OF PROFILED STRAIGHT COGGED KNIFE BY APPLYING MODERN PROGRAMMING SYSTEM

**Abstract:** Straight cogged knives are used for processing of cylindrical cogwheels serration with medium and high classes of precision. The construction theory of the straight cogged knives is very comprehensive and complicated. In this paper a part of the basic theory as well as the design and construction of the straight cogged knives in the programming system of CATIA V5 are given.

**Key words:** cutting tools, straight cogged knife, design, construction, programing system

### 1. UVOD

U savremenim proizvodnim sistemima projektovanje, konstruisanje i proizvodnja alata za obradu rezanjem i pribora zavisno od tipa proizvodnje čini 50÷80% od ukupnog vremena potrebnog za pripremu proizvodnje. Skraćivanjem tog vremena smanjuju se troškovi. To se postiže primenom novih metoda u organizaciji, projektovanju, konstruisanju i izradi alata za obradu rezanjem. U ovom radu je data automatizacija projektovanja i konstruisanja pravog zupčastog noža za obradu ozubljenja cilindričnih zupčanika sa kosim zubima. Na slici 1. prikazani su alati za obradu raznih vrsta ozubljenja



Slika 1. Alati za obradu ozubljenja

Usmeravajući proces razvoja proizvoda na razvoj mašinskih (ili tehničkih) sistema, posebno je značajno iznalaženje puteva ka podizanju kvaliteta proizvoda. Nema sumnje da je kvalitet projektovanja i konstruisanja jedan od

bitnih faktora kvaliteta mašinskih sistema i jedan od najznačajnijih uslova u razvoju proizvoda.

### 2. PROJEKTOVANJE I KONSTRUISANJE ALATA ZA OBRADU REZANJEM

Projektovanje i konstruisanje je u najširem smislu intelektualni poduhvat preduzet zbog zadovoljavanja određenih potreba na najbolji mogući način. To je jedna od tehničkih aktivnosti, prisutna u svim područjima ljudskog života, oslonjena na otkrića i zakone nauke, usmerena ka stvaranju uslova za primenu tih zakona na razvoj i izradu proizvoda.

Sam pojam "projektovanje i konstruisanje" u sebi sadrži i podrazumeva sve potrebne radnje da se određeni proizvod (mašinski ili tehnički sistem) konačno oblikuje i konstrukciono razradi do nivoa da je njegova tehnološka razrada i radionička izrada apsolutno moguća i izvodljiva. Bez obzira na aspekt posmatranja i ravan definisanja, osnova projektovanja i konstruisanja je misaonost sprovedenog procesa, gde su posebno važne struktura, geneza i sinteza misaonog procesa pomoću koga konstruktor formira konstrukciono rešenje.

U sklopu svestrane analize projektovanja i konstruisanja kao stvaralačkog procesa treba napomenuti i to da je projektovanje i konstruisanje u svim svojim oblastima prilagođeno realnosti. Cilj svakog projektovanja i konstruisanja je novi proizvod čije funkcionisanje počiva na zakonima fizike.

Projektovanje alata za obradu rezanjem u opštem slučaju sastoji se iz profilisanja i konstruktivnog oblikovanja. Na osnovu zadatog profila izratka određuje se profil (koordinate tačaka) reznog dela ili profil ledne površine alata za obradu rezanjem. Osim oblika i dimenzija izratka zadaje se i kretanje alata i obratka a takođe i karakter i položaj grudne i ledne površine.

Za uspešno ispunjavanje postavljenih zahteva neophodno je poznavati ulazne parametre koji proizilaze iz definisanog tehnološkog procesa obrade.

Prilikom projektovanja treba rešiti optimalnu kinematiku rezanja. Takođe, projektovanjem treba obezbediti efikasno hlađenje i podmazivanje, kao i efikasno lomljenje strugotine. Pri konstruisanju postoje četiri konstrukciona principa pomoću kojih se ostvaruje zamišljena ideja:

- način funkcionisanja alata,
- materijal za izradu alata,
- oblik i rezna geometrija alata i
- dimenzije ili mere alata.

Proces projektovanja i konstruisanja prolazi kroz osnovne faze koje su:

- razjašnjavanje – proučavanje zadatka
- koncipiranje
- formiranje konstrukcije
- detaljno konstruisanje

Pri projektovanju alata za obradu rezanjem glavni deo radnog vremena utroši se na proračun. Proračun alata za obradu rezanjem zahteva dosta vremena. U cilju smanjenja tog vremena pristupa se automatizaciji.

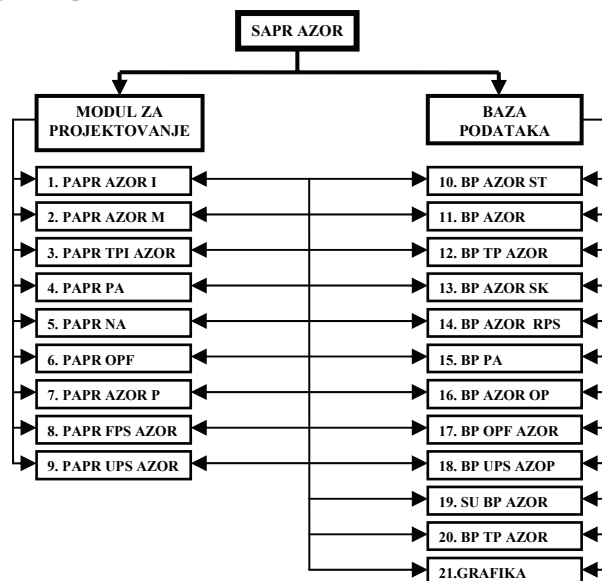
Projektovanje alata za obradu rezanjem predstavlja naročito podesan i prikladan objekat za automatizaciju, jer je to više varijantan i obiman, a ujedno složen i dovoljno formalizovan proces. Automatsko projektovanje, sa jedne strane, zahteva postojanje tačnih relacija, a sa druge strane je upotrebljivo i za određivanje najtačnijih profila alata kao i za optimizaciju njegovih parametara.

Kod projektovanja alata za obradu rezanjem pomoću računara potrebno je pristup tom poslu posmatrati u sklopu automatizacije celog projektovanog procesa i upravljanja proizvodnjom.

Proces projektovanja alata za obradu rezanjem pomoću računara moguć je samo pod uslovom da je zadatak pravilno postavljen, tj. pri odgovarajućoj formalizaciji i postavljanju algoritma

Suština programiranja jeste prevođenje algoritma na određeni programski jezik u cilju njegove realizacije. Program je niz naredbi koje poseduju implicitni i eksplicitni redosled izvršavanja i koji definiše realizaciju algoritamskog postupka na računaru.

Modul za projektovanje alata za obradu rezanjem namenjen je za izvršavanje projektnih procedura i sastavljen je od 9 podmodula (slika 2.):

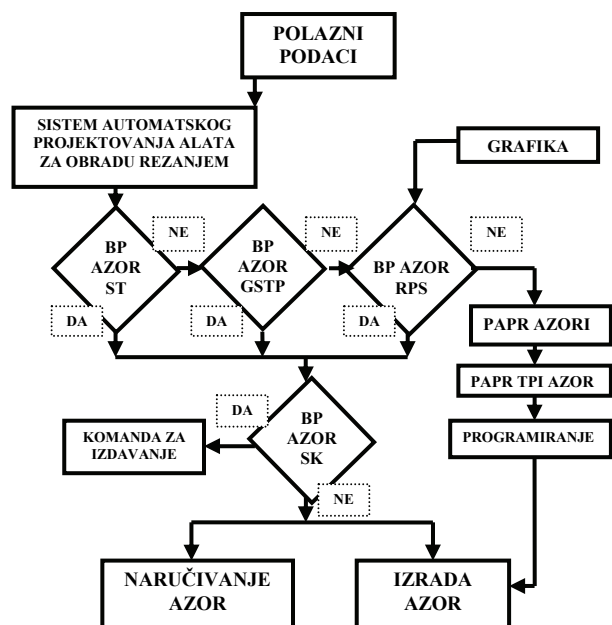


Slika 2.: Struktura sistema automatizovanog projektovanja alata za obradu rezanjem

Baza podataka alata za obradu rezanjem predstavlja nepohodan element za funkcionisanje proizvodnog sistema

na visokom tehnološkom nivou. U okviru baze podataka alata za obradu rezanjem postoji 12 podmodula (slika 2.).

Podsystemi za projektovanje i baza podataka u procesu rada nalaze se u uzajamnom dejstvu. Jedna od varijanti šeme uzajamnog dejstva podsystema za projektovanje i baze podataka prikazana je na slici 3. [10]:



Slika 3: Šema međusobnog dejstva podsystema za projektovanje i baze podataka SAPR AZOR u rangu podsystema

Obrada ozubljenja cilindričnih zupčanika rendisanjem nalazi čestu primenu, naravno, pored glodanja. Oblasti primene glodanja i rendisanja nisu uvek strogo podeljene, već se one za izvesne oblike kao i veličine zupčanika mogu i poklapati; ovo poklapanje naročito je uočljivo kod manjih zupčanika, dok se kod većih izdvaja glodanje kao produktivnija metoda ali koja u pogledu tačnosti zaostaje za rendisanjem. Pri izboru oblasti primene važnu ulogu igra oblik zupčanika, tako da na primer, rendisanje za grupe spojenih zupčanika često jedino i dolazi u obzir.

Izrada cilindričnih zupčanika pojedinačnim rezanjem svakog zupca postiže se na vertikalnoj rendisaljci sa obrtnim stolom pomoću profilisanog noža čiji profil odgovara profilu međuzublja. Po završenom jednom zupcu podeoni aparat okreće obradak za sledeći korak. Pošto je za svaki drugi broj zubaca i pri istom modulu potrebno pripremiti nož drugog profila i zbog male produktivnosti ovaj način izrade zupčanika se ređe upotrebljava i nalazi primenu uglavnom za veće zupčanike.

Jedna od metoda koja se bazira na principu relativnog kotrljanja je metoda Felouz (*Fellows*) koja kao alat koristi kružni zupčasti nož koji predstavlja višeprofilni alat u vidu zupčanika.

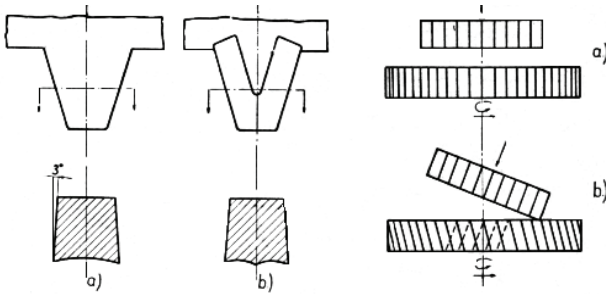
Druga metoda rendisanja cilindričnih zupčanika je metoda Maga (*Maag*). Kao alat služi pravi zupčasti nož oblika zupčaste poluge tj. dela evolventnog zupčanika beskonačnog velikog prečnika. Alat 1 (slika 5. [11]) proizvodi vertikalno glavno kretanje za slučaj obrade ozubljenja cilindričnih zupčanika sa pravim zupcima, pri čemu je hod naniže radni hod.



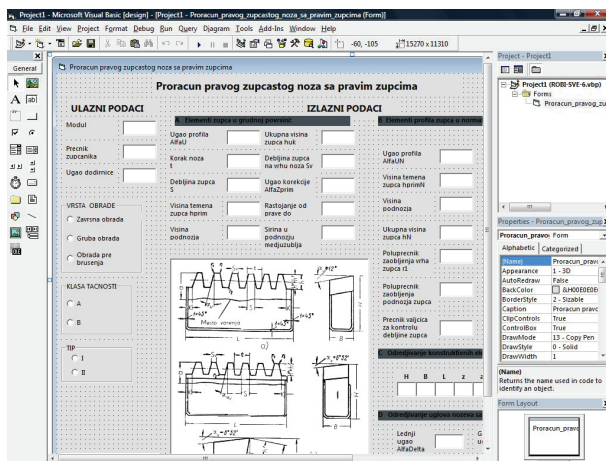


Slika 4.: Princip rada rendisaljke za zupčanike Mag

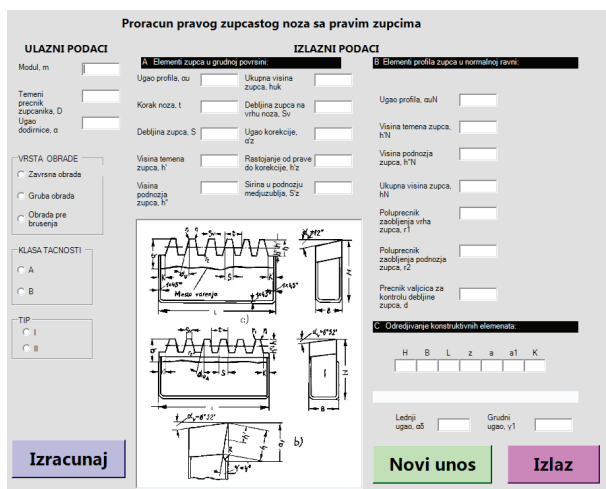
Na rendisaljci tipa Mag izrađuju se cilindrični zupčanici sa pravim zupcima pri vertikalnom kretanju nosača alata (slika 4.[11]) dok se za cilindrične zupčanike sa kosim zubima nosač alata naginje za ugao nagiba kosih zubaca (slika 5.[11]).



Slika 5.: Zubi pravog zupčastog noža i međusobni položaj alata i obradka pri rendisanju zupčanika po Magu; a- sa pravim zupcima, b – sa kosim zupcima



Slika 6: Izgled forme našeg programa



Slika 7.: Prikaz izvršne verzije programa

Izrada alata za rendisaljku Mag jednostavnija je od alata za rendisaljku Felouz i omogućava postizanje veće tačnosti zbog pravih profila zuba, dok je mašina složenija zbog potrebe za periodičnim radom koji je kod rendisaljke Felouz zamenjen kontinualnim radom i alata i obradka.

Kao osnovu za izradu programa korišćen je proračun pravog zupčastog noža, odnosno algoritam prikazan u [11].

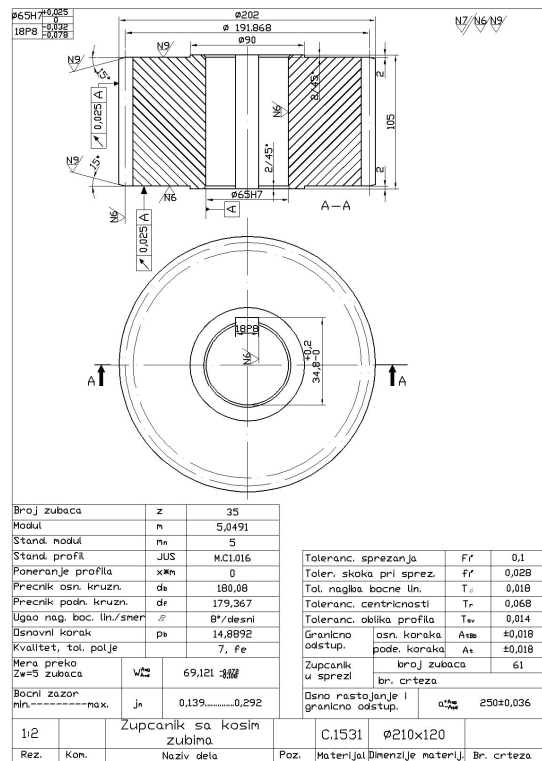
Na slici 6. je dat izgled forme programa, a izračunavanje programa vidi se na slici 7.

### 3. PRIMENA PROGRAMSKOG SISTEMA CATIA V5 U PROJEKTOVANJU I KONSTRUISANJU PRAVOG ZUPČASTOG NOŽA

CATIA V5 je veoma “uzbudljiv” alat za projektovanje podržano računom (eng. *Computer Aided Design – CAD*), koji inženjeri i dizajneri koriste pri razvoju proizvoda. Program CATIA V5 je napisan kao rešenje nezavisno od operativnog sistema računara, koje nudi nebrojene mogućnosti za strukturiranje programskih modula i prilagođavanje korisniku. Ovaj programski paket se umnogome zasniva na osnovnim elementima izgleda i ponašanja operativnog sistema.

CATIA V5 je program za kolaborativno projektovanje nove generacije, koji neprimetno integriše sve aspekte procesa razvoja proizvoda. To obuhvata simultanu upotrebu podataka i geometrijskih informacija, od koncepta proizvoda do definicije proizvodnog procesa. U “srcu” programa CATIA V5 leži integracija asocijativne strukture podataka, koja omogućava simultani razvoj proizvoda kroz čitav njegov “životni vek” i samim tim, njegov brži razvoj.

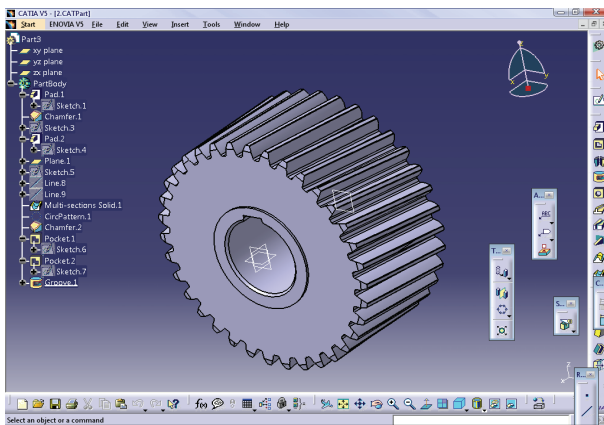
Pre projektovanja pravog zupčastog noža neophodno je znati kako izgleda izradak tj. Zupčanik. Naslici 9. je dato njegovo modelovanje.



Slika 8: Zupčanik sa kosim zubima

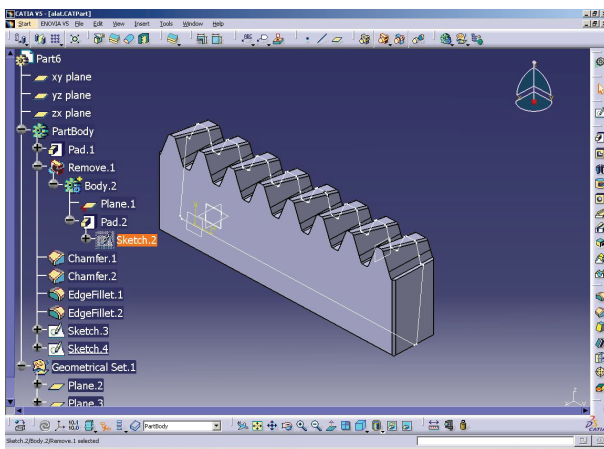
Kao što je do sada i navedeno za obradu ozubljenja koristi se pravi zupčasti nož sa pravim zupcima tipa I za završnu obradu klase tačnosti A.



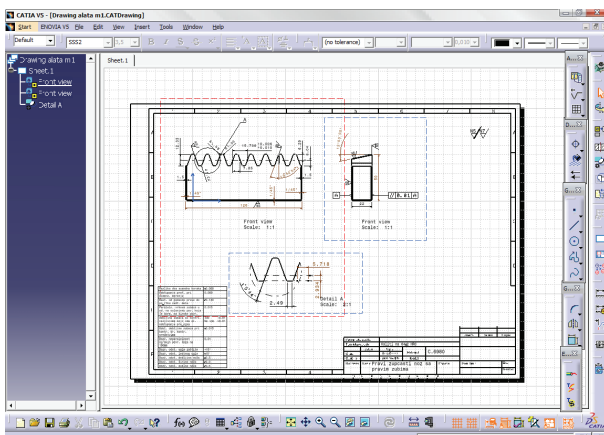


Slika 9: Konačan izgled zupčanika

Na slici 10. prikazan je konačan izgled pravog zupčastog noža dobijen u programskom sistemu CATIA V5, a na slici 11. dat je radionički crtež pravog zupčastog noža.



Slika 10: Konačan izgled pravog zupčastog noža



Slika 11.: Radionički crtež pravog zupčastog noža

#### 4. ZAKLJUČAK

Savremena proizvodnja se ne može zamisliti bez upotrebe alata za obradu rezanjem. Projektant-konstruktor alata za obradu rezanjem mora posedovati širok spektar znanja ne samo o geometriji alata i primenjenim materijalima već i o kinematici i geometriji mašine na kojoj će se alat koristiti i naročito programskim sistemima za automatizaciju projektovanja i konstruisanja.

U ovom radu je prikazan proces automatizacije proračuna pravog zupčastog noža sa pravim zupcima. Sve prednosti programskog sistema *CATIA V5* iskorištene su u ovom radu

pri modeliranju zupčanika, kao i pravog zupčastog noža sa pravim zupcima potrebnog za njegovu izradu. Korišćenjem programskog sistema *CATIA V5* u projektovanju i konstruisanju alata za obradu rezanjem ostvarujemo povezanost, komunikaciju i razmenu informacija u istoj ravni sa najvećim proizvođačima alata za obradu rezanjem i svim velikim i važnim kompanijama i školskim centrima u ovom trenutku vremena.

#### 5. LITERATURA

- [1] Bera R.: Projektovanje i konstruisanje pravog zupčastog noža primenom programskog jezika Visual Basic i programskog sistema CATIA 5, FTN Novi Sad, 2005.
- [2] Borenović M.: Projektovanje i konstruisanje kružnog zupčastog noža primenom programskog jezika Visual Basic i programskog sistema CATIA 5, FTN Novi Sad, 2005.
- [3] Čvokić, A.: *Analiza kinematske geometrije alata za obradu rezanjem*, diplomski rad, FTN Novi Sad, 2000.
- [4] Ящерицын, П.И., Ерененко, М.Л., Жигалко, Н.И. : Основы резания материалов и режущий инструмент, Минск, 1981.
- [5] Karam ,F. : CATIA V5, Kompiuter biblioteka,Čačak 2005
- [6] Miltenović, V., Ognjanović, M.: *Mašinski elementi 2*, Mašinski fakultet Niš, 2005
- [7] Ординарцев, И.А., Сергеев, А.К. , Онишко, А.В., Филипов, Г.В., Шевченко, А.Н. : Справочник инструментальщика, Ленинград, 1987.
- [8] Родин, П.Р. : *Металлорежущие инструменты*, Киев, 1974.
- [9] Sovilj, B., Rudić, I., Jaščur, M. i dr. : *Razvoj i unapređenje proizvodnje alata za ozubljenje*, FTN Novi Sad, 1986.
- [10] Tanasijević, S.: *Tribološki ispravno konstruisanje*, Mašinski fakultet Kragujevac, 2004.
- [11] Trifunčević, G.: *Projektovanje i konstruisanje modulnog koturastog glodala primenom programskog sistema CATIA V5*, FTN Novi Sad, 2006.
- [12] Wallace, W. : *Visual Basic 6*, Mikro Knjiga, Beograd.

**Autori: Prof.dr Bogdan Sovilj, Prof.dr Pavel Kovač, Bera Robert, dipl.ing., Đorđe Milenković, dipl.ing., Ivan Sovilj-Nikić Phd student, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel.: +381 21 485-2343. , Fax.: +381 21 485-133**

**Goran Trifunčević, dipl.ing., Institut za bezbednost u radu i životnoj sredini d.o.o., Aleksandra Tišme 17/6, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel.: +381 21 655-1208**

**Izv. Prof. dr Ivan Seuček, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ivana Lučića 5, 10000 Zagreb, Hrvatska, Tel.: +385 1 616-8336, Fax.: +385 1 615-7123**

E-mail: [bsovilj@uns.ns.ac.yu](mailto:bsovilj@uns.ns.ac.yu)  
[ivan.seucek@fsb.hr](mailto:ivan.seucek@fsb.hr)  
[pkovac@uns.ns.ac.yu](mailto:pkovac@uns.ns.ac.yu)  
[milenkovic\\_djordje@yahoo.com](mailto:milenkovic_djordje@yahoo.com)  
[diomed17@gmail.com](mailto:diomed17@gmail.com)

*Rad je nastao u okviru projekta "Razvoj progresivne tehnologije za lednu obradu profilnih alata na CNC mašinama", broj TR 14059 Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj, Republike Srbije, 2008.*

Babić, A., Pljakić, M., Ilić, N., Petrović, A.

## POVEZIVANJE PROCESA PROJEKTOVANJA PROIZVODA U CAD-U SA MONTAŽNIM OPERACIJAMA U CAM-U NA PRIMERU GLODAČKIH GLAVA

**Sadržaj:** Virtualno projektovanje proizvoda predstavlja tehnološki ključ za smanjenje troškova nastalih od grešaka generisanih u procesima inženjerskog projektovanja u toku životnog veka. Važno je uspostaviti vezu između projektovanja proizvoda u CAD-u sa kompleksnim ograničenjima montažnih operacija u CAM-u, tako da se u procesu projektovanja obezbeđuju uslovi za razvoj i modifikaciju u virtualnom okruženju pre početka proizvodnje. Ovo je veoma izraženo kod projektovanja glodačkih glava za obradu infrastrukturnih objekata. Prednost ovog povezivanja u procesima projektovanja je u prevazilaženju formiranja skupih fizičkih proizvodnih sistema, tako da se sva varijantna istraživanja odvijaju na virtualnom modelu. Simulacione studije se zasnivaju na korišćenju podataka CAD fajla AP203 iz STEP modela.

**Ključne reči:** Projektovanje proizvoda pomoću računara (CAD), projektovanje tehnologije pomoću računara (CAM), montaža.

## LINKING PRODUCT DESIGN IN CAD WITH ASSEMBLY OPERATIONS IN CAM IN CASE OF ROADHEADER SYSTEMS

**Abstract:** Virtual product design has become a key technology in reducing costly design errors according to PLM criteria. It is important to link a product's design in CAD with the constrained complexity of assembly operations in CAM so that the design can be evaluated and modified in a virtual environment before production begins. It is very specifically significant for product design of roadheaders for processing infrastructure objects. The advantage of this virtual product assembly system is that a design can be validated first in a virtual environment without building the expensive physical production system. Simulation studies were made using CAD Ap-203 data files from STEP model.

**Key words:** Computer aided design (CAD), computer aided manufacturing (CAM), assembly.

### 1. UVOD

Montažni procesi u okviru životnog veka proizvoda predstavljaju mnogo viši nivo od sastavljanja delova u celinu, bilo da se radi o projektovanju proizvoda ili projektovanju tehnologije izrade na komponentnom nivou. To je prevojna tačka u tehnološkom ciklusu gde proizvod započinje životni vek i po prvi put ima mogućnost funkcionisanja. Najvidljiviji aspekti kvaliteta proizvoda se ogledaju upravo projektovanim procesom montaže.

Tradicionalno, projektovanje za laku montažu DFA se zasniva na proučavanju procesa demontaže DFDA (rastavljanja) najčešće pod pretpostavkom da "ako možete rastaviti deo možete ga i sastaviti i obrnuto". U realnom okruženju stvar može biti dosta drugačija od inverznog procesa spajanja. Poznato je da za dati proizvod broj izvodljivih montažnih struktura eksponencijalno raste u skladu sa brojem komponenti. U analizi konceptualnih rešenja zaključuje se da projektovani optimalni proces demontaže ne mora predstavljati najbolje konceptualno rešenje za montažu. Projektovanje za montažu predstavlja inženjerski proces koji integriše veliki broj DFX pristupa u okviru simultanog projektovanja proizvoda i procesa.

Projektovanje virtualnog proizvoda predstavlja tehnološki ključ za smanjenje u prvom redu troškova nastalih od projektantskih propusta u okviru simultanog inženjerstva. U okviru generisanja modela proizvoda navedeni aspekt je izražen u vezi između projektovanja proizvoda u CAD-u sa montažnim operacijama u CAM-u pri čemu se virtualno okruženje zasniva na izbegavanju korišćenja skupih proizvodnih sistema.

Složenost montažnih procesa i tehnoloških procesa izrade komponenti za projektovani proizvod ima ogroman uticaj na troškove, profit i mogućnost recikliranja. Inženjerski model proizvoda integriše veliki broj DFX pristupa pri čemu tek

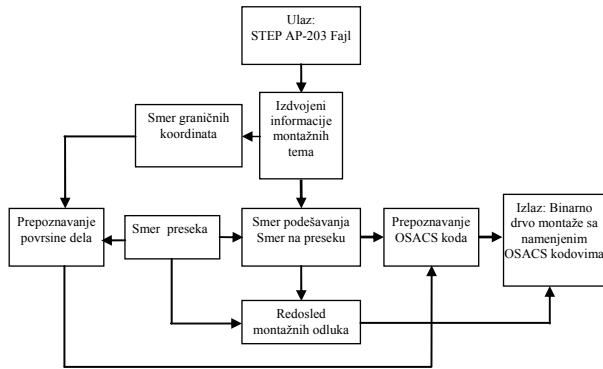
nakon detaljnog razmatranja može biti procenjen i prilagođen pre nego što je lansiran u proizvodnju (prevojna tačka rađanja proizvoda). Prema nekim autorima projektovanje proizvoda iznosi 6% od troškova namenjenih razvoju proizvoda pri čemu je više od 70% troškova proizvodnje se odnosi na faze konceptualnog projektovanja. To znači da dobre preliminarne projektantske odluke moguće je doneti jedino posle detaljnih analiza kompleksnosti proizvodnje i životnog veka proizvoda.

Složene operacije montaže značajno povećavaju troškove same proizvodnje kompleksnih proizvoda. Takođe, proizvodi čije rasklapanje zahteva složene operacije povećavaju troškove u održavanju i reciklaži. Troškovi montaže i demontaže značajno utiču na troškove u životnom veku proizvoda, što zahteva primenu projektantskih rešenja koja obezbeđuju efikasnu montažu. Složenost montaže se može definisati kao složenost ograničenja međusobnog kretanja delova koji se sklapaju. Da bi se predupredile problematične operacije montaže u CAM okruženju, potrebno je predvideti složenost međusobnog sklapanja komponenti pri projektovanju proizvoda u CAD okruženju primenom virtuelnih alata za sklapanje.

Virtualni sistem koji povezuje projektantska rešenja iz CAD okruženja sa kompleksnošću montažnih operacija u CAM okruženju, virtualno ocenjuje i vrednuje projekat proizvoda i montažne strukture. Koraci u realizaciji ovakvog sistema su:

- Kreiranje sistema za kodiranje montažnih struktura (OSACS- Open Structured Assembly Coding sistem) - koji treba da identifikuje i kodira sve operacije sklapanja dva dela u CAM -u
- Kreiranje sistema za ekstrahovanje koda koji identifikuje kompatibilne montažne operacije iz CAD modela u STEP AP-203 dokumentima.
- Kreiranje generatora redosleda operacija montaže koji generiše binarno stablo montažne strukture za projektovani

proizvod kodiran kompatibilnim operacijama montaže u CAM-u za sklop proizvoda.



Slika 1. Projektovanje generatora redosleda montaže sa sistemom za kodiranje struktura.

## 2. MONTAŽNI PROCESI

Proces montaže se može posmatrati na dva načina, kao:

- Montaža na lokalnom, i
- Montaža na globalnom nivou.

### 2.1 Montaža na lokalnom nivou

Obuhvata sve korake ili akcije montaže, uključujući opise površina na delovima, koje se nazivaju površine spajanja. Takođe, obuhvata i sva kretanja i putanje koje su uključene u bilo koji deo procesa montaže.

Rupa	Lokacija Orijentacija Prečnik Dubina Ugao oborene ivice Dubina oborene ivice Pravac izlaska	X,Y,Z $\alpha, \beta, \gamma$ broj broj broj broj Z
Rupa sa navojem	Lokacija Orijentacija Prečnik Dubina Ugao oborene ivice Dubina oborene ivice Korak navoja Vrsta navoja Pravac izlaska	X,Y,Z $\alpha, \beta, \gamma$ broj broj broj broj broj simbol Z
Trn	Lokacija Orijentacija Prečnik Dubina Ugao oborene ivice Dubina oborene ivice Pravac izlaska	X,Y,Z $\alpha, \beta, \gamma$ broj broj broj broj Z
Trn sa navojem	Lokacija Orijentacija Prečnik Dubina Ugao oborene ivice Dubina oborene ivice Korak navoja Vrsta navoja Pravac izlaska	X,Y,Z $\alpha, \beta, \gamma$ broj broj broj broj broj simbol Z

Slika 2. Montaža na lokalnom nivou

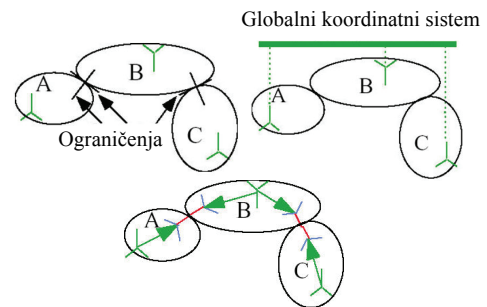
Aspekti montaže na lokalnom nivou, koji mogu biti potrebni ili korisni u montažno-orijentisanoj bazi podataka, uključuju:

- geometriju delova i njihove površine spajanja,
- promenu oblika ili položaja primitiva u odnosu na nominalan,
- vremena i troškove za izvođenje montaže pomoću različitih metoda,
- faktore koji utiču na pogodnost ili uspeh montaže, ili oštećenja dela,
- potrebne alate i pristup njima,
- veze,
- pravila ili izbor projektovanja za montažu, uključujući tipove klasifikacije primitiva spajanja i metode,
- pravila ili izbor prikazivanja dela, orijentaciju, i prilaz delova

### 2.2 Montaža na globalnom nivou

Montaža na globalnom nivou odnosi se na pitanja montaže koja uključuju više od jednog dela. Ona uključuje raznovrsnost oblasti geometrijske familije, kao što su solid modeli više delova, prikazujući više delova u njihovoj međusobnoj poziciji, sastavnici delova ili listi materijala, veze, alate za montažu, tolerancije, i putanje montaže. Model podataka koji se bavi ovim pitanjima treba biti strukturiran drugačije i treba da sadrži različite informacije od onih koje trenutno sadrže konvencionalni geometrijski modeli. To ne može samo biti skup individualnih geometrijskih delova ili neka lista delova. Model podataka minimalno treba sadržati:

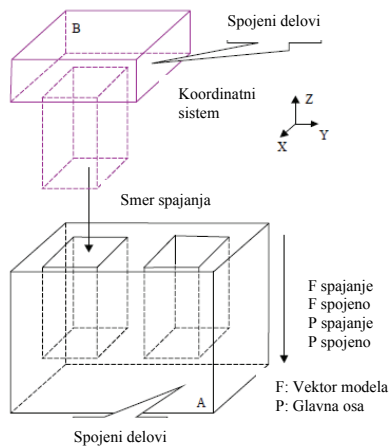
- koji delovi se spajaju sa drugima, i sa kojim primitivima,
- koji montažni primitivi su projektovani kao nosioci dimenzionih ograničenja,
- koji delovi su u kojim podsklopovima i pod kojim uslovima,
- identifikacija primitiva koji su pogodni za upotrebu kao bazne tačke, ili koji su bili označeni kao bazne ili merne tačke,
- koji delovi su u kojim varijantama proizvoda,
- gde su napravljeni ili ko je napravio delove ili podsklopove (distribuirana proizvodnja).



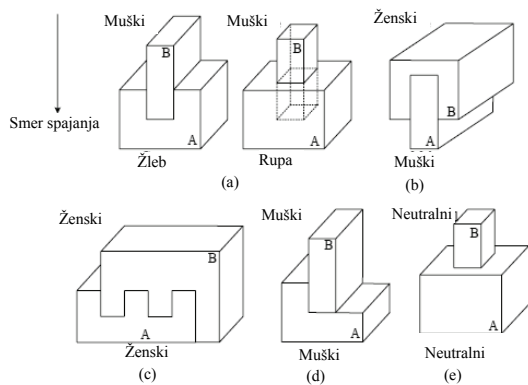
Slika 3. Montaža na globalnom nivou

### 2.3 Montažne ose i površine spajanja komponentata

Bazni elementi za modelovanje montažnih struktura su površine spajanja. Površine spajanja su lokalni elementi na delovima preko kojih se spajaju sa drugim delovima. Primeri površina za spajanje su prikazani na slici 4 i 5.



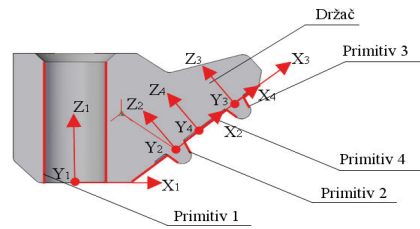
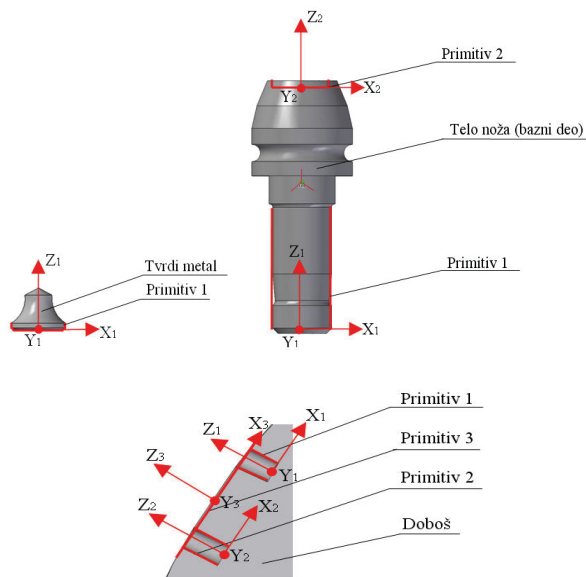
Slika 4. Kinematika montaže 2 dela



Slika 5. Tipovi i površine delova

#### 2.4 Montažne ose spajanja noževa glodačkog alata

Delovi-komponente montažne strukture glodačkih noževa sa definisanim površinama za povezivanje sa drugim delovima su prikazani na slici 6. Ovo predstavlja montažnu strukturu glodačkih glava na lokalnom nivou. Pored primitiva spajanja prikazani su i koordinatni sistemimi, gde osa Z predstavlja pravac ekspaniranja delova. Kao primitivi spajanja korišćene su ravne i cilindrične površine.



Slika 6. Delovi glodačkog doboša sa prikazanim primitivima spajanja i lokalnim koordinatnim sistemima

Na globalnom nivou, projektovanje montažne strukture glodačkih glava je izvršeno korišćenjem pristupa „Bottom-up“, gde je povezivanjem komponenata dobijena montažna struktura kao najviši nivo hijerarhijske strukture. Delovi su spojeni preko primitiva spajanja, uspostavljanjem odgovarajućih veza između površina.

Glodački alati u obradi infrastrukturnih objekata predstavljaju proizvode sa složenom montažnom strukturom pri čemu pojedine komponente proizvode više malih i srednjih preduzeća koristeći princip distribuirane proizvodnje. Definisane proizvođača/dobavljača pojedinih montažnih komponenata principom distribuirane proizvodnje zahteva analizu i kodiranje složenih struktura proizvoda u cilju generisanja a zatim prisajedinjenja komponenata montažnoj strukturi. Želja je da se na bazi opštih principa montaže formira sistem za kodiranje redosleda CAM operacija u montažnim strukturama, koji treba da bude osnova za uvođenje distribuirane proizvodnje glodačkih glava za obradu infrastrukturnih objekata.

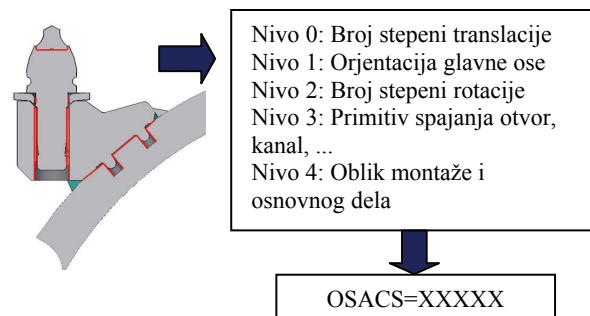
### 3. SISTEM ZA KODIRANJE MONTAŽNIH STRUKTURA

Većina montažnih operacija može se raščlaniti na nekoliko elementarnih operacija spajanja delova koje obuhvataju uklapanje jednog dela u drugi. Svaki od delova ima vektor primitiva (F) kojim se predstavlja orijentacija dela i vektor glavne ose dela kojim se iskazuje simetrija dela. Proučavanjem geometrijskih sličnosti između različitih parova delova razvijen je osnovni sistem za kodiranje montažnih struktura koji sadrži četiri nivoa (0,1,2,3), što je prikazano na slici 7. U kodu su zapravo sadržane informacije koje su ekvivalentni CAM operacijama.

Daljim razmatranjem tipova delova i njihove geometrije identifikuju se tri osnovna primitiva kojima se klasifikuju različite operacije montaže dva dela:

- broj stepeni slobode translacije između delova,
- broj stepeni slobode rotacije dela koji se uklapa u bazni deo,
- relativna pozicija i orijentacija dva dela u okviru zajedničkog koordinatnog sistema.

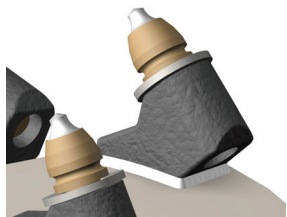
Na osnovu ovih informacija, sistem se proširuje na opšti za klasifikaciju operacija montaže i sadrži pet nivoa : 0,1,2,3,4.



Slika 7. Primer OSACS koda



Držači noževa slika 7 i 8 su elementi koji omogućavaju rotaciju noža u njima, i oni obezbeđuju nožu potreban prostorni položaj u procesu rezanja. Držači imaju relativno dug radni vek i nije ih potrebno često menjati. Zato je veza držača noževa sa dobošima izvedena zavarivanjem.



Slika 8. Držač noža na plaštu glodačke glave, spojen zavarivanjem

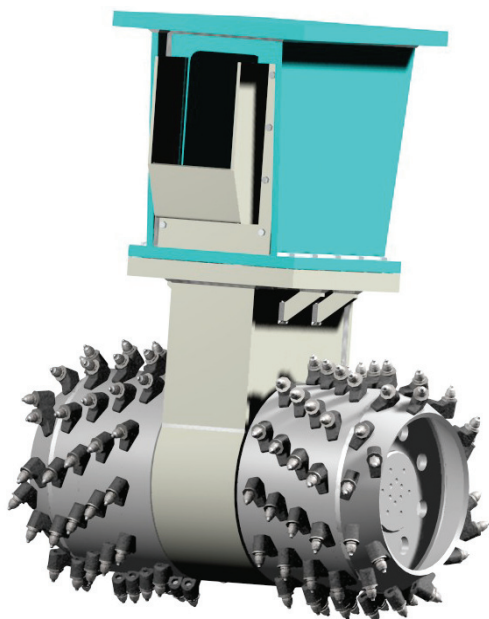
### 3.1 Automatsko ekstrahovanje OSACS koda

Za automatsko ekstrahovanje koda potrebno je da sistem pročita geometrijske informacije iz CAD sistema, da može da prepozna topološke informacije o sklapanju delova potrebne za CAM operacije i da ih prevedu u petonivojski kod ograničenja. Za prikupljanje informacija iz CAD sistema koristiće se model ISO-10303, STEP.

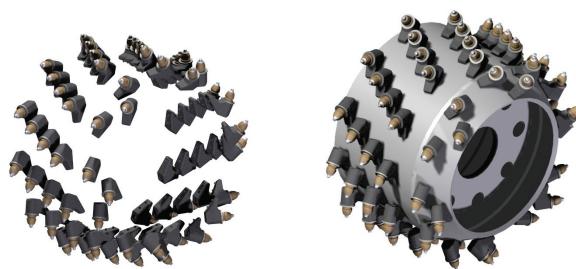
### 3.2 Generator redosleda operacija montaže

Da bi se odredio redosled operacija montaže potrebno je najpre prepoznati sve parove delova koji se mogu međusobno sklapati. Iz geometrijskih informacija obezbeđenih preko STEP-a dobijaju se informacije o maksimalnim i minimalnim granicama svakog dela u sva tri pravca. Jednostavnim algoritmom ispituje se da li se postoji međusobni presek ovih granica delova, odnosno mogućnost da se oni sklapaju. Ispitivanjem svakog dela dobija se lista svih delova sa kojima on ima presek i može da se spaja.

Modelovanje glodačke glave na nivou montažne strukture je veoma značajno jer se uspostavljanjem montažnih relacija postižu kinematski zahtevi. Solid Edge poseduje modul za modeliranje proizvoda na montažnom nivou, tzv. *assembly* modul. Montažna struktura se uspostavlja na osnovu montažnih relacija koje su u ovom programskom paketu definisane preko naleganja površina, saosnosti elemenata, paralelnosti, upravnosti, itd. Na slici 9 i 10. je prikazana montažna struktura sistema glodačke glave i alata glave.

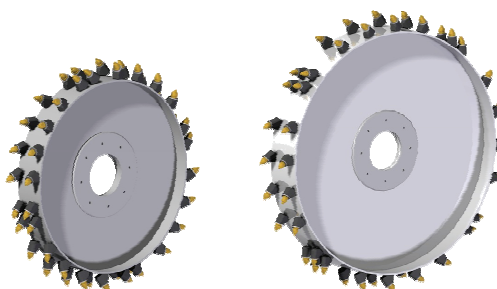


Slika 9. Sistem glodačka glava



Slika 10. Helikoidni raspored noževa i njihov položaj na glodačkoj glavi

Po istom principu urađena je i montažna struktura na primeru glodačkih diskova za obradu uskih infrastrukturnih objekata datih na slici 11.



Slika 11. Raspored noževa na glodačkim diskovima

## 4. ZAKLJUČAK

Razvoj složenih proizvoda poput glodačkih alata se zasniva na projektovanju montažne strukture proizvoda (CAD), zatim redosleda montažnih operacija u CAM-u u cilju generisanja distribuirane podrške proizvodnji komponenta.

## LITERATURA

- [1] Babić, A., Ilić, N., *Savremen koncept projektovanja glodačkih glava u rudarstvu i izradi profila tunela*, 31 Savetovanje Proizvodnog Mašinstva, str. 114-120, Kragujevac, Mašinski fakultet Kragujevac, Kragujevac, Septembar 2006.,
- [2] Babić, A., Petrović A., Petrović A., *Sistem analiza sistema alata i mašina za obradu infrastrukturnih objekata*, Časopis Instituta IMK „14. oktobar“ Kruševac, broj 22-23, str. 169-175, April 2005.
- [3] Babić, A., Petrović, A., Ilić, N., Pršić, D., *Integracija CAD/CAM u projektovanju putnih glodačkih glava*, SPMS08, 501-504, Novi Sad, FTN, Novi Sad, Septembar 2008.
- [4] Babić, A., *Tehnologija montaže*, udžbenik MFK, Kraljevo, 2005.
- [5] H. Copur, L. Ozdemir, J. Rostami: Roadheader applications in mining and tunneling industries, Earth Mechanics Institute, Colorado school of mines, Golden, Colorado, 80401

**Autori:** Prof. dr Arandel Babić, Dipl. inž. maš. Marina Pljakić, Dipl. inž. maš. Nemanja Ilić, Dipl. inž. maš. Aleksandra Petrović, Dipl. inž. maš., Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet Kraljevo, Katedra za proizvodno mašinstvo, Dositejeva 19, 36000 Kraljevo, Srbija, Tel/fax.: +381 36 383-269, +381 36 383-377.

E-mail: [babic.a@mfv.kg.ac.rs](mailto:babic.a@mfv.kg.ac.rs)  
[marinapljakic@gmail.com](mailto:marinapljakic@gmail.com)  
[ilic.n@mfv.kg.ac.rs](mailto:ilic.n@mfv.kg.ac.rs)  
[petrovic.a@mfv.kg.ac.rs](mailto:petrovic.a@mfv.kg.ac.rs)

Rad po pozivu

Milutinović, D., Glavonjić, M., Živanović, S., Dimić, Z., Slavković, N.

## RAZVOJ REKONFIGURABILNOG OBRADNOG SISTEMA NA BAZI ROBOTA

**Rezime:** Istraživanje i razvoj u oblasti višeosne obrade i rekonfigurabilnih multifunkcionalnih obradnih sistema su danas u svetu veoma aktuelni. U radu se pokazuje deo rezultata u razvoju multifunkcionalnog rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota za delove od mekih materijala sa složenim površinama, većih dimenzija i niže klase tačnosti.

**Ključne reči:** višeosna obrada, rekonfigurabilni obradni sistemi, roboti

## DEVELOPMENT OF ROBOT BASED RECONFIGURABLE MACHINING SYSTEM

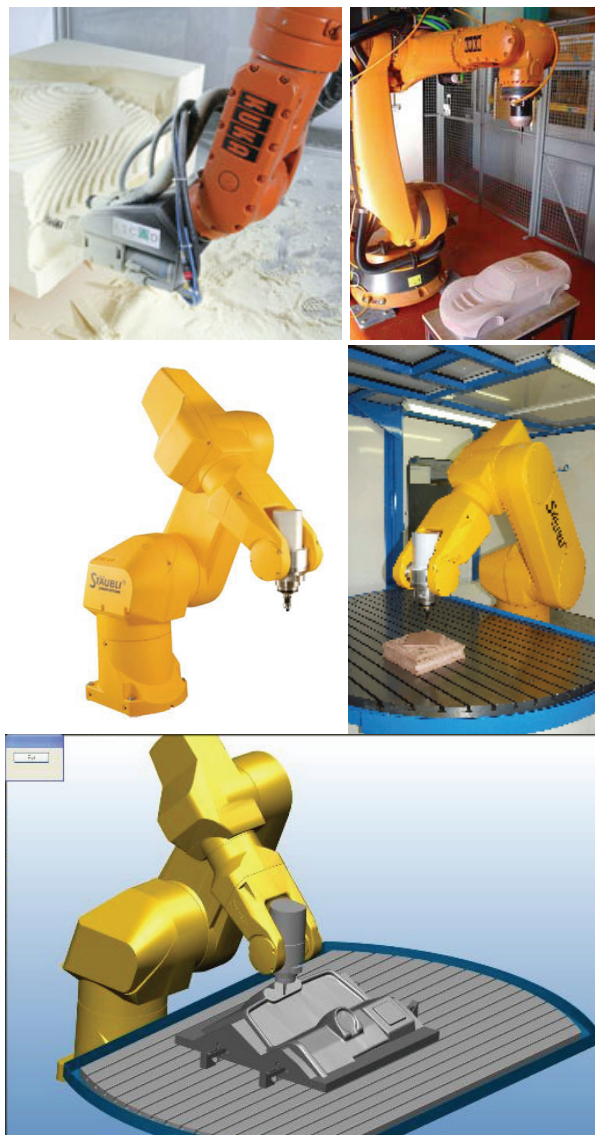
**Abstract:** Research and development in the fields of multi-axis machining and reconfigurable multifunctional machine tools are very intensive world wide. This paper presents the part of research results in the development of robot based reconfigurable multi-functioned machining system for large parts of soft materials with lower tolerances and sculptured surfaces.

**Key words:** multi-axis machining, reconfigurable machining systems, robots

### 1. UVOD

Kao što je poznato, savremene 5-oozne mašine alatke karakterišu visoka tačnost, visoka cena i relativno mali radni prostor. Ove činjenice su snažno motivisale proizvođače robota da pokriju prostor obrade velikih delova sa složenim površinama od mekših materijala i niže klase tačnosti. Industrijski roboti na današnjem nivou razvoja imaju izuzetne karakteristike u pogledu nosivosti, tačnosti i dinamike. Poredeći ih sa 5-osnim mašinama alatkama, za pomenutu klasu zadataka, odlikuje ih mnogo veći radni prostor i cena koja je niža skoro za red veličine. Međutim, jedan od najvećih nedostataka današnjih robota je njihovo programiranje. Naime, svaki proizvođač robota ima svoj jezik za programiranje. S obzirom da su roboti po definiciji multifunkcionalne mašine, robotski jezici pokrivaju vrlo različite oblasti primene kao što su manipulacija, zavarivanje, bojenje i tzv. pomoćne operacije obrade kao što su obaranje ivica, čišćenje, poliranje i slično. Programski jezici za robote su u kombinaciji sa obučavanjem pogodni za slučajeve gde se jednom napisan program koristi duže vremena. Međutim, za primenu robota u brzju izradi prototipova ili u višeosnoj obradi, programiranje robota programskim jezicima je veoma složeno i dugotrajno. Prema [1,2] razlog za ovo leži u nedovoljnoj kooperativnosti proizvođača robota u poređenju sa proizvođačima mašina alatki koji su bili spremni da koriste CAD/CAM sisteme na bazi standarda RS274, odnosno G kod. Razlozi za za ovo leže u relativno malom tržištu robota, ali i nespremnosti proizvođača robota da otkriju detalje svojih upravljačkih algoritama i softvera.

U cilju savladavanja ove ozbiljne barijere za primenu robota u višeosnoj obradi mekših delova velikih gabarita danas je pokrenuto nekoliko projekata kako od velikih i renomiranih proizvođača robota (KUKA, Motoman, Fanuc, Staubli), tako i od proizvođača softvera (Delcam). Primeri robota za obradu proizvođača robota KUKA i Staubli su pokazani na slici 1. Osnovni cilj ovih projekata je razvoj softvera za prevodenje G koda generisanih iz postojećih postprocesora za petoosne mašine alatke, na njihove robotske programske jezike.



Slika 1. Primeri robota za obradu proizvođača robota KUKA i STAUBLI



Polazeći od dugogodišnjeg iskustva u oblasti robota, mašina alatki, obrade i CAD/CAM-a na Katedri za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta u Beogradu, pokrenut je projekat razvoja pilot rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota za delove većih gabarita od mekših materijala, niže klase tačnosti i sa složenim estetskim i funkcionalnim površinama [3,4]. U ovom radu se daje postavka koncepta, opis i početni rezultati razvoja rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota domaće proizvodnje.

## 2. KONCEPT REKONFIGURABILNOG OBRADNOG SISTEMA NA BAZI ROBOTA

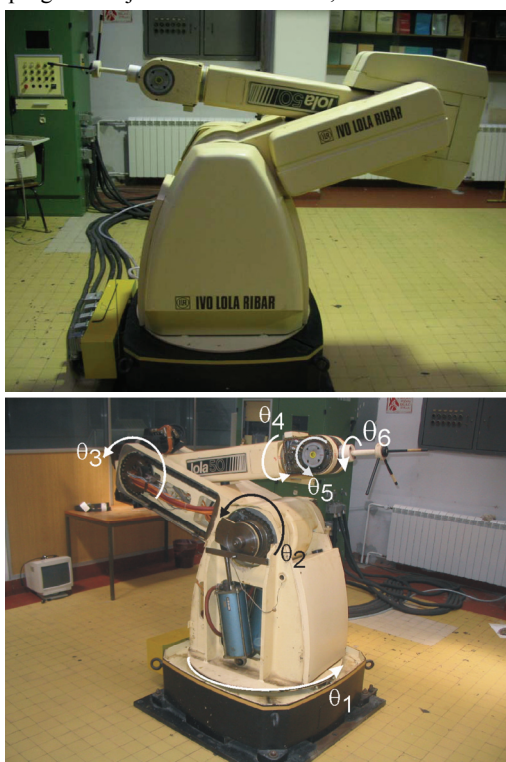
Potrebu za tehnologijom višeosne obrade glodanjem složenih estetskih i funkcionalnih površina kao i za rekonfigurabilnim multifunkcionalnim obradnim sistemima [3] imaju preduzeća u oblastima: izrade delova od lakih legura, obrade drveta, obrada drugih nemetala (kamen, plastika, staklo, kompozit), livenje metala (modeli, kalupi za jezgra i sl.), izrada alata za proizvode od kompozita (korita čamaca, kabine vozila, ljski lopatica, branika i sl.). Takođe značajan prostor za primenu ovakvih obradnih sistema predstavljaju i potrebe za restauracijom objekata kulturne baštine (crkve, manastiri, spomenici i sl.), kao i pozorišna i filmska scenografija.

Planirani rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota za izabranu klasu delova treba da obezbedi brzu izradu, na jednom mestu, složenih delova velikih gabarita od mekših materijala niže klase tačnosti sa složenim površinama generisanim raspoloživim CAD/CAM sistemima i metodama reverznog inženjerstva.

Ovakav sistem bi imao višestruko nižu cenu od postojećih petoosnih mašina alatki i zadovoljio zahteve u pogledu obrade niže klase tačnosti.

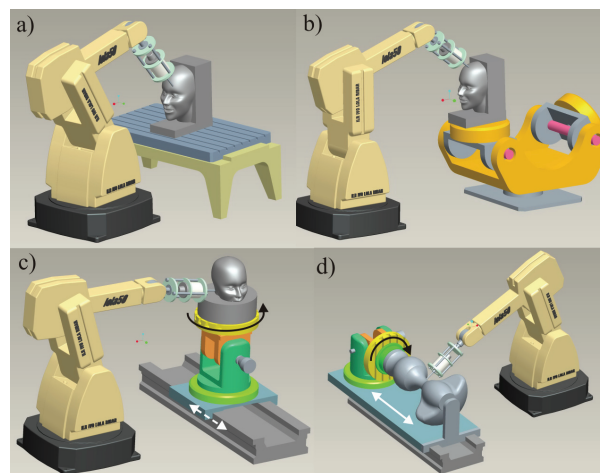
Postavka koncepta rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota koja se ovde ukratko daje se zasniva na:

- Raspoloživom 6-osnom robotu vertikalne zglobne konfiguracije domaće proizvodnje, slika 2, velikog radnog prostora, nosivosti i krutosti sa idejom upravljanja i programiranja kao 5-osne mašine,



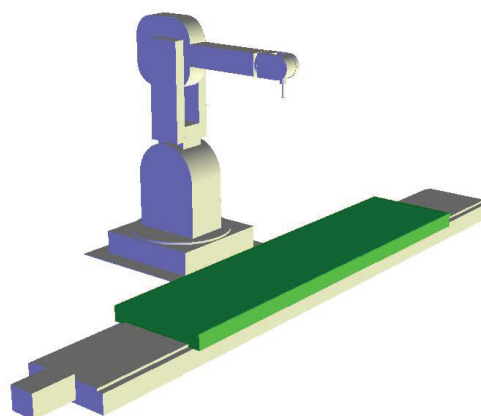
Slika 2. Raspoloživi industrijski robot LOLA 40

- Upravljačkom sistemu otvorene arhitekture baziranom na PC Linux platformi i upravljačkom sistemu ECM2 (Enhanced Machine Control) sa implementiranim upravljačkim algoritimima i softverom.
- Mogućnosti programiranja robota kao vertikalne petoosne glodalice pomoću G koda, čime se eliminiše potreba za translatorom G koda u robotski jezik.
- Mogućnost korišćenja svih CAD/CAM sistema sa implementiranom 5-osnom obradom za programiranje ovog obradnog sistema.
- Mogućnosti rekonfigurisanja osnovne verzije sa slike 3a u obradni sistem sa izmenljivim paletnim pozicionerom, slika 3b, sa dodatnim 2-osnim vertikalnim translatorno-obrtnim stolom, slika 3c i sa dodatnim 2-osnim horizontalnim translatorno-obrtnim stolom, slika 3d, i
- Virtuelnom obradnom sistemu na bazi robota za verifikaciju i simulaciju programa. Sistem je realizovan u Python virtuelnom grafičkom okruženju [7] i implementiran u upravljačkoj jedinici, slika 4.



a) robot sa radnim stolom b) robot sa izmenljivim paletnim pozicionerom c) translatorsna osa poziciona, obrtna kontinualna d) translatorsna i obrtna osa kontinualne

Slika 3. Konceptualni modeli rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi robota kao petoosne mašine

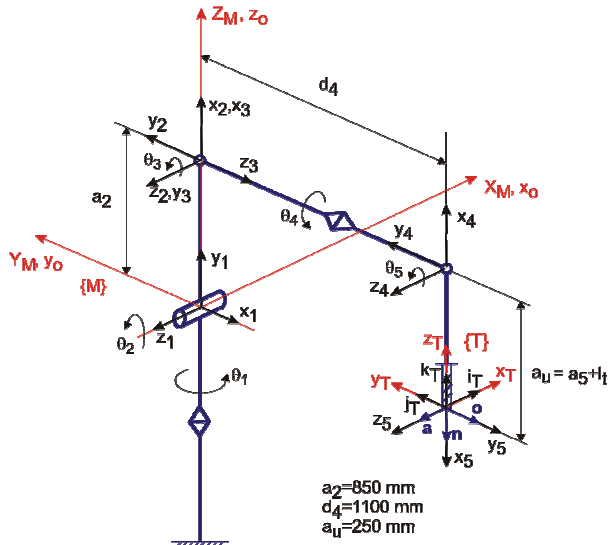


Slika 4. Virtuelni robot u Python grafičkom okruženju

## 3. UPRAVLJANJE I PROGRAMIRANJE

Upravljački sistem je baziran na PC Linux platformi i upravljačkom softveru otvorene arhitekture EMC2 (Enhanced Machine Control) [5], koji je namenjen za upravljanje mašinama alatkama i robotima serijske i paralelne kinematike. EMC2 je izrađen na osnovi NIST-ove (National Institute of Standards and Technology) [6] RCS (Real-time Control System) metodologije i programiran je korišćenjem RCS biblioteke.

Specifičan pristup kinematičkom modeliranju robota LOLA 50 (rešenje inverzne i direktne kinematike) je izvršeno po konvenciji za petoosne vertikalne mašine alatke slika 5.



Slika 5. Kinematički model robota LOLA50 kao vertikalne petoosne glodalice

Modeliranje robota LOLA 50 je izvršeno po Denavit-Hartenberg-ovoj konvenciji s tim što su uvedene dve dodatne transformacije koje se odnose na koordinatne sisteme alata i mašine po konvenciji za petoosne vertikalne mašine alatke. Pozicija i orijentacija alata, odnosno koordinatnog sistema vezanog za vrh alata {T}, u odnosu na koordinatni sistem robota kao mašine {M} je definisana jednačinom (1)

$${}^M_T T = {}^M_o T \cdot {}^o_5 T \cdot {}^5_T T = \begin{bmatrix} i_{Tx} & j_{Tx} & k_{Tx} & x_m \\ i_{Ty} & j_{Ty} & k_{Ty} & y_m \\ i_{Tz} & j_{Tz} & k_{Tz} & z_m \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Matrica

$${}^o_5 T = {}^o_1 A \cdot {}^1_2 A \cdot {}^2_3 A \cdot {}^3_4 A \cdot {}^4_5 A = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & x_o \\ n_y & o_y & a_y & y_o \\ n_z & o_z & a_z & z_o \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

određuje poziciju i orijentaciju koordinatnog sistema  $Ox_5y_5z_5$  vezanog za vrh endefektora u odnosu na koordinatni sistem  $Ox_0y_0z_0$ , vezanog za bazu robota (po konvenciji za robote).

Pri ovome matrice  ${}^{i-1}_i A$ ,  $i=1,2,\dots,5$  predstavljaju matrice segmenata.

Matrica

$${}^5_T T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

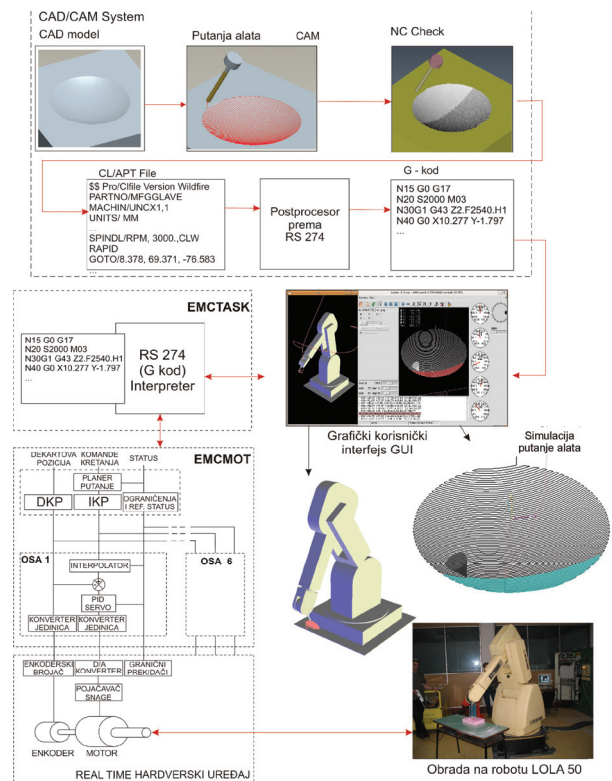
definiše poziciju i orijentaciju koordinatnog sistema {T} vezanog za vrh alata u odnosu na koordinatni sistem  $Ox_5y_5z_5$ .

Matrica  ${}^M_o T$  definiše poziciju i orijentaciju baznog koordinatnog sistema robota u odnosu na usvojeni koordinatni sistem po konvenciji za petoosne mašine alatke (u

slučaju na slici 5,  ${}^M_o T = I$ ).

Za ovako postavljene kinematički model rešenje direktne kinematičkog problema je jednostavno. Međutim, rešavanje inverznog kinematičkog problema je veoma specifično kako za slučaj da samo robot izvodi sva kretanja tako i u slučajevima preraspodele kretanja između robota i dodatnih osa. Za rešeni direktni i inverzni kinematički problem, napisane su odgovarajuće funkcije u C++ jeziku i integrisane sa HAL (Hardware Abstract Layer) u EMC2-u.

Polazeći od postavljenog cilja da se planirani rekonfigurabilni obradni sistem na bazi petoosnog robota programira kao CNC mašina alatka primenom G-koda (RS274), dobijenog iz raspoloživih CAD/CAM sistema, sistem upravljanja i programiranja je konfigurisan kao što je pokazano na slici 6.



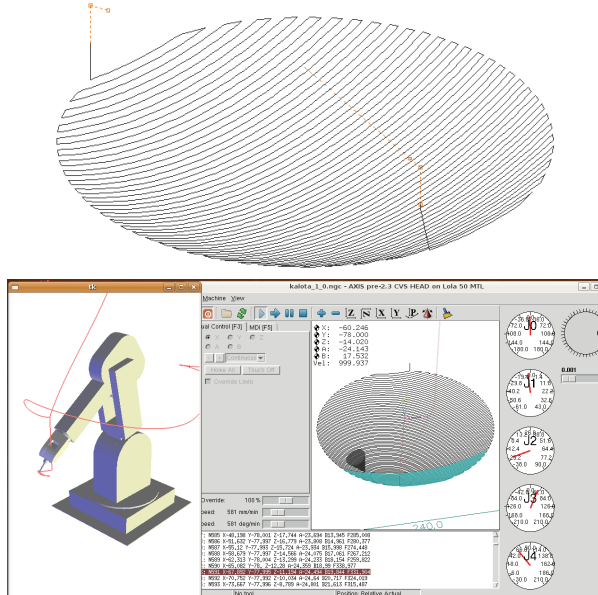
Slika 6. Koncept sistema upravljanja i programiranja za osnovnu varijantu sistema sa slike 3a

Polazi se od CAD modela za koji se u CAD/CAM sistemu (Pro/Engineer) generiše putanja alata (CLF – Cutter Location File). Za dobijenu putanju alata prvo se vrši njena verifikacija u raspoloživom softveru za simulaciju uklanjanja materijala (slika 6), a zatim pristupa postprocesiranju CLF radi dobijanja G-koda za petoosnu vertikalnu glodalicu. Razmatrane su varijante postprocesora za konfiguracije mašina  $(X,Y,Z,A,B)$  i  $(X,Y,Z,A,C)$ , [3,4], gde  $X,Y,Z$  predstavlja poziciju vrha alata, a  $A, B$  i  $C$  uglove orijentacije alata. Za varijantu sistema sa slike 3a, gde sva kretanja izvodi robot usvojen je postprocesor za konfiguraciju mašine  $(X,Y,Z,A,B)$ . Tako dobijeni G-kod se učitava u upravljački softver EMC2 gde se najpre vrši verifikacija programa na virtuelnoj mašini u realnom vremenu, slika 7, a zatim se upravljački signali sa sigurnošću mogu usmeriti ka realnom robotu kao petoosnoj vertikalnoj mašini. Virtuelni robot je konfigurisan preko nekoliko klasa predefinisanih u objektno orijentisanom jeziku Python.

Verifikacija programa u realnom vremenu na virtuelnoj mašini je neophodna zbog kinematike robota koja se bitno razlikuje od kinematike petoosnih mašina alatke (3 translatorne + 2 obrtne ose) čiji se G-kod preuzima. Takođe je



vrlo značajna analiza postavljanja obratka u radni prostor veštine robota, tako da obrada bude izvedena do kraja, a da ni jedna osa ne dođe do kraja svog hoda. To se proverava upravo na simulatoru, odnosno na virtuelnom robotu kao mašini, gde se vrši verifikacija G-koda, slika 7, sa pomeranjem segmenata i ispisivanjem putanje alata, kao da je reč o realnom robotu. Ukoliko dođe do prekoračenja hoda neke ose, vrši se korekcija postavljanja obratka u radni prostor i postupak ponavlja do ispunjenja svih uslova za obradu.



Slika 7. Prikaz ekrana za simulaciju putanje alata i simulator virtuelnog robota

#### 4. PRIKAZ REALIZOVANOG PILOT REKONFIGURABILNOG OBRADNOG SISTEMA NA BAZI ROBOTA

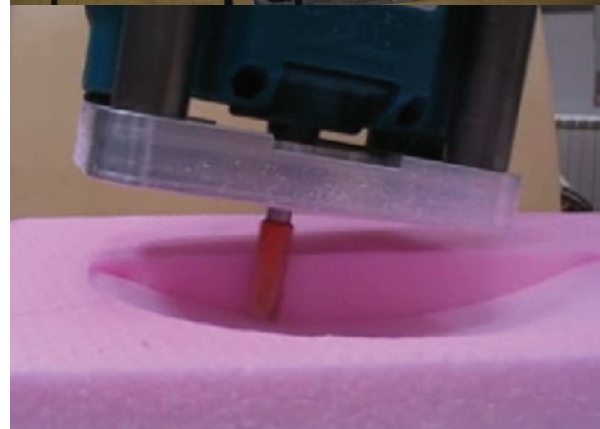
Osnovna verzija pilot rekonfigurabilnog multifunkcionalnog obradnog sistema na bazi robota, sa slike 3a je pokazana na slikama 8 i 9.

Tehničke karakteristike

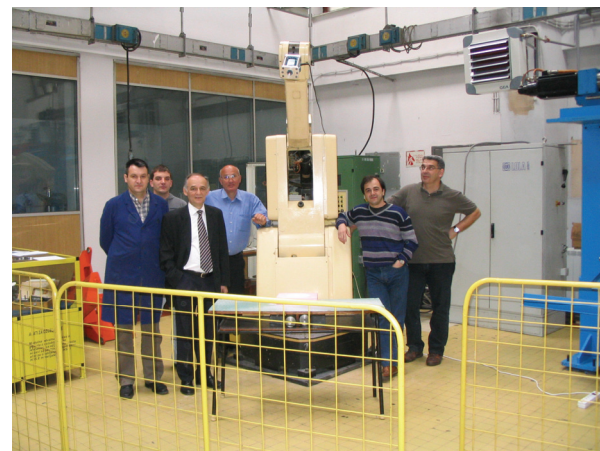
- Broj simultano upravljanih osa:
  - Na robotu 5 osa i
  - 1 ili 2 dodatne ose
- Radni prostor:
  - Robota oko 1 m<sup>3</sup>,
  - Robota sa dodatnom translatorskom osom do 3 × 1 × 1 m
- Nosivost robota: 50 kg
- Brzina glavnog kretanja: 25000 o/min
- Konturna brzina pomoćnih kretanja, u fazi uhadavanja prototipa: 2 m/min
- Dužina programa: neograničena
- CAD/CAM sistem: Pro/Engineer Wild fire 4
- Kinematička struktura mašine iz postprocesora: X, Y, Z, A, B, vertikalna glodalica
- Korekcija alata: implementirana u upravljačkom sistemu.

Tehničke mogućnosti:

Sistem omogućava 3-osnu, 3+2 osnu i 5-osnu obradu glodanjem delova od mekših materijala niže i srednje klase tačnosti sa estetskim i funkcionalnim površinama u oblastima: izrade delova od lakih legura, obrade drveta, obrade drugih nemetala (kamen, plastika, staklo, kompozit), livenja metala (modeli, kalupi za jezgra i sl.), izrade alata za proizvode od kompozita (korita čamaca, kabine vozila, ljski lopatica, branika i sl.). Takođe, značajan prostor za primenu ovakvih obradnih sistema predstavljaju i potrebe za restauracijom objekata kulturne baštine (crkve, manastiri, spomenici i sl.), kao i pozorišna i filmska scenografija.



Slika 8. Pilot rekonfigurabilnog multifunkcionalnog obradnog sistema na bazi robota



Slika 9. Projektni tim na prvoj internoj prezentaciji petoosnog obradnog sistema na bazi robota

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je pokazan koncept i delimična realizacija rekonfigurabilnog obradnog sistema na bazi petoosnog robota, kao deo istraživanja na projektu Razvoj tehnologija višeosne obrade složenih alata za potrebe domaće industrije.

U ovoj fazi istraživanja konfigurisan je virtuelni sistem upravljanja i programiranja za slučaj obrade petoosnim robotom, pri čemu sva kretanja ostvaruje robot, dok obradak miruje. Napravljen je simulator virtuelnog robota kao mašine, za potrebe simulacije i testiranja programa pre slanja programa na realan robot. Nakon toga je tako konfigurisan sistem implementiran na realnom rekonstruisanom petoosnom robotu LOLA 50, čime je zamenjena postojeća upravljačka jedinica, koja je imala PTP (Point to Point) upravljanje i sistem programiranja obučavanjem. Izvršena je i verifikacija probnom petoosnom obradom udubljene kalote.

Rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota se koristi i u nastavi na master i doktorskim studijama na Katedri za proizvodno mašinstvo, Mašinskog fakulteta u Beogradu.

Suštinu novo konfigurisanog sistema upravljanja i programiranja čini mogućnost programiranja robota u višeosnoj obradi pomoću G-koda. Ovaj pristup se bitno razlikuje od postojećih sistema programiranja robota robotskim jezicima, što je za obradu veoma komplikovano. Takođe, ovako konfigurisan sistem upravljanja i programiranja se razlikuje i od danas aktuelnih pokušaja da se za obradu robotima, vrši prevođenje G-koda u robotske jezike. Sistem je testiran na većem broju primera, koji su programirani u raspoloživom CAD/CAM sistemu.

U narednim fazama istraživanja definišaće se broj, vrste i rapored dodatnih pomoćnih i pozicionih translatorskih i obrtnih osa. Ovo znači da će se sistem upravljanja i programiranja modifikovati tako da će omogućiti petoosnu obradu različitim kombinacijama osa robota i dodatnih pomoćnih osa.

## 6. IZJAVA ZAHVALNOSTI

Ovaj rad je nastao u okviru istraživanja na projektu Razvoj tehnologija višeosne obrade složenih alata za potrebe domaće industrije, koji je podržan od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj, Vlade Republike Srbije.

## 7. LITERATURA

- [1] Webb, G., Morel, M., K., Robots: The Lower Cost, More Flexible Process Improvement Alternative to CNC Machine Tools, <http://www.Robotmachining.com>
- [2] Bates, C., Move over machine tools here come robots, American Machinist Vol. 02/17/2006.
- [3] Milutinović, D., Glavonjić, M., Živanović, S., Slavković, N., Multifunkcionalni rekonfigurabilni obradni sistem za višeosnu obradu složenih alata i delova velikih gabarita, Elaborat, Mašinski fakultet Beograd, 2009.
- [4] Milutinović, D., Glavonjić, M., Živanović, S., Dimić, Z., Multifunkcionalni rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota, XXXII Savetovanje proizvodnog mašinstva sa međunarodnim učešćem, Zbornik radova ISBN 978-86-7892-131-5, str. 369-372, FTN Departman za proizvodno mašinstvo, Novi Sad, 2008.
- [5] EMC, Enhanced Machine controller web site, <http://www.linuxcnc.org>
- [6] NIST, National Institute of Standards and Technology web site, <http://www.nist.gov>

- [7] Dimić, Z., Živanović, S., Kvrđić, V., Konfigurisanje EMC2 za programiranje i simulaciju višeosnih mašina alatki u Python virtuelnom grafičkom okruženju, XXXII Savetovanje proizvodnog mašinstva sa međunarodnim učešćem, Zbornik radova ISBN 978-86-7892-131-5, str.353-356, FTN Departman za proizvodno mašinstvo, Novi Sad, 2008.

*Autori:* **Prof. dr Dragan Milutinović, Prof. dr Miloš Glavonjić, mr Saša Živanović, Nikola Slavković, dipl. maš. inž.**, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno mašinstvo, Kraljice Marije 16, 11000 Beograd, Srbija, Tel.: +381 11 3302-271, Fax: +381 11 3370-364.

**Zoran Dimić, dipl. inž. el.**, Lola institut d.o.o, Kneza Višeslava 70a, 11030 Beograd, Srbija, Tel.: +381 11 2542-510, Fax: +381 11 2544-096

E-mail: [dmilutinovic@mas.bg.ac.rs](mailto:dmilutinovic@mas.bg.ac.rs)  
[mglavonjic@mas.bg.ac.rs](mailto:mglavonjic@mas.bg.ac.rs)  
[szivanovic@mas.bg.ac.rs](mailto:szivanovic@mas.bg.ac.rs)  
[dimic@lola-ins.co.rs](mailto:dimic@lola-ins.co.rs)  
[nslavkovic@mas.bg.ac.rs](mailto:nslavkovic@mas.bg.ac.rs)



Nedić, B., Kaplarević, M

## NOVI PRISTUP PROJEKTOVANJU FLEKSIBILNI PRIBORA ZA IZRADU SLOŽENIH PROSTORNIH DELOVA

**Rezime:** Projektovanje i razvoj montažnih pribora i njegova primena za stezanje u tehnologijama spajanja elektrootpornim i drugim vrstama zavarivanja, lemljenja, lepljenja i vijčane veze je omogućio višestruko sniženje vremena i troškova po jedinici proizvoda sa aspekta cene koštanja pribora i višestruko smanjenje vremena potrebnog za stvaranje uslova za početak proizvodnje. U radu je prikazan novi pristup projektovanja fleksibilnih alata zasnovanih na patentnom rešenju fleksibilnih pribora, prikazan je razvoj baze podataka o delovima ovih pribora i način njihovog korišćenja.

**Ključne reči:** montažni stezni pribori, spajanje, karoserijski delovi, zavarivanje

### NEW DESIGN FLEXIBLE TOOL FOR MANUFACTURE OF COMPLEX FORMS

**Abstract:** Development of assembly accessories and its application for clamping in joint technologies (electricity resistant or forms of welding, brazing, pasting or with bolted connection) enabled multiple cutting down of time and expenses per product unit, due to accessory price, and also significant lowering of time needed for fulfilling conditions for manufacturing start.

**Key works:** flexible tools, welding, clamping, car-body

#### 1. UVOD

Prilikom projektovanja i izrade pribora za stezanje pri proizvodnji delova tehnologijama spajanja (na prvom mestu zavarivanjem) javlja se veliki broj problema koji su veoma izraženi kod maloserijske i pojedinačne proizvodnje sklopova:

- troškovi projektovanja pribora zauzimaju značajno mesto u troškovima početka proizvodnje sklopova,
- visoko učešće cene pribora u ceni proizvoda,
- dug period vremena od projektovanja do izrade pribora, odnosno početka proizvodnje, što može da utiče na konkurentnu sposobnost proizvođača.

Osnovni zahtevi koje pribor za stezanje delova koji se formiraju zavarivanjem treba da ispuni kako bi se obezbedili kvalitetni sklopovi su:

- tačno pozicioniranje i stezanje sastavnih elemenata,
- slobodan pristup elementima za zavarivanje ili drugim priborima i
- lako ulaganje elemenata i vađenje zavarenih sklopova.

Navedeni zahtevi treba da budu ispunjeni bez obzira na veličinu proizvodne serije, što podrazumeva upotrebu alata za čiju konstrukciju i izradu treba uložiti odgovarajuća novčana sredstva.

#### 2. RAZVOJ FLEKSIBILNOG SISTEMA

Izrada karoserijskih delova automobila, koji predstavljaju sklopove veoma složenih prostornih formi, zahteva upotrebu skupih alata specijalne konstrukcije. Kada je u pitanju proizvodnja većih serija upotreba ovakvih alata je ekonomski opravdana. Međutim, kod izrade delova u malim serijama, kao i prototipova primena specijalnih, složenih pribora poskupljuje proizvodnju u tolikoj meri da je njihovo korišćenje gotovo isključeno.

U sadašnjoj proizvodnoj praksi, pribori za izradu karoserijskih delova se projektuju za izradu samo jednog sklopa, a stepen automatizacije zavisi od veličine proizvodne serije tog sklopa. Kada je reč o maloserijskoj proizvodnji i izradi prototipova, pribori su prilagođeni takvoj proizvodnji, što znači da su postavljanja elemenata i njihovo stezanje manualni.

Karoserijski sklopovi imaju složen oblik koji je definisan veličinama u trodimenzionalnom ortogonalnom sistemu. Problem izrade takvih sklopova u okviru zadatih tolerancija je u osnovi problem pozicioniranja i stezanja sastavnih elemenata sklopa, tako da se omoguće potrebna zavarivanja ili druge vrste spajanja i dobije sklop u propisanim tolerancijama. Isto važi za sklopove složenih prostornih formi u drugim granama metaloprerađivače industrije.

Pri projektovanju i izradi karoserijskih sklopova treba razlikovati sklopove manjih dimenzija i karoserijske sklopove veoma velikih dimenzija. Sklopovi velikih dimenzija se sreću kod vozila većih dimenzija, autobusa, kombija, dostavnih i specijalnih, teretnih i namenskih vozila i sl.

Minimalna konfiguracija pribora za izradu karoserijskog sklopa sadrži radni sto i elemente za pozicioniranje i stezanje. Veličina radnog stola, broj i optimalan raspored ovih elemenata je u funkciji veličine i složenosti sklopa a nezavisni su od veličine proizvodne serije izrađivanih sklopova.

Razvoj **fleksibilnog pribora** je proistekao iz potrebe da se na jednom radnom stolu ostvari veoma veliki (praktično neograničen) broj kombinacija pozicioniranja, oslanjanja i stezanja kroz mogućnost postizanja slobode podešavanja u svim pravcima normalnog koordinatnog sistema XYZ, kao i uz mogućnost rotacije elemenata.

Razvoj **fleksibilnog pribora** je omogućio rešavanje problem ekonomične izrade karoserijskih sklopova i drugih sklopova složenih prostornih formi koji se rade u maloserijskoj i pojedinačnoj proizvodnji, kao i izrade prototipova u istim oblastima proizvodnje.

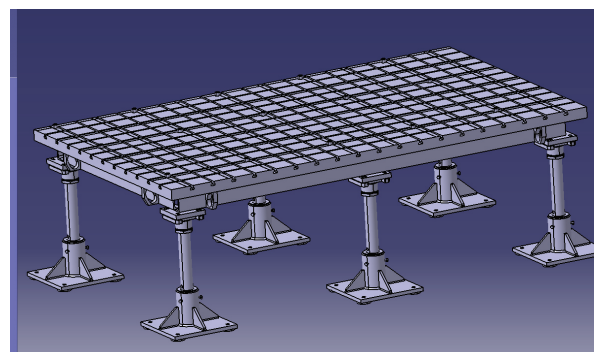


Projektovanje je ostvareno preko sistema elemenata čija konstruktivna rešenja omogućavaju potpuno pokrivanje prostora iznad površine radnog stola, kombinujući njihovu međusobnu uparivost i mogućnost podešavanja međusobnog položaja elemenata i mogućnost podešavanja položaja formiranog sklopa na površini stola zahvaljujući formiranim "T" žlebovima. To ustvari znači da će moći da se ostvari praktično neograničen broj kombinacija repernih i steznih grupa u opsegu koji je određen gabaritima radnog stola i osnovnih elemenata fleksibilnog sistema.

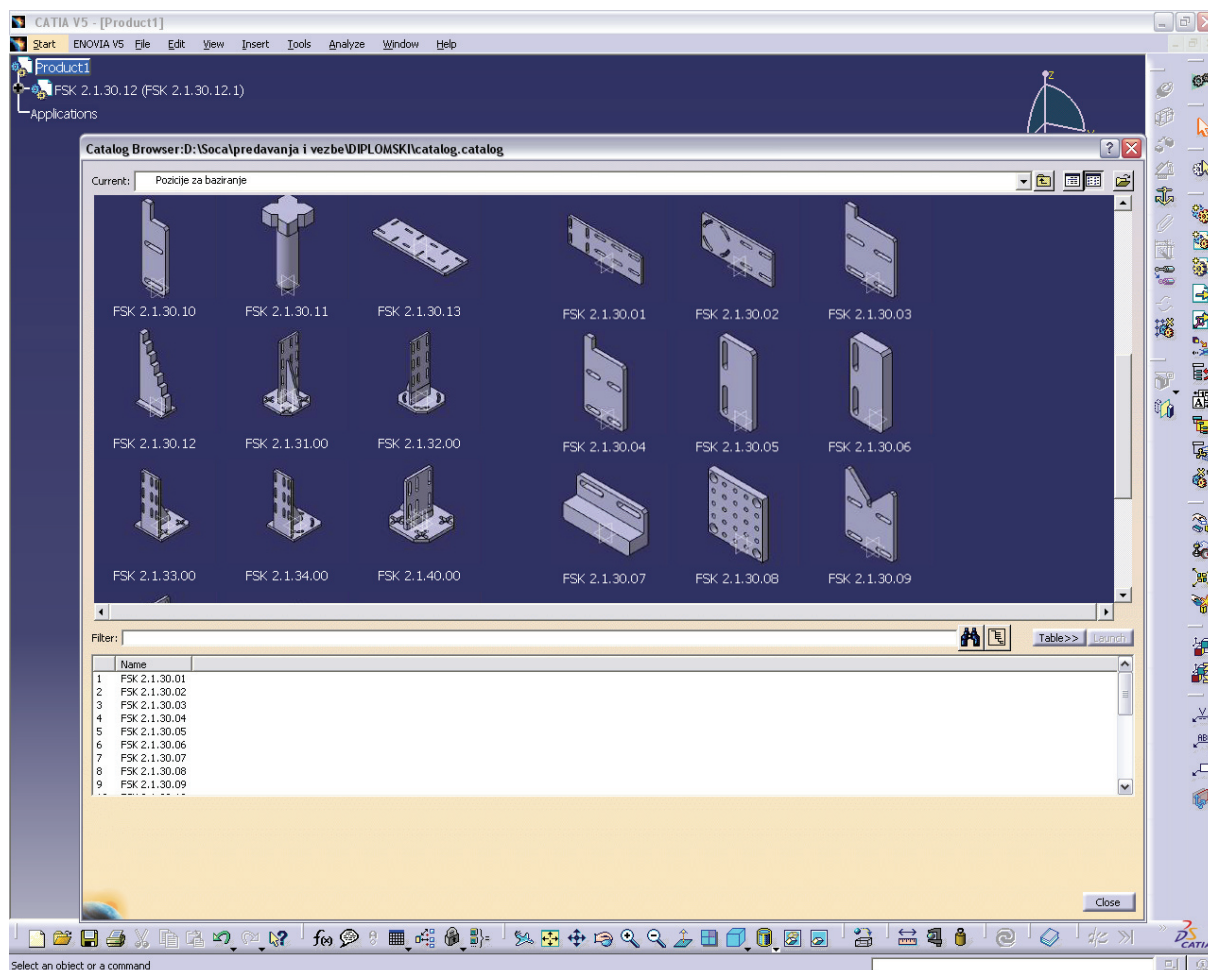
Polazeći od prethodno postavljenog zahteva i velikog iskustva na projektovanju steznih pribora za izradu karoserijskih i drugih delova tehnologijama zavarivanja izvršeno je projektovanje sistema elemenata i radnog stola koji su omogućili razvoj i projektovanje jedinstvenog, univerzalnog i fleksibilnog steznog pribora (koji nije imao uzor u postojećim montažnim steznim priborima)

Da je projektovani fleksibilni pribor jedinstven na ovim prostorima potvrđeno je priznavanjem patenta i dobijanjem patentne zaštite 2003 godine pod brojem 49007.

Saradnja autora patentnog rešenja i saradnika sa Mašinskog fakultetom iz Kragujevca na realizaciji Inovacionih projekata 401-00-217/2007-01/16 RFL-IA/16 2007 godine i 451-01-00066/2008-32/63 od 2008/2009 godine formirana je dokumentacija, odnosno katalog koji sadrži 3D model radnog stola (slika 1) i modele elemenata kreiranih u CATIA V5. Radno okruženje baze podataka prikazano je na slici 2.



Slika 1. Radni sto fleksibilnog pribora



Slika 2. Radno okruženje 3D baze elemenata fleksibilnog pribora (katalog elemenata)

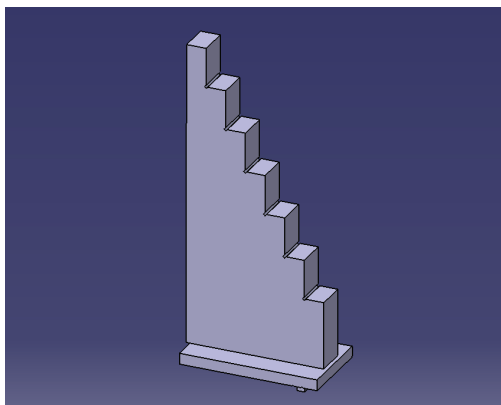
Fleksibilni stezni pribor omogućava potpuno zadovoljavanje zahteva koje karoserijski alat treba da ispuni, kroz upotrebu standardnih elemenata sistema i eventualnu konstrukciju i izradu specifičnih elemenata (oslonaca, pritiskača i slično) koji bi se kasnije koristili pri formiranju konfiguracije alata za relevantni sklop.

Konstrukcija alata za formiranje relevantnih sklopova na fleksibilnom steznom priboru predstavlja optimalno kombinovanje standardnih elemenata da se dobiju željene

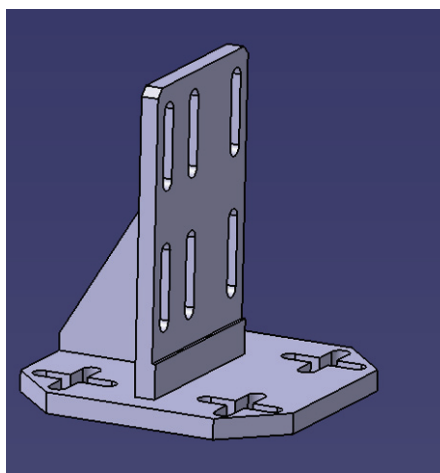
stezne i repne grupe. Kako je već napomenuto projektuju se samo specifični elementi čiju funkciju nije moguće dobiti korišćenjem standardnih elemenata sistema.

Formiranje definisane konstrukcije alata za određeni sklop vrši se prema verifikovanom uzorku relevantnog sklopa, merenjem u koordinatnom sistemu stola ili kombinovano. Posle završene izrade vrši se demontaža grupa i može se pristupiti projektovanju i montaži pribora za izradu novog sklopa.

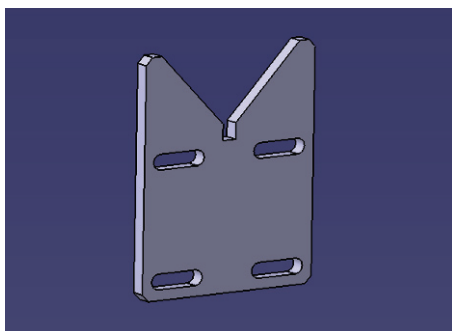
Na slikama 3, 4 i 5 prikazani su neki od 3D modela elemenata fleksibilnog pribora.



Slika 3. Oslonac



Slika 4. Nosac



Slika 5. Prizma oslonac

Pored izrade karoserijskih sklopova u redovnoj maloserijskoj proizvodnji **fleksibilni pribor** se uspešno može koristiti u prototipskoj izradi pomenutih sklopova, zatim pri montaži i zavarivanju raznih drugih sklopova složenih formi.

Osnovne prednosti **fleksibilnog pribora** su sledeće:

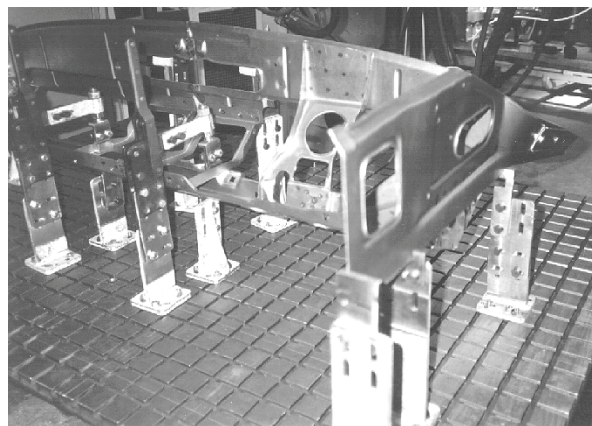
- višestruko sniženje troškova po jedinici proizvoda sa aspekta cene koštanja alata,
- višestruko skraćenje vremena potrebnog za stvaranje uslova za proizvodnju,
- višestruko skraćenje vremena potrebnog za konstrukciju alata i
- potpuna eliminacija vremena čekanja na izradu alata.

Kod izrade prototipova i uzoraka omogućeno je:

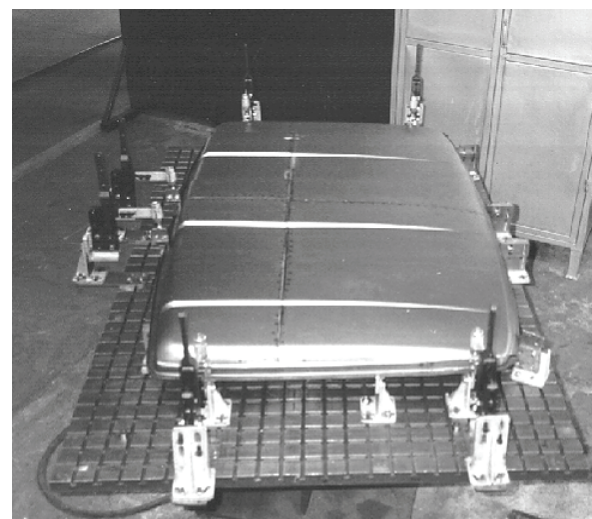
- merenje u koordinatnom sistemu stola i.
- olakšano postavljanje i fiksiranje sastavnih delova sklopa.

Jednostavnija i sa znatno manjom cenom je varijanta Fleksibilnog alata sa radnim stolom koji umesto „T” kanala ima otvore za vijčane veze. Kod ovog rešenja je u manjoj meri umanjena fleksibilnost alata.

Na slikama 6 i 7 su prikazani primeri praktične primene fleksibilnog alata pri izradi karoserijskih sklopova manjih dimenzija namenjenih za Zastava kamione.



Slika 6.



Slika 7.

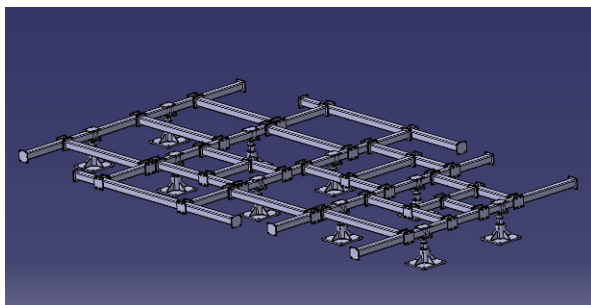
Za izradu velikih složenih prostornih formi razvijena je posebna konstrukcija Fleksibilnog alata za velike složene prostorne forme. Konstruktivno rešenje se bazira na na konceptu modularne rešetkaste platforme, koja je ekvivalent radnog stola sa „T” kanalima i korišćenju standardnih elemenata posebno dizajniranih za izradu velikih sklopova. Moduli rešetkaste platforme su dizajnirani tako da omogućavaju međusobno kombinovanje radi dobijanja konfiguracije „radnog stola” koja je optimalna osnova za postavljanje konfiguracije alata za izradu relevantnog sklopa, slika 8. Planarnost površine rešetkaste modularne platforme se postiže preko specijalnih nosača.

Specijalno dizajnirani standardni elementi omogućavaju postavljanje konfiguracije koja može da prihvati veoma velike elemente sklopova koji se izrađuju na ovom fleksibilnom priboru. Ovaj pribor je realizovan, kao i prethodni u Zastava kamionima u Kragujevcu u okviru inovacionog projekta koji je finansiran od Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

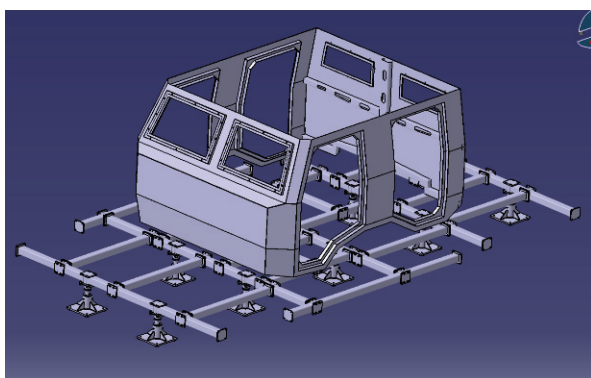
Korišćenjem 3D modela elemenata vrši se prethodno formiranje odgovarajuće modularne rešetkaste platforme na koju se postavljaju elementi za oslanjanje i pozicioniranje i postavljaju se delovi modela karoserijskog sklopa kod kojih



je potrebno odgovarajućim operacijama vršiti spajanje. Nakon toga, vrši se postavljanje elemenata pribora za ostala oslanjanja i stezanja i specijalne ručice za stezanje. Primer postavljenog karoserijskog sklopa na modularnu rešetkastu platformu kome predstoji postavljanje elemenata pribora za stezanje je prikazan na slici 9, a na slikama 10 i 11 su prikazani realizovani primeru u Zastava kamionima.



Slika 8. Modularna rešetkastu platformu za izradu velikih delova



Slika 9. Karoserijski sklop postavljen na rešetkastu platformu

Na sledećim slikama je prikazana primena fleksibilnog steznog alata namenjenog za izradu veoma velikih sklopova složenih prostornih oblika.



Slika 10.

Projektovanje i realizacija fleksibilnih steznih sistema za izradu karoserijskih i drugih sklopova složenih oblika je omogućilo stvaranje uslova za kreiranje baze podataka i projektovanje modularnog fleksibilnog pribora. To korisnicima ove baze podataka omogućuje:

- brzo i jednostavno projektovanje fleksibilnog pribora za izradu manjih i srednjih dimenzija sklopova i projektovanje fleksibilnog pribora za izradu velikih sklopova i
- jednostavnu izradu elemenata pribora u sopstvenim proizvodnim uslovima ili naručivanje od drugih proizvodnih preduzeća.



Slika 11.

#### 4. ZAKLJUČAK

Polazeći od karakteristika procesa proizvodnje u Zastava kamionima, za izradu velikog broja varijanti vozila u malim serijama, pri čemu se pojavljuje značajan broj sklopova veoma složenog oblika, za koje je potrebno imati alate da bi se postigao željeni kvalitet i dugogodišnjeg rada na projektovanju složenih alata za izradu karoserijskih sklopova, došlo je do razvoja i realizacije prototipa fleksibilnog sistema za stezanje delova pri elektrootpornom spajanju (zavarivanju) elemenata sklopova i razvoja 3D kataloga elemenata fleksibilnog pribora.

Realizovani pribori, zasnovani na garnituri odgovarajućih elemenata za pozicioniranje i stezanje i osnovnoj ploči za njihovo postavljanje i povezivanje sklopova manjih dimenzija i specijalnih nosećih veznih elemenata velikih fleksibilnih pribora, je omogućio dobijanje univerzalnih steznih montažnih pribora čime su višestruko sniženi troškovi po jedinici proizvoda sa aspekta cene koštanja alata, višestruko skraćeno vreme potrebno za konstruisanje i izradu, višestruko skraćeno vreme za započinjanje proizvodnje. Korišćenjem fleksibilnih pribora ostvarena je i višestruka pomoć pri tehnološkim analizama izrade sklopova složenih prostornih formi za serijsku proizvodnju.

#### 5. LITERATURA

- [1] Nedić, B., Kaplarević, M., Development of assembly accessories for clamping in joint technologies, X International conference on Tools, Miskolc, Hungary, 2000
- [2] Nedić, B., Kaplarević, M., Fleksibilni montažnih pribori za izradu delova složenih prostornih formi tehnologijama spajanja, Savetovanje proizvodnog mašinstva, Novi Sad, 2008.
- [3] Nedić, B., Kaplarević, M., Flexible tool for positioning and clamping the assembly the car-body and other complex three dimensional forms, The Fifth International Conference Heavy Machinery HM 2005, Kraljevo, 2005.
- [4] Kaplarević, M., Patentna prijava P-599/98, Beograd, 1998. i patentno rešenje 49007 od 2003.
- [5] <http://www.flex-sys.org/>

*Autori:*

**Prof. dr Bogdan Nedić**, Mašinski fakultet, Kragujevac, Sestre Janjić 6, 034 335 990, nedic@kg.ac.yu  
**Kaplarević Miroslav**, Zastava kamioni, Kragujevac, Trg topolivaca 4, 034 335 155, mkaplar@ptt.yu

др Богдан Ћирковић, др Томислав Тодић, мр Александар Тодић,

## ПРОЈЕКТОВАЊЕ И ИЗБОР МОДЕЛА НОСЕЋЕ СТРУКТУРЕ МАШИНА ОД КОМПОЗИТНИХ МАТЕРИЈАЛА

**Резиме:** Будућност пред пројектантима и конструкторима машина поставља нове задатке у проналажењу нових решења. Носећа структура машина, као део који треба да прихвати и уравнотежи сва напрезања у току рада спада у најважнији део машине, а самим тим и проблем конструисања носећих структура је велики. Нови материјали, као што су композитни материјали, нуде нове могућности у изнајлажењу погодних решења, а узимајући у обзир и економичност односно флексибилност и лакоћу израде, у овом раду је дат приказ моделирања и резултата моделирања носеће структуре машине за обраду деформисањем од композитног материјала.

**Кључне речи:** носећа структура машина, композитни материјал

## DESIGN AND SELECTION OF MODEL STRUCTURES SUPPORTING MACHINES FROM COMPOSITE MATERIALS

**Abstract:** The future of the designers and constructors of machines set new tasks in finding new solutions. Structure of child-bearing machines, as part of that has to accept and balance all strains in the work is one of the most important part of machine, and therefore the problem of design supporting structure of a large. New materials, such as composite materials, offer new opportunities to find suitable solutions, and taking into account the efficiency and flexibility and ease of development, this paper presents the results of modeling and modeling machine supporting structure for deformation of the composite material.

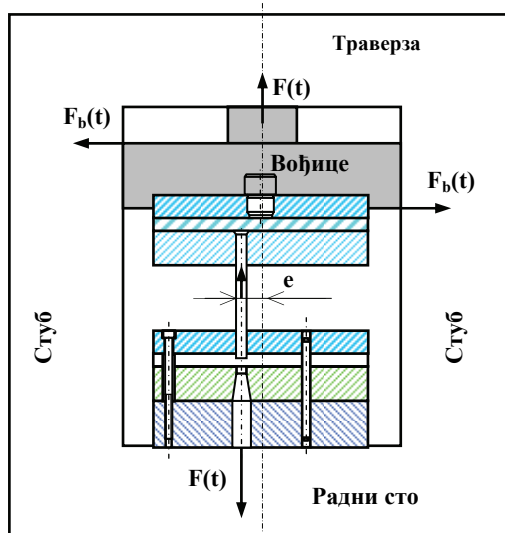
**Key words:** support structure machine, composite material

### 1. УВОД

Носећа структура машина је, с аспекта сложености оптерећења, најсложенији део машине, јер мора да прими и уравнотежи оптерећења и померања свих делова [1]. Данас постоји велики број модела носећих структура машина али да би се дошло до нових пројектанти и конструктори највећу могућност виде у новим материјалима, а нови материјали као што су

композитни материјали траже нова испитивања и нова решења модела носећих структура.

На слици 1 приказан је модел носеће структуре једне машине за обраду деформисањем, код које су вођице алата везане за стубове, чиме је узет у обзир сложенији случај оптерећења конструкције јер се појављују бочне силе на стубовима, као и ексцентричност алата, што опет доводи до сложенијег напрезања у свим деловима конструкције [1].



Слика 1, Модел оптерећења носеће структуре машине за обраду деформисањем

У општем случају носеће структуре могу бити отвореног или затвореног типа, као и једноделне или вишеделне [1].

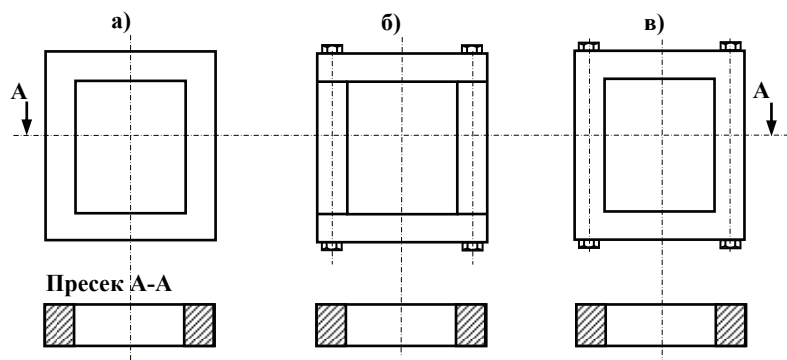
Ранијим испитивањима утврђено је да највеће могућности пружа затворени тип конструкције, због највеће носивости и најстабилнијег рада. Такође се зна и да једноделне носеће структуре стандардне израде од челика имају знатно боље карактеристике од вишеделних носећих структура али се овде даје могућност да се применом композитног материјала гвожђе-бетон лако направи и користи и једноделна и вишеделна

конструкција носеће структуре машина. На слици 2 дате су варијанте извођења носеће структуре:

- једноделна конструкција,
- вишеделна конструкција оптерећена силама за преднапрезање (ради повезивања елемената носеће структуре) и
- једноделна конструкција (преднапрегнута)

Може се предвидети и варијанта са више носећих структура постављених у низу када је потребно урадити радне комаде великих дужина или уопште великих габарита.





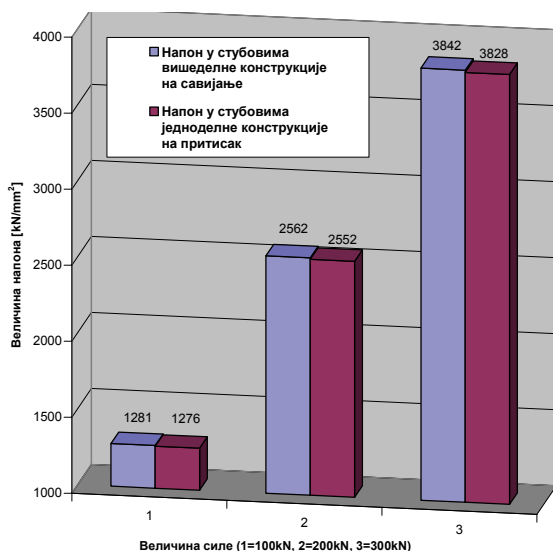
Слика 2, Варијанте извођења носећих структура машина

## 2. ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ НОСЕЋЕ СТРУКТУРЕ МАШИНА

Композитни материјал гвожђе - бетон у оваквој конструкцији својом простом применом у промени габарита даје допринос за смањење напона у конструкцији. У том правцу су урађене измене параметара везаних за димензије попречних пресека елемената носеће структуре и утврђено је да су стубови

под највећим оптерећењем, а истовремено је то и врло сложено оптерећење, и код вишеделне конструкције и код једноделних модела.

У оквиру испитивања за које су дати резултати, радни сто и траверза код свих модела су истих димензија (200x400мм), док су стубови су код једноделне конструкције 200x300мм и 200x200мм код вишеделне конструкције [2], [3].



Слика 3, Упоредни приказ напона у стубовима једноделне и вишеделне конструкције

На слици 3 види се поклапање величина напона у стубовима носећих структура, али је битно напоменути да се код једноделне конструкције ради о напонима на истезање, а код вишеделне конструкције о напонима на притисак, односно да су они главни носιοци сложеног оптерећења односно сложених напона који се јављају у свим деловима конструкција, па и у стубовима.

Треба напоменути и да се максимални напони у стубовима код једноделне конструкције јављају при максималном радном оптерећењу, док је код вишеделне конструкције максимални напон пре радног оптерећења а јавља се услед претходног притезања вијцима. Касније се услед радног оптерећења смањују напони од

преднапрезања у стубовима вишеделне конструкције. Како је бетон, по свој природи анизотропан и има боље карактеристике на притисак у односу на истезање, то нас наводи на то да више треба користити вишеделне конструкције.

Оно што је за извођаче најбитније, а проверено је израдом конкретних носећих структура реалних димензија, јесте и то да је далеко погодније и лакше направити вишеделну конструкцију.

На слици 4 дате су конструкције које су послужиле за експериментална испитивања, и на основу којих се дошло до нових сазнања о примени композитног материјала гвожђе-бетон у области машиноградње [2].



Слика 4, Носеће структуре машина израђене од композитног материјала гвожђе-бетон

### 3. ПРОЈЕКТОВАЊЕ НОСЕЋИХ СТРУКТУРА ОД КОМПОЗИТНОГ МАТЕРИЈАЛА С АСПЕКТА ДИНАМИЧКОГ ПОНАШАЊА

С аспекта динамичког понашања, такође, показује се оправданост примене вишеделне конструкције јер се у стубовима напони мењају само у једном правцу, од максималног притиска преднапрезања до нуле, а код вишеделне конструкције долази до наизменичне промене сложеног напрезања на савијање и истезање у позитивном и негативном правцу, у зависности од положаја вођица.

Динамичко понашање носећих структура и карактеристике композитног материјала гвожђе-бетон је врло тешко уклопити управо због анизотропности бетона и великих разлика у механичким карактеристикама бетона у свим правцима [5].

Сложеност динамичког понашања носеће структуре у реалним условима врло је тешко описати текстом и формулама, и зато је уведен низ предлога и захтева пред пројектанта да се што више ублаже утицаји елемената који доводе до тога и тиме омогући примена композитног материјала гвожђе-бетон и у оваквим ситуацијама. Тако је као прво смањен ексцентритет дејства радне силе који доводи до једносмерних напрезања уместо слоženих. То заправо значи да се треба одрећи ових модела у производњи слоženих производа код којих је ексцентричност неминовност.

Друга могућност за претварање слоženих напона у једносмере јесте постављање вођица алата кроз траверзу, чиме би стубови, као најоптерећенији били ослобођени попречног дејства сила и још једном би се сложене оптерећености svelо на једносмерно.

Трећа могућност за ублажавање негативних карактеристика композитног материјала гвожђе-бетон јесте побољшање карактеристика самог материјала у смислу промене процентуалног састава почев од врсте камена, цемента, додатака адитива (силицијумдиоксида, смоле и сл.), додатака кратковлакнастих укључака арматуре и на крају повећања процента влакнасте арматуре гвожђа [3], [4].

У том правцу рађена су истраживања и постављени су динамички модели код којих је по теорији динамике сваки од модела замењен одговарајућом масом,

одговарајуће крутости и одговарајућим фактором пригушења осцилација. Сви ови подаци обрађивани су првенствено променама карактеристика композитног материјала, а по избору задовољавајућих карактеристика (које су у овом случају знатно мање него што би могло да се добије скупљим инвестиционим истраживањима), вршене су измене габарита које су приближне претходно коришћеним да би добили резултате које можемо да упоређујемо.

Иако је померање у вертикалном правцу главно кретање непредвиђена и неправилна померања су штетна али не толико као померања у хоризонталном правцу која се јављају на стубовима услед слоženих оптерећења односно временски различитих померања маса елемената конструкције.

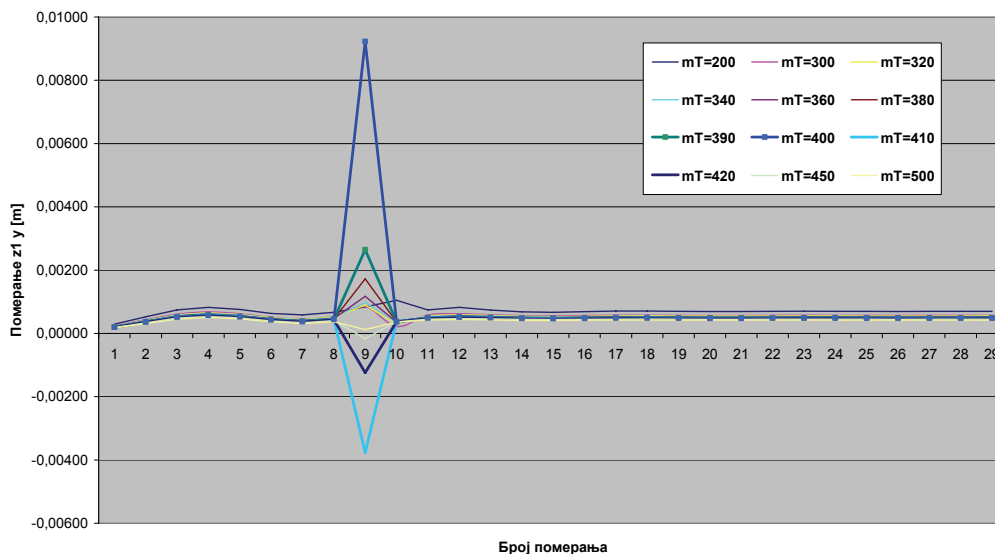
На основу теоријских модела, [1], извршена је анализа и упоређене резултата за реалне димензије.

На слици 5, која показује утицај масе траверзе на осциловање траверзе у вертикалном правцу види се да је маса врло битан фактор. Наиме, повећање масе до одређене величине (400kg), у ситуацији када се остали параметри не мењају, доводи до повећања амплитуде осциловања и то у великој мери. Након тога, даље повећање масе (до 430kg) траверзе доводи до смањивања амплитуде осциловања траверзе и промене правца померања, тј. померање се креће у супротном правцу. Ово може бити неповољније иако је мањег интензитета али се даљим променама масе долази до мирнијег рада. Може се закључити да треба избегавати критичне масе (око 400kg).

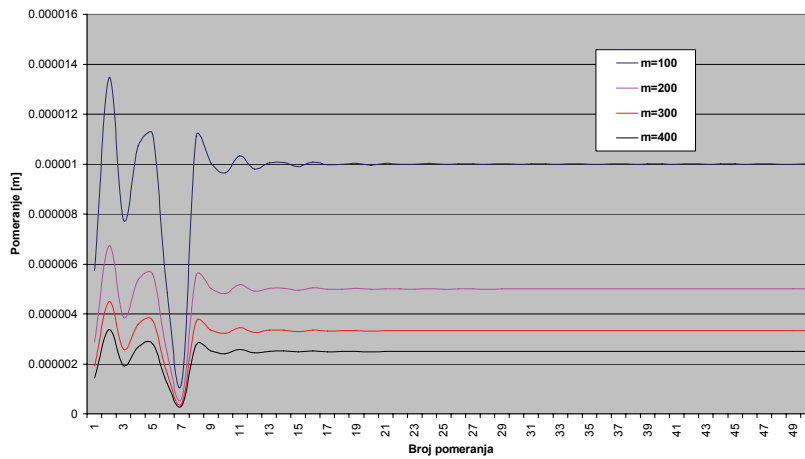
Утицај масе стубова на осциловање стубова приказан је на слици 6. Ту се може уочити да повећање масе стубова нелинеарно и врло брзо доводи до смањења амплитуде осциловања стубова.

И један и други резултат иду у прилог коришћења бетона као природног материјала и композитног материјала гвожђе-бетон, јер се великим масама добијају врло мале амплитуде осциловања, што даје врло високе квалитете производа.

Треба напоменути да су у овом случају посматрани утицаји маса без промена осталих утицајних фактора, а да се правилном идентификацијом и избором величине истих може још и више утицати на динамичко понашање носеће структуре машина, тј. директно на смањење вибрације.



Слика 5, Приказ утицаја масе траверзе на померање траверзе једноделне носеће структуре машине за обраду деформисањем у вертикалном правцу

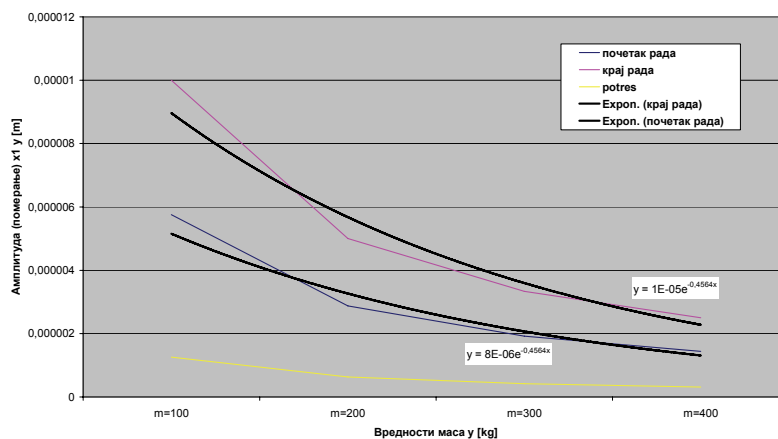


Слика 6. Приказ утицаја масе stubова на померање stubова једноделне носеће структуре машине за обраду деформисањем у хоризонталном правцу

Са слике 6 може се видети и да је са мањим масама могуће радити у оквиру дозвољених померања stubова у хоризонталном правцу, а слика 7 показује да су са мањим масама разлике у померањима на почетку рада, у тренутку потреса и крају рада велике, што значи да су брзине померања велике а самим тим и моменти

инерције. За композитни материјал гвожђе-бетон то је неповољно због његове анизотропности, поготову када је у питању једноделна конструкција код које су углови велики извори концентрације напона. Истовремено, може се видети да веће масе доприносе стабилнијем процесу рада, тј. мањим померањима у хоризонталном правцу.

Приказ утицаја масе stubова на померање stubова x1



Слика 7. Разлика у величини померања у хоризонталном правцу у току процеса рада

## 5. ЗАКЉУЧАК

Нови материјали, а међу њима и композитни материјали, су будућност, и истраживања о месту и начину њихове примене представљају задатак број 1 у борби за освајање нових начина пројектовања модела носећих структура машина.

Композитни материјал гвожђе – бетон пружа велике могућности у употреби, као конструктивни материјал јер се врло лако може, променом његовог састава, утицати на промену распореда маса у носећим структурама, што динамичко померање елемената носеће структуре чини подешивим и практично лако можемо доћи до идеалних карактеристика носеће структуре.

Правилно одабрана конструкцијско – концепцијска решења носећих структура машина израђених од композитног материјала гвожђе-бетон, као и могућност за лако мењање његових габарита, дају добре предуслове за смањење динамичких померања елемената конструкције.

## 6. ЛИТЕРАТУРА

[1]. Поповић В.П., Темелковски И.Д.: *Машине за обраду деформисањем, први и други део*, Ниш, 1991.

- [2]. Б. Ћирковић: *Компаративне статичко – динамичке карактеристике носеће структуре преса од влакнастих, ламеластих и дисперзно ојачаних композита*, магистарски рад, Ниш, 1995.
- [3]. Б. Ћирковић, *Истраживање динамичких карактеристика носећих структура машина од композитног материјала*, докторска дисертација, Косовска Митровица, 2007.
- [4]. Р.М. Кристенсен: *Введение в механику композитов*, Мир, Москва, 1982.
- [5]. Аћић М., Паквор А., Перишић Ж.: *Теорија армирано бетонских и претходно напрегнутих конструкција*, Научна књига, Београд, 1986.

Аутори: др Богдан Ћирковић, доцент Факултета техничких наука, Косовска Митровица, scirkovic1@sbb.rs др Томислав Тодић, ред. проф. Факултета техничких наука, Косовска Митровица, todics@nadlanu.com др Александар Тодић, асистент Факултета Техничких наука, Косовска Митровица, todics@nadlanu.com

Čiča, Đ., Zeljković, M., Golubović-Bugarski, V., Lakić-Globočki, G.

## IDENTIFIKACIJA PARAMETARA VEZE DINAMIČKIH SISTEMA KORIŠTENJEM FUNKCIJE FREKVENTNOG ODZIVA

**Rezime:** Sinteza dinamičkih podsistema korištenjem funkcije frekventnog odziva sadrži veći broj parametara, koji u znatnoj mjeri utiču na izlazne rezultate, a čije su vrijednosti nepoznate. Identifikacija parametara modela, na osnovu eksperimentalnih ispitivanja sistema, jedan je od ključnih faktora za obezbjeđenje dobrog slaganja rezultata dobijenih matematičkim modelom i eksperimentalnim mjerenjima. U radu je predstavljen postupak identifikacije parametara veze baziran na Levenberg-Marquardtovom algoritmu, korištenjem funkcija frekventnog odziva.

**Ključne reči:** identifikacija parametara, veza, funkcija frekventnog odziva

## JOINT PARAMETER IDENTIFICATION OF DYNAMIC SYSTEMS USING THE FREQUENCY RESPONSE FUNCTION

**Abstract:** Dynamic system coupling by frequency response function contain unknown parameters which influence on final results. Parameter identification of model, based on experimental results is one of crucial factors for good agreement between results obtain by mathematical model and measurement. In this paper parameter identification of joint is realised by use of Levenberg-Marquardt algorithm and frequency response function.

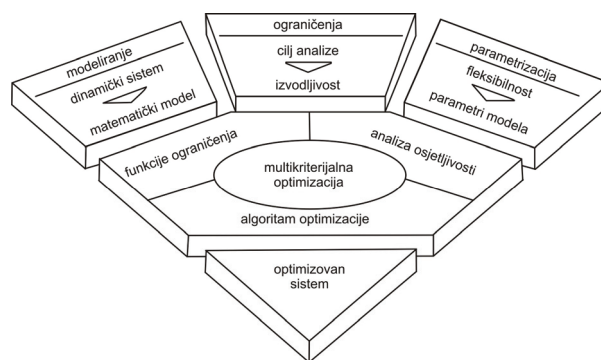
**Key words:** parameter identification, joint, frequency response function

### 1. UVOD

Identifikacija parametara ima sve veću primjenu u mnogim područjima inženjstva, praktično svugdje gdje se koriste matematički modeli za opis prirodnih fenomena i eksperimenata koji se provode za potvrđivanje tih modela. Prednosti matematičkih modela uključuju optimizaciju dizajna i proizvodnje, kao i mogućnost analize i razumijevanja ponašanja sistema prema uslovima koji nije moguće lako dobiti eksperimentom. Veoma često modeli sadrže određeni broj parametara koji se ne mogu direktno mjeriti ili proračunati primjenom uspostavljenih prirodnih zakona, pa se zbog toga moraju identifikovati iz eksperimentalnih podataka. Osnovni koncept je određivanje parametra na način da razlike između eksperimentalnih podataka i podataka koji su predviđeni modelom budu što manje. Dakle, predviđene teoretske vrijednosti trebaju odgovarati izmjenjenim.

### 2. MATEMATIČKA FORMULACIJA

Na slici 1 prikazan je generalni pristup problemu identifikacije parametara od definisanja problema do postizanja optimalnog rješenja. Sistem koji se optimizuje mora da bude predstavljen matematičkim modelom, npr. sistemom diferencijalnih jednačina, nakon čega treba definisati cilj analize. Da bi se sistem mogao optimizovati neophodno je omogućiti njegove promjene oblika i strukture. Prilikom optimizacije pojedini parametri modela mogu se smatrati nepromjenljivim, dok se vrijednost ostalih varira u unaprijed definisanim granicama.



Slika 1. Šema procesa identifikacije parametara

Pretpostavimo da je matematički model koji se razmatra opisan sistemom diferencijalnih jednačina:

$$\mathbf{D}\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{y}, \boldsymbol{\theta}), \quad \mathbf{y}(t_0, \boldsymbol{\theta}) = \mathbf{y}_0(\boldsymbol{\theta}) \quad (1)$$

gdje je  $\boldsymbol{\theta}$  - vektor nepoznatih parametara,  $\mathbf{y}$  - vektor stanja zavisan od  $t$  i  $\boldsymbol{\theta}$ ,  $\mathbf{f}$  je, generalno, nelinearna funkcija,  $\mathbf{D}$  je matrica koeficijenata sistema reda  $n \times n$ . U cilju identifikacije nepoznatih parametara zahtjeva se izvođenje određenog broja mjerenja razmatranog procesa. Primjenjujući notaciju Stortelder [1] svako mjerenje definisano je preko tri parametra:

$$(c_i, t_i, \tilde{y}_i), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

gdje  $c_i$  predstavlja komponentu vektora stanja  $\mathbf{y}$  koja se mjeri,  $t_i$  je vrijeme mjerenja,  $\tilde{y}_i$  je izmjerena vrijednost, dok  $m$  označava ukupan broj mjerenja. Rješenje jednačina modela (1) za komponentu  $c_i$  u vremenu  $t_i$ , koja korespondira  $i$ -tom mjerenju je označena sa  $y_{ci}(t_i, \boldsymbol{\theta})$ .

Generalni pristup problemu identifikacije parametara predstavlja problem minimizacije razlike između rezultata



dobijenih mjerenjem i matematičkim modelom, a uzimajući u obzir prethodnu notaciju  $i$ -ti ostatak može se definisati kao:

$$r_i(\boldsymbol{\theta}) = y_{c_i}(t_i, \boldsymbol{\theta}) - \tilde{y}_i \quad (3)$$

Odgovarajući metod identifikacije zavisi od pretpostavki i znanja o greškama mjerenja. Jedan od najčešće korištenih metoda identifikacije je metod najmanjih kvadrata. U svom najjednostavnijem obliku parametri se identifikuju na način da je suma kvadrata ostataka minimalna, tj. funkcija cilja je data u obliku sume kvadrata razlika:

$$f(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m r_i^2(\boldsymbol{\theta}) \quad (4)$$

Razlike između rezultata dobijenih mjerenjem i modelom mogu se predstaviti vektorom:

$$\mathbf{r}(\boldsymbol{\theta}) = [r_1(\boldsymbol{\theta}) \ r_2(\boldsymbol{\theta}) \ \dots \ r_m(\boldsymbol{\theta})]^T \quad (5)$$

na osnovu čega se funkcija cilja može pisati kao:

$$f(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{2} \|\mathbf{r}(\boldsymbol{\theta})\|^2 = \frac{1}{2} \mathbf{r}(\boldsymbol{\theta})^T \mathbf{r}(\boldsymbol{\theta}) \quad (6)$$

Procjena parametara modela bazirana na  $m$  izmjerenih vrijednosti se definiše kao

$$\boldsymbol{\theta}^* = \arg \min_{\boldsymbol{\theta}} f(\boldsymbol{\theta}) \quad (7)$$

### 3. PROCEDURA OPTIMIZACIJE

Kao što je ranije naglašeno, problem identifikacije parametara  $\boldsymbol{\theta}^*$  iz jednačine (7) predstavlja problem minimizacije sume kvadrata. Gotovo u svim oblastima prirodnih nauka gdje postoji potreba za minimiziranjem razlika između modela i rezultata dobijenih mjerenjem koristi se funkcija oblika (4). Nelinearni problem minimizacije sume kvadrata može se smatrati kao specijalan slučaj optimizacije bez ograničenja. Minimum funkcije  $f$  može se formalno definisati njenim razvojem u Taylorov red u okolini tačke minimuma  $\boldsymbol{\theta}^*$  i zanemarivanjem treće i viših potencija reda:

$$f(\boldsymbol{\theta} + \mathbf{h}) = f(\boldsymbol{\theta}) + \nabla f^T(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{h} + \frac{1}{2} \mathbf{h}^T \nabla^2 f(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{h} \quad (8)$$

gdje su gradijent  $\mathbf{g}$  i Hessian matrica  $\mathbf{H}$  definisani kao:

$$\mathbf{g} = \nabla f(\boldsymbol{\theta}) = \left[ \frac{\partial f}{\partial \theta_1} \quad \frac{\partial f}{\partial \theta_2} \quad \dots \quad \frac{\partial f}{\partial \theta_{n_p}} \right]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{H} = \nabla^2 f(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 f(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_1^2} & \frac{\partial^2 f(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_1 \partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial^2 f(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_1 \partial \theta_{n_p}} \\ \frac{\partial^2 f(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_2 \partial \theta_1} & \frac{\partial^2 f(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_2^2} & \dots & \frac{\partial^2 f(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_2 \partial \theta_{n_p}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_{n_p} \partial \theta_1} & \frac{\partial^2 f(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_{n_p} \partial \theta_2} & \dots & \frac{\partial^2 f(\boldsymbol{\theta})}{\partial \theta_{n_p}^2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Za funkciju cilja (6), gradijent i Hessian matrica su definisani kao:

$$\mathbf{g} = \nabla f(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})^T \mathbf{r}(\boldsymbol{\theta}) \quad (11)$$

$$\mathbf{H} = \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})^T \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) + \sum_{i=1}^m r_i(\boldsymbol{\theta}) \nabla^2 r_i(\boldsymbol{\theta}) \quad (12)$$

gdje  $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$  označava Jacobian matricu:

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1(\boldsymbol{\theta})}{\partial r_1} & \frac{\partial r_1(\boldsymbol{\theta})}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial r_1(\boldsymbol{\theta})}{\partial r_{n_p}} \\ \frac{\partial r_2(\boldsymbol{\theta})}{\partial r_1} & \frac{\partial r_2(\boldsymbol{\theta})}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial r_2(\boldsymbol{\theta})}{\partial r_{n_p}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial r_m(\boldsymbol{\theta})}{\partial r_1} & \frac{\partial r_m(\boldsymbol{\theta})}{\partial r_2} & \dots & \frac{\partial r_m(\boldsymbol{\theta})}{\partial r_{n_p}} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Vidljivo je da prvi dio Hessian matrice sadrži parcijalne derivacije prvog reda. Ova opservacija vodi do aproksimacionog osnova za Gauss-Newtonove i Levenberg-Marquardtove algoritme. Proračun prvih i drugih izvoda funkcije cilja često čini većinski dio rada koji se zahtjeva tokom optimizacije. Ovo je naročito izraženo kod dinamičkih sistema gdje je evaluacija svakog gradijenta predstavlja kompleksna procedura koja zahtjeva rješenje sistema diferencijalnih jednačina. Zbog toga, alternativna upotreba efikasnih metoda koji iskorištavaju specijalnu strukturu problema najmanjih kvadrata je djelimično velika u kontekstu identifikacije parametara dinamičkih sistema.

Levenberg-Marquardtov algoritam zasniva se na pretpostavci da se greška  $\mathbf{r}(\boldsymbol{\theta})$  u okolini tačke  $\boldsymbol{\theta}^k$  može zadovoljavajuće dobro aproksimirati sa prva dva člana Taylorova reda:

$$\mathbf{r}^*(\boldsymbol{\theta}) \cong \tilde{\mathbf{r}}^*(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{r}^*(\boldsymbol{\theta}^k) + \nabla \mathbf{r}^*(\boldsymbol{\theta}^k) \cdot (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}^k) \quad (14)$$

Zatim se umjesto minimiziranja funkcije cilja minimizuje njena aproksimacija:

$$\tilde{f}(\boldsymbol{\theta}) = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{r}}^{*T}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \tilde{\mathbf{r}}^*(\boldsymbol{\theta}) \quad (15)$$

Iz uslova  $\nabla \tilde{f}(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{0}$  dobije se sljedeća jednačina koja minimizuje funkciju (15):

$$\mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}^k) \cdot \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}^k) \cdot (\boldsymbol{\theta} - \boldsymbol{\theta}^k) + \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}^k) \cdot \mathbf{r}^*(\boldsymbol{\theta}^k) = \mathbf{0} \quad (16)$$

Uvrštavanjem (11) u (16), te dodavanjem koeficijenta učenja  $\alpha^k$ , uz  $\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}^{k+1}$ , dobije se jednačina za izračunavanje parametara:

$$\boldsymbol{\theta}^{k+1} = \boldsymbol{\theta}^k - \alpha^k [\mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}^k) \cdot \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}^k)]^{-1} \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}^k) \cdot \mathbf{r}^*(\boldsymbol{\theta}^k) \quad (17)$$

U literaturi se jednačina (17) naziva Gauss-Newtonov algoritam za  $\alpha^k = 1$ , odnosno prigušeni Gauss-Newtonov algoritam za promjenljivi  $\alpha^k < 1$  [2]. U ovom slučaju Hessian matrica zamijenjena je sljedećom matricom:

$$\tilde{\mathbf{H}}(\boldsymbol{\theta}^k) = \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}^k) \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}^k) \quad (18)$$

Levenberg je uveo aproksimacionu matricu Hessian matrice:

$$\tilde{\mathbf{H}}(\boldsymbol{\theta}^k) = \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}^k) \cdot \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}^k) + \frac{1}{\xi} \cdot \begin{bmatrix} \zeta_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \zeta_2 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dots & \zeta_n \end{bmatrix} \quad (19)$$

gdje je:

$\zeta_i$  - pozitivni skalar, odnosno težinski koeficijent koji izražava relativni značaj ograničenja promjene  $i$ -tog parametra;

$\xi$  - pozitivni skalar, koji izražava relativni značaj i greške i promjena parametara u procesu minimizacije.

Uvrštavanjem  $\zeta_i = 1$  u jednačinu (19) dobijamo sljedeću jednačinu za Levenbergovu matricu:

$$\tilde{\mathbf{H}}(\boldsymbol{\theta}^k) = \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}^k) \cdot \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}^k) + \mu \mathbf{I} \quad (20)$$

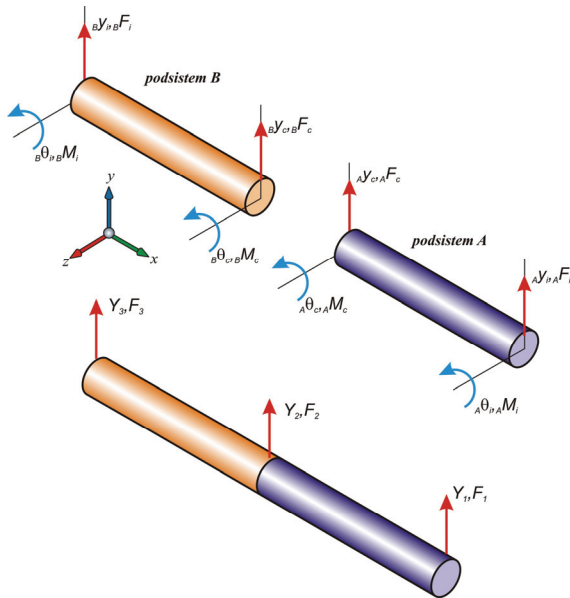
gdje je  $\mu = \frac{1}{\xi}$ .

Prema tome, Levenbergova aproksimaciona matrica  $\tilde{\mathbf{H}}(\boldsymbol{\theta})$  dobije se jednostavnim dodavanjem vrijednosti koeficijenta  $\mu$  dijagonalnim članovima matrice  $\tilde{\mathbf{H}}(\boldsymbol{\theta})$ . Zamjenom Hessian matrice Levenbergovom matricom (20) dobija se sljedeća jednačina za proračun parametara:

$$\boldsymbol{\theta}^{k+1} = \boldsymbol{\theta}^k - \tilde{\mathbf{H}}^{-1}(\boldsymbol{\theta}^k) \cdot \mathbf{J}^T(\boldsymbol{\theta}^k) \cdot \mathbf{r}^*(\boldsymbol{\theta}^k) \quad (21)$$

#### 4. IDENTIFIKACIJA PARAMETARA VEZE

U većini slučajeva, prilikom sinteze dinamičkih sistema, smatra se da je veza između njih kruta, što predstavlja pojednostavljenje problema, jer većina veza je karakterisana elastičnošću i efektima prigušenja. Modeliranje veza igra kritičnu ulogu prilikom sinteze dinamičkih sistema, jer efekti veza mogu imati značajan uticaj na odgovor globalnog sistema. Zanemarivanjem veze između podsistema može učiniti predikciju kompletne strukture nepouzdanom i netačnom. Dakle, tačnost predikcije dinamičkog odgovora sistema velikim dijelom uslovljena je nedostatkom pouzdanog opisa interakcije između podsistema tj. tipovima veza i njihovim ponašanjem. Zbog navedenih razloga postojeći metod receptivne sinteze ("Receptance coupling") proširio se na način da će uključivati i efekte veze između spojenih podsistema. U tom cilju razmotriće se sistem sa slike, koji se sastoji od dva podsistema A i B.



Slika 2. Receptivna sinteza dva podsistema

Za slučaj krute veze, jednačina za predikciju funkcije frekventnog odziva (FRF) na kraju sistema, u tački 1, ima

sljedeći oblik:

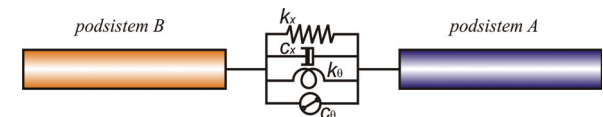
$$\mathbf{G}_{11} = {}_A\mathbf{H}_{ii} - {}_A\mathbf{H}_{ic} ({}_A\mathbf{H}_{cc} + {}_B\mathbf{H}_{cc})^{-1} {}_A\mathbf{H}_{ci} \quad (22)$$

Gdje su podsistemi A i B definisani matricama odgovora (23), u kojima, pored translatorskih, figurišu i ugaoni odgovori sistema:

$$\begin{aligned} {}_A\mathbf{H}_{ii} &= \begin{bmatrix} {}_A\mathbf{H}_{tt}^{ii} & {}_A\mathbf{H}_{tr}^{ii} \\ {}_A\mathbf{H}_{rt}^{ii} & {}_A\mathbf{H}_{rr}^{ii} \end{bmatrix}, {}_A\mathbf{H}_{ic} = \begin{bmatrix} {}_A\mathbf{H}_{tt}^{ic} & {}_A\mathbf{H}_{tr}^{ic} \\ {}_A\mathbf{H}_{rt}^{ic} & {}_A\mathbf{H}_{rr}^{ic} \end{bmatrix}, \\ {}_A\mathbf{H}_{ci} &= \begin{bmatrix} {}_A\mathbf{H}_{tt}^{ci} & {}_A\mathbf{H}_{tr}^{ci} \\ {}_A\mathbf{H}_{rt}^{ci} & {}_A\mathbf{H}_{rr}^{ci} \end{bmatrix}, {}_A\mathbf{H}_{cc} = \begin{bmatrix} {}_A\mathbf{H}_{tt}^{cc} & {}_A\mathbf{H}_{tr}^{cc} \\ {}_A\mathbf{H}_{rt}^{cc} & {}_A\mathbf{H}_{rr}^{cc} \end{bmatrix} \quad (23) \\ {}_B\mathbf{H}_{cc} &= \begin{bmatrix} {}_B\mathbf{H}_{tt}^{cc} & {}_B\mathbf{H}_{tr}^{cc} \\ {}_B\mathbf{H}_{rt}^{cc} & {}_B\mathbf{H}_{rr}^{cc} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Međutim, u većini slučajeva veza između podsistema ne može se smatrati idealno krutom, a pod pretpostavkom da se dinamičko ponašanje veze može modelirati korištenjem linearnih i ugaonih opruga i prigušivača, kao što je prikazano na slici 3, jednačina (22) poprima sljedeći oblik:

$$\mathbf{G}_{11} = {}_A\mathbf{H}_{ii} - {}_A\mathbf{H}_{ic} ({}_A\mathbf{H}_{cc} + {}_B\mathbf{H}_{cc} + \mathbf{K}^{-1})^{-1} {}_A\mathbf{H}_{ci} \quad (24)$$



Slika 3. Veza između podsistema

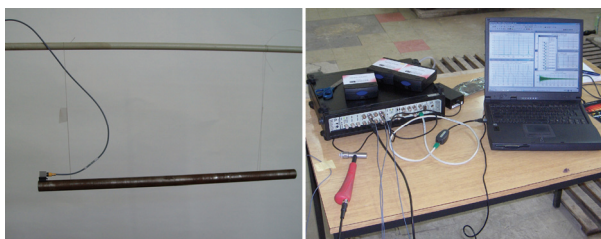
Sa  $\mathbf{K}$  je označena kompleksna matrica krutosti, koja je u opštem slučaju nepoznata:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{tt} + i\omega c_{tt} & 0 \\ 0 & k_{rr} + i\omega c_{rr} \end{bmatrix} \quad (25)$$

gdje je:  $k_{tt}$  – translatorska krutost,  $k_{rr}$  – ugaona krutost,  $c_{tt}$  – translatorsko prigušenje,  $c_{rr}$  – ugaono prigušenje. Prema [3] dijagonalni članovi matrice  $\mathbf{K}$  se mogu zanemariti jer nemaju značajnijeg uticaja na rezultat. Dakle, za potpunu identifikaciju veze između prikazanih podsistema treba identifikovati ukupno četiri parametra.

Test struktura prikazana je na slici 4, a sastoji se od dva slobodno oslonjena čelična cilindra dužina 200 i 150 mm, identičnih prečnika  $d = 16$  mm i jednakih svojstava materijala:  $E = 2e^{11}$  N/m<sup>2</sup>,  $\rho = 7860$  kg/m<sup>3</sup>. Cilindri su međusobno spojeni vijčanom vezom. Za mjerenje odgovora podsistema A i B, te globalnog sistema korištena je sljedeća oprema:

- uređaj za akviziciju podataka: višekanalni, višenamjenski dinamički analizator Portabl PULSE, tip 3560 C, proizvođač Bruel&Kjaer,
- davači odgovora: akcelerometri tip 4507, proizvođač Bruel&Kjaer,
- davač pobude: modalni čekić, model 2302-10, proizvođač ENDEVCO.



Slika 4. Test struktura i mjerna oprema

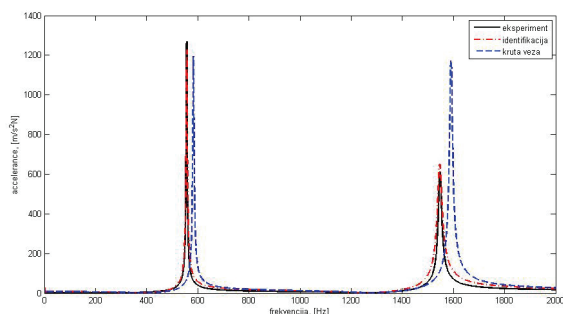
Sa navedenom opremom mogu se mjeriti samo translatorni odgovori sistema, a za kompletiranje FRF matrica neophodni su i ugaoni odgovori sistema (RDOF). Za identifikaciju RDOF korišten je metod koji je prezentovao Silva [4], uz napomenu da je isti morao biti proširen sa još jednim stepenom slobode. U cilju smanjenja grešaka, koje neizbježno nastaju mjerenjem, sva mjerenja su ponavljana sedam puta, a zatim je vršeno osrednjavanje rezultata. Nakon toga sve FRF su fitovane pomoću metoda racionalnih polinomnih razlomaka (“The Rational Fraction Polynomial method”).

Na osnovu Levenberg-Marquardtovog algoritma, predstavljenog u prethodnom poglavlju, u programskom paketu MATLAB napisan je program koji vrši identifikaciju nepoznatih parametara. U ovom primjeru riječ je o četiri parametra koji formiraju kompleksnu matricu krutosti **K**. Do optimalnog rješenja se došlo nakon 12 iteracija, a vrijednosti identifikovanih parametara prikazani su u tabeli 1.

	$k_{tt}$ [N/m]	$c_{tt}$ [Ns/m]	$k_{rr}$ [Nm/rad]	$c_{rr}$ [Nms/rad]
Identifikovana veličina	4.00653e7	404.93	4.49998e4	0.01

Tabela 1. Vrijednosti identifikovanih parametara veze

Da bi se provjerila tačnost identifikovanih parametara treba ih uvrstiti u jednačinu (24), a zatim dobijenu funkciju frekventnog odziva uporediti sa eksperimentalnom. Na slici 5. prikazano je poređenje funkcija frekventnog odziva dobijenih eksperimentalnim putem, pomoću identifikovanih parametara, te za slučaj idealno krute veze, a u tabeli 2. su prikazane greške sopstvenih frekvencija i vrijednosti amplituda na tim sopstvenim frekvencijama za navedena tri slučaja. Poređenjem sopstvenih frekvencija može se zaključiti da nema greške između eksperimentalno dobijenih vrijednosti i korištenjem metoda identifikacije, dok u slučaju idealno krute veze imamo odstupanja od 4.67% za prvu, odnosno 2.78% za drugu sopstvenu frekvenciju sistema. Kada su u pitanju vrijednosti amplituda, kod metoda identifikacije, greške iznose 2.92% od eksperimentalno dobijene veličine amplitude za prvu, te 4.80% za drugu sopstvenu frekvenciju sistema. U slučaju idealno krute veze te greške su značajnije i iznose 5.61% i 81.73%.



Slika 5. Poređenje odziva sistema

	Frekvencije [Hz]		Amplitude [m/Ns <sup>2</sup> ]	
	$f_1$	$f_2$	$A_1$	$A_2$
Eksperiment	557	1 547	1 266	646
Identifikacija	557	1 547	1 229	615
Kruta veza	583	1 590	1 195	1 174

Tabela 2. Prikaz sopstvenih frekvencija i amplituda

## 5. ZAKLJUČAK

Identifikacija dinamike veze je veoma važna za evaluaciju dinamičkog odgovora spojenih podsistema. U ovom radu prikazana je opšta procedura identifikacije parametara matematičkog modela dinamičkih sistema. Predstavljeni model zasnovan je na Levenberg-Marquardtovoj nelinearnoj metodi minimizacije sume kvadrata pri optimizaciji. Algoritam je testiran na primjeru slobodno oslonjenih greda spojenih vijčanom vezom. Primjećeno je značajan uticaj dinamike veze na dogovor globalnog sistema. Prikupljeni rezultati identifikacije su zatim verifikovani kroz unapređenu tehniku receptivne sinteze, pri čemu je pokazano dobro poklapanje sa eksperimentalno dobijenim rezultatima. Daljnja identifikacija predloženog metoda identifikacije može se proširiti i na evaluaciju različitih tipova veza kao što su ležajevi, klinovi, zavareni spojevi itd.

## 6. LITERATURA

- [1] Stortelder, W. J. H.: Parameter Estimation in Nonlinear Dynamical Systems. Ph.D. thesis, National Research Institute for Mathematics and Computer Science, University of Amsterdam, 1998.
- [2] Ljung, L.: System Identification Theory for the User, Prentice Hall, New Jersey, 1999.
- [3] Wang, J. H., Yang, M. J.: Problems and Solutions in Identification of the Parameters of Mechanical Joints
- [4] Silva, J.M.M., Maia, N.M.M., Ribeiro, A.M.R.: Estimation of Frequency Response Functions Involving RDOFs Using an Uncoupling Technique, International Conference on Applications of Modal Analysis, 1999.
- [5] Ewins, D.J.: Modal Testing, Theory and Practice, Research Study Press, 1984.
- [6] Čiča, Đ.: Modeliranje dinamičkog ponašanja sistema glavno vreteno-držač alata-alat kod mašina alatki, doktorska disertacija – radni materijal, Mašinski fakultet, Banja Luka

**Autori:** mr Đorđe Čiča, mr Valentina Golubović-Bugarški, Doc. dr Gordana Lakić-Globočki, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Vojvode Stepe Stepanovića 75, Tel.: +387 51 462-400,

**Prof. dr Zeljović Milan,** Fakultet tehničkih nauka, 21000 Novi Sad, Trg Dositeja Obradovića 6

E-mail: [djordje@urc.bl.ac.yu](mailto:djordje@urc.bl.ac.yu)  
[milanz@uns.ns.ac.yu](mailto:milanz@uns.ns.ac.yu)  
[valentina@urc.bl.ac.yu](mailto:valentina@urc.bl.ac.yu)  
[gnm@urc.bl.ac.yu](mailto:gnm@urc.bl.ac.yu)



Simonović, S.

## KONSTRUISANJE ZA FLEKSIBILNU MASOVNU PROIZVODNJU

**Rezime:** Date su osnovne karakteristike i sistemske posledice konstruisanja za nefleksibilnu masovnu proizvodnju i fleksibilnu masovnu proizvodnju. Prikazan je način konstruisanja koji omogućava masovnu proizvodnju i istovremeno ponudu širokog asortiman proizvoda. Osnovni preduslov je modularni način konstruisanja na nivou sklopova i konstruisanje umereno raznovrsnih familija grupne tehnologije na nivou detalja sa ciljem da se omogući modularizacija procesa montaže i modularizacija proizvodnje detalja. Svakoj proizvodnoj ćeliji odgovara familija delova grupne tehnologije a svakoj montažnoj ćeliji odgovara po jedan modul proizvoda. Drugi preduslov je dugoročna saradnja na konstrukciji sa dobavljačima u ranim fazama razvoja proizvoda i saradnja između konstrukcijske funkcije na nivou pogona i na nivou proizvoda da bi se obezbedio neophodan tempo inoviranja i unapređenja kvaliteta koji je neophodan uslov i posledica ovakvog pristupa poslovanju.

**Кључне речи:** modularizacija, grupna tehnologija, proizvodnja u ćelijama, sistem

## DESIGNING FOR FLEXIBLE LONG RUN PRODUCTION

**Abstract:** Basic features and systemic consequences of non flexible and flexible mass production have been exposed. The way of design has been shown that enables mass production and variety of products at the same time. The main presumption is modular design at the product level and low variation design of group technology families at detail level with the aim of enabling modularization of assembling process and detail production process. Each production cell is related to a group technology family and each assembly cell is related to a product module. Another presumption is long term cooperation with suppliers in early stages of product development and also cooperation between product design function and shop floor design function with the aim of enabling necessary pace of innovations and quality improvement that is at the same time necessity and consequence for this type of business approach.

**Keywords:** modularization, Group Technology, Cell Production, System

### 1. DEFINICIJE

**Koncept proizvoda:** Osnovna šema proizvoda u smislu grubo zamišljenog spoljnog dizajna i osobina koje bi trebao da ima da bi postigao pretpostavljeni uspeh na tržištu. Iskazuje se više jezikom kupaca a manje jezikom tehnike.

**Interfejs:** strogo definisana mesta na proizvodu, odnosno komponenti koja omogućavaju njegovu upotrebu, odnosno montažu bez potrebe da se poznaje njegova unutrašnja koncepcija i način funkcionisanja.

**Modularnost proizvoda:** Osobina da se proizvod može lako rastaviti na određen broj nezavisnih funkcionalnih delova i ponovo sklopiti od delova koji mogu biti različiti po dizajnu i performansama u odnosu na ranije ali sa istim funkcionalnostima i interfejsima.

**Orijentisanost na operacije:** Koncept proizvodnje gde se organizacija mašina vršti po tipovima mašina u cilju maksimalnog iskorišćavanja svake mašine pojedinačno.

**Orijentisanost na proizvodne tokove:** koncept proizvodnje gde se mašine organizuju tako da prate tok kretanja dela ili

sklopa kroz pogon u cilju optimizacije iskorišćenja grupe mašina odnosno celog pogona, odnosno poslovnog sistema u cilju povećanja efikasnosti celine. Primenjuje se sistemski pristup

**Sistem:** Grupa entiteta koji su koordinirani tako da kao celina postižu određeni cilj

### 2. UVOD

Konstruisanje proizvoda pored uslova koje treba da zadovolji u pogledu specifikacija vezanih za upotrebu mora da obezbedi i uslove za ekonomičnu proizvodnju. Klasično shvatanje o odvojenosti funkcije konstruisanja i proizvodnje je napušteno u kompanijama svetske klase, gde je razvijena svest o neophodnosti da proizvod svojom konstrukcijom treba da omogući i određenu naprednu filozofiju- koncepciju proizvodnje kao neophodan uslov njene realizacije. Na primer ostvarivanje koncepcije "Just In time" je nemoguće bez određenog načina organizacija proizvodnje a ovaj način proizvodnje je, sa druge strane, nemoguć bez podrške pružene kroz odgovarajući način projektovanja- konstruisanja proizvoda, njegovih sistema, podsklopova, pa sve do nivoa pojedinačnih delova. Ovaj rad će pokušati da osvetli način



konstruisanja u svetlu njegove organske povezanosti sa načinom proizvodnje i filozofijom poslovanja, odnosno prikazaće konstruisanje kao deo jednog celovitog sistema orijentisanog ka preciznom zadovoljavanju ne samo kvalitativnih nego i kvantitativnih potreba kupaca u tačno traženim količinama i onda kada su traženi. Prvo će putem karakterističnih parametara biti izložen tradicionalan pristup kao reper za poredenje a potom će na osnovu istih parametara biti izložen moderan pristup.

### 3. KONSTRUISANJE U USLOVIMA NEFLEKSIBILNE MASOVNE PROIZVODNJE

Karakteristike ovog sistema konstruisanja, u sklopu sa posledicama koje izazivana način proizvodnje i poslovanja su sledeće:

- Primenjuje se na tržištima niže platežne sposobnosti gde je tražnja za proizvodima predviđiva.
- Tržište je dovoljno veliko da obezbedi ekonomiju obima
- Zahteva dominantan položaj kompanije na tržištu.
- Kupac nema nikakav uticaj na konstrukciju proizvoda. Bitna je ušteda na troškovima.
- Kvalitet u smislu mogućnosti izbora varijanti koji se pruža kupcu je vrlo mali.
- Takođe je i kvalitet konformnosti mali kao posledica nepreglednosti proizvodnog procesa.
- Tržište se posmatra kao jedan segment i konstruktor teži da što više uprosti proizvod, da ga konstruiše sa što manje jednostavnih i visoko standardizovanih delova i da ga ponudi u što manje varijanti.
- Intenzitet promene koncepcija proizvoda je vrlo mali. Proizvod se posmatra kao jena organska celina. Zbog toga su i na izgled male konstruktivne izmene na proizvodu komplikovane jer obično tangiraju više podsistema.
- Nema brzog uvođenju novih proizvoda na tržište.
- Konstruiše se za masovnu proizvodnju klasičnog tipa (proizvodnju orijentisanu na iskorišćenje mašina) za mašine vrlo male fleksibilnosti.
- Vršnja izmena na proizvodima su retke.
- Konstruktor propisuje karakteristike proizvoda koje mora da zadovolji dobavljač.
- Prilikom konstruisanja nema saradnje između matičnog proizvođača i dobavljača.
- Tehnička dokumentacija se označava šiframa koje prate logiku konstrukcije proizvoda, ne prepoznajući tehnološke postupke a još manje način organizacije proizvodnje, to jest proces konstruisanja i proces proizvodnje nisu integrisani u jedinstveni sistem.
- Dobavljači se bira na osnovu tendera i najniže cene, zbog čega trpi kvaliteta.
- Organizacija pogona je po grupama mašina ili kao transfer linije.
- Međuskладиšta su velika.
- Protočno vreme je veliko.
- Proizvodi se za zalihe.
- Planira se unapred.
- Vreme isporuke je takoreći trenutno zbog stalne prisutnosti proizvoda na zalihama.
- Proizvodni nalog dolazi od centralne planske službe

[1,2,3,4,5,6,9,10]

### 4. KONSTRUISANJE U USLOVIMA FLEKSIBILNE MASOVNE PROIZVODNJE

Ova vrsta konstruisanja ima sledeće karakteristike date u sklopu posledica koje izaziva po osnovu organizacije proizvodnje i poslovanja:

- Primenjuje se na tržištima ekonomije obima gde je tražnja za proizvodom nepredviđiva i fluktuirajuća.
- Tržište je dovoljno veliko da obezbedi ekonomiju obima
- Kompanija nema dominantan položaj na tržištu, prisutna je konkurencija.
- Tržište se posmatra kao segment određene niže platežne sposobnosti koji je podeljene na podsegmente.
- Želje kupaca se uzimaju u obzir pri konstrukciji proizvoda u smislu da se ista varijanta proizvoda neprekidno konstruktivno unapređuje u kraćim vremenskim rokovima, a da se u određenim rokovima lansiraju potpuno nove koncepcije proizvoda.
- Pristup konstruisanju je modularan: proizvod je sastavljen iz više modula.
- Ovi moduli imaju definisane robusne interfejsne koji se ne menjaju pri promenama konstrukcija samih modula, tako da je moguć nezavisan konstruktivni razvoj pojedinih modula, ali tako da je uvek moguća njihova laka montaža u jednu celinu.
- Moduli se tako konstruišu da se njihovom kombinacijom može nuditi više varijanti proizvoda po istoj tržišnoj ceni. To se postiže smišljenom konfiguracijom proizvoda tako da se na istoj montažnoj liniji može istovremeno montirati više varijanti proizvoda.
- Saradnja na konstrukciji između proizvođača i dobavljača je vrlo izražena, počine u vrlo ranim fazama razvoja proizvoda, često i fazi definicije samog koncepta proizvoda kada se ne definiše samo proizvod matičnog proizvođača nego i dobavljača.
- Kvalitet je visok u smislu da se kupcima nudi mogućnost izbora više varijanti istog modela proizvoda
- Kvalitet konformnosti je takođe vrlo visok zbog lakog uočavanja grešaka i politike kontinualnog razvoja podesnih kontrolnih naprava koje sprečavaju greške ili zaustavljaju mašine kada pogrešno rade.
- Dobavljači komponenti se ne biraju na osnovu tendera i najniže cene već na osnovu zajedničkih dugoročnih planova osvajanja tržišta i optimizacije zajedničke dobiti.
- Označavanje konstruktivne dokumentacije je takvo da prati tehnologiju proizvodnje delova, odnosno sklopova nego i organizaciju proizvodnje delova, odnosno sklopova, to jest postoji visok stepen integracije procesa konstruisanja i procesa proizvodnje.
- Konstrukcija detalja se obično vrši sa obzirom na primenu grupne tehnologije.
- Protočno vreme je kratko.
- Nema završnih skladišta (ili su vrlo mala).
- Nema međuskладиšta između operacija ili su vrlo mala
- Vreme isporuke nije trenutno ali je kratko

- Proizvodni nalog dolazi od naredne operacije ili faze proizvodnje

[1,2,3,4,5,6,9,10]

## 5. KONSTRUISANJE S OBZIROM NA PRIMENU GRUPNE TEHNOLOGIJE I POSLEDICE NA ORGANIZACIJU PROIZVODNJE I NAČIN POSLOVANJA

Primena grupne tehnologije omogućava proizvodnju u dobro definisanim proizvodnim ćelijama (po jedna ćelija za svaku familiju proizvoda) i prelazak sa proizvodnje orijentisane na proizvodne operacije (mašine) na proizvodnju orijentisanu na tokove.

Vrši se na nivou detalja ili sklopova, ako je reč o montažnim operacijama. Ima sledeće elemente:

- Konstruktor je unapred informisan o postojećim ili planiranim proizvodnim tokovima
- Konstruktor je prilikom rešavanja konstruktivnog zadatka uvek svestan da se konstrukcija, odnosno deo mora proizvoditi u jednom od postojećih ili planiranih proizvodnih tokova (ćelija) i tu činjenicu uzima u obzir pri konstrukciji da bi omogućio takav sistem proizvodnje.
- Identifikuju se familije delova koje imaju slične konstruktivne i proizvodne atribute.
- Delovi koji su slični u ovom pogledu se slično i označavaju (kodiraju).
- Definiše se kompozitni deo koji reprezentuje proizvodne osobine prisutne u datoj familiji delova.
- Deo se konstruiše tako da pripadne određenoj familiji.
- Kada se deo konstruiše edituje se odgovarajući kompozitni proizvodni plan (plan proizvodnih operacija kompozitnog dela) čime se dobija odgovarajući proizvodni plan za taj deo.

[1,2,3,4,5,6,9,10]

## 6. PROIZVODNJA U ĆELIJAMA

Cilj proizvodnje u ćelijama je da se ima fleksibilnost proizvodnje velike raznovrsnosti proizvoda niske tražnje uz istovremeno održavanje visoke produktivnosti karakteristične za ekonomiju obima (kontinualne proizvodnje velikih serija). Svako familiji proizvoda odgovara po jena ćelija proizvodnje.

Podelom celokupnog proizvodnog procesa u diskretne (odvojene) segmente i dodeljivanje jednoj proizvodnoj ćeliji po jednog ili više srodnih segmenat proizvodnog procesa uvodi (naziva se) se modularnost (proizvodnog) procesa.

Modularnost proizvoda mora odgovarati modularnosti proizvodnih procesa. Iako ukupno proizvodni sistem kroz uvođenje proizvodnje u ćelijama postaje fleksibilniji, svaka individualna proizvodna ćelija je optimizovana za relativno uski raspon proizvodnih procesa da bi održala prednost efikasnosti masovne proizvodnje koja se zasniva na specijalizaciji i obimu.

U ovom sistemu konstruisanja svaki modularni deo se konstruiše tako da se proizvodi u nekoj od proizvodnih ćelija. Dakle konstruktor konstruiše modularni deo imajući na umu izvodljivost njegove proizvodnje u nekoj od postojećih ili

planiranih proizvodnih ćelija. Uzevši u obzir da je reč o proizvodnim ćelijama male fleksibilnosti delovi se moraju konstruisati s obzirom na veći broj mašina sa malim brojem proizvodnih operacija po svakoj mašini i sa približno istim obradnim vremenima po svakoj operaciji (mašini) da bi se postigao kontinuitet jednokomadnog toka. Važno je uočiti da ovo nisu proizvodne ćelije CNC tipa koje imaju veću fleksibilnost, veći broj proizvodnih operacija po mašini, raznovrsnije familije proizvoda, ali zato duže vreme čekanja delova na operaciju i manju produktivnost.

Ovakav način proizvodnje je osetljiv na greške jer izaziva zastoje u proizvodnju ne samo jedne mašine nego svih mašina koje su uključene u proizvodni tok, odnosno organizovanih u ćeliju proizvodnje. S druge strane greške se u ovom sistemu lako uočavaju i njihova propagacija na sledeće operacije se lako zaustavlja te zahteva neprekidnu konstruktorsku inovativnost kako operatera na mašinama tako i ostalog pogonskog osoblja. Ova konstruktorska aktivnost na nivou pogona odnosi se na inovativne konstrukcije raznih naprava za brzo pozicioniranje delova, promene u proizvodnji i rano otkrivanje ili potpuno sprečavanje grešaka. Takođe je saradnja konstruktorske funkcije na nivou pogona i na nivou proizvoda vrlo poželjna jer se malim izmenama na konstrukciji proizvoda može omogućiti konstrukcija efikasnih proizvodnih naprava.

[1,10]

## 7. PRIMER AUTOMOBILSKJE INDUSTRIJE U SEGMENTU MASOVNE PROIZVODNJE

U meri u kojoj se mnogo raznovrsnih proizvoda može konstruisati tako da se može montirati od malog broja modularnih delova u toj meri se može se istovremeno postići i visoka raznovrsnost proizvoda i visoka produktivnost njihove proizvodnje. Na primer više varijanti automobila može se konstruisati da koristi istu šasiju, manji broj konfiguracija motora i umeren broj varijanti tela automobila, od kojih je svako dostupno u nekoliko boja. Na taj način se kombinacijom izlaza iz ograničenijeg broja proizvodnih ćelija može postići proizvodnja velike raznovrsnosti automobila sa različitim performansama, izgledom i funkcijama. Kvalitet u smislu konformnosti je vrlo visok jer je proizvodnja organizovana po tokovima sa protokom delova koji se bliži jednokomadnom toku, tako da se svaki nedostatak lako uočava ili sprečava pogodnim inovacijama.

[1,9]

## 8. ZAKLJUČAK

Uvreženo mišljenje da je proizvodnja ekonomije obima nefleksibilna i da ne omogućava kvalitet proizvoda u smislu raznovrsnosti ponude varijanti proizvoda pri zadržavanju niske cene demantovali su proizvođači koji su uspeali da ponude raznovrsniju ponudu visokog kvaliteta po cenama masovne proizvodnje. Tajna je u integraciji modularnog konstruisanja proizvoda, konstruisanja detalja proizvoda s obzirom na grupnu tehnologiju i modularne organizacije proizvodnje u proizvodnim ćelijama orijentisanih na jednokomadni tok uz neprekidno i zajedničko unapređenje kako na nivou konstrukcije proizvoda tako i na nivou konstruisanja proizvodnih naprava. Takođe je odlučujući faktor saradnja proizvođača sa dobavljačima na konstrukciji proizvoda u vrlo ranim fazama razvoja proizvoda uz zajedničko planiranje na duži rok da bi se optimizovala zajednička korist. Sve ovo je forma kompletno realizovanog sistemskog pristupa [7,8].

## 9. LITERATURA

- [1] Helling, J.: *Världs mästarna*, Sellin & Partner Förlag AB, Stockholm, 1990.
- [2] Blackburn, J.: *"New Product Development: The New Time Wars" Time based competition*, Richard D. Irwin, Homewood, Illinois, 1991
- [3] Boothroyd, G., Dewhurst, P.: *Product Design for Assembly*, Boothroyd Dewhurst, Wakefield, R.I., 1989
- [4] Boothroyd, G., Dewhurst, P., Knight, W.: *Product Design for Manufacturing*, Marcel Dekker, New York, 1994
- [5] Clark, K. C., Fujimoto, T.: *Product Development Performance: Strategy, Organization and Management in World Auto Industry*, Harvard Business School Press, Boston, 1991
- [6] Fujimoto, T.: *Organizations for Effective product Development- The Case of the Global Automobile Industry*, D.B.A. diss., Harvard Business School, 1989.
- [7] Deming, W. E.: *The New Economics for Industry, Government, Education*, Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study, Massachusetts, 1994.
- [8] Deming, W. E.: *Out of the Crisis*, Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study, Massachusetts, 1986.
- [9] Ashok, R. et al- *Total Quality Management*, John Wiley & Sons, 1996
- [10] Browne, J., Harhen, J., Shivnan, J.: *Production Management Systems - An Integrated Perspective*, Addison - Wesley Publishers Ltd, 1996

Autor: dr Svetomir Simonović, profesor Visoke tehničke škole, Bulevar Zorana Đinđića 152A, 11070 Novi Beograd

e-mail: svetomir@sezampro.yu  
(svetomir@sezampro.rs)



Kheifetz M.L., Koukhla S.V., Liakhovich A.K., Alekseeva T.A.

## DESIGNING OF MANUFACTURING PROCESSES ON THE BASIS OF USE STRUCTURAL ANALYSIS

*It is shown, that the technology of the automated designing of control systems of dynamic objects on the basis of use of structural analysis consists in accomplishing of sequence of stages: the analysis of a class of commitments subject to the decision, developments of program modules, modelling of dynamic object, calculation of concrete parametres of model, the analysis of results of modelling, decision-making on applicability of the developed system.*

**Key words:** *Technology of the automated designing, control systems of dynamic objects, quality.*

The technology of the automated designing of manufacturing processes (MP), intends for development of algorithms of functioning of digital control systems and research of dynamics MP, the subsequent possibility of realisation separate MP or their whole class with set qualitative, accuracy and economic characteristics at use of considered means, and also prospective algorithm of management without natural modelling [1,2].

The major function of technology of the automated designing is making up of recommendations or requirements to separate elements of system "blank-tool-fixture-machine tool" (BTFM) at designing new MP on existing means, or to all complex «a control system - BTFM» for again developed means at early stages of their designing, allowing to provide technical and economic indicators at realisation of set class MP [3,4].

Technology of the automated designing in unity with a program complex realising it should represent convenient enough and evident tool for consultations and preparation of the highly skilled experts who are engaged in research and developmental works in the field of automatic control by dynamic objects [5,6].

The technology of designing represents the ordered aggregate of operations on handling and the analysis experimental and to making up of the analytical information: about the purpose of management of a MP, about system BTFM; about formalisation of management of a MP. Last commitment as an optimum control commitment is entered into a special modelling program complex (MPC), or adaptation of already available program modules to the decision of the generated commitment is possible: carrying out of a cycle of modelling; the analysis of results of this technology of modelling, making up of conclusions and their registration in demanded to the customer or the project head a kind [5].

The composition and structure of information technology in the field of designing is determined by its appointment, railroad train, structure and physical essence of modelled elements, the requirements shown to researched system and its elements, the restrictions imposed on process of their functioning, on the one hand, and also used for the decision of a task in view by mathematical methods, on the other hand [6].

The technology basis is made by a method of analytical synthesis of the closed control systems, the algorithms of management received with its help in the aggregate a kind, allowing to provide at a synthesis stage the set characteristics of stability and quality of managerial processes, and at a modelling stage set, or achievable indicators of accuracy [3,4].

The technology of the automated designing on railroad train, structure, formats of the entrance given and presented results in certain degree can be considered as a SADT-technology version (SADT - Structured Analysis and Design Technique) [6]. Thus the technology of the automated designing is designated with considerable expansion of a class of commitments solved with its help and reducing of terms of designing, both control systems, and dynamic objects as a whole.

To the basic advantages of SADT-technology in comparison with other approaches to the decision of challenges of the structural analysis, synthesis, and the subsequent modelling which have caused its choice as the basic means at the decision of a considered commitment are [5,6]:

1. Strict formalisation of the process of designing, and also registration of results that provides convenience of perception and the analysis of models, and also simplicity of joining of models of different levels, or received by different developers;
2. The sufficient compromise between presentation of models and them selfdescriptiveness;
3. The developed system of editing and correction, as in respect of convenience of input of fluctuations at any level of hierarchy of diagrammes, and in respect of their account on connected with an edited element of the diagramme SADT-model levels;
4. Considerable conveniences of making up of the diagrammes, providing, actuarial possibilities at making up of blocks at level of modern program complexes and the automatic image of arches of any complexity according to SADT-technology requirements.

One of the major features of application of SADT-technology at the decision of a considered class of commitments is possibility, on the one hand, developments with its help of technologies of designing of manufacturing



processes, and with another, uses of the received results for designing of actually manufacturing processes of manufacture of a detail.

Thus in the most generalised formulation appointment of the SADT-technology received with use is designing of the multifactorial manufacturing processes optimised on set of parametres of quality.

The SADT-diagramme of 0-level for development of technology of the automated designing and modelling of manufacturing processes considers input data, control data, the means (mechanisms) necessary for the decision of a task in view, and output data (fig. 1):

- I<sub>1</sub> - the design documentation on an item;
- I<sub>2</sub> - type of the machine tool, system CNC, the characteristic of the tool and the settlement scheme of system BTFM;
- I<sub>3</sub> - parametres of a processed material;
- C<sub>1</sub> - designing terms;
- C<sub>2</sub> - productivity;
- C<sub>3</sub> - the cost price;
- M<sub>1</sub> - a complex mathematical models (CMM) systems BTFM;
- M<sub>2</sub> - a modelling program complex (MPC);
- M<sub>3</sub> - A database (DB) of materials;
- M<sub>4</sub> - BD of tool;
- M<sub>5</sub> - department personnel of SAPR;

O<sub>1</sub> – a demanded MP;

O<sub>2</sub> - requirements of updating of managements or inputs.

The further decomposition of a considered commitment manufactured on the basis of SADT-technology taking into account features of a method, hardware-software means [5] offered for use, and also the analysis of the requirements shown in modern conditions to MP, allows to receive a complex of SADT-diagrammes (fig. 2-3).

The SADT-diagramme of level A0 (fig. 2) generated on the basis of the traditional approach to designing of similar processes, assumes presence of four basic functions-box: management of designing (A1), development of a variant of MP (A2), an estimation of its cost price (A3) and an estimation of its quality (A4).

The most difficult is detailed elaboration of function A2 - "to Develop a variant of manufacturing process". Result of decomposition of this box is the SADT-diagramme of level A2 (fig. 3) where for box A2 managing directors - on designing terms (box A1 exit), and on delivery capacity (C2) the data, necessary means (mechanisms) (M1-M6) are presented entrance (I1-I3), and also the target information: or the set MP (without its cost price), or requirements on updating of entrance or operating data. Last situation arises in a case when the analysis of results of modelling allows to draw a conclusion on impossibility in current statement of a commitment to calculate parametres of algorithm of the optimum control realising the set MP with set accuracy during certain time.

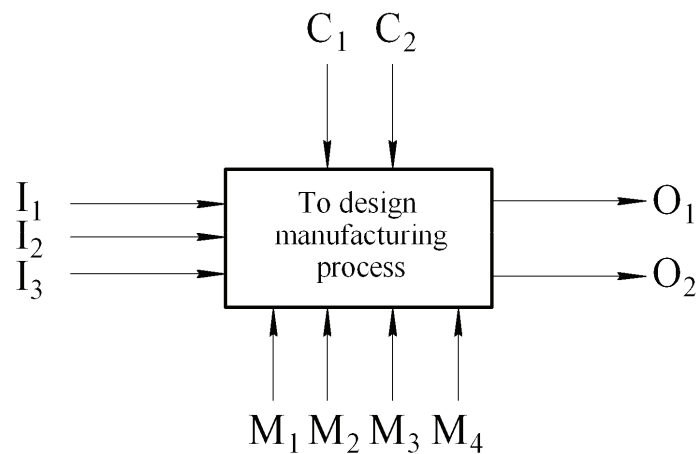


Fig. 1 - SADT-diagramme of a 0- level technology of the automated designing of MP

It is necessary to note that the SADT-technology extends not only on designing is direct handling processes,

but also on processes of their preparation, maintenance and interoperational transitions [1,6].

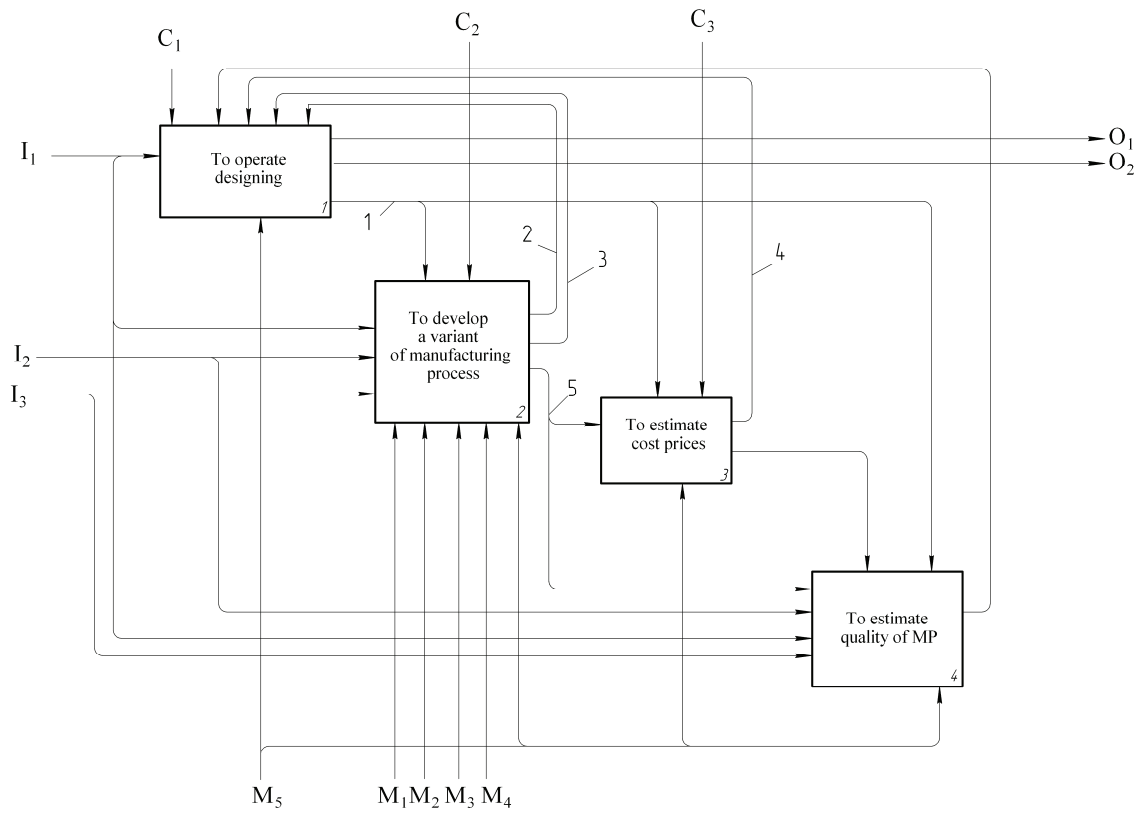


Fig. 2 - SADT-diagramme of level A0

1-plan of designing of MP; 2 updating on terms; 3 updating on productivity; 4 updating on the cost price; 5 variant of MP

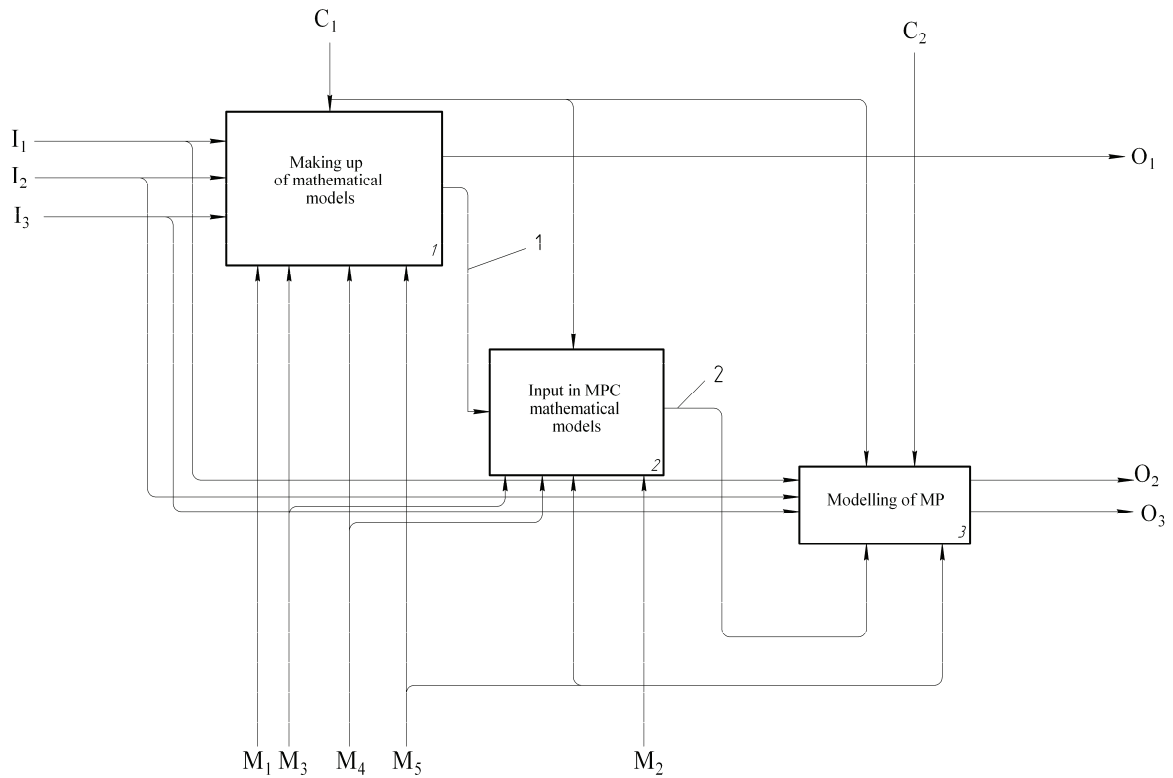


Fig. 3 - SADT-diagramme of level A2

1- aggregate of nonlinear mathematical models; 2-MPC.

From the considered SADT-diagrammes (fig. 1-3) it is appreciable, that the technology of the automated designing of control systems of dynamic objects, consists in accomplishing of sequence of stages [4,5]:

1. Construction of mathematical models, determining of an error of management, that is the preliminary analysis of a class of commitments subject to the decision, a choice of system of co-ordinates, condition status and management vectors and making up in the chosen system of co-ordinates of mathematical models, and also management errors. The specified functions in expressions can be set analytically, таблично, or necessity of use of methods and algorithms of approximation corresponding to them arises in the mixed image, therefore often. The constructed models allow addressed to the database maintaining developed before model, to draw a conclusion on possibility of use in the course of designing of ready program modules.

2. Development, in case of absence of necessary analogues, the program modules realising received mathematical models and allowing during each moment of time to calculate position of borders of operational area, a condition status of dynamic object, an error of management and their input in a complex of mathematical models (CMM) and corresponding databases (DB) or use already available in the corresponding program at the subsequent making up of demanded aggregate of models.

3. Modelling of dynamic object, check and maintenance of adequacy of models. Input in a dialogue mode in modelling program complex of parametres of the initial and set condition statuses of dynamic object, the initial and final moments of time, and also demanded characteristics of accuracy and quality of managerial processes.

4. Actually modelling of dynamic object, including accomplishing of following operations: calculation, concrete values of factors of all models for the given values of vectors of a condition status and management; check of controllability of linear non-stationary mathematical model of dynamic object and compatibility of non-stationary mathematical model. Check of a condition of the termination of modelling and modelling end at its accomplishing.

5. The analysis of results of digital modelling and decision-making or on applicability of the developed control system for the decision of the considered class of commitments, or on the minimum configuration and characteristics of technical and technological means of the object of management. Parametres of an initial condition status of dynamic object, the management error, a considered interval of time then the complex passes in an automatic mode of modelling of traffic of dynamic object are entered into a complex.

industrial business / A. G.Braturhin Ed. - Kiev: Technics, 2001. - 728 p.

4. Intellectual manufacturing: a condition status and developing prospects / M.L.Kheifetz and. B.P.Chemisov Ed. - Novopolotsk: PSU, 2002. - 268 p.
5. Akaev A. B, Management of moving objects / Akaev A. B, Zajtseva L. V, Murashov D.M.. - M: AS USSR, Scientific council on a complex problem "Cybernetics", 1988. -52 p.
6. Okulesky, V.A. Funktsionalnoe modelling - a methodological basis of realisation of the process approach / V.A.Okulesky. - M: FACE DOWNWARDS CALS-technologies «Applied logistics», 2001. -280 p.

**Authors: Kheifetz M.L., Koukhtha S.V., Liakhovich A.K., Alekseeva T.A.,** Polotsk State University, Belarus

#### LITERATURE

1. Technological aspects of conversion of machine-building manufacturing / A.S. Vasilev. S.A.Vasin, A.M. Dalsky, et al. – M. - Tula: TulSU, 2003. - 271 p.
2. Quality management of the enterprises of mechanical engineering / V.N.Koreshkov, N.A.Kusakin, Z.A.Mrochek, et al. Minsk.: Economy and the right, 2003. - 224 p.
3. Information technologies in the high technology mechanical engineering: computer maintenance of

Pejović, B., Todić, A., Mičić, V.

## ANALIZA DINAMIČKOG OPTEREĆENJA KOD PRENOSNIKA MAŠINA ALATKI U PRELAZNOM PERIODU

**Rezime:** U radu je za sistem pogona zupčastog prenosnika mašine alatke, polazeći od osnovne dinamičke jednačine obrtnog kretanja, izvedena opšta jednačina za dinamički moment neophodan za savlađivanje inercijalnih obrtnih masa za period puštanja mašine u rad. Nakon toga, primenjujući zakon o nepromenljivosti kinetičke energije sistema, određen je ekvivalentni moment inercije sistema svođenjem na vratilo elektromotora, u zavisnosti od parametara pogodnih za praktičnu primenu. Na kraju, izvršena je kvalitativna analiza uticaja različitih veličina na dinamičke efekte kod posmatranog prenosnika i date mogućnosti primene izvedene zavisnosti.

**Gljučne reči:** Mehanički stupnjeviti prenosnici, glavno obrtno kretanje, puštanje mašine u rad, nestacionarno kretanje, kinematski lanac, dinamički uticaji, kinetička energija, momenti inercije

## ANALYZE OF DYNAMIC LOAD AT MACHINE TOOLS TRANSMITTER IN TRANSITION PERIOD

**Abstract:** In paper in the period when starts by work for system which are working dentate transmitter was performed general equation for dynamic moment in the dependence of equivalent moment inertia reduce to shaft of electromotor and convenient parameters. At the end, qualitative and quantitative analyze to dynamic influence on the base of got relation was performed.

**Keywords:** primary rotation motion, stages dentate transmitters, no stationary motion, kinetic energy, cinematic chain, dynamic influence

### 1. UVODNA RAZMATRANJA

Prenosnici energije vrše prenos energije od penosnika elektromotora do mesta gde se vrši koristan rad, tj. zone u kojoj se obavlja proces obrade, /1/, /2/. Osnovni zadatak elektromotrora mašine alatke je da pretvara električnu energiju u mehaničku, koja se dalje koristi za izvršenje korisnog rada u procesu obrade. Isto tako, u obradnom sistemu dolazi do gubitaka energije u zupčastim i remenim prenosnicima, ležajevima itd., a deo energije se troši i na savlađivanju otpora trenja, /3/, /4/.

Pri radu mašine na "prazno" na izlaznom delu mašine pojavljuje se snaga praznog hoda, što znači da se deo snage i energije troši na savlađivanju pomenutih otpora trenja. Ova snaga, može se smatrati nepromenljivom /5/, /6/.

U toku rada mašine, u opštem slučaju, razlikujemo period puštanja mašine u rad, koji možemo nazvati prelazni period (period ubrzanja), koji traje do postizanja ustaljenog obrtanja, nakog čega se obično obavlja obrada /7/, /8/.

Napomenimo ovde da na osnovu literaturnih informacija, dinamički procesi za period puštanja mašine u rad (iz stanja mirovanja), nisu dovoljno proučeni, što nije slučaj sa procesima tokom stacionarnog rada mašine, /2/, /4/, /6/.

Sistem pogona sa elektromotorom, jednog prenosnika mašine alatke za obradu struganjem, može se smatrati sistemom sa obrtnim kretanjem.

Osnovna dinamička jednačina obrtnog kretanja je, /11/, /12/:

$$M_d = J \frac{d\omega}{dt} = J \cdot \dot{\omega} \quad (1)$$

Ovde  $J$  predstavlja moment inercije obrtne mase, a

$\dot{\omega}$  ugaono obrzanje. Iz jednačine (1) sledi da je:

$$M_d \cdot dt = J \cdot d\omega \quad (2)$$

Integriranjem relacije (2) od stanja mirovanja do stanja  $t_1$  odnosno  $\omega_1$ , prema sl.1 biće:

$$M_d \int_0^{t_1} dt = J \int_0^{\omega_1} d\omega \quad (3)$$

Odavde je:

$$M_d \cdot t_1 = J \cdot \omega_1 \quad (4)$$

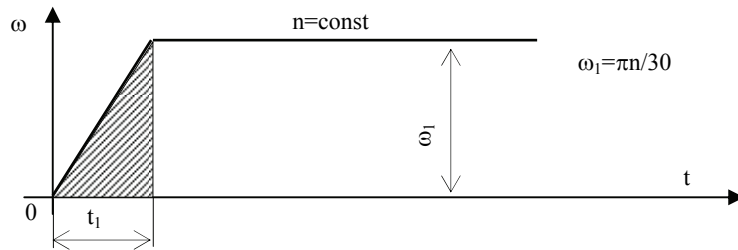
Iz relacije (4), dinamički moment obrtnih masa, biće:

$$M_d = J \frac{\omega_1}{t_1} \quad (5)$$

Prema sl.1,  $t_1$  predstavlja vreme ubrzanja, dok je  $\omega_1$  konstantna ugaona brzina nakon perioda ubrzanja masa. Očigledno, pretpostavljena je linearna zavisnost promena  $\omega = \omega(t)$  za period ubrzanja (iz stanja mirovanja).

U jednačini (5), kada je u pitanju sistem, umesto  $J$  treba uzeti ekvivalentni moment inercije  $J_e$  koji uzima u obzir sve obrtne mase, celog sistema, /11/, /12/.



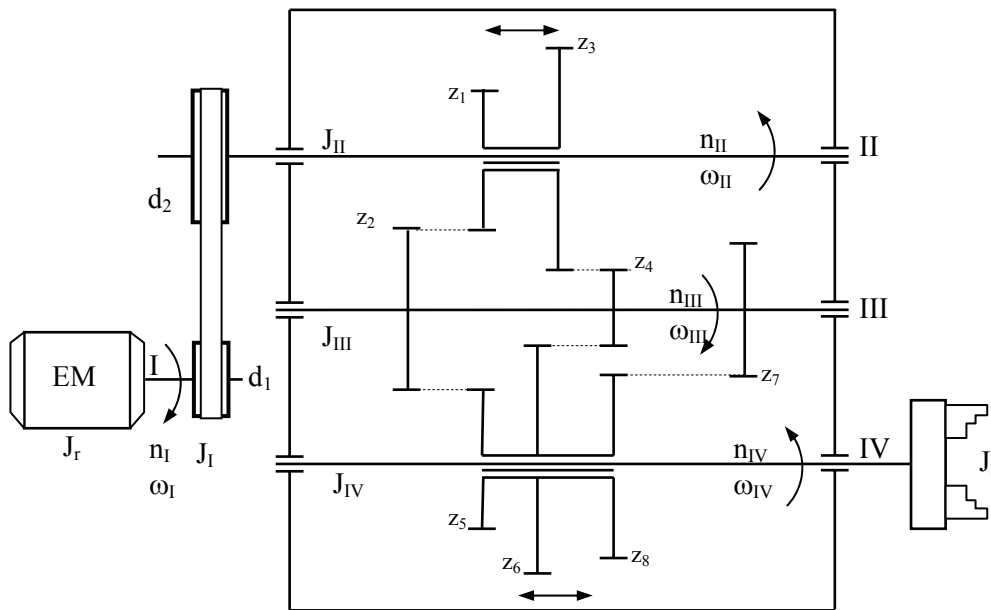


Slika 1. Dijagram obrtnog kretanja  $\omega = \omega(t)$

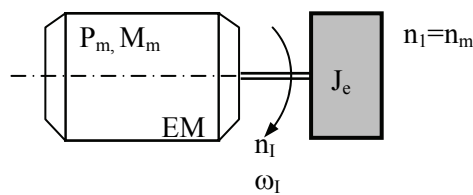
## 2. ODREĐIVANJE DINAMIČKOG MOMENTA

Kao opšti model za određivanje dinamičkog momenta u prelaznom periodu (vreme puštanja mašine u rad dok ne postigne konstantan broj obrtaja), može nam poslužiti

zupčasti prenosnik za glavno obrtno kretanje, sa dve pomerljive grupe kod mašine za obradu struganjem, prema sl.2, /5/, /8/, /10/. Usvojena je varijanta sa zajedničkim zupčanicima iz razloga smanjenja ukupnog broja zupčanika.



Slika 2. Zupčasti prenosnik za glavno kretanje struga (IV/6)



Slika 3. Ekvivalentni sistem obrtnih masa za prenosnik struga

Koristeći zakon o nepromenljivosti kinetičke energije sistema, redukovani (ekvivalentni) moment inercije na vratilo elektromotora  $J_e$ , dobiće se iz jednačine, /11/, /12/:

$$E_K = E_{KI} + E_{KII} + E_{KIII} + E_{KIV}$$

odnosno uzimajući kinetičku energiju obrtnih masa, (sl.3) biće:

$$\frac{J_e \cdot \omega_I^2}{2} = \frac{J_I \cdot \omega_I^2}{2} + \frac{J_{II} \cdot \omega_{II}^2}{2} + \frac{J_{III} \cdot \omega_{III}^2}{2} + \frac{J_{IV} \cdot \omega_{IV}^2}{2} \quad (6)$$

Ovde su  $\omega_I \div \omega_{IV}$  ugaone brzine pojedinih vratila (I do IV), dok su  $J_I$  do  $J_{IV}$  njihovi momenti inercije zajedno sa svim masama, koje se nalaze na njima.

Delenjem relacije (6) sa  $\omega_I^2$  biće:

$$J_e = J_I \frac{\omega_I^2}{\omega_I^2} + J_{II} \frac{\omega_{II}^2}{\omega_I^2} + J_{III} \frac{\omega_{III}^2}{\omega_I^2} + J_{IV} \frac{\omega_{IV}^2}{\omega_I^2} \quad (7)$$

S obzirom da je  $\omega = \frac{\pi n}{30}$ , jednačina (7) biće izražena preko

brojeva obrtaja pojedinih vratila ( $n_I$  do  $n_{IV}$ ):

$$J_e = J_I + J_{II} \frac{n_{II}^2}{n_I^2} + J_{III} \frac{n_{III}^2}{n_I^2} + J_{IV} \frac{n_{IV}^2}{n_I^2} \quad (8)$$

Pojedine prenosne odnose možemo izraziti kao

$$i_{II} = \frac{n_I}{n_{II}} \quad i_{III} = \frac{n_I}{n_{III}} \quad i_{IV} = \frac{n_I}{n_{IV}} \quad (9)$$

Sada će prema (7) biti:

$$J_e = J_I + \frac{J_{II}}{i_{II}^2} + \frac{J_{III}}{i_{III}^2} + \frac{J_{IV}}{i_{IV}^2} \quad (10)$$

Prenosne odnose (9) možemo izraziti i preko prečnika remenica odnosno brojeva zuba zupčanika kao:

$$i_{II} = \frac{d_2}{d_1} \quad i_{III} = \frac{d_2}{d_1} \frac{z_i}{z_{i-1}} \quad i_{IV} = \frac{d_2}{d_1} \frac{z_i}{z_{i-1}} \frac{z_j}{z_{j-1}} \quad (11)$$

Zamenom relacija (9) i (10), u relaciju (5), pošto je

$$\omega_1 = \frac{\pi n_I}{30}, \text{ dobijamo da je:}$$

$$M_d = \frac{\pi n_I}{30 t_1} \left( J_I + J_{II} \frac{n_{II}^2}{n_I^2} + J_{III} \frac{n_{III}^2}{n_I^2} + J_{IV} \frac{n_{IV}^2}{n_I^2} \right) \quad (12)$$

Dinamički moment za savlađivanje obrtnih masa biće prema (12) konačno

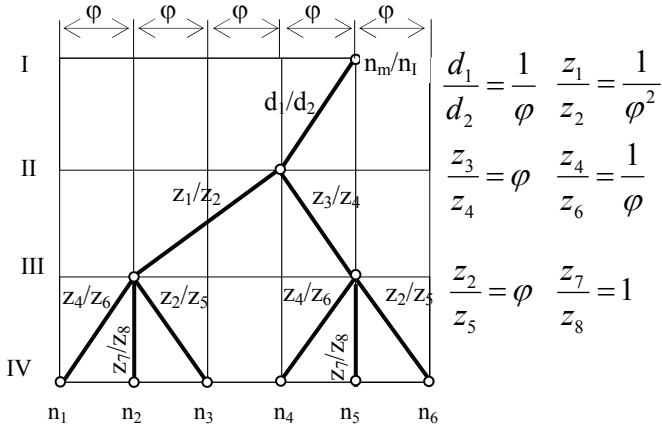
$$M_d = \frac{\pi}{30 t_1} \left( J_I n_I + J_{II} \frac{n_{II}^2}{n_I} + J_{III} \frac{n_{III}^2}{n_I} + J_{IV} \frac{n_{IV}^2}{n_I} \right) \quad (13)$$

Isto tako, u opštem slučaju biće (za N vratila):

$$M_d = \frac{\pi}{30 t_1} \left( J_I n_I + J_{II} \frac{n_{II}^2}{n_I} + J_{III} \frac{n_{III}^2}{n_I} + \dots + J_N \frac{n_N^2}{n_I} \right) \quad (14)$$

Ako za posmatrani prenosnik, konstruišemo Šlezingerov dijagram prema sl 4, kvalitativna i kvantitativna analiza dinamičkih uticaja biće uprošćena. Pri ovome s obzirom da se prenosnik pokorava geometrijskoj promeni, brojevi obrtaja pojedinih vratila biće izraženi preko geometrijskog faktora  $\varphi$ . Brojevi obrtaja vratila elektromotora (I) i ulaznog vratila prenosnika biće nepromenljivi i iznosiće:

$$n_I = n_m = n_5 \quad n_{II} = n_I \frac{d_1}{d_2} = n_I \frac{1}{\varphi} = n_4 \quad (15)$$



Slika 4. Šlezingerov dijagram prenosnika za glavno kretanje struga (IV/6)

Za broj obrtaja vratila III postoje dve mogućnosti, zavisno od toga koji zupčanik promenljive grupe je uključen:

$$n_{III}' = n_I \frac{d_1}{d_2} \frac{z_1}{z_2} = n_I \frac{1}{\varphi} \frac{1}{\varphi^2} = \frac{n_I}{\varphi^3} = n_2 \quad (16)$$

$$n_{III}'' = n_I \frac{d_1}{d_2} \frac{z_3}{z_4} = n_I \frac{1}{\varphi} \varphi = n_5$$

$$n_{III}'' > n_{III}'$$

Izlazno vratilo IV (glavno vreteno), može se obrtati na 6 različitih načina:

$$n_{IV}^I = n_I \frac{d_1}{d_2} \frac{z_1}{z_2} \frac{z_4}{z_6} = n_I \frac{1}{\varphi} \frac{1}{\varphi^2} \frac{1}{\varphi} = \frac{n_I}{\varphi^4} = n_1$$

$$n_{IV}^{II} = n_I \frac{d_1}{d_2} \frac{z_1}{z_2} \frac{z_7}{z_8} = n_I \frac{1}{\varphi} \frac{1}{\varphi} 1 = \frac{n_I}{\varphi^3} = n_2$$

$$n_{IV}^{III} = n_I \frac{d_1}{d_2} \frac{z_1}{z_2} \frac{z_2}{z_5} = n_I \frac{1}{\varphi} \frac{1}{\varphi^2} \varphi = \frac{n_I}{\varphi^2} = n_3 \quad (17)$$

$$n_{IV}^{IV} = n_I \frac{d_1}{d_2} \frac{z_3}{z_4} \frac{z_4}{z_6} = n_I \frac{1}{\varphi} \varphi \frac{1}{\varphi} = \frac{n_I}{\varphi} = n_4$$

$$n_{IV}^V = n_I \frac{d_1}{d_2} \frac{z_3}{z_4} \frac{z_7}{z_8} = n_I \frac{1}{\varphi} \varphi \cdot 1 = n_I = n_5$$

$$n_{IV}^{VI} = n_I \frac{d_1}{d_2} \frac{z_3}{z_4} \frac{z_2}{z_5} = n_I \frac{1}{\varphi} \varphi \varphi = n_I \varphi = n_6$$

Očigledno da je

$$n_{IV}^I < n_{IV}^{II} < n_{IV}^{III} < n_{IV}^{IV} < n_{IV}^V < n_{IV}^{VI}$$

Od praktičnog je interesa da odredimo ekstremne vrednosti dinamičkog momenta. Maksimalni dinamički moment, prema (13), dobija se za slučaj da se vratila III i IV obrću sa najvećim brojem obrtaja

$$M_{d \max} = \frac{\pi}{30 t_1} \left( J_I n_I + J_{II} \frac{n_{II}^2}{n_I} + J_{III} \frac{n_{III}^2}{n_I} + J_{IV} \frac{n_{IV}^2}{n_I} \right)$$

odnosno preko geometrijskog faktora:

$$M_{d \max} = \frac{\pi n_I}{30 t_1} \left( J_I + J_{II} \frac{1}{\varphi} + J_{III} + J_{IV} \varphi^2 \right) \quad (18)$$

Isto tako, prema (13), minimalni dinamički moment biće za slučaj da se vratila III i IV obrću sa najmanjim brojevima obrtaja

$$M_{d \min} = \frac{\pi}{30 t_1} \left( J_I n_I + J_{II} \frac{n_{II}^2}{n_I} + J_{III} \frac{n_{III}^2}{n_I} + J_{IV} \frac{n_{IV}^2}{n_I} \right)$$

odnosno

$$M_{d \min} = \frac{\pi n_I}{30 t_1} \left( J_I + J_{II} \frac{1}{\varphi^2} + J_{III} \frac{1}{\varphi^6} + J_{IV} \frac{1}{\varphi^8} \right) \quad (19)$$

Relacije (18) i (19) slede iz Šlezingerovog dijagrama (sl.4).

### 3. ANALIZA I MOGUĆNOST PRIMENE DOBIJENIH REZULTATA

Za kvalitativne i kvantitativne analize prema relaciji (13) treba uzeti u obzir sve obrtne mase: vratila, remenice, zupčanike, ležišta, spojnice itd. Isto tako masa rotora elektromotora (na vratilu I) kao i masa stezne glave (na vratilu IV) mogu imati znatne vrednosti momenta inercije. Dinamički efekti rastu sa povećanjem broja vratila prenosnika kao i prenosnog odnosa elemenata.

Promenljiva dinamička opterećenja prenose se sa prenosnika na noseću strukturu mašine alatke i zbog njene elastičnosti predstavljaju poremećajnu silu sistema, što može imati posledicu dopunskih opterećenja pri ustaljenom kretanju.

Kao što je pokazano dinamički efekat može doći do izražaja kod brzohodnih mašina kod kojih je obično i vreme ubravanja kratko.

Za vreme isključenja mašine javljaju se takođe dinamički efekat usled usporjenja obrtnih masa, koji je moguće analizirati na način sličan prikazanom. Ovde umesto vremena ubravanja postojaće vreme usporjenja do zaustavljanja mašine.

U prelaznom periodu moment na vratilu elektromotora možemo izraziti kao zbir dinamičkog i statičkog momenta

$$M_{m_p} = M_d + M_s \quad (20)$$

Ulazni moment na vratilo elektromotora možemo izraziti u opštem slučaju kao:

$$M_{ul} = \frac{M_{iz}}{i_u \cdot \eta_u} \quad (21)$$

Prema (21), statički moment u prelaznom periodu, redukovan na vratilo elektromotora biće izražen preko momenta trenja na izlaznom (glavnom) vretenu:

$$M_s = \frac{M_{tg}}{i_u \cdot \eta_u} \quad (22)$$

U relaciji (22) ukupni prenosni odnos i stepen iskorišćenja biće

$$i_u = \frac{d_2 z_i z_j}{d_1 z_{i-1} z_{j-1}} \quad (23)$$

$$\eta_u = \eta_{12} \cdot \eta_i \cdot \eta_j \quad (24)$$

Prema (22), očigledno, učinjena je realna pretpostavka da se kod prenosnika u prelaznom periodu, najveći moment trenja javlja na glavnom vretenu ( $M_{tg}$ ). Momenti trenja na ostalim vretenima su znatno manji s obzirom da su dimenzije ležajeva kao i opterećenje (posebno usled stezne glave) na glavnom vretenu znatno veći. Uticaj momenta trenja na ostalim vratilima uzet je u obzir preko ukupnog stepena iskorišćenja  $\eta_u$ . Zbog relativno kratkog vremena ubrzanja  $t_1$ , može se smatrati da su svi momenti trenja nepromenljivi, s obzirom da u kratkom vremenu neznatno dolazi do povećanja zagrevanja elemenata mašine.

Snaga pogonskog elektromotora u prelaznom periodu može se izraziti preko dinamičkog i statičkog momenta, s obzirom da su njihove vrednosti prema relacijama (13) i (22) poznate:

$$P_{mp} = P_d + P_s = M_d \omega_m + M_s \omega_m \quad (25)$$

odnosno

$$P_{mp} = (M_d + M_s) \omega_m = (M_d + M_s) \frac{\pi n_m}{30} \quad (26)$$

Obrtne mase kod prenosnika mašina alatki najčešće su u obliku cilindra, odnosno šupljeg cilindra. Moment inercije u ovom slučaju biće

$$J = \frac{1}{2} m r^2 \quad (27)$$

$$J = \frac{1}{2} m (R^2 + r^2) \quad (28)$$

Odavde sledi da od dva rotirajuća elementa iste mase, koji se nalaze na vratilu, veći moment inercije a time i veći dinamički uticaj ima element većeg prečnika.

Kod stupnjevitih zupčastih prenosnika čest je slučaj izmene broja obrtaja pojedinih vratila. Neka se prema sl.5 početni broj  $n_1$  u trenutku  $t_1$  menja na broj obrtaja  $n_2$  (u trenutku  $t_2$ ). Pri ovome imamo dva slučaja promene brzine:

$$n_1 < n_2 \quad n_1 > n_2$$

Koristeći relaciju (2), za ovaj slučaj biće:

$$M_d \int_{t_1}^{t_2} dt = J_e \int_{\omega_1}^{\omega_2} d\omega \quad (29)$$

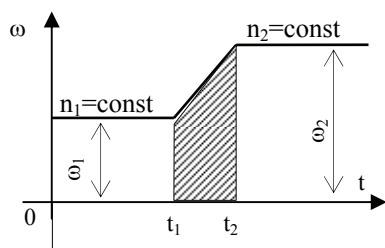
Integriranjem relacije (29) u odgovarajućim granicama dobijamo:

$$M_d (t_2 - t_1) = J_e (\omega_2 - \omega_1) \quad (30)$$

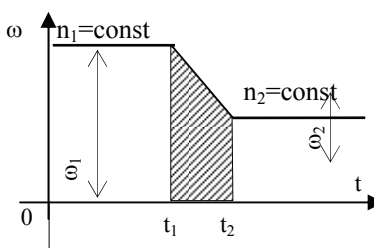
Odavde, dinamički moment biće:

$$M_d = J_e \frac{(\omega_2 - \omega_1)}{(t_2 - t_1)} \quad (31)$$

a)  $n_1 < n_2$



b)  $n_1 > n_2$



Slika 5. Dijagrami promene brojeva obrtaja

#### 4. ZAKLJUČAK

Analizom izvedene relacije za dinamički moment, na bazi svodenja na vratilo elektromotora, sledi da dinamički uticaji rastu sa kvadratom broja obrtaja pojedinih vratila linearno sa porastom momenta inercije rotirajućih masa u kinematskom lancu.

Porastom vremena ubrzanja  $t_1$ , obrnuto proporcionalno opada dinamički moment pa sa time i dinamički uticaji. Kod konvencionalnih mašina alatki ovo vreme je relativno kratko pa dinamički uticaji mogu biti izraženi. Međutim, kod teških alatnih mašina vreme  $t_1$  je nešto duže ali su momenti inercije rotirajućih masa veći.

Porastom broja obrtaja pogonskog elektromotora  $n_1$  rastu i brojevi obrtaja ostalih vratila a time i dinamički uticaji.

U opštem slučaju, dinamička opterećenja vremenski relativno kratko traju ali njihove veličine mogu biti znatne, o čemu se pri projektovanju mora voditi računa, posebno što njihov uticaj može biti i nakon vremena ubrzanja.

Korišćenjem Šlezingerovog dijagrama, kao što je pokazano, proračun i analiza dinamičkih uticaja se znatno uprošćavaju, s obzirom da isti zavise od kinematskog lanca.

Neravnomerno obrtanje u prelaznom periodu izaziva dinamičke efekte koji mogu biti uzrok pojave vibracija i oscilacija sa svim štetnim posledicama na proces, pa njihovo dejstvo treba što je moguće više smanjiti.

Prikazani model može se smatrati opštim s obzirom da se uz neznatne izmene može prilagoditi za bilo koji slučaj stepenastog zupčastog prenosnika mašine alatke za glavno kretanje. Isto tako model je pogodan kako za kvalitativne tako i za kvantitativne analize. Primena modela je moguća i kod prenosnika za glavno pravolinijsko kretanje, uz primenu odgovarajuće dinamičke jednačine.

Model može poslužiti projektantima prenosnika mašina alatki u praksi kod izbora konačnog konstrukcijskog rešenja s obzirom da je bolje ono rešenje kod koga su manji dinamički uticaji.

#### LITERATURA

- [1] Trent, E.M.: Metal cutting, Butterworths, London – Bochon, 1990.
- [2] Ačerkan, N.S. i dr.: Metallorežušće stanki, Tom 1 i 2, Mašinstroenie, Moskva, 1975.
- [3] Hans, K.B.: NC Nadbach, NC – Gesellschaft, Bad Konig, 1987.
- [4] Tochtermann, N.: Konstruktionselemente des Maschinenbanes, Teil 2, Springer – Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1989.
- [5] Zdenković, R.: Atlas alatnih strojeva, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1986.
- [6] Tarmazimanov, G.A.: Proektirovanie matallorežušćih stankov, Mašinstroenie, Maskva, 1980.
- [7] Milačić, V.: Mašine alatke I i II, Mašinski fakultet, Beograd, 1985.
- [8] Muren, H.: Konstruiranje odrezovalnih stroev, Fakultet za strojništvo, Ljubljana, 1983.
- [9] Lazić, M.: Prenosnici alatnih mašina, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1990.
- [10] Kučer, I.M.: Metallorežušće stanki, Osnovi konstruirovania i rasčetka, Mašinstroenie, Leningrad, 1980.
- [11] Halfman, R.L.: Dinamika, TEK, Moskva, 1982.
- [12] Triffet, T.: Mechanics, SKIN, New York, 1988.

**Autori: Prof. dr Branko Pejović, docent dr Vladan Mičić,** Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Tehnološki fakultet  
Zvornik, mr **Aleksandar Todić,** Fakultet tehničkih nauka  
Kosovska Mitrovica  
E-mail: [vlado1@spinter.net](mailto:vlado1@spinter.net)





Janković, M., Munćan, J.

## ANALIZA ČVRSTOĆE VRATILA I OSOVINA I TENDENCIJE NJENOG USAVRŠAVANJA

**Rezime:** U radu je ukratko prikazan suštinski razvoj proračuna čvrstoće vratila i osovina, od osnovnih do današnjih najnovijih postupaka. Razmatrani su pojedini uticaji na čvrstoću, načini njihovih određivanja i korišćenja u proračunima prema raznim standardima kao što je DIN, GOST i američki standardi. Takođe su u duhu postupaka pogonske čvrstoće kritički razmatrani pokušaji proširenja proračuna vratila i osovina izloženih u radu promenljivim amplitudama i srednjoj vrednosti predstavljenih u vidu spektara promenljivog opterećenja. Na kraju su navedene smernice za takve proračune pri originalnom vremenskom toku radnog – pogonskog opterećenja.

*Cljučne reči:* vratilo, osovina, spektar opterećenja, čvrstoća, pogonska čvrstoća

## STRENGTH ANALYSIS OF SHAFTS AND AXES AND TENDENCIES OF ITS IMPROVEMENT

**Abstract:** In this paper an essentially development of strength calculation analysis of shafts and axes, from basically to up-to-date one, is briefly given. Some influences on the strength, the ways of their estimation and using for calculation according to various standards, as DIN, GOST and Americans Standards are discussed. According to strength durability, some up-to-date attempts of calculation broaden under working load given in the form of a load spectrum with variable amplitudes and mean values, are critically discussed. On the end, some directives for such calculations under original working load as an online, time depending random load function are recommended.

*Key words:* shaft, axle, load spectrum, strength, durability

### 1.0 UVOD

Prema definiciji pojma vratila i osovina i načinu njihovog rada neposredno sledi određivanje odgovarajućih vrsta napreznja i napona po opštim principima proračuna. Na osnovu odgovarajuće čvrstoće moguće je odrediti radnu sposobnost vratila.

### 2.0 OSNOVE POSTAVKE PRORAČUNA

Opšti princip ocene radne sposobnosti zasiva se na upoređivanju napona u radnom stanju, normalnog  $\sigma$  ili tangentnog  $\tau$ , i njihovih odgovarajućih kritičnih vrednosti  $[\sigma]$  odnosno  $[\tau]$ . Radne i kritične vrednosti moraju da budu određene po istom načinu – istom konceptu proračuna da bi se ispunio osnovni uslov njihove uporedivosti pri određivanju stepena sigurnosti  $S = [\sigma]/\sigma > 1$ , odnosno  $S = [\tau]/\tau > 1$ .

#### 2.1 Opterećenja, naponi i njihova promena u radu, koncepti proračuna

Razmatra se opšti slučaj analize čvrstoće samo vratila jer se za osovine koriste dobijeni izrazi iz kojih se izostavlja samo moment uvijanja.

Neka u datom kritičnom kružnom poprečnom preseku površine  $A$ , u radnom stanju, oznaka  $RS$ , u najopštijem slučaju istovremeno postoje tri komponente napadnog opterećenja sa odgovarajućim odnosnim nominalnim radnim naponima određenim po tzv. konceptu nominalnih napona -

KNN: aksijalna sila  $F_z$  sa aksijalnim naponom  $\sigma_{z nom} = F_z/A$ , moment savijanja  $M_s$  sa savojnim naponom  $\sigma_{s nom} = M_s/W$ ,  $W$  - aksijalni otporni moment, i moment uvijanja  $T$  sa naponom  $\tau_{u nom} = T/W_0$ ,  $W_0$  - polarni otporni moment.

Ako ne postoje izvori koncentracije napona, pomenute sve tri vrednosti napona su stvarne vrednosti, u protivnom, potrebno je uzeti u obzir i uticaj koncentracije pri određivanju čvrstoće vratila, tj. kritičnog stanja, oznaka  $KS$ . Eksperimentalnim putem, ispitivanjem samog vratila, taj uticaj je sadržan u rezultatu registrovanog kritičnog opterećenja - implicitno; ili eksplicitno, preko utvrđenih faktora za dotične slučajeve koncentracije napona pri zamaranju pri čemu se koristi tzv. koncept lokalnih napona, kraće označen KLN.

#### 2.2 Karakteristične funkcije opterećivanja u radu i njihov uticaj na određivanje kritičnog stanja

Vremenske ili ciklusne funkcije i to: najveća, gornja vrednost kao nivo opterećenja, i karakter njegove promene su karakteristika rada. Pod tipom ili vrstom promenljivog opterećenja podrazumeva se oblik funkcije od vremena, a pod karakterom promene odnos amplitude i srednje vrednosti izražen njihovim količnikom, ili faktorom asimetrije ciklusa

$R$ . Svaki napon u poprečnom preseku može se menjati međusobno različito, mogu biti dva ili sva tri međusobno zavisna, pri čemu se izdvajaju nekoliko tipova i karaktera njihove promene. Najprostiji slučaj vremenske funkcije – zakonitosti opterećivanja je ako su vrednosti svih navedenih napona međusobno linearne i proporcionalne spoljašnjem

opterećenju – obrtnom momentu za slučaj vratila, ili sili za slučaj osovine. Stepenn sigurnosti dobija se količnikom dobijenog kritičnog i radnog opterećenja uz uslov da su iste vrste i isti karakter promenljivosti, i to samo onih vrednosti opterećenja koje su promenljive pri daljem opterećivanju od radnog do kritičnog stanja. Njihove nepromenljive vrednosti predstavljaju samo parametarske veličine - predopterećenja koja na svoj način utiču na kritičnu vrednost opterećenja, iako njihov uticaj nije eksplicitno izražen. Naime, kritična vrednost uz njihovo postojanje je nešto manja u odnosu na slučaj da takva predopterećenja ne postoje. Stepenn sigurnosti izražen preko napadnog opterećenja kao količnik njegove kritične i radne vrednosti, npr. momenata savijanja je

$$S = \left( \frac{[M_s]}{M_s} \right)_{\text{promenlj, isti karakter}}, \text{ odnosno preko momenata uvijanja } S = \left( \frac{[T]}{T} \right)_{\text{promenlj, isti karakter}}$$

Ovakav opšti princip određivanja stepena sigurnosti treba striktno primeniti na ostale moguće slučajeve. Za slučaj različitih karaktera vremenske promenljivosti postojećih komponenta opterećenja odnosno napona potrebno je preko Smithovog dijagrama uzeti uticaj postojanja različitih srednjih vrednosti. Npr. sa Sl.1 iz uprošćenog prikaza Smithovog dijagrama pravim linijama, uveden je faktor smanjenja amplitude trajne dinamičke čvrstoće sa porastom srednje vrednosti kao

$$\psi_\sigma = \frac{(2\sigma_{D(-1)} - \sigma_{D(0)})/\sigma_{D(0)}}{(\sigma_{A(-1)} - \sigma_{A(0)})/\sigma_{A(0)}} = \frac{(\sigma_{A(-1)}/\sigma_{A(0)}) - 1}{(\sigma_{A(-1)}/\sigma_{A(0)})} \quad (1)$$

Na osnovu toga moguće je naći amplitudu pri bilo kojoj srednjoj vrednosti ako je poznata amplituda za jednu srednju vrednost, npr. najčešće je poznata amplituda čisto naizmjenične dinamičke čvrstoće  $\sigma_{An}$

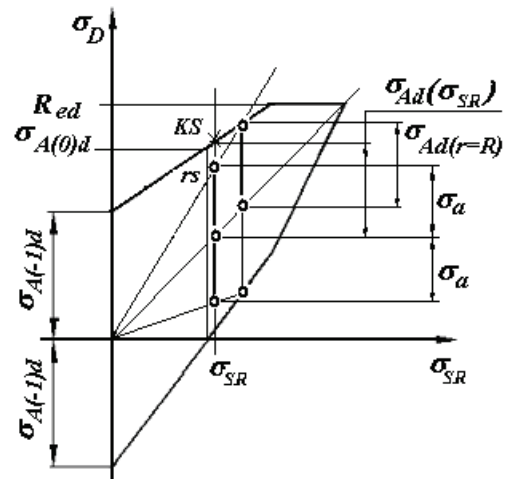
$$\sigma_A(\sigma_{SR}) = \sigma_{An} - \psi_\sigma \cdot \sigma_{SR} \quad (2)$$

Sa povećanjem radnog opterećenja povećava se samo ona komponenta napadnog opterećenja odnosno napona koja je od njega linearno zavisna, pri čemu je kod vratila najčešće aksijalni napon po ciklusima konstantan ili je linearno zavisna od obrtnog momenta koji je jednosmerno promenljiv sa relativno malim brojem ciklusa, ponekad toliko malim da se može smatrati ciklusno konstantnim – statičkim ( $N_0$  na Sl. 2). Napon od savijanja je zbog obrtnog načina rada vremenski čisto naizmjenično promenljiv.

Amplituda i srednja vrednost kao parametri vremenske promene radnog opterećenja mogu se menjati po nekom zakonu ili stohastički - po sistemu slučajnih promena. U prvom, idealizovanom slučaju se radi o vrsti zamora pri konstantnim amplitudama – tzv. Wöhlerovski slučaj zamora; u drugom, realnijem slučaju se radi o zamoru pri ciklusno promenljivim amplitudama u vidu nspektra, tzv. pogonska čvrstoća.

## 2.2 Karakteristične veličine i njihovo određivanje

Od najvažnijih uticaja ovde će se navesti poznati faktori: teorijski ili geometrijski faktor koncentracije napona  $\alpha_{k\sigma}$  za normalni odnosno  $\alpha_{k\tau}$  za tangentni napon sa odgovarajućim efektivnim faktorima koncentracije napona pri zamoru  $\beta_{k\sigma}$  odnosno  $\beta_{k\tau}$ , tehnološki faktori veličine za dinamičku čvrstoću  $K_d$ , faktori površinske hrapavosti za normalne



Slika 1. Smithov dijagram za savijanje vratila

dinamičku čvrstoću  $K_d$ , faktori površinske hrapavosti za normalne  $K_{H,\sigma}$  i tangentne napone  $K_{H,\tau}$ , faktor ojačanja površinskog sloja  $K_J$ , vrednosti dinamičkih naizmjeničnih čvrstoća materijala u mašinskom delu, za normalni  $\sigma_{D(-1)} \equiv \sigma_{A(-1)}$ , odnosno za tangentni napon  $\tau_{D(-1)} \equiv \tau_{A(-1)}$ , sa indeksima asimetrije za naizmjeničnu,  $-1$ , i jednosmernu promenu  $0$ , kao i za vrstu napreznja  $z$  - zatezanje,  $p$  - pritisak,  $s$  - savijanje,  $u$  - uvijanje.

Za naizmjenično promenljive napone, odgovarajuća amplituda trajne dinamičke čvrstoće dela, određena preko iste veličine za epruvetu, po ranijem postupku, za npr. normalne napone, je

$\sigma_{A(-1)d} = \sigma_{A(-1)}/K_D$ ; gde je faktorom trajne dinamičke čvrstoće  $K_D = \beta_k / K_d K_{H\sigma} K_J$ , sa efektivnim faktorom koncentracije po Thumu i Buchmannu  $\beta_k = \eta_k (\alpha_k - 1) + 1$ , sa  $\eta_k$  - stepenn osjetljivosti na koncentraciju napona, po ovom postupku sa mogućnošću greške oko 20% [5].

Prema novom, tačnijem konceptu određivanja po Siebelu i Stieleru [1,2,3,7,9,10], koji je uopšte prihvaćen i suštinski predstavlja novinu,  $\beta_k$  se određuje kao  $\beta_k = \alpha_k / n$ , gde je  $n$  - faktor preraspodele napona pri dinamičkom opterećenju koji uzima u obzir materijal, geometriju izvora koncentracije u zavisnosti od relativnog gradijenta promene napona po dubini  $y$  u podnožju zarezata  $G' = (d\sigma/dy) / \sigma_{max}$  [1,2,3,4].

Takođe, novost predstavlja i sumarno dejstvo efektivnih faktora koncentracije napona usled geometrije zarezata i faktora hrapavosti spoljnih površina, tako da je ukupan faktor trajne dinamičke čvrstoće po novom konceptu proračuna [1,2,3,5,10]

$$K_D = \left[ \left( \beta_k / K_2 \right) + \left( 1 / K_H \right) - 1 \right] / K_J$$

Za svaku vrstu dinamički promenljivog napona posebno se određuje i obeležava odgovarajućim indeksima.

### 3.0 KRITIČNA STANJA ČVRSTOĆE VRATILA I OSOVINA

#### 3.1 Rad u oblasti trajne dinamičke čvrstoće

U zavisnosti od veličine i karaktera promenljivosti opterećenja mogu nastati sledeće kritične pojave:

- statički, nasilan lom ili prevelike deformacije usled mogućeg preopterećenja,
- zamorni lom u stacionarnom radu konstantnim amplitudama i srednjoj vrednosti,
- zamorni lom u nestacionarnom radu sa ciklusno promenljivim amplitudama i srednjom vrednosti.

Za slučaj istovremenog dejstva dva napona iste vrste (oba normalna ili oba tangentna) i istog karaktera, npr. naponi  $\sigma_z$

i  $\sigma_s$ , ekvivalentan napon na zatezanje je

$$\sigma_{iz} = \sigma_z + \left( \frac{[\sigma_z]}{[\sigma_s]} \right) \cdot \sigma_s \quad (3)$$

Za slučaj da je jedan od njih statički a drugi dinamički, njihov ekvivalentni uticaj se određuje prema postupku iz Smithovog dijagrama.

Ako su istovremeno prisutni naponi raznorodni (normalni i tangentni) a istog karaktera promenljivosti, za određivanje njihovog ekvivalentnog dejstva potrebno je primeniti neku od proverenih i preporučenih hipoteza o složenim naprezanjima za dati materijal vratila. Npr za istovremeno dejstvo normalnog napona  $\sigma$  i tangentnog napona  $\tau$ , idealan normalni napon sa uslovom radne sposobnosti su:

-po hipotezi najvećih normalnih napona (HNN) pogodnoj za relativno krte materijale visoke čvrstoće

$$\sigma_{i,HNN} = 0,5\sigma + \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma]/S \quad (4)$$

-po hipotezi najvećih smicajnih napona (HSN)

$$\sigma_{i,HSN} = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma]/S \quad (5)$$

-po hipotezi deformacionog rada za promenu oblika (Huber-Mises-Hencky -HMH)

$$\sigma_{i,HMH} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq [\sigma]/S \quad (6)$$

S obzirom na pretežnu primenu relativno žilavih materijala za vratila i osovine, danas se uglavnom primenjuju druga i treća hipoteza, druga uglavnom u anglo-saksonskim zemljama, a poslednja u Evropi.

Opšti oblik korenskog dela izraza u gornjim hipotezama se može izraziti u vidu

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + \left( \frac{[\sigma]}{[\tau]} \right)^2 \tau^2} \leq [\sigma]/S \quad (7)$$

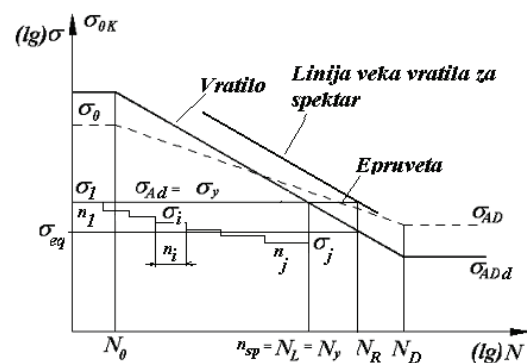
koji je eksperimentalno potvrđen odnosom dobijenih kritičnih napona  $\left( \frac{[\sigma]}{[\tau]} \right) \approx \sqrt{3}$ , tj. najbolje se poklapa sa hipotezom HMH pod uslovom da su vremenske funkcije normalnog i tangentnog napona u fazi – istovremeno oba dostižu svoje maksimalne vrednosti. Suprotno očekivanju, opasnost od razaranja nije manja pri faznoj razlici funkcija ovih dvaju napona. Napominje se da gornje formule važe za oba koncepta proračuna, i KNN i KLP, i za radne i za kritične napone, s tim da se ne sme desiti njihovo mešanje, pogotovu ako se raspolaze različito tretiranim njihovim vrednostima.

Ako postoje po dva istorodna napona, onda se u gornjim izrazima umesto pojedinih napona stavljaju odgovarajuće njihove ekvivalentne vrednosti.

#### 3.2 Rad u oblasti vremenski ograničene čvrstoće

Za ovaj slučaj je potrebno odrediti nivo napona istog karaktera promenljivosti po predloženoj hipotezi o složenom naprezanju, pri čemu se za određivanje zamornog veka i odgovarajućih stepena sigurnosti mora raspolagati odgovarajućom Wöhlerovom krivom za vratilo ili epruvetu

potrebno poznavati vrednosti navedenih faktora koje su drugačije nego u oblasti trajne čvrstoće.



Slika 2. Wöhlerove krive za epruvetu i vratilo

Zamorni vek je  $N_L = N_y = N_D \left( \frac{\sigma_{ADd}}{\sigma_y} \right)^m$ , oznake prema sl. 2,  $m$  - eksponent Wöhlerove krive.

#### 3.3 Radno opterećenje u obliku spektra napona

Za dati spektar idealnog napona jedne vrste, npr. normalni napon  $\sigma_i$ , (sl.2), sa  $j$  stepenica koje su u najprostijem slučaju veće od  $\sigma_i > \sigma_{ADd}$ , brojem ciklusa u  $i$ -toj stepenici  $n_i$  i ukupnim brojem ciklusa u spektru  $n_{sp} = N_y$  i najvećom 1.

stepenicom sa  $\sigma_1 = \sigma_y$ , određuje se najčešće primenom Palmgren-Minerove hipoteze odgovarajući ekvivalentni napon  $\sigma_{eq}$  datog spectra koji ima konstantan nivo i isti zamorni vek kao i dati spektar,

$$\sigma_{eq} = \sigma_1 \left[ \sum_{i=1}^j \left( \frac{\sigma_i}{\sigma_1} \right)^m \left( \frac{n_i}{n_{sp}} \right) \right]^{1/m} \quad (8)$$

Sa ovom vrednosti se dalje postupa kao u gornjem slučaju 3.2. Ovo spada u oblast tzv. pogonske čvrstoće za koju se osim Palmgren-Minerove mogu primeniti i druge hipoteze o akumulaciji zamora [1,2,3,4,5,6,7,8]

#### 4.0 ZAKLJUČAK I NEKE NEDOSLEDNOSTI POSTOJEĆIH PRORAČUNA

Izloženi proračun vratila je saobražen današnjem stanju istraživanja problematike opšte čvrstoće i novih tendencija istraživanja i poboljšanja. Međutim, postoje neki slučajevi proračuna koje je potrebno izdvojiti jer pokazuju nedoslednost ako se striktno primene.

Tako u slučaju raznorodnih napona statičkog karaktera, potrebno je jedan napon prevesti preko odgovarajuće hipoteze u odgovarajuću statičku komponentu druge vrste napona i dobijenu ekvivalentnu vrednost onda smatrati srednjom vrednošću napona za treći postojeći dinamički napon iste vrste. Postupkom iz Smithovog dijagrama se konačno „prevodi“ u odgovarajuću ekvivalentnu amplitudu koja predstavlja ekvivalentnu dinamičku čvrstoću na osnovu koje se određuje stepen sigurnosti. Takav način tretiranja, međutim, nije zastupljen u predloženim proračunima jer se ne vodi računa o mogućim različitim karakteristikama promene aksijalnog i savojnog napona, npr. aksijalni je najčešće statičkog, a savojni tipično dinamičkog karaktera.

Ako su brojevi ciklusa aksijalnog i tangentnog napona mali ili su statički, oni se takođe ne mogu direktno sa savojnim naponom ubaciti u izraz za ekvivalentni napon već najpre treba ova dva napona složiti po hipotezi i jedan ekvivalentni, a ovaj opet u ekvivalentni savojni napon statičkog karaktera

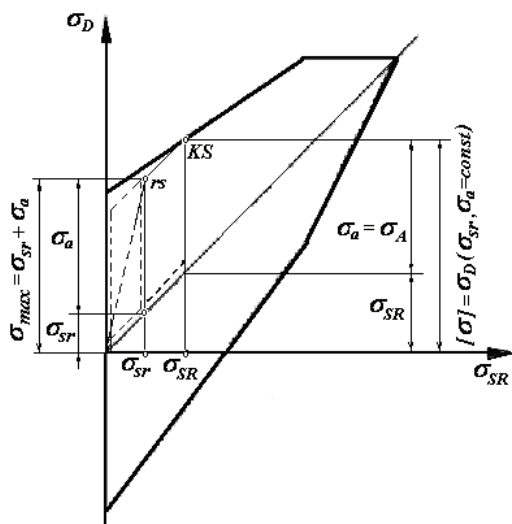


koji u odnosu na postojeći naizmjenični savojni napon predstavlja srednju vrednost. Za slučaj opterećivanja po naizmjeničnom savojnom naponu, proračun se izvodi prema Sl.1. kao

$$S = \sigma_{Ad} (\sigma_{sr,sav,stat}) / \sigma_{a,sav,(-1)} \quad (9)$$

Druga mogućnost neprincipijelnosti proračuna nastaje u slučaju ako se dalje opterećivanje vrši momentom uvijanja od nekog radnog stanja  $rs$  do kritične vrednosti  $KS$  pri istovremeno proporcionalnim aksijalnim i uvojnim naponima (sl. 3). Opet, dosledno hipotezi HMH treba odrediti ekvivalentni srednji napon, npr. na savijanje  $\sigma_{sr,s}$  a po Smithovom dijagramu naći kritičan srednji napon pri savijanju  $\sigma_{SR,s}$  pri zadržavanju amplitude savojnog napona konstantnom od radnog do kritičnog stanja, pri čemu je stepen sigurnosti

$$S = (\sigma_{SR,s} / \sigma_{sr,s})_{\sigma_{a,s}=const} \quad (10)$$



Slika3. Određivanje stepena sigurnosti pri promenljivoj srednjem naponu a konstantnoj amplitudi

Proračuni u oblasti vremenski ograničene i pogonske čvrstoće su skopčani sa nedovoljno istraženim osnovnim postavkama kao i nedostjućim potrebnim uticajnim faktorima. Najizrazitiji nedostaci se odnose na hipoteze o akumulaciji zamornog oštećenja, kao neuzimanje uticaja redosleda nastupanja i međusobne interakcije ciklusa različite amplitude i srednje vrednosti, neistraženi uticaji nivoa napona nižih od trajne dinamičke čvrstoće i sl.

## 5.0 LITERATURA

1. Niemann, G., Winter, H., Höhn, B.-R.: Maschinenelemente, Teil, Springer, Berlin Heid, 2005.
2. Linke, H.: Praxisorientierte Berechnung von Wellen und Achsen nach DIN 743, VDI Ber. 1442, 1998. S. 63
3. Linke, H.: Tragfähigkeit von Achsen und Wellen – Alles klar?, Dresdner Maschinenel. Kolloquium, 2005.
4. Серенсен, С.В., Шнейдерович, Р.М., Громан, М.Б.: Валы и оси, Машгиз, Москва 1959,
5. Серенсен, С.В., Когоаев, В.П., Шнейдерович, Р.М.: Несущая способность и расчет деталей машин на прочность, Машиностроение, Москва, 1975,
6. Shigley, J.E.: Mechanical Engineering Design, McGraw-Hill, 1986
7. Janković, M.: Über einige Bemerkungen bei der Berechnung des Sicherheitsgrade von Konstruktionen, XVI Int. Conf. On Material Flow, Machines and Devices in Industry, Fac. of Mech. Eng, p.128, 2000.
8. Janković, M.: Faze razaranja i vek trajanja mainskih elemenata, Skup o konstruiranju, knj. 2, Zagreb, 1988.
9. Janković, M.: O kritičnim naponima i deformacijama u elementima mašinskih konstrukcija, IRMES-95, knj. 1, Niš, 1995, str. 177.
10. DIN 743, Teil 1, 2, 3, 4. Oktober 2000.

**Autori:** Prof. dr M. Janković, Mašinski fakultet Beograd, J. Munčan, dipl.inž. maš., student doktorskih studija, stipendista Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja, Mašinski fakultet, Kraljice Marije 16, 11000 Beograd, Srbija  
E-mail: [mjankovic@mas.bg.ac.rs](mailto:mjankovic@mas.bg.ac.rs)  
[jelena\\_muncan@yahoo.co.uk](mailto:jelena_muncan@yahoo.co.uk)

Napomena: Ovaj rad je nastao u okviru istraživanja na projektu, TR-14009 finansiranog od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, od 2008-2011. godine.



Rad po pozivu

Pilipović, M., Spasić, Ž.

## VIRTUELNA PROIZVODNJA – VIRTUELNO PROIZVODNO MAŠINSTVO?

**Rezime:** Polazeći od značaja virtuelne proizvodnje - novog koncepta u projektovanju savremenih proizvoda i pogona, data je analiza primene virtuelne proizvodnje u industriji i istraživanju u oblasti proizvodnog mašinstva. Dat je pregled konceptata primenjenih u svetu u razvoju virtualne proizvodnje kao i osnovni pristupu u njenom modeliranju. Za usvojeni koncept virtuelne proizvodnje orijentisane upravljanju razvijan za potrebe domaće industrije definisan je osnovni model primenom IDEF0 metodologije. Dati su primeri primene razvijenog koncepta za modeliranja virtuelnih komponenti primenom standardnog i namenski razvijenog softvera a za potrebe domaće industrije.

**Ključne reči:** Virtuelna proizvodnja, Svremena proizvodnja, Proizvodno mašinstvo

## VIRTUAL MANUFACTURING – VIRTUAL PRODUCTION ENGINEERING

**Abstract:** Starting from the importance of virtual manufacturing - a new concept in the design of modern products and manufacturing, the analysis of virtual manufacturing application in industry and research in the field of manufacturing engineering are given. An overview of the concepts applied in the world in the development of virtual manufacturing, as well as its basic approach to modeling are also given. For adopted concept of the Control-Centered virtual manufacturing, developed for the domestic industry, the basic model is defined by the application of IDEF0 modeling methodology. The application of developed concepts for virtual components modeling, using standard and specialized software, for domestic industry are given.

**Key words:** Virtual manufacturing, Advanced Manufacturing, Production engineering

### 1. UVOD

Globalizacija savremenog tržišta zahteva proizvodnju sve složenijih proizvoda, sa velikim brojem varijanti projektnog rešenja, u cilju prilagodjavanja specifičnim potrebama krajnjeg kupca. Konkurencija na svetskom tržištu, posebno izražena u mašingradnji, automobilskoj i sličnim industrijama, zahteva stalno povećanje kvaliteta, smanjenje cene smanjenje vremena izlaska proizvoda na tržište i fleksibilnu proizvodnju. Ovo postavlja zahtev za što je mogućim kraćim proizvodnim ciklusom kao i za distribucijom zadatka razvoja, projektovanja i proizvodnje na više geografski udaljenih lokacija. Istovremeno, smanjenje ili kompletno eliminisanje međudržavnih barijera, omogućava postojanje i rast efikasnih i inovativnih kompanija tzv. agilnih kompanija. Projektanti savremenih proizvoda i pogona kao i menadžment poslovnih i proizvodnih sistema suočeni su svakodnevno sa potrebom donošenja važnih odluka u cilju pronalaženja najboljeg balansa između kvaliteta proizvoda i cene, krajnjeg roka za proizvodnju i performansi proizvodne opreme, itd. U cilju postizanja uspeha u ovom kontekstu, proizvodne kompanije imaju potrebu da razviju sposobnost za brzi odgovor na zahteve kupca i donošenje ispravnih odluka što je ranije moguće za vreme procesa razvoja proizvoda. Posnatrano sa tehničko-tehnološkog aspekta, uslov opstanka na tržištu je stalno uvodjenje novih tehnologija kao što su: programabilna i fleksibilna automatizacija, kompjuterski integrisana proizvodnja i novi koncepti kao što su holonički proizvodni sistemi, agilni proizvodni sistemi, inteligentni proizvodni sistemi i sl., stepenice u pravcu razvoja fabrika za 21. vek. Sve navedene primere savremenih proizvodnih sistema karakteriše sve veća primena kompjutera za obavljanje velikog broja aktivnosti kompjuterske obrade informacija u planiranju proizvodnje, projektovanju (CAD/CAE/CAPP/CAM) ili upravljanju procesima. Ovakvo značajne promene u oblasti projektovanja i proizvodnje i intezivna primena kompjuterskih tehnologija u svim oblastima poslovnog i proizvodnog sistema zahteva

kontinualno unapređenje postojećih konceptata i kreiranje novih. U oblasti projektovanja proizvoda i proizvodnje novi koncept je razvijen - Virtuelna proizvodnja (VP).

### 2. VIRTUELNA PROIZVODNJA I INDUSTRIJA

Vodeće industrije i mnogim sektorima koriste VP da podrže veći broj etapa svog procesa razvoja proizvoda. Industrija motornih vozila, sa izrazito dinamičkim razvojem, uvek je kroz niz projekata (realizovanih pojedinačno ili u saradnji većeg broja proizvođača) unapređivala proces projektovanja i tehnologije proizvodnju savremenih vozila. Industrija motornih vozila identifikovala je vrlo rano Virtuelnu proizvodnju kao izuzetno značajnu tehnologiju. Na primer, u projektu "Partnerstvo za novu generaciju vozila - PNGV"<sup>1</sup> [10, 27], pokrenutom u SAD pod pokroviteljstvom odbora za istraživanje u automobilskoj industriji - USCAR<sup>2</sup>, identifikovane su napredne proizvodne tehnologije, i između ostalog, agilna proizvodnja, brza izrada prototipova i virtuelna proizvodnja, kao tehnološke oblasti u kojima se očekuje napredak i zahtevaju inovacije [27]. Praktično, stoji konstatacija da je izvor ili koren virtuelne proizvodnje u Industrijama motornih vozila, gde su zahtevi za smanjenjem vremena izlaska novih proizvoda na tržište, smanjenjem troškova uz istovremeno poboljšanje kvaliteta specijalno akutni [12].

U zadnjih 10 godina ima više primera istraživanja u oblasti virtuelne proizvodnje od strane vodećih proizvođača industrije motornih vozila [5]. Jedan od primera primene koncepta virtuelne proizvodnje u industriji motornih vozila je DaimlerChrysler koji je najavio plan izgradnje "Digitalne fabrike" [5] u cilju skraćivanja ciklusa proizvodnje novih vozila za 30%. Osnova projekta je simulacija ukupnog proizvodnog procesa - od prvog inicijalnog crteža do montažne linije sa

<sup>1</sup> PNGV - Partnership for a New Generation of Vehicles

<sup>2</sup> USCAR - U. S. Council for Automotive Research

planom da se na postavljenom konceptu izvrši reinženjering ("retrofit") svih proizvodnih pogona u narednom bliskom periodu. Početak projekta je definisan na primeru izgradnje novog pogona za proizvodnju motora u *Koallega* - Nemačka. Za navedeni projekat izabrana je kao osnovna softver platforma CAD sistem od *Dassault* kompanije - CATIA, sa dopunskim delom - softverom za virtuelnu proizvodnju *Delmia* (danas takodje sastavni deo *Dassault* softvera). Strategija digitalne fabrike je slična sa pristupima drugih velikih proizvođača industrije motornih vozila koji podrazumevaju napore za "automatizaciju projektovanja" odnosno "Dizajn u elektronskom obliku" (*General Motors, Ford, Toyota*, itd). Drugi primer je kompanija *Rover* (u sastavu *BMW* [9]), koja je u projektovanju i proizvodnji modela *Rover 75* promovisala "Elektronsku izgradnju" (*E-build*), proces koji omogućava izgradnju prototipa vozila, komponentu po komponentu u virtuelnom svetu. Za vreme procesa elektronske izgradnje multi-disciplinarni tim inženjera i menadžera sastajao se u specijalno izgrađenom "elektronskom amfiteatru" gde su na specijalnom staklenom ekranu posmatrali proces montaže u potpunom 3D stereo okruženju.

U isto vreme, postoji opšti trend fundamentalnih promena i transformacija kompanija iz oblasti proizvodnih industrija, od vertikalno integrisanog lanca dodatne vrednosti, na saradnju između specijalizovanih nezavisnih kompanija. Ovaj trend je rezultirao u globalnoj mreži virtuelne proizvodnje i značenje "virtuelna proizvodnja" je prošireno da označi odnose između kompanija koje formiraju privremeni lanac snabdevanja [22].

### 3. VIRTUELNA PROIZVODNJA - DEFINICIJE

Prema profesionalnoj literaturi, sistem virtualne proizvodnje (VP) može se definisati na više načina. Virtuelna proizvodnja se prema [6, 13] može definisati kao koncept izvršavanja proizvodnih procesa u kompjuterima na isti način kao u realnom svetu. Kompjuterski sistem označen kao "virtuelni i informacioni sistem" simulira realni i informacioni sistem i generiše komande upravljanja za realni fizički sistem. Isti autori proširili su i definisali ovaj koncept kao agregacija različitog kompjuterskog hardvera i softvera potrebnog za široku oblast zadataka modeliranja i simulacije. Na bazi analize informacione zavisnosti pojedinih zadataka u [6, 7] je predloženo da se arhitektura sistema VP definiše sa sedam vrsti aktivnosti: priprema modela uređaja, razvoj servisa, definicija virtuelnog pogona, definicija operacija, definicija rukovanja (manipulacijom) proizvodima, simulacija virtuelnog pogona i simulacioni interfejs. Osnovna ideja drugog koncepta data u [8] je da se paralelno realnom sistemu CIM<sup>3</sup> preduzeća modelira virtuelni sistem koji se sastoji od: modela proizvoda, modela virtuelnih prototipova, modela virtuelnih resursa i modela virtuelnog okruženja. Pri tome se kao osnovne dobiti od ovakvog pristupa u projektovanju i planiranju navode: smanjen ili potpuno eliminisan broj izrađenih fizičkih prototipova; skraćeno vreme do izlaska na tržište; poboljšana kvaliteta; smanjeni troškovi materijala i alata kao i ukupni troškovi u projektovanju, planiranju, pripremi i realizaciji proizvodnje. Prema [29] ovaj model realnosti (inženjerskih i poslovnih aktivnosti) kreira test polje za eksperimente o uticaju projektovanja proizvoda na projektovanje same proizvodnje kao i za planiranje operacija podrške proizvodnji i proveru novih metoda menadžmenta proizvodnjom. Prema [11] sistem VP definiše se kao integrisano sintetičko proizvodno okruženje čija je svrha unapređenje svih nivoa odlučivanja i upravljanja i obuhvata: projektovanju orijentisanu VP, proizvodnji orijentisanu VP i

upravljanju orijentisanu VP. Prema [2] prošireno CIM preduzeće je integracija je integracija svih kompjuterizovanih aktivnosti i informacija o kupcima, dobavljačima i drugim poslovnim partnerima. Prema [23] VP predlaže kreiranje sintetičkog i integrisanog okruženja, sastavljenog od više različitih softverskih alata i sistema za simulaciju i virtuelne realnosti (VR) koja nudi po sistemu "ključ u ruke" rešenje za ukupan proces razvoja proizvoda od projektovanja do proizvodnje. VP je značajan korak prema fabrikama budućnosti i omogućava izmene u virtuelnom okruženju, šteti vreme i novac, i za rezultat ima kvalitnije i bolje projektovanje i proizvodnju.

Pored navedenih definicija i termina, kao i svaka značajna nova tehnologija, virtuelna proizvodnja dolazi i sa više drugih naziva kao što su digitalna fabrika, digitalna proizvodnja, virtuelna fabrika i neki eksperiti predlažu da je možda najbolji termin "Proizvodno inženjerstvo pomoću kompjutera" kao što je dato u [12] (*Computer-Aided Production Engineering - CAPE*). Stoji i konstatacija da su CAD/CAE sistemi značajno unapredili projektovanje proizvoda, oprema za fabričku automatizaciju unapredila je i povećala efikasnost procesa u pogonu/proizvodnji, dok je proizvodno mašinstvo koje se nalazi između - zanemareno, i kao takvo zrelo za veliko unapređenje i ima veliki potencijal za povećanje produktivnosti u proizvodnji [12]. Kao što integrisani CAD/CAM/CAE sistemi obezbeđuju kompaniji da sve izmene realizuje na jednom sistemu i da razume sve njihove efekte, virtuelna proizvodnja omogućava proizvodnim inženjerima da prouče efekte izmena, bez obzira gde su nastale (na individualnim operacijama, u celom pogonu ili u modelu proizvoda) i da im pomogne da brzo izmene ili prilagode proizvodnu liniju. Iako se virtuelna proizvodnja koristi pre svega u projektovanju, može da postane i platforma za planiranje i terminiranje i optimizaciju proizvodnje u postojećim pogonima.

Između ostalog virtuelna proizvodnja je kolekcija softverskih aplikacija koje su različito komponovane zavisno od vrste proizvodnje na koju se odnosi [12]. Tipični softverski alati i funkcije koje se javljaju u virtuelnoj proizvodnji su: CAD (esencijalna komponenta u svim aplikacijama virtuelne proizvodnje), CAE, NC programiranje sa simulacijom i verifikacijom programa (CAM), projektovanje i modeliranje opreme, rasporeda opreme u pogonu i celih fabrika, simulacija fabrika (diskretna simulacija koja uključuje tokove materijala, delova i drugih komponenti kroz pogon/fabriku i omogućava identifikaciju uskih grla, uvid u stepen iskorišćenja opreme i ocenu alternativa), simulacija robota i *offline* programiranje robota, simulacija montaže (u nekim slučajevima sa realističkom dinamikom), upravljanje kvalitetom (uključuje analizu tolerancija, programiranje koordinatnih mernih mašina uz *offline* kreiranje programa inspekcije), servis i podrška u integraciji svih softverskih sistema.

Višegodišnja istraživanja u oblasti CIM modela na Mašinskom fakultetu u Beogradu, bazirana na svetski poznatim referentnim modelima (CASA SME i CIM OSA) dovela su do sopstvenog modela virtuelne proizvodnje za prošireno CIM preduzeće [24]. Model je baziran na ranije usvojenom modelu podacima/znanjem vodene fabrike (Jupiter model) i konceptu virtuelnog i realnog sistema u kome podsistem simulacije predstavlja sve fizičke CIM komponente u virtuelnom okruženju i daje mogućnosti provere, optimizacije i osnovu za donošenje odluka.

Pored navedenih primera, definicija i u isto vreme centara i projekata gde se istražuje virtuelna proizvodnja, koncept virtuelne proizvodnje se primenjuje i u projektovanju posebno složenih savremenih proizvoda.

Na primer u preglednom radu [1] definisana je virtuelna mašina alatka kao mehatronski sistem i koncept integrisanog

<sup>3</sup> CIM - Computer Integrated manufacturing

razvoja modernih mašina alatki sa virtuelnim prototipovima. Koncept je kompleksan i uključuje kinematiku, dinamiku, analizu na bazi metode konačnih elementa, optimizaciju strukturnih komponenti i simulacije dinamičkog ponašanja strukturnih komponenti mašine zajedno sa upravljanjem kretanjem (servo upravljanje), simulacija CNC upravljanja sa virtuelnim modelima generisanja putanje alata i pozicioniranja uključujući i optimizaciju programa za obradu na više-osnim mašinama, simulacija procesa obrade i na kraju istovremena simulacija rada mašine i procesa.

S obzirom na značaj sistema upravljanja za savremenu proizvodnju veliki broj istraživanja odnosi se na virtuelne modele CNC upravljačkih jedinica i drugih sistema upravljanja kao što je primer u [4, 30].

#### 4. MODELIRANJE VIRTUELNE PROIZVODNJE

Projektovanje i modeliranje virtualnih proizvodnih sistema je kompleksan zadatak koji uključuje korišćenje širokog spektra metoda u različitim fazama projektovanja. U fazi konceptualnog projektovanja dominantna je intuicija projektanta, dok se u fazi detaljnog projektovanja koriste različite metode i alati za modeliranje detalja sistema. Pored novih postupaka u projektovanju proizvoda i proizvodnih sistema, virtualni proizvodni sistemi koriste niz postojećih znanja i razvijenih sistema, otvarajući pitanja njihove integracije. Danas postoji razne metode i objektno orijentisani jezici za modeliranje virtualnih proizvodnih sistema, međutim najčešće korišćene metode su: IDEF0, IDEF3 (*Integration DEFinition for Function modelling*) i UML (*Unified Modelling Language*). IDEF0 metodologijom definišu se jedinstvene (zajedničke) "logičke aktivnosti", dok se UML dijagramom definiše "fizički" opisi poslovnih procesa [31]. S obzirom na sve veću primenu objektno orijentisanog pristupa u projektovanju i modeliranju kompleksnih sistema i virtualnih proizvodnih sistema ističe se značaj UML jezika standardno primenjanog za objektno orijentisanu analizu i projektovanje.

Pored navedenog, uz druge metode i modele, ističe se da koncepti koji u projektovanju virtualne proizvodnje koriste Internet i za razmenu podataka koriste različite jezike od koji se navode: *HTML* (*Hyper Text Markup Language*) jezik za dokumente i *VRML* (*Virtual Reality Modelling Language*) koji omogućava prenos 3D CAD/CAM modela preko Internet-a. U dosadašnjem radu autori su koristili IDEF metodu, sa daljim istraživanjima u definisanju detalja modela na objektno orijentisanom pristupu preko UML jezika i primenu VRML i HTML jezike za Intranet/Internet okruženje.

#### 5. PRISTUP UPRAVLJANJU ORIJENTISANE VIRTUELNE PROIZVODNJE

Tri paradigme definišu specifičan pogled na virtuelnu proizvodnju i predložene su na "Radionici korisnika virtuelne proizvodnje" ("*Virtual Manufacturing User Workshop*") - na skupu održanom u Dayton-u Ohaju i publikovani u tehničkom izveštaju pripremljenom od *Lawrence Association Inc.* 1994. godine (dobijeno sa adrese <http://www.isr.umd.edu>). Ove tri paradigme: projektovanju orijentisana VP (*Design-Centered Virtual Manufacturing*); proizvodnji orijentisana VP (*Production-Centered Virtual Manufacturing*); i upravljanju orijentisana VP (*Control-Centered Virtual Manufacturing*); analizirane su od većeg broja drugih autora a posebno u [11].

Projektovanju orijentisana virtuelna proizvodnja koristi proizvodnji orijentisanu simulaciju za optimizaciju projektnog rešenja proizvoda i procesa prema specifičnim ciljevima kao što su: projektovanje za proizvodnju,

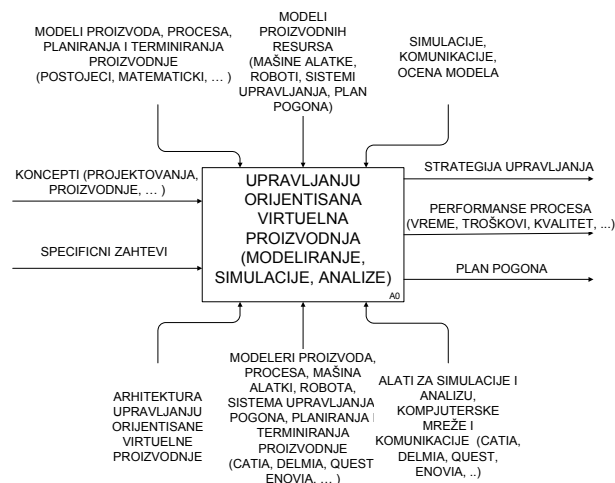
projektovanje za montažu, kvalitet proizvoda, jeftinu – efikasnu proizvodnju („*lean*“).

Proizvodnji orijentisana virtuelna proizvodnja obezbedjuje okruženje za generisanje planova proizvodnje, planova procesa, planova opterećenja resursa (kapaciteta) i koristi simulaciju za jeftinu i brzo određivanje više alteranativa proizvodnje odnosno procesa.

Upravljanju orijentisana virtuelna proizvodnja obezbedjuje okruženje za optimizaciju proizvodnih procesa i efikasnost proizvodnog sistema koristeći modele za simulaciju upravljanja proizvodnjom i procesima.

Uzimajući u obzir prethodno navedene paradigme i dalji razvoj ranije definisanog modela Računarski integrisane proizvodnje za prošireno CIM preduzeće, autori rada su za istraživanje na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu jprihvatili koncept virtuelne proizvodnje na bazi treće paradigme – upravljanju orijentisane virtuelne proizvodnje.

Osnovni koncept, modeliran primenom *IDEF0* metodologije dat je na slici 1. Za definisani koncept (projektovanja, proizvodnje ili neki drugi za koji se razvija virtuelna proizvodnja), uzimajući u obzir i specifične zahteve, glavni ulazi su modeli proizvoda, procesa, i proizvodnih resursa. Za uspostavljeni model planiranja i terminiranja proizvodnje, različite varijante pogona, rasporeda opreme u pogonu i modela upravljanja pogonom mogu se definisati u cilju optimizacije različitih elemenata proizvodnje (strategija upravljanja, performanse procesa i eventualno i rasporeda opreme u pogonu).

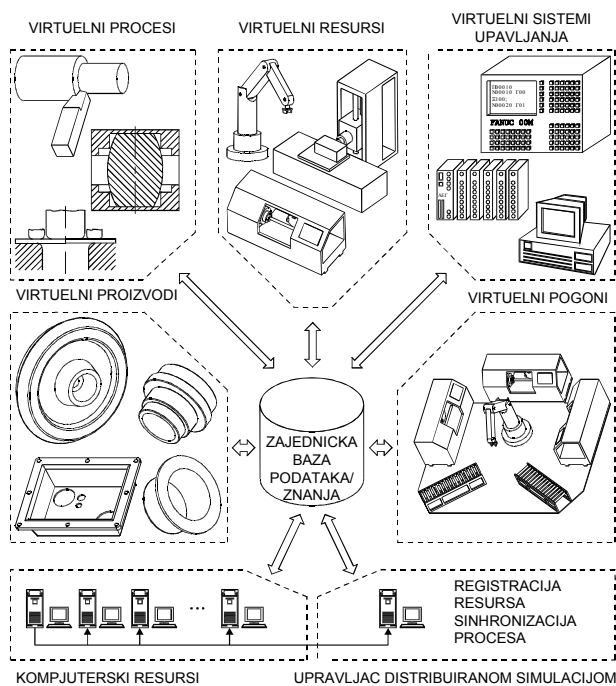


Slika 1. Koncept upravljanju orijentisane virtuelne proizvodnje

Za postavljene koncepte definisana je detaljna arhitektura virtuelne proizvodnje orijentisane upravljanju u [25, 26] i data na slici 2. Osnovni elementi arhitekture su: virtuelni modeli proizvoda, procesa, resursa pogona i sistema upravljanja, kompjuterski resursi za kreiranje virtuelnog okruženja i simulaciju i baza podataka/znanja sistema.

Kontroler distribuirane simulacije je osnova sistema i obavlja dve funkcije: registraciju virtuelnih resursa i sinhronizaciju ukupnog procesa simulacije u virtuelnom proizvodnom sistemu. Posle konfigurisanja proizvodnog pogona, svaki proizvodni resurs se alokira na odgovarajući kompjuter u kome realizuje svoju funkciju. U svakom slučaju jedan kompjuterski resurs može da deli svoje procesno vreme na više virtuelnih proizvodnih resursa. Kontroler distribuirane simulacije je odgovoran za sinhronizaciju procesa i koordinaciju individualnih resursa. Za smanjenje ukupnog vremena simulacije, prilagođen je model distribuirane simulacije u kome su virtuelni resursi distribuirani u kompjuterskoj mreži.





Slika 2. Arhitektura upravljanju orijentisane virtualne proizvodnje

Koristeći osnovni koncept virtualne proizvodnje orijentisane upravljanju (slika 1) i postavljenu arhitekturu (slika 2) daljom primenom IDEF0 metodologije za funkcionalno modeliranje, razvijeni su naredni nivoi koji prikazuje živorni ciklus virtualne proizvodnje [19, 25, 26, 28]. Definisane su četiri osnovne faze životnog ciklusa virtualne proizvodnje: projektovanje proizvoda, priprema proizvodnje, modeliranje proizvodnih resursa i simulacija sa analizom.

U procesu projektovanja virtualne proizvodnje koristi se njena referentna arhitektura i postojeći fizički, matematički i drugim modeli realnog sistema.

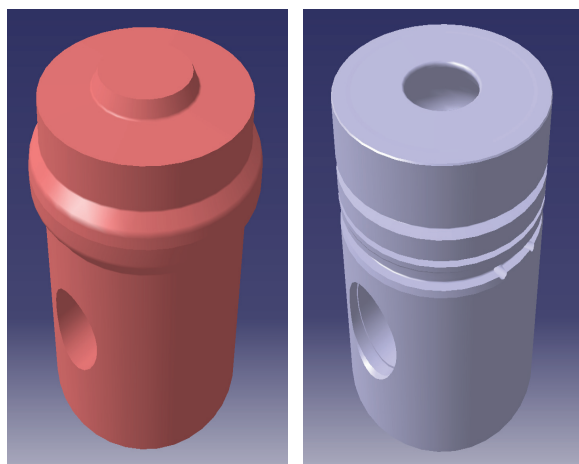
Glavna podrška postavljenom konceptu su modeli virtualnih komponenti sistema. „Velika četvorka“, koja nudi i isporučuje softver za CAD/CAM/CAE/PDM, *Dassault Systems/IBM Corp.*, *Parametric Technology Corp. (PTC)*, *SDRC* i *UNIGRAPHIC Solutions Inc.*, deklarisali su da imaju rešenje „projektovanja sa proizvodnjom“ i sa tim su se približili i ušli u svet virtualne proizvodnje [12]. Saglasno navedenom, u daljem razvoju virtualne proizvodnje prihvaćen je koncept max. korišćenja standardnog softvera, kad god je to moguće, sa jednom od ključnih prednosti – olakšava integraciju pojedinih podsistema. Na slici 3. se vidi da je u daljem razvoju pojedinih komponenti izabran CAD/CAM/CAE sistem CATIA [3], a concept integracije i izmene informacija između pojedinih podsistema je baziran na STEP datotekama i drugim standardima. Za dalji razvoj sistema, posebno u delu modeliranja i simulacije proizvodnih resursa, planiran je i drugi softver (Delmia, Enovia, Quest, itd).

## 5. PRIMERI MODELIRANJA KOMPONENTI ZA VIRTUELNU PROIZVODNJU

Na bazi postavljenog koncepta, definisane arhitekture i detaljnog razvoja projektnog rešenja virtualne proizvodnje orijentisane upravljanju primenom IDEF0 metodologije, razvijeno je više modela komponenti virtualne proizvodnje a za primere proizvodnog programa domaće, pre svega industrije motornih vozila.

### 5.1. Modeliranje proizvoda za virtualnu proizvodnju

Modeliranje virtualnih proizvoda, je prvi korak u realizaciji virtualne proizvodnje. Za primer se daje modeliranje cilindarskog sklopa, jednog od ključnih podsklopova motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Klip, cilindarska košuljica i osovinica su ključne komponente cilindarskog sklopa. Najsloženija komponenta je klip, koji sa svojom specifičnom geometrijom (cilindar u radnom stanju i ovalan na standardnoj temperaturi) zahteva kompleksno matematičko modeliranje i proračun koordinata delova omotača pre primene standardnog CAD sistema. Primenom specijalno razvijenih programa u FORTRAN programskom jeziku izvršeno je modeliranje familije klipova i proračun neophodnih geometrijskih elemenata - koordinata tačaka na osnovu čega se formirane interfejs datoteke za dalje modeliranje u standardnom CAD sistemu [18]. Ne ulazeći u detalje modela na slici 3. dati su primeri virtualnih modela klipa - komponenti cilindarskog sklopa razvijenih primenom CAD sistema CATIA u okviru istraživanja razvoja virtualne proizvodnje na globalnoj mreži Internet [19, 28].



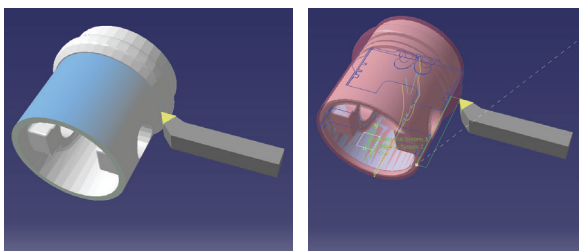
Slika 3. Modeli priprema klipa i klipa (CATIA 3D modeli)

### 5.2. Tehnološka priprema i planiranje proizvodnje za virtualnu proizvodnju

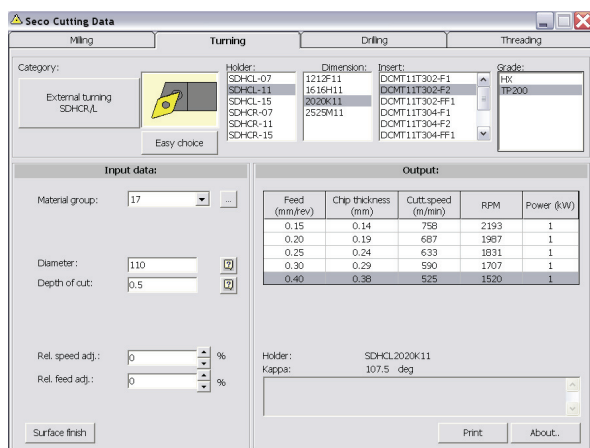
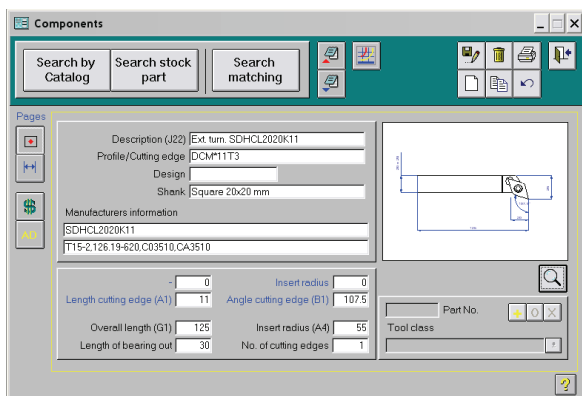
Tehnološka priprema - modeliranje proizvodnih procesa je drugi korak u realizaciji virtualne proizvodnje. Ona sadrži: modeliranje proizvodnih procesa, planiranje i terminiranje proizvodnje. Savremene proizvodne tehnologije omogućavaju primenu numerički upravljanih mašina alatki i druge programabilne opreme koja omogućava kompjutersko modeliranje proizvodnih procesa primenom različitog softvera (CAM, CAP, NC programiranje i sl.). U cilju provere mogućnosti standardnih CAM sistema za primenu u virtualnoj proizvodnji izabran je CATIA CAM modul sa podsistemom za NC programiranje. Za prethodni model virtualnog proizvoda - klip, izvršeno je projektovanje tehnološkog procesa sa NC programiranjem. Primer dela projektovanog tehnološkog procesa obrade struganjem na NC strugu za klip dat je na slici 4. (simulacija struganja u 3D modu sa putanjom alata) [19, 28].

Za projektovani tehnološki proces izbor alata i parametara režima obrade realizovan je u dve faze: selekcija alata iz CATIA kataloga sa osnovnim podacima za simulaciju i u drugoj fazi izbor realni alata iz kataloga proizvođača sa selekcijom stvarnih režima obrade. Ovo je omogućilo da se u konačnoj simulaciji izvrši realna provera projektovanog procesa i dobiju stvarna vremena obrade za simulaciju rada i opterećenja proizvodnih resursa. Primer selekcije alata za struganje i režima obrade iz *Seco* kataloga primenom odgovarajućeg softvera [21] dat je na slici 5. Realni podaci o geometriji alata sa odgovarajućim modelom su iskorišćeni za

dalju simulaciju (potrebno ih je odrediti i primeniti u virtuelnoj proizvodnji kad god je to moguće).



Slika 4. Simulacija obrade struganjem sa putanjom alata za strug (CATIA 3D modeli)

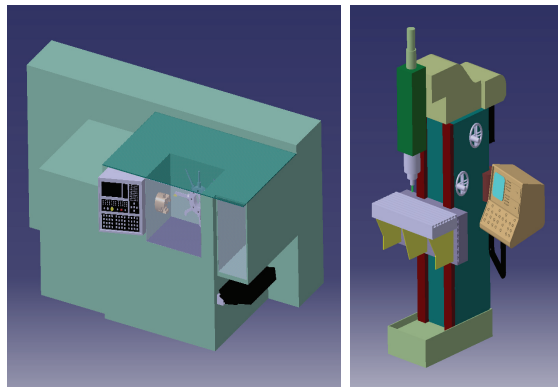


Slika 5. Primer selekcije alata i parametara režima obrade

### 5.3. Modeliranje proizvodnih resursa za virtuelnu proizvodnju

Modeliranje proizvodnih resursa je od specijalnog značaja za sve koncepte virtuelne proizvodnje. Savremene proizvodne tehnologije kao što su fleksibilne tehnologije i fleksibilna automatizacija, kompjuterski integrisana proizvodnja, holonički proizvodni sistemi, agilni proizvodni sistemi, inteligentni proizvodni sistemi i drugi, predstavljaju korake u razvoju fabrika za 21. vek - fleksibilnih, potpuno automatizovanih i prema nekim autorima inteligentnih fabrika bez ljudi. Svi ovi koncepti bazirani su na savremenoj programabilnoj opremi kao što su: NC i CNC mašine alatke, industrijski roboti i drugi automatizovani sistemi. Savremena programabilna oprema koristi specijalizovane sisteme upravljanja (CNC upravljačke jedinice, robot upravljačke sisteme, upravljačke sisteme fleksibilne ćelije) i upravljačke sisteme opšte namene bazirane na personalnim ili industrijskim kompjuterima. na bazi ovog pristupa, modeliranje proizvodnih resursa uključuje: modeliranje fizičkih resursa opreme (mašine alatke, roboti, konvejeri, alati i pribori, oprema i pribor za merenje i kontrolu kvaliteta i

drugo), modeliranje resursa sistema upravljanja i modeliranje ukupnih proizvodnih pogona. Za ovako različitu opremu teško je naći komercijalni softver koji pokriva modeliranje ukupne opreme. U daljem radu daće se primeri primene različitog softvera za modeliranje proizvodnih resursa. Prvi primer je primena standardnog CAD sistema (CATIA sa modulima *Mechanical Design* i *Equipment and systems* i drugim). Na slici 6. dat je primer modeliranja CNC mašina alatki (primer CNC struga i CNC glodalice) [19, 28].



Slika 6. Modeliranje CNC mašina alatki (Catia modeli CNC struga i CNC glodalice)

Specifični pogoni i oprema u nekim slučajevima zahtevaju kombinaciju standardnog i namenski razvijenog korisničkog softvera. Primer je pogon za vulkanizaciju elastomera u proizvodnji industrijskih i kamionskih guma [14, 16] gde je za modeliranje proizvodne opreme (prese za vulkanizaciju upravljanih specifičnim upravljačkim jedinicama) iskorišćen standardni CAD sistem (AutoCAD) sa dopunski razvijenim LISP potprogramima i namenski razvijena specifična SCADA aplikacija koja omogućava simulaciju realnog pogona i u istovremeno transfer na realni sistem gde SCADA preuzima upravljanje i nadzor.

Posebnu pažnju u zadnjih nekoliko godina, izaziva virtuelna metrologija - deo virtuelnih proizvodnih sistema predviđen za kontrolu kvaliteta proizvodnog procesa i finalnog proizvoda. Specifičnost opreme primenjene u metrologiji i njena kompleksnost uobičajeno zahtevaju specijalno softversko okruženje za njeno uvođenje u koncept virtuelne proizvodnje. Jedan primer primene virtuelne metrologije je laserski merni sistem razvijen na bazi laserske triangulacije koji namenjen kontroli u toku procesa dimenzija gume na liniji za kalendiranje. Ovaj pristup omogućava upravljanje procesom na bazi realnih podataka dobijenih merenjem u toku procesa i u okviru projekta [17] razvijen je model virtuelne robotizovane ruke sa laserskim mernim sistemom [15].

## 6. ZAKLJUČAK

Nova paradigma u projektovanju savremenih proizvodnih sistema - virtuelna proizvodnja, prezentovana je u radu sa primerima primenjenih koncepata, istraživanja i razvoja u svetu. Ističe se da je virtuelna proizvodnja, po definiciji, veliki izazov i od izuzetne važnosti za proizvodno mašinstvo. Definisana je sopstveni koncept razvoja virtuelne proizvodnje za potrebe domaće industrije. Iskustvo na bazi razvoja virtuelnih modela za primere komponenti proizvoda i tehnologija iz industrije pokazuje da je, zavisno od karakteristika proizvoda i primenjenih tehnologija, moguće koristiti standardni softver tipa CAD/CAE/CAM poznatih proizvođača softvera. Modeliranje pogona i posebno sistema upravljanja zahteva i primenu specijalizovanog softvera za modeliranje i simulaciju (na primer Delmia). Specifični proizvodi i tehnologije zahtevaju razvoj namenskog korisničkog softvera. Kombinacija standardnog i namenskog

softvera otvara pitanje integracije softverskog okruženja za primenu u virtualnoj proizvodnji, što je pravac razvoja u svetu a isto tako i daljeg istraživanja autora rada.

#### **Napomena:**

*Rezultati prikazani u ovom radu deo su istraživanja na projektu „Primena inteligentnih senzorskih sistema u razvoju integrisane automatizacije realnih i virtuelnih procesa proizvodnog preduzeća“, Projekat 14035, koji finansira Ministarstvo za nauku i zaštitu životne sredine Republike Srbije.*

## **7. LITERATURA**

- [1] Altintas, Y., Brecher, C., Weck, M., Witt, S., *Virtual machine Tool*, Annals of the CIRP, 54/2, 115-138, 2005.
- [2] Browne, J., *Global Manufacturing/Extended Enterprise*, Proceedings of Conference on “Technology para una nova industria - CIME, Guimares, Portugal, 4-10, 1995.
- [3] Dassault Systems, *Catia Version 5 Release 11 - Documentation*, Dassault Systems, 2003.
- [4] Erkorkmaz, K., Altintas, Y., Yeung, C-H., *Virtual Computer Numerical Control System*, Annals of the CIRP, 55/1, 399-402, 2006.
- [5] Hoffman, T., *Automakers Goes Digital*, Computer World, Vol. 36, Issue 49, 1-2, 2002.
- [6] Iwata, K., Onosato, M., Teramoto, K. and Osaki, S., *A Modelling and Simulation Architecture for Virtual Manufacturing Systems*, Annals of the CIRP, 44/1, 399-402, 1995.
- [7] Iwata, K., Onosato, M., Teramoto K. and Osaki, S., *Virtual Manufacturing Systems for Integrating Manufacturing Resources And Activities*, Annals of the CIRP, 46/1, 335-338, 1997.
- [8] Kimura, F., *Product and Process Modelling as a Kernel for Virtual Manufacturing Environment*, Annals of the CIRP, 42/1, 147-150, 1993
- [9] Kochan, A., *Virtual Manufacturing Comes of Age*, Design News, 69-71, May 1999.
- [10] Kubel, E., *Manufacturing Tomorrow's Supercars*, Manufacturing Engineering, Vol. 120, No. 6, 58-65, June 1998.
- [11] Lin, E., Minis, I., Nau D. and W. Regli, *Contribution to Virtual Manufacturing Background Research Phase I & Phase II, Final Report F33615-92-D-5812*, Institute for System Research - University of Maryland, 1995.
- [12] Mills, R., Schmitz, B., *Manufacturing Goes Virtual, Computer-Aided Engineering*, Vol. 17, Issue 12, 1998, pp. 1-5.
- [13] Onosato, M., Iwata, K., *Development of a Virtual Manufacturing System by Integrating Product Models and Factory Models*, Annals of the CIRP, 42/1, 475-478, 1993.
- [14] Petrović, P. B., Jakovljević, Ž- B., Miković, V. Đ., *Real Time Interactive Monitoring and Control of Enterprise Production Resources Based on Dynamical 3D Virtual Model*, Proceedings of the 34. Jupiter Conference, Belgrade, 4.28-4.34, 2008.
- [15] Petrović, P. B., *Rubberized Cord Thickness Measurement Based on Laser Triangulation*, FME Transaction, 35, 85-94, 2007.
- [16] Petrović, P., Spasić, Ž., Pilipović M., i dr., *Revitalizacija i informaciona integracija proizvodnih resursa u cilju podizanja konkurentnosti TRAYAL korporacije na međunarodnom tržištu*, Projekat TP-6362A, Ministarstvo za nauku i zaštitu životne sredine Republike Srbije, Projekat tehnološkog razvoja, 2005. - 2007. godine, Beograd.
- [17] Petrović, P., Spasić, Ž., Pilipović M., Jakovljević, Ž., *Primena inteligentnih senzorskih sistema u razvoju integrisane automatizacije realnih i virtuelnih procesa proizvodnog preduzeća*, Projekat TP-14035, Ministarstvo za nauku i zaštitu životne sredine Republike Srbije, Projekat tehnološkog razvoja, 2005. - 2007. godine, Beograd.
- [18] Pilipović, M., Stojadinović, A., Stanojević, M., *Modeliranje i projektovanje tehnologije izrade Master klipa*, Zbornik radova XXVII savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Mašinski fakultet Niš, Niš, 1998.
- [19] Pilipović, M., Vučković, D., Spasić, Ž., Vičević, Z., *Virtual Environment for Advanced Manufacturing of Cylinder Assemblies*, Proceedings of the European Automotive Congress - EAEC 2005, Belgrade, 1-10, 2005.
- [20] Pilipović, M., Spasić, Ž., Stanojević, M., *Piston Manufacturing and Informational Integration of Enterprise*, XVI International Conference “Science and Motor Vehicles”, 271-274, Belgrade, 1997..
- [21] Seco, *Turning, Main Catalogue*, Seco Tools AB, Fagersta, 2000.
- [22] Shi, Y., Gregory, M., *Emergency of Global Manufacturing Virtual Network and Establishment of New Manufacturing Infrastructure for Faster Innovation and Firm Growth*, Production Planning & Control, Vol. 16. No. 6, 621-631, 2005.
- [23] Souza, M. C. F., Porto, A. J. V. and Sacco, M., *Virtual Manufacturing as a Way for the Factory of the Future*, J. Intelligent Manufacturing, 17, 725-735, 2006.
- [24] Spasić, Ž., Stefanović, N., Stojadinović, A., Pilipović, M., *Model of Virtual Manufacturing Systems for Distributed Simulation of Extended CIM Enterprise*, Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Conference on Engineering Design and Automation, Bangkok 1997.
- [25] Stojadinović, A., *Prilog razvoju virtuelnog upravljačkog sistema za savremenu proizvodnju*, Magistarska teza, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd 1999.
- [26] Stojadinović, A., Pilipović M. and Spasić, Ž., *Development of Virtual PLC for Simulation and Education in Manufacturing*, Preprints of the 9<sup>th</sup> Symposium on Information Control in Manufacturing, Nancy - Metz, France, Vol. III, 255-260, 1998.
- [27] USCAR, *Partnership for the New Generation of Vehicles - Technology Areas*, United States Council for Automotive Research - USCAR, www.uscar.org, 1997.
- [28] Vučković, D., *Prilog razvoju virtuelnog upravljačkog sistema za savremenu proizvodnju*, Magistarska teza, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd 2004.
- [29] Wiendahl, H.-P., Scholtissek, P., *Management and Control of Complexity in Manufacturing*, Annals of the CIRP, 43/2, 533-540, 1994.
- [30] Yeung, C-H., Altintas, Y., Erkorkmaz, K., *Virtual CNC System – Part I System Architecture & Part II High Speed Contouring Application*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46, 1107-1138, 2006.
- [31] Zhao, J., Cheung, W., Young, R., *A Consistent Manufacturing Data Model to Support Virtual Enterprises*, International Journal of Agile Manufacturing Systems, Vol.1, No.3, 150-158, 1999.

**Autori: Prof. dr Miroslav Pilipović, Prof. dr Žarko Spasić**  
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno mašinstvo, Kraljice Marije 16, 11000 Beograd, Srbija, Tel.: +381 11 3302-404, Fax: +381 11 3370-364.  
E-mail: [mpilipovic@mas.bg.ac.yu](mailto:mpilipovic@mas.bg.ac.yu)  
[z.spasic@sezampro.yu](mailto:z.spasic@sezampro.yu)





Dimić, Z., Kvirgić, V., Živanović, S., Krošnjar, A.

## KONCEPT UPRAVLJANJA PETOOSNOG VERTIKALNOG STRUGARSKOG OBRADNOG CENTRA UPRAVLJAČKIM SISTEMOM OTVORENE ARHITEKTURE

**Rezime:** Do pre desetak godina CNC kao specijalizovan računarski sistem je bio neprikosnoven industrijski računar za upravljanje mašinama alatkama. Otvorena PC arhitektura dizajnirana za industrijske aplikacije polako i vrlo temeljno potiskuje specijalizovane CNC sisteme sa tržišta. Iako se veliki proizvođači CNC sistema bore da održe korak i ulažu velika sredstva u razvoj, arhitektura i performanse, a posebno cena, prosečnog industrijskog PC-a nema konkurenciju. To je razlog što se sve više ljudi u svetu okreće razvoju softverski orijentisanih CNC sistema, za šta se kao osnova koristi PC platforma i Linux operativni sistem sa real-time ekstenzijom. Dakle, PC kao osnova, odgovarajuće PC interfejs kartice i softverski orijentisani CNC čine tri glavne celine upravljačke jedinice otvorene arhitekture (OAC - Open architecture control), na svetskom tržištu.

**Cljučne reči:** otvorena arhitektura, CNC, Linux, real-time, PC platforma, obradni centar, višeosna obrada

## CONCEPT OF 5-AXES VERTICAL TURNING MACHINING CENTER CONTROL USING OPEN ARCHITECTURE CONTROL SYSTEM

**Abstract:** Up to 10 years ago, CNC as specialized computer system was the only industrial computer for machine tools control. Open PC architecture designed for industrial applications easily and very thoroughly suppresses specialized CNC systems from market. Although huge manufacturers of CNC systems invest in development, architecture and performances, and especially price of average PC has no competition. This is the main reason that more and more people turns to development of software oriented CNC systems which, as a basis, use PC platform and Linux OS with real-time extension. Hence, PC as basis, corresponding PC interface cards and software oriented CNC make three main entities of open architecture control unit (OAC - Open architecture control) in world market.

**Key words:** open architecture, CNC, Linux, real-time, PC platform, machining center, multiaxes machining

### 1. UVOD

Istraživanja u oblasti upravljanja otvorene arhitekture su postala dominantna u istraživačkim institucijama koja se bave razvojem upravljačkih sistema. Na sličan način na koji je otvorenost arhitekture uticala na revolucionaran rast PC industrije, otvorenost arhitekture upravljačkih jedinica mašina alatki treba da doprinese, kako bržem rastu industrije mašina alatki, tako i bržem razvoju malih i srednjih preduzeća iz oblasti mašinstva, kroz osavremenjavanje postojećih mašina alatki uz minimalna ulaganja.

Trenutno na tržištu postoje komercijalni programski paketi i sistemi koji pokrivaju ovaj segment. Međutim, oni su, zbog visoko postavljenih zahteva primene, zatvorenosti arhitekture i visoke cene, gotovo potpuno nedostupni domaćem tržištu.

Otvorenost arhitekture upravljačkog sistema podrazumeva otvorenost arhitekture korisničkog interfejsa, ograničenu otvorenost jezgra operativnog sistema (kernela) i otvorenost sistema upravljanja u hardverskom i softverskom smislu [1,3]. To podrazumava nezavisan izbor jeftinog hardvera, uz korišćenje besplatnog operativnog sistema i fleksibilnog upravljačkog softvera. U tom smislu, razvoj predmetne upravljačke jedinice za upravljanje mašinama alatkama i industrijskim robotima je zasnovan na univrezalnoj hardverskoj PC platformi i na real-time operativnom sistemu otvorene arhitekture.

### 2. STANJE ISTRAŽIVANJA

U svetu je EMC2 (*Enhanced Machine Controller*) [4,5] opšte prihvaćeni softverski sistem za upravljanje mašinama alatkama i robotima. Primena je vrlo raznolika. Kreće se od

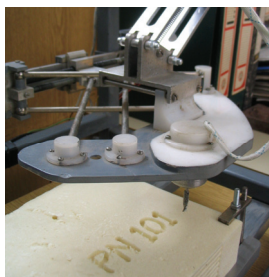
edukacione, uz korišćenje virtuelnih mašina generisanih u Python programskom okruženju [8], pa do vrlo ozbiljne koja podrazumeva upravljanje kapitalnim mašinama alatkama [7,11]. Ne treba zanemariti činjenicu da sve više novih proizvođača mašina alatki, kao osnovu za razvoj sopstvenog CNC-a, koriste EMC2. U tome, naravno, prednjače kineski proizvođači mašina. U Kini postoje i vrlo ambiciozni stručnjaci koji na bazi otvorene arhitekture razvijaju iz osnova nove upravljačke sisteme [2,3].

Tokom više godina prisutnosti na domaćoj i inostranoj softverskoj sceni, EMC2 *open-source* softverski sistem za upravljanje mašinama alatkama je stekao veliki broj, kako korisnika, tako i onih koji učestvuju u permanentnom razvoju ovog sistema [7-12]. Naša istraživanja i razvoj u ovoj oblasti, počela su pre tri godine konfigurisanjem upravljanja za stonu edukacionu troosnu mašinu sa paralelnom kinematikom pn101\_st V.1, [10], (Slika 1a). Na uspešnu realizaciju ovog projekta, nadovezalo se upravljanje robotom LOLA 50 kao multifunkcionalnim rekonfigurabilnim obradnim centrom, [12] (Slika 1c).

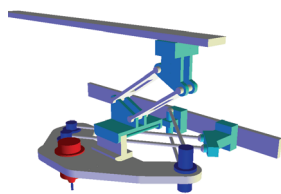
Uporedo sa navedenim upravljačkim sistemima, razvijane su virtuelne mašine na istoj osnovi, kao podrška programiranju mašina i u svrhe edukacije studenata Mašinskog fakulteta u Beogradu, [8]. Tako je nastao, najpre, virtuelni model robota LOLA 50 kao posledica neminovnosti postojanja *off-line* sistema za programiranje složenog sistema kakav je multifunkcionalni rekonfigurabilni obradni centar na bazi robota, slika 1d).

Ovladavanje modeliranjem složenih kinematičkih sistema u Python objektno orijentisanom programskom jeziku, omogućilo nam je da u virtuelno okruženje smestimo i mehanizam stone troosne mašine sa paralelnom kinematikom pn101\_st V.1, slika 1b).





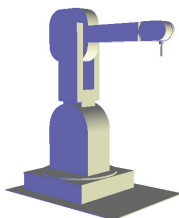
a) pn101\_st V.1



b) Virtuelna pn101\_st V.1



c) LOLA 50

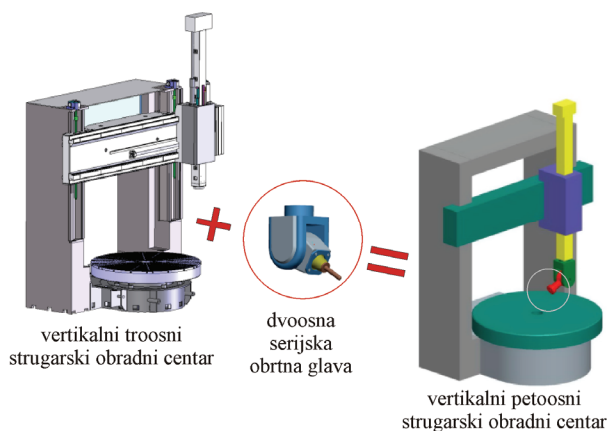


d) Virtuelni robot LOLA 50

Slika 1. Primeri do sada realizovanih upravljanja otvorene arhitekture na bazi EMC softverskog sistema

### 3. KONCEPCIJA PETOOSNOG STRUGARSKOG OBRADNOG CENTA

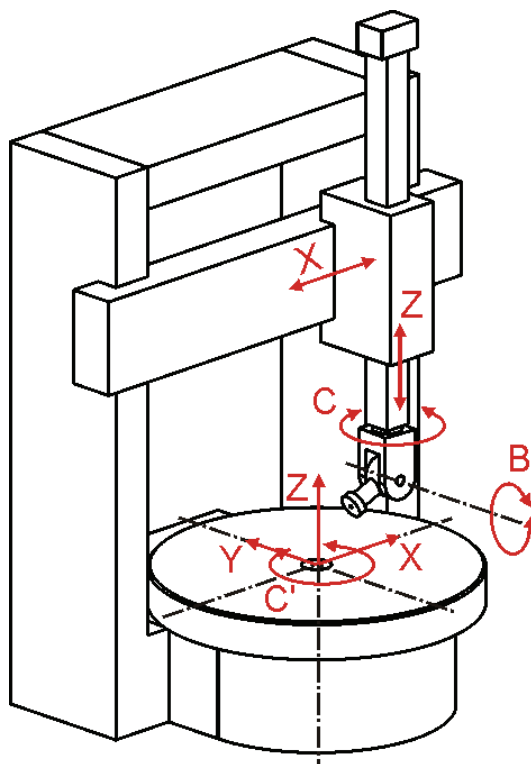
Usvojena koncepcija petoosnog vertikalnog strugarskog obradnog centra je nastala nadogradnjom vertikalnog troosnog strugarskog obradnog centra, dvoosnom serijskom glodačkom glavom na jedinicu struganja, bušenja i glodanja, slika 2.



Slika 2. Koncepcija nadogradnje troosnog na petoosni strugarski obradni centar

Na taj način se realizuje funkcija 5-osnog glodanja. Prva osa glodačke glave je kolinearna osi Z mašine. Zakretanje glodačke glave oko ove ose za  $\pm 180^\circ$  omogućava zakretanje reznog alata u pokretnoj XY ravni. Druga osa glodačke glave omogućava zakretanje reznog alata u odnosu na horizontalnu osu. Svaka od ove dve ose ima sopstveni pogon. Petoosnom obradom se omogućava da osa glodala tokom obrade uvek bude normalna na površinu koja se obrađuje, čime se bitno povećava kvalitet i produktivnost obrađenih površina. Ovo eliminiše potrebu za njihovim ručnim poliranjem, što je obavezno kod 2.5 osne obrade.

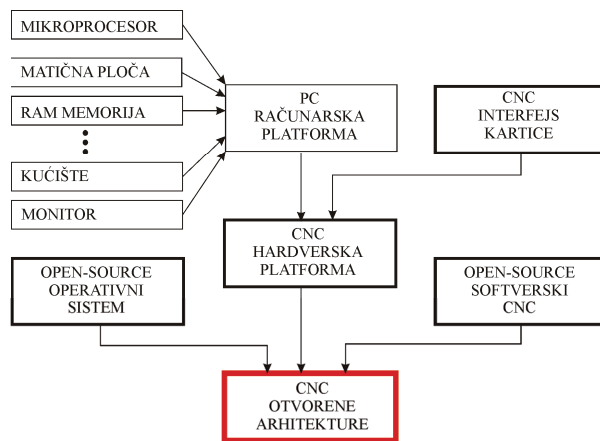
Na mašini ne postoji kretanje po Y osi, po vodičama, kakvo postoji kod klasične portalne glodalice. Da bi se ostvarilo kretanje po Y osi, bazni koordinatni sistem mašine mora biti vezan za obrtni sto, slika 3. Za ostvarivanje kretanja po X i Y osi moraju, po zakonu inverzne kinematika, da se složeno kretanje svih osa mašine alatke [7].



Slika 3. Koncepcija petoosnog strugarskog obradnog centra sa koordinatnim osama mašine

### 4. KONCEPT OTVORENE ARHITEKTURE UPRAVLJANJA

Do pre desetak godina CNC kao specijalizovan računarski sistem je bio neprikosnoven industrijski računar za upravljanje mašinama alatkama. Otvorena PC arhitektura dizajnirana za industrijske aplikacije polako i vrlo temeljno potiskuje specijalizovane CNC sisteme sa tržišta. Iako se veliki proizvođači CNC sistema bore da održe korak i ulažu velika sredstva u razvoj, arhitektura i performanse, a posebno cena, prosečnog industrijskog PC-a nema konkurencij. To je razlog što se sve više ljudi u svetu okreće razvoju softverski orijentisanih CNC sistema, za šta se kao osnova koristi PC platforma i Linux operativni sistem sa *real-time* ekstenzijom. Dakle, PC kao osnova, odgovarajuće PC interfejs kartice, softverski orijentisani CNC i *real-time* operativni sistem, čine četiri glavne celine upravljačke jedinice otvorene arhitekture (OAC - Open architecture control), slika 4.

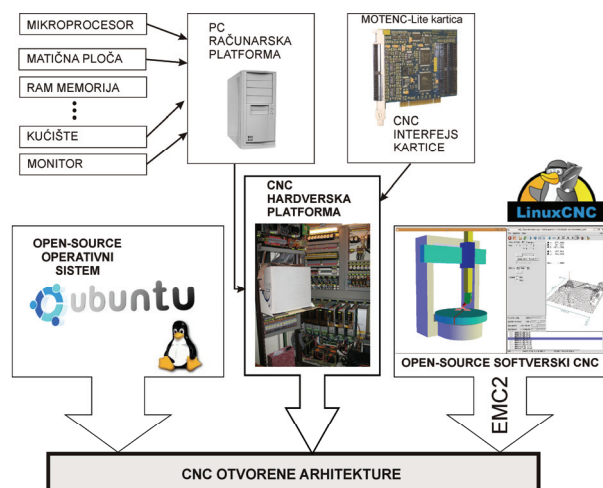


Slika 4. Koncept CNC-a otvorene arhitekture na PC računarskoj platformi

## 5. REALIZACIJA UPRAVLJANJA NA PRIMERU PETOOSNOG VERTIKALNOG STRUGARSKOG OBRADNOG CENTRA

Za realizaciju upravljačke jedinice za upravljanje višeosnom mašinom neophodno je obezbediti stabilnu hardversku platformu, *real-time* operativni sistem i upravljački softver otvorene arhitekture sa odgovarajućim performansama. Kao hardverska platforma, u našem slučaju je izabrana PC računarska platforma, kompatibilna sa odgovarajućim operativnim sistemom za rad u realnom vremenu. Pri tome je od posebnog značaja cena koja je i nekoliko puta niža od komercijalno raspoloživih CNC hardverskih platformi. Kao vrlo pouzdan i široko rasprostranjen, Ubuntu *real-time* Linux je pronašao svoje mesto u našem razvojnom projektu. Ovaj operativni sistem u potpunosti zadovoljava kriterijume izbora koji se odnose na vremenski kritične procese softverskog CNC. Period izvršavanja servo petlje od 1ms i generisanje novog interpolacionog segmenta putanje na svakih 5ms, kao i pravovremeno izvršavanje ne manje važnih procesa nižeg prioriteta uz paralelan komforan rad korisnika sa drugim manje zahtevnim aplikacijama su glavni kriterijumi koji se uzimaju u obzir prilikom izgradnje CNC hardverske platforme i izbor operativnog sistema, slika 5.

Da bi koncepcija upravljačke jedinice bila upotpunjena, u PC računarsku platformu je neophodno uključiti odgovarajuće CNC interfejs kartice. PCI interfejs ka matičnoj ploči računara je bio jedan od glavnih kriterijuma za izbor MOTENC Lite kartica. Dve ovakve kartice, koje su pridodate osnovnoj računarskoj platformi imaju ukupno osam analognih izlaza za vezu sa frekvencijskim regulatorima i osam kvadraturnih digitalnih ulaza za vezu sa optičkim mernim sistemima. Tu je i mnoštvo digitalnih ulaza i izlaza za vezu sa sensorima i mikro-prekidačima sa mašine. Ovo je više nego dovoljno za upravljanje pogonom pet osa pomoćnog kretanja mašine i pogonom vretena glavnog kretanja.



Slika 5. Struktura razvijene koncepcije CNC otvorene arhitekture na PC računarskoj platformi

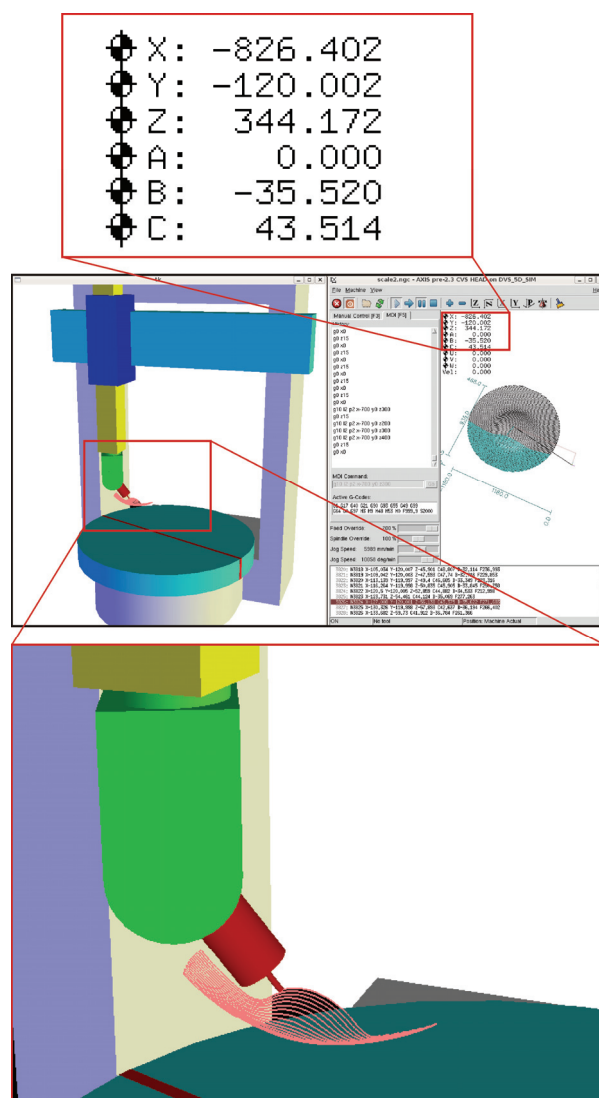
Softverski orijentisan PLC je još jedan od segmenata u sastavu EMC2 softverskog sistema. Svi moderni CNC upravljački sistemi imaju u sebi integrisan programabilni logički kontroler. Softverski PLC se izvršava na istoj hardverskoj platformi kao i softverski orijentisan CNC. To je u osnovi program koji se izvršava paralelno, konkurentno sa ostalim softverskim komponentama sistema na istoj hardverskoj platformi. PLC daje dodatne mogućnosti za proširenje funkcionalnosti mašine alatke, kao što je dodatak automatskog izmenjivača alata i dr.

Fleksibilan korisnički interfejs je jedna od najvažnijih komponenti softverskog CNC-a. Predstavljani AXIS korisnički interfejs [6], slika 6, je intuitivan a opet dovoljno kompleksan i transparentan, da korisniku sistema učini jednostavnim upravljanje i programiranje mašine alatke.

## 6. PROGRAMIRANJE

Programiranje petoosnog strugarskog obradnog centra se ostvaruje kao za petoosnu vertikalnu glodalicu koncepcije XYZBC, pri čemu se navike programera petoosne obrade ne menjaju.

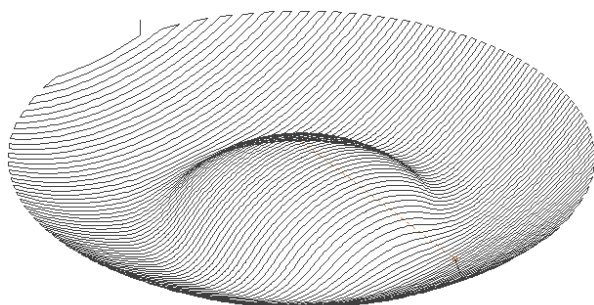
Prve probe sa simulacijom obrade na virtuelnom modelu su realizovane programiranjem u Pro/Engineer okruženju. Za dobijanje G koda konfigurisan je i odgovarajući postprocesor. Testiranje je ostvareno na virtuelnoj mašini strugarskog obradnog centra, realizovanoj u *Python* programskom jeziku, koja je integrisana sa AXIS korisničkim interfejsom. Na slici 6. je pokazana petoosna obrada složene površine u virtuelnom okruženju. Simulirana putanja vrha alata za površinu koja se obrađuje pokazana je na slici 7.



Slika 6. Petoosni strugarski obradni centar kao virtuelna mašina integrisana sa okruženjem AXIS

Prilikom postavljanja radnog predmeta u radni prostor mašine ove konfiguracije, potrebno je posebnu pažnju obratiti na delove radnog prostora u kojima se mašina može naći u singularnim pozicijama. U slučaju da je radni predmet

postavljen u blizini centra obrtnog stola, vrlo je verovatno da će, pri obradi, sto premašiti maksimalno dozvoljenu ugaonu brzinu, pri čemu dolazi do aktiviranja sigurnosnih sistema. Prevazilaženje ovog problema kao i ostalih problema sa singularnim pozicijama mašine, su predmet narednih istraživanja.



Slika 7. Simulirana putanja alata za obradu na virtuelnom petoosnom strugarskom obradnom centru

## 7. ZAKLJUČAK

Sa napretkom PC tehnologije, hardverske i softverske, softverski orijentisani CNC postaje značajna konkurencija komercijalno raspoloživim CNC sistemima. U ovom radu je predstavljena realizacija softverski orijentisanog CNC-a za upravljanje mašinom alatkom sa netrivialnom kinematikom. Zahvaljujući transparentnosti softverskog i hardverskog sistema, predstavljena upravljačka jedinica može se iskoristiti za upravljanje velikog broja mašina alatki, serijskih i paralelnih, industrijskih robota, ali i stonih mini mašina sa koračnim pogonima.

Deo ovih rezultata se već koristi u edukacione svrhe na Mašinskom fakultetu u Beogradu, u okviru laboratorijskih vežbi predmeta Mašine alatke i roboti nove generacije.

## 8. IZJAVA ZAHVALNOSTI

Ovaj rad je nastao u okviru istraživanja na projektu „Istraživanje i razvoj nove generacije vertikalnih petoosnih strugarskih obradnih centara” koji je podržan od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Vlade Republike Srbije.

## 9. LITERATURA

- [1] G. Pritschow, Y. Altintas and F. Jovane *et al.*, Open Controller Architecture - Past, Present and Future, *Annals of the CIRP* 50/2 (2001), pp. 463–470
- [2] Sungsik Park, Sun-Ho Kim, Hyunbo Cho, Kernel software for efficiently building, re-configuring, and distributing an open CNC controller, *Int J Adv Manuf Technol* Vol 27, pp 788-796, 2006.
- [3] Ji H, Li Y, Wang J.: A software oriented CNC system based on Linux/RTLinux, *Int J Adv Manuf Technol* Vol 39, pp 291-301, 2008.
- [4] EMC - Enhanced Machine controller web site - [www.linuxcnc.org](http://www.linuxcnc.org)
- [5] NIST - National Institute of Standards and Technology web site - [www.nist.gov](http://www.nist.gov)
- [6] AXIS: A User Interface for EMC2, 5-axis machining with EMC, <http://axis.unpythonic.net/>, 2008.
- [7] Kvrđić, V., Dimić, Z., Trgovčević, S., Razvoj 5-osnog vertikalnog strugarskog obradnog centra, 9. Međunarodna konferencija o dostignućima

elektrotehnike, mašinstva i informatike DEMI2009, Mašinski fakultet, Banjaluka, u štampi, 2009.

- [8] Dimić, Z., Živanović, S., Kvrđić, V., Konfigurisanje EMC2 za programiranje i simulaciju višeosnih mašina alatki u Python virtuelnom grafičkom okruženju, XXXII Savetovanje proizvodnog mašinstva sa međunarodnim učešćem, Zbornik radova ISBN 978-86-7892-131-5, str.353-356, FTN Departman za proizvodno mašinstvo, Novi Sad, 2008.
- [9] Dimić, Z., Živanović, S., Kvrđić, V., Koncept razvoja CNC upravljanja za mašine alatke specifične konfiguracije na bazi EMC softvera, 34. JUPITER konferencija, 30. simpozijum NU-Roboti-FTS, Zbornik radova, ISBN 978-86-7083-628-0, str.3.19-3.26, Mašinski fakultet, Beograd, jun 2008.
- [10] Milutinovic, D., Glavonjic, M., Zivanovic, S., Dimic, Z., Kvrđić, V., Mini educational 3-axis parallel kinematic milling machine, Proceedings of 3<sup>rd</sup> International Conference on Manufacturing Engineering IC MEN and EUREKA Brokerage Event, pp.463-474, Kallithea of Chalkidiki, Greece, 1-3 october, 2008.
- [11] Glavonjić, M., Milutinović, D., Živanović, S., Dimić, Z., Konfiguracija jedne hibridne petoosne mašine, 33. JUPITER konferencija, 29. simpozijum NU-Roboti-FTS, ISBN 978-86-7083-592-4, str.3.19-3.6, Mašinski fakultet, Beograd-Zlatibor, maj 2007.
- [12] Milutinović, D., Glavonjić, M., Živanović, S., Dimić, Z., Multifunkcionalni rekonfigurabilni obradni sistem na bazi robota, XXXII Savetovanje proizvodnog mašinstva sa međunarodnim učešćem, Zbornik radova ISBN 978-86-7892-131-5, str. 369-372, FTN Departman za proizvodno mašinstvo, Novi Sad, 2008.

*Autori: Zoran Dimić, dipl. inž. el, Dr Vladimir Kvrđić, dipl. inž. maš, Aleksa Krošnjar, dipl. inž. el, Lola institut d.o.o, Kneza Višeslava 70a, 11030 Beograd, Srbija, Tel.: +381 11 2542-510, Fax: +381 11 2544-096, Mr Saša Živanović, dipl. inž. maš, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno mašinstvo, Kraljice Marije 16, 11000 Beograd, Srbija, Tel.: +381 11 3302-271, Fax: +381 11 3370-364.*

E-mail: [dimic@lola-ins.co.rs](mailto:dimic@lola-ins.co.rs)  
[kvrgic@lola-ins.co.rs](mailto:kvrgic@lola-ins.co.rs)  
[akrosnjara@lola-ins.co.rs](mailto:akrosnjara@lola-ins.co.rs)  
[szivanovic@mas.bg.ac.rs](mailto:szivanovic@mas.bg.ac.rs)



Jurković, Z., Brezočnik, M., Sekulić, M.

## MODELIRANJE PROCESA OBRADE REZANJEM PRIMENOM GENETSKIH ALGORITAMA

**Rezime:** Definisane pouzdane matematičke modele preko je potrebno za određivanje parametara obradnog procesa, optimizaciju i simulaciju, a u cilju što veće stabilnosti procesa. Razvoj matematičkih modela za određene postupke i procese obrade jedan je od bitnih osnova, posebno kod modernih i inteligentnih obradnih sistema, za primenu savremenih računarskih sistema (CAD, CAPP, CAM).

U radu je prikazan princip modeliranja sila rezanja pri uzdužnom grubom i finom struganju primenom genetskih algoritama (GA). Dobijeni rezultati pokazuju visok stepen adekvatnosti i pouzdanosti predloženih modela zasnovanih na evolutivnim algoritmima.

**Ključne reči:** modeliranje, struganje, genetski algoritam

## MODELING OF CUTTING PROCESS BY GENETIC ALGORITHMS

**Abstract:** Definition of reliable mathematical models over the need for the determination of parameters machining process, optimization and simulation, in order that greater stability of the process. Development of mathematical models for certain procedures and processes of one of the essential basis, especially in modern and intelligent machining system for the application of modern computer systems (CAD, CAPP, CAM).

The paper presents the principle of cutting force modeling in longitudinal rough and fine turning the application of genetic algorithms (GA). The derived results show a high degree of adequacy and reliability of the proposed models based on evolutionary algorithms.

**Key words:** modeling, turning, genetic algorithm

### 1. UVOD

Moderna proizvodnja danas nemoguće je zamisliti bez stalne težnje za poboljšanjem produktivnosti, fleksibilnosti i kvalitete, te za smanjenjem cijene proizvoda u uvjetima globalne konkurentnosti. Uvođenje umjetne inteligencije u planiranje i upravljanje proizvodnih procesa, bez izravne intervencije čovjeka s ciljem postizanja optimalnih tehnološko-ekonomskih rezultata našlo je svoju konkretnu primjenu u različitim vidovima obradnih procesa kao što su: obrada odvajanjem čestica, obrada deformiranjem, injekcijsko prešanje, lijevanje, brza izrada proizvoda itd.

U ovom se radu želi pokazati primjena genetskog algoritma u uvjetima grube obrade tokarenjem, kao najraširenijeg procesa obrade odvajanjem čestica i time najreprezentativnijeg. Stalna je i neiscrpna težnja da se procesi obrade unaprijede primjenom znanja iz naprednih tehnika modeliranja i simulacije, a u novije doba i umjetne inteligencije kako bi se dobili dovoljno pouzdani modeli, potrebni za analizu, upravljanje i izbor optimalnih parametara obrade čemu teži i ovaj rad. Dobiveni matematički modeli koji predstavljaju sliku složenih odnosa između ulaznih i izlaznih parametara procesa tokarenja mogu se s dovoljnom točnošću iskoristiti u adaptivnom vođenju i nadgledanju procesa i donošenju rješenja u realnom vremenu što je od velike važnosti u eksploataciji IMS (*Intelligent Manufacturing Systems*).

Cilj istraživanja je dobiti dovoljno pouzdane matematičke modele za glavnu silu tokarenja  $F_c$ , hrapavost obrađene površine  $R_a$  i vijek alata  $T$  za unaprijed definirano istrošenje stražnje površine alata  $VB$  u ovisnosti o parametrima obrade: brzini rezanja  $v_c$ , posmaku  $f$  i dubini rezanja  $a_p$ .

### 2. MODELIRANJE PROCESA OBRADE

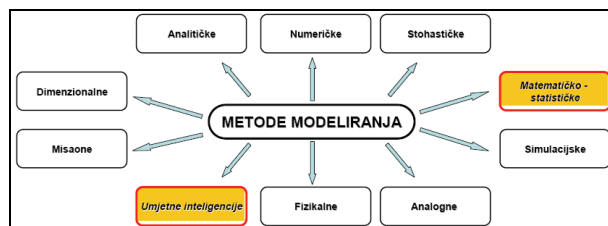
Definiranje pouzdanih matematičkih modela prijeko je potrebno za određivanje parametara obradnog procesa, optimizaciju i simulaciju, te prognoziranje stanja procesa i sustava u fazi projektiranja tehnološkog procesa i kasnijeg njegova upravljanja, a u cilju što veće stabilnosti procesa. Izgradnja matematičkih modela za određene postupke i procese obrade jedna je od bitnih podloga, poglavito kod modernih i inteligentnih obradnih sustava, za implementaciju savremenih računalnih sustava (CAD – *Computer Aided Design*, CAPP – *Computer Aided Process Planning*, CAM – *Computer Aided Manufacturing*).

Rezultati procesa modeliranja su modeli koji mogu biti analitički, stohastički, numerički, grafički, statistički i drugi. Znači, modeliranje predstavlja opis zakona promjene parametara procesa u određenom trenutku i prostoru imajući u vidu definirani skup ulaznih parametara, njihove međusobne interakcije kao i početne uvjete. Tako dobiveni modeli koji na matematički način definiraju odnos ulazno-izlaznih parametara procesa nazivaju se matematičkim modelima. U analizi i istraživanju procesa i sustava mogu biti primijenjene neke od sljedećih metoda modeliranja: analitičke, numeričke, matematičko-statističke, stohastičke, simulacijske, dimenzionalne, fizikalne, misaone, analogne kao i metode temeljene na umjetnoj inteligenciji, ali i druge, slika 1.

Modeliranje zahtijeva dobro poznavanje svih utjecajnih parametara procesa i njihovih međudjelovanja kao i odgovarajućih tehnika modeliranja. Razvoj računalne tehnike omogućio je novi pristup rješavanju problema modeliranja, simulacije i optimizacije. U radu se primjenjuje metoda



evolucijskih algoritama ( genetski algoritam) koji su svoju primjenu našli ne samo u modeliranju i optimizaciji procesa rezanja nego i u procesima planiranja, transportnim problemima, montaži, itd.



Slika 1. Klasifikacija metoda modeliranja

## 2.1 Evolucijski algoritmi

U čovjeka je oduvijek postojala potreba za definiranjem prirode oko sebe kroz odgovarajuće modele. Pritom se upravo primjena matematičkog aparata pokazala učinkovitom tijekom dužega razdoblja ljudskog stvaranja. Kako takav način modeliranja u sebi nosi i određene vidove ograničenja, idealizacija i pojednostavljenja, nije bilo moguće uvijek definirati probleme na zadovoljavajući način. U drugoj polovici XX. stoljeća stvorila se ideja o novom pristupu rješavanju takvih problema temeljem promatranja pojava u prirodi i izučavanja njihovih mehanizama funkcioniranja. Imitacija prirodnih principa matematičkim putem omogućila bi rješavanje različitih veoma složenih procesa i pojava. Korištenjem prirodnih evolucijskih mehanizama u definiranju i rješavanju problema otvoren je put razvoju novih metoda temeljenih na evolucijskim algoritmima. Pod evolucijskim se algoritmima podrazumijeva skupina algoritama definiranih na evolucijskim principima uz korištenje operatora koji oponašaju prirodne genetske principe. Evolucijske tehnike izračunavanja mogu se podijeliti na sljedeći način: genetski algoritmi (GA), genetsko programiranje (GP), evolucijske strategije i evolucijsko programiranje. Takvi algoritmi omogućavaju modeliranje i optimizaciju različitih veoma kompleksnih funkcija u višedimenzionalnom prostoru.

## 2.2 Genetski algoritam (GA)

Iako je teorijsku postavku genetskih algoritama, odnosno primjenu oponašanja prirodnoga evolucijskog procesa iznio još u ranim sedamdesetim godinama prošlog stoljeća Holland [1], ona je tek u posljednjem desetljeću našla svoju općeprihvaćenu primjenu. Kao heuristička metoda optimiranja genetski algoritam temelji se na Darwinovu konceptu prirodne genetike i selekcije, tj. težnji za preživljavanjem vrste iz generacije u generaciju što sa sobom donosi nove jedinke, sposobnije, otpornije i prilagodljivije od prethodnih. Kako je evolucija robustan proces pretraživanja mogućeg prostora rješenja, taj je prirodni mehanizam iskorišten u cilju pronalaska optimalnog rješenja višemodalnih funkcija. Ta analogija između evolucije kao prirodnoga procesa i genetskog algoritma kao metode optimiranja očituje se u procesu selekcije i genetskim operatorima. Mehanizam odabira nad nekom vrstom živih bića u evolucijskom procesu čine okolina i uvjeti u prirodi. U genetskim algoritmima ključ selekcije je funkcija cilja, koja na odgovarajući način predstavlja problem koji se rješava. Slično kao što su okolina i uvjeti u prirodi ključ selekcije nad nekom vrstom živih bića, tako je i funkcija cilja ključ selekcije nad populacijom rješenja u genetskom algoritmu. Naime, u prirodi jedinka koja je najbolje prilagođena uvjetima i okolini u kojoj živi ima najveću vjerojatnost preživljavanja i parenja, a time i prenošenja svojega genetskog materijala na potomke. Za genetski algoritam jedino rješenje je jedna jedinka. Selekcijom se odabiru dobre jedinke koje se prenose u sljedeću populaciju, a manipulacijom genetskog materijala stvaraju se nove jedinke.

Takav ciklus selekcije, reprodukcije i manipulacije genetskim materijalom jedinki ponavlja se sve dok nije zadovoljen uvjet zaustavljanja evolucijskog procesa.

Jednostavni genetski algoritam, čija je struktura dana na slici 2., prikazuje primjenu triju glavnih operatora: reprodukcije (selekcije), križanja i mutacije.

```

Genetski_algoritam
{
  t = 0
  generiraj početnu populaciju potencijalnih rješenja P(0);
  sve dok nije zadovoljen uvjet završetka evolucijskog procesa
  {
    t = t + 1;
    selektiraj P'(t) iz P(t-1);
    križaj jedinke iz P'(t) i djecu spremi u P(t);
    mutiraj jedinke iz P(t);
  }
  ispiši rješenje;
}

```

Slika 2. Struktura genetskog algoritma

Svaki evolucijski program održava populaciju jedinki u nekoj određenoj generaciji. Svaka jedinka predstavlja potencijalno rješenje problema koji se obrađuje; to može biti matematička funkcija, plan rada neke tvornice, put trgovačkog putnika i sl. Svaka je jedinka predstavljena jednakom podatkovnom strukturom (broj, niz, matrica, stablo, itd.). Te se jedinke nazivaju kromosomi. Prednosti genetskog algoritma u optimizaciji koeficijenata prethodno definiranih oblika modela mogu se iskoristiti za dobivanje matematičkih modela polinomske i eksponencijalne oblika, tj odgovarajućih koeficijenata modela prema eksperimentalnim rezultatima plana. Opći eksperimentalni i teorijski modeli (polinomske i eksponencijalne) izlaznih parametara procesa obrade korištenih ujedno i kao funkcije dobrote u procesu određivanja koeficijenata modela primjenom GA, imaju polazne oblike opisane u nastavku.

## 3. EKSPERIMENTALNO ISTRAŽIVANJE

Temeljem teorijskog razmatranja i praktičnog iskustva o problemu modeliranja pristupilo se izradi planova eksperimenata za proces uzdužnog tokarenja pri gruboj obradi. Rezultati mjerenja dobiveni ovim planovima koriste će se u svrhu definiranja modela dobivenih primjenom evolucijskih algoritama.

Za istraživani postupak obrade tokarenjem primijenjen je centralni kompozicijski plan eksperimenta utemeljen na matematičkoj teoriji eksperimenta s trima neovisno promjenjivim parametrima, gdje je potreban broj eksperimenata:  $N=2^k+n_0+n_c=2^3+6+6=20$ . Koordinata  $\alpha$  izračunata je iz izraza:  $\alpha = (2^k)^{1/4}$ .

Eksperimentalni je dio rada izveden u laboratorijima Inštituta za proizvodno strojništvo: Laboratoriju za odrezovanje i Laboratoriju za inteligentne obdelovalne sisteme, Fakulteta za strojništvo Univerza v Mariboru. Cilj je istraživanja bio dobiti rezultate mjerenja koji će omogućiti definiranje modela za tri izlazna parametra procesa uzdužnog tokarenja: opterećenje alata definirano preko glavne sile rezanja, mikrageometrija obrađene površine, iskazana kroz površinsku hrapavost i postojanost alata definirana istrošenjem oštrice noža.

### 3.1 Uvjeti izvođenja eksperimenta

Eksperimentalni podaci dobiveni su pomoću odgovarajuće mjerne opreme bez uporabe sredstava za hlađenje i podmazivanje. Također, tijekom cijeloga eksperimenta pored stroja i materijala obratka konstantan je parametar bila i geometrija oštrice alata.

Svi su eksperimenti izvedeni na NC tokarilici "Georg Fisher NDM-16". Korišten je tokarski nož proizvođača SPK oznake DDJNL 3225P15 s izmjenjivim pločicama negativne geometrije proizvođača Sandvik Coromant oznake DNMG 150608-PM4025 i prevlakom u tri sloja postupkom CVD.

Sloj Ti(C, N) koji ide na supstrat je kombinacija visoke otpornosti na trošenje i dobre zaštitne rezne oštrice, deblji srednji sloj je Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, a gornji tanji sloj je TiN (žute boje). Usvojeni kriterij istrošenja stražnje površine pločice je VB = 0,25 mm. Vrijednosti parametara obrade za definiranu pločicu koje je preporučio proizvođač su:

$$v_c = 265 - 405 = 330 \text{ m/min,}$$

$$f = 0,15 - 0,50 = 0,30 \text{ mm/okr.,}$$

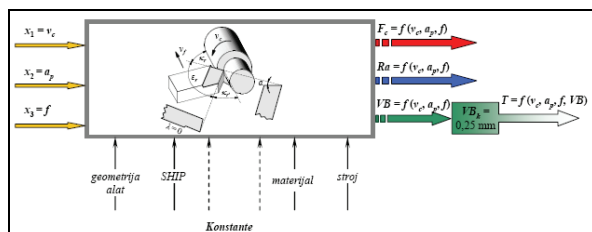
$$a_p = 0,50 - 6,00 = 3,00 \text{ mm.}$$

Materijal obratka je opći konstrukcijski čelik, s oznakom Ck45 (DIN), AISI 1045, C45E (EN 10083/1996.) tj. Č1531 (HRN), dobiven toplim valjanjem. Čelična šipka je nakon toga toplinski obrađena normalizacijskim žarenjem. Od mjerne opreme, a radi prikupljanja podataka postavljenih kao izlazne veličine procesa, korišteni su: dinamometar, uređaj za mjerenje hrapavosti površine, alatni mikroskop i štoperica.

Za mjerenje sila pri tokarenju korišten je mjerni lanac koji se sastojao od dinamometra KISTLER 9257A za mjerno područje  $F_{x,y,z} = 5 \text{ kN}$  povezanog s 3-kanalnim pojačivačem KLAG SWISS 5001, koji je dalje slao signal, s jedne strane na analogni pokazivač KLAG SWISS 5511 (kontrola) i s druge strane, preko akvizicijske kartice i LabVIEW<sup>®</sup> softvera za prikupljanje, snimanje i obradu dobivenih mjernih rezultata u digitalnom obliku, na monitor računala. Snimanje vrijednosti sila dobiveno je na temelju 20 mjerenja/s ili 1200 mjerenja/min.

### 3.2 Eksperimentalni rezultati

Izlazne vrijednosti eksperimenta su: glavna sila rezanja ( $F_c$ ), srednje aritmetičko odstupanje profila ( $R_a$ ) i srednje vrijednosti širine pojasa istrošenja oštrice na stražnjoj površini ( $VB$ ), a s ciljem definiranja postojanosti alata ( $T$ ) kao treće izlazne veličine (slika 3). Prve dvije izlazne veličine mjerene dobivene su izravno, dok je treća veličina, postojanost alata, dobivena neizravno preko vrijednosti referentnog istrošenja ( $VB_k = 0,25 \text{ mm}$ ). Tijekom eksperimenta dobivene su i vrijednosti sile prodiranja i posmične sile kao i vrijednosti ostalih parametara hrapavosti površine.



Slika 3. Shema ulazno-izlaznih parametara za obradu tokarenjem

U tabeli 1. su prikazani dobijeni rezultati pri gruboj obradi tokarenjem.

Eksperiment №	ULAZNI PARAMETRI			EKSPERIMENTALNI REZULTATI		
	$v_c$ (m/min)	$f$ (mm/okr.)	$a_p$ (mm)	$F_c$ (N)	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$T$ (min)
1	300	0,3	1,5	879,224	4,30	17,60
2	400	0,3	1,5	894,327	3,88	4,73
3	300	0,5	1,5	1436,299	11,11	6,68
4	400	0,5	1,5	1408,114	11,48	1,88
5	300	0,3	3,0	1754,215	4,21	13,86
6	400	0,3	3,0	1726,937	4,50	3,80
7	300	0,5	3,0	2896,122	14,29	4,10
8	400	0,5	3,0	2860,663	13,71	1,16
9	350	0,4	2,25	1677,149	8,10	5,38
10	350	0,4	2,25	1672,771	8,13	5,10
11	350	0,4	2,25	1679,359	8,12	5,44
12	350	0,4	2,25	1678,825	8,12	5,28
13	350	0,4	2,25	1675,829	8,11	5,50
14	350	0,4	2,25	1678,223	8,10	5,22
15	266	0,4	2,25	1697,504	7,82	12,95
16	434	0,4	2,25	1683,361	8,15	1,81
17	350	0,23	2,25	1002,763	2,46	10,52
18	350	0,57	2,25	2609,254	17,95	0,75
19	350	0,4	1,0	765,921	6,36	6,65
20	350	0,4	3,5	2746,389	9,07	3,58

Tabela 1. Eksperimentalni rezultati za grubu obradu tokarenjem

Prvih 8 eksperimenata (istaknutih u tabeli 1) izdvojeno će se koristiti kod modeliranja izlaznih parametara u polinomskom obliku prvog reda. Izlazne vrijednosti mjerenih veličina dane u tablici 1. predstavljaju srednje vrijednosti više mjerenja (3 - 5), čime je smanjena mogućnost odstupanja izmjerenih od stvarnih vrijednosti.

### 4. DOBIJENI MATEMATIČKI MODELI PRIMENOM GA

Polazni oblici polinomskih modela za primjenu u procesu modeliranja pomoću GA su sledeći:

$$F_c = C_1 + b_1 v_c + b_2 f + b_3 a_p + b_{12} v_c f + b_{13} v_c a_p + b_{23} f a_p + b_{123} v_c f a_p + b_{11} v_c^2 + b_{22} f^2 + b_{33} a_p^2 \quad (1)$$

$$R_a = C_2 + b_1 v_c + b_2 f + b_3 a_p + b_{12} v_c f + b_{13} v_c a_p + b_{23} f a_p + b_{123} v_c f a_p + b_{11} v_c^2 + b_{22} f^2 + b_{33} a_p^2 \quad (2)$$

$$T = C_3 + b_1 v_c + b_2 f + b_3 a_p + b_{12} v_c f + b_{13} v_c a_p + b_{23} f a_p + b_{123} v_c f a_p + b_{11} v_c^2 + b_{22} f^2 + b_{33} a_p^2 \quad (3)$$

Polazni oblici eksponencijalnih modela korištenih u modeliranju pomoću GA su sledeći:

$$F_c = C_4 v_c^{\alpha_1} f^{\beta_1} a_p^{\gamma_1} \quad (4)$$

$$R_a = C_5 v_c^{\alpha_2} f^{\beta_2} a_p^{\gamma_2} \quad (5)$$

$$T = C_6 v_c^{\alpha_3} f^{\beta_3} a_p^{\gamma_3} \quad (6)$$

Modeli su dobiveni za sljedeće vrijednosti evolucijskih parametara: broj generacija  $G = 300$ , populacija  $M = 5000$ , vjerojatnost križanja  $p_c = 0,8$  (u dvije točke) i mutacije  $p_m = 0,01$  kao i veličina turnirske selekcije  $S = 10$ , broj jedinki koji se bez mijenjanja prebacuje u drugu generaciju (elitizam)  $E_l = 250$ . Granice pretraživanja koeficijenata modela ovise o vrsti modela. Tako su za eksponencijalni model glavne sile rezanja granice: donja [-3000, -10, -10, -10] i gornja [3000, 10, 10, 10]. Za ostala dva parametra, hrapavost obrađene površine i postojanost alata, granice su: donja [-100, -10, -10, -10] i gornja [100, 10, 10, 10]. Za polinomске modele situacija je kompliciranija jer ima 11 koeficijenata koje treba naći. Stoga se granice postavljaju najprije široko: donja [-2000, -2000, -2000, -2000, -2000, -2000, -2000, -2000, -2000, -2000] i gornja [2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000, 2000]. a zatim ovisno o rezultatima pretraživanja prostora te se granice mogu mijenjati i time sužavati prostor pretrage, pa time i skratiti vrijeme dolaska do najboljeg rezultata za navedene evolucijske parametre. Funkcija cilja ili dobrane definirana je za svaki model posebno, a kosturi takvih funkcija pripremljeni su u Matlab<sup>®</sup> programu.

```

1 function yy = calculateExponentialValueF_x15fina(x)
2     n = numel('C1:15 disk\Toran\Boktoraka\GA-modelliranje\Fina_15\calculateExponentialValueF_x15fina.m');
3     deviation = 0;
4     for i=1:15
5         tmpvalue = calculateExponentialVal(m(i,1),m(i,2),m(i,3),x(1),x(2),x(3),x(4));
6         deviation = deviation + abs((m(i,4) - tmpvalue)/m(i,4));
7     end
8     yy = deviation/15;
9 end
10 function Fx = calculateExponentialVal(v,f,a,c,alpha,beta,gamma)
11     Fx = C*(v^alpha)*(f^beta)*(a^gamma);
12 end

```

Slika 4. Prikaz funkcije cilja-dobrote

U nastavku su dati dobiveni GA modeli za grubu obradu.

a) Glavna sila rezanja-polinomski model  

$$F_{cg} = 460,540579 + 0,899172v_c - 1674,36665f + 23,894864a_p - 5,739166v_c f - 0,996769v_c a_p + 1391,784113fa_p + 2,387642v_c fa_p + 0,00199208v_c^2 + 3773,274349f^2 + 50,188729a_p^2$$
 Srednja pogreška modela je 0,829%.

b) Glavna sila rezanja-eksponencijalni model

$$F_{cg} = 2590,22324v_c^{-0,0544773} f^{0,981452} a_p^{1,0036719} \quad (8)$$

Srednja pogreška modela je 1,484%.

c) Srednje aritmetičko odstupanje profila-polinomski model

$$R_{ag} = 17,003982 - 0,03211555v_c - 55,741557f - 6,904a_p + 0,0943f + 0,0156933v_c a_p + 21,86fa_p - 0,036533v_c a_p - 0,000010677v_c^2 + 56,439446f^2 - 0,2528a_p^2$$

Srednja pogreška modela je 0,817%.

d) Srednje aritmetičko odstupanje profila-eksponenc. model

$$R_{ag} = 37,355654v_c^{0,0311988} f^{2,1316559} a_p^{0,2833288} \quad (10)$$

Srednja pogreška modela je 2,934%.

e) Postojanost alata-polinomski model

$$T_g = 187,944577 - 0,5871317v_c - 237,66354f - 19,3717955a_p + 0,5024517v_c f + 0,0453839v_c a_p + 27,087135fa_p - 0,0659678v_c a_p + 0,000384722v_c^2 + 26,72845f^2 + 0,0862729a_p^2$$

Srednja pogreška modela je 2,43%.

f) Postojanost alata-eksponencijalni model

$$T_g = e^{25,586213} v_c^{-4,3522965} f^{-1,9686606} a_p^{-0,6510444} \quad (12)$$

Srednja pogreška eksponencijalnog modela je 18,55%

## 5. ANALIZA DOBIVENIH REZULTATA

Kako bi se ispitala pouzdanost dobivenih modela uporabom genetskih algoritama, a temeljenih na eksperimentalnim istraživanjima procesa obrade uzdužnog tokarenja za grubu obradu, izvršena je provjera adekvatnosti matematičkih modela polinomskog i eksponencijalnog oblika kao i verifikacija predloženog pristupa za identifikaciju utjecajnih parametara procesa iz domene obrade odvajanjem čestica. Temeljem navedenog izvedeni su dodatni eksperimenti, njih 26 za sva tri izlazna parametra obrade. Usporedbom dobivenih modela, temeljenih na manjem eksperimentu (tablica 1.) i njihovom provjerom na znatno većem, pokazan je visoki stupanj adekvatnosti i pouzdanosti predloženog pristupa unutar eksperimentalne domene za grubu obradu. Rezultati dobivenih odstupanja pokazali su visok stupanj točnosti polinomskih modela (tablica 2.), sva tri izlazna parametra procesa obrade. Modeli dobiveni za grubu obradu tokarenjem potvrdili su svoju učinkovitost i kod dodatnog plana eksperimenta što potvrđuje relativno odstupanje (pogreška) koje se prostire unutar područja od 1,503% za glavnu silu rezanja kod GA pristupa, do 14,124% za postojanost alata definiranog eksponencijalnim modelom pomoću GA algoritma.

DOBIVENI MODELI		GRUBA OBRADA (%)		
		F <sub>c</sub>	R <sub>a</sub>	T
GA polinomski	F <sub>c</sub> (j-na 7)	1,503		
	R <sub>a</sub> (j-na 9)		3,18	
	T (j-na 11)			5,145
GA eksponencijalni	F <sub>c</sub> (j-na 8)	1,987		
	R <sub>a</sub> (j-na 10)		3,599	
	T (j-na 12)			14,124

Tabela 2. Odstupanja dobivenih modela od svih eksperimentalnih vrijednosti

## 6. ZAKLJUČAK

Modeliranjem istraživanog procesa na temelju originalnih eksperimentalnih rezultata i genetskog algoritma, dobiveni su originalni matematički modeli izlaznih parametara procesa uzdužnog tokarenja. Rezultati dobiveni na temelju definiranih modela mogu se sažeti kako slijedi: visok stupanj adekvatnosti i pouzdanosti modela izražen je preko koeficijena determinacije od  $R^2 = 0,95$  do  $R^2 = 0,99$  kako za polinomski tako i za eksponencijalne modele; usporedba rezultata dobivenih modelima s eksperimentalnim rezultatima pokazuje razliku u granicama od 1,5% do do 14,12%; adekvatnost i pouzdanost originalno dobivenih modela za F<sub>c</sub>, R<sub>a</sub> i T potvrđena je dodatno izvedenim eksperimentima (ukupno 26) koji su verificirali izvedeno modeliranje procesa u široj eksperimentalnoj domeni.

## 6. LITERATURA

- [1] Holland, J. H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Ann Arbor, MI, University of Michigan Press, 1975.
- [2] Jurković, Z., Jurković, M.: *Modeling and Simulation of the Cutting Force Using Experimental Data*, 7th International Conference TMT 2003, Barcelona, 81-84, 2003.
- [3] Jurković, Z.: *Modeliranje i optimizacija parametara obrade primjenom evolucijskih algoritama kod inteligentnih obradnih sustava*, Doktorska disertacija, Tehnički fakultet, Rijeka, 2007.
- [4] Brezočnik, M.: *Uporaba genetskoga programiranja u inteligentnih proizvodnih sistemih*, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 2000.
- [5] Milikić, D., Gostimirović, M., Sekulić, M.: *Osnove tehnologije obrade rezanjem*, FTN, Novi Sad, 2008.

**Autori:** Doc. dr Zoran Jurković, Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet, Katedra za proizvodnu opremu i robotiku, Prof. dr Miran Brezočnik, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za inteligentne obdelovalne sisteme, Doc. dr Milenko Sekulić, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Katedra za procese obrade skidanjem materijala, Trg D. Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel.: +381 21 485-2333, E-mail: [zoran.jurkovic@riteh.hr](mailto:zoran.jurkovic@riteh.hr), [mbrezocnik@uni-mb.si](mailto:mbrezocnik@uni-mb.si), [milenkos@uns.ac.rs](mailto:milenkos@uns.ac.rs)

Erić, M., Tadić, B., Mitrović, S.

## MOGUĆI PRAVCI OSTVARIVANJA REINŽENJERINGA TEHNOLOŠKIH PROCESA MALIH PREDUZEĆA

**Rezime:** Tehnološki proces izrade nekog dela treba da bude razrađen tako da omogući realizaciju postavljenih zahteva u pogledu oblika i kvaliteta, ali pored toga da je sa aspekta ekonomičnosti to i najpovoljnija varijanta. Postupak reinženjeringa u procesu projektovanja ne sme da naruši prvi zahtev, ali mora sa aspekta vremena obrade odnosno proizvodnosti i smanjenja troškova da da najbolje rešenje. Koji su to činioci i mogućnosti i na koji način je moguće procesom reinženjeringa tehnoloških procesa ostvariti drugi zahtev biće prikazano u ovom radu.

**Cljučne reči:** reinženjering, tehnološki procesi, agregatirani pribori, tehnološki nivoi, proizvodnost, troškovi obrade

## POSSIBLE DIRECTIONS OF REENGINEERING REALISATION OF TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR SMALL ENTERPRISES

**Abstract:** Technological process of manufacturing of certain part should be designed in such a way to enable realisation of requested demands from aspect of shape and quality, but also to be the most favorable solution from aspect of efficiency. Reengineering procedure must not deny the first request in scope of the design process, and needs to produce the best possible solution from aspect of processing time, that is, from aspect of productivity and costs decrease. What are the factors and in which way is possible to realise the second demand, by reengineering process, will be presented in this paper.

**Key words:** reengineering, technological processes, aggregated accessories, technological levels, productivity, processing costs

### 1. UVOD

U tehnološkim procesima koji su okvir za izradu proizvoda, uvek ima prostora za male promene i poboljšanja koja mogu doprineti skraćenju vremena izrade proizvoda, povećanju proizvodnosti, smanjenju troškova obrade itd., i prate životni ciklus proizvoda zaključno sa završetkom stabilne proizvodnje i plasmana. Drugi aspekt promena u tehnološkom procesu uslovljen je promenama na proizvodu (dizajn, kvalitet itd.), (deo krive produženog životnog veka proizvoda) koje mogu da zahtevaju promene i u postojećem tehnološkom postupku izrade. I jedan i drugi aspekt promena u tehnološkom procesu mogu da se ostvare kroz "meki" i "tvrdi" oblik reinženjeringa.

### 2. MOGUĆI PRAVCI

#### 2.1 Reinženjering kroz primenu grupnih i agregatiranih pribora

Koncept projektovanja ovih pribora razlikuje se bitno od uobičajenog pristupa u individualnom rešavanju prihvatanja i stezanja predmeta obrade u različitim operacijama nekog tehnološkog procesa. Ovaj sistem pomoćnih pribora karakteriše znatno učešće standardnih delova u odnosu na posebno konstruisane.

Uvažavajući činjenicu da se vreme potrebno za projektovanje tehnološke opreme, uključujući specijalne pomoćne pribore, pri pojedinačnoj proizvodnji penje na 50-70%, pa i više od ukupnog vremena potrebnog za pripremu proizvodnje, a da cena te opreme dostiže vrednost do 20%, a u nekim slučajevima i više, od cene alatne mašine, veoma su značajne mere koje će omogućiti intervencije u dva smera [5].

Prvi smer se odnosi na skraćenje vremena potrebnog za pripremu opreme, od postavljenog zadatka do početka proizvodnje, a drugi smer na smanjenje cene koštanja opreme.

Na ove zahteve može se sa strane pomoćnih pribora uticati na sledeća tri načina:

- primenom specijalnih pomoćnih pribora projektovanih na principu korišćenja tipiziranih standardnih elemenata,
- primenom grupnih pomoćnih pribora, i

- primenom sistema agregatnih pomoćnih pribora (modularnih fleksibilnih pribora).

Osnovna zajednička karakteristika sva tri načina za intervencije je veoma visok nivo tipizacije elemenata, podsklopova i sklopova pomoćnih pribora, sa čestim tipskim rešenjima brzodejstvujućeg, mahom mehaničkog, rukovanja, pre svega stezanja i otpuštanja. Ne ulazeći u dublje proračune moguće je na sledeći način ukazati na ekonomičnost primene grupnih u odnosu na specijalne stezne pribore.

Ako je reč o grupi sa ukupno  $z_1+z_2+\dots+z_m=\sum_1^m z$  delova, onda

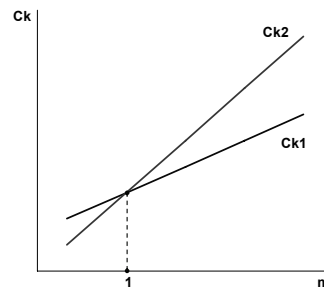
u cenu grupnog pribora  $C_{k1}$  ulazi cena osnovnog grupnog pribora  $C_g$  kao i cena svih izmenljivih delova  $C_i$  koji su potrebni za prilagodavanje pribora svakom članu grupe, pa je:

$$C_{k1} = C_g + \sum_1^m C_i, \quad (1)$$

dok je u slučaju konstruisanja i izrade specijalnih pomoćnih pribora ukupna cena  $C_{k2}$  za svih  $m$  delova, odnosno:

$$C_{k2} = \sum_1^m C_s, \quad (2)$$

gde je  $C_s$ -cena individualnog pribora.



Slika 1. Tendencija kretanja cena grupnih i specijalnih pomoćnih pribora u zavisnosti od broja delova  $m$  [5]

Tendencija kretanja cena  $C_{k1}$  i  $C_{k2}$  u zavisnosti od broja delova  $m$  može se u najjednostavnijem slučaju iskazati dijagramom na slici 1.



## 2.2 Reinženjering kroz smanjenje vremena obrade

Pri projektovanju tehnoloških procesa, teži se smanjenju vremena obrade. Kod komadnog vremena to se, u osnovi, može ostvariti na dva načina:

- smanjenjem pojedinih njihovih komponenata i
- vremenskim preklapanjem nekih delova operacija odnosno zahvata.

Smanjenje glavnog vremena može se postići: primenom visokoproduktivnih alata i režima rezanja, smanjenjem dodataka za obradu, smanjenjem broja radnih hodova i broja prolaza pri obradi itd. Pomoćno vreme se može smanjiti: smanjenjem vremena praznih (povratnih) hodova, racionalnim projektovanjem procesa obrade, smanjenjem vremena pozicioniranja i depozicioniranja priprema-obradka korišćenjem pribora sa brzodejstvujućim steznim elementima, preklapanjem njegovih delova sa glavnim vremenom itd.

Mogućnosti vremenskog preklapanja zahvata zavisi od šeme obrade (podrazumeva se šema uzajamnih položaja alata i obratka pre i u toku ostvarenja određenog dela obradnog procesa [4]). Analiza strukture i izrada šeme obradnog procesa omogućavaju otkrivanje mogućnosti povećanja proizvodnosti obrade. Pri analizi mogućnosti preklapanja pomoćnog odgovarajućim glavnim vremenom, ne može se pomoćno vreme razmatrati kao celina. Naime, pomoćno vreme pri normiranju raščlaniti na komponente, a jedna od mogućnosti te raščlane može biti: vreme pozicioniranja i depozicioniranja priprema-obratka, vreme upravljanja obradnim sistemom, vreme indeksacije (npr. premeštanje delova obradnog sistema u nove i polazne pozicije i njihovo fiksiranje), vreme promene alata, vreme regulisanja položaja alata u odnosu na obradak i vreme kontrolnih merenja i td.

## 2.3 Reinženjering kroz povećanje tehnološkog nivoa proizvodne opreme

Dugi period izolacije, doveo je da se u preduzećima pojavi vrsta troškova koja je posledica neupotrebe sredstava za rad odnosno fizičkog zastarevanja, što je dovelo do gubitka relativne proizvodne sposobnosti istih. Ta tehnološka zastarelost koja se procenjuje na 30 godina, opterećuje vrednost novog proizvoda. Nastavak proizvodnje i reaktiviranje ekonomski zastarelih sredstava za rad u proizvodnom procesu ne stvara nikakve ekonomske uštede, jer se one potiru gubljenjem konkurentne pozicije preduzeća u odnosu na druga iz okruženja, koja navedeni problem ekonomskog zastarevanja svoje opreme nisu imala u posmatranom periodu.

Otuda tendencija malih preduzeća, da klasične sisteme zamenjuju novim fleksibilnim, automatizovanim NC sistemima. Međutim rešenje za mala preduzeća može biti i reinženjering tehnoloških procesa kroz revitalizaciju postojećih tehnologija [3]. Da bi se uradila revitalizacija tehnologije, kao nosioca tehnoloških procesa, on mora da se sagleda sa aspekta automatizacije i fleksibilnosti. Sagledavanje tehnološkog nivoa tehnološkog procesa sa aspekta automatizacije, može se izvršiti prema, na osnovu aritmetičke sredine vrednosti tehnološkog nivoa sa aspekta automatizacije svih obradnih sistema uključenih u posmatani tehnološki proces:

$$TN(p) = \frac{\sum_{i=1}^n TN_i}{n}, \quad (3)$$

gde su:

- TN(p) – teh. nivo automatizacije obradnog procesa,
- TN<sub>i</sub> - tehnološki nivo automatizacije i-tog teh. sistema,
- n - ukupan broj tehnoloških sistema koji uslovljavaju izvršenje proizvodnog procesa.

Kako je svaki proizvodni sistem sastavljen iz skupa različitih tehnoloških sistema (obradnih, transportnih, mernih i dr.), koji raspolazu sa velikim brojem različitih tehnoloških karakteristika, neophodno je najpre izvršiti grupisanje srodnih

karakteristika, svih tehnoloških sistema, bitnih za utvrđivanje tehnoloških nivoa sa gledišta automatizacije. Glavne karakteristike tehnoloških sistema, presudne za uticaj na tehnološki nivo sa gledišta automatizacije, su u prvom redu one koje utiču na smanjenje učešća živoga rada koji se troši tokom eksploatacije tehnološkog sistema. Analizom je utvrđeno da svi obradni sistemi, koji se koriste u industrijskim sistemima raspolazu sa šest karakterističnih kriterijumima, koji se mogu koristiti u identifikaciji tehnoloških nivoa. Za analizu su usvojene sledeće oznake i nazivi ovih kriterijuma:

- K<sub>1</sub>** - vrsta pogona obradnog sistema,
- K<sub>2</sub>** - način vođenja ciklusa obrade,
- K<sub>3</sub>** - način stezanja predmeta obrade,
- K<sub>4</sub>** - način opsluživanja obradnog sistema,
- K<sub>5</sub>** - način kontrole predmeta obrade i
- K<sub>6</sub>** - način podešavanja i korekcije položaja alata u odnosu na predmet obrade.

Svi obradni sistemi u okviru navedenih šest kriterijuma mogu da raspolazu sa jednim ili više parametara koji mogu da se nađu u odgovarajućem kriterijumu. Usvojeni parametri navedenih kriterijuma označavaju se sa slovnim indiciranim oznakama koje imaju sledeća značenja:

**K<sub>1</sub>** - Vrsta pogona obradnog sistema sadrži parametre P<sub>R</sub> i P<sub>M</sub> sa značenjima:

P<sub>R</sub> - Pogon ručni, koji je zastupljen kod svih ručnih radova pri montaži, pakovanju, ručnim obradama koje se izvode upotrebom ručnog alata na manuelni pogon i sl.

P<sub>M</sub> - Pogon mehanizovani, koji je zastupljen kod svih priručnih alata koji rade na bilo koji motorni pogon. Sve vrste mašina i obradnih jedinica, linija, sistema na sopstveni pogon i sl.

**K<sub>2</sub>** - Način vođenja ciklusa obrade sadrži parametre C<sub>R</sub>, C<sub>K</sub>, C<sub>F</sub>, C<sub>N</sub>, C<sub>A</sub>, C<sub>AS</sub>, C<sub>IM</sub> sa značenjima:

C<sub>R</sub> - Ciklus obrade se vodi ručno, zastupljenost je kod svih ručnih radova sa ručnim i mehanizovanim alatom.

C<sub>K</sub> - Ciklus obrade se vodi ručno-mehanizovanim putem što je zastupljeno na svim univerzalnim mašinama.

C<sub>F</sub> - Ciklus obrade se vodi fiksno i automatizovano unutar mašine, sve mašine čiji se ciklus izvodi posredstvom fiksnih bregova, vođica, mehanizama i sl.

C<sub>N</sub> - Ciklus obrade se vodi numeričkim upravljanjem, svi tipovi numerički upravljanih mašina kao što su NC, CNC, DNC, i sl.

C<sub>A</sub> - Ciklus obrade se vodi adaptivnim upravljanjem, sve adaptivno upravljane mašine, kompjuterom upravljane mašine sa mogućnošću promene parametara obrade uz održavanje zadatih vrednosti.

C<sub>AS</sub> - Ciklus obrade se vodi adaptivnim upravljanjem kod mašinskih sistema i transfer linija, svi adaptivno upravljani fleksibilni obradni sistemi i fleksibilne transfer linije kompjuterom upravljane sa mogućnošću promene parametara obrade uz održavanje zadatih parametara.

C<sub>IM</sub> - Ciklusi vođeni kompjuterom integrisanih mašinskih sistema, kompjuterski integrisani proizvodni i tehnološki sistemi (CIM), sa automatskim projektovanjem proizvoda tehnologije i planiranja.

**K<sub>3</sub>** - Način stezanja predmeta obrade sadrži parametre S<sub>R</sub>, S<sub>RM</sub>, S<sub>K</sub>, S<sub>BR</sub> sa značenjima:

S<sub>R</sub> - Stezanje ručno, sva ručna stezanja pri ručnim radovima montaže, pakovanja, ručne obrade i sl.

S<sub>RM</sub> - Stezanje ručno-mehanizovano, sva stezanja koja se izvode delovanjem preko nekog mehanizovanog pribora na principu ekscentara, bregova, poluga, klinova i sl.

S<sub>K</sub> - Stezanje automatizovano, automatizovano putem delovanja komande na hidraulik, pneumatik i sl.

S<sub>BR</sub> - Stezanje bez učešća radnika, sva stezanja koja se izvode u sklopu ciklusa bez učešća radnika.

**K<sub>4</sub>** - Način opsluživanja obradnog sistema sadrži parametre O<sub>R</sub>, O<sub>RM</sub>, O<sub>P</sub>, O<sub>BR</sub> sa značenjem :

$O_R$  - Opsluživanje ručno, na svim radnim mestima gde se opsluživanje izvodi ručno.

$O_{RM}$  - Opsluživanje ručno - mehanizovano, slučaj opsluživanja motorizovanim alatom.

$O_P$  - Opsluživanje raznim punjačima, razne vrste magacina za punjenje i dodavanje mehaničkim rukama.

$O_{BR}$  - Opsluživanje automatizovano, sa raznim tipovima mašina i robota bez učešća radnika.

$K_5$  - Način kontrole predmeta obrade sadrži parametre  $K_{RC}, K_{VC}, K_{MC}, K_{AK}$  sa značenjem:

$K_{RC}$  - Kontrola ručna, izvodi se u toku ciklusa izrade.

$K_{VC}$  - Kontrola vanciklusna, izvodi se kod svih radova bez i sa mehanizovanim alatom van mašine.

$K_{MC}$  - Kontrola u ciklusu, mehanizovana, na mašini po završetku obrade.

$K_{AK}$  - Kontrola automatizovana, aktivna, vrši se za vreme obrade.

$K_6$  - Način podešavanja i korekcije položaja alata u odnosu na predmet obrade sadrži parametre  $PK_R, PK_{AU}, PK_A$  sa značenjem:

$PK_R$  - Podešavanje i korekcija alata se izvodi isključivo ručno.

$PK_{AU}$  - Podešavanje položaja alata na svim mašinama na kojima je to moguće pomoću nekog šablona ili uređaja za podešavanje.

$PK_A$  - Automatsko podešavanje i korekcija položaja alata.

Po utvrđivanju 6 kriterijuma i 24 parametra sa ciljem definisanja tehnoloških nivoa pojedinačnih obradnih sistema sa gledišta automatizacije, utvrđen je određeni broj tehnoloških nivoa koji se rangiraju po složenosti, počev od čisto ručnih aktivnosti pa do potpuno automatizovanih obradnih sistema.

Po ovom modelu usvojena je oznaka (i)-tog Tehnološkog Nivoa sa gledišta automatizacije obradnog sistema kao  $TN(i)$ , gde je:  $i=1,2,3,\dots,10$ , pri čemu  $i=1$  odgovara najnižem a  $i=10$  najvišem tehnološkom nivou sa gledišta automatizacije posmatranog obradnog sistema.

Opšti izraz za određivanje i-tog tehnološkog nivoa sa gledišta automatizacije nekog obradnog sistema, funkcija je svih šest usvojenih kriterijuma  $K_1$  do  $K_6$  i svih parametara sadržanih u pojedinim kriterijumima, odnosno  $TN(i) = F(K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6)$ .

Najveća težina odnosa učešća ljudskog i mašinskog rada dodeljena je kriterijumu  $K_1$ , jer je kod svih vrsta mašina pogon mehanizovan tokom celog trajanja procesa rada obradnog sistema, dok kod ručne obrade pogon se ostvaruje isključivo ljudskom snagom.

Po sličnom principu izvršeno je i rangiranje svih parametara u okviru pripadajućeg kriterijuma tako da za ručne radove, gde je zastupljenost mašinskog rada minimalna ili čak ne postoji, parametri imaju najmanju težinu, dok za radove sa maksimalnom zastupljenošću udela automatizacije imaju maksimalnu težinu.

Posmatranjem napisanih funkcionalnih zavisnosti kriterijuma  $K_1$  do  $K_6$ , u funkciji pripadajućih parametara, parametri su poredani tako da oni koji se nalaze do leve otvorene zagrade imaju minimalnu težinu, a oni do desne zatvorene zagrade imaju maksimalnu težinu automatizacije. Stoga su sa minimalnim težinama automatizacije parametri  $P_R, C_R, S_R, O_R, K_{RC}, PK_R$ , a sa maksimalnom zastupljenošću automatizacije su  $P_M, C_{IM}, S_{BR}, O_{BR}, K_{AK}, PK_A$ .

Između ovih parametara smešteni su svi ostali rangirani po važnosti automatizacije. Uvažavajući postavku o egzistenciji 10 rangiranih tehnoloških nivoa automatizacije obradnih sistema označenih sa  $TN_1, TN_2, TN_3, TN_4, TN_5, TN_6, TN_7, TN_8, TN_9, TN_{10}$  kao i postavljene kriterijume  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$  i sve njihove pripadajuće parametre

$P_R, P_M$   
 $C_R, C_K, C_F, C_N, C_A, C_{AS}, C_{IM}$   
 $S_R, S_{RM}, S_K, S_{BR}$   
 $O_R, O_{RM}, O_P, O_{BR}$   
 $K_{RC}, K_{VC}, K_{MC}, K_{AK}$   
 $PK_R, PK_{AU}, PK_A$ .

definisana je matrica logično mogućih kombinacija parametara tehnoloških nivoa sa gledišta automatizacije obradnih sistema, tabela 1.

Tehnološki Nivo	Vrsta Pogona	Način vođ. ciklusa	Način stezanja	Način opsluživanja	Način kontrole	Podeš. i korekcija polož. alata
$TN_1$	$P_R$	$C_R$	$S_R$	$O_R$	$K_{RC}, K_{VC}$	$PK_R$
$TN_2$	$P_M$	$C_R$	$S_R, S_{RM}$	$O_R, O_{RM}$	$K_{RC}, K_{VC}$	$PK_R$
$TN_3$	$P_M$	$C_K$	$S_{RM}, S_K$	$O_R, O_{RM}$	$K_{RC}, K_{VC}$	$PK_R$
$TN_4$	$P_M$	$C_F$	$S_{RM}, S_K, S_{BR}$	$O_R, O_{RM}$	$K_{VC}$	$PK_R, PK_{AU}$
$TN_5$	$P_M$	$C_F$	$S_K, S_{BR}$	$O_{RM}, O_P$	$K_{MC}$	$PK_R, PK_{AU}$
$TN_6$	$P_M$	$C_F$	$S_K, S_{BR}$	$O_{RM}, O_P$	$K_{MC}, K_{AK}$	$PK_A$
$TN_7$	$P_M$	$C_N$	$S_K, S_{BR}$	$O_{RM}, O_P, O_{BR}$	$K_{VC}, K_{MC}$	$PK_{AU}$
$TN_8$	$P_M$	$C_A$	$S_{BR}$	$O_{RM}, O_P, O_{BR}$	$K_{AK}$	$PK_A$
$TN_9$	$P_M$	$C_{AS}$	$S_{BR}$	$O_{RM}, O_P, O_{BR}$	$K_{MC}, K_{AK}$	$PK_{AU}, PK_A$
$TN_{10}$	$P_M$	$C_{IM}$	$S_{BR}$	$O_{BR}$	$K_{AK}$	$PK_A$

Tabela 1. Tehnološki nivoi sa gledišta automatizacije obradnih sistema

Parametri koji kvalitativno prebacuju neki obradni sistem iz nižeg u viši tehnološki nivo sa gledišta automatizacije prikazani su na sledećoj šemi:

$TN_1 - P_R \rightarrow TN_2 - P_M$   
 $TN_2 - C_R \rightarrow TN_3 - C_K$   
 $TN_3 - C_K \rightarrow TN_4 - C_F$   
 $TN_4 - K_{VC} \rightarrow TN_5 - K_{MC}$   
 $TN_5 - PK_R, PK_{AU} \rightarrow TN_6 - PK_A$   
 $TN_6 - C_F, PK_A \rightarrow TN_7 - C_N, PK_{AU}$   
 $TN_7 - C_N, K_{VC} \rightarrow TN_8 - C_A, K_{AK}$   
 $TN_8 - C_A \rightarrow TN_9 - C_{AS}$   
 $TN_9 - C_{AS} \rightarrow TN_{10} - C_{IM}$

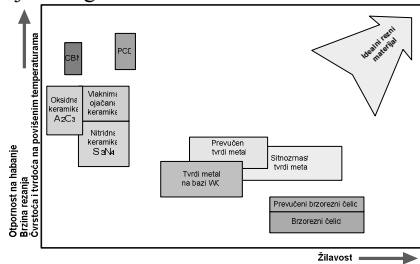
Na ovaj način koncipirana matrica, data u tabeli 1, koristi se za identifikaciju tehnološkog nivoa automatizacije svakog obradnog sistema kojim raspolažu proizvodni procesi

preduzača. Ovako razvijeni model za identifikaciju tehnoloških nivoa sa gledišta automatizacije obradnih sistema, koncipiran je tako da omogućava pouzdano identifikovanje tehnološkog nivoa bilo kog obradnog sistema od strane svakog tehničkog lica vezanog za nabavku ili revitalizaciju proizvodne opreme.

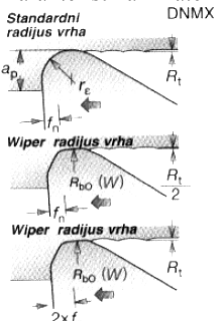
#### 2.4. Reinženjering kroz izbor alata i izbor parametara režima obrade

Troškovi reznog alata su prosečno oko 3% ukupnih troškova proizvodnje. Uštede na troškovima alata (procene su oko 1%), imaju zato neznatan uticaj u poređenju sa uštedama koje se postižu smanjenjem troškova proizvodnje povećanjem parametara obrade (procene su oko 15%). Izbor alata može da utiče na performanse obrade (režime rezanja) sa dva aspekta.

Jedan aspekt je rezna geometrija a drugi materijal reznog dela alata. Na slici 2 je prikazana veza materijala i nekih karakteristika alata (oznake: CBN – kubni nitrid bora, PCD – polikristalni dijamant, WC – volfram karbid). Primenom savremenih materijala za izradu reznih alata, dobijena je povećana čvrstoća, krutost, toplotna provodljivost, abraziona otpornost, otpornost puzanju i dimenzijska stabilnost alata. Savremeni materijali alatima omogućavaju da izdrže više temperature bez upotrebe SHP-a a bez uticaja na smanjenje čvrstoće ili povećano trošenje. Izostavljanjem SHP-a smanjuju se troškovi odmašćivanja, podmazivanja, održavanja i zbrinjavanja otpada (ekološki problem). S druge strane pri visokobrzinskoj obradi, 90% razvijene toplote odlazi sa strugotinom pa podsystem za odvođenje strugotine i SHP ima vrlo značajnu ulogu.



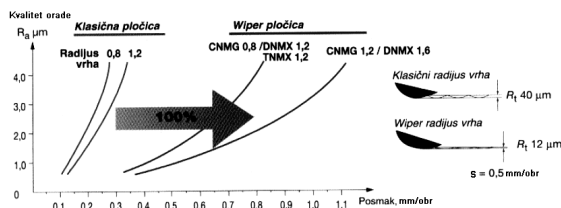
Slika 2. Veza između karakteristika i materijala alata



Slika 3. Wiper rezna geometrija (Sandvik Coromant)

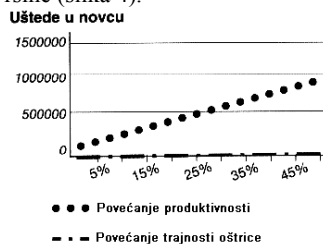
Uticaj rezne geometrije će biti ilustrovan na primeru Wiper rezne geometrije (izv. Sandvik Coromant alati), sl 3.

Da li će i kako će se iskoristiti poboljšanje u tehnološkom procesu, koje pruža izbor rezne geometrije i izbor alata od savremenijih materijala, zavisi i od drugih parametara kao što su materijal predmeta obrade, kvalitet obrade, performansi mašine alatke i dr.



Slika 4. Zavisnost kvaliteta obrade od vrste pločice

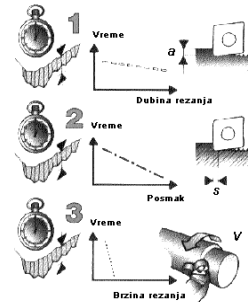
Pločice sa Wiper reznom geometrijom se koriste za polufine i fine obrade. Zahvaljujući promeni radijusa pločice, posmak se može udvostručiti bez promena na kvalitet obradene površine (slika 4).



Slika 5. Uštede u novcu u zavisnosti od povećanja produktivnosti i povećanjem trajnosti oštrice

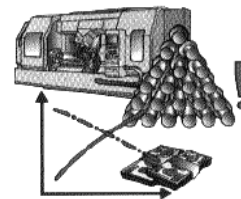
Moderni alati pravilno upotrebljeni i sa optimalnim parametrima obrade imaju najveći učinak pri uštedi troškova. Grafička ilustracija prikazuje uporednu uštedu uticaja povećanja produktivnosti i povećanja trajnosti oštrice (sl. 5).

Izbor režima obrade je kompleksan, jer zavisi od mnogih parametara, istovremeno utiče na mnoge parametre i čine ga više parametara. Pri optimalnoj geometriji alata i konstantnim uslovima obrade osnovni parametri uticajni na vreme rezanja su posmak (korak), brzina i dubina rezanja, što je ilustrovano na slici 6.



Slika 6. Uporedno, parametri obrade s' obzirom na vreme

Da se konstatovati da brzina i posmak imaju znatno veći uticaj na poboljšanje proizvodnosti a time i produktivnosti nego dubina rezanja. I ako povećanje tih parametara negativno utiče na trajnost oštrice alata, povećanje produktivnosti će višestruko nadomestiti povećane troškove trošenja alata (slika 7).



Slika 7. Troškovi usled trošenja oštrice alata i povećanja proizvodnosti (produktivnosti)

### 3. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani mogući pravci ostvarivanja "mekog" odnosno soft reinženjeringa tehnoloških procesa malih preduzeća, koji treba da nenarušavajući tehničke zahteve (zahtevi dizajnera i konstruktora), uz poštovanje tehnoloških ograničenja (zahtevi tehnologije) zadovolje ekonomske zahteve (zahtevi tržišta).

### 4. LITERATURA

- [1] Erić, M.: *Model reinženjeringa tehnoloških procesa malih preduzeća*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Kragujevac, 2007.
- [2] Minis, I., Yanushevsky, R., : *A New Theoretical Approach for the Prediction of Machine Tool Chatter in Milling*, Journal of Engineering for Industry, Vol. 115/1, February, 1993.
- [3] Mitrović, R., Erić, M., Četković, M.: *Revitalizacija postojećih tehnologija u industriji prerade metala*, Tribologija u industriji, broj 2, Kragujevac, 1992.
- [4] Nikolić, D.: *Projektovanje tehnoloških procesa I*, Mašinski fakultet Beograd, 1997.
- [5] Tadić, B.: *Obradni procesi i specijalne mašine i uređaji*, Monografija, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2006.

**Autori:** Doc. dr Milan Erić, Prof. dr Branko Tadić, Doc. dr Slobodan Mitrović, Mašinski fakultet, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac, Srbija, Tel.: +381 34 335-990, E-mail: ericm@kg.ac.rs, btadic@kg.ac.rs, boban@kg.ac.rs

Sovilj, B., Brezočnik, M., Sovilj-Nikić, I., Kovač, P.

## MODELIRANJE FUNKCIJE POSTOJANOSTI ALATA PRIMENOM GENETSKOG ALGORITMA I PLANA EKSPERIMENTA PRI IZRADI PROFILA

**Rezime:** U današnje vreme u procesima obrade metala prisutno je intenzivno uvođenje postupaka automatizacije, pri čemu se pred odvalna glodala postavljaju sve noviji i teži zahtevi. U radu je data analiza uticajnih parametara na proces profilne obrade i primena genetskog algoritma kao i planiranog eksperimenta za modeliranje postojanosti alata pri profilnoj obradi.

**Ključne reči:** genetski algoritam, planirani eksperiment, postojanost, odvalno glodanje

## TOOL LIFE FUNCTION MODELING BY USE OF GENETIC ALGORITHM AND RESPONSE SURFACE METHODOLOGY DURING PROFILE PRODUCTION

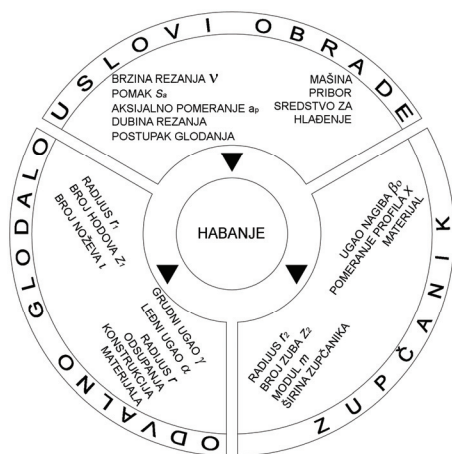
**Abstract:** Nowadays, in the metal working processes the intensive introduction of automation procedures is presented. Hob milling cutters are set to the newer and harder requirements. In the paper the analysis of influential parameters on the process of profile processing and the application of genetic algorithm and response surface methodology for tool life function modelling for the profile processing are given.

**Key words:** genetic algorithm, response surface methodology, tool life function, profile production

### 1. UVOD

Povećanje efikasnosti obrade metala rezanjem jeste jedan od osnovnih smerova razvoja savremenog mašinstva. Uspešno rešavanje postavljenih ciljeva povezano je sa istraživanjem uslova rada alata za obradu rezanjem kao jednog od najvažnijih učesnika u procesu obrade metala rezanjem. Primena optimalnih geometrijskih parametara reznog dela alata za obradu rezanjem i optimalni uslovi rada obezbeđuju najmanju cenu koštanja proizvoda i najveću proizvodnost rada.

Odvalno glodanje, kao jedan od najsloženijih procesa obrade rezanjem, nalazi najširu primenu pri obradi zubaca cilindričnih zupčanika zahvaljujući visokoj proizvodnosti procesa. Komplikovane kinematske i geometrijske veze između odvalnog glodala i obratka stvaraju niz teškoća i problema, koji sprečavaju optimalno korišćenje alata i mašine, kao na primer: određivanje optimalne brzine rezanja i pomaka, utvrđivanje racionalne postojanosti odvalnog glodala, maksimalno i ravnomerno korišćenje što većeg broja zuba alata, utvrđivanje što produktivnije geometrije odvalnog glodala itd. [1].



Slika 1. Veličine koje utiču na habanje

Postoje mnogobrojni faktori koji utiču na proces odvalnog glodanja. Mnogobrojni faktori, kao i njihovi međusobni uticaji čine proces habanja teškim za proučavanje.

Na slici 1 prikazani su faktori koji utiču na habanje tokom procesa odvalnog glodanja.

U ovom radu, na osnovu eksperimentalnih istraživanja, biće određena funkcija postojanosti profilnog alata primenom genetskog algoritma i metodologije faktornog planiranja eksperimenta.

### 2. MODELIRANJE FUNKCIJE POSTOJANOSTI PROFILNOG ALATA

#### 2.1. Primena genetskog algoritma

Uticaj procesa habanja alata na karakteristike, stanja i izlazne efekte obradnih procesa je velik i izuzetno nepovoljan. Prema tome, skup tehnoloških i ekonomskih efekata obradnih procesa determiniše, i to u velikoj meri, veličinu i intenzitet habanja alata.

Negativna dejstva procesa habanja alata na pojedine karakteristike stanja i ekonomske efekte obradnih procesa posledice su uticaja jedne brojne grupe faktora na proces habanja alata. U ovu grupu, u prvom redu spadaju:

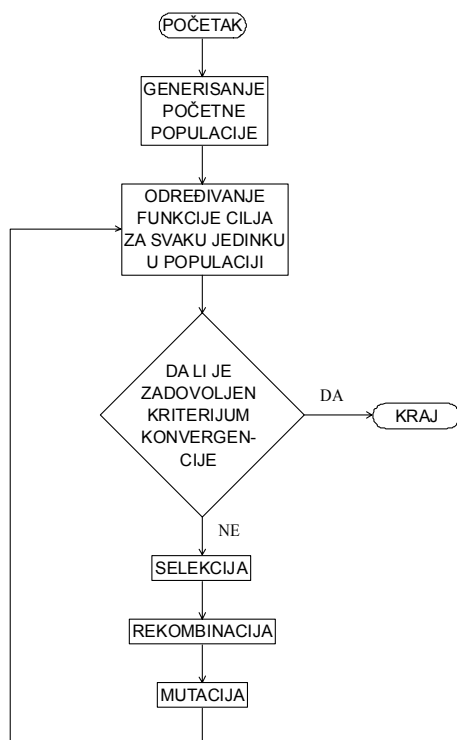
- vrsta i karakteristike materijala alata  $A$  i obratka  $O$
- režim obrade  $R$  (brzina rezanja, pomak, ...)
- geometrija alata  $GA$
- sredstvo za hlađenje i podmazivanje  $SHP$  (vrste i karakteristike sredstva, sistem hlađenja)
- temperatura rezanja  $\theta$
- krutost obradnog sistema  $K_s$
- ostali uslovi obrade  $UO$ .

Preko ovog skupa faktora može se uticati na veličinu, intenzitet i karakter habanja nekog alata, a time i na osnovne karakteristike stanja i ključne izlazne tehnološke i ekonomske efekte obradnih procesa [4].

Uzimajući u obzir prirodu problema i raspoložive podatke na početku identifikacije triboloških procesa za rešavanje navedenog problema u ovom radu izabran je genetski algoritam.



Genetski algoritam sastoji se iz nekoliko koraka čije izvršavanje dovodi do rešenja optimizacionog problema (slika 2.).



Slika 2. – Struktura genetskog algoritma

U ovom radu je za modelovanje funkcije  $L$  postojanosti jednozubog odvalnog glodala iskorišćen predefinisani model drugog reda:

$$L = k_0 + k_1\gamma + k_2\alpha + k_3r + k_4\gamma\alpha + k_5\gamma r + k_6\alpha r + k_7\gamma\alpha r + k_8\gamma^2 + k_9\alpha^2 + k_{10}r^2 \quad (1)$$

Cilj optimizacije genetskim algoritmom jeste dobiti rešenja za vrednosti koeficijenata  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, k_9, k_{10}$  takvih da razlika između eksperimentalnih i vrednosti predviđenih modelom bude što manja.

Prilikom određivanja odgovarajućeg oblika modela metodom genetskog algoritma polazi se od inicijalne slučajno odabrane populacije  $P(t)$  [5]. Populacija  $P(t)$  sastavljena je od organizama. Svaki organizam predstavlja jedno od mogućih rešenja problema i sastoji se od realnih konstanti (gena):  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, k_9, k_{10}$

Apsolutna devijacija  $D(i, t)$  individualnog modela (organizma)  $i$  u toku generacije  $t$  smatra se merom uspešnosti i definiše kao:

$$D(i, t) = \sum_{j=1}^n |E(j) - P(i, j)| \quad (2)$$

pri čemu je  $E(j)$  eksperimentalna vrednost  $j$ -tog merenja,  $P(i, j)$  očekivana vrednost dobijena uz pomoć individualnog modela  $i$  za  $j$ -to merenje, dok je  $n$  maksimalni broj merenja.

Jednačina (2) predstavlja standardnu meru uspešnosti prilikom rešavanja regresionih problema koju je predložio Koza [6]. Svrha ovog optimizacionog zadatka je da obezbedi takav model pri kom bi jednačina (2) pokazala što je moguće manje apsolutno odstupanje.

Pošto nije neophodno da najmanje vrednosti jednačine (2) obezbeđuju i najmanju procentualnu razliku, potrebno je definisati prosečnu apsolutnu procentualnu devijaciju za sva merenja sprovedena za individualni model  $i$ , koja se može definisati kao:

$$\Delta(i) = \frac{D(i, t)}{|E(j)|n} \cdot 100\% \quad (3)$$

Nakon generisanja početne populacije sledi iterativni postupak primene genetskih operatora selekcije, rekombinacije (ukrštanja) i mutacije na jedinke populacije sve dok ne bude zadovoljen kriterijum konvergencije. Dva roditelja biraju se na slučajan način, oni dobijaju mogućnost da se ukrštaju i prenose svoj genetski materijal na sledeću generaciju. U ovom radu primenjeno je dekadno kodovanje i realna aritmetička rekombinacija. Ukrštanje se vrši između dva slučajno odabrana roditeljska gena sa identičnim indeksom. Ukrštanje se odvija na principu aritmetičke rekombinacije prema izrazu:

$$POTOMAK1 = \frac{\lambda_1 RODITELJ1 + \lambda_2 RODITELJ2}{2} \quad (4)$$

$$POTOMAK2 = \frac{\lambda_2 RODITELJ1 + \lambda_1 RODITELJ2}{2} \quad (5)$$

Koeficijenti  $\lambda_1$  i  $\lambda_2$  biraju se na slučajan način iz intervala  $[0, 1]$ .

Nakon ukrštanja sledi operacija mutacije. Na slučajan način bira se jedinka, kao i njen gen koji će biti izmenjen. Mutacijom se uvodi potpuno nov genetski materijal u populaciju.

Prilikom odabira populacije na slučajan način generisano je 100 organizama. U početnoj generaciji slučajnim putem generisane su vrednosti koeficijenata  $k_0, k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8, k_9, k_{10}$  iz intervala  $[-10, 10]$ ·h

Kako bi se ublažile negativne strane elitizma, a opet u dovoljnoj meri ubrzalo izvršavanje genetskog algoritma izabrano je da verovatnoća reprodukcije bude 0.1.

Verovatnoća rekombinacije je 0.3, pri čemu je odabir jedinki koje će dobiti priliku za razmenu genetskog materijala izvršen na osnovu turnir selekcije. Što znači da je na slučajan način iz populacije odabrano 7 jedinki od kojih je nakon međusobnog upoređivanja prilagođenosti odabran jedan roditelj koji će svoj genetski materijal ukrstiti sa pobednikom drugog turnira koji je definisan na identičan način. U okviru turnir selekcije je dozvoljena mogućnost da učesnici jednog turnira budu takođe učesnici drugog, što znači da je moguće da jedinka koja nije bila najbolja u jednom turniru izbori svoje mesto za rekombinaciju u nekom narednom, dok se ne odabere 30% populacije koja će ostaviti svoje potomstvo, premda je ova mogućnost izuzetno mala. Takođe, u okviru rekombinacije se rekombinacija samo na jednom genu ostvaruje između samo 10% parova dok se u ostalih 90% slučajeva ona dešava na više gena.

Mutacija se odvija sa verovatnoćom od 60%. Od ukupnog broja jedinki koje mutiraju kod 50% njih mutacija se odvija samo na jednom genu, dok se kod ostalih ona dešava na više gena.

Procedura generisanja svake civilizacije se odvijala do 5000-ite generacije kada bi se ona privremeno prekidala. U slučaju da je prosečno odstupanje  $\Delta(i)$  jednog pretpostavljenog modela (organizma) u populaciji manje od 4% evolucija populacije bi bila nastavljena do 20000-ite generacije, u suprotnom proces bi se prekidao. Nakon svake faze treninga testira se tačnost najboljih modela uz pomoć početnih podataka. Prilikom ovog modelovanja upotrebljeno je 15 nezavisnih civilizacija.

## 2.2 Primena faktornog plana eksperimenta

Savremeni metod projektovanja eksperimenta (npr. pri matematičkom modeliranju) naziva još i metodom površine reagovanja ili površine odziva [7]. Metodološku suštinu

površine reagovanja čini izbor modela u kojem je reakcija matematički opisana preko neke funkcije nezavisno promenljivih veličina koje karakterišu datu pojavu, proces ili sistem. Na osnovu modela prvog ciklusa formiraju se eventualno novi modeli u narednim ciklusima, sve do adekvatne modelske identifikacije.

Planiranje, izvođenje i obrada rezultata eksperimentalnih ispitivanja se sastoji iz sledećih faza:

- izbor faktora eksperimenta
- izbor intervala variranja
- kodiranje faktora
- sastavljanje matrice planiranja (plan matrica)
- realizacija plana eksperimenta
- proračun koeficijenata regresije (parametara modela)
- ocena značajnosti (signifikantnosti) faktora
- provera adekvatnosti matematičkog modela i
- ocena tačnosti modela (proračun intervala pouzdanosti)

U radu su izabrana dva polinomna modela postojanosti pri odvalnom glodanju. Prvo je korišćen trofaktorni eksperimentalni plan prvog reda  $2^k + n_0 = N$  sa 12 eksperimentalnih tačaka u obliku modela sa međusobnim uticajima :

$$L = k_0 + k_1\gamma + k_2\alpha + k_3r + k_4\gamma\alpha + k_5\gamma r + k_6\alpha r + k_7\gamma\alpha r \quad (6)$$

Zatim je modeliranje funkcije postojanosti vršeno modelom drugog reda primenom centralnog kompozicionog rotabilnog plana  $2^k + 2k + n_0 = N = 20$ .

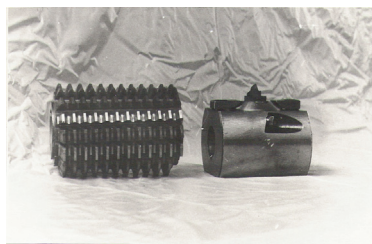
Do ovog modela se dolazi tako da su prvih 8 eksperimentalnih tačaka i 4 eksperimentalne tačke u centralnom nivou (sa ponavljanjem) bile identične. Dopunske eksperimentalne tačke locirane su na centralnim osama u temenima oktaedra (eksperimentalne tačke 9-14) i u centralnoj tački plana (eksperimenti 19 i 20). Pri tome je veličina izlaska iz kuba iznosila  $\pm 1,682$  [4]. U ovom slučaju matematički model je bio:

$$L = k_0 + k_1\gamma + k_2\alpha + k_3r + k_4\gamma\alpha + k_5\gamma r + k_6\alpha r + k_7\gamma^2 + k_8\alpha^2 + k_9r^2 \quad (7)$$

### 3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Istraživanja u okviru ovog rada izvršena su na glodalici MODUL-ZFWZ-250X5AVE od proizvođača STARKSTORM - Anlagenbau, Karl Marx, Nemačka. U okviru istraživanja korišćen je specijalno projektovan i konstruisan jednozubi alat proizveden na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu (slika 3).

Optimizaciji geometrijskih parametara alata za obradu rezanjem prethodi unutrašnja optimizacija, tj. optimizacija režima rezanja. Da bi se odredila optimalna rezna geometrija neophodno je obezbediti racionalne uslove rada, odnosno da bi se izvršila eksperimentalna istraživanja rezne geometrije alata potrebno je odrediti brzinu rezanja, pomak i aksijalni pomeraj.

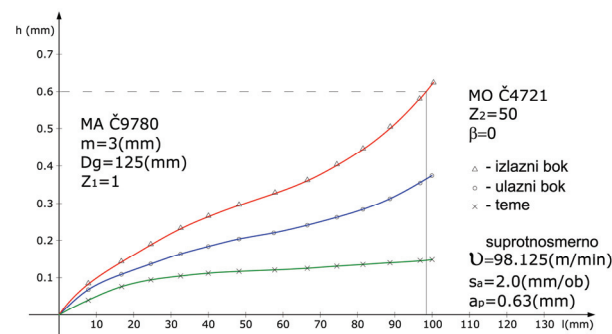


Slika 3. – Jednozubo odvalno glodalo

Rezultati eksperimenta prikazani su u [2]. Za svaku eksperimentalnu tačku merenjem su dobijene izlazne

vrednosti karakterističnih habanja ( $h_u$ ,  $h_t$ ,  $h_i$ ). Na osnovu analize kao kriterijum habanja jednozubog alata usvojena je širina pojasa habanja na izlaznom boku  $h_i=0,6$  mm.

Nakon toga, nacrtane su krive razvoja procesa habanja za sve eksperimentalne tačke. Na slici 4. data je kriva za eksperimentalnu tačku koja je na osnovu slučajnih brojeva izvedena četvrta po redu.



Slika 4. Krive habanja

### 4. ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA

Primenom genetskog algoritma dobijeni su modeli koji zadovoljavaju kriterijume izbora. Stoga, oni predstavljaju potencijalna rešenja problema. Karakteristike jednog od ovih modela su:

Model funkcije postojanosti:

$$L = 3.47514 + 4.84292\gamma + 0.00450\alpha + 23.1512r - 0.19574\gamma\alpha - 5.9446\gamma r + 0.36683\alpha r - 0.04952\gamma^2 + 0.085916\alpha^2 + 18.7778r^2 \quad (6)$$

Ukupna apsolutna razlika najbolje jedinke: 40.977  
Procentualno odstupanje najbolje jedinke: 2.7318  
Generacija sa najboljom jedinkom: 18885

U tabeli 1. su predviđene postojanosti eksperimentalnim putem dobijene i postojanosti predviđene na bazi modela date i apsolutne vrednosti i procentualne vrednosti razlike između rezultata dobijenih eksperimentalnim putem i predviđeni modelom za koji je uzet najbolji organizam u generaciji.

Redni broj	Eksperimentalni rezultati	Rezultati predviđeni modelom	D(i)	Δ(i)
1	73.000	71.360	1.640	2.247
2	29.000	29.037	-0.037	0.128
3	39.000	39.091	-0.091	0.234
4	99.000	80.146	18.854	19.045
5	52.000	52.025	-0.025	0.048
6	68.000	67.891	0.109	0.161
7	60.000	60.380	-0.380	0.633
8	41.000	41.140	-0.140	0.342
9	39.000	39.137	-0.137	0.350
10	60.000	59.985	0.015	0.025
11	53.000	52.942	0.058	0.109
12	48.000	45.124	2.876	5.991
13	81.000	88.396	-7.396	9.131
14	34.000	33.154	0.846	2.487
15	41.000	41.019	-0.019	0.047

Tabela 1. Eksperimentalne i predviđene vrednosti postojanosti alata pomoću genetskog algoritma

Iz table se vidi da je za veličinu brojčane vrednosti mere uspešnosti Δ(i) najodgovornije neslaganje vrednosti dobijene u četvrtom merenju sa predviđenom vrednošću za to merenje.

U svim ostalim merenjima ovo odstupanje je manje od 10% dok je kod nekih ono manje čak i od 1%. Zbog ovako signifikantne razlike između uspešnosti  $\Delta(i)$  četvrtog merenja u odnosu na ostala, može se zaključiti da postoji mogućnost da su greške postojale pri samom merenju (manifestacije grešaka u materijalu alata kao i radnog predmeta, ljudski faktor, vibracije alata mašine, i razni drugi stohastički poremećaji). Takođe, na osnovu ove razlike između  $\Delta(i)$  može se zaključiti da kvalitet rešenja dobijenog putem genetskog algoritma izuzetno zavisi od pouzdanosti podataka na osnovu kojih se vrši optimizacija.

R br.	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$\gamma$ [°]	$\alpha$ [°]	r [mm]
1	1	1	-1	-1	12	8	0.55
2	1	1	1	-1	12	20	0.55
3	1	-1	1	-1	0	20	0.55
4	1	-1	-1	-1	0	8	0.55
5	1	1	-1	1	12	8	0.75
6	1	1	1	1	12	20	0.75
7	1	-1	1	1	0	20	0.75
8	1	-1	-1	1	0	8	0.75
9	1	-1.682	0	0	-4.1	14	0.65
10	1	1.682	0	0	16.1	14	0.65
11	1	0	-1.682	0	6	3.9	0.65
12	1	0	1.682	0	6	24.1	0.65
13	1	0	0	-1.68	6	14	0.48
14	1	0	0	1.682	6	14	0.82
15	1	0	0	0	6	14	0.65
16	1	0	0	0	6	14	0.65
17	1	0	0	0	6	14	0.65
18	1	0	0	0	6	14	0.65
19	1	0	0	0	6	14	0.65
20	1	0	0	0	6	14	0.65

Tabela 2. Vrednosti faktora eksperimenta i kodirane vrednosti faktora eksperimenta

Na osnovu trofaktornog eksperimentalnog plana određena je sledeća jednačina adekvatnog modela postojanosti alata:

$$L = -5.33 + 6.75\gamma + 1.90\alpha + 40r - 0.5\gamma\alpha - 10.56\gamma r + 1.25\alpha r + 0.90\gamma\alpha r \quad (7)$$

Računske vrednosti prema ovoj jednačini kao i eksperimentalne vrednosti prikazane su u tabeli 3.

Br ek sp	Mere-no	Model prvog reda (7)		Model drugog reda (8)	
	L [mm]	L [mm]	D(i)	L [mm]	D(i)
1	39	47.33	-8.33	35.97	3.03
2	68	76.33	-8.33	63.32	4.68
3	60	68.33	-8.33	50.63	9.37
4	29	37.33	-8.33	32.69	-3.69
5	41	49.33	-8.33	40.03	0.97
6	99	107.33	-8.33	84.98	14.02
7	73	81.33	-8.33	67.29	5.71
8	39	47.33	-8.33	33.35	5.65
9	41	/	/	41.58	-0.58
10	53	/	/	57.87	-4.87
11	34	/	/	30.99	3.01
12	81	/	/	88.69	-7.69
13	48	/	/	47.44	0.56
14	60	/	/	66.17	-6.17
15	64	64.33	-0.33	87.55	-23.55
16	87	64.33	22.7	87.55	-0.55
17	93	64.33	28.7	87.55	5.45
18	52	64.33	-12.3	87.55	35.55
19	111	/	/	87.55	23.45
20	121	/	/	87.55	33.45

Tabela 3. Merene i računске vrednosti prema 3F planu

Funkcija postojanosti određena adekvatnim modelom drugog reda primenom centralnog kompozicionog rotabilnog plana je sledeća:

$$L = -444.03 + 2.84\gamma + 5.54\alpha + 1366.17r + 0.08\gamma\alpha + 2.08\gamma r + 6.37\alpha r - 0.37\gamma^2 - 0.27\alpha^2 - 1089.47r^2 \quad (8)$$

Računske vrednosti prema ovoj jednačini kao i eksperimentalne vrednosti prikazane su u tabeli 3

Ako se uporede merene i računске vrednosti dobijene pomoću faktornog plana eksperimenta može se videti da kod 3F plana najmanje odstupanje je -0.33 a najveće 8.33. Kod modela drugog reda najmanje odstupanje je 0.56 a najveće 14.02. Na osnovu toga se može videti da je to odstupanje manje nego kod genetskog algoritma, a koje za taj isti eksperiment iznosi 18.8. Iz ovog razmatranja su izuzete tačke sa ponavljanjem kod oba modela i genetskog algoritma. Njihova analiza pokazuje prvom redu uticaje greške eksperimenta a to se može oceniti samo kod faktornog plana na osnovu statističkih zakonitosti.

## 5. ZAKLJUČAK

Istraživanje je pokazalo da se genetski algoritam može uspešno primeniti kod određivanja pouzdane funkcije stanja na osnovu koje se mogu odrediti optimalni geometrijski parametri.

Putem evolucionih procesa dobijeno je više kvalitetnih rešenja, koja na različite načine omogućavaju postizanje zadovoljavajućeg približavanja cilju, od kojih je moguće odabrati reprezentativno.

Faktorni planovi su se takođe pokazali uspešni pri modeliranju i optimizaciji postojanosti alata, međutim kod njih se zahteva tačan odnos između vrednosti faktora i odgovarajući broj eksperimenata i njihovo ponavljanje, što nije slučaj sa genetskim algoritmom.

## 6. LITERATURA

- [1] B. Ivković: *Produktivnost u industriji*, Međunarodna menadžerska akademija, Novi Sad, 2006.
- [2] I. Sovilj-Nikić: *Primena genetskog algoritma u optimizaciji geometrijskih parametara odvalnog glodala*, Diplomski-master rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2007.
- [3] K. Bouzakis: *Konzept und technologische Grundlagen zur automatisierten Erstellung optimaler Bearbeitungsdaten beim Waeltzfraesen*, Technische Hochschule Aachen, Aachen, 1981.
- [4] B. Sovilj; *Identifikacija triboloških procesa pri odvalnom glodanju*, Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1988.
- [5] M. Brezočnik: *Uporaba genetskog programiranja v inteligentnih proizvodnih sistemih*, Fakulteta za strojništvo, Maribor, 2000.
- [6] J.R. Koza, *Genetic programming*, The MIT Press: Massachusetts, 1992.
- [7] Kovač P.: *Modeliranje procesa obrade – faktorni planovi eksperimenta*. Monografija, FTN, Novi Sad, 2006.

**Autori:** Prof dr Bogdan Sovilj<sup>1</sup>, Prof dr Miran Brezočnik<sup>2</sup>, Ivan Sovilj-Nikić<sup>1</sup> MSc, Prof dr Pavel Kovač<sup>1</sup>, <sup>1</sup>Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Srbija, <sup>2</sup>Fakulteta za strojništvo Maribor, Slovenija.

E-mail: [bsovilj@uns.ns.ac.yu](mailto:bsovilj@uns.ns.ac.yu)  
[mbrezocnik@uni-mb.sl](mailto:mbrezocnik@uni-mb.sl)  
[pkovac@uns.ns.ac.yu](mailto:pkovac@uns.ns.ac.yu)

Drndarević, D., Petrović, S., Milivojević, M., Panić, S.

## MODELOVANJE PROCESA METALURGIJE PRAHA POMOĆU NEURONSKIH MREŽA

**Rezime:** Dat je postupak i rezultati modelovanja procesa metalurgije praha pomoću veštačkih neuronskih mreža. Model je razvijen na bazi eksperimentalnih podataka sa primenom standardne arhitekture višeslojne neuronske mreže i "backpropagation" algoritma učenja. Rezultati simulacije pokazali su da dobijeni model daje manju grešku aproksimacije od do sada korišćenog statističkog postupka.

**Ključne reči:** Modelovanje, Metalurgija praha, Neuronska mreža, Greška aproksimacije

## MODELLING OF POWDER METALLURGY PROCESS USING NEURAL NETWORKS

**Abstract:** A procedure and results of powder metallurgy modelling using artificial neural networks are given. A model is developed on the base of experimental data applying standard architecture of multilayer neural network and backpropagation learning algorithm. The simulation results showed that obtained model gives less approximation error than statistical procedure used till now.

**Key words:** Modelling, Powder metallurgy, Neural network, Approximation error

### 1. UVOD

U procesu metalurgije praha javlja se relativno veliki broj faktora, koji utiču na tačnost proizvoda i koji nisu uvek upravljivi. S druge strane, kod pojedinih vrsta proizvoda postoje strogi zahtevi u pogledu tolerancija mera i oblika, koje nije moguće ostvariti standardnim postupcima izrade, što ima za posledicu povećanje troškova proizvodnje.

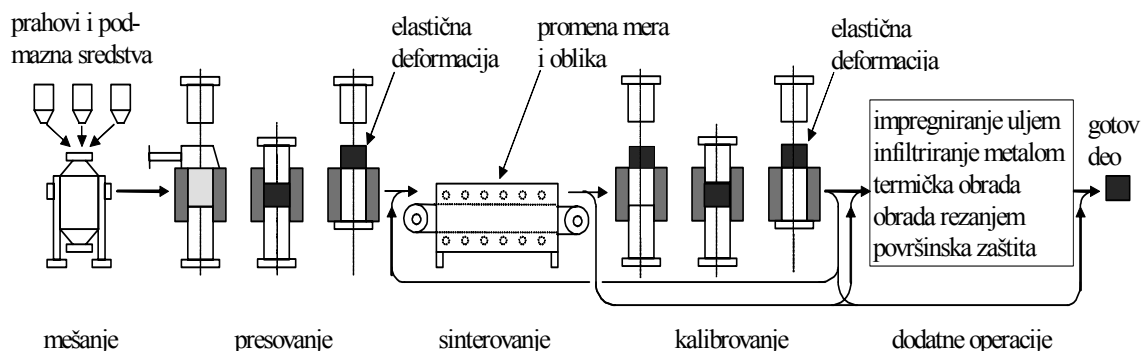
Osnovni cilj rada je rešavanje problema tačnosti izrade sinterovanih delova, dobijenih jednim od postupaka metalurgije praha. Pri tom je potrebno obuhvatiti sve relevantne faktore i povećati njihov interval varijacije do nivoa praktične primene. Posebno je značajno ostvariti veću interaktivnost ulaznih faktora, s obzirom na njen uticaj na konačni rezultat. Da bi se ostvario cilj istraživanja, za modelovanje mera alata dat je postupak zasnovan na primeni neuronskih mreža (NM).

### 2. PROCES METALURGIJE PRAHA

Proces u kome se oblikovanje izvodi hladnim presovanjem praha u zatvorenom alatu, koji se tretira u ovom radu, ima više varijanti koje su prikazane na slici 1.

U svim varijantama procesa sadržane su operacije pripreme i mešanja praha, presovanja i sinterovanja, posle čega se dobija deo konačnog oblika, mera i ostalih karakteristika. Gotov deo se može dobiti i posle operacija kalibrovanja i/ili dodatnih operacija. Radi povećanja gustine u pojedinim varijantama kombinuju se dve, pa i tri operacije sinterovanja i kalibrovanja, odnosno naknadnog presovanja. U poslednjoj fazi izrade mogu se koristiti jedna ili više dodatnih operacija, zavisno od zahteva gotovog dela.

U toku procesa izrade dolazi do promena mera i oblika dela. Pri kalibrovanju dolazi do elastične deformacije alata i elastičnog vraćanja (*springback*) dela posle napuštanja alata, koje predstavlja promenu mera dela u odnosu na mere alata u zavisnosti od mera sinterovanog dela. Pri sinterovanju dolazi kod većine materijala do skupljanja, odnosno promene mera i deformacije dela, a pri presovanju, kao i kod kalibrovanja, prisutno je elastično vraćanje dela posle napuštanja alata. Jedan od najvažnijih zadataka u postupku projektovanja procesa je predikcija mera alata da se dobiju mere dela u zadatim tolerancijama.



Slika 1. Proces metalurgije praha sa presovanjem praha u zatvorenom alatu



### 3. VIŠESLOJNA NEURONSKA MREŽA

Višeslojna NM je sa *feedforward* tokom signala i kod nje postoji potpuna jednosmerna povezanost susjednih slojeva preko procesirajućih elemenata. Opšta arhitektura ove NM data je na slici 2. Ona se sastoji iz ulaznog sloja sa  $N$  procesirajućih elemenata,  $H$  "skrivenih" slojeva sa  $N_1, N_2, \dots, N_H$  procesirajućih elemenata, respektivno i izlaznog sloja sa  $M$  procesirajućih elemenata.

Funkcija NM sastoji se iz dve faze: faze učenja i faze generisanja izlaza (radne faze). Učenje se izvodi pomoću *backpropagation* algoritma, poznatog i pod nazivom "Generalisano delta pravilo" [1].

Proces učenja je iterativan i u prvoj etapi jedne iteracije određuju se izlazi procesirajućih elemenata u svim slojevima od ulaznog do izlaznog. U ulaznom sloju se ne vrši obrada ulaznih signala  $x_1, x_2, \dots, x_N$ , već samo grananje signala prema svim procesirajućim elementima drugog sloja. U ulaznom i svim skrivenim slojevima dodat je po jedan jedinični (*bias*) ulaz  $x_0, x_0^1, x_0^2, \dots, x_0^H$ , čija je vrednost stalno postavljena na jedan. Jedinični ulazi omogućuju svakom elementu da nađe svoju vrednost praga u procesu učenja. Izlazi  $x_j^l$  u prvom skrivenom sloju dobijaju se kao zbir proizvoda težina  $w_{ij}$  međusobnih veza elemenata  $i$  i  $j$  i ulaza  $x_i$ , na koji se primenjuje odgovarajuća transfer funkcija. Kod ove vrste NM transfer funkcija je najčešće sigmoidna. Na isti način dobijaju se izlazi elemenata u ostalim slojevima i na kraju se dobijaju izlazi NM  $y_1, y_2, \dots, y_M$ .

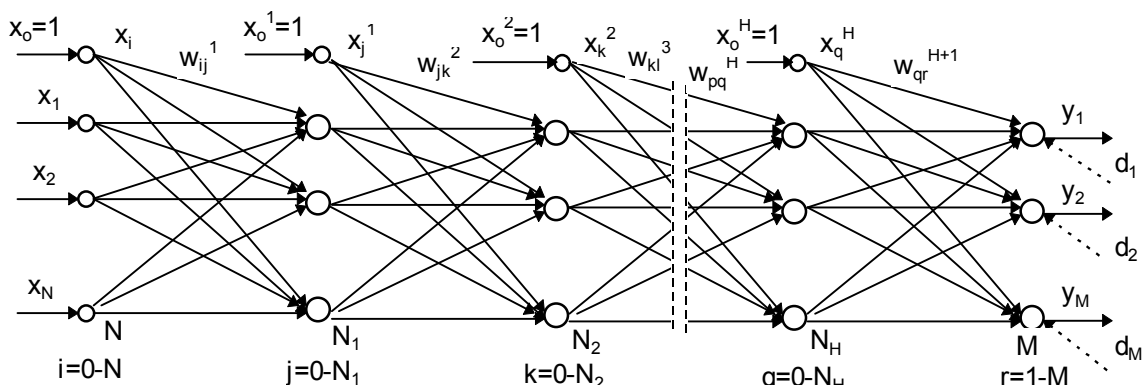
U drugoj etapi, primenom gradijentnog metoda na srednju kvadratnu grešku izlaza, koja predstavlja razliku željenih izlaza  $d_1, d_2, \dots, d_M$  i izlaza mreže  $y_1, y_2, \dots, y_M$ , vrši se korekcija težina. Korekcija težina izvodi se prostiranjem greške izlaza unazad od izlaznog do ulaznog sloja. Iteracije se izvode za odgovarajuće parove ulaza/izlaza i pri tom se smanjuje greška izlaza, dok ne dostigne zadatu vrednost prema izabranom kriterijumu. Kao kriterijum tačnosti može se, pored srednje kvadratne greške, uzeti maksimalna greška, srednja greška itd.

### 4. MODEL PROCESA

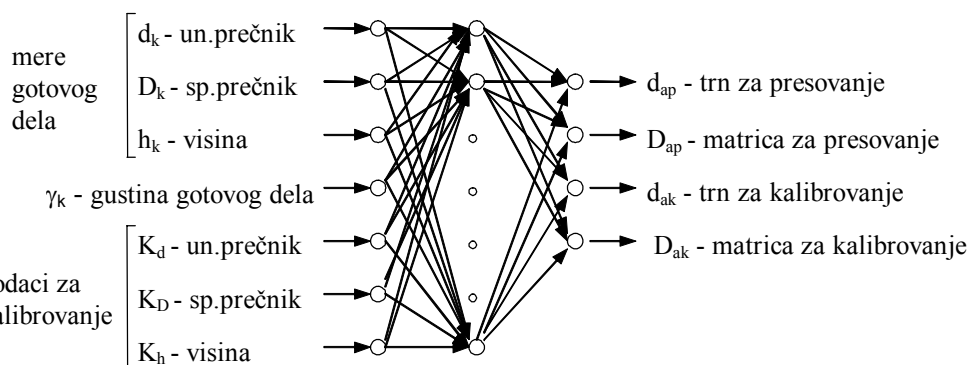
Model procesa na bazi NM čine ulazni podaci, arhitektura NM i algoritam učenja.

Model je formiran za određenu vrstu sinterovanih delova - klizne ležaje, čiji su oblici, mere i tolerancije definisani standardom ISO 2795. Za materijal ležaja uzeta je bronza sa oznakom P4013Z. Eksperimentalnim programom obuhvaćeno je 53 ležaja po 3 serije sa raspodelom unutrašnjeg prečnika koji odgovara raspodeli u proizvodnom programu za dati tip ležaja.

Na osnovu analize procesa u [2] izabrani su relevantni faktori i formirana arhitektura modela (slika 3.). Arhitektura modela formirana je dovođenjem na ulaze



Slika 2. Opšta arhitektura višeslojne neuronske mreže



Slika 3. Arhitektura modela mera alata za metalurgiju praha

NM relevantnih faktora, koji su poznati pri projektovanju procesa, a na izlazu su dobijene tražene karakteristike, u ovom slučaju mere alata, potrebne za projektovanje.

Primenjen je standardni *backpropagation* algoritam sa korekcijom težina posle svake iteracije i sa "momenat"

članom, na bazi kog je formiran program za simulaciju. U okviru programa za simulaciju izvršena je priprema ulaznih, odnosno eksperimentalnih podataka. Randomiziran je redosled ulaznih podataka, posle čega je izvršena podela ukupnog skupa ulaznih podataka na podatke za učenje i

podatke za testiranje, tako što je od ukupnog broja ulaznih podataka (159) približno 1/4, odnosno 39 podataka namenjeno za testiranje. Izlazni podaci su izraženi u parametarskom obliku (kao razlika vrednosti mera alata i mera dela, dobijenih datom operacijom), koji je dao manje vrednosti greške u odnosu na direktnu primenu nominalnih vrednosti izlaza. Normalizacija ulaznih podataka je izvedena u obliku linearne transformacije u intervalu (0,1) skupa ulaza i skupa željenih izlaza. Zajedničkom normalizacijom skupa za učenje i skupa za testiranje dobijeni su bolji rezultati u odnosu na posebnu normalizaciju. Interval početnih vrednosti težina ( $\pm 0,3$ ) je određen optimizacijom u odnosu na minimalnu grešku testiranja. Kriterijum tačnosti izražen je u obliku greški učenja i testiranja koje predstavljaju srednju vrednost apsolutnog odstupanja izlaza modela od željenih, odnosno eksperimentalnih vrednosti izlaza za odgovarajući skup ulaznih podataka.

Optimizacija parametara modela izvedena je prema kriterijumu minimalne greške aproksimacije i maksimalne brzine konvergencije [3,4], primenjujući poseban postupak zbog prisustva fenomena "prekomernog učenja" (opisan u [5]).

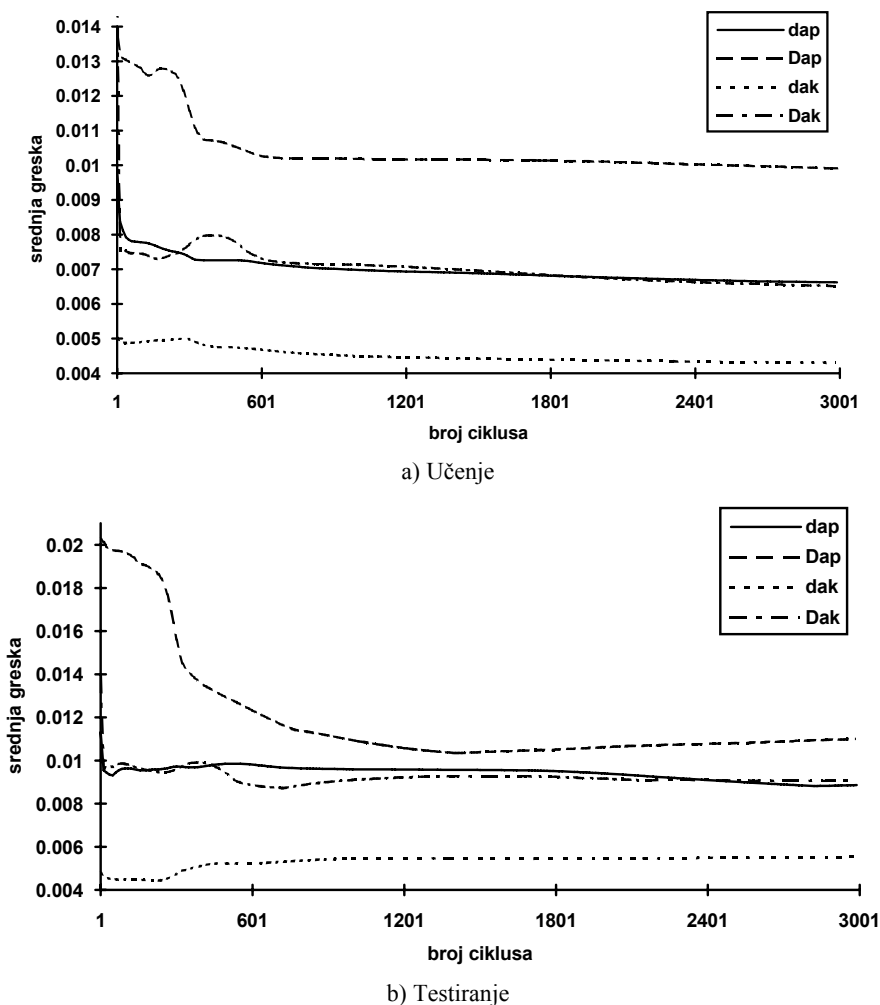
## 5. REZULTATI SIMULACIJE

Rezultati učenja i testiranja modela sa optimalnim parametrima dati su na slici 4. Dobijeni dijagrami pokazuju

da greške učenja, posle veoma brzog opadanja u samom početku procesa učenja i variranja u narednoj fazi, posle približno 600 ciklusa ulaze u područje konvergencije. Slično se ponašaju i greške testiranja, koje se posle dospevanja u globalni minimum (na 2826 ciklusa je optimum, odnosno minimum zbira grešaka testiranja), sporo povećavaju sa povećanjem broja ciklusa zbog pomenutog efekta "prekomernog učenja".

Rezultati simulacije modela, dati u radu, poređeni su sa standardnim postupkom, baziranim na statističkoj obradi eksperimentalnih podataka. Dati postupak je izabran jer, pored toga što se najčešće nalazi u praktičnoj praksi, između njega i modela na bazi NM postoji određena analogija. Poređenje je sprovedeno za dimenzije alata. Postupak je izveden kretanjem unazad, od dimenzija kalibrovanog dela do otpreska, uzimajući u obzir dimenzionalne promene pri kalibrovanju, sinterovanju i presovanju. Određeni su koeficijenti promena dimenzija, bazirani na skupu podataka za učenje pomoću NM. Dimenzije alata su određene za skup podataka za testiranje, koristeći dobijene koeficijente. Za poređenje je korišćen isti oblik srednje greške kao kod NM.

Rezultati poređenja dati su u tabeli 1. Rezultati iz tabele 1. pokazuju da model na bazi NM daje manju srednju grešku pojedinačnih izlaza osim  $d_{ak}$  i manju ukupnu srednju grešku za 26,4% od statističkog postupka.



Slika 4. Greške učenja i greške testiranja modela

Model	$d_{ap}$	$D_{ap}$	$d_{ak}$	$D_{ak}$	$\Sigma$
Sa statističkim postupkom	0.01389	0.01636	0.00458	0.01185	0.04668
Sa NM	0.00882	0.01094	0.00552	0.00906	0.03434

Tabela 1. Srednje greške za statistički postupak i model sa NM

## 6. ZAKLJUČAK

Praktični značaj modelovanja procesa metalurgije praha pomoću veštačkih NM je u smanjenju odstupanja mera delova proizvedenih ovom tehnologijom, što se postiže pre svega definisanjem odgovarajućih mera alata uz adekvatno izabrane režime procesa. Time se smanjuje procenat netačnih delova i izbegava višestruka izrada visokokvalitetnih alata.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da modeli sa mrežama uče aproksimaciju zadatih karakteristika na bazi eksperimentalnih podataka i zato nemaju numeričku preciznost kao statistički postupak. Njihova prednost je u obuhvatanju većeg broja uticajnih faktora i njihove međuzavisnosti, kao i u posedovanju opštijih funkcionalnih oblika i iterativnom približavanju rešenju.

Dati model na bazi standardne arhitekture troslojne mreže sa odgovarajućim algoritmom učenja predstavlja početni korak u uvođenju postupka modelovanja pomoću neuronskih mreža u istraživanju procesa metalurgije praha. U daljem razvoju ovih postupaka planira se korišćenje mreža sa dva ili više "skrivenih" slojeva, nestandardnih arhitektura, kao i drugih tipova mreža.

## 7. LITERATURA

- [1] Rumelhart D.E., Hinton G.E., Williams R.J., "Learning representation by back-propagating errors", Nature, vol.323, 1986 (533-536)
- [2] Drndarevic D., Reljin B., "Modelling of Powder Metallurgy Process Accuracy Using Multilayer Neural Networks", Powder Metallurgy, The Institute of Materials, London, Vol.43, No.1, 2000. (1-5)
- [3] Drndarevic D., Djuricic M., Panic S., "Modelling of PM processes using Backpropagation algorithm", 2004 PM World Congress, Vol. 5, Vienna, 2004. (249-254)
- [4] Drndarevic D., Djuricic M., "Modelling of the Dimensional Changes during Sintering", Science of Sintering. SANU, Belgrade, Vol. 37, No. 3, 2005. (181-187)
- [5] Hecht-Nielsen R., "Neurocomputing", Reading MA, Addison-Wesley, 1990.

**dr Dragoljub Drndarević, prof., mr Slobodan Petrović, pred., mr Milovan Milivojević, pred., dr Stjepan Panić, prof.,** Visoka poslovno-tehnička škola, Sv. Save 34, 31000 Užice, Srbija. Tel.: 381 31 512013, Fax: 381 31 512789,  
E-mail: [dragoljub.drndarevic@vpts.edu.rs](mailto:dragoljub.drndarevic@vpts.edu.rs)  
[slobodan.petrovic@vpts.edu.rs](mailto:slobodan.petrovic@vpts.edu.rs)  
[milovan.milivojevic@vpts.edu.rs](mailto:milovan.milivojevic@vpts.edu.rs)  
[stjepan.panic@vpts.edu.rs](mailto:stjepan.panic@vpts.edu.rs)

Jovanović, J., Đukić, R.

## UPRAVLJANJE PROIZVODNIM PROCESIMA KORIŠĆENJEM APLIKATIVNOG SOFTVERA MS PROJECT

**Rezime:** U radu je prikazan jedan od načina za modeliranje strukture složenog proizvoda koji može da posluži za projektovanje proizvodnih ciklusa, kao osnove za primenu koncepta „tačno na vreme“ (just in time), za planiranje i upravljanje proizvodnjom uz korišćenje softvera MS Project. Gledano u tom kontekstu vremenska dimenzija predstavlja podlogu za merenje valjanosti projektovanih i ostvarenih rešenja.

**Ključne reči:** Planiranje, upravljanje, proizvodnja, projekat

## MANAGING OF PRODUCTION PROCESSES BY USING SOFTWARE MS PROJECT

**Abstract:** This paper shows a method for structure modeling of a complex product which can serve as a base for application of a general concept for projection of manufacturing cycle by using software MS Project. That way we have created circumstances for Just-in-time concept application in productive and business cycle. Viewed from that perspective of time dimensions, it represents a base for value measuring of projected and accomplished solutions.

**Key words:** Planning, management, production, project

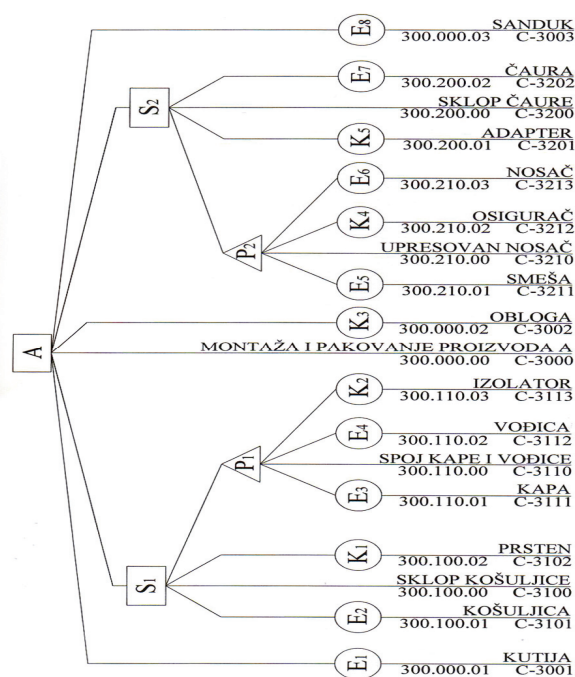
### 1. UVOD

U radu je prikazano modeliranje strukture i projektovanje proizvodnog ciklusa korišćenjem softverskog alata MS Project. Proizvodnja se odvija na bazi porudžbina na fleksibilnim tehnološkim sistemima. Kupac je stavljen u centar poslovnih zbivanja što podrazumeva visok nivo kvaliteta, najnižu cenu u odnosu na konkurente, veliki broj varijanti proizvoda koji se proizvode kako u malim tako i u velikim serijama. Savremeni stil menadžmenta nametnuo je ideju da treba stvoriti resursno štedljiv i fleksibilan sistem koji proizvodi samo ono što se može prodati. Stalnim poboljšanjima na proizvodu i u proizvodnji, maksimalnim skraćenjem proizvodnog ciklusa, proizvodnjom u pravom trenutku bez zaliha i međuskladišta minimiziraju se troškovi poslovanja. Originalne ideje nameću nov pristup planiranju i upravljanju proizvodnjom uz korišćenje odgovarajućih aplikativnih softvera.

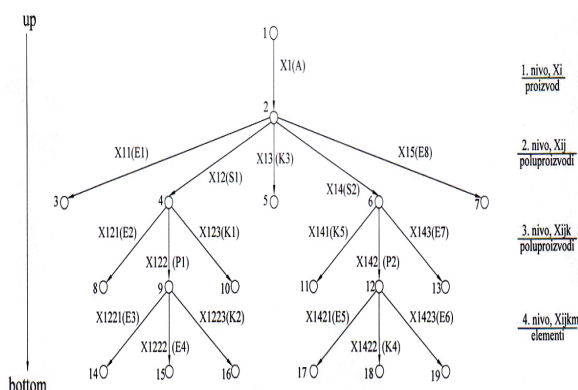
### 2. PRIKAZ KONSTRUKCIONE I STRUKTURNE SASTAVNICE

Konstruktivno-tehnološka dokumentacija služi za definisanje i oblikovanje proizvoda i predstavlja osnovu industrijskog načina proizvodnje. Crteži sklopa i detalja proizvoda, konstrukciona sastavnica, tehnološki postupci izrade i organizacija stručnih sadržaja predstavljaju osnov za sve aktivnosti planiranja, pripreme proizvodnje i upravljanja proizvodnjom. Na bazi znanja, uverenja i zahteva okruženja konstruktor definiše proizvod uvažavajući pre svega, funkcionalni aspekt. U okviru konstrukcione sastavnice (šeme raščlanjavanja) definišemo funkcionalne nivoe polazeći od elemenata (delova, pozicija) koji predstavljaju prvi nivo, pa preko podsklopova i sklopova dolazimo da zadnjeg n-tog nivoa (slika 1).

Respektujući tehnološki i proizvodni aspekt, koristeći teoriju grafova i metodu višenivovskog indeksnog označavanja lukova grafa na slici 2 prikazana je strukturna sastavnica složenog proizvoda.



Slika 1. Konstrukciona sastavnica složenog proizvoda



Slika 2. Strukturna sastavnica proizvoda A



### 3. PROJEKTOVANJE PROIZVODNOG CIKLUSA

Pre početka korišćenja MS Project-a potrebno je nacrtati strukturnu sastavnicu proizvoda (slika 2) i utvrditi projektovana vremena proizvodnje pojedinih proizvodnih faza (tabela 1).

Strukturnu sastavnicu proizvoda (slika 2) možemo iskoristiti višestruko za projektovanje proizvodnog ciklusa. Na slikama 3 i 4 prikazan je postupak za projektovanje ciklusa u MS Projectu. Ako vremena proizvodnih faza, koja smo prethodno utvrdili, i vremenske rezerve želimo da prikazemo u najranijem početku tada gantogram crtamo u desno polazeći od spoljašnjih čvorova grafa (3, 5, 7, 8, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19) iz strukturne sastavnice (slika 3). Ukoliko projektujemo ciklus sa prikazom vremenskih rezervi i proizvodnih faza u najkasnijem početku (princip just-in-time) tada prvo odredimo kritičan put u grafu pa zatim crtamo gantogram u levo polazeći od završnog čvora 1 (slika 4).

Za dobijanje prikaza (Gantt Chart) datih na slikama 3 i 4 u programu je potrebno prvo „definirati projekat“ tj. u oknu Tasks izabrati vezu Define The Project i uneti datum početka proizvodnje (11.05.2009). Sledeći korak se odnosi na definisanje radnog kalendara odnosno definisanje opšteg radnog vremena (8h dnevno, 40h nedeljno i 20 dana mesečno) i neradnih dana.

Nakon podešavanja osnovnih parametara koji se odnose na naš „projekat“ potrebno je pažljivo pristupiti izradi liste zadataka što u našem slučaju predstavljaju proizvodne faze.

Nakon unosa svih proizvodnih faza (kolona Task Name) potrebno je uneti i njihovo trajanje (kolona Duration).

Proizvodne faze treba „povezati“ tj. napraviti zavisnost između njih koristeći strukturnu sastavnicu (veze između proizvodnih faza prikazane su strelicama na gantogramu). U zavisnosti od toga koji prikaz želimo da dobijemo (slika 3 ili slika 4) veze između proizvodnih faza biće različite.

Radi lakšeg praćenja projekta potrebno je definisati sumarne zadatke (dužina trajanja proizvodnog ciklusa, dužina trajanja proizvodnje sklopa S1 i S2, podsklopa P1 i P2) i ključne tačke na projektu (početak proizvodnje proizvoda A, završetak sklopa S1, završetak podsklopa P1, završetak sklopa S2, završetak podsklopa P2 i završetak proizvodnje proizvoda A).

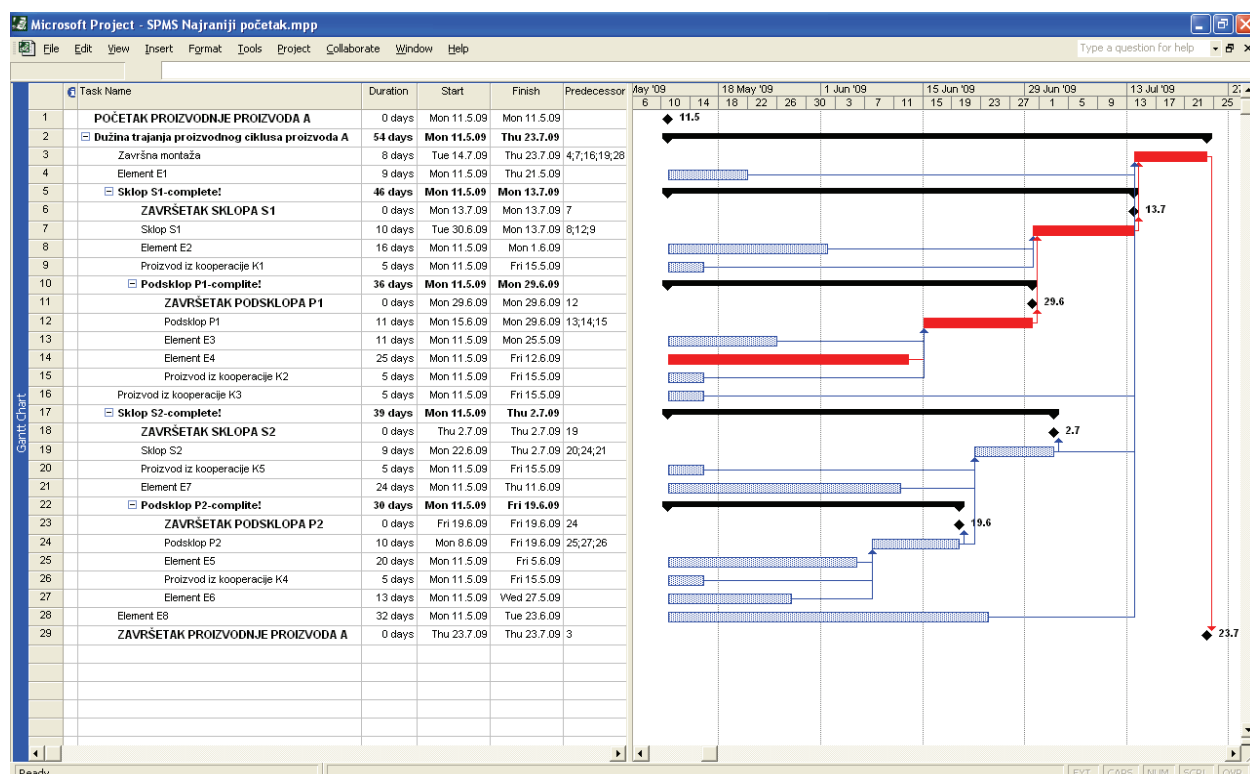
Na slikama 3 i 4 pored Gantt-ovog dijagrama sa leve strane prikazana je tabela u kojoj se nalaze najbitniji podaci o proizvodnim fazama a to su:

1. Ime (Task Name),
2. Dužina trajanja (Duration),
3. Datum početka proizvodnje (Start),
4. Datum završetka proizvodnje (Finish) i
5. Redni brojevi proizvodnih faza sa kojima su u vezi (Predecessors).

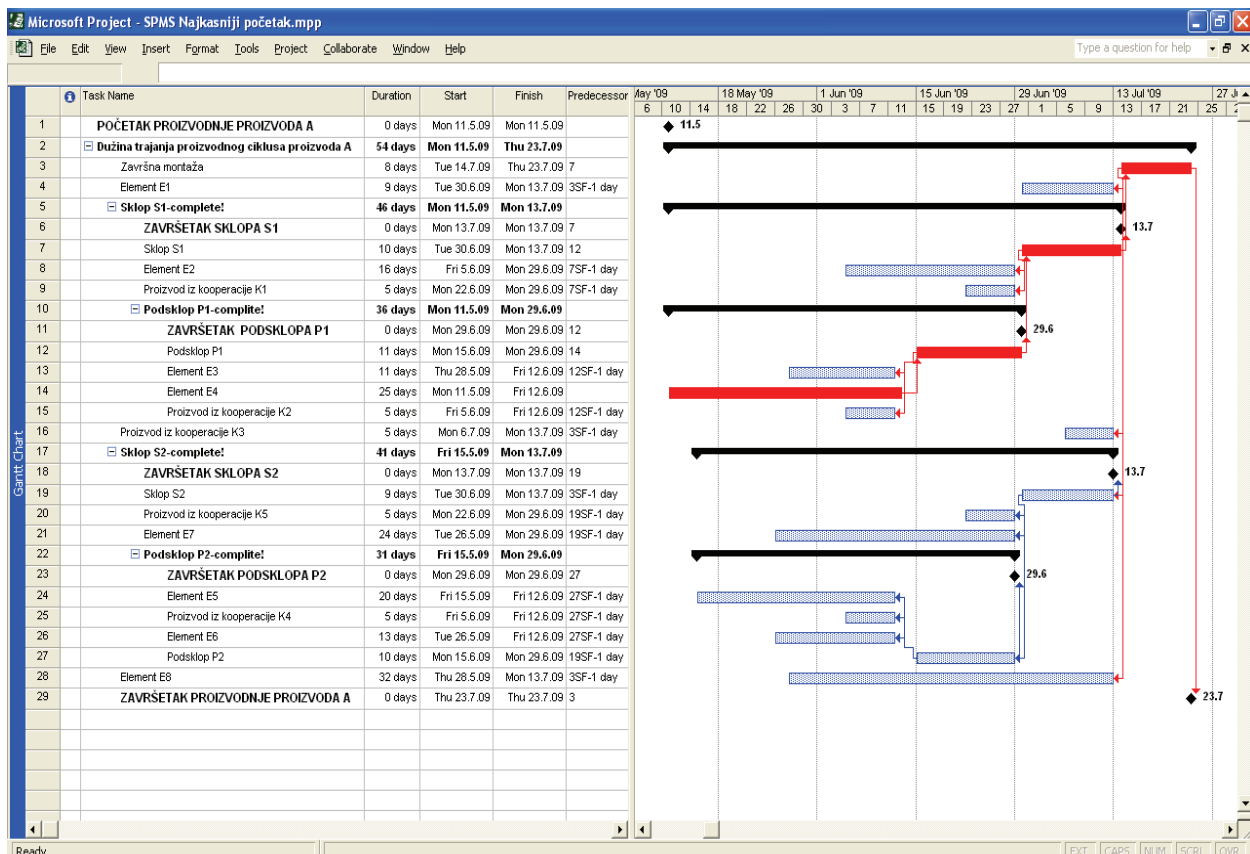
Graf prikazan na slici 4 možemo transformisati u mrežni dijagram (slika 5) izborom opcije View, pa iz padajuće liste odaberemo opciju Network Dijagram. Na slici 5 prikazan je mrežni dijagram bez sumarnih zadataka koji se pojavljuju u prikazu Gantt Chart (slika 3 i slika 4).

Proizvodna faza	Projektovana vremena (dana)
E1	9
E2	16
K1	5
E3	11
E4	25
K2	5
P1	11
S1	10
K3	5
X1	8
E5	20
K4	5
E6	13
P2	10
K5	5
E7	24
S2	9
E8	32

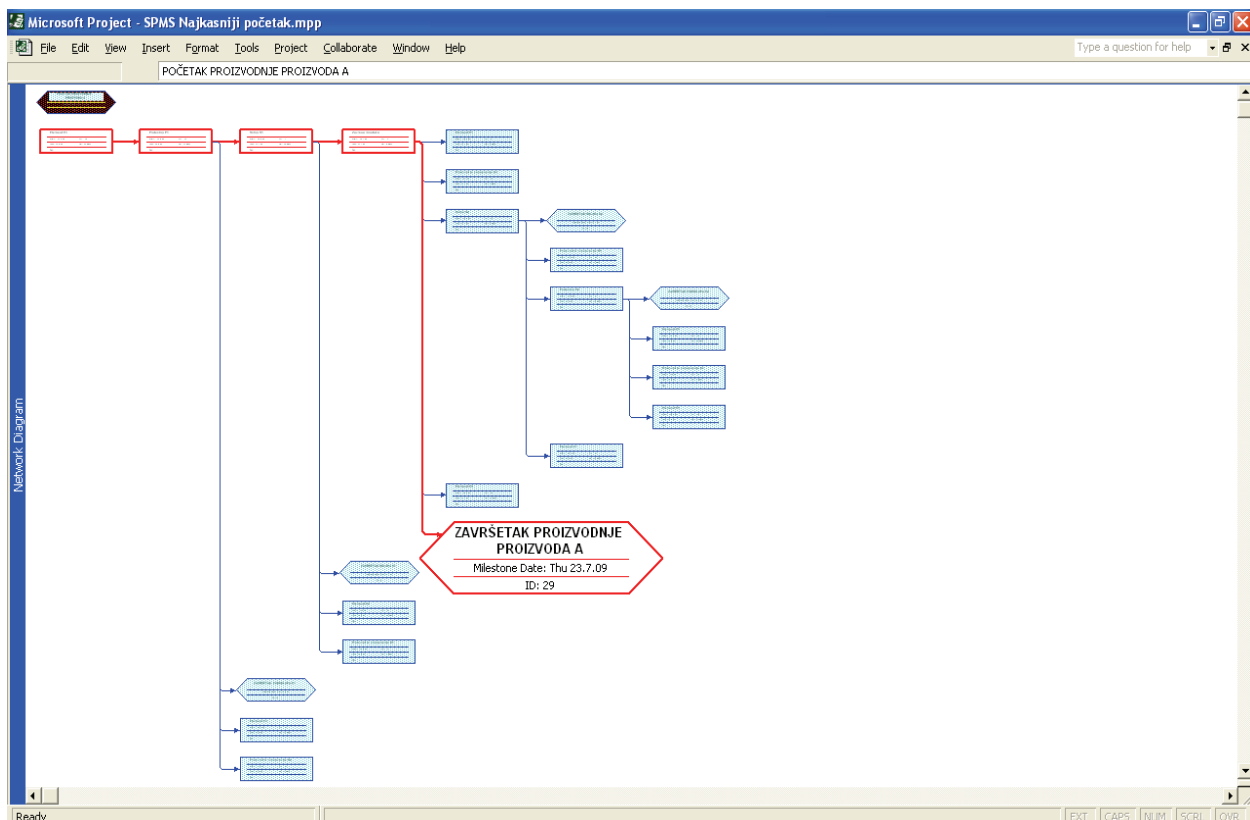
Tabela 1. Projektovana vremena proizvodnje



Slika 3. Projektovanje proizvodnog ciklusa složenog proizvoda A – najraniji početak



Slika 4. Projektovanje proizvodnog ciklusa složenog proizvoda A – najkasniji početak



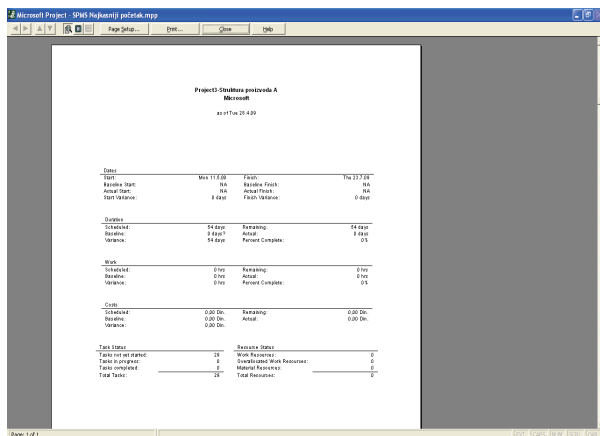
Slika 5. Prikaz mrežnog dijagrama (Network Dijagram)

Softverski paket omogućava dobijanje izveštaja pod sledećim nazivima:

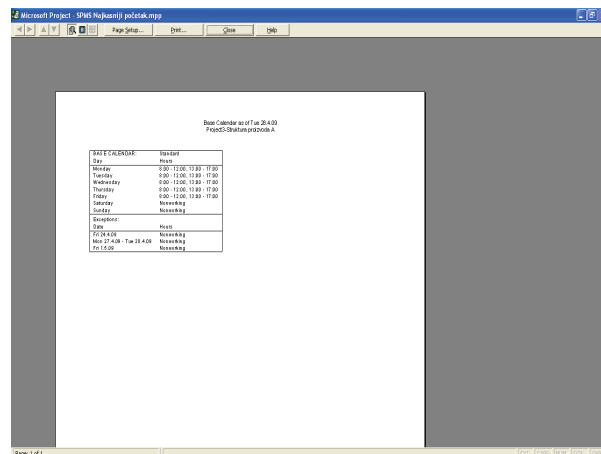
1. Sumarni izveštaj projekta (slika 6),
2. Aktivnosti najvišeg nivoa (slika 7),
3. Kritične aktivnosti (slika 8),
4. Ključne tačke "projekta" (slika 9),

5. Radni kalendar (slika 10),
6. Aktivnosti čija realizacija nije počela (slika 11), ...

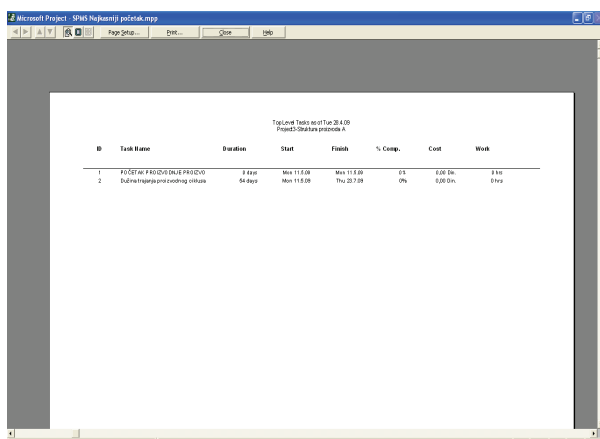
Izveštaji koji su prikazani vezani su samo za zadatke dok sam program omogućuje dobijanje izveštaja koji su vezani i za resurse. Izveštaji se dobijaju izborom opcije View a zatim iz padajuće liste odaberemo opciju Reports.



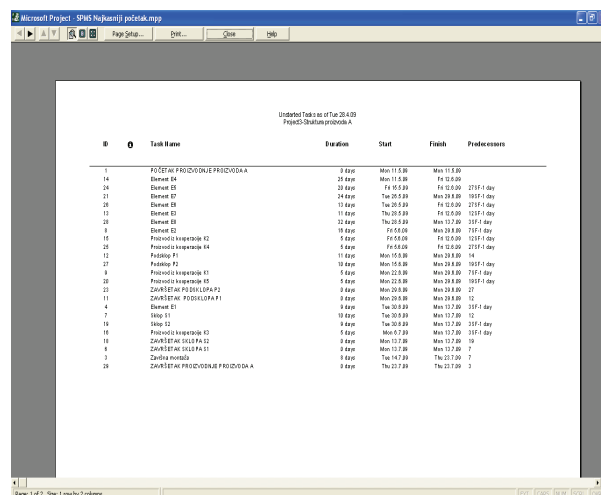
Slika 6. Sumarni izveštaj projekta



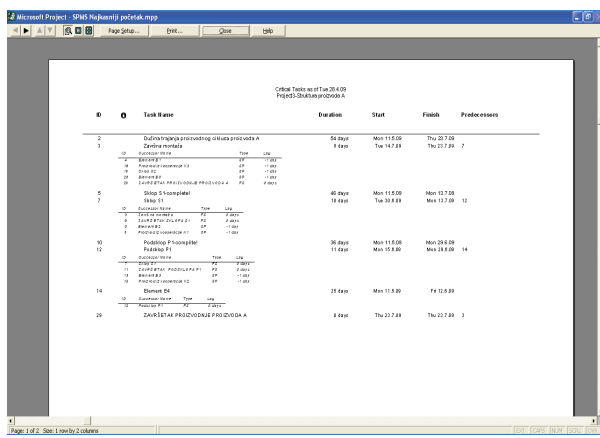
Slika 10. Radni kalendar



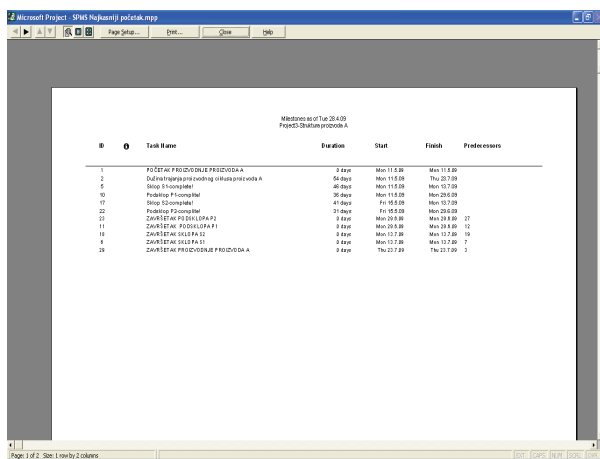
Slika 7. Aktivnosti najvišeg nivoa



Slika 11. Aktivnosti čija realizacija nije počela



Slika 8. Kritične aktivnosti



Slika 9. Ključne tačke "projekta"

#### 4. ZAKLJUČAK

Projektovana dužina proizvodnog ciklusa iznosi  $T_p = 54$  (dana). Kritične proizvodne faze (kritičan put u gantogramu ili mreži) čini proizvodnja pozicije  $E_4$ , montaže podsklopa  $P_1$ , sklopa  $S_1$  i finalnog proizvoda  $X_1$  (A). Ako početak proizvodnje terminiramo za 11.05, ugovorenu količinu proizvoda možemo isporučiti 23.07.2009 godine.

#### 5. LITERATURA

- [1] Pyron T., Project 2002, Kompjuter biblioteka, Čačak, 2003.
- [2] Đukić R., Jovanović J., Stefanović M., Utvrđivanje tehnološke dužine proizvodnog ciklusa, 34. JUPITER konferencija, Beograd, 2008.
- [3] Đukić R., Modeliranje strukture složenog proizvoda za podršku JUST-IN-TIME konceptu, 30. Jubilarno savetovanje proizvodnog mašinstva SCG, Vrnjačka Banja, 2005.
- [4] Đukić R., Planiranje i upravljanje proizvodnjom složenog proizvoda, X Internacionalni simpozijum iz PROJECT MANAGEMENT-A, Zlatibor, 2006.
- [5] Đukić R., Đukić J., Planiranje proizvodnje, Viša tehnička škola Čačak, Čačak, 2007.

**Autori:** Jelena Jovanović, Radisav Đukić, Visoka škola tehničkih strukovnih studija, Čačak, Svetog Save 65, 32000 Čačak, Srbija, Tel/Fax: +381 32 222 321.  
 E-mail: [jelena.jovanovic@live.com](mailto:jelena.jovanovic@live.com)  
[radisavdjukic@yahoo.com](mailto:radisavdjukic@yahoo.com)  
[vtscacak@eunet.rs](mailto:vtscacak@eunet.rs)



Rad po pozivu

Petrović, P. B., Jakovljević, Ž. B.

### 3D DIGITALIZACIJA OBJEKATA KOMPLEKSNE GEOMETRIJE INTEGRACIJOM LASERSKOG TRIANGULACIONOG SENZORA I INDUSTRIJSKOG ROBOTA

*Rezime: U okviru ovog rada izlažu se konceptualni okviri nove klase metroloških sistema baziranih na integraciji industrijskog robota i laserskih triangulacionih senzora za beskontaktno dimenziono merenje. Navodi se osnovna arhitektura sistema, razmatraju ključni aspekti sprege ova dva sistema i navode metodološki okviri za obradu senzorskih signala i generisanja 3d digitalnog modela skeniranog objekta složene prostorne geometrije. U cilju provere praktične upotrebljivosti izgrađena je demonstraciona laboratorijska instalacija na kojoj su sprovedeni odgovarajući eksperimenti i provere.*

*Ključne reči: Industrijski robot, laserski triangulacioni senzor, 3d digitalizacija*

### 3D DIGITALIZATION OF OBJECTS HAVING COMPLEX GEOMETRY USING INTEGRATED LASER TRIANGULATION SENSOR AND INDUSTRIAL ROBOT

*Resume: This paper gives conceptual framework for new class of metrology systems based on integration of industrial robot and laser triangulation sensors for contactless dimensional measurement. The basic architecture of system is given together with the key points of the interface of these two systems and methodological framework for sensor signals processing and generation of 3D digital model of scanned object with complex spatial geometry. For the purpose of practical verification, laboratory installation is developed and experiments were carried out.*

*Key words: Industrial robot, laser triangulation sensor, 3D digitalization*

#### 1. UVOD

Ekstremno male serije i ekstremno visoka varijantnost proizvoda, koja je karakteristična za aktuelno stanje tržišta u kontekstu masovne personalizacije proizvoda, nameće pred savremene proizvodne sisteme, posebno u delu procesa završne montaže, delikatne tehnološke zahteve, među kojima je jedan od najkritičnijih identifikacija kvaliteta geometrije dela, komponente ili neke međufaze u formiranju sklopa koji se montira. Savremeni standardi kvaliteta nameću potrebu da se praktično nad svakim delom/komponentom koji se uvodi u proces mora sprovesti neka vrsta identifikacije njegovih geometrijskih svojstava. Slično je i sa sklopom koji se montira, gde se gotovo za sve međufaze takođe sprovodi identifikacija ostvarenih geometrijskih svojstava, prepoznaju odstupanja od nominala i sprovode korektivne intervencije ukoliko su one neophodne. Ovo je tipična situacija za mnoge industrije, počev od industrije automobila, bele tehnike, elektronike, pa do proizvoda kao što su zaverene metalne konstrukcije [6]. Kod zavarenih metalnih konstrukcija, gde se proces zavarivanja javlja kao jedan od osnovnih procesa tehnologije montaže, identifikacija geometrije je ključni zahtev sa aspekta izvodljivosti procesa, ostvarenog kvaliteta finalnog proizvoda i ekonomičnosti proizvodnje u celini.

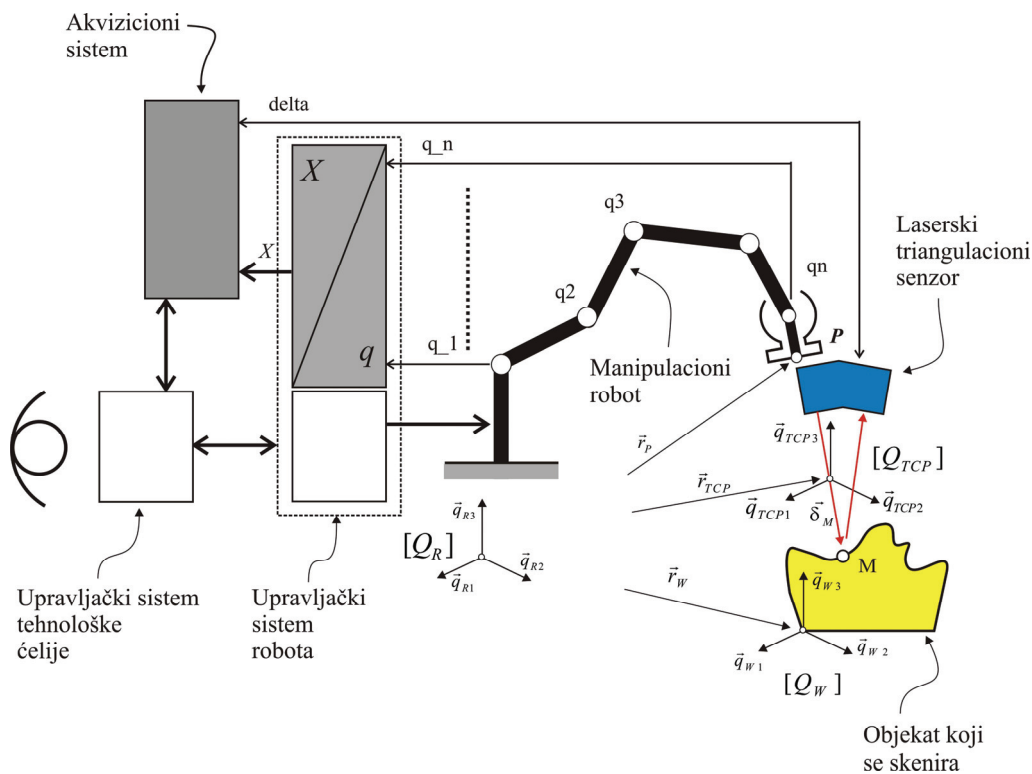
Ugradnjom optičkog senzora na vrh standardnog industrijskog robota, najčešće antropomorfne konfiguracije, dobija se moćan tehnološki sistem, izuzetne fleksibilnosti i izuzetne tačnosti, sa potencijalom realizacije jedne vrlo široke klase tehnoloških zadataka za domen dimenzione metrologije u industrijskim uslovima, direktno na proizvodnoj liniji. Očigledan tehnološki potencijal koji nastaje ovakvom simbiozom istovremeno otvara niz inženjerskih zadataka i izazova. Rešavanje ovih zadataka je neophodan uslov za njegovu praktičnu valorzaciju u realnim

industrijskim uslovima. Ti zadaci se mogu svrstati u sledeće grupe:

- Izbor optimalnog senzorskog sistema za konkretan slučaj primene;
- Planiranje optimalne trajektorije i profila brzine, posebno razvoj interaktivnih alata za generisanje trajektorije na bazi nominalnog geometrijskog objekta koji se skenira;
- Izgradnja virtuelnog metrološkog modela sistema robot-senzor-objekat koji se skenira za potrebe simulacije radnog zadatka robota i senzorskog sistema;
- Obrada senzorskih signala i generisanje ravanskog ili prostornog modela skeniranog objekta;
- Autonomna kompenzacija greške pozicije i orijentacije objekta koji se skenira, uključujući i zadatak prepoznavanja i lociranja objekta koji se skenira u radnom prostoru robota;
- Kalibracija sistema i mapiranje i kompenzacija greške robota.

Tehnologija beskontaktnih optičkih senzora koji su pogodni za primenu u konkretnom slučaju nudi sledeće mogućnosti: 1) tačkasti CCD ili PSD laserski sistemi bazirani na jednostrukoj ili dvostrukoj optičkoj triangulaciji, 2) konfokalni tačkasti laserski sistemi, 3) CCD ili CMOS profilometarski sistemi bazirani optičkoj triangulaciji i 4) triangulacioni sistemi sa struktuiranim (kodiranim) izvorom bele svetlosti. Pregled prethodno navedenih senzorskih tehnologija navodi se u okviru [7] i [2]. Svi navedeni senzorski sistemi su kompaktni i jednostavno se ugrađuju na vrh robota. Sa metrološke tačke gledišta, industrijski robot u ovakvom sistemu ima funkciju programabilne platforme za kretanje/manipulaciju senzorskog sistema u prostoru. U mnogim situacijama zahteva se kombinacija dva različita senzorska sistema čime





Slika 1: Koncept robotizovanog mernog sistema.

se dobijaju hibridna rešenja sa sasvim novim, unapređenim metrološkim performansama.

U okviru ovog rada saopštava se deo rezultata koji su ostvareni u okviru projekta MA14035 INTOSA<sup>1</sup> u okviru koga su razvijene konceptualne osnove jednog robotizovanog sistema za 3d digitalizaciju objekata kompleksne geometrije na bazi CCD laserskog senzora sa tačkastom optičkom trinagulacijom za primenu na linijama za montažu u automobilske industriji i za kontrolu geometrije otkovaka u okviru robotizovanih ćelija za obradu kovanjem. Praktična upotrebljivost ovog koncepta proverena je i demonstrirana u laboratorijskim uslovima u okviru Centra za nove tehnologije Mašinskog fakulteta u Beogradu.

## 2. KONCEPT SISTEMA

Merni sistem se sastoji iz: 1) industrijskog robota odgovarajuće kinematske konfiguracije, 2) laserskog triangulacionog senzora i 3) akvizicionog sistema za kondicioniranje senzora i prikupljanje podataka (slika 1). Senzor se priključuje na vrh robota,  $P$ , preko odgovarajućeg adaptera. Mada je u opštem slučaju senzor moguće priključiti na proizvoljan način, iz praktičnih razloga pogodno je da se senzor ugradi tako da se obezbedi kolinearost i/ili ortogonalnost sa glavnom osama simetrije terminalne priključne ploče robota.

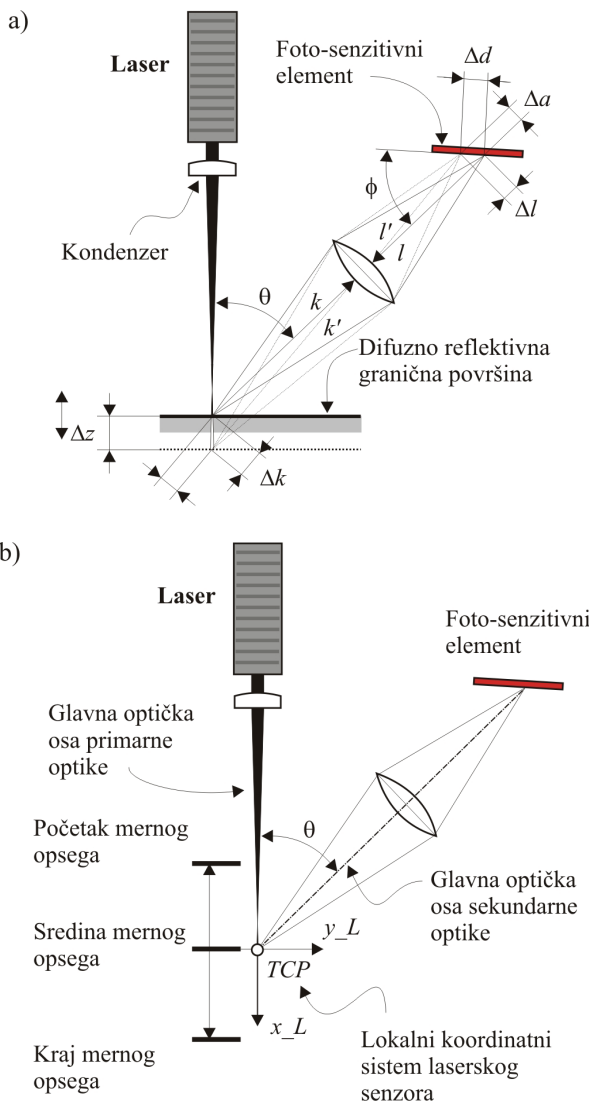
Tipična konstrukcija laserskog senzora sa optičkom trinagulacijom prikazana je na slici 2. Princip rada senzora je u osnovi jednostavan. Poluprovodnički laser male snage, najčešće sa maksimalnom snagom od 1mW generiše monohromatsku koherentnu svetlost koja se kroz primarni optički sistem kolimira na površinu objekta čija se površina skenira. Optička osa primarnog optičkog sistema je značajna u tehnološkom smislu, jer se za nju vezuje jedna od osa

lokalnog koordinatnog sistema. Emitovani svetlosni snop prečnika od 10 do 100 $\mu$ m, reflektuje se u svim pravcima, pokoravajući se Lambertovom zakonu difuzne refleksije [4]. Jedan deo reflektovane svetlosti reflektuje se i u pravcu optičke ose sekundarnog optičkog sistema, koji zahvaćeni deo svetlosti fokusira na optoelektrični pretvarač. Tačka na koju pada fokusirana svetlost zavisi od udaljenosti površi objekta koji se skenira. Primenom trinagulacione geometrije se na osnovu informacije o lokaciji te tačke u odnosu na lokalni koordinatni sistem linijskog pretvarača izračunava nepoznata distanca. Primenom visokorezolutnih linijskih CCD ili CMOS digitalnih pretvarača, uz odgovarajuće algoritme za primarno procesiranje senzorskog signala ostvaruje se rezolucija i tačnost na podmikronskom nivou. Brzina skeniranja se kreće od nekoliko stotina odmeraka u sekundi pa do nekoliko desetina kHz. Trinagulacioni senzori ove vrste se odlikuju velikom robusnošću i metrološkom stabilnošću. U zavisnosti od izabranih konstrukcionih karakteristika optičkog sistema senzora, ostvaruju se različiti merni opsezi, kao i njihova projekcija u odnosu na telo senzora (*stand off distance*).

U tehnološkom smislu, kod određivanja TCP robota u konkretnom slučaju primene, pogodno je da se jedna od osa poklopi sa glavnom osom primarnog optičkog sistema, i da se za koordinatni početak lokalnog koordinatnog sistema laserskog senzora izabere tačka sredine mernog opsega. Ovu činjenicu treba koristiti kod planiranja trajektorije robota, tako što treba težiti da se TCP odnosno, koordinatni početak lokalnog koordinatnog sistema laserskog senzora uvek nađe na površini objekta koji se skenira. Drugi zahtev, koji je od posebnog značaja za tačnost ukupnog mernog sistema, vezan je za ograničenje koje nameće koncept optičke trinagulacije. Modeliranje i kalibracija laserskog senzora se uvek izvode pod uslovom da je glavna osa emitovanog i kolimiranog laserskog snopa ortogonalna na površinu objekta čija se distanca meri. Odstupanje od ortogonalnosti degradira tačnost laserskog sistema, što ima svoje jasno utemeljenje u Lambertovom zakonu difuzne refleksije. Pored toga, inklinacija merene površi smanjuje energiju reflektovane

<sup>1</sup> Projekat MA14035: **Primena inteligentnih senzorskih sistema u razvoju integrisane automatizacije realnih i virtuelnih procesa proizvodnog preduzeća - INTOSA**, dvogodišnji projekat za oblast tehnološkog razvoja koji finansijski podržava Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije

svetlosti, što u određenim slučajevima može da ima drastične reperkusije na rad pretvaračkog sklopa senzora, koji zbog nedovoljne pobude može da ostane bez validnog merenja. Generalno pravilo je da inklinacija bude unutar intervala od  $\pm 15^\circ$ . Ovo je posebno značajno kada objekat poseduje jako reflektivnu površinu i/ili površinu sa izraženom teksturom. Za slučaj referentne površine od belog papira, inklinacija u navedenom intervalu generiše grešku od 0.2% mernog opsega, što za slučaj mernog opsega od 100 mm iznosi čak 200 $\mu$ m, što se mora smatrati respektivnom greškom. Ukoliko se inklinacija u oba pravca zadrži u intervalu od  $\pm 5^\circ$  onda greška nije veća od 0.12% mernog opsega senzora. Drugi problem se odnosi na problem senke odnosno pojavu fizičke prepreke koja u potpunosti ili delimično preseca optičku osu sekundarnog optičkog sistema, kada senzor ne može da generiše validni rezultat.



Slika 2. Princip funkcionisanja laserskog triangulacionog senzora (a) i definicija njegovog lokalnog koordinatnog sistema (b).

U oba prethodna problematična slučaja za funkcionisanje laserskog senzora, primena robota dobija svoj puni značaj. Inherentna svojstva manipulabilnosti omogućavaju da se pravilnim izborom trajektorije uvek obezbede: 1) ortogonalnost glavne optičke ose na površinu objekta koji se skenira, 2) lociranje početka TCP koordinatnog sistema laserskog senzora na površini objekta koji se skenira i 3) eliminacija problema senke uvek kada je to fizički izvodivo. Upravo mogućnost zadovoljenja prethodna tri

uslova simbiozu robota i laserskog triangulacionog senzora čini visokovrednim tehnološkim entitetom.

Integracija robota i laserskog senzora se u metrološkom smislu ostvaruje preko akvizicionog sistema. Akvizicioni sistem, odnosno PC ili neki drugi mikroprocesorski sistem opremljen odgovarajućim interfejsima i akvizicionim softverom, mora da ostvari funkciju komunikacije sa sistemom upravljanja robota i mikroprocesorskim sistemom laserskog senzora. Akvizicioni sistem vrši sinhronizovanu akviziciju unutrašnjih koordinata robota očitavanjem koordinata enkodera aktuatora upravljivih stepeni slobode robota i merne distance do objekta koji se skenira. U sukcesivnim trenucima uzorkovanja akvizicioni sistem povlači i memoriše vektor koji ima  $(n + 1)$  elemenata, gde je  $n$  označen broj aktivnih stepeni slobode robota. Od akvizicionog sistema se zahteva da poseduje funkciju diskontinualnog povlačenja enkoderskih signala i sa njima uparene merene distance, onda kada se to planom merenja zahteva. Po pravilu, zadatak skeniranja se sastoji iz niza sekvenci koje se sastoje iz podsekvenci skeniranja i podsekvenci repozicije robota. Svaka od sekvenci kao izlazni rezultat generiše vektor jedne konture, najčešće kao kontinualnu vremensku seriju. Ovakav modalitet rada podrazumeva postojanje bidirekcionne komunikacije između akvizicionog sistema sa jedne strane i upravljačkog sistema robota i laserskog senzora sa druge strane. Akvizicioni sistem može da bude deo čelijskog kontrolera ili da se locira u sloju odmah ispod čelijskog kontrolera. U svakom slučaju on je nadređen mikroprocesorskom sistemu laserskog senzora i u hijerarhijskom smislu paralelizovan sa upravljačkom sistemom robota.

### 3. OBRADA SENZORSKOG SIGNALA

Vremenske serije za svaku od skeniranih kontura zahtevaju odgovarajuću obradu pre nego što se uvedu u sistem za generisanje digitalnog 3d modela objekta. Obrada senzorskih signala se može grupisati u četiri zadatka:

- Uklanjanje šuma i mikrogeometrijskih detalja tekture u vremenskom domenu;
- Transformacija vremenskog u prostorni domen;
- Diskretizacija konture u prostornom domenu;
- Dekompozicija konture u prostornom domenu i formiranje njenog konačnog oblika;

Ključni zahtev kod izbora tehnike obrade vremenskih serija je fazona korektnost i mogućnost multirezolucijske analize. Tehnike bazirane na vejljet transformaciji ispunjavaju oba navedena zahteva, uključujući i mogućnost delimične ili potpune rekonstrukcije polaznog vektora.

Diskretnom vejljet transformacijom (DWT – Discrete Wavelet Transform) [3] signal  $f$  se prikazuje kao zbir njegove aproksimacije  $A_j f$  na određenoj rezoluciji  $J$  i detalja  $D_j f$ ,  $j \in [1, J]$  koji su mu oduzeti prilikom prelaska sa viših na niže rezolucije.

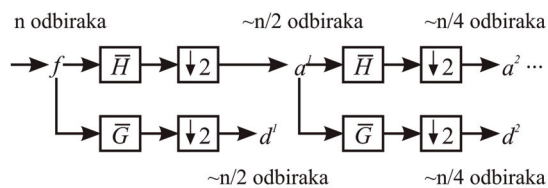
$$f = A_J f + \sum_{j=1}^J D_j f = \sum_n a_n^j \phi_{j,n} + \sum_j \sum_n d_n^j \psi_{j,n} \quad (1)$$

Aproksimacije i detalji signala su izraženi preko koeficijenata aproksimacije  $a_n^j$  i detalja  $d_n^j$  koji predstavljaju udeo odgovarajućih funkcija – funkcija skaliranja  $\phi_{j,n}$  i vejljeta  $\psi_{j,k}$  u signalu. Ovi koeficijenti se izračunavaju na osnovu relacija (2) i (3) pomoću brzog jednodimenzionalnog hijerarhijskog algoritma – takozvane šeme filtriranja koja omogućuje reverzibilnost filtracije i algoritam za inverznu vejljet transformaciju (IDWT).

$$d_j^k = \sum_n \overline{g_{n-2k}} a_n^{j-1} \quad (2)$$

$$a_j^k = \sum_n h_{n-2k} a_n^{j-1} \quad (3)$$

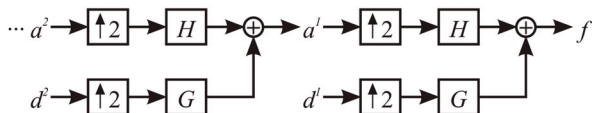
(a)



$\boxed{X}$  - konvolucija sa filtrom X

$\boxed{\downarrow 2}$  - zadržavanje svakog drugog odbirka

(b)



$\boxed{X}$  - konvolucija sa filtrom X

$\boxed{\uparrow 2}$  - Dodavanje nule između svaka dva odbirka

Slika 3: Šema filtriranja za proračun: (a) direktne DWT; (b) inverzne DWT

Korišćenjem šeme filtriranja prikazane na Slici 3 koeficijenti detalja  $d_n^j$  se izračunavaju na osnovu koeficijenata aproksimacije  $a_n^{j-1}$  i to njihovim filtriranjem visokofrekventnim filtrom  $\bar{G}$  a zatim uzimanjem svakog drugog odbirka. Analogno, koeficijenti aproksimacije  $a_n^j$  se izračunavaju filtriranjem koeficijenata  $a_n^{j-1}$  niskofrekventnim filtrom  $\bar{H}$  i uzimanjem svakog drugog odbirka. Filteri  $H$ ,  $G$ ,  $\bar{H}$  i  $\bar{G}$  čiji su impulсни odzivi dati koeficijentima  $(h_n)$ ,  $n \in \mathbb{Z}$  i  $(g_n)$ ,  $n \in \mathbb{Z}$  predstavljaju simetrične konjugovane filtere i izračunavaju se na osnovu odabranog vejvleta. Reverzibilan algoritam za izračunavanje signala  $f$  na osnovu koeficijenata  $a_n^j$  i  $d_n^j$ , tj. za izvođenje IDWT, se može opisati šemom filtriranja datom na Slici 3b. Koeficijenti aproksimacije  $a_n^{j-1}$  se izračunavaju tako što se između svaka dva koeficijenta  $a_n^j$  i  $d_n^j$  ubacuje po jedna nula, a zatim se vrši konvolucija ovako dobijenih sekvenci sa filterima  $H$  i  $G$  i rezultujuće sekvence se, konačno, sabiraju. Algoritam za izvođenje IDWT može se iskoristiti za izračunavanje aproksimacije signala na rezoluciji (nivou DWT)  $J - Af$  ako se koeficijenti detalja  $d_n^j$ ,  $j \in [1, J]$  tokom proračuna proglase za nule. Detalji  $Df$  se mogu izračunati na sličan način.

Postojanje IDWT je izuzetno značajno za dekoplovanje šuma, mikrogeometrije teksture površine dela koji se skenira i njegove makrogeometrije [4]. Pravilnim izborom vejvleta koji će se koristiti u DWT reprezentaciji polaznog signala kao i nivoa transformacije  $-J$  moguće je navedene komponente prepoznati na određenim nivoima aproksimacije ili detalja signala.

Prelaz iz vremenskog u prostorni domen u opštem slučaju narušava uniformnost diskretizacije konture. U zavisnosti od oblika trajektorije skeniranja i lokalnih svojstava površi objekta koji se skenira, u većoj ili manjoj meri dolazi do narušavanja uniformnosti diskretizacije senzorskih signala koja je postojala u vremenskom domenu, sa pojavom nagomilavanja tačaka u nekim delovima konture i njihovog razređivanja u drugim delovima konture. Problem se rešava tako što se inicijalni vektor konture u prostornom domenu ponovo diskretizuje primenom odgovarajućih interpolacionih algoritama [1]. Ova oblast je vrlo studiozno istraživana decenijama u kontekstu geometrijskog modeliranja prostornih

objekata i nije predmet istraživanja koja se prezentiraju u okviru ovog rada. U cilju zaokruživanja razvijenog koncepta u metodološkom smislu korišćeni su interpolatori nultog reda, ostavljajući prostor za primenu naprednijih tehnika u fazi generisanja digitalnog 3d modela u nekom od CAD okruženja.

#### 4. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA

Na slici 4 prikazana je instalacija za eksperimentalnu verifikaciju koncepta robotizovanog skeniranja, koja je realizovana u okviru Centra za nove tehnologije Mašinskog fakulteta u Beogradu. Sistem se sastoji iz 1) robota antropomorfne konfiguracije sa šest stepeni slobode, japanskog proizvođača Kawasaki, model JS10, 2) laserskog triangulacionog senzora nemačkog proizvođača Micro Epsilon, model optoNCDT 1700-100 (karakteristike su navedene u Tabeli 1), 3) PC akvizicionog sistema sa odgovarajućim interfejsima i softverskom podrškom i 4) radnog stola.

Merni opseg (MO):	100 mm
Početak mernog opsega ( <i>stand off</i> ):	70 mm
Linearnost:	$\pm 0.08\%$ MO
Rezolucija:	6 $\mu\text{m}$
Maksimalna brzina uzorkovanja:	2.5 kHz
Laserska dioda	
Talaska dužina: 100 mm	670nm, crvena
Max. snaga:	1mW
Klasa lasera:	2(II)
Dozvoljeni intenzitet ambijentalne svetlosti:	10.000lx
Prečnik laserske tačke na sredini MO:	60 $\mu\text{m}$
Temperaturna stabilnost:	0.01 % FSO/K
Radna temperatura:	0...+50 °C
Otpornost na vibracije (IEC 68-2-6):	2g/20...500Hz
Otpornost na udar (IEC 68-2-29):	15g / 6ms
Težina:	550g

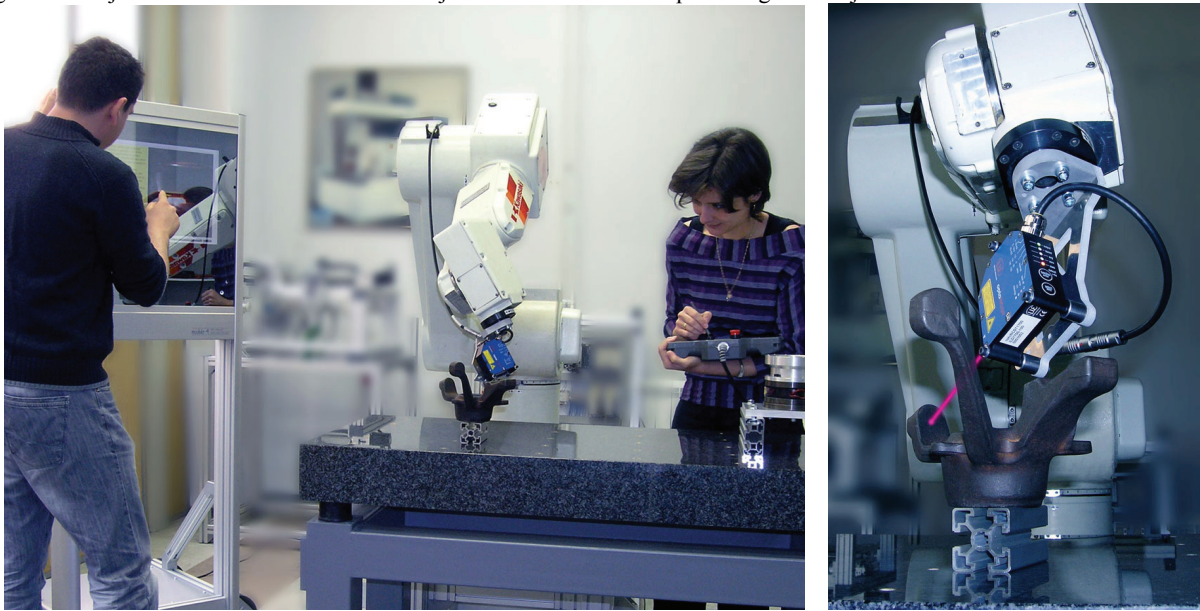
Tabela 1: Tehničke karakteristike laserskog trinagulacionog senzora ME optoNCDT 1700-100

Primer konture skeniranog poprečnog preseka otkovka kućišta ležajne jedinice prednjeg točka automobila u finalnom obliku prikazan je na slici 5. Kontura je skenirana brzinom od 100 mm/sec što daje prostornu rezoluciju od 40 $\mu\text{m}$ . Prikazane su samo one tačke koje su vidljive u horizontalnoj ravni ortogonalne projekcije. U konkretnom slučaju, primenom ovakvog mernog sistema moguće je realizovati kontrolu svih tolerisanih mera otkovka neposredno posle uklanjanja venca opsecanjem, čime se ostvaruje funkcija kontrole procesa kovanja direktno na proizvodnoj liniji. Ovakav pristup omogućava brzu reakciju na pojavu odstupanja, čime se garantuje visok kvalitet i stabilnost proizvodnje. Na slici 6 je prikazana kalibraciona kriva robota na nivou radnog stola izvedena skeniranjem etalon lenjira dužine 500 mm. Uočava se prisustvo greške izazvane nesavršenostima manipulacionog robota koje dolaze od: 1) mehanike kinematskog lanca robota, 2) akcionog sistema i 3) sistema upravljanja robota. U konkretnom slučaju ta greška iznosi  $\pm 0.142$  mm što je 40% veće od greške koju specificira proizvođač, a koja iznosi  $\pm 0.1$  mm u kompletnom radnom prostoru. Kalibraciona kriva izvedena je primenom multirezolucijske analize originalnog signala prevedenog iz vremenskog u prostorni domen. Dekompozicija signala izvedena je na 11 nivoa pomoću DWT transformacije, korišćenjem db4 vejvleta [3]. Dekomponovani signal, odnosno niz njegovih aproksimacija i korespondentnih detalja pikan je na slici 7. Eliminacijom visokofrekventnih

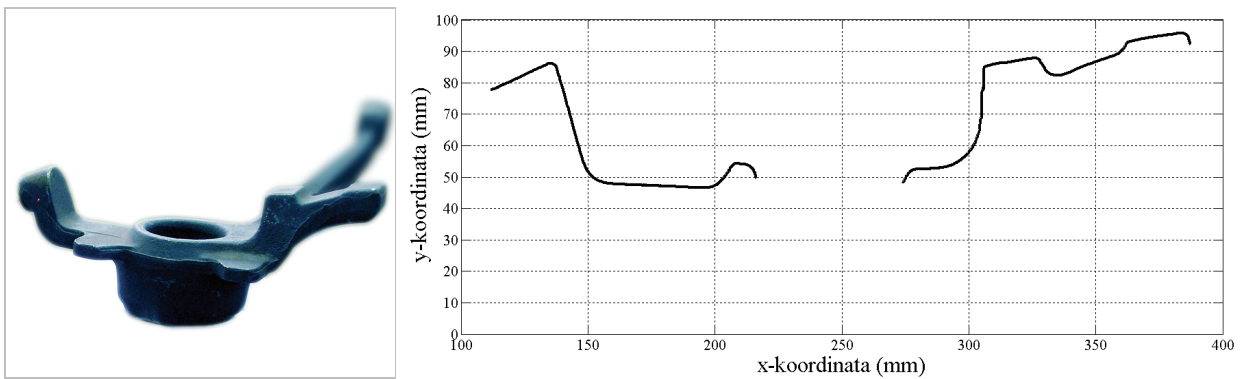


sadržaja koji dolaze od robota i šuma u senzorskim signalima, dobijena je kalibraciona kriva. Pažljivom analizom signala detalja na svih 11 nivoa izabran je A10 nivo

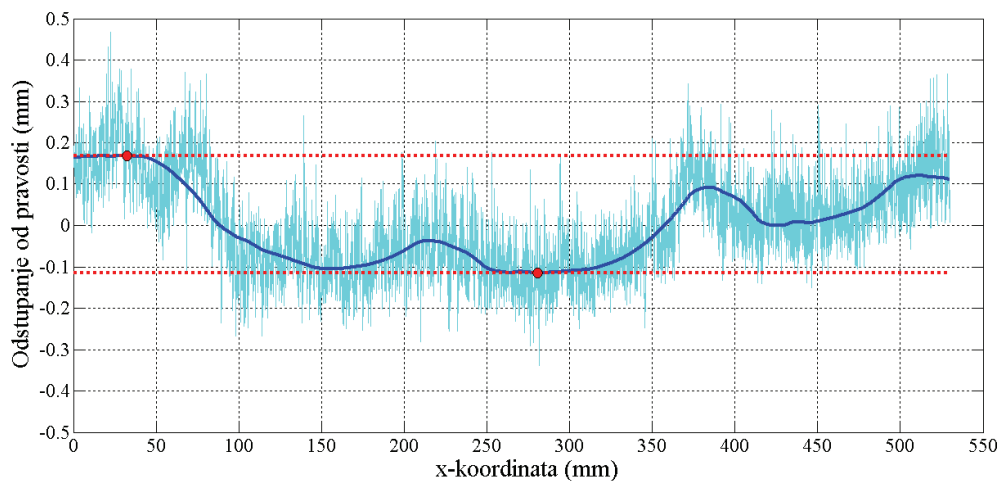
aproksimacije kao dominantni nivo na kome se nalazi greška koja dolazi od nesavršenosti mehanike i upravljanja robota. Komponente greške koje dolaze od



Slika 4: Demonstraciona instalacija razvijena za potrebe eksperimentalne verifikacije kritičnih istraživačkih sadržaja koncepta robotizovanog skeniranja objekata kompleksne prostorne geometrije primenom laserskih triangulacionih senzora.

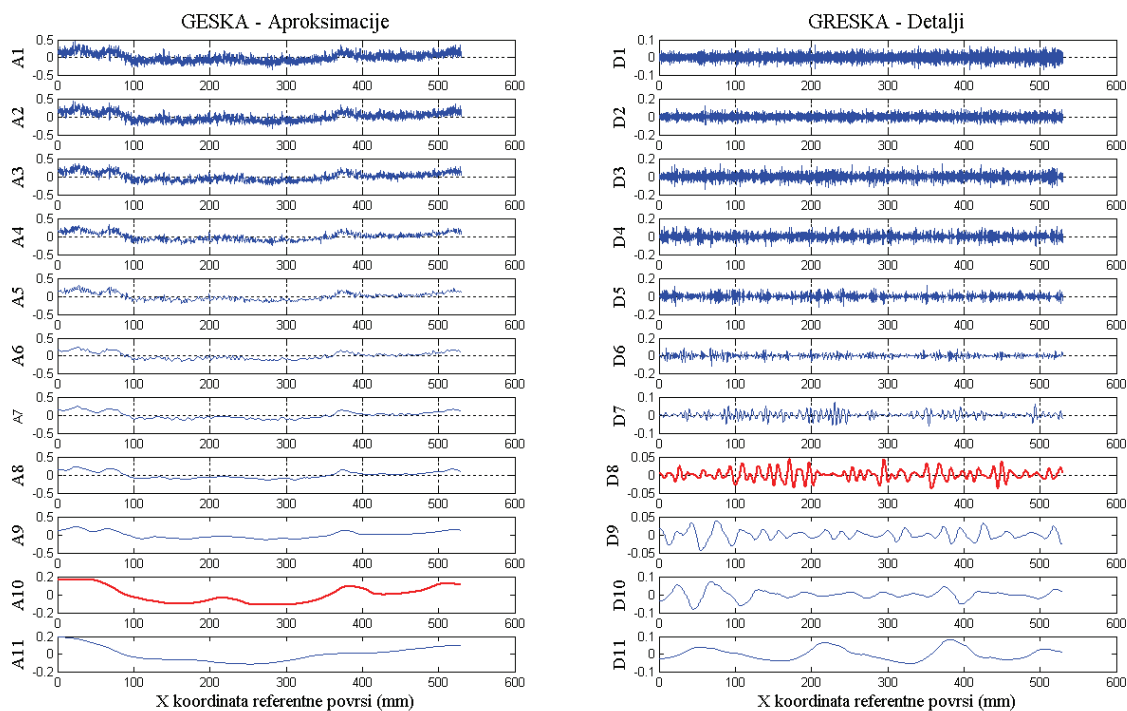


Slika 5: Primer skenirane finalne konture poprečnog preseka otkovka u glavnoj vertikalnoj ravni prevedene u prostorni domen. U levom uglu prikazana je fotografija skeniranog otkovka iz ugla koji pokazuje izgled skeniranog preseka.



Slika 6: Identifikovana greška robota u horizontalnoj ravni na nivou radnog stola. Multirezolucijskom analizom izdvojena je bazna komponenta greške ostvarene trajektorije robota (tamno plava); Originalni signal sadrži visokofrekventne komponente šuma koji dolazi od laserskog senzora i šum + vibracije koje dolaze od manipulacionog rebeta.





Slika 7: Dekomponovana signal greške kretanja vrha robota (u konkretnom slučaju odstupanje od pravosti) primenom DWT transformacije i db4 vejvleta.

vibracija vrha robota grupisane su oko D8 nivoa detalja. Visokofrekventne komponente greške koje dolaze od senzorskog sistema nalaze se na nivou D1 i niže. Greška metrološkog sistema u celini određena je greškom koju generiše manipulacioni robot.

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan koncept sistema za robotizovnu digitalizaciju prostornih objekata kompleksne geometrije baziranog na primeni tačkastih laserskih senzora sa jedstrukom triangulacijom. Prikazana je struktura sistema i diskutovani kritični detalji kao i sistem za akviziciju i obradu senzorskih signala. Praktična funkcionalnost predloženog koncepta eksperimentalno je verifikovana u laboratorijskim uslovima primenom antropomorfnog manipulacionog robota sa 6 stepeni slobode i laserskim triangulacionim senzorom mernog opsega 100mm i brzinom uzorkovanja 2.5 kHz. Sistem je pokazao zadovoljavajuće ponašanje, a metrološke performanse su dominantno uslovljene tačnošću manipulacionog robota. U konkretnom slučaju ostvarena je tačnost bolja od  $\pm 200 \mu\text{m}$  u kompletnom radnom prostoru. Razvijeni sistem ima opštu primenljivost na linijama za montažu proizvoda srednjeg i velikog gabarita, kao i na proizvodnim linijama za izradu delova od plastičnih masa, odlivaka i otkovaka.

## Zahvalnica

Autori se zahvaljuju kompaniji ROBOTAKT iz Valjeva na privremenom ustupanju robota za potrebe sprovođenja eksperimentalne verifikacije razvijenog robotizovanog mernog sistema.

## 11. LITERATURA

[1] Bernardini, F., Bajaj, C., L., Chen, J., Schikore, D., R., Automatic Reconstruction of 3D CAD Models from Digital Scans, International Journal of Computational

Geometry and Applications, Vol. 9, No 4/5, pp: 327-369, August 1999

[2] D'Apuzzo, N., *Overview of 3D surface digitization technologies Europe2006*, Corner B.D., Li P., Tocheri M. (Eds.), Three-Dimensional Image Capture and Applications VI, Proc. of SPIE-IS&T Electronic Imaging, SPIE Vol. 6056, San Jose (CA), USA.

[3] Mallat, S., G., *A Theory for Multiresolution Signal Decomposition: The Wavelet Representation*, IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol II, No. 7, pp: 674-693, July 1989.

[4] Petrović, P., Jakovljević, Ž., Novi koncept identifikacije procesa kalandriranja primenom multirezolucijske analize geometrije profila poprečnog preseka gumiranog korda, 30. Savetovanje proizvodnog mašinstva SCG, Zbornik radova, pp: 257-262, Vrnjačka Banja, 2005

[5] Petrović, P., *Rubberized Cord Thickness Measurement Based on Laser Triangulation – Part I: Technology*, FME Transaction, Vol 35, pp: 77-84., November 2007

[6] Reinhart G, Tekouo W. *Automatic programming of robot-mounted 3D optical scanning devices to easily measure parts in high-variant assembly*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2009, doi:10.1016/j.cirp.2009.03.125.

[7] Schwenke, H., et al., *Optical Methods for Dimensional Metrology in Production Engineering*, Annals of the CIRP, Vol. 51, No. 2, pp: 685-699, 2002

**Autori: Prof. dr Petar B. Petrović, mr Živana Jakovljević**, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno mašinstvo, Kraljice Marije 16, 11000 Beograd, Srbija, Tel.: +381 11 3302-435, Fax: +381 11 3370-364.  
E-mail: [pbpetrovic@mas.bg.ac.rs](mailto:pbpetrovic@mas.bg.ac.rs)  
[zjakovljevic@mas.bg.ac.rs](mailto:zjakovljevic@mas.bg.ac.rs)

Đukić, R.,<sup>(1)</sup> Bradić, Z.,<sup>(2)</sup> Jovanović, J.,<sup>(1)</sup> Stefanović, M.<sup>(1)</sup>

1) Visoka škola tehničkih strukovnih studija Čačak, mail: vtscacak@eunet.rs; 2) Kompanija Sloboda – Fabrika specijalnih proizvoda Čačak

## PLANIRANJE PROIZVODNJE SLOŽENOG PROIZVODA

**Rezime:** Planiranje proizvodnje je osnovna menadžerska funkcija za ostvarenje željenog proizvodnog programa koji predstavlja konkretizaciju programske orijentacije sa kratkoročnog aspekta. U radu je prikazana metodologija planiranja zasnovana na principima linovativne proizvodne doktrine (LEAN production) gde je proizvodu dodeljena uloga generatora u svim zbivanjima unutar i izvan poslovno-proizvodnog sistema.

**Cljučne reči:** Planiranje, proizvodnja, složen proizvod, resursi, metodologija

## PLANNING OF THE PRODUCTION OF A COMPLEX PRODUCT

**Abstract:** Production planning is a fundamental managerial function for accomplishing the desired production program which makes concrete the program orientation in the short terms. This paper shows methodology of planning based on the principles of LEAN production where the product has the role of a generator in all occurrences, both within and outside the business and production system.

**Key words:** Planning, production, complex product, resources, methodology

### 1. UVOD

Poslovno proizvodni sistem (PPS) je prevashodno izložen uticajima stohastičke prirode koji ga često dovode u konfliktne i neizvesne situacije. Neophodnost promene stanja traži potpuno razumevanje događaja kako bi se privredni subjekat što duže održao u najboljem delu životnog ciklusa. Programska orijentacija je tokom vremena podložna izmenama pri čemu se dugoročni aspekt uglavnom bazira na pretpostavkama i predviđanju gde preovladavaju elementi kvalitativne prirode. Proizvodni program je konkretizacija programske orijentacije sa kratkoročnog aspekta pri čemu se njegovo projektovanje zasniva na činjenicama koje su manje ili više podložne kvantifikaciji. Pošto se proizvodni program definiše vrstom i količinom proizvoda njegovo planiranje i realizacija predstavlja složen proces sa dalekosežnim posledicama. Planiranje predpostavlja poznavanje stanja poslovnog sistema ali i izbor jednog od više mogućih skupa aktivnosti za njegovu transformaciju u očekivano-željeno stanje. U radu ćemo prikazati modelovanje složenog proizvoda, ključne normative, metodologiju i obrasce za planiranje proizvodnje i izradu komponentnih planova. Savremeni stil menadžmenta nametnuo je ideju da treba stvoriti resursno štedljiv i fleksibilan sistem koji proizvodi samo ono što se može prodati. Proizvodnja se odvija na bazi porudžbina na fleksibilnim tehnološkim sistemima. Kupac je stavljen u centar poslovnih zbivanja što podrazumeva visok nivo kvaliteta, najnižu cenu u odnosu na konkurente, veliki broj varijanti proizvoda koji se proizvode kako u malim tako i u velikim serijama.

### 2. MODELOVANJE STRUKTURE SLOŽENOG PROIZVODA

Konstruktivno-tehnološka dokumentacija služi za definisanje i oblikovanje proizvoda i predstavlja osnovu industrijskog načina proizvodnje. Crteži sklopa i detalja proizvoda, konstrukciona sastavnica, tehnološki postupci izrade i organizacija stručnih sadržaja predstavljaju osnov za sve aktivnosti planiranja, pripreme proizvodnje i upravljanja proizvodnjom. Na bazi znanja, uverenja i zahteva okruženja konstruktor definiše proizvod uvažavajući pre svega,

funkcionalni aspekt. U okviru konstrukcione sastavnice (šeme raščlanjavanja) definišemo funkcionalne nivoe polazeći od elemenata (delova, pozicija) koji predstavljaju prvi nivo, pa preko podsklopova i sklopova dolazimo da zadnjeg n-tog nivoa.

Konstrukcionu sastavnicu odabranog proizvoda (A) čine četiri funkcionalna nivoa koji se sastoje od trinaest delova ( $E_i, K_i$ ), dva podsklopa ( $P_j$ ) i dva sklopa ( $S_k$ ):

$$A = \{ (E_i | i=1,8 K_i | i=1,5), (P_j | j=1,2), (S_k | k=1,2) \} \quad (1)$$

Za jednoznačno definisanje svakog elementa (x) skupa A odnosno grafa (G) koristimo naziv (N), šifru (Š), i crtež (C):

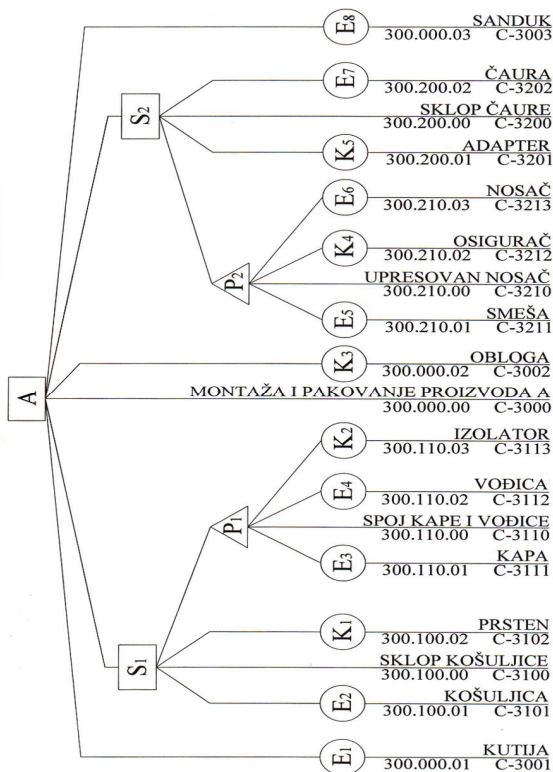
$$G(x) = \{ x | N(x), \check{S}(x), C(x) \} \quad (2)$$

Modelovanje strukture složenog proizvoda pomoću relacija (1) i (2) i grafa prikazanog na sl.1 pri planiranju, organizaciji i upravljanju proizvodnjom najčešće promovise princip „Supply push” tj. „guranje” proizvodnje napred nabavkom i proizvodnjom čime se stvaraju nepotrebne zalihe na svim nivoima. Prioriteti su dodeljeni funkcionalnim nivoima odnosno poluproizvodima pri čemu se gubi osećaj za celinu (proizvod), vremensku dimenziju i značaj pojedinih poluproizvoda u okviru prikazanih nivoa opisa artikla. Respektujući tehnološki i proizvodni aspekt, koristeći teoriju grafova i metodu višenivovskog indeksnog označavanja lukova grafa na slici 2 prikazana je hijerarhijska struktura nastanka proizvoda A ( $X_1$ ) odnosno struktura sastavnica. Orjentisan graf sastoji se od čvorova i lukova:

$$G(x) = \{ x | \check{C}(x), L(x) \} \quad (3)$$

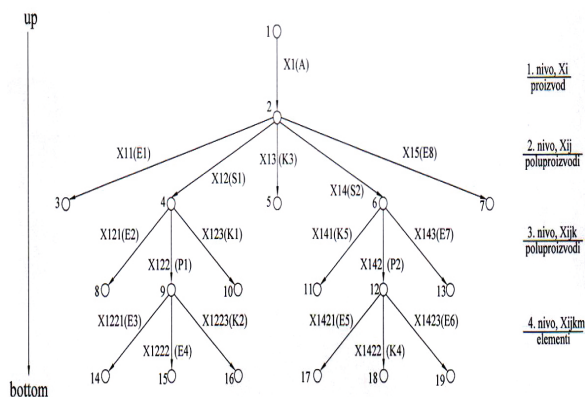
Sve lukove označavamo slovom (X) pri čemu indeks definiše položaj luka u grafu. Na prvom nivou koristimo jedan indeks (i) na drugom dva (ij) i td. Označavanje susednih lukova na sledećim nivoima vrši se uvek s leva na desno dodajući na indeks susednog luka, sa predhodnog nivoa, broj iz skupa prirodnih brojeva redom počev od jedan pa nadalje. Finalni proizvod opisujemo preko elemenata skupa:

$$X_1 = \{ (x_1), (x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}), [(x_{121}, x_{122}, x_{123}), (x_{141}, x_{142}, x_{143})], [(x_{1221}, x_{1222}, x_{1223}), (x_{1421}, x_{1422}, x_{1423})] \} \quad (4)$$



Slika 1. Konstrukciona sastavnica proizvoda A

Elementi skupa definisani relacijom (4) predstavljaju istovremeno: sastavne delove proizvoda - proizvodne faze (card  $X_1=18$ ), nivoe ugradnje (card  $X_1=4$ ) i ukazuju na složene proizvodne faze u okviru kojih se vrši montaža (card  $X_1=5$ ). Modeliranje strukture složenog proizvoda pomoću relacija (3) i (4) i grafa prikazanog na slici 1 omogućava nam korišćenje principa „demand pull” (usisavanje). Nivoi ugradnje definisani su po principu „usisavanja” pri čemu prvi nivo predstavlja nivo finalnog proizvoda a ostali nivoi definišu odgovarajuće proizvodne faze. U tom kontekstu proizvodnju složenog proizvoda moguće je realizovati sa minimalnim zalihama radeći samo ono što je stvarno potrebno i to „ni prerano ni prekasno”.



Slika 2. Strukturna sastavnica proizvoda A

Elemente, podsklopove i sklopove nazivamo zajedničkim imenom poluproizvodi. Za svaki od nivoa opisa tj. za sve poluproizvode važi:

$$m_i = \Pi n_i \quad (5)$$

$n_i$  - količina  $i$ -tog poluproizvoda koji se ugrađuje u prvi nadređeni nivo,  $m_i$  - količina  $i$ -tog poluproizvoda koji se ugrađuje u finalni proizvod,  $\Pi$ - proizvod koeficijentata  $n_i$  od nivoa posmatranog poluproizvoda pa do nivoa montaže, po putanji grafa koji predstavlja strukturnu sastavnicu.

### 3. NORMATIVI

Služe za: planiranje alata, materijala i delova iz kooperacije, planiranje i merenje iskorišćenja raspoloživih kapaciteta (radna snaga, mašine), utvrđivanje troškova i cene proizvoda i upravljanje proizvodnim procesima.

Najvažniji normativi su: normativ vremena izrade, normativ mašinskog vremena, normativ materijala i delova iz kooperacije i normativ alata. Za izradu normativa vremena izrade neophodni su: strukturna sastavnica, tehnološki postupci, organizaciona struktura podsistema za proizvodnju. Svaki tehnološki postupak treba da sadrži sledeće elemente: podatke o proizvodu-poluproizvodu, podatke o materijalu (direktni, indirektni, pomoćni), podatke o alatu koji se koristi, podatke o mašinama koje se koriste, redni broj i naziv operacije, oznaku radne jedinice ili pogona (učesnika u poslu), opis operacija, dozvoljeni tehnološki škart, osnovno vreme izrade, dopunsko vreme, vremensku normu i grupe složenosti posla.

Vremensku normu po organizacionim celinama  $j$  izračunavamo preko obrasca:

$$t_{n_j} = \sum m_i \cdot t_{ij} \quad (6)$$

$t_{ij}$  - normirano vreme za izradu  $i$ -tog poluproizvoda u  $j$ -toj organizacionoj celini.

Vremensku normu po artiklu izračunavamo:

$$t_n = \sum m_i \cdot t_i = \sum t_{n_j} \quad (7)$$

$t_n$  - ukupno vreme proizvoda,  $t_i$  - ukupno vreme  $i$ -tog poluproizvoda.

Normativ vremena izrade prikazan je u tabeli 1. Definiše se na nivou proizvoda - poluproizvoda i organizacionih celina - podsistema (radna jedinica, pogon, sektor). Koristimo ga za izračunavanje cene koštanja proizvoda (i njegovih delova) i za dinamičko uravnotežavanje proizvodnih planova sa aspekta proizvodnih ljudskih resursa.

Normativ mašinskog vremena (prikazan je u tabeli 2) utvrđuje se na osnovu tehnološke dokumentacije (tehnoloških postupaka). Koristimo ga za dinamičko uravnotežavanje proizvodnih planova sa aspekta raspoloživih komponentnih kapaciteta.

Komponentni mašinski kapaciteti može biti jedna mašina ili grupa mašina identičnih ili sličnih tehnoloških mogućnosti.

Mašinsko vreme artikla po  $j$ -tom komponentnom kapacitetu - mašini izračunava se po obrascu:

$$t_{m_j} = \sum m_i \cdot t_{m_{ij}} \quad (8)$$

Ukupno mašinsko vreme artikla možemo izračunati po sledećoj formuli:

$$t_m = \sum t_{m_{ij}}, (i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}) \quad (9)$$

$t_{m_{ij}}$  - ukupno mašinsko vreme  $i$ -tog poluproizvoda po  $j$ -om

komponentnom kapacitetu - mašini.

Normativ materijala (tabela 3) i delova iz kooperacije koristimo za planiranje ovih resursa i utvrđivanje direktnih troškova. Materijale možemo podeliti na direktni, indirektni i pomoćni. Direktni materijali imaju svoj normativ (poznata je količina potrebna za izradu jedinice proizvoda).

Indirektni materijale koristimo za izradu proizvoda ali nemaju strogo utvrđen normativ, dok se pomoćni materijali ne koriste direktno za izradu proizvoda već se angažuju u procesu proizvodnje i neophodni su za funkcionisanje sistema kao celine.

Indirektni i pomoćni materijale planiramo na osnovu iskustvenih normativa i statističke potrošnje. Normativ materijala izračunava se po obrascu:

$$s_j = \sum m_i \cdot s_{ij} \quad (10)$$

$s_j$  - ukupan normativ  $j$ -tog materijala po artiklu,

$s_{ij}$  - normativ  $j$ -tog materijala za  $i$ -ti poluproizvod.

Proizvod – poluproizvod X <sub>i</sub>			Normativ vremena izrade										
			Podsistem 1			Podsistem 2				Podsistem 3			Sektor proizvodnje
oznaka	n <sub>i</sub>	m <sub>i</sub>	ORJ11	ORJ12	Σ	ORJ21	ORJ22	ORJ23	Σ	ORJ31	ORJ32	Σ	Σ Σ Σ
X <sub>i</sub>													
S <sub>1</sub>													
...													
S <sub>j</sub>							t <sub>ij</sub>						t <sub>i</sub>
P <sub>1</sub>													
...													
P <sub>k</sub>													
E <sub>1</sub>													
...													
E <sub>m</sub>													
Ukupno:			Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	Σ	t <sub>n</sub>

Tabela 1. Normativ vremena izrade na nivou proizvoda - poluproizvoda i organizacionih celina - podsistema

Proizvod – poluproizvod X <sub>i</sub>			Komponentni mašinski kapacitet M <sub>j</sub> , j = 1, 2, ..., m							Ukupno
oznaka	n <sub>i</sub>	m <sub>i</sub>	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	...	M <sub>j</sub>	...	M <sub>m</sub>		
X <sub>i</sub>					...		...			
S <sub>1</sub>					...		...			
...					...		...			
S <sub>j</sub>					...		...			
P <sub>1</sub>					...	t <sub>mij</sub>	...		t <sub>mi</sub>	
...					...		...			
P <sub>k</sub>					...		...			
E <sub>1</sub>					...		...			
...					...		...			
E <sub>m</sub>					...		...			
Ukupno:			Σ	Σ	...	Σ	Σ	Σ	t <sub>m</sub>	

Tabela 2. Normativ mašinskog vremena na nivou proizvoda – poluproizvoda i komponentnih mašinskih kapaciteta

Proizvod – poluproizvod X <sub>i</sub>			Normativ materijala i delova iz kooperacije								
oznaka	n <sub>i</sub>	m <sub>i</sub>	S <sub>1</sub>	...	S <sub>j</sub>	...	S <sub>m</sub>	K <sub>1</sub>	...	K <sub>m</sub>	
X <sub>i</sub>				...		...			...		
S <sub>1</sub>				...		...			...		
...				...		...			...		
S <sub>j</sub>				...		...			...		
P <sub>1</sub>				...	S <sub>ij</sub>	...			...		
...				...		...			...		
P <sub>k</sub>				...		...			...		
E <sub>1</sub>				...		...			...		
...				...		...			...		
E <sub>m</sub>				...		...			...		
Ukupno:			Σ	...	Σ	...	Σ	Σ	...	Σ	

Tabela 3. Normativ materijala i delova iz kooperacije na nivou proizvoda – poluproizvoda

Normativ alata (tabela 4) koristimo za izradu komponentnog plana alata. Utvrdjuju ga planski i tehnički sektor na osnovu podataka o njegovoj postojanosti i statističkoj potrošnji. Pod alatom podrazumevamo sve vrste radnih i steznih alata, pribora i kontrolnika.

Normativ alata izračunavamo pomoću obrasca:

$$a_j = \sum m_i \cdot a_{ij} \quad (11)$$

a<sub>j</sub> - ukupan normativ j-tog alata po proizvodu,  
a<sub>ij</sub> - normativ j-tog alata za i-ti poluproizvod

Proizvod – poluproizvod X <sub>i</sub>			Normativ alata					
oznaka	n <sub>i</sub>	m <sub>i</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	...	A <sub>j</sub>	...	A <sub>m</sub>
X <sub>i</sub>					...		...	
S <sub>1</sub>					...		...	
...					...		...	
S <sub>j</sub>					...		...	
P <sub>1</sub>					...	a <sub>ij</sub>	...	
...					...		...	
P <sub>k</sub>					...		...	
E <sub>1</sub>					...		...	
...					...		...	
E <sub>m</sub>					...		...	
Ukupno:			Σ	Σ	...	Σ	...	Σ

Tabela 4. Normativ alata na nivou proizvoda – poluproizvoda

#### 4. PLAN PROIZVODNJE I KOMPONENTNI PLANOVI

Perspektivni (dugoročni, srednjoročni) plan razvoja preduzeća predstavlja podlogu za definisanje godišnjeg plana koji je usklađen sa potrebama tržišta i proizvodnim kapacitetima. Godišnji plan proizvodnje sadrži količinu proizvoda (Q<sub>i</sub>) po vrstama (X<sub>i</sub>) sa dinamičkom razradom po kvartalima i mesecima. Obim zaposlenosti (T) na nivou proizvodnog sistema ili njegovih delova izračunavamo koristeći sledeći obrazac:

$$T = \sum Q_i \cdot t_{n_i} \quad (12)$$

Q<sub>i</sub> - količine pojedinih artikala, t<sub>n<sub>i</sub></sub> - ukupno vreme po artiklu. Proizvodni program definisan godišnjim planom proizvodnje predstavlja podlogu za dalju razradu komponentnih planova: plan poluproizvoda i delova iz kooperacije, plan angažovanja proizvodnih ljudskih resursa, plan korišćenja mašinskih kapaciteta, plan materijala, plan specijalnih i standardnih alata, plan održavanja osnovnih sredstava, finansijski plan i plan investicija.

Plan poluproizvoda je najznačajniji operativni plan koji služi za fino planiranje proizvodnje najčešće u vremenskom periodu do tri meseca (u zavisnosti od dužine proizvodnog ciklusa).

Za izradu plana poluproizvoda (elementi, podsklopovi, sklopovi) neophodno je poznavati: godišnji plan proizvodnje, strukturu sastavnice, zalihe u nedovršenoj proizvodnji (magacini i radni nalozi), planiran (ostvaren, tehnološki) škart, i planirane zalihe na kraju godine (radi kontinuiteta u proizvodnji). Ako sa x<sub>ijk</sub> označimo poluproizvode, a sa q<sub>ijk</sub> planirane količine poluproizvoda tada za planiranje proizvodnje, na nivou poluproizvoda, možemo koristiti sledeće formule:



$$x_{ijk} : q_{ijk}^{(1)} = m_{ijk} \cdot Q_i = n_{ijk} \cdot q_{ij} \quad (13)$$

$$x_{ijk} : q_{ijk}^{(2)} = \frac{n_{ijk} \cdot q_{ij}}{1 - \check{S}_{ijk}} = \frac{m_{ijk} \cdot Q_i}{\Pi(1 - \check{S}_{ijk})} \quad (14)$$

$$x_{ijk} : q_{ijk}^{(3)} = \frac{n_{ijk} \cdot q_{ij} - q_{ijk}^M}{1 - \check{S}_{ijk}} - q_{ijk}^{RN} \quad (15)$$

$$x_{ijk} : q_{ijk}^{(4)} = \frac{n_{ijk} \cdot q_{ij} - q_{ijk}^M}{1 - \check{S}_{ijk}} - k q_{ijk}^{RN} \quad (16)$$

$\check{S}_{ijk}$  - planiran škart poluproizvoda,  $q_{ijk}^M$  - količine poluproizvoda koje se nalaze u magacinu poluproizvoda,  $q_{ijk}^{RN}$  - količine poluproizvoda koje se nalaze u lansiranim radnim nalozima,  $k$  - koeficijent koji uzima u obzir stepen (procenat) realizacije radnog naloga ( $0 \leq k \leq 1$ ).

Ukoliko je realizovano 70% obima posla po radnom nalogu (pri čemu se za kriterijum uzima količine, broj operacija i vremenska norma svake operacije) tada koeficijent uzima vrednost  $k = 0,7$ . Ako se radni nalog nalazi na početnim operacijama tada je  $k$  bliži nuli, a ako se nalazi na završnim operacijama tada je  $k$  bliži jedinici. Po obrascu (13) izračunavamo idealne količine poluproizvoda. Obrazac (14) uzima u obzir gubitke po osnovu kvaliteta u proizvodnji (škart). Obrazac (15) uzima u obzir i zalihe u nedovršenoj proizvodnji (magacin poluproizvoda i radne naloge u toku). Obrazac (16) koristimo za proračun količina poluproizvoda koje se koriste za otvaranje radnih naloga (RN) i planiranje materijala. Obrazac (16) koristimo za proračun količina poluproizvoda koje se koriste za planiranje alata i angažovanje direktne (proizvodne) radne snage i mašinskih kapaciteta.

Obim zaposlenosti proizvodnih ljudskih resursa na nivou poluproizvoda izračunavamo po sledećem obrascu:

$$T = \sum q_{ijk} \cdot t_{ijk} \quad (17)$$

$t_{ijk}$  - vremenska norma poluproizvoda

Obim proizvodnje koji angažuje nedovršena proizvodnja računa se po sledećim obrascima:

$$T_N = \sum (q_{ijk}^{(2)} - q_{ijk}^{(4)}) \cdot t_{ijk} \quad , \text{ ili} \quad (18)$$

$$T_N = 100 - \frac{\sum q_{ijk}^{(4)} \cdot t_{ijk}}{\sum q_{ijk}^{(2)} \cdot t_{ijk}} \cdot 100(\%) \quad (19)$$

Plan angažovanja proizvodnih ljudskih resursa u direktnoj je vezi sa obimom zaposlenosti. Grubo planiranje radne snage zasniva se na planu proizvoda ( $Q_i$ ), a fino planiranje na planu poluproizvoda ( $q_i$ ). Poredeći planirani obim zaposlenosti  $T$  sa raspoloživim potencijalom radne snage  $T_r$  ( $T:T_r$ ) moguća su dva slučaja:

-  $T_r \geq T$  plan proizvodnje može da se realizuje sa raspoloživom radnom snagom,  
-  $T_r < T$  plan proizvodnje ne može da se realizuje sa raspoloživom radnom snagom, pa je u tom slučaju potrebno izvršiti preraspodelu radne snage, dodatno angažovanje zaposlenih radnika kroz prekovremeni rad ili neradnim danima, ili izvršiti prijem radnika. Plan angažovanja radne snage potrebno je sprovesti po svim organizacionim nivoima. Raspoloživi kapacitet radne snage računamo po sledećoj formuli:

$$T_r = Z \cdot \eta_r \cdot D_r \cdot \check{C}_s \cdot p_n \quad (20)$$

$Z$  - broj proizvodnih radnika,  $D_r$  - broj radnih dana,  $\eta_r$  - stepen korišćenja kapaciteta radne snage,  $\check{C}_s$  - časova u smeni,  $p_n$  - prosečno izvršenje norme.

Plan korišćenja mašinskih kapaciteta odredićemo pomoću formule (21):

$$T_{p_j} = \sum Q_i \cdot t_{m_{ij}} \text{ ili } T_{p_j} = \sum q_i \cdot t_{m_{ij}} \quad (21)$$

$t_{m_{ij}}$  - ukupno mašinsko vreme na nivou  $i$ -tog proizvoda i  $j$ -tog komponentnog kapaciteta,  $t_{m_{ijk}}$  - ukupno mašinsko vreme na nivou poluproizvoda i  $j$ -tog komponentnog kapaciteta.

Poredeći planirano angažovanje mašina sa raspoloživim ( $T_{p_j} : T_{r_j}$ ) moguća su dva slučaja: prvi  $T_{p_j} \leq T_{r_j}$  - plan proizvodnje može da se realizuje sa raspoloživim mašinskim parkom i drugi slučaj  $T_{p_j} > T_{r_j}$  - ukoliko je ispunjen ovaj uslov kod nekog kapaciteta onda ta mašina ili grupa mašina predstavljaju „usko grlo“ u procesu proizvodnje.

$$T_{r_j} = m \cdot D_r \cdot \check{C}_s \cdot S_n \cdot p_m \cdot \eta_m \quad (22)$$

$T_{r_j}$  - raspoloživi mašinski kapacitet grupe mašina,  $m$  - broj mašina,  $\eta_m$  - stepen korišćenja kapaciteta,  $p_m$  - izvršenje norme grupe mašina,  $S_n$  - broj smena.

Planiranje materijala i alata zasniva se na proizvodnom programu, normativima materijala, statističkoj potrošnji alata i količinama koje se nalaze na zalihama:

$$S_j = \sum Q_i \cdot s_i, S_j = \sum q_i \cdot s_{ij} \quad (23)$$

$$A_j = \sum Q_i \cdot a_i, A_j = \sum q_i \cdot a_{ij} \quad (24)$$

$$S_{n_j} = S_j - S_{z_j}, A_{n_j} = A_j - A_{z_j} \quad (25)$$

$S_j$  - planirane količine  $j$ -te vrste materijala,  $s_i$  - normativ materijala na nivou proizvoda,  $Q_i$  - planirane količine proizvoda,  $s_{ij}$  - normativ  $j$ -te vrste materijala na nivou  $i$ -tog poluproizvoda,  $q_i$  - planiranje količine poluproizvoda,  $A_j$  - planirane količine  $j$ -te vrste alata,  $a_i$  - normativ alata na nivou proizvoda,  $a_{ij}$  - normativ  $j$ -te vrste alata na nivou  $i$ -tog poluproizvoda,  $S_{z_j}, A_{z_j}$  - postojeće zalihe materijala i alata,  $S_{n_j}, A_{n_j}$  - količine koje treba nabaviti.

Plan materijala i alata treba da sadrži: naziv i vrstu, zahtevani kvalitet, količinu (25) i dinamiku nabavke.

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je izložen teoretski okvir za planiranje proizvodnje i izradu najvažnijih komponentnih planova. Zasnovan je na strukturalnoj sastavnici složenog proizvoda slika 2 (modelu koji strukturu proizvoda prikazuje koristeći teoriju grafova), normativima prikazanim u matricnom obliku i formulama koje su upotrebnu vrednost dokazale u praksi.

Normativi ukupnog i mašinskog vremena, materijala i alata prikazani su u matricnom obliku (tabele 1-4) na nivou poluproizvoda i proizvoda kao celine. Njihova upotreba zavisi od nivoa planiranja. Planiranje na nivou proizvoda često nazivamo "grubo planiranje" dok na nivou poluproizvoda "fino planiranje" zbog toga što su potrebni resursi, u drugom slučaju, precizno proračunati.

Koristeći formulu (15) možemo proračunati količine poluproizvoda u realnim uslovima proizvodnje počev od prvog pa do zadnjeg ( $n$ -tog) nivoa po strukturalnoj sastavnici.

## 6. LITERATURA

- [1] Holt K., Management and Organization through 100 years, Technovation, 1999.
- [2] Todorović J., Japanski menadžment, Mrlješ, Beograd, 2000.
- [3] Đukić R., Dinamičko uravnoteženje i upravljanje složenim poslovno-proizvodnim sistemima, 29. SPMJ, Beograd, 2002.
- [4] Vuleta J., Metode ekstremizacije na grafovima, Naučna knjiga, Beograd, 1981.
- [5] Đukić R., Đukić J., Planiranje proizvodnje, Viša tehnička škola Čačak, Čačak, 2007.



Dejan Movrin, Plavka Skakun, Dragiša Vilotić, Miroslav Plančak, Igor Maravić, Rade Jovičić

## OPTIMIZACIJA PROCESA KOVANJA PNEUMATSKE STEZALJKE NUMERIČKOM SIMULACIJOM

**Rezime:** Razvoj novih tehnoloških procesa u obradi deformisanjem podrazumeva primenu teorijskih i eksperimentalnih metoda analize i numeričkih simulacija, koje omogućavaju predviđanje grešaka koje se mogu javiti tokom procesa proizvodnje. Na taj način moguće je u kraćem vremenskom roku projektovati optimalan proces proizvodnje, a samim tim, izbeći dodatne troškove. Jedan od osnovnih problema pri kovanju u otvorenom kalupu jeste nedovoljna popunjenost šupljine alata. U cilju rešavanja tog problema, primenjuju se različite metode analize i numerička simulacija procesa kovanja. U ovom radu su prikazani rezultati optimizacije procesa kovanja pneumatske stezaljke. Preliminarni broj faza kovanja određen je primenom teorijske metodologije, a potom je izvršena provera simulacijom pomoću softvera Simufact Forming.

**Cljučne reči:** Toplo kovanje, otvoreni kalup, numerička simulacija

## OPTIMISATION OF PNEUMATICAL CLAMP FORGING PROCESS BY NUMERICAL SIMULATION

**Abstract:** Nowadays numerical simulations, theoretical and experimental methods are common part of forging method development. It is possible to predict defects which could occur in production process such as die underfill and avoid them. By using simulation it is also possible to avoid need for costly trial and error methods to prove the process. Most common problem during open die forging operation is insufficient die filling. Theoretical methodology and numerical simulation were used for solving this problem. In this paper optimization of pneumatical clamp forging process is shown. Theoretical solution was checked by numerical simulation performed by Simufact Forming software.

**Key words:** Hot forging, open die, numerical simulation.

### 1. UVOD

Zahvaljujući komparativnim prednostima tehnologije kovanja u odnosu na druge tehnološke metode (mogućnost izrade delova kompleksne geometrije, veoma dobre mehaničke osobine dobijenih delova, niži napon tečenja i dr.), kovanje i dalje zauzima značajno mesto u oblikovanju širokog asortimana proizvoda različitih oblika. Procenjuje se da na svetu postoji više od 600.000 različitih alata za kovanje otkovaka, mase od 1 gr do preko 1 t, i od različitih materijala.

U Srbiji postoji relativno mali broj kovačnica sa većim proizvodnim kapacitetom. Jedan od problema srpskih kovačnica i fabrika koje se bave tehnologijom plastičnog deformisanja uopšte, jeste problem efikasnog načina projektovanja ove tehnologije. Pristup projektovanju tehnologije kovanja je klasičan sa puno neizvesnosti u pogledu broja faza oblikovanja, što često ima za posledicu visoku cenu otkovaka. U industrijski razvijenim zemljama projektovanje tehnologije kovanja izvodi se primenom savremenih CAx sistema, to jest, primenom informacionih tehnologija u svim fazama projektovanja, počev od konstrukcije otkovka, definisanja faza oblikovanja, projektovanja tehnologije, pa do izrade alata.

Klasičan način projektovanja tehnologije kovanja zasnovan je na primeni trial-and-error metodologije. Takav način projektovanja je skup i zahteva utrošak velikog broja radnih sati inženjera, a s obzirom na potencijalne razlike i iskustva, on može dovesti do sistemskih grešaka i niskog kvaliteta otkovaka. Savremeni pristup projektovanja tehnologije kovanja podrazumeva primenu računara i odgovarajućih CAx programskih paketa (CAD, CAE; CAM; CAPP). Korišćenjem CAD softvera, konstruktor kreira 3D

model otkovka, geometriju obratka po fazama kovanja i neophodne alate. Detaljno modeliranje alata i obradaka omogućava veoma brzu i jednostavnu promenu parametara, kao što su dimenzije dela, kovački nagibi, radijusi zaobljenja, faktor skupljanja itd.. Time se ujedno ostvaruje optimizacija procesa konstruisanja. Pored toga, CAE programski paketi bazirani na primeni MKE (metode konačnih elemenata) ili MKZ (metode konačnih zapremina) omogućavaju simulaciju procesa kovanja i simultanu analizu više različitih opcija, pri čemu uzimaju u razmatranje veliki broj uticajnih faktora. Na veoma lak, brz i jeftin način dolazi se do optimalnog rešenja još u ranoj fazi razvoja, u vreme kad su potencijalne investicije najmanje. Simulacija procesa kovanja između ostalog omogućava:

- Simulaciju procesa tečenja materija;
- Proveru popunjenosti kalupne šupljine;
- Eliminaciju grešaka na otkovcima;
- Optimizaciju broja faza kovanja i geometrije međufaznih oblika;
- Povećanje složenosti geometrije otkovka;
- Postizanje željene strukture materijala i mehaničkih karakteristika otkovka;
- Proračun i optimizaciju parametara procesa kovanja;
- Analizu naponsko-deformacionog stanja u alatu i obratku;
- Proveru geometrije alata i izbor opreme.

U ovom radu prikazana je simulacija procesa kovanja pneumatske stezaljke (Slika 1), kao i optimizacija broja faza, korišćenjem programskog paketa Simufact Forming v.8.1.



Slika 1. Pneumatska stezaljka

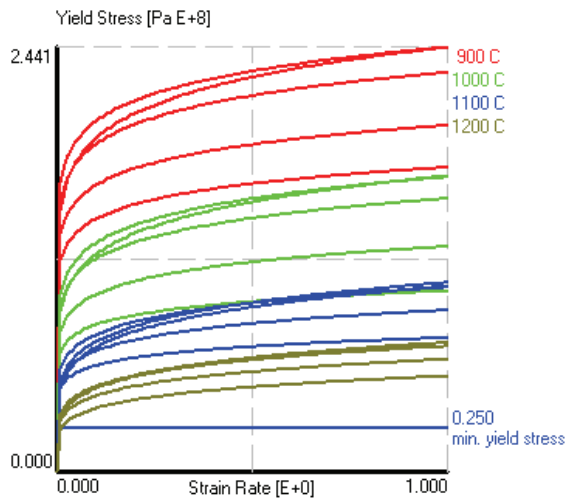
## 2. NUMERIČKA SIMULACIJA FAZA KOVANJA

Na osnovu uobičajenog postupka određivanja operacija kovanja [1,7], usvojeno je da se komad izrađuje u tri faze, dve faze pripremnog kovanja i završno kovanje:

- Predoblikovanje radi rasporeda masa,
- Predoblikovanje poprečnog preseka obratka,
- Završno kovanje.

Simulacija procesa kovanja izvršena je primenom programskog paketa Simufact Forming v.8.1. Da bi simulacija dala dobre rezultate, potrebno je definisati ulazne parametre procesa.

Pneumatska stezaljka izrađuje se od materijala Č 1530, čije su krive tečenja u zavisnosti od temperature i brzine deformacije prikazane na slici 2. Temperatura zagrevanja pripremk je 1200°C, a temperatura predgrevanja alata je 400°C. Pretpostavljena temperatura okoline iznosila je 40°C. Finalni oblik se dobija višefaznim kovanjem, pa je bilo neophodno definisati i parametre toplotne provodljivosti kako bi se u obzir uzelo hlađenje materijala pri premeštanju radnog dela u različite gravure.



Slika 2. Krive tečenja za Č 1530 u zavisnosti od temperature i brzine deformacije (baza Simufact)

Usvojeni faktor trenja bio je  $m=0,3$  [3]. Pošto su u slučaju kovanja u kalupu efektivne deformacije velike, u simulaciji je korišćen metod konačnih zapremina, koji je pogodan za takve probleme.

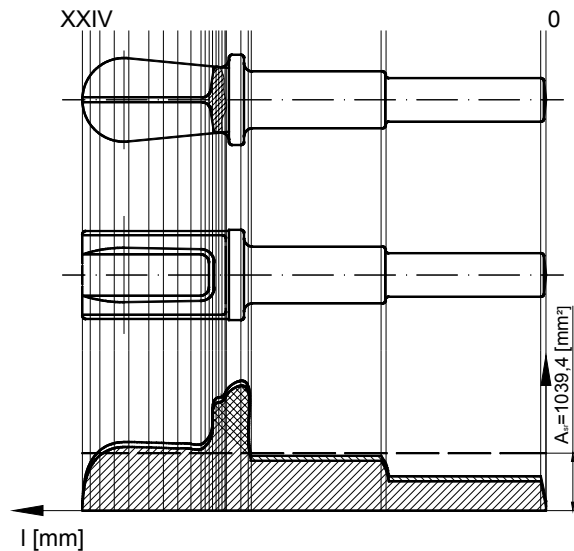
### 2.1 Operacija predoblikovanja radi rasporeda masa

Ova operacija vrši se sa ciljem raspodele masa pripremk uzduž glavne ose otkovka, kako bi se dobio što povoljniji oblik za operaciju predoblikovanja poprečnog preseka i omogućilo bolje popunjavanje gravure. Najjednostavniji način izvođenja operacije jeste upotreba ravnih alata. Međutim, problem kod takvog načina izrade jeste to što tačnost dobijenog dela direktno zavisi od veštine radnika. Zbog toga u literaturi postoji preporuka da se za operaciju

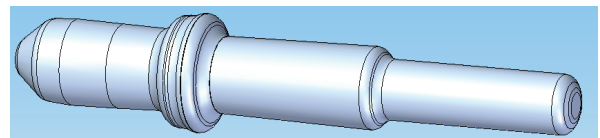
rasporeda masa koriste posebne gravure.

Pre faza predoblikovanja potrebno je odrediti oblik i dimenzije pripremk. Dimenzije pripremk određene su prema zapremini komada, koja je uvećana za zapreminu pločice i venca otkovka. Početne dimenzije pripremk prema proračunu bile su  $\text{Ø}55 \times 145 \text{ mm}$ .

Oblik dela koji bi trebalo da se dobije operacijom raspoređivanja masa određen je na osnovu dijagrama rasporeda masa (Slika 3) [1]. Međutim, simulacijama je pokazano da takav oblik nije tehnološki, pa je na osnovu tih rezultata izvršena korekcija. Takođe, usvojen je i novi oblik pripremk – šipka pravougaonog poprečnog preseka  $50 \times 40 \times 170 \text{ mm}$ .



Slika 3. Dijagram rasporeda masa



Slika 4. 3D model računskog oblika nakon operacije rasporeda masa

Za operaciju predoblikovanja radi rasporeda masa moguće je koristiti dve vrste gravura [4]:

- Sa elipsastim poprečnim presekom (Slika 5) i
- Sa ravnim poprečnim presekom (Slika 6).



Slika 5. Gravura za predoblikovanje radi rasporeda masa sa elipsastim poprečnim presekom



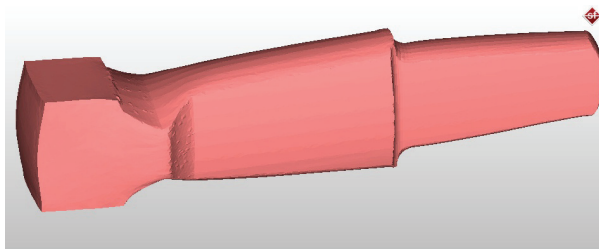
Slika 6. Gravura za predoblikovanje radi rasporeda masa sa ravnim poprečnim presekom

Kod gravura sa elipsastim poprečnim presekom moguće

je ostvariti veće izduženje priprema, ali je gravura složenija. Zbog zahteva za većim izduženjem polaznog oblika, pri izradi predoblika za kovanje pneumatske stezaljke korišćena je ovakva gravura.

Korišćenjem tog načina izrade, u odnosu na izradu sa ravnim alatima, povećava se tačnost predoblika i skraćuje se vreme izrade.

Izgled dela nakon operacije rasporeda masa alatom sa elipsastim poprečnim presekom, dobijen simulacijom prikazan je na slici 7.

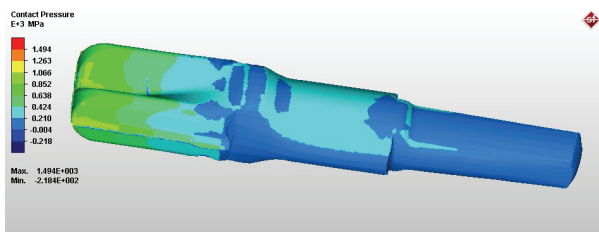


Slika 7. Izgled dela nakon operacije rasporeda masa

## 2.2 Operacija predoblikovanja poprečnih preseka

Ova operacija projektuje se sa ciljem pripreme za završno kovanje, to jest, radi dobijanja oblika komada što približnijeg završnom obliku, tako da se u završnoj gravuri obavi minimalna korekcija geometrije otkovka. Oblik gravure za predoblikovanje poprečnih preseka dobija se redukcijom oblika površina pojedinih poprečnih preseka gotovog otkovka i na osnovu preporuka iz literature [1,6]. Ako se koristi operacija predoblikovanja poprečnih preseka, bolje je popunjavanje kalupa, povećava se vek trajanja završne gravure. Međutim, njena upotreba je opravdana samo u velikim serijama.

Simulacijom su određeni kontaktni pritisci i izgled dela nakon operacije predoblikovanja poprečnih preseka (Slika 8).



Slika 8. Kontaktne pritisci u operaciji predoblikovanja poprečnih preseka

Pritisci u otkovku posle operacije predoblikovanja poprečnih preseka daleko su niži od dozvoljenih vrednosti (maksimalno 800 MPa), što predstavlja dobru polaznu osnovu za završno kovanje. Dozvoljeni pritisci u operacijama toplog kovanja prema [1] iznose 2000 MPa.

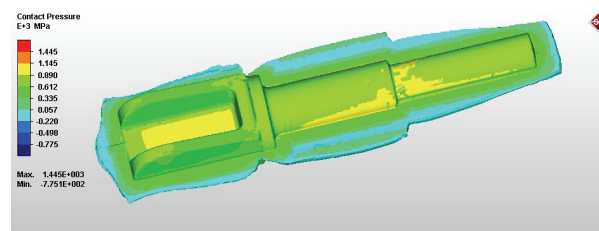
## 2.3 Završno kovanje

Simufact Forming omogućava da se u procesima višefaznog kovanja, kao ulazni parametar za simulaciju naredne faze kovanja, koristi model dobijen u simulaciji predoblikovanja. Takvim načinom uvoženja modela zadržani su podaci o naponsko-deformacionom stanju i temperaturnom polju iz prethodnih operacija.

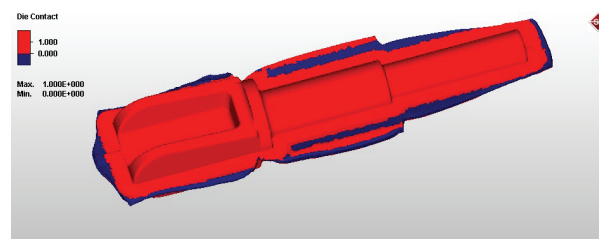
Rezultati simulacije pokazali su da su maksimalni kontaktne pritisci u fazi završnog kovanja ispod 1000 MPa, (Slika 9), kao i da je popunjenost gravure potpuna (Slika 10).

Na osnovu prethodno navedenih činjenica može se zaključiti da se primenom takvog načina izrade pneumatske

stezaljke dobija kvalitetan deo, a opterećenje alata je znatno ispod dozvoljenih granica, što garantuje njegov duži radni vek.



Slika 9. Kontaktne pritisci u operaciji završnog kovanja

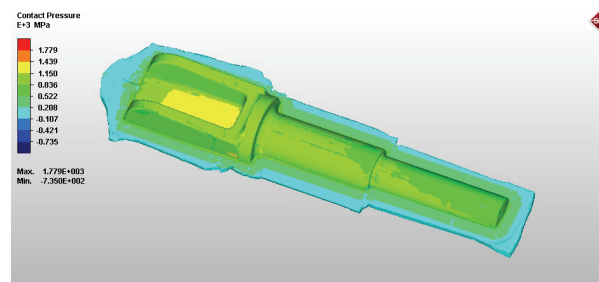


Slika 10. Popunjenost završne gravure

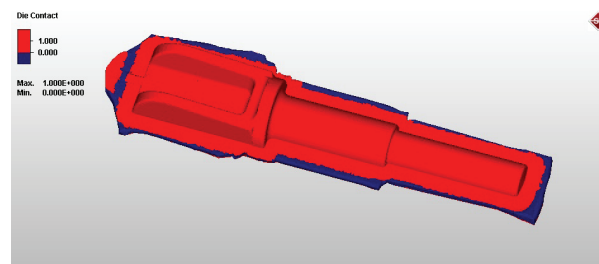
## 3. OPTIMIZACIJA BROJA FAZA KOVANJA

Simulacijom procesa kovanja pneumatske stezaljke sa dve faze kovanja - predoblikovanjem radi rasporeda masa i završnim kovanjem, proverena je mogućnost smanjenja broja faza kovanja i mogućnost njene optimizacije. Osim skraćivanja vremena izrade, postiže se ušteda i u materijalu alata i vremenu njegove izrade.

Na osnovu rezultata simulacije, ustanovljeno je da je proces kovanja pneumatske stezaljke moguće izvesti u dve faze. U slučaju kada se izostavi predoblikovanje poprečnih preseka, kontaktne pritisci u operaciji završnog kovanja kreću se najviše do 1500 MPa na najkritičnijim mestima (pločica između dva rebra, Slika 11), a popunjenost kalupa je potpuna (Slika 12). Evidentno je da postoji značajna razlika u kontaktne pritiscima u prethodna dva slučaja (oko 50%), što za posledicu ima kraći radni vek alata, kao i veće napone u obratku koji mogu dovesti do deformacije dela prilikom njegovog hlađenja.



Slika 11. Kontaktne pritisci u operaciji završnog kovanja



Slika 12. Popunjenost završne gravure



#### 4. ZAKLJUČAK

Primenom savremenih softvera za numeričku simulaciju procesa kovanja, moguće je pri projektovanju tehnologije i alata za kovanje proveriti popunjavanje gravure, napone u obratku i alatu, kontaktne pritiske i ostale parametre procesa koji utiču na kvalitet otkovka i radni vek alata. Takav način projektovanja tehnologije kovanja omogućava veoma brzo i jednostavno otklanjanje eventualnih grešaka, korigovanjem geometrije alata i parametara procesa, uz minimalne troškove. Takođe, moguće je optimizovati proces oblikovanja kroz smanjenje broja faza kovanja, što za direktnu posledicu ima smanjenje troškova proizvodnje usled uštede u materijalu alata, vremenu njegove izrade i vremenu izrade dela.

U ovom radu prikazan je deo rezultata analize i optimizacije procesa toplog kovanja pneumatske stezaljke. Korišćenjem programskog paketa Simufact Forming v.8.1 izvršena je simulacija procesa kovanja u tri faze, a zatim proverena mogućnost dobijanja dela u dve faze (izostavljanjem predoblikovanja poprečnih preseka). Potvrđeno je da se deo može uspešno dobiti i iz dve faze, a kao posledica toga javljaju se veći kontaktni pritisci, što može uticati na radni vek alata. Takav način dobijanja dela opravdan je u slučaju malih i srednjih serija.

#### *Napomena:*

*Rezultati prikazani u ovom radu deo su rezultata istraživanja na projektu „Razvoj i primena savremenih pristupa projektovanja tehnologije kovanja radi povećanja kvaliteta otkovaka i smanjenja troškova proizvodnje”, koji finansira Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, evid. broj TR-14050.*

#### 5. LITERATURA

- [1] Vujović V. : Tehnologija plastičnosti u mašinstvu I Deo, Novi Sad 1990. god.
- [2] Altan T., Ngaile G., Schen G.: *Forging - Fundamentals and Applications*, ASM International, Materials Park, Ohio, 2005.
- [3] Kobayashi, Oh S., Altan T.: *Metal Forming And The Finite Element Method*, Oxford Univ. Press, 1989
- [4] Pešić A. : Konstruisanje otkovaka i alata za kovanje u kalupima, Sarajevo 1955 god..
- [5] Nikolić D. : Projektovanje tehnološkog procesa 2, Obrade deformisanjem (kovanje), Mašinski fakultet , Beograd 1998 god.
- [6] Musafija B. : Obrada metala plastičnom deformacijom, Sarajevo 1970 god.
- [7] Lange, K., *Lehrbuch der Umformtechnik* , Springer-Verlag, 1975, Berlin - Heidelberg - New York.

**Autori: Dejan Movrin dipl.inž., mr Plavka Skakun, Prof. dr Dragiša Vilotić, Prof. dr Miroslav Plančak, Igor Maravić**, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, Trg Dositeja Obradovića 6, 21000 Novi Sad, Srbija, Tel.: +381 21 485-2334, Faks: +381 21 454 495, **Rade Jovičić dipl.inž.maš.**, A.D. „Proleter“, Svetolika Lazarevića 14, 31230 Arilje, Srbija, Tel.: +381 31 892 686, Faks: +381 31 894 353  
E-mail: movrin@uns.ac.rs  
plavkas@uns.ac.rs  
vilotic@uns.ns.ac.yu  
plancak@uns.ns.ac.yu  
igorgilemaravic@gmail.com  
proleter.tr@gmail.com

Jovišević, V., Jakanović, S., Borojević, S.,

## MODELIRANJE I SIMULACIJA PROIZVODNIH PROCESA PRIMJENOM PROGRAMSKOG SISTEMA TECNOMATIX PLANT SIMULATION®

**Rezime:** Projektovanje proizvodnih procesa sa stanovišta neophodnih resursa za izvođenje samog procesa proizvodnje već dugi niz godina predstavlja važan skup inženjerskih zadataka. U sklopu projektovanja procesa proizvodnje, pored projektovanja tehnologije proizvodnje, neophodno je izvršiti i određivanje normativnih parametara, pomoću kojih će efektivnost procesa proizvodnje dostići visok nivo. To je moguće ostvariti primjenom programskog sistema Tecnomatix Plant Simulation, koji je prikazan u ovom radu. Ovaj programski sistem u primjeni predstavlja jedan korak bliže automatizaciji projektovanja proizvodnih procesa. U ovom radu izvršeno je modeliranje i simulacija proizvodnog procesa u konkretnim uslovima, primjenom ovog programskog sistema, u 2D i 3D okruženju.

**Ključne riječi:** Tecnomatix Plant Simulation, Projektovanje, Modeliranje, Simulacija.

## MODELING AND SIMULATION OF PRODUCTION PROCESSES WITH PROGRAM SYSTEM TECNOMATIX PLANT SIMULATION®

**Abstract:** The design of production process, from the standpoint of the necessary resources for execution of production, for many years is an important set of engineering tasks. In the scope of design of production systems, in addition to design technologies of production, it is necessary to conduct evaluations and determine norms (norms of time, materials, surfaces, etc.) as aid which will make influence that effectiveness of the process of production achieve a high level. This is possible to execute with application of the software system Tecnomatix Plant Simulation, which is represent in this paper. This program system in application represents one step closer to automation design of production processes. In this paper it is executed a modeling and simulation of production system in realistic conditions, applying this program system, in 2D and 3D environment.

**Key words:** Tecnomatix Plant Simulation, Design, Modeling, Simulation.

### 1. UVOD

Projektovanje proizvodnih sistema sa stanovišta neophodnih resursa za izvođenje samog procesa proizvodnje već dugi niz godina predstavlja važan skup inženjerskih zadataka. To je proces koji je uslovljen mnoštvom uticajnih faktora različitog stepena jačine, pravca i smjera dejstva. U uslovima rastuće konkurencije u okolini postupci optimizacije procesa rada proizvodnih sistema dobijaju na značaju.

U sklopu projektovanja procesa proizvodnje, pored projektovanja tehnologije proizvodnje, neophodno je izvršiti i određivanje normativa (normativi vremena, materijala, površina, i dr.), pomoću kojih će efektivnost procesa proizvodnje dostići visok nivo. Pri tome najvažniju ulogu imaju normativi potreba rada proizvodnih sistema koji su usko vezani sa vremenom izrade i količinom proizvoda (dijelova).

Da bi se postigla visoka efektivnost proizvodnih sistema neophodno je izvršiti optimizaciju procesa proizvodnje. Optimizacija se u većem dijelu slučajeva izvodi primjenom neke od poznatih metoda a uzimajući u obzir vremena izrade, čekanja, otkaza, pripremno-završna vremena, pomoćna vremena i dr. Standardne procedure ovakvog vida optimizacije se uglavnom izvode manuelno ili primjenom programskih rješenja.

Troškovi izrade projekta proizvodnog sistema, potrebnog i dovoljnog kvaliteta nisu u osnovi, ništa veći od troškova izrade projekta nedovoljnog kvaliteta. Razlike se javljaju u vremenu, jer projekat nižeg kvaliteta generiše niže efekte u vremenu. Projekat potrebnog i dovoljnog kvaliteta nosi u sebi ugrađenu ekonomiju procesa, što je moguće ostvariti primjenom postupaka optimizacije procesa proizvodnje.

U ovom radu je predstavljen programski sistem Tecnomatix Plant Simulation, koji omogućuje jedan korak

bliže prema automatizaciji projektovanja proizvodnih procesa.

### 2. SIMULACIJA PROIZVODNIH PROCESA

Simulacija se od strane VDI (Verein Deutscher Ingenieure, Udruženje njemačkih inženjera) smjernica 3633 definiše kao oponašanje sistema, uključujući i njegove dinamične procese, prema modelu sa kojim se može eksperimentisati. Cilj simulacije je postizanje rezultata koji mogu biti preneseni u realni svijet. Osim toga, simulacija definiše pripremu, izvođenje i evaluaciju pažljivo usmerenih eksperimenata u sklopu projektovanog simulacijskog modela. Simulacija proizvodnih procesa se izvršava pomoću sljedećih koraka:

- Procjena i sakupljanje podataka, iz realnih proizvodnih procesa, koji su neophodni za projektovanje simulacionog modela,
- Određivanje cilja simulacijske studije i stvaranjem simulacionog modela u skladu sa definisanim ciljevima,
- Pokretanje eksperimenta za izvođenje simulacije, u sklopu simulacijskog modela. To daje određen broj rezultata, kao što su: koliko često su mašine u stanju otkaza, koliko često su blokirane, koje podešavanje mašina koristiti, kakvo iskorištenje mašine imaju, itd,
- Interpretacija podatka simulacije proizvodnje,

U procesu definisanja zadataka i ciljeva simulacijske studije, najčešće je potrebno postaviti sljedeća pitanja:

- Koju propusnost i kakav izlaz možemo očekivati?

- Koji je optimalan broj resursa (mašina, radnika, alata)?
- Gdje su potrebna međuskладишта?
- Koja je optimalna veličina međuskладишта?
- Koji optimalan broj radnih komada se može obraditi?
- Koje strategije su najprikladnije za taj zadatak?
- Kako neke ili sve od navedenih faktora spojiti u interakciji i proizvesti različite rezultate?

Nakon toga, potrebno je odlučiti o obuhvatu simulacije: samo proizvodni pogon ili i druga područja proizvodnog sistema (prijem, skladištenje, dostava itd.).

Razvijanje simulacionog modela je cikličan i evaluacijski proces. Simulacija se izvršava na osnovu prvog, odnosno početnog modela, a zatim njegovim poboljšavanjem i unapređivanjem, model se osposobljava da pruža optimalne rezultate nakon izvršenog procesa simulacije. Konačno, nakon nekoliko ciklusa poboljšavanja i unapređivanja, dolazi se do optimalnog simulacionog modela za adekvatni proizvodni proces. Tako definisan optimalni simulacioni model predstavlja stvarni proizvodni proces, za koga je potrebno izvršiti neophodna istraživanja i analize.

U pravilu, simulacija se primjenjuje u slučajevima kada se :

### 1. Planira novi proizvodni sistem

U ovom slučaju simulacija ima sljedeće prednosti:

- Otkrivanje i eliminaciju problema koji bi inače zahtevali korektivne mjere u pogledu cijene i vremena tokom lansiranja proizvodnje,
- Određivanje i optimizaciju vremena, kao što su vremena obrade, vremena zastoja, vremena za ponovno pokretanja, kao i kapacitet proizvodnih sistema,
- Utvrđivanje granica efikasnosti mašina i postrojenja kao cjeline,
- Istraživanje kako kvarovi utiču na kapacitet i iskorištenje mašina,
- Određivanje koliko je radnika potrebno za odgovarajući kapacitet,
- Sticanje znanja o ponašanju pogona,
- Određivanje pogodne kontrolne strategije za mašine i način njihove interakcije,
- Vrijedovanje različitih alternativa pokretanjem brojnih simulacija eksperimenata.
- Umanjivanje investicionih troškova za proizvodne linije bez ugrožavanja zahtjevanih izlaznih veličina,

### 2. Unapređuje postojeći proizvodni sistem

U ovom slučaju simulacija ima sljedeće prednosti:

- Poboljšanje performanse postojećih proizvodnih sistema, preko implementacije mjera koje su provjerene u simulacijskom okruženju prije sprovođenja,
- Optimizaciju kontrolnih strategija, koje su ranije definisane,
- Testiranje izvršavanja svakodnevnih postupka u svrhu obezbjeđenja nesmetanog odvijanja proizvodnog procesa,

### 3. Uvodi plan koji je definisan u praksi

Ovdje simulacija ima sljedeće prednosti:

- Formiranje obrazca za stvaranje upravljačkih strategija.

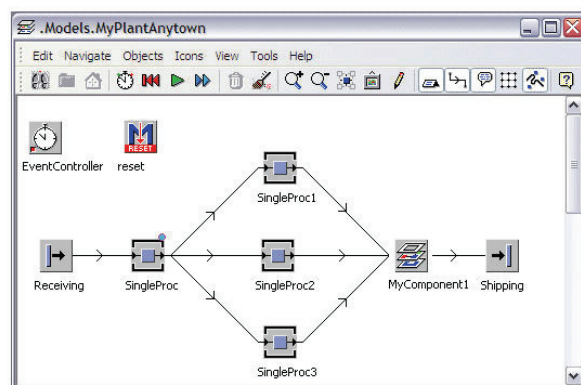
- Testiranje različitih scenarija tokom faze probnog rada pogona.
- Obučavanja operatera na mašinama u različitim okruženjima, u kojima mašina i pogon može biti.

## 3. PRIKAZ PROGRAMSKOG SISTEMA TECNOMATIX PLANT SIMULATION

Tecnomatix Plant Simulation, predstavlja programski sistem, koji je namjenjen za modeliranje, simulaciju i optimizaciju procesa proizvodnje. Optimizacija procesa proizvodnje pomoću ovog programskog sistema vrši se na osnovu vremenski orjentisane simulacije i događajno orjentisane simulacije.

Vremenski orjentisana simulacija uzima u obzir veliki opseg različitih vrsta proizvodnih vremena, dok događajno orjentisana simulacija uzima u obzir samo one tačke u vremenu na koje događaji imaju uticaj u sklopu simulacionog modela.

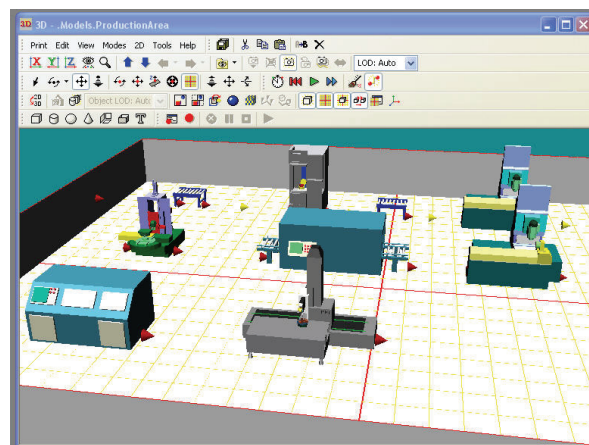
Modeliranje proizvodnih procesa odnosno stvaranje simulacionog modela realnih proizvodnih procesa primjenom programskog sistema Tecnomatix Plan Simulation je moguće izvršiti u 2D i 3D okruženju.



Slika 1. Modeliranje proizvodnih procesa u 2D okruženju

Modeliranje u 2D okruženju, prikazano je na slici 1, a primjenjuje za kompleksnije optimizacione probleme, koji se odnose prvenstveno na vremensko uravnoteženje procesa, odnosno analizu procesa proizvodnje sa stanovišta vremena (vremena izrade, pomoćna i dodatna vremena, pripremno-završna vremena, ciklusi proizvodnje i dr.).

Modeliranje u 3D okruženju, prikazano je na slici 2, a prvenstveno se koristi za praćenje rasporeda tehnoloških sistema i uređaja, koje je neophodno prostorno rasporediti u odgovarajući proizvodni sistem.



Slika 2. Modeliranje proizvodnih procesa u 3D okruženju

Modeliranje u 2D i 3D okruženju je moguće povezati, tako da se modeliranjem u 3D okruženju na automatizovan način generiše model u 2D okruženju.

Tok stvaranja simulacionog modela se odvija na sljedeći način:

- Generisanje u 2D ili 3D okruženju odgovarajućih modela tehnoloških sistema, uređaja, načina transporta materijala, ulaza, izlaza i dr., iz baze podataka pomenutih tehnoloških jedinica,
- Izrada prostornog rasporeda izabranih tehnoloških jedinica i njihovo prilagođavanje uslovima koji se odnose na realne procese proizvodnje,
- Povezivanje odgovarajućih tehnoloških jedinica u proizvodne linije. Tako definisane proizvodne linije predstavljaju realne proizvodne tokove, koji se javljaju u odgovarajućem proizvodnom sistemu,
- Podešavanje svih parametara za svaku od izabranih tehnoloških jedinica, koje čine odgovarajuće proizvodne tokove. Podaci koji se u ovom koraku unose trebaju u što većoj mjeri odgovarati vrijednostima iz realnih procesa proizvodnje,
- Definisane odgovarajućih objekata, u vidu dijagrama, tabela, histograma i sl., koji imaju funkciju praćenja i prezentovanja rezultata simulacije procesa proizvodnje,
- Modeliranje proizvodnog procesa i njegovo podešavanje u cilju stvaranja uslova za izvođenje procesa simulacije odnosno testiranje modela simulacije,
- Ukoliko projektant nije zadovoljan sa rezultatima modela simulacije, vrši se korekcija ulaznih parametara sve dok se ne dobije model simulacije koji daje zadovoljavajuće rezultate.

Mogućnosti programskog sistema Tecnomatix Plan Simulation sa aspekta predmeta i načina simulacije se ogledaju kroz simulaciju i modeliranje:

- Proces proizvodnje pomoću velikog broja različitih strategija proizvodnje,
- Proces proizvodnje pomoću tehnološkog procesa,
- Stanja: u otkazu, u radu, u pauzi,
- Učesnika u radu i poslova koji oni obavljaju,
- Sistema radnih smjena,
- Transportnih sistema i td.

## 4. PRIMJENA PROGRAMSKOG SISTEMA TECNOMATIX PLANT SIMULATION

### 4.1 Model proizvodnog procesa

Primjena programskog sistema Tecnomatix Plan Simulation u ovom radu je prikazana na modelu proizvodnog procesa za proizvodnju i montažu koljenastih vratila za potrebe motornih pila.

Proces proizvodnje u konkretnim uslovima obuhvata izradu tri dijela koljenastog vratila:

- polutku magneta,
- polutku kvačila i
- klipnjaču.

Kao ulazni parametri za proces simulacije i modeliranja proizvodnog procesa za izradu i montažu koljenastih vratila pomoću programskog sistema Tecnomatix Plan Simulation korišteni su sljedeći podaci:

- tehnološki proces proizvodnje dijelova koljenastog vratila,
  - redosljed operacija
  - vremena izrade
  - pomoćna vremena
  - spisak mašina
- broj komada koljenastih vratila na godišnjem nivou.

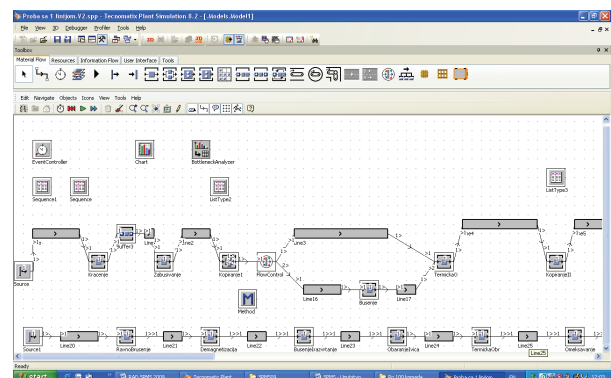
### 4.2 Simulacija proizvodnog procesa

Simulacija proizvodnog procesa za izradu i montažu koljenastih vratila pomoću programskog sistema Tecnomatix Plan Simulation u 2D okruženju se sastoji od nekoliko koraka:

- Definisane prostornog modela i generisanje pojedinačnih procesa, koji predstavljaju operacije u procesu proizvodnje iz tehnološkog procesa,
- Definisane udaljenosti između pojedinačnih tehnoloških sistema kako bi se izvršila simulacija vremena koje se gubi pri transportu dijelova od predhodne do sljedeće operacije,
- Povezivanje pojedinačnih procesa u tokove obrade materijala prema projektovanom tehnološkom procesu,
- Definisane potrebnih vremena za pojedinačne procese,
- Definisane metoda i pravila prelaza radnih komada u toku obrade materijala,
- Definisane objekata za praćenje i evidentiranje rezultata simulacije
- Izvođenje početnog procesa simulacije,
- Analiza rezultata simulacije,
- Izmjena simulacionog modela i
- Izvođenje završnog procesa simulacije.

Simulacija proizvodnog procesa za izradu i montažu koljenastih vratila pomoću programskog sistema Tecnomatix Plan Simulation u 2D okruženju je prikazana na slici 3.

Nakon izrađenog zadovoljavajućeg modela proizvodnog procesa za izradu i montažu koljenastih vratila u 2D okruženju, izvršeno je modeliranje proizvodnog procesa u 3D okruženju. Svrha modeliranja u 3D okruženju je prije svega određivanje prostornog rasporeda mašina i opreme u proizvodnom pogonu.



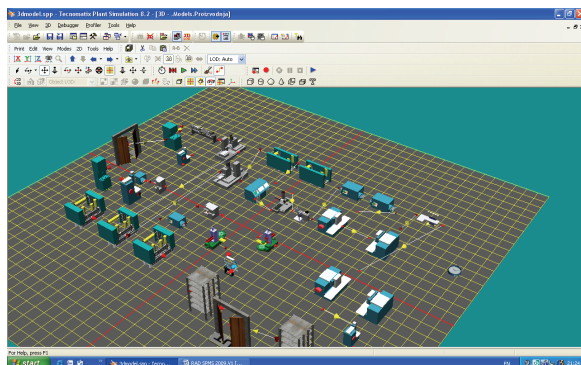
Slika 3. Segment simulacionog modela prikazanog u 2D okruženju

Postavljanjem mašina i uređaja na tečno definisane lokacije u proizvodnom pogonu u 3D okruženju određuju se precizne udaljenosti između mašina koje utiču na optimizaciju ranije izvršenog modela.

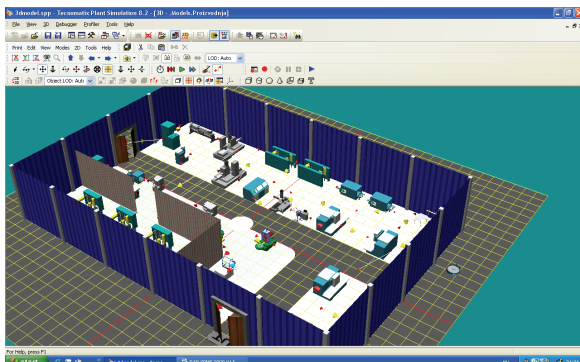
Programski sistem Tecnomatix Plan Simulation omogućuje vezu između 2D i 3D modela simulacije proizvodnih procesa, te je ta mogućnost u konkretnim uslovima korišćena za prelazak iz jednog modela u drugi.

Simulacioni model proizvodnog procesa za izradu i montažu koljenastih vratila pomoću programskog sistema Tecnomatix Plan Simulation u 3D okruženju je prikazan na slici 4. Ilustracija proizvodnog pogona za izradu i montažu koljenastih vratila prikazana je na simulacionom modelu (slika 5). Ovaj model je formiran na osnovu predhodnih informacija o broju, rasporedu i položaju potrebnih tehnoloških sistema i opreme.





Slika 4. Simulacioni model prikazan u 3D okruženju

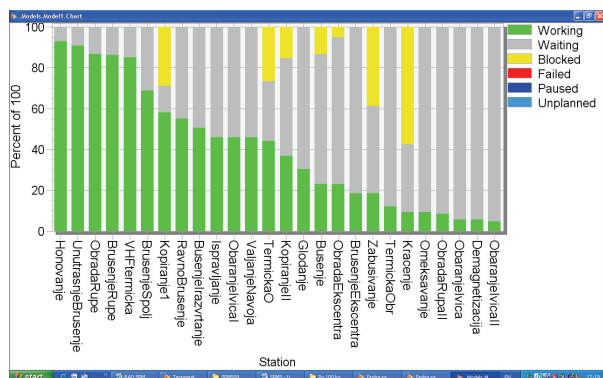


Slika 5. Simulacioni model smješten u odgovarajući proizvodni pogon

### 4.3 Rezultati simulacije proizvodnje

Izvođenjem početnog procesa simulacije i analizom rezultata simulacije formiraju se smjernice za poboljšanje simulacionog modela. U modelu proizvodnog procesa za izradu i montažu koljenastih vratila nakon analize rezultata identifikovana su uska grla proizvodnje i nagomilavanje radnih komada na tačno definisanim operacijama proizvodnog procesa.

Rješavanjem tih nedostataka, uvođenjem međuskладиšta i povećanjem broja mašina, ostvareno je znatno kraće vrijeme ciklusa proizvodnje. Na primjeru partije od 100 komada koljenastih vratila, ušteda u vremenu proizvodnje nakon izvršene simulacije je iznosila oko 40 %.



Slika 6. Stepen iskorištenja mašina u toku procesa proizvodnje

Nakon izvršenog projektovanja i simulacije proizvodnih procesa u 3D okruženju određene su tačne lokacije mašina i uređaja u prostornom rasporedu proizvodnog pogona. Na osnovu tih informacija ciklusa proizvodnje je smanjen za 5% , kao rezultat uštede na vremenu prilikom transporta dijelova između postavljenih mašina.

U rezultatu izvođenja simulacije proizvodnog procesa

generišu se vremena ciklusa za odgovarajuće veličine partija dijelova kao i procentualna iskorištenja mašina u toku procesa proizvodnje. Prema projekovanom optimalnom simulacionom modelu, za slučaj izvedene simulacije proizvodnog procesa za partiju od 100 komada koljenastih vratila, procentualno iskorištenje mašina prikazano na slici 6.

## 5. ZAKLJUČAK

Modeliranjem i simulacijom proizvodnih procesa omogućuje se stvaranje modela, koji predstavljaju adekvatne proizvodne procese, čime se ostvaruju sljedeće prednosti:

- Unaprijeđenje produktivnosti postojećih proizvodnih sistema,
- Smanjenje ulaganja u planiranje novih proizvodnih objekta i kapaciteta,
- Smanje zaliha i protoka vremena,
- Optimizaciju dimenzija proizvodnih sistema, uključujući rezervne veličine,
- Smanjenje rizika ulaganja preko ranog dokazivanja koncepcije proizvodnih sistema,
- Maksimizaciju iskorišćenja proizvodnih resursa,
- Pobljšanje projektovanja proizvodnih linija i rasporeda mašina.

U prikazanom primjeru, kao krajnji rezultat izvođenja simulacije dobijeni su podaci koji se odnose na trajanje ciklusa proizvodnje, iskorištenje resursa, kao i potrebne dimenzije proizvodnog sistema koje zadovoljavaju postavljene uslove proizvodnog procesa.

## 6. LITERATURA

- [1] Jokanović, S.: *Geometrijsko modeliranje*, Mašinski fakultet Banjaluka, Banjaluka, 2006.
- [2] Jovišević, V.: *Projektovanje tehnoloških procesa*, Mašinski fakultet Banjaluka, Banjaluka, 2005.
- [3] Programski sistem *Tecnomatix Plant Simulation* – UGS Corporation - Siemens Product Lifecycle Management Software Inc., 2009.
- [4] Zelenović, D.: *Projektovanje proizvodnih sistema*, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2003.
- [5] Zelenović, D., Ćosic, I., i dr.: *Automatizovani postupak za oblikovanje proizvodnih sistema* – APOPS 08, Novi Sad 1990-92.

**Autori: Prof. dr Vid Jovišević, Prof. dr Simo Jokanović, Stevo Borojević, dipl.inž.**, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno mašinstvo, Ulica Stepe Stepanovića 75, 78000 Banjaluka, Bosna i Hercegovina, Tel.: +387 51 465-473, Fax: +387 51 462-400.  
E-mail: [vid.jovisevic@blic.net](mailto:vid.jovisevic@blic.net)  
[simoi@urc.bl.ac.yu](mailto:simoi@urc.bl.ac.yu)  
[stevoborojevic@hotmail.com](mailto:stevoborojevic@hotmail.com)

Slavica Cvetković

## MODELIRANJE SISTEMA TOKOVA MATERIJALA

**Rezime:** U ovom radu se definišu modeli sistema toka materijala u konkretnom pogonu za proizvodnju radiatora. Za modeliranje se primenjuju algoritmi i grafovi. Iz analize i promene stanja procesa dobijaju se saznanja o funkcionalnoj zavisnosti. Generiše se matematički model koji opisuje proces, tako da se njegovo ponašanje analizira i programira. Rezultati ovako modeliranog sistema mogu se interpretacijom vratiti u realnost.

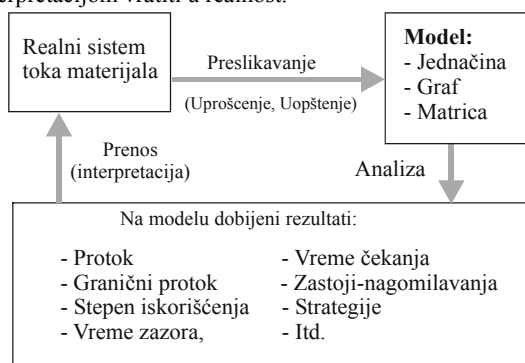
**Cljučne reči:** modeliranje, sistem, materijal

## MODELLING OF MATERIAL COURSE SYSTEMS

**Apstrakt:** In this paper, there are definitions of material course system models for radiators production. We use many different algorithms and graphs for modelling these courses. About their functional dependence we get information from analysis and change of process conditions. Also, we generate mathematical model which describes the process, so we can analyse and programme its behaviour. The results of a modelled system in such a way can be returned into reality by means of interpretation.

### 1. UVOD

Jedan od najkreativnijih zadataka inženjera sastoji se u tome da se naučnim metodama uz pomoć apstrakcije i uprošćenja tzv. modelima predstave realni sistemi i procesi. Za modeliranje se najpre primenjuju algoritmi, grafovi, tabele, slike blokova i šeme delovanja. Iz analize stanja i promene stanja procesa mogu se dobiti saznanja o funkcionalnoj zavisnosti. Metodom tehničke teorije sistema generišu se matematički modeli koji u značajnim granicama opisuju proces i čine mogućim da se njegovo ponašanje analizira i programira. Rezultati izvedenih ispitivanja i saznanja na modelu mogu se svakako samo pogodnom interpretacijom vratiti u realnost.



Sl.1.1 Rad sa modelima toka materijala

Na sl. 1 generalno se objašnjava rad sa modelima u izučavanju tokova materijala kao i pojmovi koji se tu uvode. Kod poznatih struktura toka materijala postoji postupak preslikavanja, najčešće u kvantitativnom predstavljanju, npr. u formi protoka ili međuvremenu dolazaka transportnih jedinica. Sa poznavanjem strategije (na primer prioriteta prolaza) i statističkih elemenata (na primer transportne putanje, račvanje, spajanje) mogu se predstaviti transportne jedinice u svom dinamičkom procesu.

Jedan sistem toka materijala sa složenom ili još definitivno neutvrđenom strukturom (u fazi planiranja) predstavlja se po pravilu najpre kao kvalitativna šema.

Postupak analize odnosi se na kvantitativna i kvalitativna vrednovanja. Kvantitativno vrednovanje može biti

provedeno egzaktno matematički, dakle analitičkim metodama ili u obliku simulacija (u dobroj meri kao "matematički eksperiment"). Pri simulaciji - promene stanja se određuju numerički, korak po korak, uz pomoć računara. Posle jednog, kao dovoljno procenjenog vremena, postupak se završava i iz predstavljanja rezultata određuje rezultat.

Kao i u drugim tehničkim procesima, realne promene stanja sistema toka materijala mogu se u celosti ili u delovima determinisati i stohastički, jednovremeno, kontinualno ili diskontinualno odvijati.

To za praktičnu primenu znači, da se u realnosti kontinualne promene stanja u modelu smeju takođe diskontinualno preslikovati (ako je tako jednostavnije), da bi se brže došlo do rezultata, a da rezultati pri tome ne budu pogrešni. Za kreativni postupak modeliranja, važno je samo da inženjer sa odgovarajućim obimom rada, postigne dovoljno snažan dokaz svog modela.

U jednom determinističkom sistemu, sve promene stanja odvijaju se "po planu": iste ulazne vrednosti sistema deluju uvek isto i daju tačno prognozirane izlazne vrednosti. Ali već jedna jedina slučajna promenljiva mora da vodi stohastičkom sistemu, jer iste ulazne veličine sada različito deluju (uslovljene slučajem) na izlazne vrednosti.

### 2. OPIS SISTEMA

Da bi smo definisali sve elemente unutar i van posmatranog industrijskog preduzeća neophodno je poći od definicije logistike pod kojom se podrazumeva proučavanje protoka materijala počevši od izvora sirovina pa završavajući sa isporukom gotovih proizvoda krajnjim korisnicima. Prvi element predstavljaju izvori sirovina (Isi) i pripadaju sistemu tržišta nabavke TN. Drugi element predstavljaju skladišta materijala (SMj), pripada sistemu preduzeća (Pd). Treći element čine proizvodni pogon (PPk) i unutrašnji element preduzeća (Pd). Četvrti element je skladište gotovih proizvoda (SPI). Peti element predstavljaju kupci finalnih proizvoda (Kpm). Dakle, logistički sistem (LGs) može se izraziti u vidu sledećeg skupa:

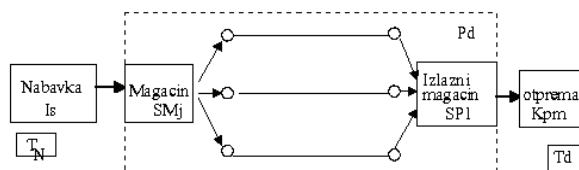
$$LGs = (Isi, SMj, PPK, SPI, Kpm) \quad (2.1)$$

Ovakvo postavljen logistički sistem omogućava integralni

pristup pri rešavanju problema vezanih za protok materijala i njegovu optimizaciju koja nije moguća pri parcijalnim rešenjima.

Logistički sistem predstavljen šematski na sl.2.1 ili matematičkim skupom (2.1) primenjen na poslovanje konkretnog preduzeća poseduje određena operativna ograničenja koja se manifestuju kao unutrašnja ili spoljašnja. Kao važna unutrašnja ograničenja, na prvom mestu ističu se već izgrađeni proizvodni pogoni i skladišta. Kao drugo unutrašnje ograničenje navodi se postojeća sposobnost preduzeća da obezbedi nivo usluga koji će zadovoljiti potrebe potrošača. Trećim unutrašnjim ograničenjima mogu se smatrati uslovi prodaje. Kada su u pitanju spoljašnja ograničenja najpre treba naglasiti da preduzeće ne može da ih drži pod kontrolom. Sa logističkog aspekta među njima su najvažnija:

- strategija konkurencije,
- državni propisi i
- način transportovanja.

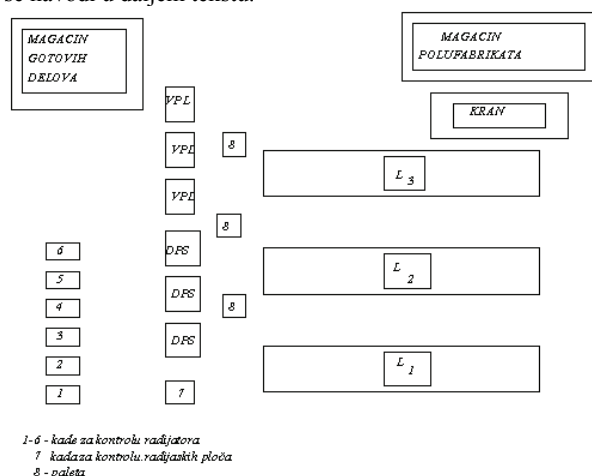


Slika 2.1 Šematski pristup logističkog sistema

### 3. ANALIZA PONAŠANJA SISTEMA

Postupak simulacije tokova proizvodnje prikazan je na primeru tehnološkog sistema za proizvodnju radijatora. Analizom strukture posmatranog sistema koji predstavljen slikom 3.1 uočavaju se njegovi stalni i prolazni entiteti. Prolazni entiteti se često nazivaju i *master entity* ili *client*, a stalni entiteti *slave entity* ili *server*. Kao glavni entitet sistema uočavamo radni predmet.

Stalni entitet modeliranog sistema su: kran, linija radijatorskih ploča, mašina za zavarivanje lamela, mašina za zavarivanje priključka, kada za kontrolu radijatorskih ploča, kada za kontrolu radijatora, transportno sredstvo, magacin polufabrikata, magacin gotovih delova, mesta za smeštaj međufaznih zaliha, palete, i radnik. Po uočavanju ovih entiteta pristupa se njihovoj operacionoj analizi kao što se navodi u daljem tekstu.



Slika 3.1 Struktura poslovnog sistema

#### 3.1 Kran

Operacije koje izvodi kran mogu se obuhvatiti sa tri ciklusa aktivnosti. On pre svega transportuje koturove lima do linije 1,2 i 3. Preduslovi za izvođenje svakog od ovih ciklusa aktivnosti su:

- kran slobodan, linija spremna za prijem lima i
- lim postoji u magacinu.

Stanje sistema u vreme dešavanja tog ciklusa je: kran zauzet, jedan kotur lima manje u magacinu. Posledice završetka ovog ciklusa su:

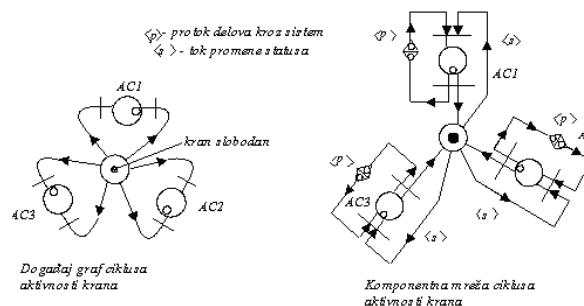
- kran slobodan,
- linija zauzeta i spremna za obradu.

Na slici 3.1 su prikazani dijagram ciklusa aktivnosti - graf događaj kao i komponentna mreža ciklusa aktivnosti kрана koji su dobijeni na osnovu podataka iz sopstvene operacione analize.

#### 3.2 Linije 1, 2 i 3

Linija u svom ciklusu aktivnosti izvodi sledeće aktivnosti:

- prihvata kotur lima sa ulaznog mesta buffer- a
- obrađuje lim transformišući ga u radijatorske ploče i
- odlaže radijatorske ploče na izlazni buffer linije.



Slika 3.2 Graf događaj i komponentna mreža aktivnosti kрана

Preduslovi za odvijanje ovog ciklusa aktivnosti su:

- linija je slobodna i podešena za obradu zahtevane vrste radijatora,
- odgovarajući kotur lima se nalazi na njenom ulaznom buffer- u

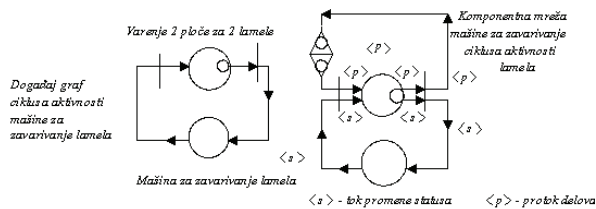
Stanje sistema u vreme izvršenja ciklusa je promenjeno činjenicom da je linija zauzeta i vrši se kontinualna promena broja radijatorskih ploča na izlaznom buffer- u linije. Posledice završetka ovog ciklusa su da je linija slobodna i da se u sistemu nalazi odgovarajući broj radijatorskih ploča. Deo modeliranog sistema koji se odnosi na funkcionisanje linije i njeno snabdevanje sa koturom lima kao i odlaganje i prijem radijatorskih ploča sa njenog izlaznog buffer-a.

#### 3.3 Mašina za zavarivanje lamela

Ciklus aktivnosti koji izvodi mašina za zavarivanje lamela podrazumeva zavarivanje dve lamele za radijatorske ploče. Preduslovi za izvođenje ovog ciklusa aktivnosti su:

- mašina je slobodna i
- na odgovarajućem skladišnom prostoru nalazi se paleta sa 32 radijatorske ploče.

Stanje sistema u vreme dešavanja ovog ciklusa aktivnosti je da je mašina zauzeta i da je broj sklopova radijatorskih ploča i lamela u sistemu promenjen. Posledice završetka ovog ciklusa aktivnosti su da je mašina slobodna, a da se u sistemu nalaze 16 novih sklopova radijatorskih ploča sa lamelama. Na slici 3.2 prikazani su dijagram ciklusa aktivnosti - graf događaj kao i komponentna mreža aktivnosti mašine za zavarivanje lamela koji su dobijeni na osnovu podataka iz sprovedene operacione analize.



Slika 3.3 Graf događaj i komponentna mreža aktivnosti mašine za zavarivanje lamela

### 3.4 Mašina za zavarivanje priključaka

Ciklus aktivnosti koji izvodi mašina za zavarivanje podrazumeva 4 priključka zavarivanja za radijatorske ploče. Preduslovi za izvođenje ovog ciklusa aktivnosti su:

- mašina je slobodna i
- na odgovarajućem skladišnom prostoru se nalazi paleta sa 16 radijatora.

Stanje sistema u vreme dešavanja ovog ciklusa aktivnosti je da je mašina zauzeta i da je broj sklopova radijatorskih ploča i priključaka u sistemu promenjen. Posledice završetka ovog ciklusa aktivnosti su da je mašina slobodna, a da se u sistemu nalaze 16 novih sklopova radijatorskih ploča i priključaka.

### 3.5 Kada za ispitivanje radijatora

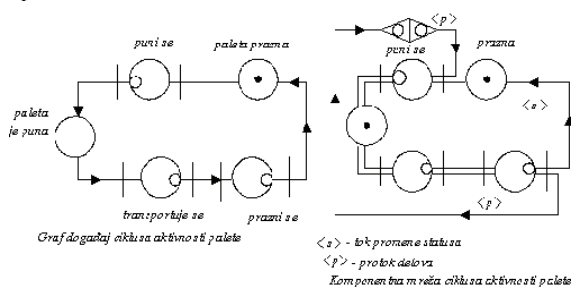
Ciklus aktivnosti koji izvodi kada za ispitivanje radijatora podrazumeva ispitivanje radijatora. Preduslovi za izvođenje ovog ciklusa aktivnosti su da je kada slobodna i da se na odgovarajućem skladišnom prostoru nalaze palete sa 16 radijatora. Stanje sistema u vreme dešanja ovog ciklusa aktivnosti je da je kada zauzeta i da je broj sklopova radijatora u sistemu promenjen. Posledice završetka ovog ciklusa aktivnosti su da je kada slobodna, a da se u sistemu nalaze 16 testiranih radijatora.

### 3.6 Transportno sredstvo

Ciklus aktivnosti transportnog sredstva podrazumeva transportovanje paleta sa polufabrikatima ili gotovim delovima između lokacije modeliranog sistema. Preduslovi za realizaciju ovog ciklusa aktivnosti su da je transportno sredstvo slobodno i da su sistemi na odgovarajućim lokacijama nalaze palete koje su spremne za transport. Pri izradi ovog simulacionog modela ne razmatra se problem samog transporta i njegove optimizacije već se smatra da je transport optimalno organizovan (dovoljan broj transportnih sredstava, optimalne putanje i uvek dostupna sredstva). Za protok delova - linija - mašina - kada - magacin gotovih delova podrazumeva se da su transportna sredstva uvek dostupna.

### 3.7 Paleta

Paleta je pasivan entitet modeliranog sistema ali veoma značajan sa aspekta sprovođenja simulacionog modela. Paleta može biti spremna za transport (puna), može da se puni i da bude prazna. Na slici 2.6 prikazani su dijagram ciklusa aktivnosti - graf događaj, kao i komponentna mreža aktivnosti palete koji su dobijeni na osnovu podataka iz sprovedene operacione analize.



Slika 3.4 Graf događaj i komponentna mreža aktivnosti palete

### 3.8 Radnik

Ciklus aktivnosti koji izvodi radnik podrazumeva manipulaciju radnih predmeta (od linije do palete, zatim od palete do odgovarajuće mašine, od odgovarajuće mašine do palete, od palete do kade).

Preduslovi za odigravanje ovog ciklusa aktivnosti su da je radnik slobodan (model podrazumeva da je radnik uvek slobodan, odnosno da u sistemu ima uvek radne snage), i da u sistemu postoji odgovarajući preduslovi za konkretnu manipulaciju radnih predmeta.

### 3.9 Magacin polufabrikata

Magacin polufabrikata je takođe pasivan entitet, ali je i kao takav veoma značajan za sprovođenje simulacionog eksperimenta. Jedan od ciljeva sprovođenja simulacionog eksperimenta je anticipiranje takvog nivoa zaliha koji će obezbediti nesmetano odvijanje proizvodnog procesa uz minimalne troškove zaliha. Atributi koji opisuju ovaj entitet su broj koturova lima i vreme. Ovaj entitet se ne modelira Petrijevim mrežama već je primena njegovog stanja u vremenu data kao jedan od izlaznih rezultata simulacionog programa.

### 3.10 Magacin gotove robe

Ovo je takođe pasivan entitet, ali je i kao takav veoma značajan. Jedan od ciljeva sprovođenja simulacionog eksperimenta je anticipiranje takvog nivoa zaliha koji će obezbediti nesmetano odvijanje proizvodnog procesa uz minimalne troškove. Atributi koji opisuju ovaj entitet su broj gotovih proizvoda u vremenskoj skali. Fleksibilnost pri definisanju ovog atributa omogućava primenu akumuliranih znanja iz teorije operacionih istraživanja i može se naznačiti kao jedna od mera performansi simulacionog softvera. U nastavku teksta prikazan je izgled klase dizajnirane na osnovu podataka dobijenih upredhodnom postupku.

## 4. OPIS PROBLEMA

Performanse proizvodnih sistema u velikoj meri zavise od načina organizacije toka materijala kroz sistem, odnosno definisanja prioriteta ili pravila kada i gde će biti izvedena odgovarajuća operacija. Ta ista pravila se koriste pri ulazu radnih predmeta u sistem, imaju uticaja na tehnološki postupak izrade, kao i pri alokaciji resursa sistema odgovarajućim radnim predmetima. Nivo kvaliteta termin plana procenjuje se različitim, često konfliktnim kriterijumima kao što su kriterijumi zasnovani na trajanju proizvodnog ciklusa, veličini zaliha u samom procesu proizvodnje, iskorišćenju resursa sistema, roka isporuke gotovog proizvoda ili kriterijumi zasnovani na troškovima. Pošto je nemoguće sačiniti termin plan koji zadovoljava sve ove kriterijume, u zavisnosti od aktuelnih proizvodnih ciljeva biraju se najčešće jedan ili dva kriterijuma pri izradi termin plana. Zbog svega navedenog jasno je zašto su problemi terminiranja krajnje kompleksni i značajni i zašto su često najinteresantniji specijalistima iz operacionih istraživanja koji su teoretski obradili najveći deo problema iz ove oblasti. I pored svega, problemi terminiranja proizvodnje još uvek pripadaju klasi problema koja je suviše kompleksna za sveobuhvatnu matematičku formulaciju dok su optimalna rešenja dostupna tradicionalnim tehnikama operacionih istraživanja jedino za ograničen broj idealizovanih slučajeva. Kod tehnoloških sistema problemi terminiranja problemi terminiranja postaju još složeniji ali se i pružaju nove mogućnosti za izradu optimalnog, aktuelnog, odnosno dinamički prilagođenog termin plana. Kod ovih sistema koristi se kompjuterska tehnologija za integraciju proizvodnih aktivnosti što podrazumeva da su informacije neophodne za izvođenje proizvodnih aktivnosti dostupne na vreme, da su precizne, u zahtevanom formatu i da opisuju trenutno stanje



promenljivog okruženja. Problemi terminiranja u današnje vreme rešavaju se uz pomoć ekspertnih sistema i to kombinovanjem simulacionih tehnika sa znanjima i tehnikama ugrađenim u sam ekspertni sistem. Simulacioni model se koristi za egzekuciju složenih algoritama terminiranja čime se dolazi do podataka o performansama sistema za različite kriterijume terminiranja, dok ekspertni sistem vrši procenu zadatih strategija, predlaže najpogodniju strategiju ili ukazuje na neophodnost korigovanja termin plana u cilju postizanja zadovoljavajućih performansi.

Pri izboru optimalnog termin plana u slučaju obrade  $M$  poslova na  $N$  mašinama termineru stoje na raspolaganju  $(M!)^N$  alternativnih rešenja među kojima za jasno definisan kriterijum sigurno postoji optimalno rešenje koje je moguće naći u konačnom broju iteracija. Međutim, broj mogućih kombinacija za svaki netrivialan problem je takav da jednostavno pretraživanje mogućih rešenja u potrazi za optimalnim nije praktično čak i sa najnovijom kompjuterskom tehnologijom. Iz tog razloga u praksi se u cilju ograničavanja prostora stanja dostižnih termin planova koriste teoreme, pravila i algoritmi razvijenih nakon detaljne analize modela posmatranog sistema.

Na taj način globalnim modeliranjem osnovnog procesa poslovnog sistema otvara se mogućnost integracije određenih procesa i aktivnosti kao i funkcionisanja poslovnog sistema u celini. Informacije neophodne za izradu termin plana u slučaju obrade  $M$  poslova,  $J_i$  ( $i = 1, 2 \dots M$ ) u radionici sa skupom mašina  $M_k$  ( $k = 1, 2, 3 \dots N$ ) su:

$t_{ij}$  - vremena obrade potrebna za izvođenje operacija  $O_{ij}$  naloga  $J_i$

$r_i$  - vremena pojavljivanja naloga  $J_i$  u sistemu,

$d_i$  - rok isporuke naloga  $J_i$ .

Osnovni zadatak terminiranja operacija je postizanje optimalnog termin plana što podrazumeva postojanje određenih kriterijuma, odnosno pokazatelja performansi sistema. Najčešće korišćeni kriterijumi su trajanje proizvodnih ciklusa, veličine zaliha u samom procesu proizvodnje, iskorišćenja resursa sistema, datum isporuke gotovog proizvoda ili kriterijumi zasnovani na troškovima. Vreme čekanja  $N_{ij}$  operacije  $O_{ij}$  je vremenski interval od završetka predhodne operacije za izradu te operacije. Vremenski interval  $F_i$  od pojavljivanja naloga  $J_i$  u sistemu do završetka njegove poslednje operacije naziva se vreme protoka nalog  $J_i$  kroz sistem, proizvodni interval ili vreme završetka datog naloga.

Efikasan i može se reći neizbežan pristup rešenju problema terminiranja je simulacioni eksperiment. Osnovni zadatak simulacionog eksperimenta je da definiše takve prioritete za raspoređivanje naloga koje zadovoljavaju unapred postavljen kriterijum optimalnosti ponašanja sistema, detaljan vremenski termin plan u obliku Gantovih dijagrama.

Kao što je navedeno, termin planovi se sačinjavaju prema unapred određenom kriterijumu optimalnosti performansi sistema. To mogu biti kriterijumi zasnovani na trajanju proizvodnog ciklusa, veličine zaliha u samom procesu proizvodnje u slučaju da je skladišni prostor mali ili ne postoji, iskorišćenje resursa sistema, roku isporuke gotovog proizvoda ili kriterijumio zasnovani na troškovima. Bez jasno definisanog kriterijuma optimizacije koji će ukazivati na kvalitet termin plana nema smisla izvođenje simulacionog eksperimenta. U našem slučaju osnovni kriterijum koji upravlja egzekucijom simulacionog programa je pravovremena isporuka proizvoda kupcu. Simulacioni program u slučaju konfliktnih situacija kada više radnih naloga čeka na jednu mašinu izabira radni nalog sa najvišim prioriteto. Važno je istaći da ne postoji jedinstveno rešenje problema terminiranja. Koja je tehnika pogodna za konkretan domen zavisi od složenosti tog domena, strukture i prirode tačaka odlučivanja, prirode ograničenja, mere optimalnosti, performansi sistema i mnogih drugih faktora. Zato se na kraju

aglašava da ne postoji niti se preporučuje pokušaj projektovanja univerzalnog simulacionog alata koji će pokriti sve slučajeve u praksi. Mnogobrojne karakteristike fleksibilnih tehnoloških sistema koje imaju odlučujući uticaj na njihove performanse verovatno mogu biti obuhvaćene u jednom softverkom paketu, ali bi njegov stepen iskorišćenja u slučaju pojedinačnog korisnika bio minimalan i to iz više razloga. Kako se povećava univerzalnost simulacionog paketa za terminiranje tako se smanjuje njegova efikasnost u primeni za svaki slučaj pojedinačno. U ovom radu se preporučuje izrada originalnog simulacionog modela za svaki pojedinačni slučaj jer su tada specifičnosti modeliranog sistema potpuno obuhvaćeni programom, program je pristupačan korisniku, svi zahtevi korisnika su ugrađeni u program, i na kraju, pošto je program pisan u objektno orijentisanom jeziku C++, može se bez teškoća dograditi u slučaju budućih dodatnih zahteva.

## 5. ZAKLJUČAK

Sistemi tokova materijala modeliraju se tako da se svakoj vremenskoj tački u kojoj može egzistirati ulazna vrednost, dodeljuje rezerva vrednosti, odakle se aktuelna vrednost slučajno bira.

Mnogi procesi nisu stohastičke prirode, već se karakterišu komplikovanim pravilima. Dešava se da sam tehnički proces, čije je ponašanje zaista determinisano, pod uticajem smetnji prelazi u stohastički proces. Iz ovih razloga, izučavanje tokova materijala (kao i u ostalim oblastima) često stohastičko ponašanje pojedinih elemenata podređuje i time primenjuju stohastički modeli umesto komplikovanih determinističkih modela. Ovde je takođe prepušteno inženjerima da izaberu pogodan model pod uslovom da tačno interpretiraju prenos saznanja sa modela u realnost.

Validnost matematičkog modela ima za cilj da se utvrdi da li postoje problemi u modelu, ukoliko se ustanove problemi mora se ponovo pristupiti konstrukciji modela.

## 6. LITERATURA

- [1] Slavica Cvetković, " *Razvoj savremenih proizvodnih strategija u industriji*", Monografija, Zadužbina Andrejević, Beograd 2002 god. ISBN 86-7244-335-7
- [2] Cvetković S., Barac N., " *Optimal solution for organizing the logistics process of just-in-time conception*" Facta Universitatis, Uuniversity of Niš 2004. ISSN 0354-2025 (153-159)
- [3] Ceranić, S., Maletić R., Smiljić, S (2004): modeli u rešavanju tehničko ekonomskih problema biljne proizvodnje, Zbornik radova SYM-OP-IS-2004, str373-377, Beograd
- [4] Slavica Cvetković, „Razvoj koncepta upravljanja sa aspekta fleksibilnosti za domaću industriju prerade metala“, doktorska disertacija 1999god.
- [5] Cvetković S., " *Simulates softnjere for optimal ieevi of supplies i the vienj of JIT sistem* " Mihicterctvo osviti Ukraina, BICHIK ŽITI 11, Žitomirskogo inženjerno tehnologičesgo insitut, Texnički nauki, Ukraine 1999 year [254]

**Autori: Prof. dr Slavica Cvetković**, Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka, Katedra za proizvodno mašinstvo, Kneza Miloša br.7, 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija, Tel.: +381 28 425320, Fax: +381 28 425322.  
E-mail: smijoc@yahoo.com

S. Randelović, P. Milosavljević, B. Stanković

## SIMULACIJA PROCESA ISTISKIVANJA ALUMINIJUMA PRIMENOM FEM ADAPTIVNIH METODA

**Rezime:** Numerička simulacija procesa toplog ekstrudiranja aluminijuma uz softversku podršku zahteva što tačniji opis termomehaničkih veličina i parametara procesa. Integralno formulisanje problema zasniva se na primeni nelinearnih metoda konačnih elemenata sa izrazima po brzini i pritisku. Vremenska diskretizacija problema je predstavljena inkrementalnom aproksimacijom promene kontaktnih uslova. U toku simulacije istiskivanja, gotovih elemenata sa složenom geometrijom, konačni elementi su izloženi velikoj deformaciji tako da je neophodno periodično generisanje nove mreže.

**Ključne reči:** Istiskivanje, aluminijum, nelinearne FEM adaptivne metode

## SIMULATION OF ALUMINIUM PROCESS EXTRUSION WITH SUPPORT FEM ADAPTIVE METHODS

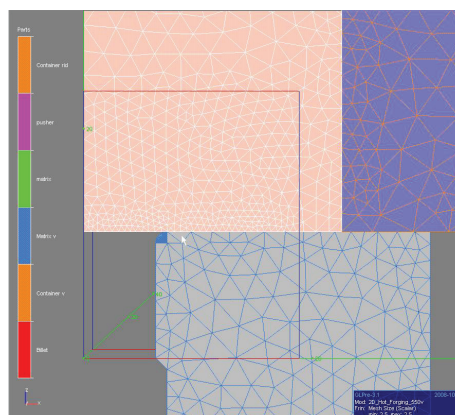
**Abstract:** Numerical simulation of hot extrusion processes with software support requires the description of a precise thermal and mechanical parameters. The integral formulation of the problem is based on applied the nonlinear finite element method with a mixed velocity and pressure formulation. The time discretisation problem is presented with incremental approximation contact conditions change. During extrusion simulation of a complex part, the FEM elements undergo excessive distortion so that a new mesh must be periodically rebuilt.

**Key words:** Extrusion, aluminium, Nonlinear FEM adaptive methods

### 1. UVOD

Projektanti tehnologije plastičnog deformisanja aluminijuma postupcima istiskivanja suočavaju se sa vrlo kompleksnom geometrijom gotovih elemenata, kratkim rokovima i visokim zahtevima u pogledu tačnosti rešenja. Najnoviji zahtevi idu u pravcu projektovanja tehnologije za izradu prostorno zakrivljenih elemenata, istovremeno istiskivanje dva ili više metala i sl.

Softverska simulacija ovakvih problema podrazumeva 3D automatsko generisanje mreže po zapremini otkovka (meshing) kao i periodično generisanje nove mreže (remeshing). Ova procesiranja zasnovana su na topologiji mreže koja je posebno sposobna za lokalno generisanje nove mreže (rezoning). Kod Lagrange metode mreža konačnih elemenata vezana je za materijal i kreće se sa njim prateći odgovarajuće deformacije u toku procesa. Razlikujemo updated Lagrange metod i potpuni Lagrange metod (total Lagrange). Kod obe metode zavisno promenljive su funkcija materijalnih (Lagrange) koordinata i vremena. Kod potpune Lagrange metode imamo uprošćeni integralni oblik po početnoj konfiguraciji i izvodi se uzimaju prema materijalnim koordinatama [1, 2]. Kod update Lagrange metode uzimaju se izvodi po prostornim koordinatama (Eulerian) i uprošćeni oblik podrazumeva integral po tekućim koordinatama deformisane konfiguracije. Osnovni nedostatak Lagrange pristupa je nemogućnost praćenja velikih deformacija. Eulerian pristup uzima prostorno fiksirane konačne elemente i čvorove mreže kroz koje pratimo kretanje kontinua. Ovde su zavisne promenljive date u funkciji prostornih (Eulerian) koordinata i vremena.



Slika 1. Mreža konačnih elemenata deformabilne zapremine priprema, matice i prijemnika

Podrazumeva se da sve promenljive, koje prate staru mrežu konačnih elemenata, moraju biti preslikane na novu mrežu sa tekućom promenom veličina (remesh). Kao jedno od boljih rešenja uvodi se proizvoljna kombinacija Lagrange i Eulerian metode da bi se objedinile njihove prednosti (Arbitrary Lagrangian Eulerian). Kod ALE metode pomeranja materijala i mreže u toku procesa deformisanja su nezavisna i mreža konačnih elemenata se može nezavisno kretati u odnosu na materijal. Uvode se posebne jednačine za opis kretanja materijala i mreže konačnih elemenata. ALE metodom se generalno smanjuje broj remshing – a. Uporedo se razvijaju iterativne metode za rešavanje linearnih sistema jednačina sa proračunom elemenata kompleksne geometrije čija je zapremina diskretizovana velikim brojem čvorova.

Rad ukazuje na glavne elemente modeliranja deformabilne zapremine priprema konačnim elementima pri istosmernom istiskivanju aluminijuma na temperaturama između 450° i 500°C.

## 2. JEDNAČINE I PARAMETRI PLASTIČNOSTI

### 2.1 Konstitutivne jednačine i jednačine trenja

Dostizanje postavljenih ciljeva u fazi projektovanja i optimizacija kompleksnih simulacija procesa istiskivanja predstavljaju izazove za savremene industrijske procese odnosno pouzdana softverska rešenja [3]. Kao odgovor postoji veliki broj naučnih radova, istraživanja i aktivnosti u oblasti nelinearnih metode konačnih elemenata za područje plastičnosti i viskoplastičnosti. Počev od ranih sedamdesetih nekoliko softverskih programa je ponudeno za 2D ili osnosimetrične analize a sada već i za 3D probleme (MSC.MARC, MSC.SuperForge, DEFORM, FORGE3, FORGE2008, ABAQUS). Ovi softveri se dosta uspešno primenjuju u proizvodnim kompanijama za rešavanje praktičnih problema plastične deformacije. Sa najnovijim razvojem u računarskim tehnologijama i mala cena paralelnih računarskih sistema učinili su realnim obimne i vrlo složene proračune za vrlo kompleksne geometrije gotovih elemenata. Ukoliko se razmatra konvencionalni proces toplog istiskivanja apsolutno se može zanemariti početni efekat elastičnosti i uzeti u obzir samo plastično ponašanje zagrejanog metala [4,5]. Prostorni izotropni uslov plastičnosti Norton Hoff može se napisati :

$$s = 2K(\sqrt{3}\dot{\epsilon})^{m-1} \epsilon \quad (1)$$

gde je  $s$  devijatorski deo tenzora napona,  $\epsilon$  dostignuti steepen deformacije,  $\dot{\epsilon}$  efektivna brzina deformacije, izražena preko tenzora brzina deformacije  $\dot{\epsilon}$ .

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \sum_{i,j} \dot{\epsilon}_{ij}^2} \quad (2)$$

$K$  je specifični deformacioni otpor metala koji se deformiše i direktno je u funkciji temperature  $T$  i ekvivalentan je dostignutoj deformaciji u toku procesa plastične deformacije:

$$K = K_0 (\epsilon_0 + \bar{\epsilon})^n e^{\frac{\beta}{T}} \quad (3)$$

i moguće je opisati fizičke parametre deformabilnog tela opisujući mikrostrukturu,  $m$  je indeks koji uzima osetljivost na brzinu deformacije, koji je takođe funkcija temperature  $T$  :

$$m = m_0 + m_1 T \quad (4)$$

Za materijale poput metala uslov nestišljivosti u polju brzine  $v$  može se napisati :

$$\text{div}(v) = 0 \quad (5)$$

Kod toplog istiskivanja kontaktni uslovi na granici  $\partial\Omega_c$  između zapremine koja se deformiše i alata izuzetno su složeni [1,2,5,6]. Često se koristi aproksimacija plastičnosti kao nelinearna zavisnost između smičućeg napona  $\tau$  i tangencijalne brzine na kontaktu  $v_s$  koja predstavlja razliku brzine metala i odogvarajuće tačke površine alata:

$$\tau = -\alpha_f K |v_s|^{q-1} v_s \quad \text{gde je } v_s = v - v_{\text{alata}} \quad (6)$$

gde je  $\alpha_f$  koeficijent trenja, koji zavisi od normalnog napona i  $q$  je funkcija kontaktnog trenja s obzirom na brzinu klizanja.

### 2.2 Integralno formulisanje problema

Na delu  $\Omega$ , gde su sile inercije i zapreminske sile zanemarene može se formulirati jednačina ravnoteže [5,6,7]. Na granici je predpostavljen nulti vektor napona na slobodnoj površini  $\partial\Omega_s$  dok se na kontaktnoj površini  $\partial\Omega_c$ , sa normalom  $n$ , između dela i alata, predpostavlja ograničenje da nema prodora, kada se radi o normalnim naponima pritiska:

$$v_s \cdot n = 0 \quad \text{ukoliko je } (\sigma \cdot n) \cdot n < 0 \quad (7)$$

Za bilo koje virtualno polje brzina  $v^*$  i pripadajući virtualni tenzor brzine deformacije, brzinska forma virtualnog rada se može napisati

$$\int_{\Omega} \sigma : \dot{\epsilon}^* dV - \int_{\partial\Omega_c} \tau \cdot v^* dV = 0 \quad (8)$$

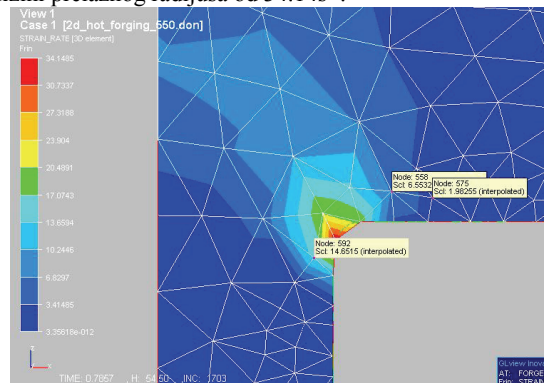
koji se pridodaje uslovu nestišljivosti (5) odnosno uslovu neprodiranja u kontinualnu sredinu (7). Tačan put zadavanja svih ovih uslova je korišćenje mešovitih izraza gde figurišu brzina i pritisak, koji je dat za bilo koju virtualnu brzinu  $v^*$  i bilo koji virtualni pritisak  $p^*$ .

$$\int_{\Omega} s : \dot{\epsilon}^* dV - \int_{\partial\Omega_c} \tau \cdot v^* dS - \int_{\Omega} p \text{div}(v^*) dV = 0 \quad (9)$$

i uprošćeni oblik ograničenja (uslova) nestišljivosti :

$$\int_{\Omega} p^* \text{div}(v) dV = 0 \quad (10)$$

Primer polje brzina deformacije, pri toplom istiskivanju punih komada, u blizini prelaznog radijusa matrice istiskivanja dato je na slici 2 gde se vidi izrazita promena u nekoliko izabranih čvorova. Na ulazu u žarište deformacije brzina deformacije ima vrednost na nivou  $1,98s^{-1}$ , sa maksimalnom vrednosti u blizini prelaznog radijusa od  $34.14s^{-1}$ .



Slika 2. Polje brzina deformacije u blizini prelaznog radijusa

### 2.3 Termički uslovi pri simulaciji procesa toplog istiskivanja

Jednačina toplotne ravnoteže može se napisati :

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \text{div}(k \text{grad}(T)) + \dot{q}_v \quad (11)$$

gde je  $\rho$  gustina materijala,  $c$  toplotni kapacitet i  $k$  parametar provođenja toplote. Unutrašnja generisana toplota  $\dot{q}_v$  plastičnom deformacijom je:

$$\dot{q}_v = f K (\sqrt{3}\dot{\epsilon})^{m+1} \quad (12)$$

gde  $f$  uzima u obzir deo energije koji se prevodi u toplotu i kreće se u granicama od 0,9 i 1.

Uvođenjem toplotnih efekata, koji prate procese plastične deformacije, granični uslovi procesa istiskivanja su složeniji [6,7] :

- na slobodnoj površini  $\partial\Omega_s$  emisija zračenja određuje se po modelu

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = \epsilon_r \sigma_r (T^4 - T_0^4) \quad (13)$$

gde je  $\epsilon_r$  parametar emisije toplote,  $\sigma_r$  je Stefan Bolcmanova konstanta i  $T_0$  je temperatura okoline,

- na parcijalnoj površini alata  $\partial\Omega_c$  sa normalom  $n$ ,



provođenje toplote na kontaktnoj površini sa predmetom obrade usled trenja uzima se u obzir :

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h_{cd}(T - T_{alata}) + \frac{b}{b + b_{alata}} \alpha_f K |V_s|^{q+1} \quad (14)$$

gde je  $h_{cd}$  parametar provođenja toplote sa alatom temperature  $T_{alata}$ , dok su  $b$  i  $b_{alata}$  ispunjenost dela odnosno šupljine alata.

Integralni izraz se može napisati za bilo koju test funkciju  $w$

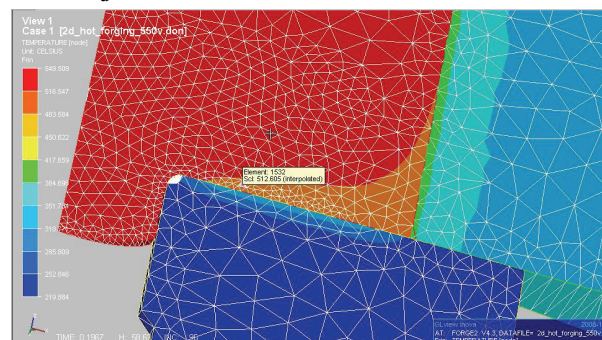
$$\int_{\Omega} \rho c \frac{dT}{dt} w dV + \int k \text{grad}(T) \cdot \text{grad}(w) dV - \int_{\Omega} \dot{q}_v w dV - \int_{\partial\Omega} \phi w dV = 0 \quad (15)$$

gde protok toplote kroz parcijalnu površinu, sa normalom  $n$ , uzima jedan od oblika (13) ili (14).

Sada konstitutivna jednačina zavisi od temperature i uslova o održanju mase, ima formu :

$$\text{div}(v) - 3\alpha_d \dot{T} = 0 \quad (16)$$

gde je  $\alpha_d$  koeficijent linearne dilatacije.



Slika 3. Temperaturna polja po deformabilnoj zapremini, matrici i prijemniku

### 3. AROKSIMACIJA DEFORMABILNE ZAPREME KONAČNIM ELEMENTIMA

#### 3.1 Diskretizacija konačnim elementima

Korišćenjem izoparametarskih elemenata, polje brzina se izražava preko čvorovih vektora brzine  $V_n$ , funkcija oblika  $N_n$  i vektora lokalnih koordinata  $\xi$  kao:

$$v = \sum_n N_n V_n(\xi) \quad (17)$$

tako da se tenzor brzina deformacije izražava preko :

$$\dot{\epsilon} = \sum_n V_n B_n \quad (18)$$

gde se komponente operatora B proračunavaju prema :

$$B_{ijkn} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial N_n}{\partial x_j} \delta_{ki} + \frac{\partial N_n}{\partial x_i} \delta_{kj} \right) \quad (19)$$

Slično polje pritiska se diskretizuje preko pritiska u čvorovima  $P_m$  sa kompatibilnom funkcijom oblika  $M_m$  :

$$p = \sum_m P_m M_m(\xi) \quad (20)$$

Za mešoviti pristup, dobija se sistem nelinearnih jednačina.

#### 3.2 Inkrementalni pristup

Dobijanje novih vrednosti, update, po čvorovima može se izvesti prema Euler-ovom eksplicitnom algoritmu. Ukoliko je

$X_n^t$  koordinatni vektor čvora  $n$  u trenutku  $t$ , sa vektorom brzine  $V_n^t$ , u trenutku  $t + \Delta t$  novi koordinatni vektor biće:

$$X_n^{t+\Delta t} = X_n^t + \Delta t V_n^t \quad (23)$$

Uvođenjem algoritma drugog reda za povećanje tačnosti, koji se specijalno odnosi na zakon o održanju zapremine, metodom Runge Kutta ili polu implicitnim algoritmom koordinatni vektor postaje :

$$X_n^{t+\Delta t} = X_n^t + \frac{1}{2} \Delta t (V_n^t + V_n^{t+\Delta t}) \quad (24)$$

Da bi model što realnije simulirao složeni kontakt između površine alata i površine predmeta, ili zapremine koja se deformiše, definiše se jedinstveni kontaktni algoritam. Površina alata opisana je jednačinom  $g(x,t)=0$ , dok je  $g(x,t) > 0$  predstavlja unutrašnjost alata. Inkrementalni kontaktni uslovi moraju uzeti u obzir tri različita slučaja. Sa materijalne

tačke sa koordinatnim vektorom  $X^t$  u trenutku  $t$  :

a – prelaz se može javiti između slobodne površine i kontakta  $g(x^t, t) < 0, (\sigma^t \cdot n) \cdot n = 0 \rightarrow g(x^{t+\Delta t}, t + \Delta t) = 0, (\sigma^{t+\Delta t} \cdot n) \cdot n < 0$  (25)

b – kontakt klizanja se zadržava tokom čitavog vremenskog intervala

$g(x^t, t) = 0, (\sigma^t \cdot n) \cdot n < 0 \rightarrow g(x^{t+\Delta t}, t + \Delta t) = 0, (\sigma^{t+\Delta t} \cdot n) \cdot n < 0$  (26)

c – kontakt se može izgubiti tokom inkrementa

$g(x^t, t) = 0, (\sigma^t \cdot n) \cdot n \leq 0 \rightarrow g(x^{t+\Delta t}, t) < 0, (\sigma^{t+\Delta t} \cdot n) \cdot n = 0$  (27)

Kada se koristi Euler-ov algoritam, diskretizovani kontaktni uslovi za čvor  $n$  mogu se napisati [1,2,4]:

a – prelaz: ukoliko na kraju inkrementa čvor ostaje unutar alata, projektuje se na alat, ali ova aproksimacija daje relativno netačne rezultate, uključujući značajne gubitke zapremine dela. Zato je poželjno smanjiti vremenski inkrement da ne bi doveli više od jednog čvora u kontakt sa površinom alata tokom svakog vremenskog inkrementa.

b – inkrementalni kontakt uslov je:

$$g(X_n^t, t) = 0, (\sigma_n^t \cdot n) \cdot n < 0, (V_n^{t+\Delta t} - v_{alata}) \cdot n = 0 \quad (28)$$

Projekcija na površinu alata mora biti sprovedena kada površina alata nije lokalno ravna.

c – inkrementalni gubitak kontakta postaje:

$$g(X_n^t, t) = 0, (\sigma_n^t \cdot n) \cdot n \geq 0, (\sigma_n^{t+\Delta t} \cdot n) \cdot n = 0 \quad (29)$$

#### 3.3 FE pristup za simulaciju toplog istiskivanja

Temperaturno polje je opisano istim elementima kao i polje brzina prema:

$$T = \sum_n T_n N_n(\xi) \quad (30)$$

Klasična poludiskretizovana forma jednostavno se dobija iz jednačine (15)

$$C \frac{dT}{dt} + H \cdot T + F = 0 \quad (31)$$

gde je  $T$  vektor temperatura u čvoru,  $C$  matrica kapaciteta i  $H$  matrica provođenja (kondukcije) toplote.  $C$  i  $H$  se proračunavaju kao:

$$C_{ij} = \int_{\Omega} \rho c N_i N_j dV \quad (32)$$

i

$$H_{ij} = \int_{\Omega} k \cdot \text{grad}(N_i) \cdot \text{grad}(N_j) dV \quad (33)$$

Dok  $F$  vektor sadrži disipaciju toplote u proseku plastične deformacije i granične uslove. Temperaturno polje može se integraliti po drugom algoritmu gde stavljam:

$$T = aT^{t-\Delta t} - (1.5 - 2a - g)T^t + (a - 0.5 + g)T^{t+\Delta t} \quad (34)$$



$$\frac{dT}{dt} = (1-g) \frac{T^t - T^{t-\Delta t}}{\Delta t} + g \frac{T^{t+\Delta t} - T^t}{\Delta t} \quad (35)$$

$$C = (0.5-g)C^{t-\Delta t} + (0.5+g)C^t \quad (36)$$

U Dupont-ovom algoritmu imamo  $a = 0.25$  i  $g = 1$ .

#### 4. GENERISANJE POČETNE I NOVE MREŽE

Za analizu plastičnih deformacija aluminijuma u toplom stanju mogu se naći rešenja gde se koriste kvadratni elementi pri 2D ili heksaedarni elementi pri 3D generisanju početne (meshing) odnosno nove mreže (remeshing) konačnih elemenata za oblast koja pokriva složene geometrije. Međutim, za složenije konture i geometrije gotovih elemenata poželjno je koristiti trougaone konačne elemente za 2D ili tetraedarne konačne elemente u 3D prostoru, koji dozvoljavaju više fleksibilnosti i prilagodavanje spoljašnjoj konturi [8]. Šta više, predpostavlja se da na početku imamo mrežu na granici kontinualne zapremine u vidu trouglova koji se mogu generisati CAD programom.

Da bi predupredili zastoje i prekide procesa simulacije usled uslova nestišljivosti, izabrani konačni elementi moraju da zadovolje uslov Brezzi – Babuska. Mogući izbor je tetraedarni 5 - čvorni element za brzinu sa linearnim kontinualnim pritiskom (sl.1)

#### 5. ZAKLJUČAK

Dat je kratak pregled osnovnih jednačina i parametara teroije plastičnosti koji su potrebni za simulaciju toplog istiskivanja. Prostorna i vremenska diskretizacija koja uključuje kontakt sa trenjem, termički uslovi deformisanja, automatsko generisanje početne mreže konačnih elemenata i njen prilagodavanje dostignutom stepenu deformacije (remehing), samo su osnove za jednu dublju i realniju analizu procesa istosmernog istiskivanja. Prikaz samo nekih od brojnih rezultata ukazuje na prednosti i mogućnosti ovakvog pristupa pri generisanju novih proizvoda. U bliskoj budućnosti očekuje se da industrija više koristi 2D i 3D simulaciju procesa deformisanja kao preduslov razvoja i napretka, odnosno njenu konkurentnost na svetskom tržištu.

#### 6. LITERATURA

- [1] S. Randjelović, "Modeliranje procesa istosmernog istiskivanja šupljih elemenata koji obezbeđuje visoku sposobnost procesa", doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Niš, 2006.
- [2] F. Krumphals, I. Flitta, S. Mitsche, T. Wlanis, A. Jahn, C. Sommitsch, "Comparison of experimental and Finite Element Modelling of the extrusion of AA6082 on both tools and extrudate as a function of process parameters", Proc. 11<sup>th</sup> International Esaform Conference on Material Forming, Lyon, France (2008).
- [3] S. Randjelović, S. Mladenović, P. Milosavljević, "Modelling of forward extrusion process for hollow elements on base of nonlinear adaptive finite element method", Journal for Technology of Plasticity, vol. 31, 1-2, Novi Sad, 2006. Serbia.
- [4] Atzema E. H, Heutnik J, "Finite element analysis of forward – backward extrusion using ALE techniques" University of Twente, Department of Mechanical Engineering, The Netherlands.
- [5] Mahajan P, Fourment L, Chenot J. L, "Implicit scheme for contact analysis in non-steady state forming", vol. 15, No. 7, pp. 908-924, Engineering Computation, ©MCB

University Press. 1997.

- [6] I. Flitta, T. Sheppard, "Nature of friction in extrusion process and its effect on material flow", Materials Science and Technology, vol. 19 No. 5, (2003) pp. 837-846.
- [7] Schikorra M, Tekkaya A. E, Donati L, Tomesani L, "Effect of Pocket Shape in the Extrusion of Aluminium Profiles", Aluminium Alloys, Their Physical and Mechanical Properties, Hirsch, J, Skrotzki, B, Gottstein, G (eds.) vol. 1, (2008) pp. 1387-1393
- [8] S. Randjelović, V. Stoiljković, Lj. Bogdanov, "Metal flow Modeling at the Forward Extrusion in the Shape Changing Area", The 13<sup>th</sup> International DAAAM symposium "Intelligent Manufacturing & Automation: Learning from Nature", 23-26<sup>th</sup>, October 2002, Viena, Austria.

**Autori: dr Saša Randjelović<sup>1)</sup>, docent, dr Pedja Milosavljević, docent, Bojan Stanković<sup>2)</sup>.**

<sup>1)</sup> Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno informacione tehnologije i menadžment, Beogradska 14, 18000 Niš, Srbija, Tel: +381 11 500702, 500629

<sup>2)</sup> NISSAL, do, Niš, Srbija, Tel.: +381 18 524 524.

E-mail: [sassa@masfak.ni.ac.yu](mailto:sassa@masfak.ni.ac.yu)  
[pedja@masfak.ni.ac.yu](mailto:pedja@masfak.ni.ac.yu)

Koreshkov V.N., Kheifetz M.L., Liakhovich A.L., Tochilo V.V.

## COMBINED PROCESSING CONTROL ON THE BASIS OF STATISTIC AND STRUCTURAL ANALYSIS

*It has been shown that the combination of statistic and structural analysis provides complex technological operations management on the basis of a number of parameters, optimizes and specifies factors through which it is necessary to control in real-time mode.*

**Key words:** *Technology of the automated designing, control systems of dynamic objects, quality.*

The method of structural analysis is one of the basic methods, used when investigating and developing engineering systems. The abbreviation SADT (Structured Analysis and Design Technique) is used for identifying it. The method SADT presupposes consecutive detailing of the system under analysis "top-down" [1, 2].

Different levels of analyzing the system are distinguished. On each level the decomposition of the analyzed system, which is more detailed, but completely equivalent to the preceding level, is presented. Thus not only the system, but also the environment is analyzed, which is exposed to consecutive detailing too, together with the system.

The method SADT, like other universal methods, gives recommendations on conducting the analysis and making out the results, but it doesn't give any recommendations on the ways of splitting. This question is connected with the peculiarities of each subject area and demands knowledge of the nature of the problem. For each subject area specific recommendations can be worked out, which will allow to decrease the amount of creative work and thus to raise labour productivity in the system design and analysis.

All in all the purpose of the technology, which has been worked out with the help of SADT-approach is, generally, complex technological processes design, which can be improved in a number of quality parameters.

SADT-diagram of the A0-level, which has been worked out on the basis of the traditional approach to designing technological processes and presupposes the presence of four main functions: design management (the A1-unit), working out of the manufacturing processes variant MP(A2), the evaluation of its cost price (A3) and the evaluation of its quality(A4).

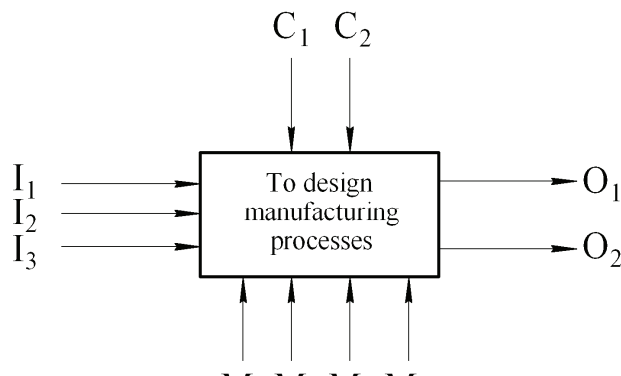


Fig. 1 - SADT-diagram of the 0-level of the automated design technology (MP)

SADT-diagram of the 0-level, where input management data, the ways (mechanisms), necessary for completing the task, and output data are indicated, has been worked out with the aim of developing automated design technology and it considers:

- C<sub>1</sub>- terms of designing;
- C<sub>2</sub>- productivity;
- I<sub>1</sub>- construction documentation of the product;
- I<sub>2</sub>- the type of machine tool, CNC-system, instrument characteristics and calculation scheme of the system BTFM (blank-tool-fixture-machine tool);
- I<sub>3</sub>- parameters of the processed material;
- M<sub>1</sub>- the complex of mathematical models (CMM) of the BTFM system;
- M<sub>2</sub>- modelling program complex(MPC);
- M<sub>3</sub>- database (DB) of the materials;
- M<sub>4</sub>- DB of the instruments;
- O<sub>1</sub>- required MP;
- O<sub>2</sub>- requirements for correcting management or inputs.

When developing design technology the functions “The Forming of Mathematical Models” (A21) and “MP Modelling” (A23) are analyzed in detail and structured, the result of which is the SADT-diagrams of the levels A21 (fig. 2) and A23 (fig. 3).

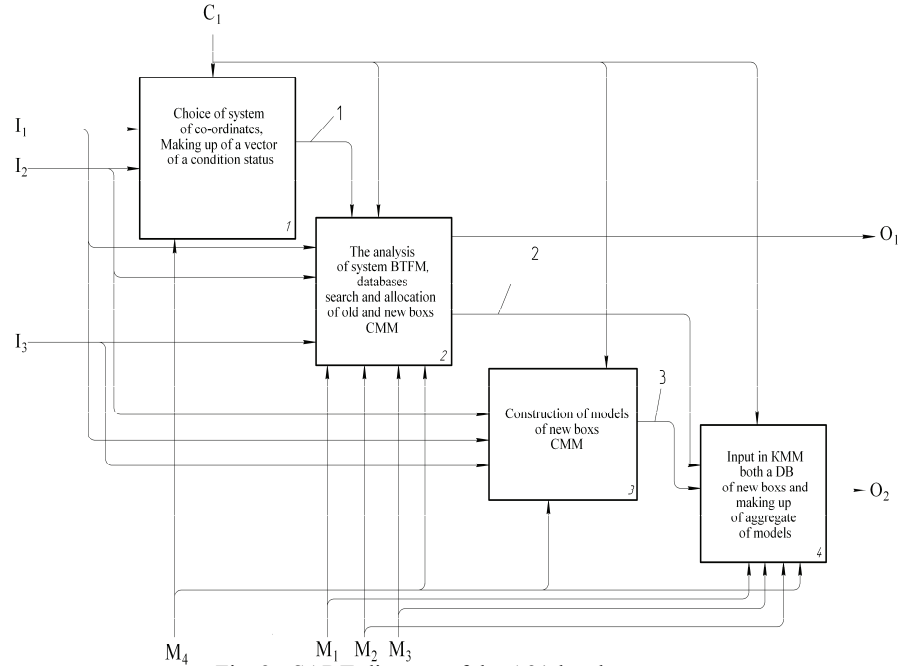


Fig. 2 - SADT-diagram of the A21-level

1- the coordinate system of the state and management vector; 2- the available in the CMM units; 3- new units

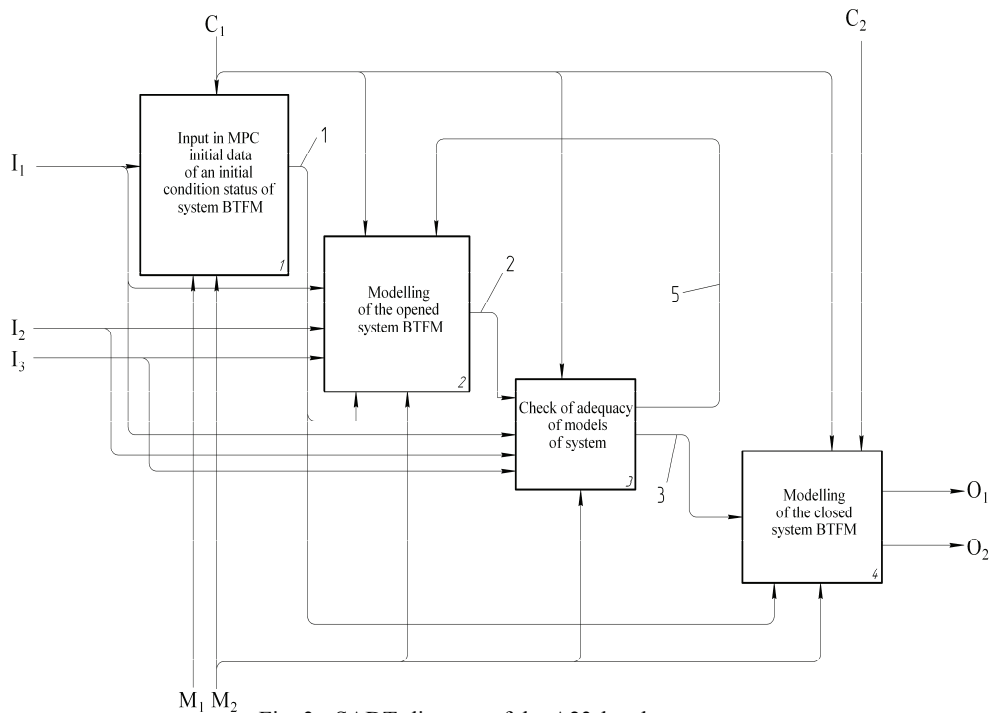


Fig. 3 - SADT-diagram of the A23-level

1-MPC; 2- transition processes; 3- adequate model; 4- requirements for the correction of modelling conditions

We shall consider management modelling of the technological operation in a closed system BTFM (unit A234) on the example of complex processing of the surface layer operation [5]. The operation combines thermal processing with the removal of the deficient surface layer with the help of cutting and strengthening deformation of the processed surface. In order to temporarily decrease the strength of the deficiency layer, plasma heating is used, and in order to remove allowance and deformation of the surface, a cutting tool is used [6].

It is expedient to use quadratic functions as a statistic model of combined processing, and to build and evaluate them one can use dispersive, correlative и regression analysis.

When using structural analysis [5] of combined thermomechanical processing for detailing on SADT-diagram of the technological operation of cutting with preliminary plasma heating of the removed layer one should differentiate between physicomechanical and geometrical quality parameters (picture 4).

It is expedient to control the operation with the help of the most influential and the least correlative with others factors, that is why for the maintenance of the required parameters the following technological factors are the most suitable [6]:

$C_1$ - the movement of tools ( $L$  – the distance from the heating speck to the cutting edge of the tool;  $S$  – the speed of tool advance);

$C_2$ - termomechanical factors ( $I$  – current intensity of plasma arch;  $V$  – the speed of the principal motion);

$I_1$ - initial geometrical parameters ( $Sm$ , – waviness;  $Ra$  – roughness);

$I_2$ - initial physicomechanical parameters ( $HRC$  – hardness ;  $U_n$ - degree of hardening);

Slightly variable characteristics:

$M_1$ - the location of a concentrated energy source ( $h_c$  – the distance of the nozzle of the plasma generator from the processed surface;  $t$  – the depth of cutting when removing the deficient layer);

$M_2$ - electromagnetic factors ( $G_e$  – the expense of plasma formation gas;  $U_H$  - the pressure of plasma arch)

$O_1$ - the required geometrical parameters ( $Sm$ ,  $Ra$ );

$O_2$ - the required physicomechanical parameters ( $HRC$ ,  $U_n$ ).

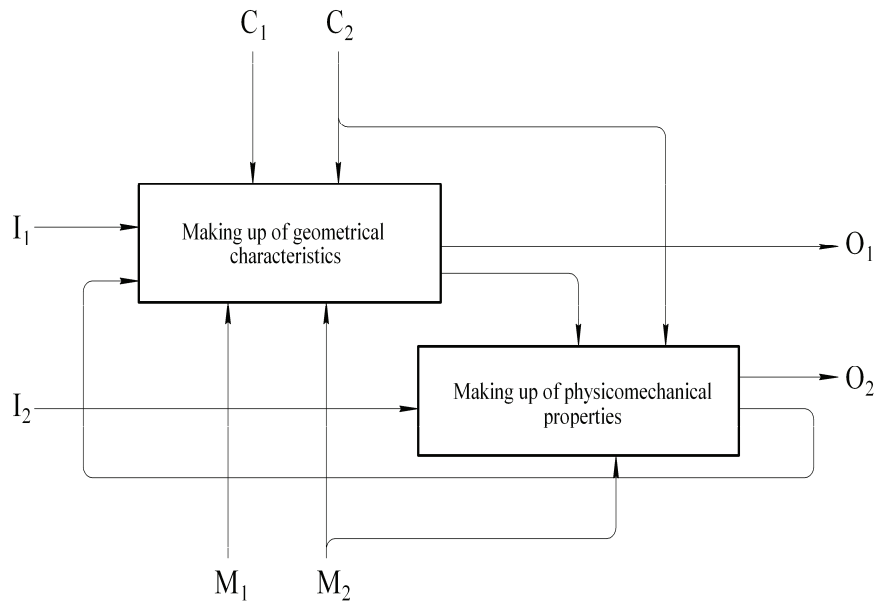


Fig. 4 – SADT-diagram of the A234-level for combined processing operation

As a result of the conducted statistic analysis [5], it was revealed that one should use arrangement factors and movement factors of tools for geometrical parameters management, and thermomechanical factors – for physicomechanical parameters management. (рис. 5).

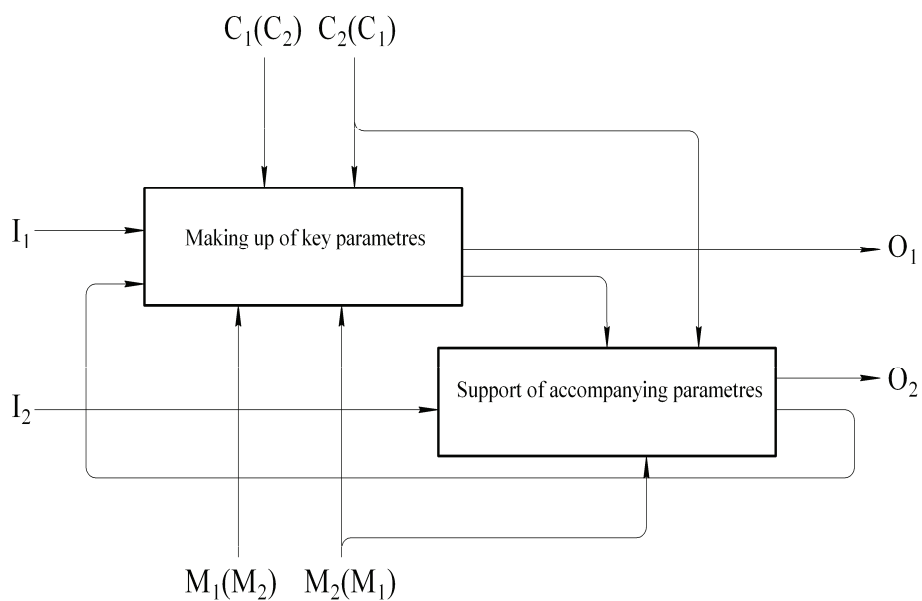


Fig. 5 - SADT-diagram of the A2341 (A2342)-level for combined processing operation



Thus on the basis of the statistic and structural analysis of technological systems, the peculiarities of automated design of technological processes and the specificity of controlling a complex of parameters of optimization of a multiple-factor technological operation it is possible to draw the following conclusions: the combination of statistic and structural analysis provides control of multiple-factor technological operations over a complex of parameters, optimizes and emphasizes the factors, with the help of which one should exercise management and the parameters, which are necessary to control in real-time mode.

#### THE LITERATURE

1. Metodologija of the structural analysis and designing / D.Mark, K.MakGouen. - M: Meta Technology, 1993. - 240 p.
2. Funktsionalnoe modelling - a methodological basis of realisation of the process approach / V.A.Okulesky. - M: FACE DOWNWARDS CALS-technologies «Applied logistics», 2001. - 280 p.
3. Information technologies in the high technology mechanical engineering: computer maintenance of industrial business . A.G.Bratuhina. - Kiev: Technics, 2001. - 728 p.
4. Intellectual manufacturing: a condition status and developing prospects / under общ. ред. M.L.Heifetz and B.P.Chemisova. - Novopolotsk: PSU, 2002. - 268 p.
5. Use of the structural analysis for management and the surveillance of operations of the combined handling / V.N.Koreshkov, M.L.Heifetz, T.A.Alekseeva// Bulletin of PSU. - 2008. - № 3. - p. 53 - 59.
6. Designing of processes of the combined handling / M.L.Heifetz. - M: Mechanical engineering, 2005. - 272 p.

Autors: **Koreshkov V.N., Kheifetz M.L., Liakhovich A.L., Tochilo V.V.**, Polotsk State University, Belarus

## RAČUNARSKI SISTEMI ZA UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM

**Rezime:** Svakodnevna borba za tržište, usled jake konkurencije, dovodi do niza promena koje moraju da uslede kako bi se zadržala ili poboljšala pozicija na tržištu. Bez obzira da li je u pitanju proizvod ili usluga, mora se imati u vidu stalno poboljšanje sa svih aspekata. Preduzeće koje želi da opstane na globalnom tržištu mora imati jasnu viziju svoje budućnosti i strategiju kao način ostvarivanja ciljeva preduzeća u okruženju u kojem posluje. Vizija i strategija se prevode u niz konkretnih ciljeva preduzeća. Primena simulacije u upravljanju proizvodnjom danas je neophodna i obavezujuća sa aspekta skraćanja vremena proizvodnje, proširenja asortimana proizvoda, smanjenja škarta i povećanja produktivnosti i ekonomičnosti proizvodnje. Ovaj rad predstavlja pokušaj da se ukaže na mogućnost upotrebe računarskih sistema, odnosno simulacije, u upravljanju proizvodnjom. **Ključne reči:** upravljanje proizvodnjom, računarski sistemi, simulacija, softver

## COMPUTER SYSTEM FOR PRODUCTION MANAGEMENT

**Abstract:** Everyday competition for a market, due to strong rivalry, results in the sequence of changes which should result in order to keep or get better positions on market. Whether it is a product or a service, constant improvement should be taken into account from all aspects. Corporation who wants to survive on global market must have a distinct vision of its own future, and also a strategy of accomplishing its goals in existing environment. Vision and strategy are turned into corporation's precisely defined goals. Nowadays, the application of simulation in production management is necessary and obliging from the perspective of time saving in production, broadening the variety of products, reducing the waste and increasing the productivity and economy of production. This paper presents an attempt of implementation computer system and simulation in production management. **Key words:** production management, computer system, simulation, software

### 1. UVOD

Upravljanje proizvodnjom je problem koji je nastao onog trenutka kada je grupa ljudi udružila svoje sposobnosti u cilju ostvarenja proizvodnih rezultata koje su unapred odredili. Rezultat proizvodnih aktivnosti od pre nove ere je ideja o osnovnim fazama upravljanja: planiranje, priprema, izvršenje, kontrola. Proizvodnja, kakva je danas poznata, nastala je zahvaljujući industrijskoj revoluciji u 18. veku. Već tada su se sprovodile aktivnosti koje su i danas neophodne za efikasnu i racionalnu proizvodnju. U livnici Soho, 1800. godine su se mogli naći konkretni dokazi o istraživanju tržišta, prognoziranju, planiranju lokacije za izgradnju livnice, studiju o mogućnostima mašina, standardima proizvodnje, planu proizvodnje, standardizovanju komponenti, računovodstvu i obuci zaposlenih radnika. Od tada do danas ideja je ostala ista, dok su se organizaciona sredstva i tehnike za upravljanje proizvodnjom promenile. Od usmenih i pisanih naredbi, preko pomoćnih sredstava za ručno planiranje i kontrolu izvršenja proizvodnih aktivnosti, stiglo se do sofisticiranih računarskih sistema za upravljanje proizvodnjom, čime su znatno porasle mogućnosti za pribavljanje, obradu i prenos podataka, potrebnih za primenu savremenih metoda upravljanja proizvodnjom. Razvoj hardvera i softvera omogućio je masovnu i uspešnu primenu računara u proizvodnji. Do ekspanzije te primene došlo je izgradnjom koncepta 'Planiranje potreba za materijalom' MRP (MRP je skraćenica od engleskih reči Material Requirements Planning, što znači 'planiranje potreba za materijalom'). Programski paketi za upravljanje proizvodnjom, zasnovani na MRP sistemima, na tržištu su se pojavili početkom 60-ih godina ovog veka, nedugo pošto su MRP sistemi široko prihvaćeni u proizvodnim kompanijama. Iako su pioniri u eri upravljanja proizvodnjom pomoću računara, MRP sistemi i danas predstavljaju najpouzdaniji i najčešće korišćeni softverski alat za upravljanje proizvodnjom [1]. Razmatranje uspešnosti primene sistema za upravljanje proizvodnjom u praksi ukazuje na veliku razliku između potencijala koje ti sistemi imaju i njihove primene u praksi. Autor J.J. Skivington smatra da su ovi sistemi u praksi uglavnom neuspešni. Njegovo mišljenje je da je to zbog toga što je u proizvodnim preduzećima prisutno izvesno nerazumevanje činjenice da koncept upravljanja

proizvodnjom koji podržavaju sistemi za upravljanje proizvodnjom nije nov. U naporu da sofisticiraju svoju proizvodnju kompanije najčešće zaborave da obezbede efikasno funkcionisanje osnovnih proizvodnih procesa, što je preduslov za primenu savremenih, računarskih organizacionih sredstava.

### 2. SISTEMI ZA UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM

Za realizaciju zadataka upravljanja proizvodnjom koriste se odgovarajući sistemi, koji podrazumevaju model upravljanja proizvodnjom, organizaciona sredstva i tehnike. Model upravljanja proizvodnjom ima ulogu da se na osnovu strukture otkriju funkcionalne zavisnosti objekata i njihovih atributa i da se prati vremenski tok proučavanih pojava na realizaciji uzrok-posledica. Po autoru J.J. Skivingtonu model upravljanja proizvodnjom može se prikazati sledećom slikom[2].



Slika 1. Model upravljanja proizvodnjom

Model upravljanja proizvodnjom se sastoji iz četiri faze: *Predviđanje:* predviđanje tražnje; predviđanje prodaje; osnovni program proizvodnje; osnovni plan proizvodnje; *Planiranje:* planiranje potreba za materijalom; sastavnica materijala; upravljanje zalihama; planiranje kapaciteta; planiranje proizvodnje; planiranje održavanja; *Izvršenje:* priprema proizvodnje; lansiranje; dispečiranje; kontrola; *Izveštavanje:* izveštaji za pojedinačne elemente; izveštaji za integralni sistem. Organizaciona sredstva i tehnike za upravljanje proizvodnjom određuju podelu sistema za upravljanje proizvodnjom na ručne i računarske. Ručni sistemi za upravljanje proizvodnjom se mogu podeliti na centralizovane i decentralizovane. Računarski sistemi za upravljanje proizvodnjom mogu se, dalje, podeliti na:

- MRP sistemi
- Specijalizovani sistemi (programski paketi koji pomažu u rešavanju određenih problema upravljanja proizvodnjom, npr. Upravljanje zalihama, održavanje itd. ).
- Sistemi za simulaciju proizvodnog procesa.
- Ekspertne sisteme za upravljanje proizvodnjom.

### 3. PROIZVODNI PROCES

Proizvodni proces je deo proizvodnog sistema. On obuhvata sve ono što se događa sa predmetom rada, proizvod ili usluga, između njegovog ulaza u proizvodni proces i izlaska iz proizvodnog procesa.

Operacije obrade izvode se na mestima rada ili radnim mestima. Taj deo proizvodnog procesa, koji je takođe proces, ali manjeg obima, zove se rad na proizvodni radnim mestima. To je samo jedan, ali osnovni, od više elementarnih procesa u proizvodnji. To znači da svaki proizvodni proces ima više elementarnih procesa, ima odgovarajuću strukturu [3].

#### 3.1. Struktura proizvodnog procesa

Nova vrednost se stvara samo tokom elementarnog procesa rad na proizvodnim radnim mestima. Ostali elementarni procesi (kontrola kvaliteta, unutrašnji transport, skladištenje, preventivna zaštita radnika na radu, preventivno održavanje sredstava za rad, snabdevanje energijom i tehnološkim fluidima), uglavnom povećavaju troškove proizvodnje, produžavajući proizvodni ciklus, a time i rokove isporuke i posložavaju proces proizvodnje. To posložavanje smanjuje fleksibilnost proizvodnog sistema i u celini smanjuje nivo organizovanosti radne organizacije. Zato kod postojeće proizvodnje treba prvo izvršiti racionalizaciju samog procesa proizvodnje, pa tek onda usavršavanje elementarnih procesa u proizvodnji.

### 4. MODELIRANJE I SIMULACIJA

#### 4.1. Modeliranje i modeli

Modeliranje predstavlja jedan od osnovnih procesa ljudskog uma. Ono je usko vezano za način ljudskog razmišljanja i rešavanja problema. Modeliranje izražava našu sposobnost da mislimo i zamišljamo, da koristimo simbole i jezike, da komuniciramo, da vršimo generalizacije na osnovu iskustva, da se suočavamo sa neočekivanim. U najširem smislu, modeliranje predstavlja isplativo (u smislu troškova) korišćenje nečeg (modela) umesto nečeg drugog (realni sistem) sa ciljem da se dođe do određenog saznanja. Rezultat modeliranja je model.

#### 4.2. Računarska simulacija

Da bi model bio koristan, od suštinske je važnosti to da se za dati ograničeni skup njegovih opisnih promenljivih, njegovo ponašanje može odrediti na praktičan način: analitički, numerički ili putem eksperimenta, gde se za izvesne, uglavnom slučajne ulaze, posmatraju odgovarajući izlazi. Ovaj poslednji proces naziva se simulacija.

Reč simulacija u svakodnevnoj upotrebi može da označi veći broj različitih aktivnosti, kao na primer: složene video igre, ispitivanje uticaja brojnih faktora na let novih modela aviona, deo eksperimenta u socio-psihološkim istraživanjima itd. Izraz modeliranje i simulacija izražava složenu aktivnost koja uključuje tri elementa: realni sistem,

model i računar. Modeliranje je proces kojim se uspostavlja veza između realnog sistema i modela, dok je simulacija proces koji uspostavlja relaciju između modela i računara. Relacija modeliranja odnosi se na validnost modela. Validnost ili valjanost modela opisuje koliko verno jedan model predstavlja simulirani sistem. Proces utvrđivanja stepena slaganja podataka o realnom sistemu sa podacima modela naziva se validacija modela. Proces validacije je veoma značajan, jer se na osnovu njega donose odluke o upotrebljivosti rezultata simulacije, izmeni modela, izmeni podataka (ulaznih promenljivih, parametara), daljem nastavku simulacije, ponavljanju simulacije, itd.

Relacija simulacije odnosi se na proveru da li simulacioni program verno prenosi model na računar kao i tačnost kojom računar izvršava instrukcije modela. Pre poređenja stvarnih podataka sa podacima koje generiše računar (simulator), mora se utvrditi tačnost, odnosno korektnost simulatora. Proces procene korektnosti simulatora naziva se verifikacija [4].

#### 4.3. Simulacioni proces

Simulacioni proces je struktura rešavanja stvarnih problema pomoću simulacionog modeliranja. On se može prikazati u obliku niza koraka koji opisuju pojedine faze rešavanja problema ovom metodom (životni ciklus simulacije). Struktura simulacionog procesa nije strogo sekvencijalna, već je moguć i povratak na prethodne korake procesa, zavisno od rezultata dobijenih u pojedinim fazama procesa. Broj faza i redosled njihovog obavljanja zavisi od svake konkretne situacije, ali je ipak moguće navesti jedan opšti, uređen skup procedura.



Slika 2. Dijagram toka simulacionog procesa

## 5. RAČUNARSKI SISTEMI ZA UPRAVLJANJE PROIZVODNJOM

Ubrzani razvoj računarskog hardvera i softvera uslovio je prevazilaženje primene ručnih sistema za upravljanje proizvodnje. Računari su postali jedno od osnovnih sredstava za rad u proizvodnji i predstavljaju najznačajniji doprinos daljem tehnološkom razvoju. Pored primene računara u projektovanju i razvoju proizvoda, rukovanju i upravljanju proizvodnom opremom, numeričkom upravljanju, kontroli procesa, robotskim sistemima, automatskim skladištima, automatski vođenim vozilima itd., računar ima značajnu ulogu i u upravljanju proizvodnjom. Kao alternativa projektovanju i implementaciji vlastitog informacionog sistema za upravljanje proizvodnjom, kompanije danas imaju na raspolaganju veliki broj komercijalnih sistema za upravljanje porizvodnjom .

### 5.1. Softveri za simulaciju proizvodnih procesa

Prednosti korišćenja simulacije u proizvodnom menadžmentu su sledeće: simulacija je relativno veran prikaz realnog sistema; može se koristiti za analizu velikih i kompleksnih realnih problema koji se ne mogu rešiti konvencionalnim modelima proizvodnog menadžmenta; simulacija dozvoljava rad sa bilo kojom raspodelom verovatnoća; zahvaljujući simulaciji efekti mogućih promena u sistemu su odmah vidljivi; simulacija dopušta 'šta-ako' analize; simulacija ne remeti realan sistem, što je velika prednost jer je nemoguće eksperimentisati sa pravim fabrikama, bolnicama ili aerodromima.

Neke od oblasti u kojima se danas primenjuje simulacija su: avio-saobraćaj, gradski saobraćaj, distributivni sistemi, planiranje i upravljanje zalihama, predviđanje prodaje, terminiranje proizvodnje, investiranje, raspored radnih mesta, raspoređivanje radne snage itd.

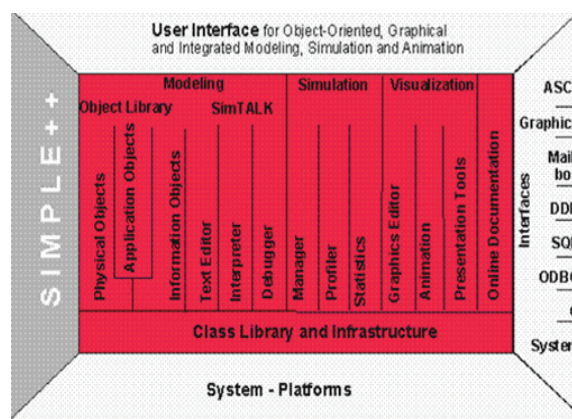
Simulacija može da ima i nedostatke kao što su: dobri simulacioni modeli su vrlo skupi; simulacija ne garantuje nalaženje optimalnog rešenja problema; simulacioni modeli ne daju odgovore bez adekvatnih, realnih ulaznih podataka; svaki simulacioni model je jedinstven i obično se ne može primeniti na druge probleme

Ovi problemi se danas mogu prevazići upotrebom simulacionih jezika, poput GPSS, SIMSCRIPT, DYNAMO ili spreadsheet softvera, kao i korišćenjem komercijalnih, lakih za upotrebu, programa kao sto su Witness, Promodel, Arena, Taylor II, AutoMod itd. Komercijalni softveri za simulaciju proizvodnih procesa su vrlo rasprostranjeni zbog mogućnosti koje imaju u planiranju, simulaciji i analizi proizvodnje, relativno niske cene i lakoće upotrebe, koja omogućava i neprogramerima da uspešno izvode eksperimente sa modelom. Ovakvi softveri rade u grafičkom okruženju, na UNIX- radnim stanicama ili na personalnim računarima sa UNIX ili Windows operativnim sistemima, podržavajući sledeće operacije: modelovanje, simulaciju i vizuelizaciju proizvodnog procesa. Na slici 3 prikazana je struktura simulacionog softvera SIMPLE++, proizvod kompanije AESOP. SIMPLE++ označava akronim za reči 'SIMulation in Production, Logistics and Engineering and its implementation in C++'. U modelu za modelovanje moguće je projektovati izgled proizvodnog pogona pomoću opcija *Fizički objekti* i *Informacioni objekti*. Fizički objekti su: mašine, konvejeri, linije, skladišta vozila, putevi, kontejneri, palete i delovi. Informacioni objekti služe za prikazivanje informacionih tokova između svih objekata. Oni mogu biti metode,

generatori, liste i podaci. Pomoću osnovnih objekata mogu se kreirati aplikativni objekti sa svojim dizajnom, funkcijama i ponašanjem. Na raspolaganju su sledeći aplikativni objekti: sistem automatski vođenih vozila, sistem konvejera, procesna industrija, skladište, personal, upravljanje pogonom, MRP.

Za unošenje raznih pravila za materijalne i informacione tokove, kao i za donošenje odluka koristi se jezik SimTalk, preko tekst editora. Posle projektovanja proizvodnog sistema moguće je startovati simulaciju. Simulacija se može izvoditi sa ili bez animacije. Moguće je primeniti bilo koji ulazni podatak, što je vrlo važno kod svakodnevnih optimizacija, kao što je terminiranje. Posle simuliranja procesa daju se statistički podaci u obliku raznih dijagrama ili tabela za pojedine delove ili za celu simulaciju.

Modul za vizuelizaciju sadrži alate za prezentaciju, grafički editor i animaciju. Alati za prezentaciju omogućavaju efektan prikaz parametara modela i rezultata simulacije. Grafički editor se koristi za kreiranje slika objekata. Mogu se koristiti i gotovi objekti. Animacija ide uporedo sa simulacijom i njena brzina se može menjati.



Slika 3. Struktura softvera SIMPLE++

Karakteristike softvera za simulaciju proizvodnih procesa:  
**Korisnički interfejs:** Objektno orijentisano, grafičko okruženje sa prozorima, menijima i mišom, aplikativno orijentisan dijalog i verodostojna provera ulaznih podataka, korisnički definisani dijalog prozori, upravljanje ekranom preko zumiranja, 'integrisano radno okruženje': sve funkcije modelovanja, simulacije i animacije su istovremeno raspoložive, 'inkrementalna opercija' : detaljanje ili uproščavanje modela u svakom trenutku, 'neproceduralna opercija' : procedura modelovanja je nezavisna od toka simulacije, on-line dokumentacija i help funkcije.

**Modelovanje:** Veličina modela nije ograničena, 'top-down' i 'bottom-up' modelovanje, kontrola nivoa parametara, neograničena hijerarhija modela i strukture procesa, neograničen broj nezavisnih generatora slučajnih promenljivih, različite pomoćne funkcije: automatsko povezivanje objekata, aktivno pozicioniranje preko koordinatne mreže, skrivanje povezujućih linija itd., spoljna manipulacija modelom sa drugim programima, osnovni objekti za materijalni i informacioni tok: mašina, skup paralelnih mašina, linija, skladište, traka, vozilo, konvejer, kontejner, generator, metod, podatak, stohastička raspodela parametara: konstantna, uniformna, normalna, eksponencijalna, geometrijska, hipergeometrijska i formule definisane od strane korisnika, fiksni i od strane korisnika definisani atributi za svaki objekat, grafički editor za definisanje i menjanje slike svakog objekat, menjanje slika



za vreme animacije, biblioteka slika sadrži različite ikone za prikazivanje objekata, više od 50 matematičkih, tekstualnih i logičkih funkcija, SimTalk: jezik sa jednostavnim komandama i strukturom, globalna ili lokalna kontrola jednog ili više objekata, materijalni i informacioni tokovi se mogu modelovati nezavisno.

**Simulacija:** Promena modela i parametara u toku simulacije, izbor brzine simulacije, prikaz korak po korak simulacije, razmena podataka u toku simulacije, grafički prikaz vrednosti parametara u toku i posle simulacije, statistika za totalno vreme simulacije, intervala i aktuelnog vremena, analiza simuliranog ponašanja.

**Animacija:** Slobodna definicija layout-a animacije, promena animiranih slika, prikaz hijerarhijskog nivoa otvorenih objekata u svakom trenutku, simulacija može ići sa ili bez animacije.

Ovaj sofisticiran softver za simulaciju proizvodnih procesa pruža i sledeće mogućnosti:

- C interfejs povezuje model sa spoljnim C programima, koji mogu da rade sa podacima poput jezika SimTalk;
- DDE (Dynamic Data Exchange) interfejs omogućuje razmenu podataka između različitih programa u toku simulacije. Tipičan primer aplikacije DDE je integracija sa spreadsheet softverom EXCEL u cilju grafičke prezentacije rezultata simulacije za vreme trajanja simulacije;
- GA je softver koji podržava iterativne optimizacije terminiranja proizvodnje koristeći genetske algoritme. Rezultujući podaci se prezentiraju pomoću Gantovih dijagrama. Ovi dijagrami se mogu analizirati i menjati i koristiti kao ulazni podatak za sledeću simulaciju. Postoje dve vrste ovih dijagrama: dijagram zauzetosti mašina i dijagram redosleda izrade proizvoda;
- Mailbox je klijent-server komunikacioni sistem koji obezbeđuje fleksibilnu, direktnu komunikaciju između softvera za simulaciju i drugih programa u mreži;
- SQL omogućava razmenu podataka sa SQL bazama podataka. Na raspolaganju je kompletan raspon SQL komandi. Podržane su najpopularnije baze podataka za Unix sisteme: INFORMIX i ORACLE.

Softveri za simulaciju proizvodnih procesa se vrlo lako mogu povezati i sa drugim komercijalnim paketima za proizvodni menadžment: za modelovanje poslovnih procesa, za planiranje layout-a, za planiranje i upravljanje proizvodnjom, za studiju rada itd. Takođe, oni se mogu povezivati sa CAD/CAM sistemima i tako postati deo CIM sistema [5].

Mnoštvo simulacionih softvera koji su dostupni može biti poražavajuće za nove korisnike. Danas se na tržištu mogu naći neki od sedećih softvera, koji su izabrani kao slučajni uzorak: SIMAS II; gPROMS; SES/Workbench; WITNESS; ARENA; EASY5; SIMPLORER; Promodel; SimBax; AutoSimulations; DynaWiz; AMESim; ShowFlow; cnet; QualNet; OPNET; Universal Mechanism 2.0; HCADWin.

Postoji nekoliko stvari koje čine simulacioni paket idealnim. Neke su pogodnosti paketa kao što su podrška, reaktivnost na notifikaciju greške, interfejs, itd. Neke druge pogodnosti paketa koje pruža korisnicima, kao što su njihove potrebe, njihov nivo ekspertize, itd. Zbog tih razloga pitanje koji paket je najbolji, predstavlja iznenađni neuspeh procenjivanja. Prvo pitanje koje treba postaviti je u koju svrhu vam je potreban softver? U svrhu edukacije, obuke, studentskog projekta ili istraživanja?

Glavno pitanje glasi: Koji su bitni aspekti koji se traže u paketu? Odgovor zavisi od specifične aplikacije. Mada ipak, neki generalni kriterijumi su: ulazni kapaciteti, mogućnost optimizacije, izlazni rezultati, okruženje koje uključuje službu obuke i podrške, ulazno-izlazne statističke podatke analize mogućnosti, i naravno faktor troškova. Morate znati koje karakteristike su potrebne, prigodne i neophodne za vašu situaciju.

## 6. ZAKLJUČAK

Danas je nemoguće upravljati proizvodnjom bez pomoći modela upravljanja, organizacionih sredstava i tehnika. Ta pomoć je uglavnom realizovana preko primene računarskih sistema za upravljanje proizvodnjom.

Ručni sistemi su prevaziđeni pojavom mainframe računara, koji su postali jedno od osnovnih sredstava za rad u proizvodnim kompanijama. Kompanije su imale dve strategije korišćenja ove tehnologije na raspolaganju: projektovanje i implementacija vlastitog informacionog sistema za upravljanje proizvodnjom i kupovina komercijalnih programskih paketa. Komercijalni softveri su se pokazali i efikasnijim i jeftinijim alatima, pa se, zbog velike potražnje, na tržištu pojavio veliki broj ovih programskih paketa.

Nagli razvoj informacionih tehnologija uticao je i na pojavu sistema za upravljanje proizvodnjom na personalnim računarima, što je uslovalo pad cene, još veću tražnju i tome srazmeran broj komercijalnih softvera. Ni za jedan sistem se ne može reći da je najbolji ili najgori, kao što ni jedan ne sadrži sve što je potrebno za upravljanje proizvodnjom. Može se reći da softverske kompanije veoma brzo reaguju na pojavu novih modela, ugrađujući ih u svoje pakete.

Opšta ocena o sistemima za upravljanje proizvodnjom je da oni u praksi pokazuju mnogo manje nego što njihovi potencijali obećavaju. Postoje dva razloga za to. Prvi je taj što proizvodne kompanije pre uvođenja sistema ne obezbede efikasno funkcionisanje osnovnih proizvodnih procesa. Drugi je taj što ne postoji sistem koji bi sam bio dovoljan da realizuje zahteve kompanije. Proizvodne kompanije bi trebalo da prvo instaliraju MRP sisteme, a da kritične funkcije za proces poboljšaju potrebnim specijalizovanim i simulacionim softverima.

## 7. LITERATURA

- [1]Gumaer R., Beyond ERP and MRPII, IIE Solutions, Vol. 29 No.9, pp.32-6, 1996
- [2]Skivington J., Computerizing Production Management Systems, Chapman & Hall, 1990.
- [3]Radović M., Proizvodni sistemi – projektovanje, analiza i upravljanje, FON, Beograd, 1999.
- [4]Radenković B., Stanojević M., Marković A., Računarska simulacija, FON, Beograd, 1999
- [5]Petronijević B., Radović M., Prilog poboljšanju strukture modela upravljanja proizvodnjom, FON, Beograd,1999
- [6][http://www.simlab.fon.bg.ac.yu/Download/Simulacija\\_u\\_poslovnomodlucivanju/Knjiga/knjiga.zip](http://www.simlab.fon.bg.ac.yu/Download/Simulacija_u_poslovnomodlucivanju/Knjiga/knjiga.zip)
- [7] Janković A, Skripta iz predmeta Modeliranje i Analiza sistema, CIMS I, Kragujevac, 2005.
- [8] <http://ubmail.ubalt.edu>
- [9] <http://lionhrtpub.com>

Autori: dipl. Ing. Brzaković Radomir, mr. Marjanović Zoran, Zastava automobil, Trg Topolivaca 4, Kragujevac  
E-mail: [brzijax@yahoo.com](mailto:brzijax@yahoo.com)



Majstorović, V.

## QUALITY MANAGEMENT PRACTICE IN SERBIA – SOME RESEARCHES RESULTS

**Summary:** *QM theory and praxis is strongly developed in the world in the last two decades. The ISO 9000 series standards give the biggest contribution for such diffusion. If we talk about QM models today, we assume that they integrate QMS, Total Quality Management (TQM), Business Excellence (BE) and Excellence (E). Regarding these facts, this paper gives the researches results of the Impact QM principles on QM practices in Serbia.*

**Key words:** *QM, Practice, Improvement.*

## PRAKSA MENADŽMENTA KVALITETOM U SRBIJI – REZULTATI ISTRAŽIVANJA

**Rezime:** *Praksa i teorija QM u svetu je doživela intezivan razvoj u poslednje dve decenije. Serija ISO 9000 je posebna doprinela difuziji QM modela u praksu. Kada danas govorimo o QM modelima, mi obično podrazumevamo da se to odnosi na QMS (menadžment sistemom kvaliteta), TQM (menadžment totalnim kvalitetom), BE (poslovna izvrsnost) i E (izvrsnost). Polazeći od ovih činjenica, ovaj rad daje neke rezultate istraživanja uticaja QM principa na QM praksu u Srbiji. Ključne reči: QM, Praksa, Unapređenja.*

### 1. INTRODUCTION

If we look history, we can divide the evolution of the quality movement into five distinct eras: (i) inspections, (ii) quality control (QC), (iii) quality assurance (QA), (iv) quality management (QMS), and (v) strategic quality management, which includes TQM and BE. ISO 9000 standards dominate the world scene of quality practice in the last two decades. Today, the 4<sup>th</sup> version of ISO 9000 series (ISO 9001:2008) is actual as a model for certification. At the other hand, the quality awards (international, company's, national – there are over 150 different models today in the world) have suffered an intensive changes as well (TQM, BE, E). The whole set of techniques and tools used for quality improvement and QMS & TQM models integration is also established. For instance the ISO 9004:2009 and other models (up to date analyses shows that over 120 different models are used today). Eight quality management principles on which the quality management system standards of the ISO 9000:2005, ISO 9001:2008 and ISO 9004:2009 series are based. These principles can be used by senior management as a framework to guide their organizations towards improved performance.

This paper show to QM principles/QMS analyses and synthesis of theory and QM practice (of specified modifications of well known models) in the world and in Serbia [Majstorović, V., et al, (2008), Duret, D., Pillet, M., (2008), Forman, B., et al, (2008), Ivanović, M., Majstorović, V., (2006), Ivanović, M., Majstorović, V., (2005), Kearney, S., Nour, K., (2004)].

### 2. WORLD'S QM THEORY AND PRACTICE – THE ADVANCED APPROACHES

If we look world's QM theory and practice today, we can see following thinks: (i) The evolution of QM model development in praxis, and (ii) The new QM model dimension and it's praxis.

At the beginning of this paper covers the analyses of following approaches: general approach to the QMS application - against the TQM in EU, analyzed by longitudinal approach and empiric data (continual development and application of QM praxis based on integration and development of QMS and TQM) [Sun, H., et al, (2004)], generic benchmarking as a framework for BE model application in SMEs (BE model for SMEs) [McAdam, R., Kelly, M., (2002)], development of QM models based on benchmarking analysis and organizational

learning, by application of many criteria's (QM model based on learning) [Laise, D., (2004)], integrated quality data model (IQDM) for support of all processes, sub processes and quality activities in the life cycle of product [Tang, X., Yun, X., (2008)], quality of product defined as "kind of durability", through the QM process [George, D., (2000)], the future TQM model defined based on the "body of knowledge" [McAdam, R., Henderson, J., (2004)].

The conclusion can be made that the evolution of QM concept development in praxis (QM praxis in the world) is based on the new expanded approach for quality knowledge modeling (QMS, TQM / BE, IQDM, body of knowledge for QM). These approaches and advanced QM models can be used as a paradigm for improvement of good QM praxis in the Serbian economy.

The second part of the paper analyze the new dimension of QM model and it's praxis in the world; especially the questions like: how can QMS certification benefit the organization? (production increment, market expansion, better QM model, quality problems decrement, customer satisfaction - global competitiveness) [Chua, C., et al, (2003)], integration of sustainable development as a lever of a business system, application of integrated management system (IMS) which integrates QMS, EMS, OHSAS and CSR [Rocha, M., et al, (2007)], QMS certification and it's contribution to improvement of educational and training activities - education for quality (training and development for quality initiatives) [Quazi, H., Jacobs, R., (2004)], the application of Step by Step Programme (SSP) for the quality improvement (QI) in low innovative industries (heavy industry) - QM improvement [Zackrisson, J., et al (1995)], contingent approach of QM concept development in different structured organizations - contingent QM [Lagrosen, S., Lagrosen, Y., (2003)], QMS and TQM, can they be complementary, or not? The analyses show that the simultaneous implementation is the best approach, when organization reaches bigger and better benefits, then in separated implementation - QMS/TQM simultaneous implementation [Lorente, A., Costa, M., (2004)], the adoption to changes brought by the new versions of standards and business condition changes, that define the scope of business - gap between organizational changes and QMS models [Johnson, D., (2004)], the QM role and it's implication on strategic planning in organization, as a part of the global business - QM as new global competitive strategy [Mehra, S., Agrawal, S., (2003)], T(QM)'s influence on business results from it's competencies angle (customer orientation, continual improvement, focus on employees and the global vision of the

organization) - (T)QM as a competitive factor [Tena, A., (2004)] and positive and dominant influence of TQM on product quality and innovation performance - The relationship between TQM practices, quality performance, and innovation performance [Prajogo, D., Sohal, A., (2003)].

The conclusions based on fulfilled analyses can be recapitulated as: (i) The good QM practice positively influences on different aspects of business performances of an organization (starting with sustainable development and finishing with innovations) and inverse, (ii) the following paradigm of the research has been confirmed - The good QM practice in Serbia positively influences on overall business performances of an organization.

### 3. QM PRAXIS IN SERBIA – SOME RESEARCHES RESULTS

QM praxis in Serbia can be observed from two different views: (i) quality improvement in business, based on QMS certification, and (ii) development and application of good QM praxis. The first approach can be defined by following facts (May 2009.): about 1850 QMS certificates, 6 ISO 16949 certificates, about 145 EMS certificates, about 280 (QMS + EMS) certificates, 72 (QMS + EMS + OHSAS) certificates, 127 HACCP certificates, 28 ISO 22001 certificates, 9 ISO 13485:2003 and 8 ISO 27001 certificates. If we have on mind the fact that there is over 1.05 million of QMS certificates at this moment on the world, Serbia participates about 2 promiles of overall certificates number. That is extremely small number, because there is 205 countries today in the world, and Serbia holds 103<sup>nd</sup> place in the world by the number of certificates. Considering the level of economic development (BND) and level of technical and technological development, Serbia is on 76<sup>th</sup> place, it is clear that our country deserves larger number of QMS certificates. In the region of West Balkans, all significant countries have larger number of QMS certificates (some of them, like Hungary have more 17000 QMS certificates, Romania more of 11000, etc). Why is that so? Here are some reasons: (i) commerce transition process with owner structure change lasts for very long period (almost two decades), so that we have about 150 organizations that lost their certificates – they did not go for recertification, (ii)

nonconsistent Government policy in the scope of macroeconomics which are supposed to encourage commercial subjects for QMS certification (there were some palliative measures till now), and (iii) lack of national strategy for long-term quality development in Serbia. Because of all this, YUSQ, as a National Organization for Quality started national programme named: *Quality improvement study in Serbia*, in cooperation with EOQ and EC. This study is based on following paradigms: (i) good QM praxis has positive influence on business performances and development on organizations (Pharmaceutical industry, „Metalac“ – Gornji Milanovac, Carlsberg – Serbia, Celarevo, „Tigar“ – Pirot, Elektro-Vojvodina, Novi Sad, etc.), (ii) Quality engineering tools and techniques for QM praxis improvement in Serbia (iii) New national strategy for quality improvement based on good QM praxis in EU (YUSQ, EOQ and EC Study), (iv) Continual education for quality (YUSQ permanent education system for quality) and (v) Education and lider role of management in good QM praxis in Serbia.

Next part are related on researches of the impact Quality Management Principles on Quality Management Practices in Serbia. We are used questionnaire and Lickert scale model (five level – from 1/low to 5/high). We are formulate companies data base – more 300 (about 30% without QMS certificate and about 70% with QMS certificate). The organizations were divided into groups according to size and industry type, and each group was divided into QMS and non-QMS certified organizations. We are received 341 responses to the 755 survey instruments that were distributed, by e-mail. 16 responses were excluded from the study because they were incomplete. The survey instruments were mailed directly to top and middle managers who were responsible for quality management practices. Table 1 represents the sample by industry type (we are used UN classification system – table 2), showing that it comprised 237 manufacturing and service industries. As indicated in the table, most participants in this study were manufacturing companies, representing 66 % of the total sample. These participants were classified into ten categories: (1) oil & gas, (2) basic materials, (3) industrials, (4) consumer goods, (5) health care, (6) consumer services, (7) telecommunications, (8) utilities, (9) financials and (10) technology.

Table 1. Industry classification

Industry	Non-QMS	QMS	Total
Oil & Gas	2	9	11
Basic Materials	15	31	46
Industrials	11	49	60
Consumer Goods	12	29	41
Health Care	6	11	17
Consumer Services	2	4	6
Telecommunications	1	3	4
Utilities	1	4	5
Financials	8	27	35
Technology	5	11	16
	64	173	237

*Table 2. Industrials – detailed classification*

Industry	Supersector	Sector
	Construction & Materials	Construction & Materials
	Industrial Goods & Services	Aerospace & Defense
		General Industrials
<b>Industrials</b>		Electronic & Electrical Equipment
		Industrial Engineering
		Industrial Transportation
		Support Services

Table 3 shows the companies grouped in terms of number of employees. Most of the samples were taken from small organizations. The QMS registered organizations in the

study tended to have more employees than the non-QMS registered organizations.

*Table 3. Review analyzing organizations*

Size	Employees	Non-QMS	QMS	Total
Small	< 50	26	133	159
Medium	50 - 249	24	46	70
Large	>250	13	9	22
	Total	63	188	241

Tables 4 and 5 show the results of descriptive statistics and ANOVA. There were significant differences in all seven QM principles: (1) Customer focused organization, (2) leadership, (3) Involvement of people, (4) Process approach, (5) System approach to management, (6) Continual improvement, (7) Factual approach to decision making, and (8) Mutually beneficial supplier relationships, between non-QMS and QMS organizations. In addition, the QMS organizations

had higher mean results in all of the quality management principles. The mean values for QM principles were the highest for QMS organizations had higher mean values than non-QMS registered companies. Table 5 show that QM principles (system approach to management) for non-QMS organization not have significant level in relation of QMS certificated organization.

*Table 4. Basic statistics*

QM Principles	Non-QMS	QMS	Average
Customer focused organisation	<u>3.89</u>	<u>4.15</u>	<u>4.02</u>
Leadership	3.51	<b>3.82</b>	<b>3.66</b>
Involvement of people	3.69	3.99	<b>3.84</b>
Process approach	<b>3.30</b>	3.71	<b>3.51</b>
System approach to management	3.51	3.81	<b>3.66</b>
Continual improvement	3.43	3.89	<b>3.65</b>
Factual approach to decision making	3.63	4.11	<b>3.87</b>
Mutually beneficial supplier relationships	3.58	3.99	<b>3.79</b>
Average	<b>3.57</b>	<u>3.94</u>	<b>3.76</b>

*Table 5. ANOVA analysis results*

QM Principles	Non-QMS	F-Value	QMS
Customer focused organisation	<u>3.89</u>	<b>8.05*</b>	<u>4.15</u>
Leadership	3.51	<b>3.27*</b>	<b>3.82</b>
Involvement of people	3.69	<b>7.95*</b>	3.99
Process approach	<b>3.30</b>	<b>15.71*</b>	3.71
System approach to management	3.51	<b>0.24**</b>	3.81
Continual improvement	3.43	<b>12.61*</b>	3.89



Factual approach to decision making	3.63	7.11*	4.11
Mutually beneficial supplier relationships	3.58	7.26*	3.99

#### 4. QM RESEARCHES IN SERBIA

Basic research centers in Serbia for quality development and technology are: (i) Mechanical Faculty in Belgrade, Laboratory for production metrology and TQM: (a) research, development and application of good QM/IMS praxis – BE model (business organizations, educational organizations), (b) intelligent and digital quality model for new technology systems generations, and (c) six sigma and Taguchi method for production without waste - research, development and application, (ii) Vinca institutes, Belgrade - development and application of EU directives in Serbia, (iii) Faculty of technical sciences – IIS – ITC, Novi Sad: (a) development and application of good QM and IMS praxis in commerce of Serbia, and (b) education for quality, and (iv) CIM College, Nis: (a) research, development and application of software models for quality engineering techniques, (b) development and application of software model for process modeling in QM and IMS commerce praxis, and (iii) development and application of good QM and IMS praxis in Serbia.

If we compare scope of research mentioned above, with research themes shown in chapter 2 of this paper, the conclusion can be made that Serbia does not lag behind in this area, as it was stated in paragraph 3. This can assure us that the paradigms defined in paragraph above, were defined correctly.

#### 5. CONCLUSIONS

Talking about QM theory and praxis in the world and in Serbia today, we can make a conclusion that: (i) quality and sustainable development are basic paradigms of commerce in high developed countries, in the first decade of 21<sup>st</sup> century, and (ii) Serbia has all necessary prerequisites for high achievements in this area, but necessary steps needed for this accomplishment are intensive state changing activities, defined as paradigms in paragraph 3. YUSQ with it's activities has a leading role in those processes, and accomplishes that in some long-term period.

#### ACKNOWLEDGEMENT

Model described in this paper is partially developed as part of the research, conducted under the sponsorship of Ministry of Science and Technology, two Projects.

#### REFERENCES

[1]. Sun, H., Li, S., Ho, K., Gertsen, F., Hansen, P., Frick, J., (2004), The trajectory of implementing ISO 9000 standards versus total quality management in Western Europe, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 21 No. 2, pp. 131-153

[2]. Lorente, A., Costa, M., (2004), ISO 9000 and TQM: substitutes or Complementaries?, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 21 No. 3, pp. 260-276.

[3]. Johnson, D., (2004), Adaptation of organizational change models to the implementation of quality standard requirements, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 21 No. 2, pp. 154-174.

[4]. Kearney, S., Nour, K., (2004), SME and quality performance in networking environment, *Computers & Industrial Engineering*, 46, 905–909.

[5]. Mehra, S., Agrawal, S., (2003), Total quality as a new global competitive strategy, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 20 No. 9, pp. 1009-1025.

[6]. Tena, A., (2004), TQM as a competitive factor, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 21 No. 6, pp. 612-637.

[7]. McAdam, R., Henderson, J., (2004), Influencing the future of TQM: internal and external driving factors, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 21 No. 1, pp. 51-71.

[8]. Prajogo, D., Sohal, A., (2003), The relationship between TQM practices, quality performance, and innovation performance, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 20 No. 8, pp. 901-918.

[9]. Ivanović, M., Majstorović, V., (2005), *Research on the Quality Management Level in the certified organisations in our country*, Balkans Conference on Quality" The Balkans as a region of quality", Proceedings, pp. 12- 16, Belgrade.

[10]. Ivanović, M., Majstorovic, V., (2006), *Model developed for the assessment of quality management level in manufacturing systems*, The TQM Magazine, Vol.18 No. 4, pp. 410-418.

[11]. Forman, B., et all, (2008), *Qualite, Securite, Environnment*, AFNOR, Paris.

[12]. Duret, D., Pillet, M., (2008), *Qualite en Production*, Eyrolles, Paris.

[13]. Majstorovic, V., Stanivukovic, D., Kamberovic, B., Radlovacki, V., (2008), *Theory and Praxis of Quality Management System in the World and in Serbia – The Comparative Study*, Proceedings of 8th International Conference "Centar amd East European Countries", pp. 124-132, Kiev.

[14]. Laise, D., (2004), Benchmarking and learning organizations: ranking methods to identify "best in class", *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 11 No. 6, pp. 621-630.

[15]. Tang, X., Yun, X., (2008), Data model for quality in product lifecycle, *Computers in Industry* 59 167–179.

[16]. George, D., (2000), A Model of Endogenous Quality Management, *Journal of Economics and Business*, 52:289–304.

[17]. Chua, C., Goh, M., Wan, T., (2003), Does ISO 9000 certification improve business performance?, *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 20 No. 8, pp. 936-953.

[18]. Rocha, M., Searcy, C., Karapetrovic, S., (2007), Integrating Sustainable Development into Existing Management Systems, *Total Quality Management*, Vol. 18, Nos. 1–2, 83–92, January–March.

[19]. Zackrisson, J., Franzbn, M., Melbin, M., Shahnavaz, H., (1995), Quality by a step-by-step program in low scale industries, *Int. J. Production Economics*, 41 419 - 427.

**Author:** Prof. Dr. Vidosav D. Majstorovic, Belgrade University, Mechanical Engineering Faculty, Belgrade. E-mail: [majnem@eunet.rs](mailto:majnem@eunet.rs)



Prof.Dr-Ing. Branko Popović, Prof.Dr-Ing. Milivoj Klarin, Doc. Dr-Ing. Zorica Veljković  
**PROCES POBOLJŠAVANJA- SISTEM ŠEST SIGMA**

*Sistem šest sigma raspolaže sa mehanizmom za dalji razvoj celokupne organizacije i dostizanje svetskog nivoa. On pruža potrebnu pomoć rukovodstvu da postigne najveću vrednost uz korišćenje najmanjih ulaganja. Sistem omogućava napredak organizacije: poboljšanjem efektivnosti i efikasnosti procesa, sniženjem troškova proizvodnje, uspešnom konkurencijom i postizanjem zadovoljstva korisnika. On primenjuje: dobijanje rezultata uz rešavanje problema, poboljšavanje procesa, planiranjem zadataka i rokova u pojedinim etapama, pokretanjem inicijativa i ciljeva zaposlenog osoblja, aktiviranjem raspoložive radne infrastrukture i održavanjem svih neophodnih procesa, koji su zasnovani na naučnim i statističkim teorijama, metodologijama i praktičnim postupcima. Knjiga autora sa ovim naslovom (Sistem šest sigma u realizovanju rezultata procesa, Mašinski fakultet, Beograd, 2008) predstavlja razumljiv vodič u realizovanju pomenutih poboljšanja, uz dobijanje potrebnih rezultata i izbegavanje grešaka. **Cljučne reči:** Upravljanje proizvodnim sistemima. Sistem šest sigma.*

### THE SIX SIGMA IMPROVEMENT PROCESS

*The Six Sigma improvement process refers to the mechanism of breakthrough to world-class standards of performance across the whole enterprise. Six Sigma's role in all of this is to help management produce the maximum value while using minimum resources. It is focused on 'adding value'; one in which organizations seek out opportunities to improve efficiency and effectiveness with a view to enhancing profit margins, competitiveness and customer satisfaction: it achieves results through a highly focused system of problem-solving and process-improvement projects, it is implemented through a standard road-map for each project undertaken, it is an initiative that aims at channelling and unifying the efforts of everyone in the organization towards the Six Sigma goal, an infrastructure is created to make it work and keep on working, it is equally applicable to all processes in an organization and to any organization, it is based on scientific method utilizing practical and directed statistical thinking and methodology. The goal of authors book (Processing for Six sigma, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, 2008) remains the same as for the first edition, namely, to provide you with the comprehensive guidance and direction necessary to realize Six Sigma's promise, while avoiding traps and pitfalls commonly encountered. **Key words:** Production systems. Six sigma.*

#### 1. Uvod

Kao što je poznato Sistem za upravljanje kvalitetom QMS je namenjen za obezbeđenje i upravljanje kvalitetom, ali se povišenje kvaliteta rezultata procesa (poluproizvod, proizvod, dokumentacija, usluga) teško može postići bez zapošljavanja kvalifikovanih kadrova, primene bolje opreme i korišćenja poboljšane tehnološke dokumentacije [1]. Zato se u poslednjih 20 godina razvio novi Sistem šest sigma, koji donosi upravo takva poboljšanja. Nažalost domaća industrija, opterećena svojim problemima, potpuno je neobaveštena i veoma je udaljena od moguće primene.

Nasuprot čestom shvatanju Sistem šest sigma ne donosi povećanu strogost kontrolisanja, ne rešavaju se samo nastali problemi i nije zasnovan na širokom uvođenju statističkih tehnika. Pogrešno je tumačenje da ovaj sistem dopušta samo minimalnu neispravnost, manju od uobičajenih 0,27 % izvan u industriji uobičajenog područja  $\pm 3\sigma$ . Pogrešno je i mišljenje da ovaj sistem rešava neke nastale probleme jer se umesto ovde postizu unapred postavljeni ciljevi poslovanja. Konačno, pogrešno je i shvatanje da ovaj sistem zasnovan na širokom uvođenju statističke tehnike, jer se koriste i druga napredna znanja: analiza podataka (Fault Tree, Trend, Cluster, Markov, Decision Tree Analysis), planiranje eksperimenata (Design of experiments), mrežno planiranje (PERT), teorije sniženja troškova (Taguchi), rešavanja zadataka (TRIZ) i ograničenja (Theory of Constraints) itd.

#### 2. Osnovi Sistema šest sigma

Sistem šest sigma je napredni nivo znanja za poboljšavanje poslovanja organizacije, sa ciljem povećanja profita, smanjenja neispravnosti i eliminisanja gubitaka u procesima organizacije, koji postiže: povećanje vrednosti poslovanja, poboljšavanje procesa i primenu novijih praktičnih rešenja.

Povećanja vrednosti poslovanja usklađuju povećanja internih vrednosti organizacija i eksternih vrednosti korisnika. Povećanje internih vrednosti organizacije isporučioća rezultata procesa obično podrazumeva: povećanje profita,

realizacije i ušteda materijala, kao i smanjenje gubitaka, škarta, broja zaposlenih, itd. Povećanje eksternih vrednosti korisnika rezultata procesa obično podrazumeva: sniženje cene, povišenje kvaliteta rezultata procesa, povećanje ponude rezultata procesa, itd.

Vrednosti organizacije i vrednosti korisnika definisane su (BSI 2000, CEN/TC 2000) relativnim odnosom zadovoljenja sopstvenih potreba i korišćenja raspoloživih sredstava, odnosno što većim zadovoljenjem sopstvenih potreba i što manjim korišćenjem raspoloživih sredstava [8]. Odavde proizilazi da se poboljšanje opšteg poslovanja u organizacijama može postići samo povećanjem vrednosti organizacije na jedan od četiri moguća načina. Naravno da će se najveće poboljšanje poslovanja u organizacijama postići samo kod veoma velikog zadovoljenja sopstvenih potreba (povećanje profita povećanje realizacije, povećanje prodaje) i veoma malog korišćenja raspoloživih sredstava (povećanje ušteda materijala, smanjenje gubitaka, smanjenje škarta, smanjenje broja zaposlenih).

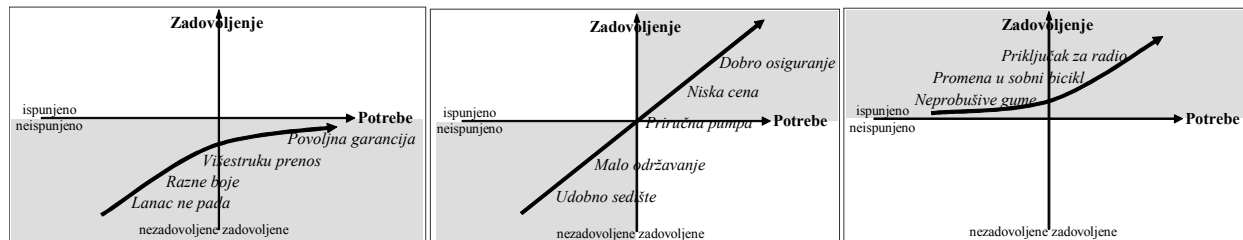
Pored mogućih poboljšanja u realizovanju rezultata procesa primenjuje se i model postizanja zadovoljenja korisnika u odnosu na ostvareni kvalitet prema slici 4, koji je postavio Noriaki Kano 1986. [5]. Kano je istraživao postizanje zadovoljenja korisnika u odnosu na zadovoljenje korisnika i postignutog dostignuća, posmatrajući tri različite vrste zadovoljenja korisnika. Podrazumevano zadovoljenje (Basic needs) se očekuje posle uobičajenog istraživanja tržišta (npr. kupovani automobil mora lako da se pokrene) tako da obično ne ispunjava potpuno zadovoljenje korisnika. Zahtevano zadovoljenje (Performance needs) se obično ugovara posle detaljnog istraživanja tržišta (npr. za kupljeni automobil korisniku se daje garancija) pa može biti ispunjeno samo delimično zadovoljenje korisnika. Izvanredno zadovoljenje (Excitement needs) se obično ne očekuje pa se želi postići primat na tržištu (npr. uz prodati automobil korisniku se poklanja poseban poklon) pa obično ispunjava puno zadovoljenje korisnika. Prepoznavanje podrazumevanih, zahtevanih i izvanrednih zadovoljenja korisnika olakšavaju

odgovori na dva postavljena pitanja.

Na prvo pitanje "Kako bi se osećali ako neka karakteristika rezultata procesa izostaje?" mogući odgovori su "loše" ili "normalno". Na drugo pitanje: "Kako bi se osećali ako neka karakteristika rezultata procesa postoji?", mogući odgovori su "normalno", "dobro" ili "zavisi". Podrazumevano zadovoljenje korisnika je kada se na prvo pitanje dobija odgovor "loše" i kada se na drugo pitanje dobija odgovor "normalno".

Zahtevano zadovoljenje je kada se na prvo pitanje dobija odgovor "normalno" i ako se na drugo pitanje dobija odgovor "zavisi". Izvanredno zadovoljenje korisnika je kada se na prvo pitanje dobija odgovor "normalno" i ako se na drugo pitanje dobija odgovor "dobro".

Na slici 1 prikazana je jednostavna ilustracija primene Kano modela na podrazumevano, zahtevano i izvanredno zadovoljenje korisnika za kvalitet običnog bicikla.



Slika 1. Kano model zadovoljenja korisnika biciklom

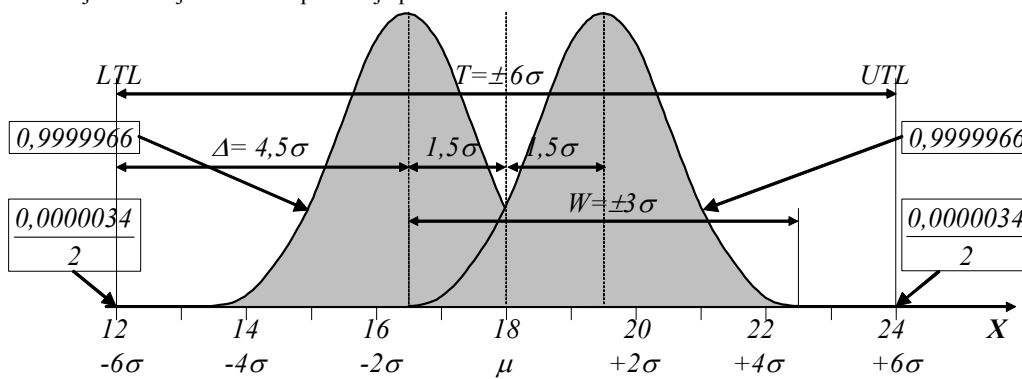
Poboljšavanje procesa se najbolje postiže povišenjem preciznosti procesa odnosno povećanjem indeksa preciznosti procesa, pri čemu je tolerancija procesa jednaka ili veća od šest standardnih devijacija procesa  $T \geq \pm 6\sigma$ . Ovakvo povišenje preciznosti procesa je standardizovani postupak (ISO 8258) koji se primenjuje posle postupka kontrolisanja i eliminisanja nestabilnosti procesa. Kontrolisanje procesa obuhvata utvrđivanje stanja stabilnosti procesa, analiziranje preciznosti i analiziranje tačnosti procesa. Posebno su značajni precizni i tačni procesi, jer precizan proces može da daje ispravne rezultate procesa zbog veće tolerancije od širine procesa ( $T > W$ ), dok tačan proces uvek daje ispravne rezultate procesa zbog središnjeg položaja širine procesa unutar tolerancije ( $LTL < W < UTL$ ).

Polazeći od ovih razmatranja Bill Smith je 1986. razmatrao probleme neispravnosti u Motoroli [3], preko odnosa tolerancije i širine procesa, kao i propisanih kriterijuma preciznosti ( $PCI > 1,33$ ) i tačnosti procesa ( $PPI > 1,33$ ). Došao je do zaključaka da se povišenje preciz-

nosti procesa može se postići samo ako se širina procesa pomera unutar tolerancije i ako ovakav pomak bude veći od  $\pm 1,5\sigma$ , ukoliko je širina procesa puno manja od tolerancije ( $W \ll T$ ).

Poboljšani proces po Sistemu šest sigma prikazan je na slici 2: proces sa tolerancijom od  $T = \pm 6\sigma$  postiže preciznost od  $PCI=2$ , sa pomakom od  $\pm 1,5\sigma$ , i sa kritičnim rastojanjem  $\Delta=4,5\sigma$ , koji obezbeđuju najviši nivo poverenja od  $\Theta(\Delta)=0,9999966$  odnosno pojavu 99,99966% ispravnih rezultata procesa. Najniži rizik je  $\tau=1-\Theta(\Delta)=0,0000034$  odnosno pojava 0,00034% neispravnih ili 3,4 neispravnih na milion realizovanih rezultata procesa [4].

Ovakav pristup omogućava poboljšanje procesa koje se postiže: povećanjem indeksa preciznosti  $PCI$ , indeksa tačnosti  $PPI$ , kritičnih rastojanja  $\Delta(\sigma)$  kao i nivoa poverenja  $\Theta(\Delta)$  a sa smanjenjem rizika  $\tau=1-\Theta(\Delta)$  i dobijenih neispravnih rezultata procesa  $PPM=10^6\tau$ , na milion realizovanih rezultata procesa, prema tabeli 1.



Slika 2. Primer poboljšanog procesa sa tolerancijom  $T = \pm 6\sigma$  i uz preciznost ( $PCI = 2$ )

Tolerancija $T(\pm\sigma)$	Indeks preciznosti $PCI$	Indeks tačnosti $PPI$	Kritična rastojanja $\Delta(\sigma)$	Nivo poverenja $\Theta(\Delta)$	Rizik $\tau=1-\Theta(\Delta)$	Neispravnih od milion $PPM=10^6\tau$
3	1,00	0,50	1,5	0,93319	0,0668100	66810
4	1,33	0,83	2,5	0,99379	0,0062100	6210
5	1,67	1,17	3,5	0,99977	0,0002300	2300
6	2,00	1,5	4,5	0,9999966	0,0000034	3,4

Tabela 1. Rezultati povišenja profita u organizacijama

Dakle, dobijeni rezultati po Sistemu šest sigma pokazuju da su najbolji procesi sa širokom tolerancijom  $T = \pm 6\sigma$  koji imaju: najveći indeks preciznosti  $PCI=2$ ; povećani indeks

tačnosti  $PPI=1,5$ ; velika kritična rastojanja  $\Delta(\sigma)=4,5$ ; najveći nivo poverenja  $\Theta(\Delta)=0,9999966$  i najmanji rizik  $\tau=0,0000034$ , odnosno rizik od samo 3,4 neispravnih

rezultata procesa od ukupno milion realizovanih. Ova ideja Bill Smith-a, velikog povećanja indeksa preciznosti ( $PCI=2$ ) sa tolerancijom ( $T=\pm 6\sigma$ ), kasnije je postala moto novog Sistema šest sigma.

Primena procesa sa povišenjem indeksa preciznosti u privrednim sistemima [9] daje naročito velika povišenja profita i znatna sniženja gubitaka, prema tabeli 2. Privredni sistemi svetske klase sa  $T= \pm 6\sigma$  povisuju profit za 20÷35% i

Tolerancija $T(\pm\sigma)$	Klasa organizacije	Moguće povišenje profita	Očekivani gubici u (prema prodaji)
3	prosečne klase	5 %	30÷40 %
4	bolje klase	10 %	15÷30 %
5	napredne klase	20 %	5÷15 %
6	svetske klase	35 %	< 1 %

Tabela 2. Rezultati povišenja profita u organizacijama

Međutim dostizanje tolerancije od  $T=\pm 6\sigma$  nije nemoguće u uslužnim tehnologijama, koje manje zavise od potrebne skupe opreme. Primena velikog povećanja preciznosti procesa u uslužnim sistemima [11] zaista daje velika smanjenja neispravnosti i grešaka. Uslužni sistemi svetske klase sa  $T=\pm 6\sigma$  uspešno smanjuju neispravnosti, npr. prestanak snabdevanja električnom energijom od 45 sati mesečno se smanjuje na samo osam sekundi, 24 neispravna sletanja aviona na aerodromima od ukupno 100 sletanja se smanjuje na samo 12 neispravnih sletanja od milion sletanja, itd.

postizu velika sniženja gubitaka na samo 1% u odnosu na ukupnu prodaju. Nažalost, danas domaći privredni sistemi jedva da ima realizaciju sa tolerancijom  $T=\pm 3\sigma$  jer se velika povećanja preciznosti procesa teško dostižu. Dostizanje tolerancije od  $T=\pm 6\sigma$  u domaćim organizacijama je gotovo nemoguće na današnjem nivou tehničkog razvoja, zbog neophodno potrebne savremene opreme (numeričkih upravljanja, automatskih pomoćnih pribora i alata, itd) [6].

Primena novijih praktičnih rešenja posebno je uočljiva u poređenju sa sistemom QMS (ISO 9000) prema tabeli 3. Sistem šest sigma je prvenstveno usmeren na realizovanje ili projektovanje [7], a ne samo na kvalitet rezultata procesa, upravljanje poslovanjem u organizacijama se zasniva na poboljšavanju procesa a ne samo na upravljanju kvalitetom putem dokumentacije, primarna je aktivnost povećanje profita organizacije a ne upravljanje kvalitetom, odgovornost zaposlenih se utvrđuje preko ostvarenja profita a ne izveštavanjem, uštede se veoma lako dokazuju, itd.

Karakteristike "Sistema šest sigma"	Karakteristike podsistema za upravljanje kvalitetom QMS)
Usmerenost na realizovanje ili projektovanje rezultata procesa.	Usmerenost samo na kvalitet rezultata procesa.
Upravljanje poslovanjem organizacije zasnovano na poboljšavanju procesa.	Upravljanja kvalitetom zasnovano na primeni dokumentacije.
Primena metodologije za poboljšavanje poslovanja organizacije sa razmatranjem profita.	Primena metodologije upravljanja kvalitetom bez razmatranja profita organizacije.
Primarna aktivnost rukovodstva jeste povećanje profita organizacije.	Primarna aktivnost rukovodstva jeste upravljanje kvalitetom.
Utvrđivanje odgovornosti preko ostvarenja profita organizacije.	Utvrđivanje odgovornosti preko izveštavanja u organizaciji.
Uska primena u nekoliko organizacija koje su postigle ogromno povećanje profita.	Široka primena u preko 500000 organizacija širom sveta.
Uštede se veoma lako dokazuju.	Uštede se veoma teško dokazuju.
Orijentacija samo na izvrsne organizacije.	Orijentacija na veliki broj standardnih organizacija.
Dokazivanje unutar organizacije.	Certifikacija preko treće strane.
Organizacija dokazuje superiorne finansijske rezultate.	Organizacija dokazuje jednakost sa drugim organizacijama.

Tabela 3. Karakteristike Sistema šest sigma i Sistema za upravljanje kvalitetom (ISO 9000)

Pored toga Sistem šest sigma karakteriše: moguće povišenje kvaliteta rezultata procesa, češće utvrđivanje ciljeva organizacije, primena kratkoročnih projekata poboljšavanja umesto dugoročnih održavanja podsistema, aktivnije učešće rukovodstva, jedinstveni programi sa utvrđenim etapama, kompleksnija obuka zaposlenih kadrova itd.

### 3. Prednosti Sistema šest sigma

Sistem šest sigma u poređenju sa sistemom QMS (ISO 9000) ima evidentne prednosti u pogledu: kvaliteta, operativnosti i ostvarenih efekata.

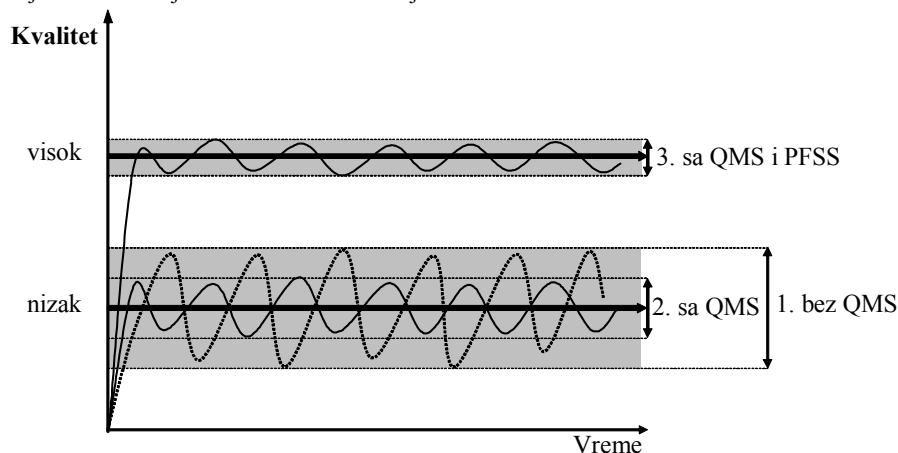
Kvalitet rezultata procesa u organizacijama može biti na raznim nivoima i sa različitim varijabilnostima. Ove promene

nastaju tokom vremena, zbog uticaja mnogih sistematskih i slučajnih uzroka (zastarelost mašina, habanje alata i opreme, raznolikost isporučenih materijala, klimatski uticaji, promene radnih uslova i radne sposobnosti, praznične atmosfere, itd. Za organizacije su značajnije promene varijabilnosti kvaliteta od promena nivoa kvaliteta, jer su korisnici obično zadovoljni sa ugovorenim nivoom kvaliteta, a veoma nezadovoljni promenama varijabilnosti ili pojavom odstupanja kvaliteta rezultata procesa.

Polazeći od ovih saznanja organizacije primenjuju razno vrste akcije za stabilisanje varijabilnosti i povišenje nivoa kvaliteta rezultata procesa, kao što su: ulazno kontrolisanje materijala od isporučilaca, statističko kontrolisanje procesa



realizovanja (proizvodnje ili usluživanja), izlazno kontrolisanje rezultata procesa [10], uvođenje sistema QMS, opšte upravljanje kvalitetom TQM, uvođenje Sistema šest sigma, itd. Opisane akcije za stabilisanje varijabilnosti i povišenje nivoa kvaliteta rezultata procesa, ostvaruju se u organizacijama uglavnom prema shemi na slici 3. U početku se obično ostvaruju veće varijabilnosti kvaliteta koje



Slika 3. Prednosti Sistem šest sigma u odnosu na Sistem za upravljanje kvalitetom (ISO 9000)

U pogledu operativnosti organizacije Sistem šest sigma je znatno aktivniji od sistema QMS. Sistem QMS se zasniva na dugoročnom godišnjem održavanju, obično se aktivira jednom godišnje (tokom 3÷4 meseca), pre nadzora ili certifikacije. QMS obično posle perioda uvođenja primenjuje: korektivne akcije (KA), interne (IP) i eksterne provere (EP) i godišnje nadzorne provere (NP), od strane ovlašćene organizacije. Sistem šest sigma se zasniva na primeni kratkoročnih projekata (3÷4 meseca) koji se planiraju, izvršavaju i proveravaju, pa ima intenzivniju operativnu aktivnost (9÷10 meseci godišnje). Posle perioda uvođenja u 1. godini primenjuje se pet obaveznih uzastopnih faza (DMAIC ili DMADV), koje se prekidaju samo zbog jednomesečnih pauza i godišnjih odmora.

Sistem šest sigma pokazuje izuzetne postignute rezultate i zapanjujuće efekte, sa ogromnim ostvarenim profitima i uštedama sredstava, vremena, alata kao i materijala.

Motorola [3] je ostvarila povećanje profita od 15 milijardi dolara tokom prvih deset godina. U periodu od 1987-1997. prodaja se rasla sa stopom 17 % godišnje, profit 17,2 %, a vrednosti deonica 16,5 % godišnje. Troškovi neispravnosti po jedinici proizvoda su smanjeni za više od 84 %, a produktivnost je porasla za 204 %, prosečno 12,3 % godišnje. General Electric [4] je ostvario povećanje profita od 2 milijarde dolara u 1999. i povećanje profita od 2,4 milijarde dolara u 2000. Ford Motor Company je 2001. imao gubitke od 2,19 milijardi dolara, a sa Sistemom šest sigma imao je gubitke od samo 731 miliona dolara 2003.

Sistem šest sigma primenjuje jedinstvenu metodologiju programa (DMAIC ili DMADV) sa pet obaveznih uzastopnih etapa i napredna znanja sa metodama poboljšavanja pa su neophodni odgovarajući potrebni kadrovi, koji ne brinu samo o ispunjavanju propisanih zahteva (dokumenata i izveštaja) kao u sistemu QMS [2]. Kadrovske potrebe Sistema šest sigma zahtevaju utvrđivanje hijerarhije učesnika i potrebne obuke zaposlenih kadrova. Hijerarhija učesnika u izvođenju Sistema šest sigma obuhvata više, srednje i niže rukovodioce kao i neposredne izvršioce, sa posebno organizovanim radnim grupama (instruktor i izvršioći), koje imaju različite zadatke.

Sistem šest sigma zahteva učešće rukovodstva na sva četiri nivoa dok se u sistemu QMS uglavnom zahteva učešće višeg rukovodstva samo na dva nivoa (rukovodilac sistema i rukovodioci sektora ili pogona). Sistem šest sigma zahteva kompleksniju obuku rukovodstva sa daleko većim brojem

zahtevaju stabilisanje (1). Primenom statističkog kontrolisanja procesa i uvođenjem sistema QMS postiže se stabilisanje kvaliteta sa manjim varijabilnostima (2), koje zahtevaju povišenje kvaliteta. Jedino uvođenje Sistema šest sigma omogućava željeno povišenje kvaliteta rezultata procesa sa manjim varijabilnostima kvaliteta (3).

(50÷200) složenijih postupaka dok sistem QMS uglavnom zahteva obuka rukovodstva za primenu nekoliko (5÷7) jednostavnijih postupaka.

Zaposleni kadrovi su najvredniji deo privrednog sistema jer su mu uvek nesebično lojalni i zato što predstavljaju kritičnu kariku u zadovoljenju zahteva korisnika. Vlasnici (Champions) su usmereni na utvrđivanje ciljeva organizacije. Ako postoji više vlasnika onda jedan od njih predstavlja sve vlasnike i obično predsedava dogovorima svih vlasnika.

#### 4. Literatura

- [1] Popović B., Klarin M., Veljković Z., Sistem šest sigma – Processing for Six sigma, Mašinski fakultet, Beograd (2008)
- [2] Popović B., Klarin M., Realizovani kvalitet proizvoda – Quality of Conformance, Mašinski fakultet, Beograd (2007)
- [3] Motorola University, The inventors of Six Sigma (<http://www.motorola.com/content>), retrieved on 29. I 2006.
- [4] Brue G., and Howes R., Six Sigma, McGraw-Hill, New York (2006)
- [5] Keller P., Six Sigma Demystified, McGraw-Hill, New York (2005)
- [6] Popović B., Klarin M., Upravljanje proizvodnjom i usluživanjem – Operations Management, Mašinski fakultet, Beograd (2005) 599
- [7] Popović B., Klarin M., Projektovani kvalitet proizvoda–Quality of Design, Mašinski fakultet, Beograd (2003) 315
- [8] Truscott W., Six Sigma: Continual Improvement for Businesses, Butterworth-Heinemann, Oxford (2003)
- [9] Popović B., Klarin M., Procesna kontrola u Sistemu upravljanja kvalitetom-Process Control, Mašinski fakultet, Beograd (2002) 282
- [10] Popović B., Todorović, Z., Izlazna kontrola u Sistemu kvaliteta -Product Control, Nauka, Beograd (2000) 345
- [11] Harry M., and Schroeder R., Six Sigma, Doubleday, New York (2000)Popović

**Autori:** Prof.Dr-Ing. **Branko Popović**, Prof.Dr-Ing. **Milivoj Klarin**, Doc. Dr-Ing. **Zorica Veljković**, Mašinski fakultet, Beograd ([popovicb@eu.net.rs](mailto:popovicb@eu.net.rs))



Nuhodžić, S., Bulatović, M.

## OŠTEĆENJA OSOVINSKIH LEŽAJA ŽELJEZNIČKOG VOZILA

### REZIME

Ovim radom predstavljene su osnovne otkazi koji se javljaju kod ležajeva i ležišta primijenjenih kod željezničkih voznih sredstava. U radu su opisani uzroci nastanka oštećenja ležajeva. Konačan cilj rada je upoznavanje sa problematikom održavanja ležajeva i njihovim značajem sa aspekta bezbjednosti željezničkog saobraćaja

**Ključne riječi:** željezničko vozilo, trčeci stroj, osovinski ležaj

## DAMAGE ON AXIAL BOLSTERS OF THE RUNNING ENGINE

### ABSTRACT

This paper presents the basic failures that appear on axial bolsters and bearings applied on railway vehicles. It describes the causes of damage on axial bolsters. The aim of this paper is to familiarize oneself with the problems of axial bolster maintenance and their importance from the aspect of railway safety.

**Key words:** railway vehicle, running engine, axial bolster

### 1. UVOD

Opšte poznato je da se stanje svakog tehničkog sistema stalno mijenja u toku njegove eksploatacije, a što za posledicu ima i promjenu njegovih eksploatacionih svojstava. Pri tome, promjena stanja tehničkog sistema zavisi od više faktora, a neki od njih su: prirodno habanje djelova, kvalitet materijala i obrade, nesavršenost konstrukcije djelova, montaža, uslovi eksploatacije, kvalitet održavanja i drugo.

Željezničko vozilo predstavlja složeni tehnički sistem koji se sastoji iz više podsistema (trčeci stroj, postolje, sanduk, uređaji za kočnje, vlačna i odbojna sprema, elektro oprema...), gdje između ostalih posebnu ulogu i značaj ima trčeci stroj, a u okviru njega osovinska ležišta i osovinski ležaji.

Ležišta i ležaji kao sastavni elementi osovinskih sklopova su najopterećeniji segmenti tehničkog sistema-željezničkog vozila. Samim tim, od njihove ispravnosti ne samo da direktno zavisi efikasnost vozila kao tehničkog sistema, već i bezbjednost odvijanja željezničkog saobraćaja. Zbog toga se nadzoru i dijagnozi stanja kotrljajnih ležajeva i pripadajućih ležišta, mora dati poseban značaj kako bi se analizom relevantnih pokazatelja stanja ležajeva donijeli pravilni zaključci o njihovoj ispravnosti, kao i ukazalo na smetnje u radu i eventualna oštećenja.

Za rezultat bi bilo sprečavanje pojave otkaza sa posledicama po život i zdravlje ljudi, materijalna dobra i okolinu.

Uslov za vršenje kvalitetnog nadzora i dijagnosticiranja stanja kotrljajnih ležajeva i ležišta jeste posjedovanje određenog nivoa znanja vezano za tu problematiku, a to znači

poznavanje tipova oštećenja i neispravnosti kotrljajnih ležajeva kao i njihovo povezivanje sa fizičkim fenomenima koji su uzrok tih oštećenja i neispravnosti.

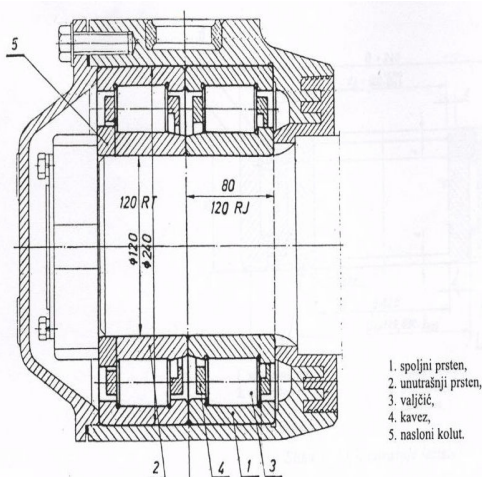
U cilju lakšeg razumijevanja materije koja će biti izložena u ovom radu, pored klasifikacije oštećenja, prethodno je dat kratak opis sklopa mazalice sa kotrljajućim ležajima koji se primjenjuje kod željezničkih vozila, ne razmatrajući sve primijenjene konstrukcione izvedbe zavisno od serije vozila, već načelno najzastupljeniji tip mazalice. Ovom prilikom treba napomenuti da su kotrljajni ležaji koji se mogu koristiti kod željezničkih vozila strogo propisani objavama UIC-a (Međunarodni savez željeznica) i ERRI-a (Evropski željeznički istraživački institut, ORE).

### 2. MAZALICA SA KOTRLJAJNIM LEŽIŠTIMA

Zavisno od serije vozila, u praksi se susreću razni tipovi mazalice, koji se u sustini razlikuju samo u konstrukcionoj izvedbi kućišta dok su kotrljajući elementi uglavnom identični i nose oznaku WJ/WJP 120 \* 240. Zajedničko za sve tipove mazalice je da su standardizovane i unificirane u skladu sa objavama UIC.

U načelu, ležišta sa mazalicom (u daljem tekstu mazalica), željezničkog vozila (vučenog) sastoji se od sledećih elemenata:

- poklopca mazalice
- zaptivnog prstena
- kućišta ležaja
- zavrtnjeva za pričvršćivanje poklopca (sa rupama za plombiranje)
- spoljašnjeg ležaja
- unutrašnjeg ležaja
- naslonog prstena
- labirinskog prstena (prahobrana)



Sl.1 Sklopni crtež ležaja sa mazalicom - mazalice

Svaki od elemenata sklopa mazalice je tipski i razlike u vezane za vrstu vozila kod kojih se ugradjuju. Održavanje, preventivno (plansko) i korektivno, takodje je propisano međunarodnim objavama UIC-a, željezničkim Pravilnicima i Uputstvima, kao i Uputstvima proizvođača.

Funkcionalnost mazalice neposredno zavisi od ispravnosti svakog njenog elementa bez izuzetaka, kao i postupanja sa mazalicom u eksploataciji i tokom održavanja.

U eksploataciji su mazalice plombirane i smiju se otvoriti samo uz odobrenje vlasnika vozila. Demontaža, pregled i montaža ležišta se izvodi najkasnije 4 godine poslije njegove prve ugradnje ili poslije poslednje demontaže. Pregled treba izvršiti:

- poslije predjenih 400.000 km,
- po utvrđivanju oštećenja,
- po narušavanju geometrije profila točkova,
- isključiva ili drugog nepredviđenog događaja.

Mjere otvora unutrašnjeg prstena, lavirinskog prstena i kućišta su u propisanim tolerancijama, koje su date u tabeli 1.

Tabela 1.

Prečnik [mm]	Tolerancije			Radijalni zazor [mm]
	Kućišta	Rukavca	Lavirinskog prstena	
80-130	H7(J7)	p6	H8/u9	0.12-0.16
130-180	H7(J7)	p6	F7/t7	0.12-0.16
> 180	H7(J7)	p6	F7/t7	0.12-0.16

### 3. OTKAZI I OŠTEĆENJA

Kotrljajni ležaj sa mazalicom, odnosno mazalica, je pripadajući podsklop osovinskog sklopa i kao takav predstavlja njegov najosjetljiviji dio imajući u vidu raznovrsnost faktora koji negativno utiču na ispravnost i funkcionalnost osovinskog sklopa u cjelini, a time i samog željezničkog vozila.

U eksploataciji se javlja više od 60 vrsta otkaza osovinskog

sklopa, a dobar dio njih odnosi se na kotrljajuće ležajeve. Samo pravilnim postupanjem, održavanjem i nadzorom sprečavaju se negativne posledice otkaza ležaja odnosno sprečava se sama njihova pojava.

Mnogi oblici otkaza međusobno su povezani, tj. mnogi od njih su uzrok pojave i razvitka drugih. Uzroci za oštećenje kotrljajnih ležaja i ležišta su različiti, a mogu biti u:

- greškama u materijalu,
- greškama u proizvodnji (greške nastale prilikom kovanja, presovanja i kaljenja, pukotine nastale prilikom brušenja, greške u tolerancijama),
- pogrešnom sastavljanju ili ugradnji ležišta,
- nepravilnom podmazivanju (manjak maziva, predoziranje ili neadekvatno sredstvo za podmazivanje),
- prolazu struje,
- uticaju vlažnosti i drugo.

U tabeli 2 su dati osnovni tipovi oštećenja kotrljajnih ležaja i ležišta kao i uzroci koji ih izazivaju. Tipovi oštećenja koji su najčešći u eksploataciji željezničkih vozila detaljnije su obrađeni u nastavku ovog rada.

Tabela 2

Uzrok	Posljedica
Neppravilna montaža	- brazdanje putanja kotrljanja - pukotine
Neppravilan zazor u ležaju	- abrazivno trošenje - kontaktna korozija - oštećenja pri montaži - nesaosnost - krivljenje i razaranje
Zamor materijala	- oštećenja površina - ljuštenje
Nedovoljno ili predozirano podmazivanje	- zaribavanje ležaja - zadiranje površina staza kotrljanja - brazdane kotrljajnih staza
Neadekvatno sredstvo za podmazivanje	- nagrizanje
Prolaz struje (prilikom električnog zavarivanja na vozilu odnosno obrtnom postolju)	- hrapavost - krateri - razaranje ležaja
Nezaptivenost	- zadori - abrazivno trošenje - kontaktna korozija - brazde na površini kotrljanja
Korozija i nagrizanje	- habanje izjedanjem-ožiljci
Labavost unutrašnjeg prstena i rukavca	- korozija trenja i habanje
Uzajamno dejstvo mekih i okaljenih djelova	- habanje mekih djelova kaveza
Zaprljanost ležaja	- habanje tvrdih djelova (cilindrični valjci, putanje..)

#### 3.1 Oštećenja ležišta korozijom i nagrizanjem

Korozija i nagrizanje dovode do povećanog habanja izjedanjem, čija je posledica stvaranje ožiljaka. Korozija trenja ili korozija spoja stvara se već pri neznatnim pomjeranjima između unutrašnjeg prstena i osovinskog rukavca kao i između spoljašnjeg prstena i kućišta (sl.2). Labavim sklopom pospješuje se pomjeranje jednog dijela



prema drugom. Tarna rdja prouzrokuje habanje u ležaju jer deluje kao sredstvo za brušenje ili poliranje.



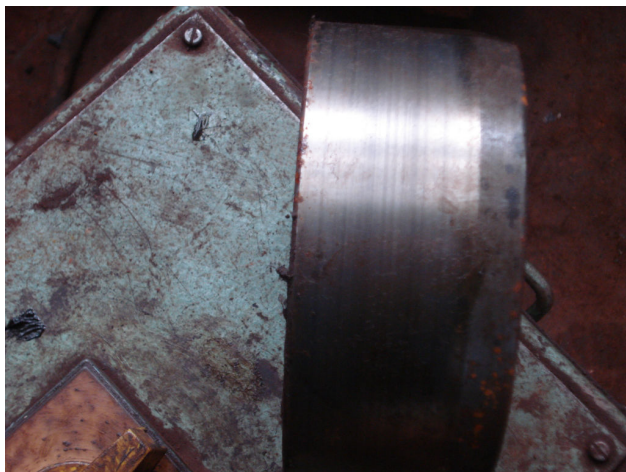
Sl.2 Oštećenja ležišta (rukavca) korozijom i nagrizanjem

### 3.2 Ostećena površina i ljuskanje

Hrapavost i listanje na putanji i cilindričnim valjcima označava se kao ljuštenje. Javlja se usled zamora materijala, pogrešne ugradnje ležišta ili prisustva stranih tijela (sl.3).

Ljuštenje usled normalnog zamora materijala nastaje tek ako je predviđeni vijek trajanja značajno premašen i usled velikog broja promjenljivih opterećenja kao uzroka zamora materijala. Tipično, u početku se javlja srazmjerno neznatno ljuskanje a zatim se stalno povećava do punog obima. Nasilnim navlačenjem ležaja na unutrašnji prsten stvaraju se jedva vidljive ogrebotine koje su inicijatori prevremenog razaranja površine metala i ljuskanja.

Strana tijela koja prilikom montaže dopijevaju u ležaj utiskuju se u putanje i cilindrične valjčice i uzrokuju nastajanje finih naprslina iz kojih nastaje ljuštenje.



Sl. 3 Ostećena površina i ljuskanje

### 3.3 Pukotine

Pukotine nastaju prilikom nestručnog navlačenja i skidanja ležaja, a kao posledica udaranja čekićem i udaraca na prstenove i valjčice.

Uzrok poprečnim pukotinama na unutrašnjim prstenovima je često suviše tijesan sklop sa osovinskim rukavcem (sl.4)



Sl.4 Pukotine na prstenu

### 3.4 Ostećenje kaveza

Pri nedovoljnom podmazivanju nastaje jako habanje džepova u kavezu usled čega se cilindrični valjčici zakošuju i prouzrokuju oštećenja nosive površine naslona prstena i labavljenje zakovičastog spoja. Habanje kaveza dovodi na kraju do loma odstojnika-distancera i upropašćavanja ležaja (sl.5).

### 3.5 Stvaranje brazde

Brazde su oštećenja putanje koja nastaju od mikroskopski malih čeličnih opiljaka. Rijetka su pojava kod kotrljajnih ležaja šinskih vozila.

Pored toga brazde nastaju i usljed strujnog opterećenja većeg od  $0.7 \text{ A/mm}^2$  (jednosmjerna ili naizmjenična) i to dubine  $16 \mu\text{m}$  i širine oko  $2\text{mm}$ .



Sl.5 Posljedice nepodmazanosti kaveza i ležaja

### 3.6 Nagorjela mjesta

Prilikom električnog zavarivanja na vozilu odnosno obrtnom postolju dolazi do prolaza struje čime se stvaraju nagorjela mjesta u obliku kratera na putanji prstena i površini kotrljanja cilindričnih valjčica. Usled toga dolazi do razaranja ležaja (sl.6).

### 3.7 Nezaptivenost mazalice

Nezaptivenost kućišta ležaja omogućava prodor vlage iz vazduha (i ne samo vlage već i atmosferskih padavina) u ležaj koja se prilikom hlađenja kondenzuje i stvara prekid uljnog filma na mjestima kontakta kotrljajnih tijela i kotrljajnih staza.



Tokom imobilizacije kola stvara se korozija koja se kasnije ponaša kao abrazivno sredstvo i izaziva mehanička oštećenja (sl.7).



Sl.6 Nagorjelost ležaja



Sl.7 Posljedice nezaptivenosti mazalice

#### 4. ZAKLJUČCI

Kotrljajni ležaji sa mazalicom koji se primjenjuju kod željezničkih vozila su vitalni elementi trčućeg stroja i predstavljaju osnov bezbjednog saobraćaja.

Oštećenja na sklopu ležaja dovode do mehaničkih oštećenja i zagrijavanja trčućeg stroja, što u krajnjem slučaju ima za posledicu blokiranje osovine (ili u težim slučajevima njen lom), usled čega neizostavno dolazi do iskliznuća vozila.

Poznavanjem nepravilnosti u radu ležajeva, njihovim praćenjem, analizom i preduzimanjem mjera u cilju sprečavanja njihove pojave ostvaruje se cilj održavanja, a to je efikasan tehnički sistem sa minimalnim učešćem otkaza u radu.

#### LITERATURA

- [1] Gosa, *Uputstvo za održavanje i opravku osovinskog sklopa sa kotrljajnim lezistima*, Gosa 1987.
- [2] SKF, *Priručnik za održavanje lezajeva SKF*, 1988.
- [3] Vladimir Aleksandrov, *Održavanje željezničkih vozila*, Naučna knjiga Beograd 2000.
- [4] ZJZ, *Uputstvo o održavanju osovinskih sklopova 260*, ZJZ Beograd 2000.

[5] ZJŽ, *Uputstvo za korišćenje i održavanje vagonskih mazalica sa kotrljajućim ležajima*, Beograd 1964

[6] Bulatović, M., *Održavanje i efektivnost tehničkih sistema*, predavanja na postdipl. Studijama, Mašinski fakultet, Podgorica, 2008.

**Autori:** Sadžid Nuhodžić, dipl. inž. maš. Željeznički prevoz Crne Gore AD, Podgorica, Prof. dr Miodrag Bulatović, Mašinski fakultet, Univerziteta Crne Gore, Podgorica, bulatovm@yahoo.com



Jovanović, D., Nedić, B.

## UTICAJ TEHNOLOGIJE IZRADE NA RADNE KARAKTERISTIKE MAŠINSKIH ELEMENATA

**Rezime:** Poslednjih godina pokazuje se sve više interesovanja za ispitivanje uticaja načina izrade mašinskih elemenata na njegove radne karakteristike. Mnoge pojave nastale u prethodnoj i završnoj obradi mašinskih elemenata, značajno utiču na proces gubitka radne sposobnosti sklopova u eksploatacionim uslovima. Očigledno je da je za obezbeđenje visokog kvaliteta i pouzdanosti mašinskih elemenata i njihovih sklopova neophodna svestrana analiza svih pojava koje prate proces njihove izrade u eksploataciji. Osnovni parametri mašinskih elemenata, nasleđeni u toku tehnološkog procesa, mogu se podeliti u dve grupe: vezani za materijal i mikro i makrogeometrijske pokazatelje obrađenih površina. U prvu grupu spadaju parametri koji karakterišu hemijski sastav, strukturu i stanje naprezanja materijala delova i sklopova, strukturu površinskih slojeva, površinsku energiju i dr. Druga grupa karakteriše mikro i makrogeometriju obrađenih površina (hrapavost, talasnost, ovalnost, ...). U ovom radu je dat prikaz uticaja tehnološkog nasleđa pri izradi delova lovačkih karabina na njihov radni vek.

**Ključne reči:** tehnološki proces, sanduk, prskotine

## INFLUENCE OF THE PRODUCTION PROCESSES ON WORKING PROPERTIES OF MACHINE ELEMENTS

**Abstract:** More interest has been shown in the last few years for interrogation of technological heritage and its connection to exploitation properties of elements. A lot of effects in raw and final machining of machine details have a big influence to loss of working capacity of assemblies in exploitation conditions. Obviously it is of need for achieving a high quality and reliability of machine details and its assemblies to make overall analysing of production processes and exploitation. The basic parameters machine elements, heritagaged technological process can be classified in two groups: related to material and micro and macro geometry indicators of machined surfaces. In the first group are parameters who characterized chemical texture, structure of surface layers, surface energy and others. The second group characterized micro and macro geometry of machined surfaces (roughness, corrugation,...). The subject is paper is a display is shown a review of the technological heritage influence in manufacturing of hunting carbine parts to their life cycle

**Key words:** production process, hutch, fracture

### 1. UVOD

Visoki zahtevi savremenog mašinstva za kvalitet i pouzdanost mašina i mašinskih elemenata, suštinski su izmenili prilaz ka njihovom konstruisanju, tehnologiji izrade i održavanju u procesu eksploatacije. Mnoge pojave nastale u prethodnoj i završnoj obradi mašinskih elemenata, značajno utiču na proces gubitka radne sposobnosti sklopova u eksploatacionim uslovima. Očigledno je da je za obezbeđenje visokog kvaliteta i pouzdanosti mašinskih elemenata i njihovih sklopova neophodna svestrana analiza svih pojava koje prate proces njihove izrade i eksploatacije.

Poslednjih godina pokazuje se sve više interesovanja za ispitivanje tehnološkog nasleđa i njegova veza sa eksploatacionim svojstvima elemenata. Danas se pod

pojmom tehnološkog nasleđa podrazumevaju fizičko-mehaničke karakteristike obrađenih površina mašinskih elemenata, nastale kao rezultat prethodnih i završnih tehnoloških operacija.

Osnovni parametri mašinskih elemenata, nasleđenih u toku tehnološkog procesa, mogu se podeliti u dve grupe: vezani za materijal i mikro i makrogeometrijske pokazatelje obrađenih površina.

U prvu grupu spadaju parametri koji karakterišu hemijski sastav, strukturu i stanje naprezanja materijala delova i sklopova, strukturu površinskih slojeva, površinsku energiju i dr. Druga grupa karakteriše mikro i makrogeometriju obrađenih površina (hrapavost, talasnost, ovalnost, ...).

Struktura i defekti metala različite vrste, nastali u

metalurškom procesu, mogu proći kroz celokupan tehnološki lanac operacija i pokazivati uticaj na kvalitet gotovih mašinskih elemenata. Izvesno je da naprimer od temperaturnog intervala kovanja i presovanja suštinski zavisi struktura materijala mašinskih elemenata. Ako je pri tome formirana nepovoljna struktura, elementi će imati slabije fizičko-mehaničke karakteristike i kratak radni vek, bez obzira na visok nivo završne mehaničke obrade.

U zavisnosti od načina obrade, nekada je uticaj prethodne obrade na karakteristike mašinskih elemenata znatno uticajniji od vrste završne obrade. Kao rezultat preraspodele zaostalih napreznja, faznih i strukturnih promena, mašinski elementi u procesu eksploatacije mogu izmeniti svoju geometrijsku formu.

U ovom radu je dat prikaz uticaja tehnologija izrade sanduka lovačkog karabina na njegov radni vek.

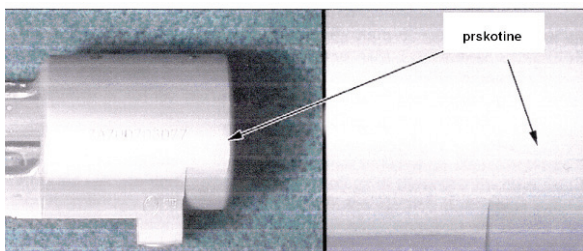
## 2. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

Završna ispitivanja na 70 uzoraka karabina od nerđajućeg čelika (po 10 uzoraka sa različitim kalibrima) obavljena u fabrici Zastava oružje AD u Kragujevcu pokazala su otkaz na dva karabina.

Uslovi ispitivanja:

- svaki karabin je tretiran sa 10 bojevih metaka
- standardna municija, proizvođača Prvi partizan, Užice.

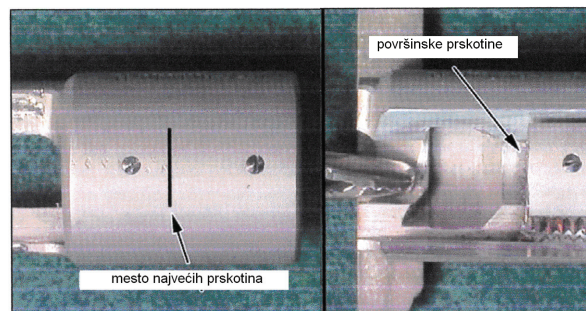
Posle inicijalnog ispitivanja na funkciju, dva karabina, Cal 7 mm Rem, su identifikovna sa manama, koje se ogledaju na pojavi vidljivih prskotine na sanducima. Na sanduku "1" otkrivena je pukotina duž desne strane okidača na prednjem delu sanduka, slika 1. Kod testiranog sanduka "2" došlo je do pojave pukotine na vrhu, između otvora za postavljanje optičkog nišana, slika 2.



Slika 1. Pojava prskotine na sanduku 1

Prema predviđenom tehnološkom postupku sanduk se izrađuje od materijala X19CrNi17-2 (Č4570). Početni materijala je otkovak prikazan na slici 3. Operacija kovanja se izvodi prema sledećem tehnološkom postupku.

- predgrevanje do 760/816 °C,
- ravnomerno zagrevanje do 1027/1024 °C,
- kovanje,
- hlađenje otkovka u suvom pepelu ili kreču,
- žarenje 732/ 780 °C.
- delove hladiti u peći.



Slika 2. Pojava prskotine na sanduku 2

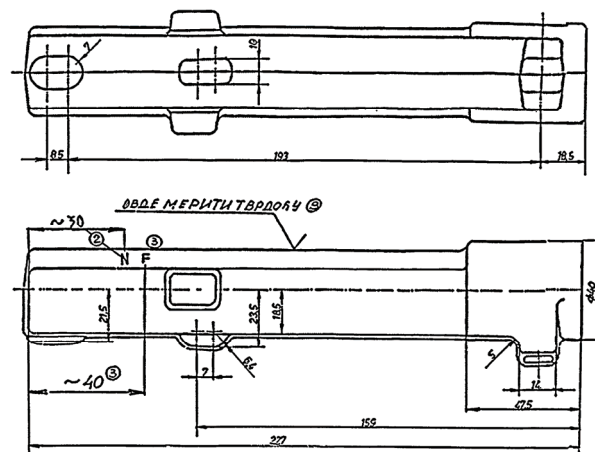
Posle mehaničke obrade komada izvodi se operacija termičke obrade prema sledećem režimu

- predgrevanje  $T= 760 - 790 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
- austenizacija  $T= 981 - 1061 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
- dvostruko popuštanje  $T= 230 - 370 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , u neutralnoj atmosferi,
- tvrdoća 42-48 HRC.

Kod sanduka kod kojih je došlo do pojave pukotina prvo je izvršena analiza tvrdoće. Izvršeno je pet meranja na svakom sanduku duž prednjeg dela sa leve strane okidača.

Na osnovu izmerenog vidi se da je tvrdoća u granicama propisane, 42 - 48 HRC, a analiza sastava materijala pokazala je da nije došlo do zamene već da su sanduci urađeni od predviđenog materijala X19CrNi17-2 (Č4570).

U tabeli 1 dati su rezultati merenja tvrdoće kod dva naprsila sanduka.



Slika 3. Otkovak sanduka

Tabela 1. Rezultati merenja tvrdoće prslih sanduka

broj merenja	1	2	3	4	5	prosek
uzorak 1	46,7	47,3	46,9	45,3	46,6	46,6
uzorak 2	46,4	44,7	43,7	44,0	47,4	45,3

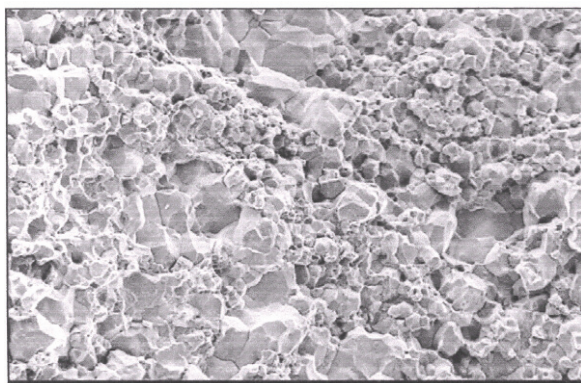
U tabeli 2. dat je hemijski sastav materijala od kojeg je napravljen sanduk iz koje se vidi da korišćeni materijal ispunjava hemijske uslove za nerđajući čelik 420 (UNS#S42000) .



Tabela 2. Hemijski sastav materijala sanduka

element	%	420, UNS#S42000
ugljenik	0,25	0,15 min
silicijum	0,40	1,00 max
mangan	0,43	1,00 max
fosfor	0,013	0,040 max
sumpor	0,027	0,030 max
hrom	12,66	12,00-14,00
molibden	0,15	-
nikl	0,28	-
vanadijum	0,07	-
kobalt	0,02	-
bakar	0,14	-
volfram	0,22	-
gvožđe	ostatak	ostatak

Prelom pukotine sanduka "2" je ispitan i došlo se do morfologije koja se sastoji od 100% intergranularnog preloma. Ovo nije morfologija preloma koja je trebalo da proistekne od delova koji su u stanju termičke obrade, slika 4-a. Ova morfologija preloma upoređena je sa morfologijom odvojenog preloma napravljenog u istom sanduku kroz kanal za izbacivanje.



a) uzorak - 1



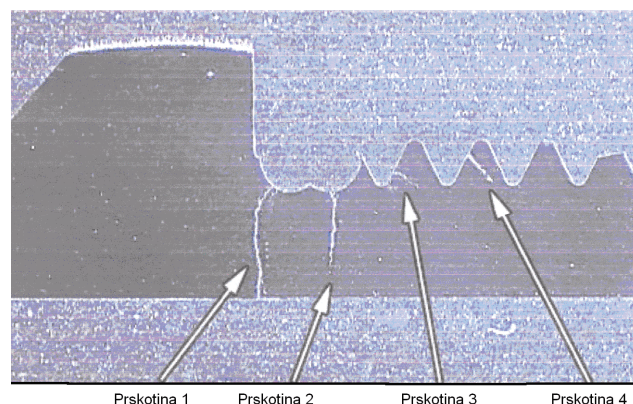
b) uzorak - 2

Slika 4. SEM slika sanduka

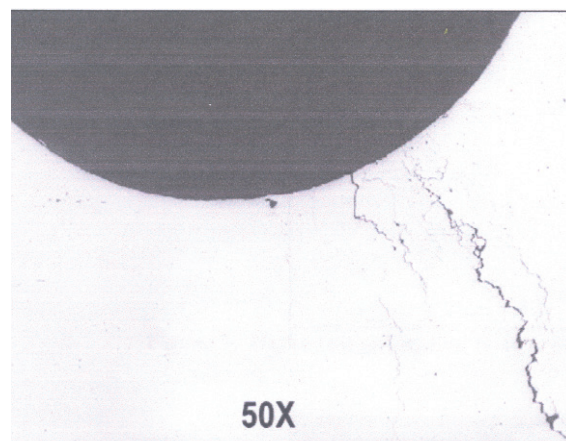
Otkriveno je da se radi o različitim morfologijama preloma. Morfologija preloma u napravljenom prelomu u oblasti kanala za izbacivanje pokazuje mali stepen intergranularnog preloma, ali se u velikoj meri

sastoji od raznovrsnih transgranularnih rastegljivih ulegnuća i cepanja, slika 4-b.

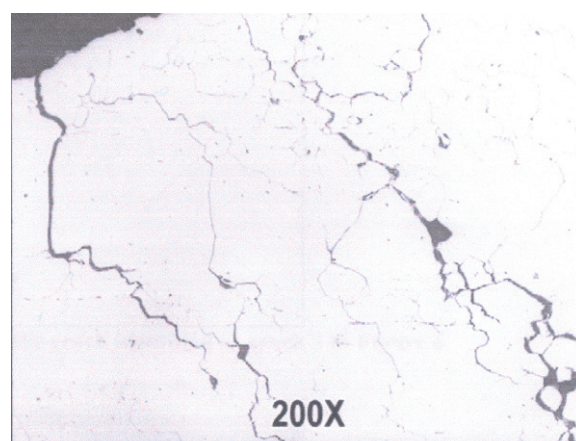
Na slici 5, dat je polirani poprečni presek na mestu prskotine 1, koja je otkrivena kod sanduka broj 2. Ovaj poprečni presek pokazuje da je bilo nekoliko oblasti koje su pokazale pucanje ispod površine sanduka.



Slika 5. Polirani poprečni presek sanduka sa prskotinama



a)

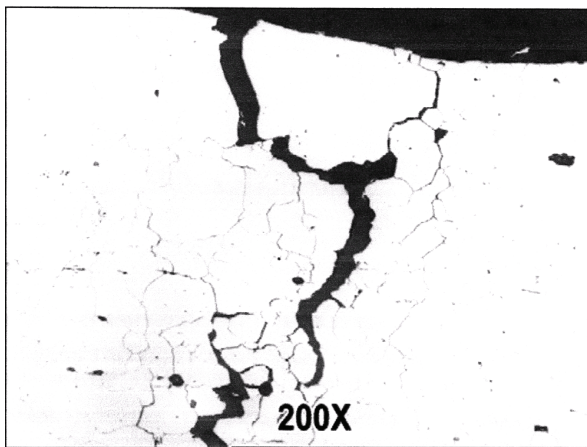


b)

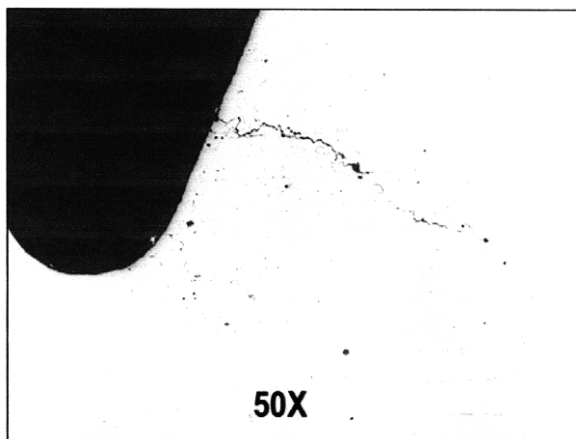
Slika 6. Prskotina 1 (sa različitim uvećanjima)

Na slikama 7, 8 i 9 dat je prikaz nekoliko otkrivenih prskotina. Svi prelomi pokazuju 100% intergranularni prelom koji je potvrđen poliranim poprečnim preseccima koji pokazuju širenje prskotine duž prethodnih granica od zrna austenita.

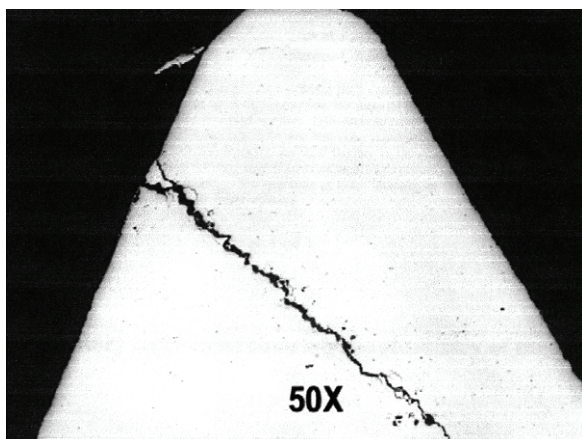




Slika 7. Prskotina 2



a)



b)

Slika 9. Prskotina 3

### 3. ZAKLJUČAK

U procesu kovanja priprema za izradu sanduka kao i pri izvođenju operacije termičke obrade, nije u potpunosti ispoštovan predviđeni tehnološki ciklus. Ovo je imalo za posledicu formiranje nepovoljne strukture u materijalu, čime se objašnjavaju slabije fizičko-mehaničke karakteristike i kratak vek gotovog dela.

Nasledena struktura se ogleda u nastanku unutrašnjih prskotina koje se u procesu eksploatacije šire i dovode do loma dela. Naknadno ostvarena visoka tačnost završne mehaničke obrade ne može da otkloni defekte nastale prethodnim neodgovarajućim postupcima obrade (kovanje i termička obrada).

### 4. LITERATURA

1. Аверченков В. И. *Технологическая наследственность в машиностроении*. Минск: Наука и техника, 1997. - 276 с. (в соавторстве),
2. Мухин В. С. *Технологические методы повышения эксплуатационных свойств изделий*: Учеб. пособие. Уфа: УАИ, 1982. 56 с,
3. Jovanović D., Nedić B. *Uticaj tehnološkog nasleđana na radni vek mašinskih elemenata*, Zbornik radova, DEMI-2009, Banjaluka, 2009.
4. Zapisnici o internim ispitivanjima ZO,
5. Standardi SNO.

**mr Desimir Jovanović**, Zastava oružje AD, Kosovska 4,  
34000, Kragujevac, Srbija,  
e-mail: zo.tehnologija@nadlanu.com

**Prof. dr Bogdan Nedić**, Mašinski fakultet, Sestre Janjić 4,  
34000 Kragujevac, Srbija, e-mail: nedic@kg.ac.rs

Predrag Ž., Slobodan M.

## RAZARANJA CENTRALNIH ZUPČANIKA PLANETARNIH PRENOSNIKA SNAGE

**Rezime:** Pojava habanja zubaca centralnih pogonskih zupčanika je višestruko izražena i intenzivnija u odnosu na habanja zubaca zupčanika satelita, a naročito u odnosu na zupce venca sa unutrašnjim ozubljenjem. Ovakvo neujednačeno habanje je posledica neujednačenih napona i veoma različitih brojeva sprezanja zubaca u jedinici vremena. Ova razlika u intenzitetu trošenja zubaca dovodi do skraćivanja veka prenosnika. Vek se može povećati smanjivanjem opterećenja koje se prenosi, a to smanjuje racionalnost iskorišćenja mase prenosnika.

Cilj rada je da se definišu uzroci i posledice fenomena pojave habanja centralnih zupčanika, i da se definišu verovatnoće razaranja centralnih zupčanika a koje mogu da posluže za određivanje elementarne pouzdanosti centralnih zupčanika planetarnih prenosnika.

**Cljučne reči:** Habanje, zupčanik, verovatnoća

### FAILURE OF THE CENTRAL GEARS OF PLANETARY POWER TRANSMITTERS

**Abstract:** The appearance of central drive gears wear is multi expressed and intensive in relation to the teeth wearing of satellite gear, especially in relation to the teeth rim with internal toothing. This uneven wear is a consequence of uneven stress and very different number of teeth coupling in the unit of time. This difference in the intensity of teeth wearing leads to shortening of validity of the gear. Validity can be increased by reducing the load that is transferred, and it reduce the use of rationality gear mass.

The aim of this work is to define the causes and consequences of the occurrence of the phenomenon of central wear gear, and to define the probability failure central gear that can serve to determine the reliability of the central elementary reliability of planetary gear transmitters.

**Key words:** Wear, gear, probability

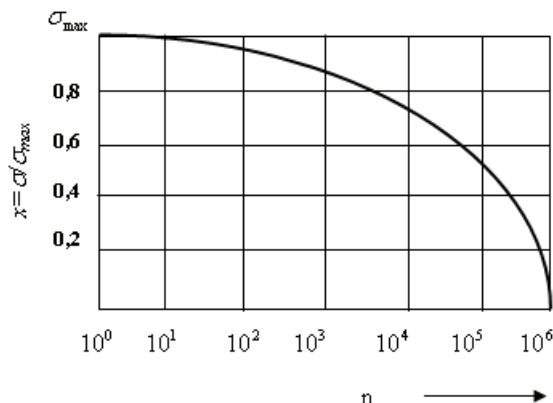
#### 1. UVOD

Planetarni prenosnici snage predstavljaju novije i savremenije rešenje za transformaciju mehaničke energije. Odlikuju se visokom kompaktnošću konstrukcije, velikim prenosnim odnosom i visokom nosivišću po jedinici mase. Primena ovih prenosnika postaje sve šira kako za stalne prenosne odnose tako i za menjače. U planetarnim prenosnicima prenos energije je specifičan. Deo se prenosi kao kod zupčaste spojnice a deo zupčanjem. Unutar prenosnika javljaju se novi fenomeni u pogledu povećanog intenziteta zagrevanja i pvečanog trošenja zupčanika i ležaja.

Osnovni oblici i fenomeni nastanka oštećenja bokva zubaca opisana su i objašnjena u DIN 3979.

#### 2. RADNA STANJA DELOVA PRENOSNIKA

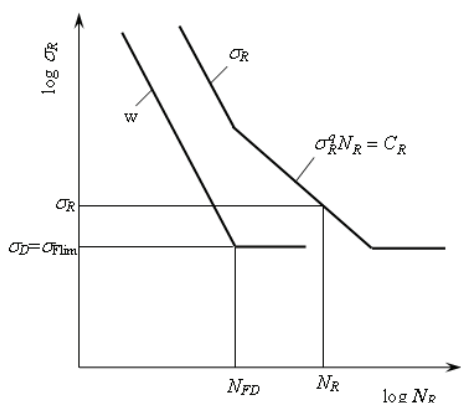
Planetarni prenosnici se ugrađuju u mašinama kod kojih su radna opterećenja visokog intenziteta i složene promene u toku radnog veka. Promenljivost opterećenja, inercijalne sile visokih intenziteta i sopstvene vibracije čine da dinamičke sile budu relativno velike. Usled promenljivosti radnih otpora koji se savladavaju posredstvom prenosnika, na primer kod bagera, obrtni moment na izlaznom vratilu je promenljiv. Usled toga i naponi na/u zupcima zupčanika su promenljivi. Prikaz ovog stanja realizuje se posredstvom spektra opterećenja odnosno spektra napona.[3] Spektar napona je uređjeni skup napona (opterećenja) različite veličine koji pokazuje učešće svakog od napona u izabranom broju promena od  $10^6$ . (Slika 1.)



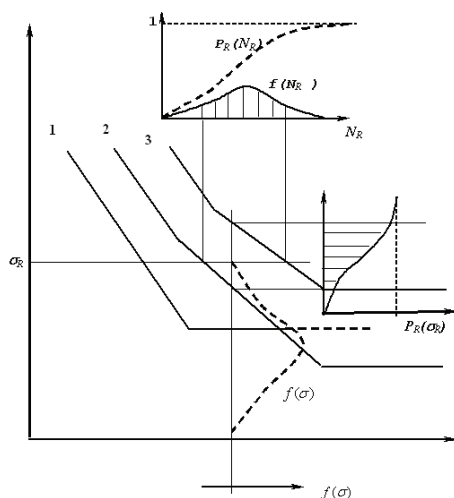
Slika 1. Mogući spektar radnih napona u zupcima

Pod dejstvom napona stalne amplitude, zamor zubaca se ostvaruje u skladu sa Velerovom krivom tj. sa osnovnom dinamičkom izdržljivošću (W-sl.2). Pošto je opterećenje odnosno napon promenljiv u toku radnog veka, zamor se ostvaruje u skladu sa radnom izdržljivošću. To je najveći napon u spektru napona  $\sigma_R$  koji dovede do loma posle  $N_R$  promena napona svih veličina. Pošto manje amplitude promene napona ostvaruju manji uticaj na zamor to je potreban broj promena  $N_R$  mnogo veći od broja promena  $N$  koji odgovara Velerovoj krivoj. Usled toga je i radna izdržljivost veća od osnovne (Velerove). Oblik i položaj linije radne izdržljivosti (sl.2) zavisi od težine radnog režima odnosno od spektra napona na slici 5.2. [3]. Osim navedenih promena usled uticaja radnih uslova, prisutni su još neki. Proces zamaranja je stohastičkog karaktera. Lomovi ne

nastaju uvek pri istom broju ciklusa promene napona i nisu ponovljivi na isti način.



Slika 2. Uticaj promenljivog opterećenja na izdržljivost u odnosu na lom zupca



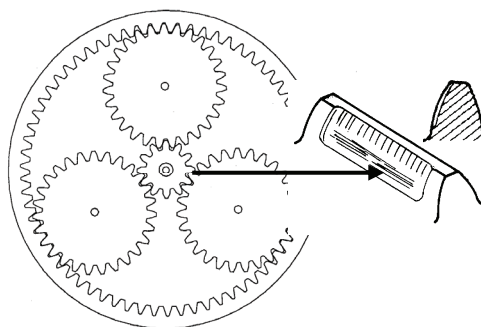
Slika 3. Rasipanje radne izdržljivosti u oblasti radne izdržljivosti

Uслед toga u razmatranje se uvodi još jedan parametar, a to je verovatnoća razaranja. Ni Velerova kriva ni kriva radne izdržljivosti prikazane na slici 2. nisu linije već područja rasipanja tačaka koje definišu izdržljivost. Prikazane linije predstavljaju samo srednje vrednosti tj. odgovaraju verovatnoći razaranja od 50%. Na slici 3, umesto jedne linije radne izdržljivosti prikazano je ovo područje ograničeno linijama za verovatnoću razaranja od 10% ( $P_R=0,1$ ) i za verovatnoću razaranja 90% ( $P_R=0,9$ ).[3] Ovo područje rasipanja verovatnoće razaranja kada se preseče linijom koja određuje radnu izdržljivost  $\sigma_R$ , dobija se funkcija raspodele verovatnoće razaranja zavisna od broja promena napona  $P_R(N_R)$ . Kada se ovo područje preseče linijom koja odgovara broju promena napona u radnom veku  $n_S$ , dobija se funkcija promene verovatnoće razaranja u zavisnosti od radne izdržljivosti  $P_R(\sigma_R)$ . Ove funkcije raspodele verovatnoće razaranja neophodne su za određivanje (procenu) elementarne pouzdanosti u odnosu na lom zubaca zupčanika. Habanje zubaca zupčanika odvija se po drugačijim zakonitostima te će verovatnoća habanja biti definisana po drugačijim kriterijumima.

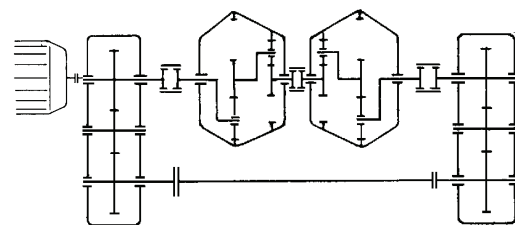
### 3. ISPITIVANJE RAZARANJA

Centralni zupčanik je malog prečnika te je pri istom obrtnom momentu vrlo velika obimna sila. Uслед malog broja zubaca i radijus krivine boka je mali što takodje doprinosi povećanju

napona na boku zupca. Povoljna okolnost je ta što se opterećenje ovog zupčanika deli na broj satelita, pa je sila po jednoj sprezi manja u poređenju sa zupčanikom istih dimenzija koji bi bio izložen celokupnim opterećenjem. Ipak ovaj efekat je umanjn neravnomernošću raspodele opterećenja na satelite i činjenicom da se isti zubac centralnog zupčanika spreže sa različitim zupcima zupčanika satelita. Na slici 4, prikazana je šema jednog planetarnog seta na kojoj je označeno mesto razaranja centralnog zupčanika.



Slika 4. Planetarni set sa označenim razaranjem centralnog zupčanika



Slika 5. Šematski prikaz principa povezivanja planetarnih prenosnika

Planetarni prenosnik, koji je bio predmet istraživanja je dvostepeni sa ulaznim brojem obrtaja  $1108 \text{ min}^{-1}$ , ukupnim prenosnim odnosom 42(prvi stepen 7, drugi 6), izlaznog obrtnog momenta 23000 Nm. Za prvi stepen brojevi zubaca centralnog zupčanika, satelita i venca su 12/30/72, modul 3,5 mm, a za drugi planetarni set, brojevi zubaca su 13/26/65 a modula 4 mm. Material centralnih zupčanika i zupčanika satelita je Č.4721, a venčanika Č.4732. Podmazivanje je uljem *S3 SAE90*. Za ispitivanje navedenog planetarnog reduktora, pripremljen je odgovarajući probni sto, koji čine dva istovetna prenosnika sa paralelnim vratilima istih prenosnih odnosa, spojeni u zatvoreni "back to back" sistem (sl. 5).[4] Opterećenje u sistemu se ostvaruje torzionim elastičnim deformisanjem vratila koja spajaju prenosnike.

### 4. REZULTATI ISPIIVANJA

U toku ispitivanja koje je trajalo 200 sati pri izmerenoj učestanosti obrtanja centralnog zupčanika od  $1108 \text{ min}^{-1}$ , jedan zubac centralnog zupčanika ostvario je broj promena napona  $39,9 \times 10^6$ , pri učestanosti sprežanja 664,8 Hz. Kod drugog planetarnog seta brzina rotacije i broj promena napona su manji, ali su opterećenja zubaca i naponi veći. Napon na bokovima zubaca centralnog zupčanika,

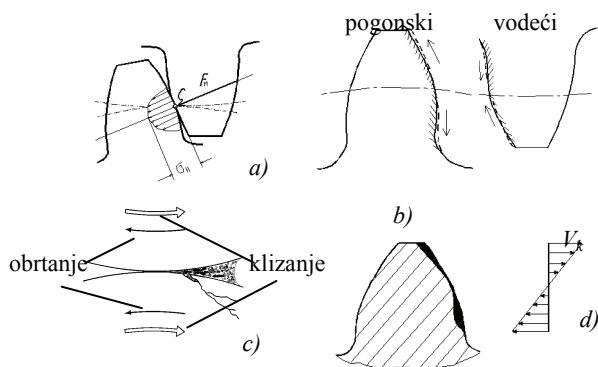
$$\sigma_{Ha2} = \sigma_{Hg2} = 2412 \frac{N}{\text{mm}^2}, \text{ a radni napon u podnožju}$$

centralnog zupčanika drugog planetarnog seta:

$$\sigma_{Fa2} = 787 \frac{N}{\text{mm}^2}, [4]$$

Drugi planetarni set konstruktivno je izveden sa tri satelita. Broj promena napona na boku zupca u toku od 200 sati

ispitivanja je  $5,69 \times 10^6$ , a učestanost sprezanja zubaca centralnog zupčanika drugog planetarnog seta 102,9 Hz. Bokovi zubaca centralnih zupčanika prvog i drugog planetarnog seta izloženi su izuzetno visokom površinskom pritisku. Osim toga učestanost sprezanja i ukupni broj sprezanja u radnom veku veoma je visok. Tokom radnog veka zupci jednog zupčanika u sprezi prilagodjavaju se zupcima drugog zupčanika u sprezi. U ovom slučaju jedan zupčanik se prilagodjava zupcima tri druga zupčanika što značajno ubrzava habanje. Sve to utiče da razaranje bokova centralnog zupčanika planetarnog prenosnika bude izuzetno specifično.



Slika 6. a) Hrtzov pritisak, b) klizanja, c) mikroprslinae, d) oštećenja bokova klizanjem

1. Habanje klizanjem zubaca najvećeg je intenziteta u zonama gde su brzine klizanja najveće tj. u zoni početka i kraja sprezanja (blizu temena i blizu podnožja zupca) – sl.6d. Ovo razaranje je ubrzano ukoliko su zupci od mekših materijala, ukoliko je brzina rotacije odnosno brzina klizanja veća, ukoliko je pritisak na bokovima zubaca (sl.6a), veći i ukoliko je podmazivanje (sl.6c) siromašniji. Ovo habanje može biti ubrzano delovanjem abrazivnih čestica koje se odvajaju od jednog dela boka i lepe na druge delove ili upadaju u zonu klizanja. Kod visokih brzina i kod visokih lokalnih temperatura u lokalnim tačkama dodira ove se čestice, a i sami bokovi međusobno "zavaruju", a proces abrazije izuzetno ubrzava. Tako ovo razaranje dobija oblik zaribavanja bokova.

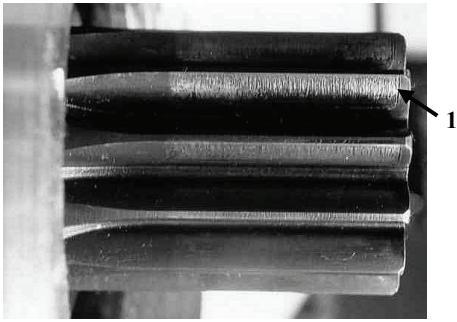
2. Ako su bokovi mekani (termički neotvrdnuti), u zoni oko sredine boka gde je brzina klizanja bliska nuli (sl.6d) može doći do gnječenja. To je plastična deformacija površinskog sloja u obliku utiskivanja jednog boka u drugi. Ova pojava doprinosi da se debljina pohabanog sloja ujednači duž celog boka tj. da srednji deo boka ne zaostaje bitno u habanju u odnosu na krajeve boka (sl.6d).

3. Ako su zupčanici površinski otvrdnuti, na primer cementirani, proces habanja, a naročito gnječenje su jako usporeni ili potpuno onemogućeni. Vek bokova zubaca je na ovaj način jako produžen.[4] Posle veoma velikog broja promena napona koji uglavnom mogu da "dožive" cementirani zupci, oko sredine zubaca počinje da nastaje razaranje usled zamora površinskog sloja poznato pod nazivom "piting". Centralni zupčanici planetarnog prenosnika koji je predmet ovog razmatranja su sa cementiranim bokovima. Usled velikog broja promena napona koji je posledica Hercovog pritiska (sl.6a), nastaje zamor. Ispod površine boka zupca (sl.6c) nastaju mikroprslinae. Njihovo širenje je potpomognuto i dejstvom tangentialnih napona usled sile trenja (sl.6b) i dejstvom ulja koje prodire u prslinu (sl.6c). Tako nastale pukotine se šire u smeru klizanja bokova. Kao uzrok pojave mikropukotina može biti i zarez kao posledica hrapavosti, koji je nastao u postupkom izrade, koji se javlja kao izvor koncentracije napona. U ovako nastale pukotine ulazi ulje koje u toku sprezanja biva zatvoreno i pritisnuto

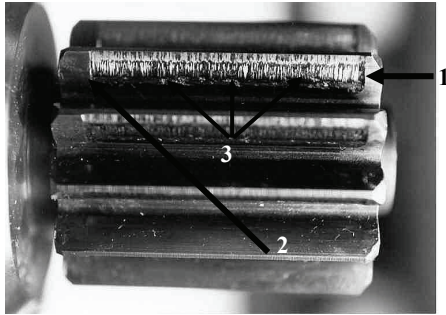
bočnom površinom zupca spregnutog zupčanika., pri čemu pritisak ulja jako raste. Učestalim zatvaranjem i ponovnim otvaranjem toku sprezanja ove pukotine se dalje povećavaju lomljenjem delića materijala na njihovim ivicama i ispadanjem odlomljenih delova. Ulje izaziva širenje pukotina sve dok one ne postanu dovoljno velike da dodje isticanje ulja iz zone pritiska bokova. Pukotine nastale na ovaj način, leže pod uglom 5 do  $20^0$  u odnosu na bočnu površinu u smeru klizanja bokova. Tendencija otvaranja pukotina zavisi od smera klizanja u odnosu na smer pukotine. Kod pukotina koje se poklapaju sa smerom klizanja, zbog površinskih opterećenja dolazi do otvaranja pukotine i njenog punjenja uljem, pa bok zupca spregnutog zupčanika zatvara pukotinu i povećava pritisak ulja. Na ovaj se način od pritiska ulja širi pukotina. Kod pojave pukotine suprotnog nagiba u odnosu na smer klizanja, dolazi do istiskivanja ulja, pa tek onda do opterećenja iznad same pukotine. Na ovaj način ulje ne utiče na povećanje pukotina. Na smer pukotine utiče smer sile trenja na boku zupca. Sila trenja kod pogonskog zupčanika deluju od kinematske kružnice ka temenu i ka podnožju zupca (sl. 6b). U istom smeru postoji i tendencija pomeranja površinskih slojeva boka zupca. Kod gonjenog zupčanika je obrnuto (sl. 6b). Brzina klizanja na kinematskoj kružnici je nula, pa u toj zoni nema tendencije pomeranja površinskih slojeva (sl.6c). Kod pogonskog zupčanika sila trenja je usmerena od kinematske kružnice ka temenom delu zupca, to postoji tendencija izvlačenja gornjeg sloja materijala (sl.6c). Kod gonjenog zupčanika je obrnuto, pa postoji tendencija sabijanja gornjeg sloja materijala ka kinematskom cilindru (sl.6c). Sa ovako opisanim smerovima klizanja materijala na temenu u podnožju zupca, prilikom ulazka i izlaska zubaca iz sprege se javljaju ubrzana habanja (odnošenje materijala sa bokova) (sl.6c). Teorijski posmatrano, površinski pritisak je najveći u okolini tačke B jednostruke sprege, tj u podnožju zupca malog zupčanika. Za broj zubaca  $z_1 < 20$  površinski pritisak u ovoj tački je veći od pritiska u kinematskoj tački C, pa se vrlo često u toj zoni najpre javlja piting. Usled toga se neravnine nastale pitingom gnječe, a abrazija ubrzava.

4. Prethodni opis razvoja pitinga ukazuje na to da je pogonski (centralni) zupčanik u znatno nepovoljnijoj situaciji od gonjenog. Pitingom se otvrdnuti površinski sloj razori, a zaštita koju ovaj sloj obezbeđuje protiv habanja i gnječenja, nestaje. Dakle, kada piting dostigne odgovarajuće razmere, cementirani sloj oko sredine boka nestaje, a gnječenje u ovoj zoni ubrzava proces razaranja. I habanje krajeva bokova postaje intenzivnije tj. lakše se skida preostali cementirani površinski sloj na krajevima boka. Na ovaj način je cementirani sloj "odložio" ubrzano razaranje klizanjem i gnječenjem sve dok piting nije uklonio ovaj sloj. Time je vek zupčanika produžen, ali pojavom kombinovanog procesa razaranja nije u potpunosti onemogućena. Ako je cementirani sloj veće debljine i veće tvrdoće, a radni uslovi zupčanika povoljniji efekti cementacije mogu biti takvi da pojavu razaranja gotovo u potpunosti onemoguće. U zatvorenom kolu snage ispitivana su dva međusobno spregnuta planetarna prenosnika sa po dva planetarna seta. Opterećenje i broj obrtaja su bili znatno veći od onih koji su predviđeni za uslove eksploatacije. Razlog je da se proces ispitivanja ubrza, a zatim da se uslovi ispitivanja transformišu na radne uslove. Posle 200 sati rada, stanje centralnih zupčanika je bilo sledeće. Centralni zupčanik prvog planetarnog seta pohaban je relativno malo tj. do dubine 0,1-0,2 mm. Skinuti sloj materijala je približno iste debljine po visini zupca i po širini zupčanika (sl.7). Zbog neravnomernosti raspodele opterećenja duž zubaca u sprezi, habanje je ipak nešto izraženije na slobodnom kraju zupčanika (sl.7-1).





Slika 7. Oštećenja bokova zubaca ulaznog centralnog zupčanika prvog planetarnog seta



Slika 8. Oštećenja bokova zubaca ulaznog centralnog zupčanika drugog planetarnog seta

Centralni zupčanik drugog planetarnog seta izrađen je kao i centralni zupčanik prvog planetarnog seta sa dubinom cementiranog sloja na bokovima zubaca od 0,7-1,0 mm, tvrdoće 58-60 HRC. Po konstrukciji je izveden i izrađen izjedna sa nosačem satelita prvog planetarnog seta kao celina je velike krutosti a po konstrukcijskom izvodenju je izveden kao plivajući i bolje se prilagđava zupčanicima - satelitima. Pogonski centralni zupčanik drugog planetarnog seta izložen je znatno većim naponima u poređenju sa prvim planetarnim redom i pretrpeo je znatno veća površinska razaranja bokova. Debljina skinutog sloja materijala je relativno velika i iznosi 0,4 - 0,6 mm (slika 8). Proces se odvijao tako što je najpre nastupio piting koji je doveo do oštećenja (probijanja) cementiranog sloja materijala. Iza toga mekano jezgro zupca je bilo izloženo gnječenju i abraziji, a proces razaranja ubrzan. Posmatrano u pravcu širine i visine zupca, jasno su izražena mesta gde je nastupilo gnječenje bokova i mesta gde su odvojene čestice materijala ostvarile abraziju bokova. Oštećenja su veća u podnožju i na početku zupca (sl.8, poz.1) a blago opadaju prema temenu i kraju zupca (sl.8, poz.2). Pored habanja na bokovima pojedinih zubaca primećeni su ostaci pitinga gde je uočljivo odvajanje čestica materijala sa oblikom krtoq preloma i nastanak jamica na bokovima zubaca (sl.8, poz.3), kao posledica razbijanja otvrdnutog površinskog sloja materijala na bokovima. Sve to predstavlja progresivni piting tj. kombinaciju zamora, gnječenja i habanja, kako je već napred navedeno. U konkretnom slučaju proces se odvijao na sledeći način. Na boku zupca zupčanika, delom na kome su se već javile početne pukotine ili je došlo do izravnavanja neravnina, koje su posledica hrapavosti. Tokom rada, zbog velikih površinskih pritisaka, povećavaju se postojeće pukotine-jamice kao i broj novo nastalih. Usled čega se neprekidno smanjuje efektivna dodirna površina bokova. Intenzivno habanje sa plastičnim deformisanjem neravnina, nastaje zbog smanjenja kontaktne površine i porasta kontaktnih napona. Za dati nivo napona, na primer za napon  $\sigma_H$  na boku zupca, razaranje se ostvaruje pri broju sprezanja zubaca  $N$ . Ako se za stanje kritične pohabanosti usvoji debljina pohabanog sloja  $0,3m_n$  onda toj debljini odgovara verovatnoća koja teži jedinici. Nultoj debljini

pohabanog sloja odgovara verovatnoća koja teži nuli. Pošto je proces površinskog razaranja bokova zubaca dugotrajan i postepen to je i Vejbulova funkcija razvučena na velikom intervalu broja promena napona tj. broja sprezanja zubaca zupčanika. Za napon  $\sigma_H=1421 \text{ N/mm}^2$ , parametri Vejbulove raspodele su  $\eta=2,5 \cdot 10^8$  i  $\beta=1,5$ , tj. funkcija Vejbulove

raspodele je:  $P_R = 1 - e^{-\left(\frac{N}{2,5 \cdot 10^8}\right)^{1,5}}$  Za utvrđeni broj

sprezanja zubaca  $n_s=39,9 \times 10^6=N$  verovatnoća razaranja  $P_R(N)=0,0617$  što odgovara utvrđenoj debljini pohabanog sloja od 0,2 mm tj.  $0,06m_n$ . Za centralni zupčanik drugog planetarnog seta  $\sigma_H=2412 \text{ N/mm}^2$ , procenjeni parametri Vejbulove raspodele su  $\eta=10^7$  i  $\beta=2$  tj.

$$P_R = 1 - e^{-\left(\frac{N}{10^7}\right)^2}$$

Za izračunati broj sprezanja zubaca  $n_s=5,69 \times 10^6=N$ , verovatnoća razaranja  $P_R(N)=0,276$  što odgovara utvrđenoj debljini pohabanog sloja od 0,6 mm tj.  $0,15m_n$ . Funkcije su nacrtane na nivoima napona koji odgovaraju naponima na bokovima zubaca pri ispitivanju. Tako su dobijene prave linije koje odgovaraju verovatnoćama razaranja  $P_R=0,1$  i  $P_R=0,9$ , kao i linija sa verovatnoćom 0,5.[4] Područje rasipanja verovatnoće razaranja je dobijeno na osnovu ispitivanja za dva nivoa napona i može se koristiti za određivanje verovatnoće razaranja za bilo koju veličinu napona koja nastane u eksploataciji, a na ovaj način rezultati se transformišu u radne uslove.[4]

## 5. ZAKLJUČAK

U radu su određene verovatnoće razaranja. Koje se mogu predstaviti funkcijom Vejbulove raspodele, a mogu da posluže za definisanje modela pouzdanosti i odrede elementarne pouzdanosti centralnih zupčanika planetarnih prenosnika. Poklapanje rezultata sa eksperimentalnim ispitivanjem je bilo dobro.

## 6. LITERTURA

- [1] Ognjanović M.: Progressive gear teeth wear and failure probability modeling, - Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Tribology BALKANTRIB'05, Kragujevac 2005, pp 403-409
- [2] Ognjanovic M, Živkovic P., Rosić B., :Razvoj metodologije ubrzanog ispitivanja planetarnih prenosnika, IV Međunarodno naučno – stručni skup, Izvor i prenos snage IPS'97, Podgorica – Bečići, 1997,pp 383-390
- [3] Ognjanović M.:Konstruisane mašina, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd,2000.
- [4] P. Živković, : Istraživanje gubitaka energije i razaranja delova planetarnih prenosnika snage, doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 2006.
- [5] Živković P., Ognjanović M.: Specifičnost pristupa u određivanju pouzdanosti planetarnog prenosnika, Zbornik radova sa naučno stručnog skupa – istraživanje i razvoj mašinskih elemenata i sistema, Srpsko Sarajevo – Jahorina 19. i 20. Septembar 2002. pp619-624.

**Autori: dr Predrag Živković, docent, Prof. dr Slobodan Makragić, vanr.prof.** Univerzitet u Prištini, Fakultet tehničkih nauka, Kneza Miloša 7. 38220 Kosovska Mitrovica, Srbija, Tel.: +381 28 425-320, Fax: +381 28 425-325.  
E-mail: [jomine@sbb.co.yu](mailto:jomine@sbb.co.yu)  
[makragic@nadlanu.com](mailto:makragic@nadlanu.com)



Stanković, B., Milosavljević, P., Randelović, S.

## PRILOG UNAPREĐENJA PROCESA ODRŽAVANJA PRIMENOM METODE TPM U INDUSTRIJSKOJ ENERGANI

**Rezime:** *Potrošnja komprimovanog vazduha stalno raste u industrijskim procesima i već je postala imperativ u svim granama industrije. Sa sigurnošću se može tvrditi da je prodor komprimovanog vazduha doveo do višestrukog povećanja produktivnosti rada u najrazličitijim granama industrije.*

*Snabdevanje "NISSAL"-a A.D. komprimovanim vazduhom za potrebe procesa proizvodnje vrši se iz industrijske energane koja se nalazi u krugu fabrike. S obzirom na velike troškove vezane za energiju i fluide koji se u značajnoj meri koriste u proizvodnim procesima i u krajnoj liniji nepovoljno se odražavaju na proizvodnu cenu gotovog proizvoda, uvedene su savremene metode održavanja celokupnog sistema za proizvodnju, distribuciju i potrošnju komprimovanog vazduha radi uštede u potrošnji.*

*Totalno produktivno održavanje (TPM) je jednostavnija i fleksibilnija metoda, koja traži znatno manja ulaganja u implementaciju. Zasnovana je na iskustvu radnika koji rade sa određenim tehničkim sistemom, kao što su rukovaoci, kontrolori, planeri i rukovodioci. TPM metodom održavanja postrojenja i instalacija, neutrališu se gubici a krajnji cilj je precizno kontrolisana proizvodnja i potrošnja komprimovanog vazduha u proizvodnim procesima koji su vezani cenu gotovog proizvoda.*

**Cljučne reči:** *komprimovani vazduh, kompresori, održavanje, ušteda*

### ATTACHMENT PROCESS IMPROVEMENT MAINTENANCE WITH TPM APPLICATION IN INDUSTRIAL ENERGY STATION

**Abstract:** *Compressed air consumption is constantly increasing in the process and already has become imperative in all branches of the industry. With certainty can be claimed that the penetration of compressed air led to multiple increase in productivity in the various branches of the industry.*

*Supply the company "NISSAL" with compressed air production is done from energy station which is located in the factory. Given the high costs of energy and fluids that are in significant measure used in the production processes in line final production cost of the finished product, there are modern methods of maintaining entire system of production, distribution and consumption compressed air for savings in air consumption.*

*Total productive maintenance (TPM) is a simpler and more flexible method that requires significantly less investment in the implementation. Is based on the experience of workers who work with specific technical system, such as operators, controllers, planners and executives. TPM method of maintenance work and installation, neutralization of the losses and the ultimate goal is to precisely controlled production and consumption compressed air in the production processes that are related for final cost products.*

**Key words:** *compressed air, compressors, maintenance, savings*

#### 1. UVOD

Održavanje tehničkih sistema, između mnogobrojnih aktivnosti, koje prate neposrednu proizvodnju i pružanje usluga, sa vremenom dobija sve više na značaju, i to ne samo zbog činjenice da se odnosi na sve proizvodne sisteme, već i zbog toga što je danas prisutno u svakodnevnom životu prilikom zadovoljavanja svih ljudskih potreba. Razvoj nauke i tehnologije u današnje vreme omogućava primenu najsavremenijih sredstava za prenos ljudi i informacija do najudaljenijih mesta, za šta se koriste tehnički sistemi, koje je potrebno održavati u ispravnom stanju. Znanje postaje najznačajnija i najskuplja roba na tržištu, za čiju se praktičnu primenu i plasiranje koriste takođe tehnički sistemi, koji se moraju održavati.

Održavanje ne treba smatrati troškom već investicijom u cilju unapređenja proizvodnje. Ulaganje u održavanje, kao jednu od osnovnih funkcija preduzeća, uzvraća poboljšanim kvalitetom, bezbednošću, pouzdanošću i fleksibilnošću u ciklusnim vremenima. U poslednje vreme sve je prisutnija činjenica da u proizvodnji svetske klase (**World Class**

**Manufacturing-WCM**), održavanje nije odvojena, izolovana funkcija, koja se koristi za opravlanje i obavljanje određenih, potrebnih aktivnosti. Održavanje je ravnopravni partner koji sa svim ostalim funkcijama teži da dostigne strateške ciljeve jednog preduzeća.

**Privatna preduzeća** imaju veoma važnu ulogu u privredi i ekonomiji svake zemlje, jer od njihovog neometanog funkcionisanja zavisi zadovoljenje vitalnih potreba stanovništva. Njihovi tehnički sistemi imaju strogo definisane zadatke, koje se moraju ostvariti po određenim kriterijumima.

Zbog toga je blagovremeno, efektivno i efikasno obavljanje procesa održavanja ključno za uspešno poslovanje privatnih kompanija. Korisnici njihovih proizvoda i usluga imaju veoma visoke zahteve u pogledu zadovoljenja svojih potreba, pa se visoka raspoloživost, pouzdanost i optimalno stanje tehničkih sistema mogu postići samo interakcijom ljudi koji ih neposredno opslužuju i samih tehničkih sistema.

Nedostatak adekvatnog koncepta i kvalitetnog pristupa održavanju tehničkih sistema kod privatnih preduzeća može dovesti do:

1. Uvećanih troškova poslovanja;

2. Niske pouzdanosti tehničkih sistema;
3. Smanjenja eksploatacionih svojstava opreme;
4. Neispunjavanja planova rada;
5. Smanjenja planiranog prihoda;
6. Nezadovoljstva korisnika usluga;
7. Stvaranja lošeg poslovnog okruženja, itd.

Veliki privredni sistemi sa proizvodnim objektima, opremom i instalacijama spadaju u red velikih tehničkih sistema (npr. "NISSAL"-Niš, i sl.), čijem se održavanju mora posvetiti značajna pažnja, kako bi se ostvarila puna efikasnost tehničkih sistema. Nepredvidivi, iznenadni otkazi na delovima sistema mogu prouzrokovati otkaz čitavog sistema,

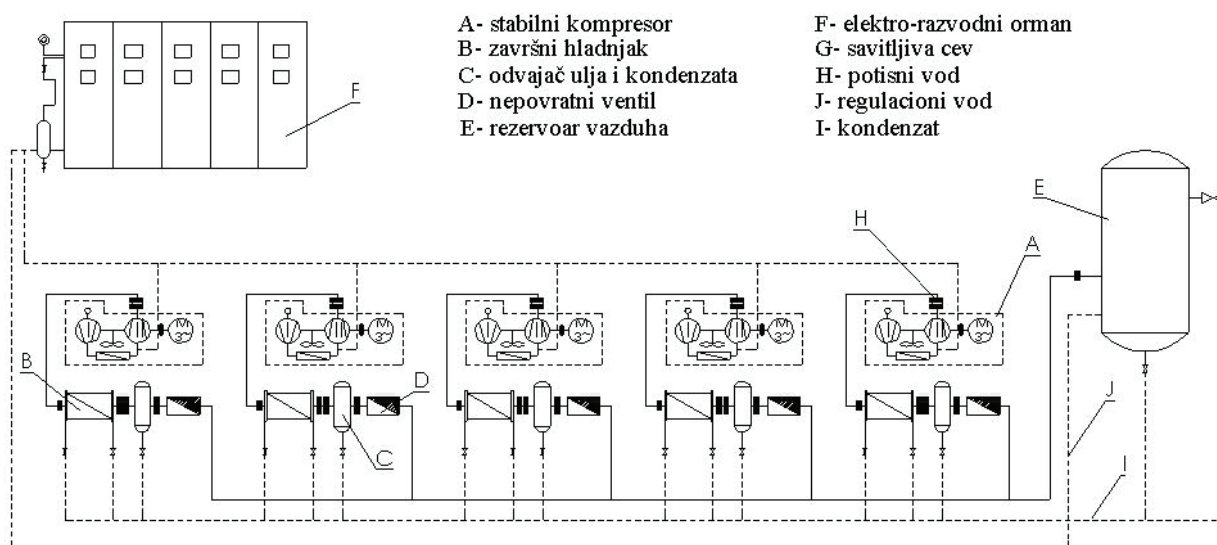
čime se ne samo povećavaju troškovi održavanja, već i troškovi proizvodnje i ukupnog poslovanja preduzeća [1].

## 2. ELEMENTI KOMPRESORSKE STANICE

Svaka kompresorska stanica, u principu, poseduje sledeće elemente: kompresorski agregat, vazdušni filter, krajnji hladnjak, grubi i fini odvajač kondenzata, nepovratni ventil, rezervoar za vazduh, razdelnik vazduha, sušač vazduha, formacione mehaničke i automatske elemente, magistralne vodove sa armaturom i elektro-razvodni orman. Na slici 1 prikazana je šema povezivanja u kompresorskoj stanici.

### ŠEMA POVEZIVANJA

#### LEGENDA:



Slika 1: Šema povezivanja u kompresorskoj stanici

Za potrebe preduzeća napravljena je nova kompresorska stanica kapaciteta 66 m<sup>3</sup>/min i normalnog radnog pritiska od 7 bara, koja treba da zadovolji potrebe proizvodnje u četiri pogona. Kompresorska stanica je smeštena u objektu

Energana i projektovana je za rad sa pet klipnih kompresora čije su osnovne karakteristike prikazane u tabeli 1.

Oznaka kompresora	Tip	Kapacitet (n.m <sup>3</sup> /min)	Snaga elektromotora KW
EKZ 12	KDK- 12	12	90
2 x TV 4	KDK -16	16	90
2 x TV2	KDK- 11	11	75

Tabela 1: Osnovne karakteristike kompresora

### 2.1 Tehnički opis energane

U kompresorsku stanicu je ugrađen vertikalni rezervoar zapremine V= 15 m<sup>3</sup>, na slobodnom prostoru pored zgrade u kojoj su smešteni kompresori. Posle solo kompresora postavljeni su naknadni završni hladnjaci (hlađeni vazduhom i vodom) sa odgovarajućim odvajačima kondenzata. Kompresori sa pratećom opremom, sem rezervoara, su smešteni u posebnu prostoriju u okviru građevinskog objekta Energana, dimezija 20m x 4,5m i visine 3,5m. Na svim vratima na donjem delu su ugrađene usisne rešetke (4 kom.) za ulaz svežeg vazduha, a na jednim vratima ugrađeni su izduvna rešetka 1 (kom.) i aksijalni ventilator 1 (kom.) za

odvod toplog vazduha. Na spoljnim bočnim zidovima su ugrađene izduvne rešetke i odgovarajući kanal za odvod toplog vazduha. Oprema i cevovodi u kompresorskoj stanici su smešteni tako da je omogućen dobar pristup i mogoćnost opsluživanja. Za kompresorsku stanicu obezbedene su sve potrebne mere zaštite osoblja, opreme i objekta u skladu sa važećim propisima i tehničkim normativima [3].

### 2.2 Princip rada kompresorske stanice

Kompresorski agregat usisava atmosferski vazduh kroz usisni vod na čijem se ulazu nalazi filter za vazduh koji služi da zadrži krupne čestice mehaničkih nečistoća. Usisni vazduh se komprimuje u prvom stepenu kompresora na pritisak do 3

bara, i tako sabijen i zagrejan na temperaturi od približno 160°C vodi se u među hladnjak gde se ohladi na 40÷50°C, a zatim se ponovo komprimuje u drugom stepenu kompresora na pritisak do 10 bara, tako da je sabijeni vazduh na kraju drugog stepena sabijanja opet zagrejan na temperaturi od 160°C. Ovako komprimovani zagrejeni vazduh odvodi se u završni hladnjak gde se vrši hlađenje vazduha na temperaturi od 40÷45°C. Hlađenjem komprimovanog vazduha u završnom hladnjaku vrši se snižavanje temperature vazduha ispod tačke rose i iz vazduha se počinje odvajati vodeni kondenzat. Iza odvajача kondezata postavlja se nepovratni ventil čija je uloga da ne dozvoli povratni tok vazduha u kompresorski agregat. Posle nepovratnog ventila, vazduh se odvodi u rezervoar za komprimovani vazduh. Rezervoar za vazduh služi za umirenje pulzirajuće struje vazduha i smanjenje kolebanja pritiska u cevovodu, što je posledica neravnomernog toka vazduha iz kompresora, jer kompresor isporučuje komprimovani vazduh u taktovima. Da bi se izvršila distribucija komprimovanog vazduha do potrošača, obično se u potisnom vodu posle rezervoara postavlja razdelnik vazduha, odakle se za svaku grupu potrošača ili za pojedine pogone vrši odvođenje vazduha. Na svakoj magistralnoj cevi mogu se ugraditi posebni merači protoka vazduha, tako da se za svaki pogon registruje dnevna, nedeljna, mesečna ili godišnja potrošnja vazduha. Obzirom da neki potrošači zahtevaju potpuno čist vazduh bez vlage i ulja, to se ispred istih postavlja fini odvajачи kondenzata kao i sušači vazduha [3].

### 2.3 Komandovanje kompresorskom stanicom

Za komandovanje kompresorskom stanicom potrebna je cela mreža formacionih i kontrolnih elemenata, mehaničkog i automatskog dejstva za registraciju sledećih parametara: temperature i pritiska vazduha, temperature i protoka vode, pritiska ulja, daljinskog i automatskog puštanja, zaustavljanje kompresorskih agregata i njihovo rasterećenje, automatska regulacija proizvodnje vazduha, i sl. Sve te komande se objedinjuju preko jednog elektro-razvodnog ormara, tako da rukovaoac putem komandno- kontrolnog puta vrši automatsku kontrolu i upravljanje kompresorskom stanicom.

### 2.4 Zaštitna automatika

Elementi zaštitne automatike postavljeni su tako da omogućuju zaštitu kompresora od eventualnih nepravilnosti u radu. Automatsko isključivanje agregata vrši se u sledećim slučajevima:

1. Kada je pritisak ulja za podmazivanje kompresora mali;
2. Kada temperatura izlaznog vazduha iz kompresora posle drugog stepena sabijanja prelazi dozvoljenu granicu od 170°C;
3. Kada temperatura vazduha posle prvog stepena sabijanja prelazi dozvoljenu granicu od 170°C;
4. Kada temperatura izlaznog vazduha iz među hladnjaka prelazi 50°C.

Elementi koji omogućuju isključenje kompresora u slučaju pada pritiska ulja je presostat koji ispred sebe u električnom kolu ima jedan vremenski relej čija se uloga sastoji u omogućavanju puštanja kompresora u rad dok se ne postigne dovoljan pritisak ulja u instalaciji. Za zaštitu kompresora od visokih temperatura služe termostati postavljeni na kraju prvog i drugog stepena sabijanja kao i na kraju hlađenja iz prvog stepena sabijanja.

### 2.5 Radna automatika

Automatska regulacija kapaciteta kompresorske stanice u zavisnosti od potrošnje vazduha ima dvostruku ulogu:

1. Da usklađuje isporuku vazduha sa potrošnjom pri čemu se u relativnom stacionarnom režimu potrošnje vazduha regulacija obavlja na principu sve ili ništa ; i

2. Da omogućava uštedu u energiji i trošenju kompresora pri većim zastojima potrošnje vazduha, preko automatskog isključivanja kompresora- zaustavljanje motora.

### 2.6 Fino prečišćavanje i sušenje vazduha

Obzirom, na sve veću potrošnju komprimovanog vazduha u svim oblastima industrije, zahtevi za suvim i prerađenim vazduhom su sve izraženiji. Iako svaka savremena kompresorska stanica raspolaže sa svim neophodnim elementima za hlađenje i odvajanje kondenzata ulja i vode, ipak komprimovani vazduh u sebi sadrži izvesne ostatke ovih elemenata u vidu uljnih i vodenih para, kao i mehaničkih nečistoća od korozije u cevima i armaturi.

## 3. RADNI DEO

Upravljanje u snabdevanje shodno potrebama pogonskih celina, planiranje, analiza potrošnje, održavanje instalacija i sprovođenje mera racionalizacije u potrošnji, su aktivnosti koje u okviru "NISSAL" A.D. obavlja R. J. "Održavanje". U cilju racionalizacije potrošnje u R.J. "Održavanje" kontinuirano se sprovode niz aktivnosti koje se odnose na sledeće glavne mere:

1. Detaljni pregledi instalacija komprimovanog vazduha: magistralnih, primarnih i sekundarnih vodova, opreme i postrojenja, kako bi se izvršila sanacija eventualnih oštećenja, obezbedilo bolje zaptivanje i smanjila potrošnja koja nije u funkciji proizvodnje;
2. Realizacija rekonstrukcija instalacija u cilju nezavisnog snabdevanja proizvodnih linija ili grupa potrošača kako bi se omogućilo isključivanje onih koji nisu angažovani u procesu proizvodnje u slučaju smanjenog obima posla;

U slučaju besprekornog stanja postrojenja, pri postizanju projektovanog izlaznog pritiska, obzirom na potpuno automatizovan proces, na vrednost specifične potrošnje električne energije uticao bi jedino stepen iskorišćenja kompresora, tj. zahtevi potrošača i odgovarajuće kapacitivne proizvodne mogućnosti maksimalnog iskorišćenja proizvodnog kapaciteta. Savremena kompresorska postrojenja sa vijčanim kompresorima i PLC kontrolerima imaju znatno manji normativ potrošnje električne energije po proizvedenom n.m<sup>3</sup> (0,11–0,13 kWh/n.m<sup>3</sup>), koji zahvaljujući kompjuterskom upravljanju u frekventnoj regulaciji rada elektromotora, utiču pozitivno na povećani obim proizvodnje komprimovanog vazduha.

## 4. PREDLOG MERA ZA POBOLJŠANJE PROCESA ODRŽAVANJA

Na osnovu činjenica, kao i neposrednim ličnim uvidom u nabrojane aktivnosti održavanja, a u skladu sa navedenim modelom održavanja, mogu se predložiti sledeće mere za poboljšanje sistema održavanja u Energani firme "NISSAL" A.D. Niš:

1. Dodatno izvršiti obuku osoblja za izvođenje rutinskih operacija čišćenja, podmazivanja, provere ispravnosti i funkcionalnosti, otkrivanje i otklanjanje slabih mesta i praćenja parametara procesa (merenje protoka, temperature, pritiska, itd.);
2. Kontinualno upoznavati i obučavati rukovaoce i održavaoce postrojenja sa novim tehnologijama i tehničkim sredstvima, uređajima i opremom koja se pri tom primenjuje, kako bi u svakom trenutku bili sposobni i spremni da obavljaju zadatke održavanja koji su im povereni;
3. Insistirati na striktnoj primeni definisanih standarda održavanja i radnih uputstava, procedura i preporuka, kako bi definisano vreme za izvođenje aktivnosti



- održavanja bilo u potpunosti ispoštovano i kako ne bi došlo do nepotrebnog gubljenja vremena na neproduktivan rad;
4. Omogućiti zajednički rad timova održavaoca i opslužioca postrojenja, čime se ostvaruje ne samo razmena međusobnih iskustva vezanih za odgovarajuće postrojenje, već se aktivnosti održavanja obavljaju brže, kvalitetnije i jeftinije, uz angažovanje manjeg broja izvršioaca;
  5. Koristiti savremene metode za dijagnostiku procesa i postrojenja, kao npr. Monitoring i ocenu stanja svih uređaja i postrojenja sa stanovišta vibracionih karakteristika, ili merenjem karakterističnih parametara (broja obrtaja, pritiska, protoka, snage, vremena);
  6. Sprovoditi konstantne inspekcije i preglede postrojenja tokom čitavog perioda funkcionisanja, sa ciljem otkrivanja mogućih uzroka smanjenja ili potpunog gubitka radne sposobnosti postrojenja i otklanjanje odstupanja od standardnih vrednosti, a u smislu održavanja njegove pouzdanosti i raspoloživosti za neometano funkcionisanje;
  7. Formirati knjigu postrojenja, kao svojevrsnu ličnu kartu sa biografijom postrojenja, u koju treba uneti podatke dobijene od proizvođača, sve intervencije održavanja koje su preduzete, delove koji su zamenjeni, datume i izvršioce, rezultate merenja, kao i komentare održavaoca koji proizilaze iz njihovog znanja i iskustva u održavanju odgovarajućeg postrojenja;
  8. Stvoriti odgovarajuće okruženje radne sredine, koje će stimulatino delovati na zaposlene, ukloniti sve potencijalne izvore psihofizičkih smetnji kod zaposlenih, stvoriti klimu međusobnog poverenja kod svih učesnika u procesu i stimulisati trud i zalaganje pojedinaca putem nagrađivanja, čime se stvara takmičarski duh i motiviše osoblje [1].

## 5. ZAKLJUČAK

Snabdevanje sva četiri pogona komprimovanim vazduhom u "NISSAL" A. D. koja rade konstantno u dve smene (po potrebi uključuje se vrlo često i treća smena), proizvedenim u sopstvenim Energani, podrazumevalo je niz aktivnosti koje su projektovane i realizovane od strane radnika u R.J. "Održavanje".

Može se pretpostaviti da će za razvoj održavanja u narednom periodu biti karakteristično sledeće:

1. Troškovi održavanja moraju se svesti na minimum na nivou direktnih troškova (troškovi materijala i rezervnih delova i rad na održavanju);
2. Funkcionisanje tehničkih sistema bez otkaza i zastoja;
3. Kvalitet rada tehničkih sistema (opreme) bez greške/škarta proizvoda/procesa;

4. Zalihe materijala i rezervnih delova za održavanje bliske nuli, jer će poručene zalihe biti odmah ugrađene;
5. Zaposleni u održavanju obučeni do perfekcije, da nema poslova dorade;
6. Reinženjering održavanja u procesima, tehnologiji, kadrovima, menadžmentu u cilju eliminisanja gubitaka, skraćanja srednjeg vremena u otkazu i produžavanje srednjeg vremena između intervencija održavanja (povišenje nivoa gotovosti i pouzdanosti);
7. Produžavanje ekonomičnog životnog ciklusa (sniženje troškova eksploatacije opreme);
8. Unapređenje kvaliteta aktivnosti, odnosno procesa održavanja (eliminisanjem reklamacija na održavanje, dorade, i sl.);
9. Razmatranje problema i posledica održavanja kroz faze: istraživanja i razvoja, nabavke, proizvodnje, kontrole i ispitivanja, prodaje i otpreme, ugradnje i puštanja u pogon, održavanja i tehničke pomoći, otpisa i povlačenja iz upotrebe [1].

Realizacija ovih mera donela bi dodatne uštede u potrošnji. S obzirom na cenu KWh električne energije, cenu jednog n.m<sup>3</sup> komprimovanog vazduha "NISSAL" A.D., probleme vezane za usputne gubitke u transportu i distribuciji, kao i za kvalitet isporučenog komprimovanog vazduha, za četiri fabrička pogona, postoji potreba da se primeni TPM metoda za održavanje Energane za proizvodnju komprimovanog vazduha.

## 6. LITERATURA

- [1] Milosavljević, P.: Održavanje tehničkih sistema po konceptu TPM i Six Sigma, monografija, Biblioteka Dissertatio, Zadužbina Andrejević, Beograd, 2007.
- [2] Milosavljević, P., Primena modela održavanja zasnovanog na konceptu TPM u JKP "Gradska toplana"-Niš, Zbornik radova sa XXVII majskog skupa održavalaca Srbije i Crne Gore, Vrnjačka Banja, 2004.
- [3] Interna dokumentacija pogona održavanja, R.J. "Održavanje"- "NISSAL" A.D., Niš, 2008.
- [4] Servisno uputstvo za upravljanje i održavanje kompresora Trudbenik, Doboje.
- [5] Adamović, Ž., Upravljanje održavanjem tehničkih sistema, OMO, Beograd, 1986.
- [6] Adamović, Ž., Tehnička dijagnostika u mašinstvu, Drugo dopunjeno izdanje, Privredni pregled, Beograd, 1991.

**Autori:** Bojan Stanković, dipl. maš. inž., doc. dr Peđa Milosavljević, doc. dr saša Randelović, Mašinski fakultet u Nišu, CIM TTC Laboratorija, Aleksandra Medvedeva 14, 18000 Niš.

E-mail: [bsk@medianis.net](mailto:bsk@medianis.net)

Đuričić, R.M., Aćimović-Pavlović Z., Milutinović, I., Nenadić M.,

## NEUTRALISANJE I SAGOREVANJE OPASNOG MEDICINSKOG OTPADA- ZNAČAJNA ŠANSA ODRŽIVOG RAZVOJA

**Rezime:** Održivi razvoj je želja i cilj. Život i zdravlje ljudi su preduslov za realizaciju sveukupnog razvoja. Sa tog razloga sve vrste zagađujućih materija se moraju posebno razmatrati. Naša želja je da damo doprinos uništavanju medicinskog otpada. Opasni medicinski otpad predstavlja veliku opasnost po životnu sredinu i sav živi svet. Pravilno sakupljanje, sortiranje, čuvanje i njegovo uništavanje je želja i cilj svake države koja razmišlja o svom opstanku i razvoju. U Srbiji se godišnje proizvede oko 70.000 tona medicinskog otpada, od kojih je 9600 tona opasni jer može da bude prenosilac različitih virusa i zaraza. U svetu je razvijeno više tehnologija za tretman opasnog otpada. Mi smo razvili originalni ekonomičnu i efikasnu tehnologiju i postrojenje prilagođeno potrebama zdravstvenih organizacija u kojima nastaje opasni medicinski otpad u količinama do 100 kg/dnevno.

**Ključne reči:** medicinski otpad, opasni medicinski otpad, sagorevanje, postrojenje, održivi razvoj

## NEUTRALIZATION AND INCINERATION OF HAZARDOUS MEDICAL WASTE- IMPORTANT CHANCE OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

**Abstract:** Sustainable development is wish and aim. Life and health of people are prerequisite for realization of whole development. Because of that all kind of pollution matters have to be separately examine. Our wish is to give contribution of destruction of medical waste. Hazardous medical waste represents a big risk for the environment and for all the beings. Proper collection, keeping and destruction of the waste is the wish and the objective of each state thinking about its survival and development. In Serbia, about 70,000 tones of medical waste are produced annually, out of which 9,600 tones are hazardous, because these may be the carriers of various viruses and infections. A number of the hazardous waste treatment technologies has been developed worldwide. We developed an original, economical and efficient technology as well as a plant adjusted to the requirements of health care organizations, which can produce medical waste in quantity of up to 100 kg per day.

**Key words:** medical waste, hazardous medical waste, incineration, plant, sustainable development

### UVOD

Otpad i upravljanje otpadom zaokupljaju pažnju čitavog sveta. Urbanizacija i industrijalizacija su glavni uzrok nastajanja problema otpada. Posebnu pažnju zaslužuje tzv. čvrsti otpad koji može biti:

- fermentabilni (organski: otpaci hrane, uginule životinje i sl.), koji se brzo raspadaju, i
- inertni (organski i neorganski: keramika, staklo, plastika i dr.), koji se razlažu veoma sporo.

Čvrsti otpad često se klasifikuje i u sledeće vrste:

- otpad od hrane (iz domaćinstva, restorana, pijaca,...),
- pepeo (iz domaćinstva, od spaljivanja smeća...),
- smeće u užem smislu (hartija, drvo, baštensko smeće, tekstil, guma, plastika, metalne konzerve, staklo, keramika...),
- vozila (odbačena putnička i teretna vozila i dr.),
- industrijski otpad (od prerade hrane, pepeo kotlovnih ložišta, otpad hemijske industrije, rudarstva, metalurgije...),
- otpad građevinskog materijala (šut, cigla, crep,...),
- specijalni otpadni materijali (medicinski otpadni materijali<sup>1</sup>, eksplozivi, radioaktivni otpad...),
- otpad od obrade otpadnih voda (čvrsti materijal sa rešetki, mulj i sl.).

Posebna pažnja, danas, se posvećuje odlaganju bolničkog i medicinskog otpada (dalje: MO), jer ga civilizacija proizvodi

sve više. Naučno-tehnološki napredak i razvoj ekološke svesti učinili su da borba protiv medicinskog otpada postane uspešnija. Cilj te borbe je da se medicinski otpad: 1. izbegne (smanji), 2. iskoristi (reciklira), i 3. obradi i na kraju odloži na način siguran po okolinu.

Na osnovu karakteristika koje poseduje medicinski otpad se kategoriše u pet grupa (sl.1.)

KATEGORIZACIJA MEDICINSKOG OTPADA	
<b>GRUPA A:</b> Medicinski otpad – bez rizika	$A_1$ – otpad za recikliranje
	$A_2$ – biorazgradiv otpad
	$A_3$ – drugi otpad bez rizika
<b>GRUPA B:</b> Medicinski otpad nastao specifičnim aktivnostima	$B_1$ – human anatomski otpad
	$B_2$ – upotrebljeni oštri instrumenti
	$B_3$ – farmaceutski otpad
	$B_{31}$ – farmaceutski otpad bez rizika
	$B_{32}$ – potencijalno opasni farmaceutski otpad
$B_{33}$ – opasni farmaceutski otpad	
$B_4$ – citotoksični farmaceutski otpad	
$B_5$ – krv, krvni derivati i telesne izlučevine	
<b>GRUPA C:</b> Infektivni i visoko infektivni otpad	$C_1$ – infektivni otpad
	$C_2$ – visoko infektivni otpad
<b>GRUPA D:</b> Drugi opasan otpad	
<b>GRUPA E:</b> Radioaktivni otpad	

Sl.1. Kategorizacija medicinskog otpada

Kvalitet življenja vrlo zavisi i od kvaliteta životne sredine,

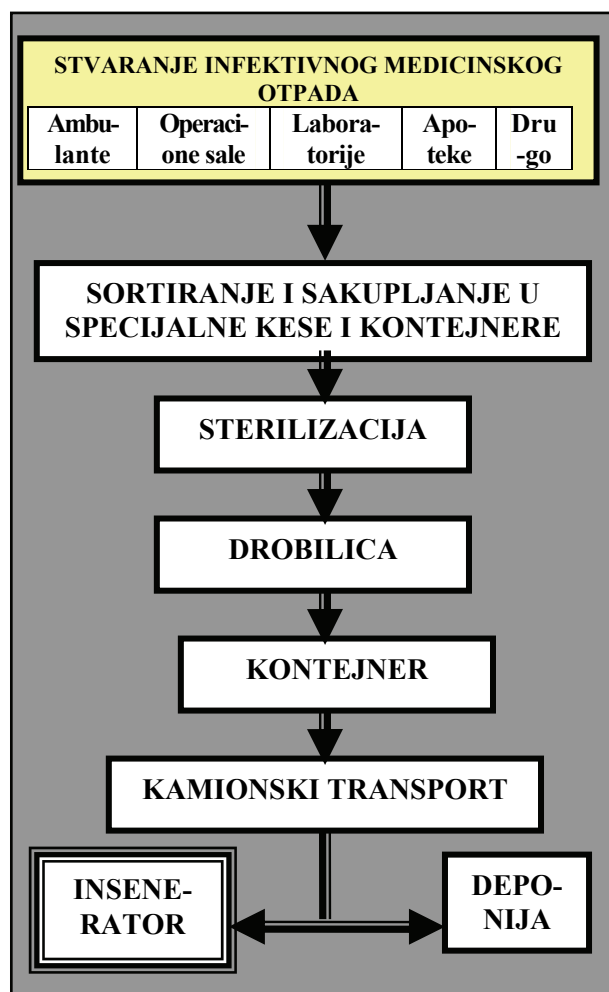
<sup>1</sup> Medicinski otpad se definiše kao heterogena mešavina klasičnog smeća, infektivnog, patološkog, radioaktivnog, farmaceutskog i laboratorijskog otpada, kao i dezinficijensa i ambalaže.

Ukupna godišnja količina medicinskog otpada u Srbiji, procenjuje se na 70.000 tona, odnosno 1,8 kilograma po krevetu medicinskog otpada dnevno, od čega 9 600 tona predstavlja opasan otpad.

koji najviše zavisi od samih građana i njihovog odnosa prema otpadu, ali i od mera vlade, komunalnih preduzeća, poslovnih sistema i dr. Razvoj kulture menadžmenta otpadom je osnova kreiranja održivog razvoja društva. Kvalitetna životna sredina je osnova za zdrav život čoveka i ostalih živih vrsta.

## 1. MENADŽMENT OPASNIM MO

Otpad iz stacionarnih, ambulatno – polikliničkih i specijalističko – konsultativnih i nastavnih ustanova čini najveći deo MO. U razvijenom svetu razvijene su standardizovane metode postupanja sa opasnim MO (sl.2). Poslednjih godina i kod nas počela je da se vrši selekcija i separacija medicinskog i nemedicinskog otpada. Primeri za to su Beograd, Novi Sad, Valjevo i dr. u kojima se sa medicinskim otpadom postupa po evropskim standardima. U najvećem broju zdravstvenih organizacija čvrsti otpad se, najčešće, skuplja u crne plastične vreće za otpad i iznosi u kontejnere komunalnih preduzeća, koji su često otvoreni i dostupni insektima, glodarima, mačkama, psima lualicama, kao i licima koja dolaze u kontakt sa sadržajem kontejnera u cilju skupljanja sekundarnih sirovina. Sadržaj kontejnera se odlaže na sanitarne deponije. Većina zdravstvenih organizacija svoj tečni otpad ispušta se u gradsku kanalizaciju, a iz nje u recipijent. Ugrađen sistem prečišćavanja otpadnih voda, a posebno sistem za hemijsku i radiološku dekontaminaciju tečnih otpadnih materija teško je naći u Srbiji.



Sl.2. Prikaz jedne standardizovane metode postupanja sa opasnim medicinskim otpadom

ambulanti odlaže, u većini slučajeva, na lokalne divlje deponije koje mogu predstavljati visok epidemiološki rizik po lokalno stanovništvo. Tečni MO iz ovih ustanova se bez ikakvog predtretmana najčešće upušta u recipijent – lokalni potok ili reku. Tako se vrši stalna kontaminacija vode i zemljišta.

Zbog visokog higijensko – epidemiološkog rizika MO iz grupe B, C, D i E prema stavovima Svetske zdravstvene organizacije, mora se odvojiti od drugog otpada (ambalaža, ostaci hrane i dr.) i upakovati u posebne vreće sa vidnom oznakom da se radi o MO. Vreće moraju biti propisno zatvorene kako ne bi došlo do curenja i prosipanja sadržaja. Tako pripremljene vreće se odlažu u propisno obeležene kontejnere za MO, koji se dobro-hermetički zatvaraju.

Infektivni i potencijalno infektivni otpad treba podvrći predtretmanu tj. dezinfikovati ga u sopstvenoj ustanovi pre transporta na deponiju. Na taj način obezbeđuje se njegov bezbedan transport do mesta za evakuaciju, odnosno do konačnog odlaganja.

Radiotivni otpad se mora čuvati do vremena poluraspada, u samoj zdravstvenoj ustanovi, primenjujući odgovarajuću dekontaminaciju u zavisnosti od samog radionuklida.

Hemijsko – toksičan otpad ( eksplozivni i korozivni ) takođe se mora tretirati u samoj zdravstvenoj ustanovi pre konačne dispozicije.

Na slici 3. su date mogućnosti tretiranja medicinskog otpada.

Vrsta otpada	Način pripreme za odlaganje	Način odlaganja
PATO-LOŠKI OTPAD	→ Predobrada	→ Deponija komunalnog otpada
	→ Bez predobrade	→ Spaljivanje
INFEKTIVNI OTPAD	→ Predobrada	→ Deponija komunalnog otpada
	→ Bez predobrade	→ Spaljivanje
OŠTRI PREDMETI	→ Predobrada	→ Recikliranje
	→ Bez predobrade	→ Spaljivanje
FARMA-CEUTSKI OTPAD	→ Predobrada	→ Deponija komunalnog otpada
	→ Bez predobrade	→ Spaljivanje
HEMIJSKI OTPAD	→	Fizikalno-hemijska obrada
AEROSOLI I SUDOVI POD PRITISKOM	→	Deponija komunalnog otpada
RADIOAKTIVNI OTPAD	→	Posebni propisi

Sl.3. Prikaz mogućnosti tretiranja medicinskog otpada

## 2. IZBOR METODA ZA DEPONOVANJE MO

Za deponovanje MO koriste se dve mogućnosti:

Seoska područja su posebno ugrožena jer se čvrsti MO bez ikakvog predtretmana iz lokalnih zdravstvenih stanica i

### 1) Lokalno odstranjivanje medicinskog otpada, i

### 2) Centralni način – spaljivanje otpada

Glavne karakteristike pojedinih načina dispozicije MO prikazane su na sl.4. U tom pravcu su doneti i odgovarajući propisi koji definišu sledeće:

- ❖ Karakteristike otpada koji se spaljuje
- ❖ Specifičnu ambalažu i posude za odlaganje
- ❖ Količinu pepela i sadržaj gasova u emisiji
- ❖ Postupak sa pepelom i način konačnog odlaganja

### 3. UREĐAJI ZA SPALJIVANJE MO

Postoje različiti tipovi uređaja za spaljivanje MO pri čemu se koriste tečna ili gasovita goriva, a temperatura spaljivanja je od 800 - 1200 - 4000 °C. Postoje namenske peći za razne vrste i količine MO. U novije vreme se praktikuje i tkz. Mobilni spaljivači koji vrše svoju funkciju na licu mesta za potrebe manjih zdravstvenih organizacija.

Sam proces kontrolisanog spaljivanja infektivnog otpada podeljen je u nekoliko faza, odnosno odvija se u nekoliko koraka. Osnovni delovi procesa su: 1.Priprema otpada. 2.Punjenje ložišta, 3.Sagorevanje otpada, 4.Prečišćavanje otpadnih gasova, i 5.Prikupljanje i konačno odlaganje pepela

NAČINI ODSTRANJIVANJA MEDICINSKOG OTPADA	
<b>1. Lokalno odstranjivanje medicinskog otpada</b>	<b>2. Centralni način – spaljivanje otpada</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Preporuke SZO su da se infektivni i potencijalno infektivni otpad spaljuju na lokaciji koja je bliže mestu za konačno odlaganje otpada ili na gradskim deponijama gde se predviđaju posebna mesta samo za otpad iz zdravstvenih ustanova.</li><li>❖ Lokaciju treba odrediti u krugu zdravstvenih ustanova.</li><li>❖ Urbanističkim planom treba odrediti transportni put do uređaja za spaljivanje, kao i dalji tretman otpadnih gasova dobijenih spaljivanjem.</li><li>❖ Urbanističkim planom se određuje lokacija sabirnog mesta, način transporta od ustanova do sabirnog mesta i od sabirnog mesta do gradske deponije.</li><li>❖ Za kompleks zdravstvenih organizacija se preporučuje namensko vozilo sa zatvorenim karoserijom.</li><li>❖ Evakuacija i transport pripremljenog otpada se vrši po tačno utvrđenom redu uzimajući u obzir i prioritete.</li></ul>	<p>1.Svetska zdravstvena organizacija - SZO preporučuje spaljivanje otpada kao metod izbora jer:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>❖ Zapremina otpada se smanjuje 90%</li><li>❖ Uništavaju se patogeni organizmi</li><li>❖ Dobijena energija se može koristiti za zagrevanje prostorija, sanitarne vode i dr.</li><li>❖ Donosi uštedu (nema transportnih troškova )</li><li>❖ Smanjuje opasnost od nastanka infekcije</li></ul> <p>2. Potencijalne opasnosti se ogledaju u emisiji štetnih i opasnih gasova i neadekvatnom odlaganju pepela, koji može imati svojstva opasnog otpada.</p>

Sl.4. Prikaz načina odstranjivanja medicinskog otpada

Da bi se sprečila emisija mikroorganizama iz incineratora temperatura na kojoj se vrši sagorevanje otpada mora biti dovoljno visoka ( minimum 800<sup>0</sup>S ). Postoji nekoliko tipova incineratora ali se najčešće koriste oni sa ubacivanjem vazduha u ložište ili sa rotirajućom primarnom komorom.

U incineratorima se može spaljivati i tečni MO ukoliko se ubrizgava u primarnu komoru pod pritiskom da bi se izvršilo raspršivanje u sitne kapi. Zabranjeno je spaljivati radioaktivni i opasni hemijski otpad osim uz specijalno odobrenje nadležnih inspeksijskih organa. *U infektivnom otpadu ne bi smelo da bude više od 5% patološkog materijala( delovi tela, organa, tkiva ).*

### 4. RAZVOJ POSTROJENJA ZA NEUTRALISANJE I SPALJIVANJE OPASNOG MO

Pred sebe smo postavili ozbiljan projektni zadatak, čiji je krajnji cilj bio da se razvije i osvoji Postrojenje za neutralisanje i spaljivanje opasnog MO na mestu njegovog stvaranja, tj. u samim zdravstvenim ustanovama. Želeli smo da izbegnemo skup i opasan transport opasnih materija, kao i njegovo skupo odlaganje. Pravilnim sortiranjem u toku prikupljanja i njegovim sagorevanjem kolčine koje se odlažu na deponije se smanjuju preko 90%, što dugoročno posmatrano donosi društvu najveće koristi.

Razvijeno postrojenje za neutralisanje i spaljivanje opasnog medicinskog otpada zadovolja sledeće osnovne zahteve:

- realizaciju tehnološkog procesa neutralisanja MO i
- realizacija tehnološkog procesa neutralisanja MO je efektivna i ekonomski opravdana, i

• naš postrojenje može u potpunosti da zadovolji potrebe za neutralisanjem celokupnog čvrstog opasnog MO u Srbiji i šire.

Da bi ostvarili zadate ciljeve projektovani smo tehnologiju neutralisanja i spaljivanja opasnog MO (sl.5.), a i optimalnu strukturu postrojenja za spaljivanje komponujući ga iz tri tehnički zaokružene celine:

1.**Termoizolovane peći za sagorevanje** MO propan-butan gasom, kapaciteta 7-10 kg/sat i temperature sagorevanja 1200 – 1400 °C. Efekat što potpunijeg sagoravanja se ostvaruje uduvanjem, u komoru peći, tehničkog kiseonika (O<sub>2</sub>). Dobijeni dimni gasovi se dovode u posebnu komoru gde je temperatura 1000-1200°C na dodatno potpuno sagorevanje. I u ovu komoru se, po potrebi, dovodi tehnički kiseonik za potpunu oksidaciju. Potpuno sagorevanje plastičnih materijala sprečava pojavu dioksina i furana[9].

2.**Sistema za transport i rashlađivanje dimnih gasova** nastalih sagorevanjem, do 150 °C, ima za zadatak da obezbedi nesmetan protok dimnih gasova od ložišta peći do izmenjivača toplote pa do filtera. Izrađen je od nerđajućeg čelika. Rashlađivanje gasova nastalih sagorevanjem se vrši u dve faze:1. **prirodno** sa temperature 1200 °C na 700 °C u cevovodu i 2.**prirodno** sa temperature 700 °C na 150 °C. vodom koja struji kroz orebrene cevi. Ovakvo ohlađeni dimni gasovi u sebi nemaju mikroorganizma i osnovno obeležje koje medicinski otpad svrstava u opasnu materije prestalo je da postoji. Sistem prirodnog hlađenja sa 1200 °C na 700 °C onemogućava pojavu dioksina i furana.

3.**Sistema za prečišćavanje dimnih gasova**, koji se sastoji iz posebno razvijenog glavnog četvoroslojnog filtera, koji sprečava odlazak u atmosferu opasnih i štetnih jedinjenja nastalih u procesu sagorevanja. Slojevi filtera su:

- Prvi sloj: apsorbuje čestice dioksina i furana,
- Drugi sloj: zadržava mehanički čestice veće od 50 μm,
- Treći sloj: zadržava mehanički sve čestice veće od 0,01 mm i odstranjuje eventualno izdvojene radioaktivne čestice,
- Četvrti sloj: apsorbuje sve mirise i viruse, i zadržava najsitnije čestice.

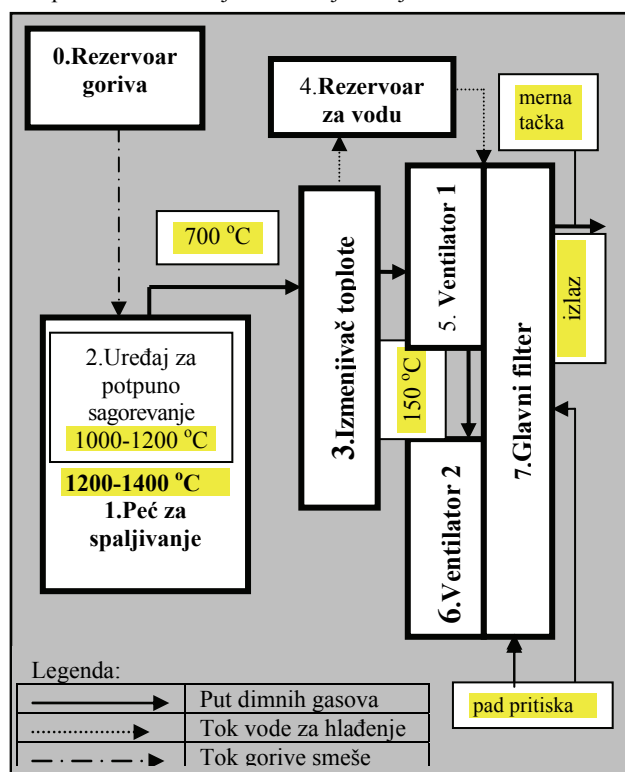
Stepen zaprljanosti filtera pokazuje pad pritiska kroz filter i kada dostigne vrednost 25 mbara (pad pritiska kod novog filtera je 6 mbara) vrši se zamena uložaka. Deo komponenti uložaka se uništava u samom postrojenju, a deo se reciklira.

Postrojenje se izrađuje klasičnim metodama mašinske obrade rezanjem i plastičnim deformisanjem, a pri njegovom sklapanju koriste se i gotovi proizvodi drugih proizvođača. Naš proizvod sprečava ekološke katastrofe, a ne prouzrokuje ih. Pri realizaciji našeg tehnološkog procesa pojavljuju se tri grupe štetnih materija: 1. *medicinski otpad pre tretmana*, 2. *gasni polutanti na izlasku iz filtera*, i 3. *čvrsti otpad*. Studijom o proceni uticaja saglasno Zakonu projektovani smo na bazi relevantnih procena sve mere zaštite čovekove životne sredine. Takođe obezbedili smo i bezbednost na radu saglasno važećoj zakonskoj regulativi.

Lica koja rukuju MO se posebno obučavaju za obavljanje



ovih poslova. Takođe, obavezni su da nose i propisanu zaštitnu opremu ( zaštitno odelo, zaštitnu obuću, zaštitne rukavice, zaštitne naočare i dr.). Sa druge strane predviđa se neophodna imunizacija osoba koje rukuju MO.

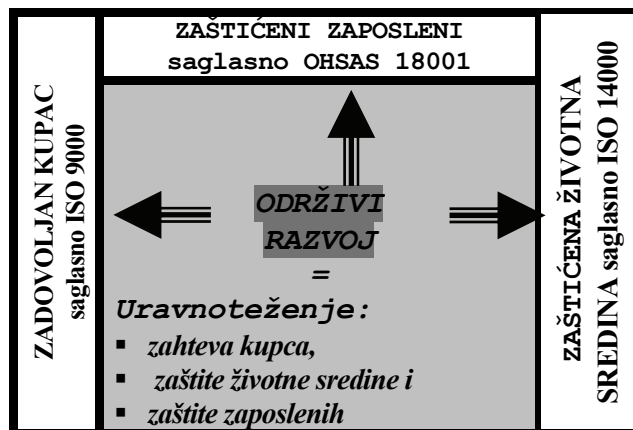


Sl. 5. Blok šema postrojenja za neutralisanje i spaljivanje MO/2/

Sve ove aktivnosti predstavljaju značajan element sistema održivog razvoja društva.

## 5. RAZVOJ KONCEPTA ODRŽIVOG RAZVOJA

Održivi razvoj ima za cilj da obezbedi opstanak čoveka na zemlji, tj. da se život organizuje tako da se koriste prirodni resursi za zadovoljenje potreba ljudi uz težnju da se buduće generacije ne spreče da zadovolje svoje potrebe. To zahteva osvešćenje čoveka, o njegovim aktivnostima, koje ga neminovno vode samouništenju. Realno se postavlja pitanje na koje svako društvo treba da odgovori: *Da li je moguće ostrvo održivog razvoja u moru neodrživosti?* Odgovor je nedvosmislen: *Moguće je pod uslovom da se shvati da koncept održivog razvoja sadrži više dimenzija koje ukazuju na povezanost privrednog, socijalnog i kulturnog razvoja i njegovu usklađenost sa potrebama i ograničenjima životne sredine.* On se zasniva na novoj percepciji i nauke i tehnologije, dominantno u okviru nove ekološke, umesto dosadašnje tehnoekonomske paradigme. Nužno je postavljanje realnih i ostvarivih ciljeva zaštite životne sredine, koji će biti dugoročni, ali sa jasno definisanim rokom. U tome mnogo pomaže dosledna primena međunarodnih standarda serije ISO 9000, ISO 14000, ISO 17000 i dr. Cilj standarda ISO 9000 je zadovoljstvo kupca iskazano sa "njegovu Visočanstvo KUPAC", a cilj standarda ISO 14000-očuvanje životne sredine iskazano sa "njena Visost PRIRODA". Ovi ciljevi često predstavljaju dva divergentna procesa. Kada se tome doda zaštita i bezbednost zaposlenih saglasno OHSAS 18001-Sistem upravljanja zaštitom zdravlja i bezbednošću na radu i sve to uravnoteži može se uspostaviti održivi razvoj (sl. 6). Zaštita životne sredine, kao najvažniji cilj održivog razvoja, predstavlja multidisciplinarni problem i zahteva precizno planiranje preventivnih mera u cilju ostvarivanja održivog razvoja. Jedan, vrlo važan, segment toga je pravilno zbrinjavanje opasnog MO.



Sl.6. Održivi razvoj-ravnoteža zadovoljenja standarda ISO 9000, ISO 14000, ISO 17000 i drugih relevantnih propisa

## ZAKLJUČAK

Menadžment medicinskim otpadom u našoj zemlji zaostaje za razvijenim evropskim državama. Osnovni razlozi za to su: -nedovoljna zakonska regulativa, -nedovoljna usklađenost zakona i propisa sa propisima EU, - nedostatak primene metoda prevencije nastajanja otpada (tzv. čistija proizvodnja), -nedovoljna organizovanost vezana za sakupljanje podataka o količinama opasnog medicinskog otpada i nadzoru na tokovima, - nedostatak izvora finansiranja u modernizaciju načina postupanja sa otpadom i štetnim uticajima na okolinu, zdravlje i klimu.

Osnovni cilj menadžmenta MO je izgradnja sistema postupanja s MO, što će biti ogroman doprinos razvoju koncepta održivog razvoja. Utvrdili smo da oko 15% od ukupnog MO u Srbiji otpada na infektivni MO, a da je nedovoljna pokrivenost teritorije Srbije postrojenjima za uništavanje opasnog otpada, kao i svih susednih država. To svedoči o potrebi razvoja tehnologija i postrojenja za uništavanje opasnog MO. Razvili smo originalnu tehnologiju i postrojenje za neutralisanje i potpuno sagorevanje opasnog MO za količine do 100 kg/dnevno, koja predstavlja doprinos razvoju tehnologija uništavanja opasnog MO uopšte i ima ogroman značaj za društvo u njegovoj borbi za održivi razvoj i očuvanje čovekove životne i radne sredine.

## LITERATURA

- [1] Biočanin R. *Zaštita radne i životne sredine u uslovima hemijske kontaminacije*, PMF Novi Sad, 1999.
- [2] Đuričić R. M., Nenadić S. M., Milutinović I. I., Ačimović-Pavlović Z., *Razvoj postrojenja za neutralizaciju i sagorevanje opasnog medicinskog otpada*, Zbornik "Otpadne vode, komunalni čvrsti otpad i opasan otpad, Zlatibor 06-09-april 2009.g.str.351-355.,
- [3] Holoubek I., Hrdinka Č., *Environmentalni aspekti antropogenih tehnologija (07) Nemocnični odpady*, RECETOX, Masaryk University, Brno, ČR, Available on Web site: <http://recotex.muni.cz>
- [4] *Non-Incineration Medical Waste Treatment Technologies in Europe A Resource for Hospital Administrators, Facility Managers, Health Care Professionals, Environmental Advocates, and Community Members*, Prague, June 2004 ,
- [5] Emmanuel. J, *Non-incineration Alternatives to the Treatment of Medical Waste*. Presented at the conference "Environmentally friendly management of medical waste", Debeli rtič, Slovenia, 12th April 2002.
- [6] *Zakon o zaštiti životne sredine*, ("Sl. glasnik RS" broj 135/2004), Beograd, 2004
- [7] *Zakon o upravljanju otpadom-predlog*, Beograd, 2006.

Зоран Јањуш, Александар Петровић, Александар Јововић, Предраг Илић

## ПРИЈЕДЛОГ УПРАВЉАЊА ОТПАДНИМ ПАПИРОМ

*Резиме:* У раду је приказан један од начина процјене динамике продуковања отпада. Као релевантни подаци кориштени су број становника, доходак и количина комуналног отпада у бањалучкој регији. Резултати могу да послуже у анализама везаним за управљање отпадом и његовом искориставањем, као и приликом процјене количина у сличним регијама, које имају систем прикупљања отпада нижег организационог нивоа.

**Кључне ријечи:** отпадни папир, количине отпада, процјена.

### ESTIMATION EXAMPLE ON THE AMOUNT OF PAPER GARBAGE

*Abstract:* In this work there has been shown one of the ways of estimation of dynamics of garbage production. As a relevant data, there have been used population, income and amount of communal garbage in the region of Banja Luka. These results may be used in the analysis related to garbage management and its use, and also during the estimation of the garbage amount in similar regions, which have a garbage collecting system of the lower organizational level.

**Key words:** paper garbage, amount of garbage, estimation.

#### 1. УВОД

Регија Бања Лука је подручје које обухвата осам општина: Бања Лука, Градишка, Кнежево, Котор Варош, Лакташи, Прњавор, Србац и Челинац, укупно 4718 km<sup>2</sup> што чини око 19% територије Републике Српске. На овом подручју живи приближно 444200 становника или око 30% становништва Републике (подаци Завода за статистику РС)[5].

#### 1. САСТАВ ОТПАДА И ОПИС РЕГИОНАЛНЕ ДЕПОНИЈЕ

У укупној маси комуналног отпада удио папирног отпада је 14,5% [1]. Средње вриједности густине испитиваног продуковањем комуналног отпада износи 200 kg/m<sup>3</sup>, влажност се креће у границама од 40 – 60 %. Регионална депонија је лоцирана у сјеверозападном дијелу Бања Луке, на удаљености од око 150 m од пута Бања Лука – Приједор, и око 10 km од центра града. Отпад се на предметној локацији одлаже 30 година. Уколико би се изградило рециклажно постројење, количина отпада би се смањила за 40%, чиме би се и вијек депоније са предвиђених 20 година продужио за још 8 година. Депонија "Рапићи" ће ове године постати санитарна депонија [2]. Од 01.07.2004. године је у надлежности Ј.П. "ДЕП-ОТ" Бања Лука. Предвиђена је за одлагање комуналног и индустријског неопасног отпада. Тренутни начин управљања отпадом се састоји у прихватању доведеног отпада, вагању, прегледу врсте отпада, евидентирању, обради, мануелном издвајању корисних сировина, одлагању, компактовању и прекривању отпада. Након истовара отпада, врши се разастирање у слојевима и збијање компактором у слојевима и прекривање слојем погодног инертног материјала. Поновна употреба отпада и рециклажа у региону нису организоване.

#### 3. ПРЕГЛЕД РЕЛЕВАНТНИХ ПОДАТАКА

Промена количина папирног отпада праћена је од половине 2005.год. до краја 2008.год. у зависности од

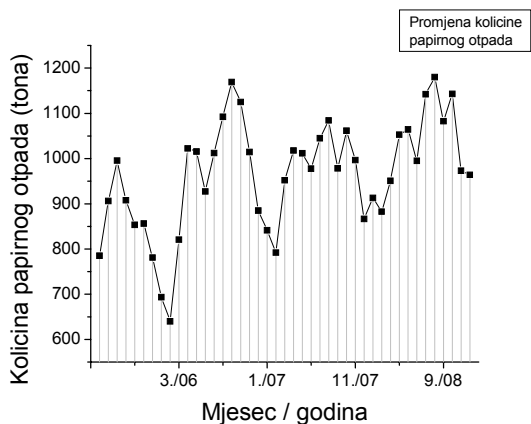
броја становника, дохотка [5] и годишњег доба. Подаци су приказани табеларно и графички.

Год. / мјес.	Количина папирног отпада (тона)	Број стан.	Доход. по гл. стан. (кон. мар.)	Кол. п. отп. по дох. по гл. стан.
'05 јун	785.0561	445783	89,4	8.7814
'05 јул	906.2645	445747	90,69	9.9930
'05 авг	995.3206	445711	90,88	10.9520
'05 сеп	907.9726	445674	90,88	9.9909
'05 окт	853.2032	445637	91,65	9.3094
'05 нов	855.8596	445601	91,26	9.3783
'05 дец	780.8134	445565	94,34	8.2766
'06 јан	693.3175	445538	100,51	6.8980
'06 феб	639.8154	445511	101,76	6.2875
'06 мар	820.8102	445484	102,8	7.9845
'06 апр	1022.586	445457	105,71	9.6735
'06 мај	1015.606	445430	107,38	9.4581
'06 јун	927.1938	445403	109,04	8.5032
'06 јул	1011.987	445376	110,29	9.1757
'06 авг	1092.462	445349	111,33	9.8128
'06 сеп	1169.147	445322	111,96	10.4425
'06 окт	1124.762	445295	112,17	10.0273
'06 нов	1014.31	445268	111,75	9.0766
'06 дец	884.8335	445241	114,46	7.7305
'07 јан	841.1972	445194	112,51	7.4766
'07 феб	791.9494	445147	118,66	6.6741
'07 мар	951.8177	445100	120,57	7.8943
'07 апр	1017.787	445053	122,26	8.3248
'07 мај	1011.346	445006	122,05	8.2863
'07 јун	977.5117	444959	123,74	7.8997
'07 јул	1044.893	444912	122,05	8.5612
'07 авг	1084.113	444865	125,65	8.6280

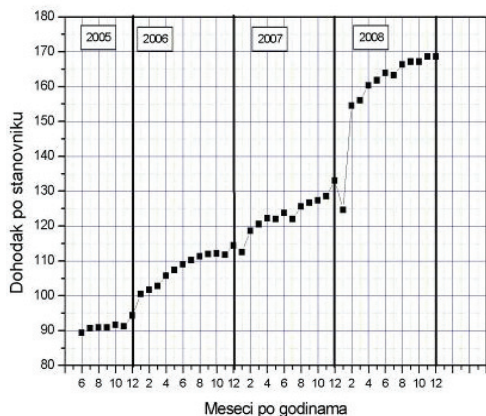
'07 сеп	978.199	444818	126,71	7.7199
'07 окт	1061.281	444771	127,35	8.3336
'07 нов	996.8779	444723	128,62	7.7506
'07 дец	866.7172	444677	133,07	6.5132
'08 јан	912.862	444640	124,68	7.3216
'08 феб	882.4033	444603	154,57	5.7087
'08 мар	950.7853	444567	156,07	6.0920
'08 апр	1052.706	444530	160,34	6.5655
'08 мај	1064.172	444493	161,83	6.5759
'08 јун	994.9001	444457	163,97	6.0676
'08 јул	1142.438	444420	163,33	6.9947
'08 авг	1180.251	444383	166,32	7.0963
'08 сеп	1082.701	444347	167,17	6.4766
'08 окт	1142.646	444310	167,17	6.8352
'08 нов	972.8485	444273	168,65	5.7684
'08 дец	964.0963	444236	168,65	5.7165

Табела 1. Релевантни подаци

Прецизни подаци везани за количине комуналног чврстог отпада пристигле на регионалну депонију воде се у Ј.П. "ДЕП-ОТ" Бања Лука од половине 2005.год. На слици се види тренд промјене количине папирног отпада кроз посматрани временски период, као и промјене током године. Продукција папирног отпада има стаалан тренд раста. У току једне године раст количине се биљежи током љетног перида, а пад током зимских мјесеци. Нагли пораст количине током 2006.год. везан је за санирање дивљих депонија на подручју регије.

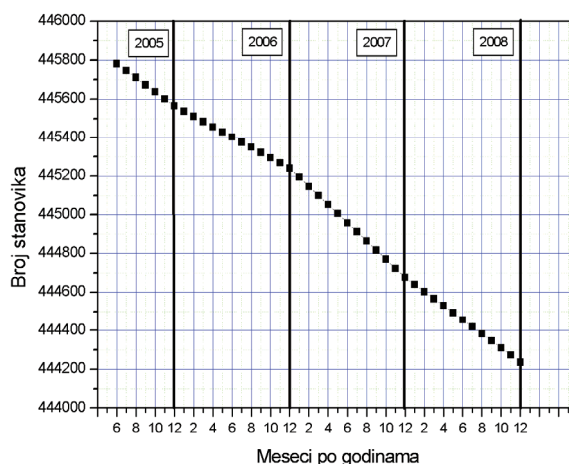


Слика 1. Промјена количине папирног отпада



Слика 2. Доходак по глави становника

Податке везане за број становника регије и доходак води Републички завод за статистику Бања Лука [5]. Број становника регије је у сталном паду (слика 4.). За 2005., 2006. и 2007.год. кориштени су подаци виталне статистике док су за 2008.год. усвојени на основу претходних. Број становника пропорционално је распоређен по мјесецима у току године. Доходак кроз посматрани период биљежи стаалан раст (слика 2.). Посматрано током године пад се јавља само у јануару, што је последица већег броја нерадних - празничних дана. За посматрани период вршен је прорачун количине папирног отпада по доходу по глави становника (тона / конвертибилној марки) што би могло послужити за процјену количине отпада на основу броја становника и дохотка у регијама сличним посматраној.



Слика 4. Промјена броја становника регије

#### 4. ПРИЈЕДЛОГ НАЧИНА ПРОЦЈЕНЕ КОЛИЧИНЕ ОТПАДА

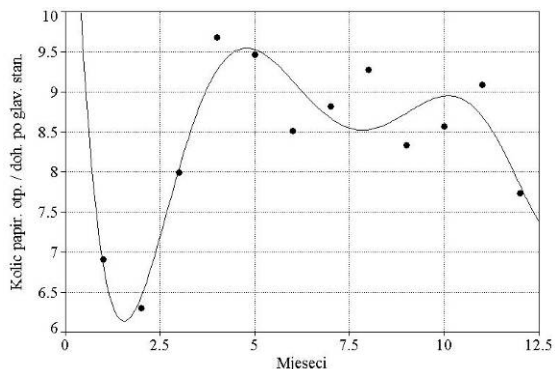
Да би смо добили реалнију слику потребно је из укупне количине папирног отпада искључити утицај количина допремљених са дивљих депонија, а што се у конкретном случају односи на период јули – октобар 2006.год. Тиме добијамо резултате количина отпада прикуљеног редовним одвозом. Поређењем количина за исти мјесец у посматраним годинама види се пораст количине са одступањем у 2006.години. Опишемо ли их полиномским функцијама другог степена добијамо прихватљивије податке (табела 2.).

Година / мјесец	Мјерена количина (тона)	Усвојена количина (тона)
2006 јул	1011.987	971.377
2006 авг	1092.462	1031.969
2006 сеп	1169.147	932.681
2006 окт	1124.762	960.642

Табела 2. Усвојени подаци количине папирног отпада за 2006. год.

На следећим сликама графички и аналитички су приказани обрађени подаци промјене количине папирног отпада по доходу по глави становника за 2006., 2007. и 2008. годину. Статистичком анализом експериментални резултати описани су полиномским функцијама шестог степена. Прецизност описа је задовољавајућа а примјена једноставнија од сложенијих функција које би нешто

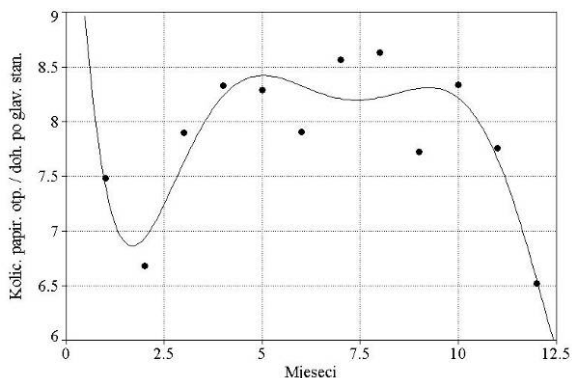
боље описале промјене.



Слика 5. Промјена посматраних података за 2006.год.

$$(1) \quad y = 14.58264 - 14.130907x + 8.1677229x^2 - 1.994977x^3 + 0.23856401x^4 - 0.013812589x^5 + 0.0003094904x^6$$

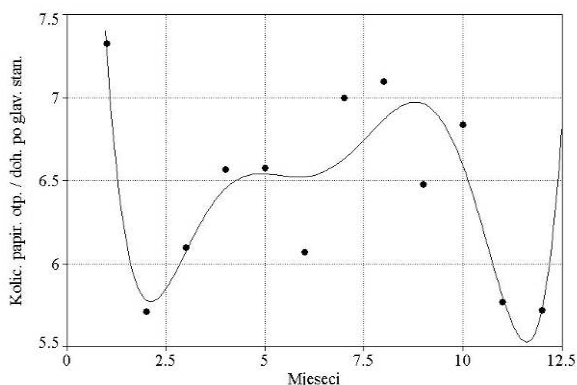
$r^2=0.85776088$ ; DF Adj  $r^2=0.60884241$ ; FitStdErr=0.57195; Fstat=5.0253454



Слика 6. Промјена посматраних података за 2007.год.

$$(2) \quad y = 11.872875 - 7.8952752x + 4.3735125x^2 - 1.0567618x^3 + 0.12705232x^4 - 0.0074458843x^5 + 0.00016876722x^6$$

$r^2=0.80274727$ ; DF Adj  $r^2=0.457555$ ; FitStdErr=0.44852753; Fstat=3.3913653



Слика 7. Промјена посматраних података за 2008.год.

$$(3) \quad y = 14.687769 - 12.495952x + 6.5410767x^2 - 1.6284746x^3 + 0.20962798x^4 - 0.01340857x^5 + 0.00033580528x^6$$

$r^2=0.79561609$ ; DF Adj  $r^2=0.43794426$ ; FitStdErr=0.37694059; Fstat=3.243961

Помоћу приказаних података могуће је посматрано за сваки мјесец посебно по годинама статистичком

анализом одредити тренд промјене, што би нам дало могућност процјене за неколико наредних година, уз услов да не дође до радикалне промјене релевантних података (да се радикално не наруше економски и демографски показатељи).

## 5. РЕЦИКЛАЖА ПАПИРА

Штампани већ употребљен папир представља јефтину сировину за добијање висококвалитетног новог папира. Повећање рециклаже отпадног папира наглашено је у цијелом свијету. Око 30% свјетске производње папира потиче од отпадног папира. Рециклирањем папира не уништавају се шумска добра, смањује се потрошња енергије, воде и загађење ваздуха. Тачније добијањем једне тоне папира из једне тоне рециклираног папира потроши се 60% мање енергије у односу на добијање папира прерадом дрвета, 50 % мање воде, а за 70% се смањује емисија штетних гасова [3]. Уобичајени поступак за добијање квалитетног рециклираног папира "деинкинг" поступком је флотација. Прање и флотација су два најсличнија начина за уклањање мастила са површине папира. Обично користе у комбинацији да би се селективно отклониле честице по типу и величини. Прање подразумјева испирање пулпе, често додатком хемикалија, и њиховим одвођењем из система. Овај метод је најефикаснији при уклањању веома малих честица (испод 30µm). Флотацијом се уклањају нешто веће честице него прањем папира, у опсегу од 10µm до 250µm, а неки системи и честице до 500µm. У индустрији папира, значај флотирања тонера расте нарочито у протеклих неколико година. Такозвана "деинкинг" флотација је данас, у свијету, у индустрији папира, доминантни процес који се користи за уклањање тонера са прерађеног папира. Лабораторијска истраживања примене флотацијске концентрације у уклањању тонера са високо квалитетног папира, дала је неочекиване резултате у погледу искоришћења папира и у погледу квалитета истог. Већ дуго се истражују биохемијске замене за хемикалије које се користе у процесу прављења папира да би се смањили трошкови и лош утицај на животну средину. У области рециклирања истраживање коришћења ензима у циљу замене или појачања традиционалних хемикалија за чишћење даје резултате који показују да ензимски поступак може дати сличне или боље резултате чишћења без лошег утицаја на физичке одлике финалног производа. Постоје резултати индустријских експеримената ензимског чишћења а и целокупна технологија ензимског чишћења је развијена до те мере да се већ може примењивати.



Слика 8. Приказ процеса животног циклуса папира

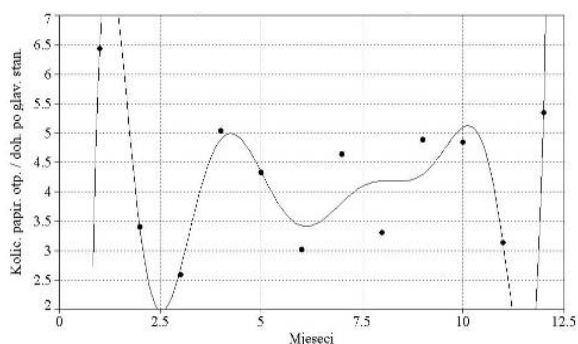


## 6. ПРИЈЕДЛОГ НАЧИНА ПРОЦЈЕНЕ КОЛИЧИНЕ ПАПИРНОГ ОТПАДА

Помоћу приказаних података могуће је посматрано за сваки мјесец посебно по годинама статистичком анализом одредити тренд промјене, што би нам дало могућност процјене за неколико наредних година. Обрасци промјене и подаци (количина папирног отпада по дохотку по глави становника - тона / конвертибилних марака), за 2009.год. добијени помоћу њих приказани су следећом табелом. Година 2006. представљена је са 1, 2007. са 2, 2008. са 3, а 2009. година. у анализи представља се бројем 4 (умјесто промјениве X). Коэффициент детерминације  $R^2$  ( $0 \leq R \leq 1$ ) показује у којој мјери су експериментални резултати објашњени апроксимативним (за све посматране обрасце  $R^2=1$ ), а  $\sigma^2$  средње квадратно одступање.

Мјесец	Образац промјене ( $R^2=1$ )		Кол. (т/км)
Јан	$y = -0.3668x^2 + 1.6791x + 5.5857$	$\sigma^2=0.0598$	6.433
Феб	$y = -0.676x^2 + 2.4145x + 4.5489$	$\sigma^2=0.1574$	3.391
Мар	$y = -0.856x^2 + 2.4779x + 6.3627$	$\sigma^2=0.7598$	2.578
Апр	$y = -0.2053x^2 - 0.7329x + 10.612$	$\sigma^2=1.6194$	5.032
Мај	$y = -0.2694x^2 - 0.3636x + 10.091$	$\sigma^2=1.4006$	4.327
Јун	$y = -0.6143x^2 + 1.2394x + 7.8781$	$\sigma^2=1.0726$	3.007
Јул	$y = -0.7223x^2 + 1.7987x + 8.0993$	$\sigma^2=0.9088$	4.631
Авг	$y = -0.8149x^2 + 1.9014x + 8.7264$	$\sigma^2=1.3775$	3.294
Сеп	$y = 0.1291x^2 - 2.4994x + 12.813$	$\sigma^2=2.6251$	4.881
Окт	$y = -0.1329x^2 - 1.0644x + 11.225$	$\sigma^2=1.7021$	4.841
Нов	$y = -0.328x^2 - 0.3419x + 9.7465$	$\sigma^2=1.8479$	3.131
Дец	$y = 0.2103x^2 - 1.8481x + 9.3683$	$\sigma^2=0.6858$	5.341

Tabela 3. Процијени подаци за 2009. год.



Слика 9. Промјена посматраних података за 2009.год.

$$(4) \quad y = -109.86116 + 306.08663x - 311.37421x^2 + 162.93532x^3 - 49.650508x^4 + 9.3182387x^5 - 1.0926909x^6 + 0.078029764x^7 - 0.0031039939x^8 + (5.2730008e-05)x^9$$

$$r^2=0.85931378; DF Adj r^2=0; FitStdErr=1.0172035; Fstat=1.357337$$

## 7. ЗАКЉУЧАК

Анализа посматраних података показује да:

- папирни отпад могуће је употребити као сировину за производњу рециклираног папира или за производњу енергије.
- продуковање папирног отпада за посматрану регију не зависи од промјене броја становника, јер је занемарива у односу на повећање количине отпада.
- повећање дохотка по глави становника утиче на повећање продукције папирног отпада.
- проведене анализе могу да користе сличним регијама у свијету који имају систем прикупљања отпада нижег организационог нивоа за процјену његових количина.
- проведене анализе могу да користе за процјену продукције папирног отпада у будућности.
- продукција папирног отпада у савременом друштву је у сталном порасту, што захтјева стално праћење, анализе и предузимање системских мјера.
- уз приказане резултате и обраду економских показатеља могуће је одредити препоруку најприхватљивијег модела за управљање прикупљеним папирним отпадом: рециклажа, спаљивање или продају у неки од центара за рециклажу.

## 8. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Илић, М. и сарадници, "Студија управљања чврстим отпадом за регију Бања Лука", Урбанистички завод Републике Српске, а.д., Бања Лука, 2002.
- [2] Гашвић, М., Трбић, М., Илић, П., Митровић, М., Свитилица, С., Рачић, М., Денис, М., Ерић, Љ. "План прилагођавања управљања отпадом за регионалну депонију "Рапићи" у Бања Луци", Институт заштите, екологије и информатике, Бања Лука, 2005.
- [3] Трумић, Г., Ђорђевић, М., Павловић, Н. " *Magnetni deinking papira*", I Симпозијум о рециклажним технологијама и одрживом развоју, 247-250, Соко Бања, Технички факултет Бор, новембар 2006. год.
- [4] Јањуш, З., Петровић, А., Јововић, А. "Процјена стања комуналног отпада у бањалучкој регији", Процесинг, Суботица, 2008.
- [5] www.rzs.rs.ba: Билтени – мјесечни статистички прегледи; Посебна издања – Република српска у бројкама, Саопштења – Рад (плате и запослени), Становништво (витална статистика).

**Аутори:** мр Зоран Јањуш<sup>1</sup>, Проф. др Александар Петровић<sup>2</sup>, Проф. др Александар Јововић<sup>2</sup>, мр Предраг Илић<sup>3</sup>,<sup>1</sup> Градска управа Бања Лука, Трг српских владара 1, 78000 Бања Лука, РС БиХ, Моб.: +387 65 856-890, <sup>2</sup> Универзитет у Београду, Машински факултет, Катедра за процесну технику, Краљице Марије 16, 11000 Београд, Србија, <sup>3</sup> Институт заштите, екологије и информатике, Видовданска 43, 78000 Бања Лука, РС БиХ.

Е-mail: [mrjzoran@teol.net](mailto:mrjzoran@teol.net)  
[apetrovic@mas.bg.ac.rs](mailto:apetrovic@mas.bg.ac.rs)  
[ajovovic@mas.bg.ac.rs](mailto:ajovovic@mas.bg.ac.rs)  
[pedja\\_1979@yahoo.co.uk](mailto:pedja_1979@yahoo.co.uk)



Đapić, M., Zeljković, V., Urošević, A., Senkijević, A., Đurić, A.

## USKLAĐIVANJE MAŠINA ZA SEČENJE METALNIH OJAČANJA SA ZAHTEVIMA EVROPSKIH DIREKTIVA

**Rezime:** U ovom radu su predstavljeni opšti principi CE označavanja proizvoda kako je definisano u Novom i Globalnom pristupu Evropske Unije (EU). Kao primer prikazani su neki od rezultata projekta koji se odnosio na usklađivanje mašina za sečenje metalnih ojačanja sa zahtevima odgovarajućih EU direktiva i harmonizovanih standarda

**Ključne reči:** CE znak, Novi i Globalni pristup, Mašina za sečenje metalnih ojačanja

## STEEL CUTTING MACHINES HARMONIZATION WITH REQUIREMENT OF EUROPEAN DIRECTIVES

**Abstract:** This paper presents a general principles to the product CE marking in according with requirement of the New and Global Approach European Union (EU). As an example, some of the results of the project which is relating to the harmonization of machine tools for steel cutting with the requirements of the relevant EU directives and harmonized standards are presented.

**Key words:** CE mark, New and Global approach, Machine tools for cutting steel

### 1. UVOD

Uslovi koje proizvodi moraju da zadovolje da bi stigli na tržište Evropske Unije zavise od toga da li su proizvodi obuhvaćeni tehničkim zakonodavstvom Novog pristupa ili ne.

Ako su proizvodi obuhvaćeni tehničkim zakonodavstvom procedure ocene usaglašenosti su definisane u osam modula koji su definisani u Odluci Saveta Evropske Unije (EU) o uvođenju Modula za ocenu usaglašenosti.

Ovi proizvodi prolaze tzv. "obavezujuće" procedure ocene usaglašenosti. Kao potvrda uspešno sprovedene procedure proizvođač je obavezan da na svoj proizvod stavi CE – oznaku, čime se potvrđuje njegova usklađenost sa suštinskim bezbednosnim zahtevima koji su definisani u odgovarajućoj ili odgovarajućim direktivama.

Ako proizvod nije obuhvaćen tehničkim zakonodavstvom Novog pristupa on potpada pod tzv. "dobrovoljnu" sertifikaciju. Što drugim rečima znači da je proizvođač slobodan u izboru da li ili ne sertifikovati proizvod.

Proizvodnja i plasman mašina i mašinskih komponenti je od posebnog značaja za EU. Ovaj sektor "mašingradnje" godišnje ostvaruje oko četiristo milijardi evra prihoda i zapošljava oko 2,6 miliona radnika [3]. Osim ovoga, EU je i veliki uvoznik proizvoda iz sektora mašingradnje što se posebno odnosi na alatne mašine.

Cilj ovog rada je da predstavi neke od rezultata projekta koji su autori ovog rada u toku 2008. godine realizovali zajedno sa firmom URBAN-Technic iz Valjeva. Projekat se odnosio na usklađivanje proizvoda URBAN Technicsa sa zahtevima evropskih direktiva i harmonizovanih standarda. Kao primer u radu se daje usklađivanje "Mašine za sečenje metalnih ojačanja UT-003H sa zahtevima evropskih direktiva" [1].

**URBAN Technics** je izuzetno uspešna, privatna firma iz Valjeva koja je osnovana stopostotnim kapitalom krajem 2003.godine. Ona je uspela za nepune dve godine da plasira, montira i servisira blizu 600 manjih i većih linija raznorazne opreme za aluminijumsku i PVC stolariju.

Uporedo sa tim, razvijena je i sopstvena proizvodnja rolera, mašine za sečenje metalnih ojačanja (štancerica), varilica i brojnih rezervnih delova, kako za domaće tako i za svetsko tržište.

URBAN TECHNICS se osposobio za reparaciju polovnih mašina i opreme, a za koje ima sve više interesovanja, naročito od onih koji tek započinju proizvodnju stolarije od PVC-a i aluminijuma.

### 2. EVROPSKI PRISTUP OCENJIVANJU USAGLAŠENOSTI PROIZVODA

Postoje različiti putevi za plasiranje proizvoda na tržište Evropske unije. Na njima proizvođači, odnosno isporučioi koriste različite tehnike koje vrlo često obuhvataju i angažovanje nezavisne treće strane u ocenjivanju usaglašenosti proizvoda. Slika 1. daje globalni prikaz algoritma koji se primenjuje kod "obavezne" i "dobrovoljne" sertifikacije proizvoda.

Prvi odgovor koji se zahteva od proizvođača ili njegovog ovlašćenog predstavnika je da li su proizvodi obuhvaćeni tehničkim zakonodavstvom Novog pristupa ili ne. Ako proizvod potpada pod tehničko zakonodavstvo, odnosno obuhvaćen je direktivama Novog pristupa, procedure ocene usaglašenosti su definisane u Odluci<sup>1</sup> Saveta Evropske Unije o uvođenju Modula za ocenu usaglašenosti (Slika 2.).

Mnogi od modula, ukupno ih ima osam, zahtevaju od proizvođača da u postupku ocenjivanja usaglašenosti uključi nezavisnu treću stranu, odnosno ovlašćena ili notifikovana tela. Angažovanje ovih tela se uglavnom zahteva u procedurama ocene usaglašenosti koje se odnose na visoko rizične proizvode sa stanovišta ugroženosti zdravlja i bezbednosti ljudi i okoline. Zbog toga je veoma važno da ova tela obavljaju svoju funkciju sa prethodno dokazanim visokim nivoom kompetencije, integriteta i profesionalizma. Obaveza je država članica da imenuju ova tela ako njihovo tržište to zahteva. Drugim rečima, države članice nisu obavezne da imenuju tela za sve direktive nego samo za one za koje postoji interes, odnosno tržište.

Imenovanje tela za ocenu usaglašenosti je obaveza koju nameću direktive Novog pristupa. a kriterijumi se nalaze u Odluci saveta EU broj 768/2008/EC o uvođenju Modula za ocenu usaglašenosti i anaksima direktiva.

Drugi odgovor koji se postavlja pred proizvođače je, ako

<sup>1</sup> 768/2008/EC: Council Decision of 9 July 2008.

proizvod ne potpada pod tehničko zakonodavstvo Novog pristupa, da li je iz marketinških ili nekih drugih razloga potrebna sertifikacija proizvoda ili ne.

ISO knjiga "Sertifikacija i vezane aktivnosti" [5] daje osam sistema za sertifikaciju proizvoda preko treće strane (Slika 3.).

U suštini sistemi za sertifikaciju proizvoda treba da obuhvate najmanje dve aktivnosti:

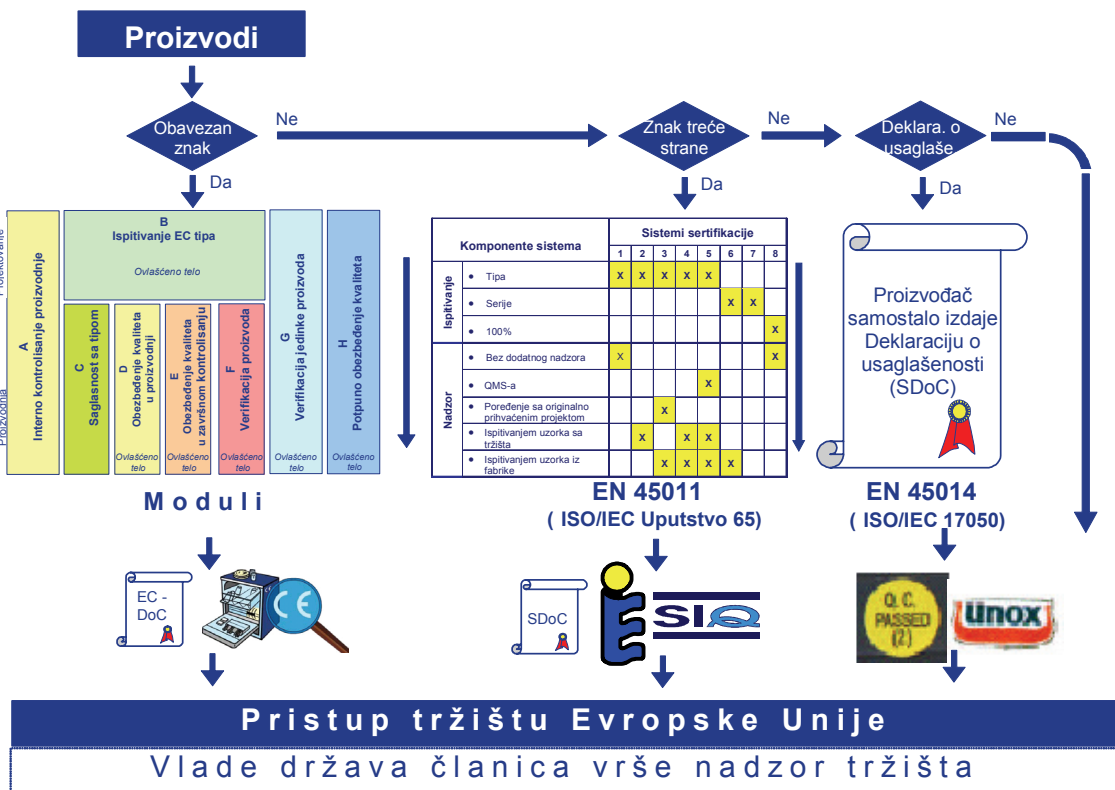
- prihvatanje proizvoda na osnovu ispitivanja (projekta) proizvoda i ili proizvodnog procesa,
- nadziranje sposobnosti proizvođača da stalno isporučuje usaglašene proizvoda.

Sistem sertifikacije broj jedan obuhvata samo ispitivanje tipa pa se može smatrati koa sistem koji nije dovoljno "zreo" pošto ne obezbeđuje nadzor nad proizvodnjom ispitano tipa.

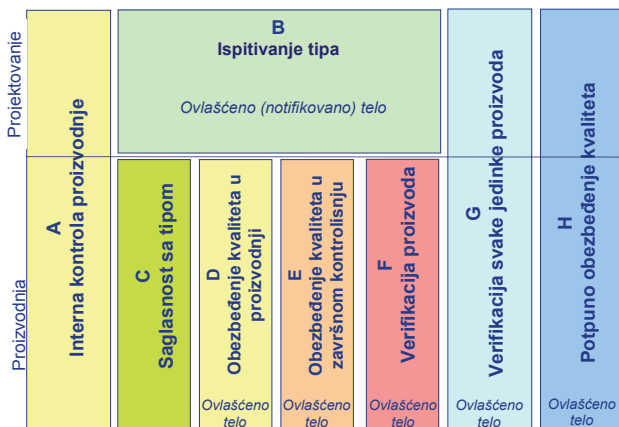
Isto važi i za sistem broj sedam, dok za sistem broj osam nadzor je nebitan pošto on obuhvata 100% ispitivanje svih proizvoda u odnosu na definisane zahteve.

Sistemi broj dva, tri i četiri obuhvataju pored ispitivanja tipa i nadzor kroz kontrolna ispitivanja uzoraka sa tržišta, sistem broj dva, nadzor kroz kontrolna ispitivanja uzoraka iz proizvodnje, sistem broj tri, i nadzor kroz kontrolna ispitivanja uzoraka sa tržišta i iz proizvodnje, sistem broj četiri.

Naj obuhvatniji sistem sertifikacije je broj pet. On obuhvata ispitivanje tip u fazi razvoja i nadzor QMS-a u fazi proizvodnje kao i ispitivanje uzoraka koji se uzimaju sa tržišta i iz proizvodnje.



Slika 1. Evropski pristup ocenjivanju usaglašenosti proizvoda



Slika 2. Moduli obavezne sertifikacije proizvoda (Globalni pri.)

Komponente sistema		Sistemi sertifikacije							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Ispitivanje	• Tipa	X	X	X	X	X			
	• Serije						X	X	
	• 100%								X
Nadzor	• Bez dodatnog nadzora	X							X
	• QMS-a					X			
	• Poređenje sa originalno prihvaćenim projektom			X					
	• Ispitivanjem uzorka sa tržišta		X		X	X			
	• Ispitivanjem uzorka iz fabrike			X	X	X	X		

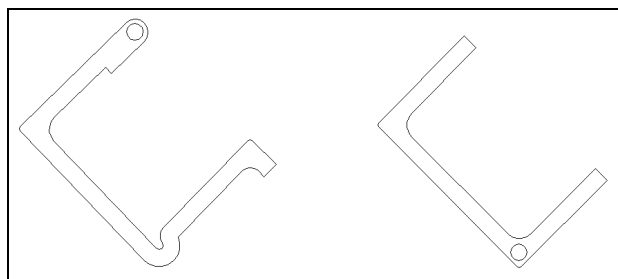
Slika 3. Sistemi dobrovoljne sertifikacije proizvoda

### 3. USKLAĐIVANJE MAŠINA ZA SEČENJE METALNIH OJAČANJA SA ZAHTEVIMA MAŠINSKE DIREKTIVE

Mašina za sečenje metalnih ojačanja UT-003H, koji je dat na slici 4. i tabeli 1., je konstruisan kao hidraulična presa za sečenje metalnih ojačanja. Ova metalna ojačanja su otvorenog poprečnog preseka poput onih koji se koriste u izradi profila za PVC stolariju (slika 5).



Slika 4. Mašina za sečenje metalnih ojačanja



Slika 5. Poprečni presek metalnih ojačanja

U cilju plasmana na Evropsko tržište, bilo je neophodno sprovesti kompletnu proceduru usaglašavanja mašine sa zahtevima EU direktiva (Direktive o mašinama i LVD) i odgovarajućih harmonizovanih standarda.

Sem Direktive za mašine 98/37/EC, korišćen je i harmonizovani standard EN 13985:2003 – "Machine tools, Safety-Guillotine shears" koji daje sve elemente koji su potrebni da bi mašina za sečenje metalnih ojačanja bila bezbedna.

Najpre su evidentirane i analizirane opasnosti i ocenjeni rizici. Kao što sama Direktiva za mašine predlaže, konstruktivnim rešenjem su eliminisane određene opasnosti, pre svega mehaničke opasnosti od zahvatanja dela tela, prsta. Tačka 5.3.1 standarda EN 13985:2003 navodi: "The major danger zone at guillotine shears is the blade and associated

area and protective measures need to be taken to deal with the relevant hazards. This sub-clause indicates how hazards in the blade and associated area shall be safeguarded. No safeguarding is required where the gap between the closing surfaces cannot exceed 6 mm."

Projektom, odnosno konstruktivnim rešenjem se obezbedilo da ovakva mehanička opasnost bude eliminisana. Ovo se pokazalo veoma efikasno, jer se time uklanjaju zahtevi za zaštitnim merama što pojednostavljuje konstruktivno rešenje i doprinosi operativnosti mašine.

Maksimalna veličina metalnog ojačanja	60mm x 150mm x 2700mm
Maksimalna debljina profila	5mm
Radni pritisak	110 bar
Maksimalna sila sečenja	86kN
Brzina smicanja	5mm/sec
Motor hidraulične jedinice	0,75 kW – 900 obrtaja u minuti
Napajanje	380V -50Hz
Radno sredstvo	mineralno hidrauličko ulje HV 46
Količina hidrauličkog ulja u sistemu	4 lit
Uslovi okruženja: temperatura	10÷30 °C
vlažnost	15÷90 % RV (relativna vlažnost)
Težina mašine	95 kg
Težina navoznog rolera	20 kg
Težina mernog dela	8 kg
Dimenzije uređaja sa navoznim rolerom:	
širina	860 mm
dužina	max 6300 mm
visina	950 mm

Tabela 1. Tehničke karakteristike mašine za sečenje metalnih ojačanja – štancerica UT-003H

Sprovedena je kompletna procedura usklađivanja prema zahtevima standarda EN 13895:2003, uključujući i verifikaciju, koja je data u tabeli 5. standarda, "Means of verification of the safety requirements and/or protective measures".

Verifikacija bezbednosnih mera zahtevala je četiri grupe aktivnosti:

- Vizuelni pregled,
- Provera/testiranje performansi,
- Merenja (instrumentima),
- Crteži/proračuni.

U ovom radu se nevede deo rezultata koji je vezan za merenje buke. Harmonizovani standard EN 13985:2003, tačke 5.8.5.1-3 i annex D, definišu uslove rada mašine, uslove okoline, način merenja buke, obradu rezultata i oblik prikazivanja rezultata.

Merenje buke izvršio je Tehnički Opitni Centar (TOC, Beograd) prema standardu ISO 11202:1995 (Noise emitted by machinery and equipment – Measurement of emission sound pressure levels at a work station and at other specified positions).

Za merenje i analizu buke korišćena je sledeća merna oprema:

- merni sistem za buku i vibracije, NetdB12 (01dB Metravib), ser.br. LCF009675-068 koji je podržan,
- softverom za merenje i obradu podataka, dBFA Suite (01dB Metravib) i
- mikrofonska jedinica (1/2") predpojačivač i free field mikrofoni tipa 46AE sa TEDS (G.R.A.S Sound



& Vibration), ser.br. 88741,

- kalibrator, akustički V&K4230, ser.br. 991890.

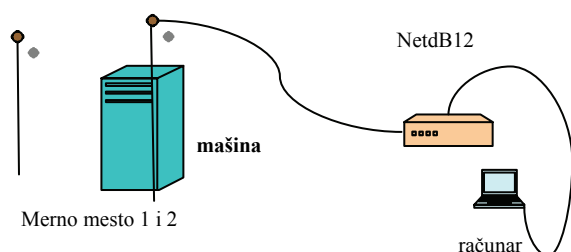
Merna oprema je savremena u smislu da ima hardverski i softverski kvalitet i potencijal da podrži najstrožije zahteve standarda iz grupe EN ISO 3743 – 3746, za određivanje zvučne snage izvora buke. Između ostalog to znači da ima dovoljno kanala za sva predviđena merna mesta u zvučnom polju oko mašine tj. za istovremeni rad sa 12 mikrofona i odgovarajuću obradu signala uz zahtevane proračune.

Merenje buke je rađeno u situacijama:

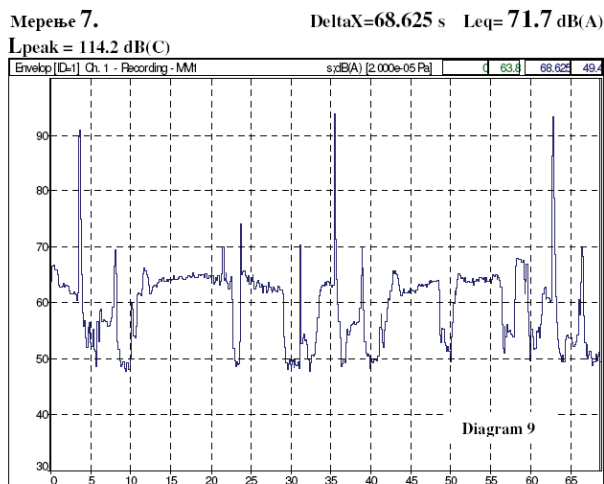
- kada je mašina isključena – buka okoline,
- kada je mašina uključena i nije opterećena (u leru)
- kada mašina radi (za merno mesto operatera i drugo merno mesto na 1 m sa leve bočne strane mašine gde je najveća emisija buke, što je prethodnim merenjem utvrđeno), pri sečenju profila max debljine kao i tanjih profila.

Merene veličine su:  $L_{A,eq}$  ekvivalentni nivo zvučnog pritiska prema A- karakteristici otežavanja i  $L_{C,peak}$  vršni nivo zvučnog pritiska prema C - karakteristici za impulsni zvuk koji emituje mašina pri sečenju profila.

Merni lanac za merenje buke dat je na slici 5:



Slika 5. Merni lanac za merenje buke



Slika 6. Izgled zapisa merenja buke i rezultati obrade signala

Dijagram na slici 6., se odnosi na buku u najnepovoljnijim uslovima, odnosno pri kraćenju debelih ojačanja, gde se vidi da je ekvivalentni nivo buke 71.7 dB(A), što nije veliki nivo za rad mašine, jer ne prelazi 85 dB(A). Ako buka prelazi ovu vrednost kao što je navedeno u EN 13985:2003, tačka 5.8.5.3 s) potrebno je meriti zvučnu snagu izvora prema EN ISO 3746.

Primena samo standarda ISO 11202:95 je opravdana i sa aspekta što je položaj operatera kod ove mašine jasno definisan jer mašina po gabaritima nije velika. Takođe u Annex-u 1, Direktive o mašinama, ovakav nivo buke ne zahteva nikakva dodatna zaštitna sredstva. Međutim, neophodno je u uputstvu za upotrebu naznačiti izmereni nivo

u dB(A).

#### 4. ZAKLJUČAK

Jedinstveno tržište EU - EFTA danas obuhvata trideset jednu državu sa oko petsto miliona stanovnika. U cilju stvaranja Jedinstvenog tržišta projektovani su Novi i Globalni pristup koji obuhvataju tehničku harmonizaciju, standardizaciju i ocenjivanje usaglašenosti proizvoda.

Proizvodi koji su obuhvaćeni tehničkim zakonodavstvom Novog pristupa moraju pre pojave proizvoda na tržištu EU da prođu proceduru ocene usaglašenosti, sa suštinskim zahtevima odgovarajućih direktiva. Proizvođači su obavezni da proizvode koji prođu proceduru ocene usaglašenosti označe CE-oznakom.

Jedan od tih proizvoda je **mašina za sečenje metalnih ojačanja (štancerice)**. U radu su prikazani neki od rezultata projekta koje su autori rada zajedno sa tehničkim rukovodstvom firme URBAN-Technics uradili 2008. godine. U finansiranju navedenog projekta delimično je učestvovala Agencija za strana ulaganja i promociju izvoza - SIEPA.

U radu su posebno predstavljeni delovi projekta koji su se odnosili na proveru ispunjenosti zahteva odgovarajućeg harmonizovanog standarda (EN 13895:2003) koji se odnose na dozvoljene nove buke.

#### 5. LITERATURA

- [1] Đapić, M., Zeljković, V., Urošević, A. i ost., Usklađivanje mašine za sečenje metalnih ojačanja sa zahtevima evropskih direktiva i odgovarajućih harmonizovanih standarda, LOLA Instituta (Interni projekat), Beograd, 2008.
- [2] Đapić, M., Zeljković, V., European Approach to Product Conformity Assessment, The Fifth International Conference "Heavy Machinery - HM 2005", Kraljevo, 28. June – 03 July, 2005., pp (IIC.13 – IIC.17).
- [3] Prešern, S. Notification body obligation, Project SCG-Quality, Course CA-1, Belgrade, 2005.
- [4] Blue Guide, Guide to Implementation of Directives Based on the New Approach and the Global Approach, Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2000.
- [5] ISO, Certification and related Activities, 1992.
- [6] EN 13985:2003, Machine Tools - Safty - Guillotine shears, CEN, 2003.

#### Autori:

- **dr Mirko Đapić**, Mašinski fakultet Kraljevo, Dositejeva 19, Kraljevo, (LOLA Institut Beograd, Kneza Višeslava 70a), [mdjapic@yahoo.com](mailto:mdjapic@yahoo.com); [djapic.m@mfvk.bg.ac.yu](mailto:djapic.m@mfvk.bg.ac.yu)
- **dr Vladimir Zeljković**, Institut tehničkih nauka SANU, Beograd, Kneza Mihaila 22, [valadazz@yahoo.com](mailto:valadazz@yahoo.com)
- **Aleksandar Urošević**, URBAN-Technics, Knez Mihailova 86, Valjevo, [aleksandar@urban-technics.com](mailto:aleksandar@urban-technics.com)
- **Anton Senkijevic**, URBAN-Technics, Knez Mihailova 86, Valjevo, [toni@urban-technics.com](mailto:toni@urban-technics.com)
- **Aleksandar Đurić**, TOC-Tehnički oopitni centar Vojske Srbije, Beograd, [toc@toc.vs.rs](mailto:toc@toc.vs.rs)



Zoran Marjanović, Radomir Brzaković

## DIJAGNOSTIČKE METODE ZA ODRŽAVANJE IZOLACIJE ASINHRONOG MOTORA

**Rezime:** Neočekivana pojava otkaza izolacije asinhronog motora u pogonima može izazvati velike materijalne troškove. Primenom adekvatnih dijagnostičkih metoda, otkaze izolacije možemo otkriti na vreme. U tom slučaju planiranje servisiranja i nabavke rezervnih delova su olakšani. Da bi dijagnostičke metode bile primenljive, neophodno je odabrati veličine iz kojih će se dobiti najviše podataka za dijagnostiku otkaza. Dijagnostika asinhronih motora je u svetskoj tehničkoj praksi područje koje se vrlo intenzivno razvija. U radu su date dijagnostičke metode za održavanje izolacije asinhronog motora.

**Ključne reči:** dijagnostika, održavanje izolacije, asinhroni motor

## DIJAGNOSTIC METHODS FOR MAINTENANCE ASYNCHRONOUS MOTOR ISOLATION

**Abstract:** Unforeseen event of failure at asynchronous motor isolation in industrial plants can produce a big material expenses. With adequate diagnostic methods, it is possible to find failure isolation just in time. In that case, service planing and spare parts purchasing are much easier. If diagnostic method should be applicable, it is necessary to choose variables from wich it can be obtained the most of data for failure diagnostic. Diagnostic of asynchronous motor in the world technical practice is the area in very expansive development. In this paper are given diagnostic methods for maintenance asynchronous motor isolation.

**Key words:** diagnostic, maintenance isolation, asynchronous motor

### 1. UVOD

Dijagnostika je pravovremeno ili periodičko određivanje stanja nekog motora s ciljem procene pouzdanosti daljeg rada i predlaganja načina i obima servisiranja [4]. Uloga dijagnostike je otkrivanje otkaza motora ili pojedinih njegovih delova u najranijoj mogućoj fazi, a samim tim povećava se pouzdanost i raspoloživost motora. Osnova dijagnostike je upoređivanje stvarnih i željenih ponašanja, odnosno parametara motora. U tome nam pomažu dijagnostički parametri i zato je bitno izabrati one prave. Dijagnostički parametar je merljiva fizička veličina prisutna u procesu rada motora.

Osnovna korist dijagnostike ogleda se u [1]:

- prelasku s korektivnog na proaktivno održavanje,
- smanjenju rizika materijalne štete,
- povećanju eksploatacione pouzdanosti,
- povećanju srednjeg vremena između otkaza i
- minimiziranju neplaniranih zastoja.

U literaturi se spominju različite metode kojima je moguće ustanoviti otkaz izolacije asinhronih motora. Za sve dijagnostičke metode potrebno je imati unapred definisane kriterijume prihvatljivosti, kako bi bilo jasno da li je rezultat ispitivanja prihvatljiv ili ne. Kriterijumi prihvatljivosti se određuju projektno-konstruktivnom dokumentacijom ili odgovarajućim međunarodnim ili priznatim nacionalnim standardima. Da bi se neki parametar koristio kao dijagnostički, mora da zadovolji neke osnovne zahteve koji se odnose na [1]:

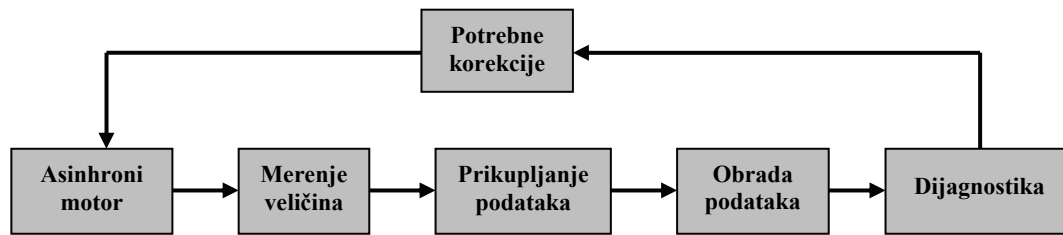
- jednoznačnost promene,
- dovoljnu osetljivost promene i
- pristupačnost i lakoću merenja.

Dakle, dijagnostika stanja nekog sistema složen je i zahtevan zadatak. Čitav dijagnostički sistem je prikazan na slici 1.

U tabeli 1 su definisani osnovni pojmovi, nazivi i definicije koji se odnose na održavanje motora.

Tabela 1. Osnovni pojmovi, nazivi i definicije [4]

<b>Otkaz</b> (Failure)	Uzrok odstupanja od nazivnog rada. Posledica otkaza je nedozvoljena promena parametara zbog koje je onemogućen pravilan rad motora.
<b>Praćenje stanja</b> (Condition Monitoring)	Periodičko ili neprekidno (on-line) nadgledanje rada motora u cilju otkrivanja stanja motora. Obuhvata prikupljanje, obradu i analizu pojedinih veličina iz kojih se mogu dobiti informacije o stanju motora.
<b>Održavanje</b> (Maintenance)	Tehničke radnje preduzete u cilju da se motor održi ili vrati u stanje da može ispunjavati traženu funkciju.
<b>Preventivno održavanje</b> (Preventive maintenance)	Održavanje koje se izvodi prema unapred određenim intervalima ili odgovarajućim propisanim kriterijima, u cilju smanjenja verovatnoće nastanka otkaza. Izvodi se prema utvrđenim terminima i vremenu rada motora.
<b>Dijagnostika</b> (Diagnostics)	Određivanje stanja motora. Na osnovu iskustava i znanja određuje se mesto otkaza. Određivanje uzroka odstupanja parametara motora.
<b>Nadgledanja</b> (Supervision)	Aktivnosti koje se vrše ručno ili automatski u cilju određivanja motora.
<b>Ekspertiza</b> (Expertise)	Ocena stanja i davanje mišljenja i preporuka za zamenu, popravku, reviziju ili revitalizaciju delova motora. Zasniva se na znanjima specijalista za pojedine tehničke oblasti, a na osnovu izvedenih dijagnostičkih ispitivanja, najčešće u servisima za popravku.



Slika 1. Faze dijagnostičkog sistema [1]

## 2. DIJAGNOSTIKA IZOLACIJE ASINHRONOG MOTORA

Izolacija je možda najvažniji deo asinhronog motora, iako se za svaki deo može tvrditi da je najvažniji, jer tek svi delovi čine celinu koju nazivamo asinhroni motor. Ipak, izolacija je ta koja omogućava da motor deluje, jer električno odvaja pojedine delove motora. Ako se izolacija ošteti, motor je odmah uništen. Stoga je potrebno da se ona kontroliše i ispituje tj. da se utvrdi stvarno stanje izolacije i ispitivanjima dobije potvrda da motor ima propisani stepen izolacije koji traže propisi.

Za izolaciju asinhronih motora, karakteristične su sledeće dijagnostičke metode [5]:

- merenje otpora izolacije,
- ispitivanje izolacije indukovanim naponom,
- ispitivanje izolacije dovedenim naponom.

## 3. MERENJE OTPORA IZOLACIJE

Pre nego što se izvrši priključenje asinhronog motora na napon, potrebno je izvršiti merenje otpora izolacije (jer izolacija nikad nije apsolutna, to se ne može postići, i kroz izolaciju uvek teče neka struja ako je motor pod naponom) kako između međusobno izolovanih namotaja tako i između namotaja i mase.

Na osnovu merenja otpora izolacije, možemo utvrditi:

- eventualna oštećenja, ovlaženja ili starenje izolacije,
- trenutno stanje izolovanosti asinhronog motora.

Kako je u toku radnog veka izolacija izložena različitim mehaničkim oštećenjima, zatim hemijskim procesima (vlaga, pare, gasovi i sl.), temperaturi i dr., vremenom dolazi do njenog starenja (gubitak izolacionih svojstava), a posebno je taj proces ubrzan ukoliko se motor nalazi u otežanim uslovima rada. Zbog toga praćenjem otpora izolacije možemo steći uvid o stepenu njenog oštećenja.

Merenje izolacijskog otpora je na neki način slično merenju omskog otpora, samo što se u ovom slučaju meri otpor izolacije, a ne žice. Na izvod faze kojom se meri izolacijski otpor priključuje se jedan kraj izvora jednosmernog napona, dok se drugi kraj priključuje na masu. U praksi jednosmerni napon koji se priključuje na asinhroni motor iznosi 1000 V i dok je napon priključen, meri se struja koja teče kroz izolaciju. Izolacija se sastoji uglavnom od izolatora kojima je specifična provodljivost manja od  $10^{-6}$  S/m. Dakle, kroz izolaciju teče struja reda veličine mikroampera i čine je tri komponente:

- apsorpcijska struja koja se javlja zbog gubitaka pri pojavi polarizacije u izolaciji,
- provodna (poprečna) struja koja postoji zbog slobodnih nosilaca elektriciteta i
- struja punjenja koja se javlja zbog kapacitivnog svojstva izolacije.

Apsorpcijska struja i struja punjenja s vremenom opadaju tako da se vrednost struje kroz izolaciju asimptotski približava iznosu provodne struje.

Sam otpor izolacije zavisi od:

- temperature - eksponencijalno opada sa porastom temperature,
- trajanja merenja – za vrednosti otpora dobro je uzeti onu koja se dobije u ustaljenom režimu, recimo posle 60 s),
- mernog napona,
- veličine asinhronog motora,
- vlage,
- vrste i debljine izolacionog materijala i dr.

Zato se na osnovu merenja ne sme odmah zaključivati koliki je otpor već se mora voditi računa o svim predhodno navedenim uticajima.

Uređaj, kojim se meri otpor izolacije zove se ommetar ili induktor. On ima prilagođenu skalu za očitavanje otpora izolacije koji se, zbog visine napona i vrlo male struje, meri u megaomima. Kako struja kroz izolator menja svoj karakter zavisno od početka merenja, otpor izolacije se očitava u tačno definisanim trenucima.

Američki IEEE propisi definišu očitavanje otpora izolacije nakon prve i desete minute od početka merenja [6].

Evropski propisi, koji definišu da se otpor izolacije očitava nakon 15 i nakon 60 sekundi od početka merenja. Odnos ove dve vrednosti daje indeks polarizacije [3]:

$$i_p = \frac{R_{60s}}{R_{15s}} \quad (1)$$

gde je:  $R_{15s}$  - otpor izolacije očitana nakon 15 sekundi, a  $R_{60s}$  - otpor izolacije očitana nakon 60 sekundi.

Indeksom polarizacije se može proceniti stanje izolacije, da li je ona vlažna, da li je masna, itd. To se uglavnom odnosi na starije motore, kojih u Zastava automobilima ima u velikom broju i u koje su ugrađivane izolacije klase B, koje su porozne i dosta higroskopne. Danas, se u motor ugrađuju izolacije u klasi F koje se još vakuumski impregniraju tako da nema više opasnosti od upijanja vlage. Zbog toga indeks polarizacije više nema tako važnu ulogu kao nekada.

U praksi se uzima da otpor izolacije mora iznositi najmanje onoliko megaoma, koliko iznosi napon napajanja u kilovoltima:

$$R_i [\text{M}\Omega] = U_n [\text{kV}] \quad (2)$$

## 4. ISPITIVANJE IZOLACIJE INDUKOVANIM NAPONOM

Pomoću ovog ispitivanja proverava se izolacija između namotaja, elemenata namotaja, između faza, odnosno drugim rečima "unutražnja izolacija".

Propisima je definisano da se ispitivanje vrši sa naponom na statorskom namotaju koji je 30% veći od nominalnog tj.

$$U_i = 1,3U_n \quad (3)$$

i traje 3 minuta.

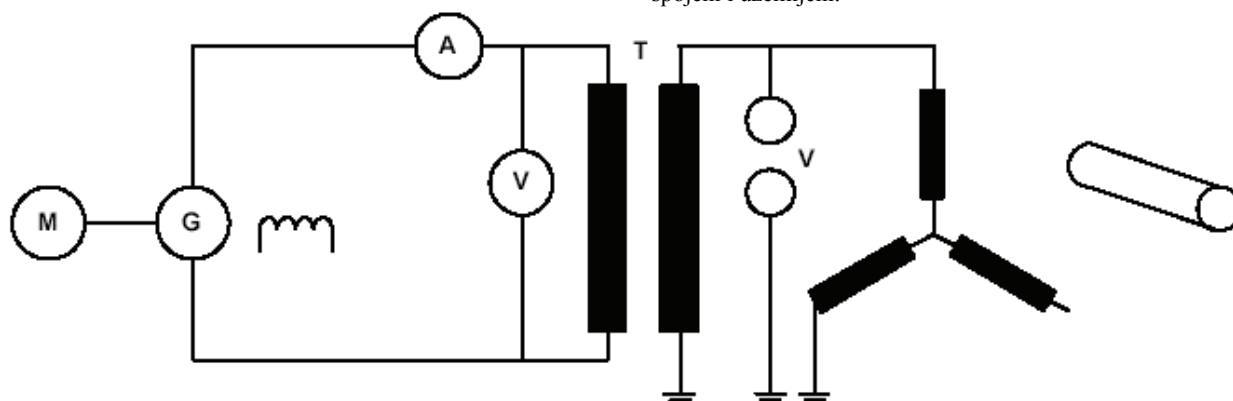
Za vreme trajanja ispitivanja prate se vrednosti struja kroz namotaj. Ako nema kratkih spojeva namotaja, struje će biti simetrične tj. njihove se efektivne vrednosti neće razlikovati za više od  $\pm 10\%$ .

## 5. ISPITIVANJE IZOLACIJE DOVEDENIM NAPONOM

Ovim ispitivanjem se proverava izolaciona čvrstoća između pojedinih namotaja i između namotaja i uzemljenih delova motora, tzv. "glavna izolacija".

Različiti nacionalni propisi definišu vrednosti ispitnog napona, koje pri ovom ispitivanju izolacija mora podneti određeno vreme.

Vrednosti ispitnih napona prema propisima VDE 0530, dati su u tabeli 2.



Slika 2. Šema za ispitivanje izolacije dovedenim naponom [2]

Ispitivanje treba započeti naponom koji nije veći od polovine punog ispitnog napona da bi se osigurali od eventualnih oštećenja izazvanih prelaznom pojavom. Zatim napon postepeno povećavamo. To povećanje mora biti kontinualno, a ako to nije moguće, skokovi napona ne smeju prekoračiti 5% konačne vrednosti. Minimum u kom namotaj mora biti ispitan računamo od trenutka kada se postigne puni napon.

Radi kontrole pri ispitivanju služe ampermetar i voltmetar na niskonaponskoj strani ispitnog transformatora (T). U slučaju proboja izolacije napon naglo padne a struja poraste. Oblik ispitnog napona mora biti sinusan i najtačnije se meri varničarem (V) na strani visokog napona ispitnog transformatora jer varničar reaguje na maksimalnu vrednost napona koja i dovodi do probijanja.

## 6. ZAKLJUČAK

Savremene strategije održavanja asinhronih motora u pogonima mora da podrazumeva primenu različitih dijagnostičkih metoda za održavanje izolacije motora i utvrđivanje posledica koje loše stanje izolacije može da prouzrokuje. U ovom radu se predlaže primena nekih metoda dijagnostike izolacije motora zasnovana na ispitivanju nekih parametara asinhronih motora. Ovakav pristup sprovođenju ispitivanja izolacije je u potpunosti u skladu sa sistemom kvaliteta ISO 9000. Prednosti ovakvog ispitivanja su:

- izbegavanje grube greške pri preračunavanju očitanih veličina tokom prikupljanja podataka, čime se značajno smanjuje merna nesigurnost,

Tabela 2. Vrednosti ispitnih napona prema VDE 0530

Asinhroni motor	Ispitni napon
Nazivne snage ispod 1 kW i nazivnog napona ispod 100 V	$2 U_n + 500 \text{ V}$
Nazivne snage do 10 MW i napona: do 2 000 V	$2 U_n + 1 000 \text{ V}$
od 2 000 V do 6 000 V	$2,5 U_n$
iznad 6 000 V	$2 U_n + 3 000 \text{ V}$

Vreme trajanja ispitivanja prema VDE propisima je 60 s i u toku tog vremena ne sme doći do probijanja kroz izolaciju.

Šema za ispitivanje izolacije asinhronog motora dovedenim naponom, data je na slici 2.

Ispitivanje se vrši tako da se propisani ogledni napon dovede između kratkospojenih priključaka ispitivanog namotaja i mase. Za vreme ogleda priključci ostalih namotaja su kratko spojeni i uzemljeni.

- smanjenje broja potrebnih ljudi uključenih u ispitivanje,
- pružanje dodatne garancije da su ispitivanja i izračunavanje karakterističnih veličina sprovedena korektno.

## 7. LITERATURA

- [1] Marjanović Z.: Rizik primene asinhronog motora kod vozila i mere upravljanja rizikom sa tehničkog, ekonomskog i ekološkog aspekta, Magistarski rad, CIMSI, Kragujevac, 2007,
- [2] Mitraković B.: Asinhronne mašine, Naučna knjiga, Beograd, 1996.
- [3] Jeremić B.: Tehnologija održavanja tehničkih sistema, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1992.
- [4] Tavner P. J., Penman J.: Condition Monitoring of Electrical Machines, John Wiley & Sons Inc., New York, 1997.
- [5] Nandi S., Toliyat H. A.: Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Machines, IEEE Industry Applications Conference Thirty - Fourth IAS Annual Meeting, 1999.
- [6] Haji M., Toliyat A.: Pattern Recognition – A Technique for Induction Machines Rotor Broken Bar Detection, IEEE Trans. on Energy Conv., 2001.

**Autori:** mr Zoran Marjanović, dipl. maš. ing., Zastava automobili – DRA Istraživačko-razvojni centar, Trg Topolivaca 4, Kragujevac

**Radomir Brzaković**, dipl. inf., Zastava automobili – PJ Informacioni sistemi, Kragujevac, email : [brzijax@yahoo.com](mailto:brzijax@yahoo.com)







Sandra Milunović, Ratomir Ječmenica

## METODA STRUKTURIRANJE FUNKCIJE KVALITETA (QFD) U PLANIRANJU KVALITETA PROIZVODA: TRADICIONALNI I FUZZY PRILAZ

**Rezime:** Opstanak preduzeća na tržištu ograničen je njegovom sposobnošću za identifikaciju zahteva korisnika i posedovanjem kapaciteta za razvoj novih proizvoda [1]. Strukturiranje funkcije kvaliteta (Quality Function Deployment - QFD) je metoda koja se koristi kao značajan deo procesa razvoja novog proizvoda. U istraživanju čiji rezultati su prikazani u ovom radu primenjena je metoda QFD (tradicionalni i fuzzy prilaz) za formiranje plana unapređenja kvaliteta sapuna. Analiza je zasnovana na oceni značaja pojedinih karakteristika za kvalitet proizvoda od strane korisnika.

**Cljučne reči:** Razvoj proizvoda, Metoda QFD, Tradicionalni prilaz, Fuzzy prilaz, Plan unapređenja kvaliteta.

## QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT (QFD) IN THE PRODUCT QUALITY PLANNING: TRADITIONAL AND FUZZY APPROACH

**Abstract:** The company subsistence on the market is heavily dependent on its capacity to identify new customer requirements and to develop a new product. The Quality Function Deployment (QFD) is method which can be used in new product development process [1]. In research which results are presented here, QFD method (traditional and fuzzy approach) was applied for creating soap quality improvement plan. Analysis is based on customer's evaluation about importance of some characteristics for product quality.

**Keywords:** Product development, QFD method, Traditional approach, Fuzzy approach, Quality Improvement Plan.

### 1. UVOD

U istraživanju, čiji su rezultati predstavljeni u ovom radu, razmatrane su karakteristike kvaliteta sapuna kao veoma važnog proizvoda za svakodnevni život čoveka. Cilj istraživanja bilo je utvrđivanje relativnog i apsolutnog značaja pojedinih karakteristika sapuna, kao osnove za formiranje plana kvaliteta proizvoda. Postoje brojni kriterijumi za izbor sapuna: miris, boja, veličina, sastav, cena itd. [3]. Organizacija proizvođač nije u stanju da zadovolji u potpunosti sve zahteve korisnika. Zbog toga je neophodno utvrditi koje karakteristike su značajnije od drugih i raditi pre svega na njihovom unapređenju. U radu je data analiza značaja pojedinih karakteristika sapuna za njegov kvalitet korišćenjem QFD metode (tradicionalnog i fuzzy prilaza), a na bazi ocene od strane korisnika. Rezultati analize predstavljaju osnovu za formiranje plana unapređenja kvaliteta proizvoda.

### 2. METODA QFD: TRADICIONALNI PRILAZ

Metoda QFD je sistematska i analitička tehnika za prikupljanje informacija o očekivanjima korisnika. Ona se koristi u procesu planiranja, kroz prevođenje zahteva („glasa“) korisnika u odgovarajuće karakteristike kvaliteta za svaku fazu životnog ciklusa proizvoda (marketing, planiranje, projektovanje proizvoda, razvoj prototipa, ispitivanje i razvoj procesa proizvodnje, proizvodnja, prodaja) [4].

Koncept metode QFD je podeljen na dve osnovne aktivnosti: razvoj kvaliteta proizvoda i strukturiranje funkcije kvaliteta. Razvoj kvaliteta proizvoda pretvara „glas korisnika“ u karakteristike kvaliteta. Strukturiranje funkcije kvaliteta ispituje reakciju (odgovor) preduzeća na zahteve korisnika [5].

Matrica QFD („kuća kvaliteta“) se sastoji iz sedam delova (faza) [6]: utvrđivanje „glasa korisnika“, ocena konkurentnosti sa aspekta korisnika (tabele 1, 2 i 3), određivanje karakteristika kvaliteta, utvrđivanje međusobne korelacije između karakteristika kvaliteta (tabela 4), ocena

stepena konkurentnosti sa tehničkog aspekta, plan unapređenja kvaliteta.

Spisak korisničkih zahteva određen je upotrebom literature i metodom Brainstorming u preduzeću koje je odabrano za istraživanje. Nakon prikupljanja podataka sačinjena je sledeća lista zahteva korisnika:

1. cena,
2. marka,
3. miris,
4. vitamini,
5. prirodnost,
6. preventiva opekotina očiju,
7. omekšavanje kože,
8. obezbeđenje sjaja kože,
9. lako penušanje,
10. lako ispiranje,
11. pakovanje,
12. ergonomija,
13. podesnost za kožu.

Primenom strukturiranog upitnika, ispitano je 250 korisnika, koji su određivali značaj pojedinih karakteristika dodeljujući im vrednosti na skali od 1 do 5, pri čemu vrednost 5 označava veoma značajan zahtev, a 1 - zahtev sa relativno malim značajem. U tabeli 1 data je srednja vrednost i standardno odstupanje ocene korisnika o značaju pojedinih karakteristika proizvoda. Analiza faktora, kao multivarijantna tehnika, povezuje 3 karakteristike u faktor 1, 3 karakteristike u faktor 2, dve karakteristike u faktor 3, tako da postoji jedinstven ideo tri faktora u svakoj od 8 karakteristika (tabela 2) [5].

U predmetnom istraživanju razmatrano je sedam značajnih karakteristika kvaliteta definisanih u [4]: performanse, specijalna svojstva, pouzdanost, usaglašenost sa standardima, trajnost, ispravnost i estetika. Iako se u [7] tvrdi da je pouzdanost karakteristika kvaliteta koja se više vezuje za trajnije (tehničke) proizvode, mnogo je primera koji ukazuju na pouzdanost kao ključni atribut usluga ili potrošnih dobara.

**Tabela 1:** Srednja vrednost i standardno odstupanje ocene korisnika o značaju pojedinih karakteristika sapuna

Promenljiva (karakteristika)	Srednja vrednost	Standardno odstupanje
Pakovanje	2,71	1,25
Cena	3,05	1,23
Preventiva opekotina očiju	3,09	1,36
Ergonomija	3,09	1,33
Marka	3,70	1,20
Lako penušanje	3,85	0,99
Miris	3,90	1,06
Lako ispiranje	3,96	1,02
Prirodnost	4,05	1,02
Vitamini	4,25	0,97
Omekšavanje kože	4,33	0,92
Obezbeđenje sjaja	4,35	0,91
Prikladnost za kožu	4,50	0,64

**Tabela 2:** Faktori značaja

Karakteristike	Faktor		
	1	2	3
Obezbeđenje sjaja	0,800		
Omekšavanje kože	0,657		
Miris	0,572		
Prirodnost		0,851	
Vitamini		0,747	
Prikladnost za kožu		0,703	
Lako penušanje			0,817
Lako ispiranje			0,803

### 3. METODA QFD: FUZZY PRILAZ

Ulazi u obliku ocena koji se dobijaju primenom upitnika, intervjua i drugim metodama predstavljaju izvor neodređenosti u pokušaju da prikupljeni podaci budu kvantifikovani. Fuzzy logika nalazi primenu u redukcovanju neodređenosti prikupljenih podataka. Fuzzy logika ima neka korisna svojstva, pogodna za upotrebu u metodi QFD:

□ korišćenje lingvističkih izraza u predstavljanju znanja o proizvodu,

□ omogućavanje donošenja odluka na bazi ocenjenih vrednosti do kojih se došlo na osnovu nekompletnih ili neodređenih informacija,

□ pogodnost za rasuđivanje na osnovu neodređenosti,

□ jednostavnost i lakoća tumačenja i razumevanja njenih pravila,

□ primena kod proizvoda sa više ulaza i više izlaza.

U fuzzy pristupu QFD precizne vrednosti su pretvorene u fuzzy brojeve, koje se mogu posmatrati kao raspodela verovatnoće. Matematički, može se pisati:

$$A_{ij} = [\alpha_{1ij}, \alpha_{2ij}], \quad (1)$$

gde je:

$A_{ij}$  - simetričan trouglast fuzzy broj, definisan intervalom  $[\alpha_{1ij}, \alpha_{2ij}]$ . Koristeći isti način označavanja, tipična funkcija pripadnosti za simetričan fuzzy trouglasti broj  $A_{ij}$ , može biti izražena kao:

$$\mu_{A_{ij}}(\alpha_{ij}) = 1 - \frac{\alpha_{ij} - \frac{\alpha_{2ij} - \alpha_{1ij}}{2}}{\frac{\alpha_{2ij} - \alpha_{1ij}}{2}}, \alpha_{ij} \in A_{ij} \quad (2)$$

Skalar kojim se množi trouglasti fuzzy broj i zbir dva simetrična trouglasta fuzzy broja može se predstaviti na sledeći način [6]:

$$\lambda \cdot [\alpha_1, \alpha_2] = [\lambda \cdot \alpha_1, \lambda \cdot \alpha_2] \quad (3)$$

$$[\alpha_1, \alpha_2] \cdot [\beta_1, \beta_2] = [\alpha_1 \cdot \beta_1, \alpha_2 \cdot \beta_2], \quad (4)$$

gde  $\lambda$  označava skalar kvantiteta, a  $[\alpha_1, \alpha_2]$  i  $[\beta_1, \beta_2]$  su intervali dva simetrična trouglasta fuzzy broja, respektivno.

U predmetnim istraživanjima individualna ocena je generisana kao:

$$\text{Individualna ocena} = \sum_j^n A_{ij} X_j, \quad (5)$$

$$A_{ij} = [\alpha_{1ij}, \alpha_{2ij}], \quad (6)$$

gde  $A_{ij}$  i  $X_j$  označavaju relativan značaj i-te karakteristike u vezi j-te potrebe korisnika u matrici veza i značaj j-te potrebe korisnika opažene od strane korisnika, koju korisnik ocenjuje, respektivno.

Ovde je, radi poređenja određene (jasne) individualne ocene i fuzzy individualne ocene, korišćena normalizovana individualna ocena [6].

Normalizovana individualna ocena za svaku karakteristiku može biti određena kao:

$$\text{Normalizovana individualna ocena} = \frac{\text{Individualna ocena}}{\text{Maksimalna ind. ocena}} \quad (7)$$

Relativan značaj i ocena korisnika mogu biti lingvističke ili precizne promenljive. Kao što je već rečeno, lingvistički izrazi kao što su: jaka veza (s), umerena veza (m) ili slaba veza (w), primenjuju se da opišu relativan značaj, umesto vrednosti 9, 3 i 1. Ovi lingvistički izrazi najpre su prevedeni u trouglaste fuzzy brojeve (tabela 5).

Tabela 6 predstavlja ocenu korisnika i relativan značaj primenom lingvističkih promenljivih. Rangiranje lingvističkih vrednosti za kvantifikovanje veze je unapred intuitivno određeno. U predmetnim istraživanjima vrednost neodređenosti je definisana na nivou  $\pm 0,1$  i to je prikazano u koloni ocene u tabeli 6.

**Tabela 5.** Definicija lingvističkih promenljivih

Lingvističke varijable	Fuzzy broj
Jaka veza (s)	$[0,6 \div 1,0]$
Umerena veza (m)	$[0,3 \div 0,7]$
Slaba veza (w)	$[0,0 \div 0,4]$

Primenom fuzzy prilaza QFD, individualne ocene su izračunate korišćenjem izraza (5) i (6). Onda su pretvorene u normalizovane individualne ocene primenom jednakosti (7).

Utvrdjivanje individualne ocene sprovodi se prema sledećem postupku, a rekapitulacija je data u tabeli 6 korišćenjem fuzzy prilaza QFD.

a) ocena performansi:

$$\sum A_{ij} X_j = (16,11 \cdot 0,00; 16,31 \cdot 0,4) + (16,60 \cdot 0,00; 16,80 \cdot 0,4) + (7,88 \cdot 0,00; 8,08 \cdot 0,00) + (11,93 \cdot 0,6; 12,13 \cdot 1,00) + (11,60 \cdot 0,30; 11,80 \cdot 0,70) + (16,57 \cdot 0,30; 16,77 \cdot 0,70) + (7,88 \cdot 0,60; 8,08 \cdot 1,00) + (10,63 \cdot 0,60; 10,83 \cdot 1,00) = (26,715; 64,283)$$

Sve ostale ocene izračunate su korišćenjem prikazanog prilaza.

- b) ocena specijalnih svojstava:  
 $\sum A_{ij}X_j = (49,56; 90,72)$   
 c) ocena pouzdanosti:  
 $\sum A_{ij}X_j = (40,674; 81,594)$   
 d) ocena usaglašenosti sa standardima:  
 $\sum A_{ij}X_j = (59,52; 100,80)$   
 e) ocena trajnosti:  
 $\sum A_{ij}X_j = (15,261; 51,161)$   
 f) ocena ispravnosti (pogodnosti):  
 $\sum A_{ij}X_j = (29,76; 70,56)$   
 g) ocena estetike:  
 $\sum A_{ij}X_j = (36,483; 69,779)$   
 Maksimalna individualna ocena iznosi 100,80.

Izračunavanje normalizovanih individualnih ocena sprovodi se prema sledećem postupku, a rekapitulacija je data u tabeli 6 korišćenjem fuzzy prilaza QFD.

- Normalizovana individualna ocena za performanse:  
 $= (26,715/100,80; 64,283/100,80) = (0,265; 0,638)$   
 Normalizovana individualna ocena za specijalna svojstva:  
 $= (49,56/100,80; 90,72/100,80) = (0,492; 0,9)$   
 Normalizovana individualna ocena za pouzdanost:  
 $= (40,764/100,80; 81,594/100,80) = (0,404; 0,809)$   
 Normalizovana individualna ocena za usaglašenost sa standardima:  
 $= (59,52/100,80; 100,80/100,80) = (0,590; 1,00)$   
 Normalizovana individualna ocena za trajnost:  
 $= 15,261/100,80; 51,161/100,80) = (0,151; 0,508)$   
 Normalizovana individualna ocena za ispravnost (pogodnost):  
 $= (29,76/100,80; 70,56/100,80) = (0,295; 0,70)$   
 Normalizovana individualna ocena za estetiku:  
 $= (36,483/100,80; 69,779/100,80) = (0,362; 0,10)$

Ocene vezane za tradicionalni prilaz QFD su takođe normalizovane. Kao što je već rečeno, normalizovana individualna ocena izračunata je deljenjem individualne ocene sa maksimalnom ocenom. Maksimalna individualna ocena u tradicionalnom prilazu je dobijena u vrednosti 900,00. Ova vrednost ocene pokazuje da karakteristika "usaglašenost sa standardima" ima najveću vrednost (videti tabelu 4). Za svaku karakteristiku sapuna normalizovane vrednosti date su u sledećem obliku:

- Normalizovana individualna ocena za performanse:  
 $= 394,68/900 = 0,4385$   
 Normalizovana individualna ocena za specijalna svojstva:  
 $= 852,12/900 = 0,9468$   
 Normalizovana individualna ocena za pouzdanost:  
 $= 709,74/900 = 0,7886$   
 Normalizovana individualna ocena za usaglašenost sa standardima:  
 $= 900/900 = 1,00$   
 Normalizovana individualna ocena za trajnost:  
 $= 222,96/900 = 0,2477$   
 Normalizovana individualna ocena za ispravnost (pogodnost):  
 $= 276,60/900 = 0,3073$   
 Normalizovana individualna ocena za estetiku:  
 $= 537,99/900 = 0,5978$

Rezultati, dobijeni tradicionalnim postupkom i fuzzy prilazom uporedno su prikazani u tabeli 7.

U oba prilaza, usaglašenost sa standardima je određena kao najznačajniji tehnički zahtev kod kreiranja plana kvaliteta razmatranog proizvoda. Na drugom i trećem mestu po značaju kod tradicionalnog i fuzzy prilaza QFD su specijalna svojstva, odnosno pouzdanost proizvoda. U tradicionalnom prilazu QFD redosled po značaju tehničkih zahteva je ispravnost, performanse, trajnost i estetika, dok je kod fuzzy prilaza taj poredak drugačiji i izgleda ovako: estetika, performanse, ispravnost i trajnost.

**Tabela 7.** Rezultati generisani putem primene fuzzy prilaza QFD i tradicionalnog prilaza QFD

Zahtevi za projekt.	Fuzzy prilaz QFD	Tradicionalni prilaz QFD
Performanse	0,451	0,44
Svojstva	0,70	0,95
Pouzdanost	0,61	0,79
Usagl. sa stand.	0,79	1,00
Trajnost	0,33	0,25
Ispravnost (pogodnost)	0,50	0,31
Estetika	0,23	0,60

#### 4. ZAKLJUČAK

U predmetnom istraživanju, razmotreno je kako može biti utvrđen plan kvaliteta za sapun koristeći metodu QFD u dva različita prilaza, tradicionalnom i fuzzy. Metoda QFD povezuje zahteve korisnika ili "šta" sa tehničkim zahtevima ili "kako", pa se na taj način "glas korisnika" transformiše u plan kvaliteta.

U razmatranom slučaju ustanovljeno je da, tokom formiranja plana unapređenja kvaliteta sapuna, pažnja treba da bude usmerena na različite karakteristike kvaliteta zavisno od toga koji prilaz metode QFD se koristi. Formiranje plana unapređenja kvaliteta u skladu sa rezultatima dobijenim primenom fuzzy QFD metode obezbediće značajnu konkurentsku prednost preduzeću u složenim i promenljivim tržišnim uslovima.

#### LITERATURA

- [1] Boucherau V., Rowlands H.: Methods and techniques to help Quality Function Deployment (QFD), Benchmarking: An International Journal, Vol. 7, No. 1, 2000, pp. 8-19.
- [2] Bramson A.: Soap: Making it, Enjoying it, Second Edition, Workman Publishing Company, New York, 1975.
- [3] Miller Cavitch S.: The Natural Soap Book: Making Herbal and Vegetable-Based Soaps, Storey Publishing, Pownal, Vermont, 1995.
- [4] Zaim M., Sevkli M.: The Methodology of Quality Function Deployment with Crisp and Fuzzy Approaches and an Application in the Turkish Shampoo Industry, Journal of Economic and Social Research, Vol. 4, No. 1, Jan. 2002, pp. 27-53.
- [5] Milunović S.: Razvoj i primena koncepta neodređenosti pri modeliranju u menadžmentu kvalitetom, Magistrski rad, 149 s., Tehnički fakultet, Čačak, 2005.
- [6] Khoo L. P., Ho N. C.: Framework of a fuzzy quality function deployment system, International Journal of Production Research. Vol. 34, No. 2, 1996, pp. 299-311.
- [7] Griffin J.: Customer Loyalty: How to earn It How to Keep It, Jossey-Bass Publishers, 2000.
- [8] Day R. G.: Quality Function Deployment: Linking a Company with its Customer, ASQC Quality Press.

**Autori: Sandra Milunović, Ratimir Ječmenica,**  
 Tehnički fakultet, Čačak, smilunovic@tfc.kg.ac.rs;  
 jecmenica@tfc.kg.ac.rs



**Tabela 3: Ocena konkurentnosti kod korisnika**

Nivo karakteristike		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prvi nivo (faktori)	Drugi nivo (karakterist.)	Ocena značaja	Ostvareni nivo kvaliteta	Konkurent X	Konk. Y	Konk. Z	Planirani nivo kvaliteta	Koef. poboljš.	Vrednost prodaje	Apsol. značaj karakter.	Relat. značaj karakter.
Faktor mogućnosti upravljanja (faktor 1)	Obezbeđenje sjaja	3,86	3,59	3,2	3,52	3,14	4,34	1,21	1,5	7,01	16,21
	Omekšavanje kože	3,85	3,44	3,4	3,43	3,25	4,31	1,25	1,5	7,22	16,70
	Miris	3,22	3,67	3,16	3,43	3,14	3,91	1,07	1	3,45	7,98
Faktor održavanja (faktor 2)	Prirodnost	3,44	3,21	3,16	2,83	2,81	4,05	1,26	1,2	5,20	12,03
	Vitamini	3,83	3,21	3,2	3,52	3,1	4,26	1,32	1	5,06	11,70
	Prikladnost za kožu	3,97	3,74	3,48	3,52	3,01	4,51	1,21	1,5	7,21	16,67
Faktor čistoće (faktor 3)	Lako penušanje	3,19	3,56	3,4	3,43	3,04	3,83	1,08	1	3,45	7,98
	Lako ispiranje	3,28	3,36	3,12	3,39	2,96	3,95	1,18	1,2	4,64	10,73
										43,24	100,00

**Tabela 4: Matrica veza između "glasa korisnika" i karakteristika kvaliteta**

Karakteristika kvaliteta		Perfor- manse	Specijalna svojstva	Pouzda- nost	Usaglaš. sa stand.	Trajnost	Ispravnost	Estetika
Faktor mogućnosti upravljanja (faktor 1)	Obezbeđenje sjaja	1	9	9	9	1	3	9
	Omekšavanje kože	1	9	9	9	3	3	9
	Miris	0	3	3	9	9	3	9
Faktor održavanja (faktor 2)	Prirodnost	9	9	3	9	1	3	9
	Vitamini	3	9	3	9	0	1	1
	Prikladnost za kožu	3	9	9	9	1	3	3
Faktor čistoće (faktor 3)	Lako penušanje	9	9	9	9	3	3	0
	Lako ispiranje	9	9	9	9	3	3	0
Značaj karakteristika kvaliteta		394,68 5	852,12 2	709,74 3	900 1	222,96 7	276,6 6	537,99 4

**Tabela 6. Ocena korisnika i relativan značaj**

	Ocena	Performanse		Specijalna svojstva		Pouzdanost		Usaglašenost sa stand.		Trajnost		Ispravnost (pogodnost)		Estetika	
Obezbeđenje sjaja	16,11-16,31	w		s		s		s		w		m		s	
Omekšavanje kože	16,60-16,80	w		w		s		s		m		m		s	
Miris	7,88-8,08			s		w		s		s		m		s	
Prirodnost	11,93-12,13			s		w		s		w		m		s	
Vitamini	11,60-11,80			m		s		s				m		w	
Prikladnost za kožu	16,57-16,77			m		s		s		w		m		m	
Lako penušanje	7,88-8,08			s		s		s		m		m			
Lako ispiranje	10,63-10,83			s		s		s		m		m			
Individualna ocena		26,715	64,283	49,56	90,72	40,674	81,594	59,52	100,80	15,261	51,161	29,76	70,56	36,483	69,779
Normalizovana individualna ocena		0,265	0,638	0,492	0,9	0,404	0,809	0,590	1,00	0,151	0,508	0,295	0,7	0,362	0,10



Miomir Vukićević

## STRUKTURA RADA UNIVERZITETSKIH NASTAVNIKA – TEHNIČKE NAUKE –

### REZIME

Usvajanjem i primenom Zakona o visokom obrazovanju [3], bitno su promenjeni ranije konstituisani uslovi odvijanja univerzitetske nastave, [1, 2]. Nova 'pravila' bitno menjaju obim i sadržaj rada, odnosno uspostavljaju se novi metodi, novi i obavezni sadržaji ... Zahteva se permanentni rad studenata. Pojačana je dinamika obaveza tokom semestra. Ukinuta su prava studenata na prenos ispita u narednu godinu studija. Od nastavnih radnika očekuje se i sve više zahteva da studente uče kako bi se povećala prohodnost (mentorski). Implicitno se ukazuje na potrebu smanjenja troškova univerzitetske nastave, ali se ne insistira na podizanju kvaliteta studija.

Odsustvo protivljenja navedenim promenama, nije istovremeno i garancija, odnosno dokaz da se te promene rado i bespogovorno prihvataju i primenjuju. Ali i da su prave i konačne, takođe.

Radom se ukazuje na suštinsku nedorečenost predmetnog zakona. Aksiomski se polazi od nepoznavanja oblasti koja se uređuje i nedoraslosti zakonopisca izradi ovakvog akta.

**Gljučne reči:** Zakon o univerzitetu, univerzitetska nastava, univerzitetski nastavnici, nastavni proces, naučno – istraživački rad, saradnja sa privredom.

### ABSTRACT

Adopting and applying the law on higher education are significantly altered previously established conditions of operation of university teaching. The new "rules" significantly change the scope and content of the work of lecturers, and establish new methods, new and required facilities ... Permanent work of the students is required. Pace of obligations is increased during the semester. The law abolished the right of students to transfer exam in the next year of study. From lecturers is expected even more, students are expected to learn, almost mentor way, in order to increase transience. Implicitly is indicated to the need of reducing the cost of university teaching, but there is no too much insistence on raising the quality of studies.

Absence of opposition from the above changes, it is not also a guarantee or proof that these changes willingly and obediently are accepted and applied. But, also that they are real and final. This article points to substantial understatement of the law. Axiomatic proceeds from no understanding of the field which is edited and from inadequacy of legislator to development of this act.

**Keywords:** law on higher education, university teaching, university teachers, teaching, scientific research, cooperation with the economy.

## 1. PROLOG

Svojevremeno je sporadično ali snažno iskazano protivljenje promeni definicije univerziteta po kojoj bi trebalo od naučno-nastavne da postane nastavno-naučna ustanova (početak devedesetih). Malobrojni oponenti etiketirani su kao sitničari i dezavuisani oportunističkim ponašanjem većine. Bio je to svojevrsan test univerzitetske javnosti. Kako u pogledu sposobnosti pružanja otpora predstojećim promenama tako i shvatanja njihovog sadržaja i dometa.

Raspad države, ratni vjhor građanskih ratova, sankcije, opšte siromašenje, političke bure i smene vlasti odložile su promene do početka novog milenijuma.

Prvo rešenje zakonskog uređivanja ove oblasti nije donelo velike i radikalne novine [2], uprkos dobrim uslovima koje su karakterisali aktuelni tzv. Šešeljev zakon [1], i razvijena snažna medijska i politička propaganda. Ipak, to je još jedna, nenamerna, neželjena ali konačna i, svakako, vredna proba intelektualnih snaga univerziteta.

U narednih nekoliko godina svim sredstvima stvarana je negativna slika i omalovažavan aktuelni sistem obrazovanja (kompletno, od osnovnog do univerzitetskog), za šta su korišćeni primeri debilnih testova na kojima naši učesnici, prirodno, nisu mogli da pokažu nikakvo znanje. Osnovna argumentacija je da postojeći obrazovni sistem ne stvara upotrebljiva znanja, već da je faktografski i bubalački, te beskoristan a veoma skup. Javnost je pripremljena za

predstojeće promene i stvorena je podrška za slamanje eventualnog otpora usvajanju Zakona o visokom obrazovanju (prvi put to više nije zakon o Univerzitetu).

Organizuje se, bolje reći fingira se, javna rasprava pod strašnim "pritiskom" ulaska Srbije u procese evropskih integracija. Savršeno sinhronizovana akcija panike, smutnje i farse. Vreme rasprave vrlo je kratko (nepun mesec dana),

proces transfera primedbi i predloga usmeren i hijerarhijski organizovan – cenzura nevidenih razmera.

Zakon o visokom obrazovanju, konačno i sa velikom "evropskom podrškom", usvojen je i primenjuje se na osnovu nenaučnog metoda eksperimenta *in vivo*.

Za one koji su prognozirali pogubne posledice njegove primene, nekoliko loših osnovnih postavki nije bilo sporno. Najpre, uslov da se sa striktno određenim brojem ECTS bodova upisuje naredna godina studija, posle dugogodišnjeg "omekšavanja" uslova upisa (čime je "verifikovan" pad ulaznog kvaliteta usled brojnih državnih i nacionalnih turbulencija, sankcija i štrajkova u školama), predstavlja ne samo nepoznavanje naše stvarnosti već čisti inat realnom stanju i vredanje prosečne inteligencije. U istoj ravni je fiktivna liberalizacija izbora u nastavnička zvanja kojom se nastavljaju i podstiču korupcija i nepotizam, sa jedne, a prenormiranjem se proizvodi nemoralno zaoštavanje uslova izbora u svim univerzitetskim zvanjima, sa druge strane. Onemogućen je kontinuitet izbora i evolutivna smena

generacija. Grubo je poništena civilizacijska tekovina i pravna doktrina po kojoj se novi zakoni primenjuju od dana donošenja a ne retroaktivno.

U oblasti prirodnih i tehničkih nauka, nekritičko insistiranje na jednosemestralnim predmetima, neminovno proizvodi pad nivoa stečenih znanja i njihovog kvaliteta, naravno.

Treća ključna novina Zakona odnosi se na povećanje obaveza nastavnika u radu sa studentima. I ona ima najmanje dve posledice. Prva proističe iz nove metodologije rada za čiju je kvalitetnu implementaciju neophodna dobro osmišljena obuka nastavnika, manje ili značajnije obavezna, ali je potpuno izostala. Druga posledica ogleđa se u povećanju vremena angažovanja nastavnika u nastavi u odnosu na raniju praksu (nije sporna, ali je evidentna).

I, na kraju, ali ne i konačno, Univerziteti se centralizuju tako da se od ogromnih, ranije, razuđenih zajednica fakulteta stvaraju centralizovane mastodontske organizacione forme koje poprimaju feudalne ili statističke atribute (primer osionog ponašanja BU u relaksaciji uslova upisa narednih godina studija i u opredeljivanju upisne politike). Razvlašćena, i podeljenih ingerencija, ministarstva Prosvete i Nauke postaju nemi posmatrači i kritičari stanja koje se sve više pretvara u svoju suprotnost. Decentralizovanost univerziteta je decenijska tekovina koju, pokazalo se, nije tako lako promeniti, posebno nekritičkim preslikavanjem iz drugih sredina i državnih sistema.

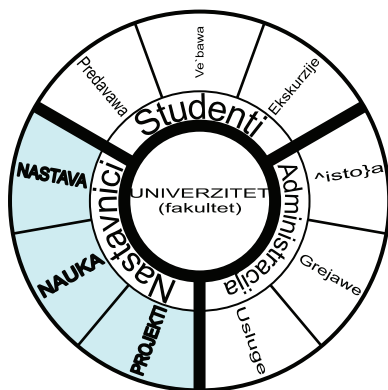
Obaveznost angažovanja nastavnika u naučno istraživačkoj delatnosti nije ni na koji način promenjena. Ni umanjena ni uvećana. U “preporukama o bližim uslovima za izbor u zvanja nastavnika”, [6], proširuje se struktura i broj elemenata, tako da nastavnik, kao kompletna ličnost, treba da ispunjava uslove izvrsnosti u pogledu:

- ‡ nastave,
- ‡ naučnoistraživačkog, odnosno umetničkog, stručnog i profesionalnog doprinosa,
- ‡ doprinosa akademskoj i široj zajednici.

Ovim elementima odgovara model genija (Nobelovac, u najmanju ruku), izuzetan pedagog i veoma angažovan društveni radnik. Nažalost, ispušten je domen saradnje sa privredom.

Insistira se na smanjenju finansijske potpore države i skriveno se ukazuje da opstanak zavisi od sopstvenih prihoda (finansiranje po modelu tri trećine). Ni jednim potezom tokovi kapitala ne usmeravaju se ka univerzitetu.

Navedene teze se, u ovom radu, konfrontiraju funkcionalnoj strukturi univerziteta (fakulteta), slika 1, čime se ukazuje na neodrživost opstajanja integralnih obaveza univerzitetskih nastavnih radnika i neophodnost hitne normativne i stvarne distribucije tri ključne oblasti njihovog angažovanja, posebno kada je reč o fakultetima tehničke provenijencije.



Slika 1. Funkcionalna struktura Univerziteta (fakulteta).

## 2. NASTAVNI PROCES

U ranijim vremenima, odnosno u vremenima koja je karakterisala primena svih varijanti Zakona o univerzitetu, u nastavi se primenjivao klasični ekskatedarski princip držanja nastave (*ex cathedra*<sup>1)</sup>). Ostvaruje se kroz odsustvo interakcije sa slušaocima u bilo kom obliku. Studenti, na kraju semestra ili školske godine, polažu ispit na osnovu ceduljice sa tri (najčešće) ili više pitanja. Na tehničkim fakultetima primenjuju se pismeni delovi ispita kao eliminaciono sredstvo (gruba selekcija). Karakteristika studentskog rada je kampanja a ispiti se polažu na hazarderskom principu i principu iscrpljivanja.

Ekskatedarski metod odgovara svim učesnicima nastavnog procesa. Nastavnici nisu previše opterećeni obavezama u nastavi tako da su ostatak vremena posvećeni “bavljenju naukom”, i, posebno, neposrednoj saradnji sa privredom (“biznis”). U periodu ograničenom ispitnim rokovima, studenti eksploatišu iluziju intelektualne avangarde u nastajanju i revolucionarne mladosti baveći se duhovnim stvaralaštvom i izgradnjom sopstvene ličnosti i/ili društva u celini.

Na osnovu Zakona o visokom obrazovanju uspostavljaju se novi metodi rada koji u nastavu uvode kombinovani princip iznošenja nastavnih sadržaja:

- ‡ ekskatedra (*ex cathedra*), i
- ‡ kejs (*case*<sup>2)</sup>).

U osnovi navedenih oblika nastave ugrađeni su dodatni elementi kojima se studenti permanentno vežu za odgovarajuću nastavnu disciplinu i povećava njihovo angažovanje tokom celog semestra, poput izrade i odbrane:

- ‡ seminarских radova,
- ‡ stručnih projektnih zadataka,
- ‡ konstrukcionih zadataka,
- ‡ domaćih zadataka,
- ‡ prezentacija (*MS PowerPoint*),
- ‡ izveštaja sa laboratorijskih vežbi, itd.

Metod ekskatedre primenjen je za izvođenje klasičnih predavanja i iznošenje teorijskih osnova obuhvaćene materije. U cilju stimulacije kvalitetnog praćenja izlaganja, izrađuju se i na početku časa dostavljaju studentima pomoćni materijali u obliku priprema za predavanja i vežbi (papirni oblik<sup>3)</sup>). Obavezna je primena računarske prezentacije (*MS PowerPoint* ili slično), koja bitno utiče na povećanje razumevanja tekućih izlaganja i bolje pamćenje iznetih činjenica i podataka.

Kombinovni princip zahteva obimnu pripremu, puno uloženog rada i potrošenog vremena a zasniva se na:

- ‡ permanentnom praćenju predmetne naučne discipline i rezultata koji se u toj oblasti postižu u nas i u svetu, i
- ‡ neprestanom inoviranju papirnih priprema i prezentacija (nedopustivo je da se iste pripreme i prezentacije koriste u dva ciklusa predavanja).

Pripreme i prezentacije predstavljaju pomoćni nastavni materijal, postavljaju se na WEB stranicu fakulteta, pa je, stoga, potrebno da su visokog kvaliteta i da prođu recenziju kompetentnih poznavalaca nastavnog sadržaja (sastavni deo dokumenata).

Nastavni sadržaj zasnovan na primeni kejs metoda ostvaruje se kroz interaktivnu analizu i izradu unapred pripremljenih (pre početka časa), pomoćnih nastavnih materijala ili protokola primera iz prakse (projekti, tehnologije), i koji su studentima dostupni u skriptarnici i/ili na WEB stranicama fakulteta.

<sup>1)</sup> *eks kathedra, lat.*, sa katedre sa merodavnog mesta, učeno, nepogrešivo; Lj. Mićunović, Školski rečnik, 2007.

<sup>2)</sup> *case, engl.*, slučaj, okolnost, činjenica, argument: M. Cvekić, Poslovni rečnik, 2006.

<sup>3)</sup> Na tehničkom fakultetu u Novom Sadu, za svaki dvočas, u obimu 6-8 stranica, odštampan ili pisan rukom i podeljen studentima, [4].

Osnovni cilj primene kombinovanog metoda jeste postizanje aktivnog učešća studenata na predavanjima.

Izrada seminarskih radova, projektnih, konstruktivnih i domaćih zadataka, prezentacija i izveštaja sa laboratorijskih ispitivanja (vežbe), sastoji se u nadgledanoj pripremi i izradi (mentorski), proveri i ocenjivanju ostvarenih rešenja. U nekim slučajevima (nastavnim predmetima), nije neophodna primena klasične podele na predispitne i ispitne aktivnosti. Recimo, na konstruktivnim predmetima, suvišan je ispit u svom klasičnom obliku (slika 2).

Svaki nastavnik u obavezi je da objavi sopstveni udžbenik i pomoćnu literaturu (praktikum, zbirka, repertorijum). Time nije amnestiran obavezne izrade pomoćnih nastavnih sredstava.

Studenti moraju da budu potpuno i detaljno informisani o načinu sticanja poena/bodova na svakom elemntu koji se ocenjuje/vrednuje, slika 2. Ukoliko se ispit razume kao način provere teorijskog znanja, onda se taj cilj postiže kroz odbranu svakog projektnog zadatka putem tri elementa:

- ‡ odbrana projekta (znanje) – do 8 poena,
- ‡ funkcionalnost konstrukcije – do 5 poena, i
- ‡ estetika – do 2 poena.

Stoga, kroz odbranu projektnih zadataka, ukupno, student može da sakupi 32 poena, što se približno uklapa u Zakonom predviđeni okvir (predispitne obaveze+ispit = 70+30 poena).

Šematski prikaz indikativan je u drugom smislu. Naime, on vrlo ubedljivo pokazuje kolike su vremenske i radne obaveze nastavnika tokom jednog semestra. I koliko su te obaveze značajno veće i raznovrsnije od ranije prisutnih. Ranija zakonska rešenja predviđala su normu od 2 časa predavanja za nastavnika. Danas je ta norma podignuta na šest časova sa nagoveštajima i tendencijom uvećanja. S obzirom da je status asistenata bitno drugačije uređen i da nastavnici u velikoj meri preuzimaju i taj domen rada u nastavi (u odnosu na raniju poziciju i zadatke asistenata), da nastavnici mogu da budu izabrani za mentora za izradu završnog rada (ima tretman nastavnog predmeta koji se realizuje tokom celog semestra), da sličan obim zadataka ostvaruju na master i doktorskim studijama, kao i da mogu i na tim nivoima studija da budu angažovani u svojstvu mentora, očigledno je da se obim obaveza u nastavi enormno povećava.

### 3. NAUČNO ISTRAŽIVAČKI RAD

Naučno istraživački rad na univerzitetima realizuje se kroz izradu projekata koje finansira Ministarstvo za nauku i/ili kroz međunarodno finansirane projekte. Drugi oblik ostvaruje se kroz izradu magistarskih radova (master) i doktorskih teza. Bilo da su samo članovi istraživačkog tima ili rukovodioci projekta, nastavnici su u obavezi da ostvarene rezultate afirmišu putem naučnih skupova ili objavljivanjem radova u naučnim časopisima. Novina nametnuta tumačenjem Zakona o visokom školstvu jeste objavljivanje radova u časopisima sa tzv. SCI liste. To su elementi na kojima se utvrđuje uslov sticanja i napredovanja u nastavnim zvanjima (zvanja su nastavna a kriterijumi su naučni), s tim da se oni klasifikuju prema značaju skupa i/ili časopisa. Jedino radovi objavljeni u časopisima sa SCI liste imaju apsolutnu vrednost.

Prema [6], elementi za ocenu doprinosa u ovoj oblasti sistematizovani su na:

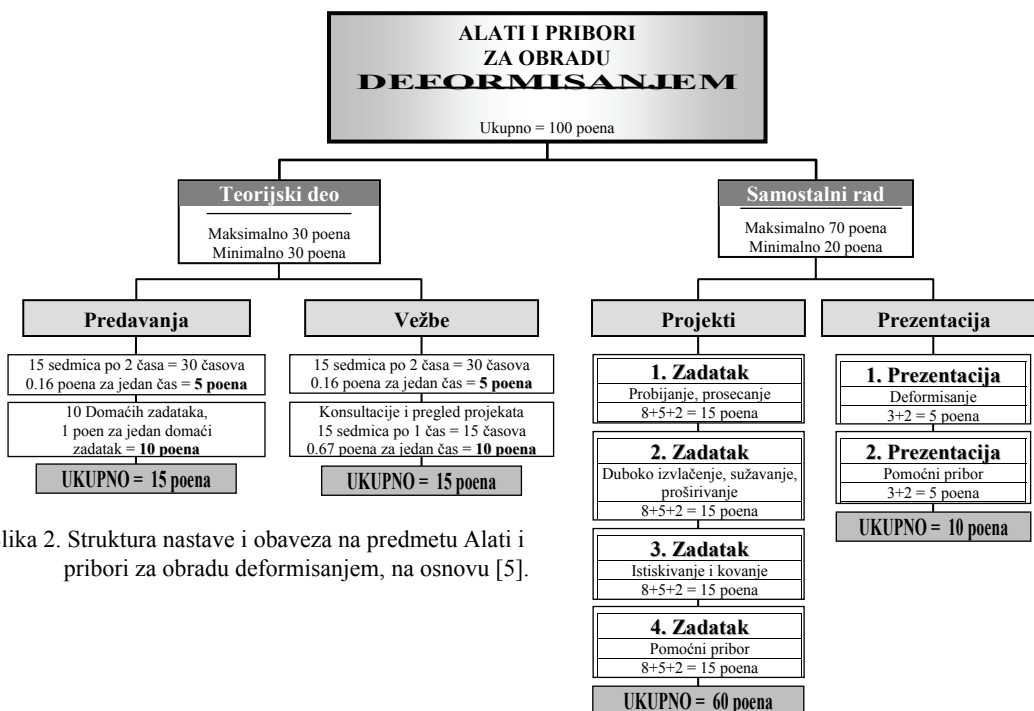
- ‡ publikovanje radova u vidu knjiga i članaka,
- ‡ seminare, naučne konferencije i javna predavanja,
- ‡ kreativan razvoj u oblastima za koje nastavnik dobija javna priznanja,
- ‡ saopštavanje radova,
- ‡ uređivačke poslove,
- ‡ konsultantske i slične aktivnosti.

Prirodno je da se rezultati u ovoj oblasti ne mogu ostvarivati ukoliko se permanentno ne prate savremena dostignuća u naučnoj oblasti kojom se nastavnik bavi. Dobra je orijentacija Ministarstva nauke da se naučni timovi za izradu projekata koje ono finansira sastavljaju od naučnika jake i uske specijalizovanosti, [7].

### 4. SARADNJA SA PRIVREDOM

Pored posedovanja određenih subjektivnih osobina (preduzumljivost, komunikativnost, inženjerska kreativnost i iskustvo, i dr.), potrebno je da se raspolože odgovarajućim tehničkim uslovima poput laboratorije, radionice, računarske opreme, nacionalnih i/ili međunarodnih standarda, licenci, sertifikata, itd.

Karakteristika ovog domena angažovanja univerzitetskih nastavnika i saradnika sadržana je u kratkim rokovima izrade,



Slika 2. Struktura nastave i obaveza na predmetu Alati i pribori za obradu deformisanjem, na osnovu [5].



neophodnosti posedovanja visoke stručnosti na inženjerskom nivou, izražena sposobnost ubeđivanja i, posebno, ugovaranja finansijskih aranžmana.

Zakonom o visokom školstvu i podzakonskim aktima nisu precizirana prava koja proizilaze iz raspodele efekata ostvarenih rešenja i prava raspolaganja stečene opreme. Reč je o sukobu autorstva i prava svojine nad kapitalom i materijalnim dobrima. Predmetna materija uređuje se intuitivno i selektivno tako da je izraženo šarenilo različitih rešenja uglavnom zasnovanih na autoritativnosti pojedinaca ili rukovodećih timova fakulteta (uskoro valjda Univerziteta). Odgovarajuća zakonska i podzakonska akta pružaju velike mogućnosti organizovanja u okviru naučno istraživačke delatnosti.

Zanimljivo je da se, međutim, od visokoškolskih ustanova zahteva ostvarenje prihoda iz ovog domena a da se uopšte ne stvaraju ekskluzivni uslovi za ostvarenje tog cilja. Navodi se jedan primer. Sertifikacijom se bave raznorazna strukovna udruženja, koja često (!), sertifikuju i same fakultete, odnosno njihove organizacione jedinice, iako su kadrovski, znanjima, iskustveno i opremom često inferiornije.

## 5. RASPLET

Cilj ovoga rada je da ukaže na neodrživost stalnog uvećavanja obaveza univerzitetskim nastavnicima koje polako prevazilaze mentalne i fizičke mogućnosti većine. Reč je o sledećim obavezama u radu odnosno elementima na kojima bazira izbor u nastavnička zvanja:

- ‡ tri delatnosti koje pokriva svaki univerzitetski nastavnik (nauka, obrazovanje i projekti/saradnja sa privredom),
- ‡ izbor u zvanja ostvaruje se na osnovu naučnog doprinosa (dominantno do isključivo),
- ‡ doprinos u nastavi fragmentarno se ceni (!),
- ‡ uvodi se četvrta delatnost nastavnika – doprinos akademskoj i široj zajednici (!), i
- ‡ neposredna saradnja sa privredom potpuno se ignoriše a implicitno nameće.

Razmatrani položaj nastavnika univerziteta nameće potrebu uvođenja diferenciranih uslova njihovog izbora i takvih da respektuju lična interesovanja i biološke procese.

Umesno je zakonskim izmenama i/ili dopunama omogućiti nastavniku izbor pretežne delatnosti univerzitetskog rada. Odnosno, umesno je predvideti da se viša naučno – nastavna zvanja u većoj meri usmeravaju ka nastavnoj delatnosti a da se naučna delatnost u većoj meri ceni u početnim nastavničkim zvanjima i periodu školovanju naučnog podmlatka.

## 6. REFERENCE

1. Zakon o univerzitetu, 1998.g.
2. Zakon o univerzitetu, 2001.g.
3. Zakon o visokom obrazovanju, 2005.g.
4. Predlog nastavnih planova i programa osnovnih i magistarskih akademskih studija Fakulteta tehničkih nauka – Odsek za proizvodno mašinstvo, Novi Sad, 1999.g, [www.mfns.co.yu](http://www.mfns.co.yu)
5. Alati i pribori za obradu deformisanjem, [www.mfkv.kg.ac.yu](http://www.mfkv.kg.ac.yu)
6. Preporuke o bližim uslovima za izbor u zvanja nastavnika, Nacionalni savet za visoko obrazovanje, [www.mps.sr.gov.yu/](http://www.mps.sr.gov.yu/)
7. Pravilnik o postupku i načinu vrednovanja i kvantitativnom iskazivanju naučnoistraživačkih rezultata istraživača, [www.mps.sr.gov.yu/](http://www.mps.sr.gov.yu/)

**Autor: Miomir Vukićević**, vanredni profesor Mašinskog fakulteta Kraljevo, [vukicevic.m@mfkv.kg.ac.yu](mailto:vukicevic.m@mfkv.kg.ac.yu)



Pavićević, A. Ž., Mićunović, J., Hamzić, D.

## EVOLUCIJA EFEKTIVNOG SISTEMA MENADŽMENTA ZNANJA

**Rezime:** Menadžment znanja je sredstvo, a ne cilj. Ono treba da bude prirodan način u upravljanju proizvodnjom, radnim jedinicama i kompanijama i stoga treba da bude integrisano u svakodnevni rad odgovornih osoba (menadžment). Razvoj ovog sistema predstavlja veliki izazov iz dva razloga i to što mnoge organizacije imaju kulturu koja ne podržava menadžment znanja dok bi drugi bio taj da organizacija obezbedi stalno korišćenje i kontinualno unapređenje jednom uspostavljenog sistema. Organizacije ne mogu da nateraju zaposlene da uče ili da dele znanje. One ih moraju motivisati, pokazati značaj i važnost tih aktivnosti i nagraditi za razmenu istih kroz prirodan sistem nagrada i stimulacije ali i raširiti poruku da su znanje i razmena od suštinskog značaja za dugoročno poslovanje. Ako su strategija i ljudi glavni pokretači menadžmenta znanja, onda je IT fundamentalni deo koji to omogućava. To je suštinski deo organizacione infrastrukture koji ne samo da prikuplja, organizuje i širi podatke, već pomaže i omogućava razmenu, kreativnost i inovaciju. Od podjednako je značaja istovremeno razvijanje internog i eksternog protoka informacija što se ostvaruje ISKM. Važne komponente menadžmenta znanja su kodifikacija znanja, upravljanje ljudskim resursima (HRM) i organizaciona kultura kao uslov za pravilan transfer znanja. Vrednost znanja priznata je uglavnom u svim organizacijama, ali ideja o merenju znanja relativno je nova. Razlog leži u činjenici da su tradicionalni izvori konkurentskih prednosti kao što su tehnologija, patenti i sl., sve više dostupni. Resursi znanja koje je potrebno vrednovati su humani kapital, strukturalni kapital i kapital kupca. Ralozni za uvođenje menadžmenta znanja su jaki i ubedljivi. Određene organizacije počele su da implementiraju dugoročne programe, zahvaljujući današnjem, boljem protoku informacija, tehnološkom napretku i konkurentskom pritisku. Mnogi i dalje ne prihvataju ideju o menadžmentu znanja i usredsređuju se na „ad hoc“ projekte. U svakom slučaju, svi koji su okrenuti budućnosti uviđaju da, strategijski menadžment znanja može da obezbedi značajnu konkurentsku prednost.

**Ključne reči:** menadžment znanja, informacioni sistemi, transfer znanja, merenje performansi

## EVOLUTION OF EFFECTUAL SYSTEM OF KNOWLEDGE MANAGEMENT

**Abstract:** Knowledge management is only means, not the goal. It should be the natural way for conducting of the production, production units, and companies, and that is why it should be integrated into everyday work of executives (management). Development of this system represents great challenge for two reasons: Many organizations have culture which doesn't support knowledge management. The other is that organization should provide contineous use and upgrading of once established system. Organization could not force employees to learn, or to exchange knowledge. Organization should motivate, and emphasize the meaning and importance of these activities, and stimulate it through natural system of prizes of stimulation, but also through spreading the message that knowledge and exchange are crucial for long term business. If the strategy and people are the main initiators of knowledge management, than the IT is fundamental for inabling it. It should be the substantial part of organizational infra-structure, which not only collects, organizes and spreads data, but also supports and enables exchange, creativity, and innovation. Equally important is simultaneous development of internal and external flux of information, and this is provided by ISKM. Important components of knowledge management are codification of knowledge, human resource management (HRM) and organizational culture as condition for correct transfer of knowledge. Value of knowledge is generally justified in most of the companies, but the idea about evaluation of knowledge is relativly new. Reason for this lays in the fact that traditional sources of competitional advantages like technology, patents, etc. became more accessible. Knowledge resources which should be evaluated are human capital, structural capital, and capital of the customer. Reasons for introduction of knowledge management are strong and persuasive. Certain organizations started to implement long-term programs owing to modern, better flow rate of information, advance of technology, and competition. Many still do not accept the idea about knowledge management, and concentrate to ad hoc projects. However, everyone who is oriented towards future could see that strategic knowledge management could provide decesive advantage over the competition.

**Key words:** knowledge management, information systems, transfer of knowledge, perfor assessment.

### 1. UVOD

“Jedna od najvećih grešaka koje možete da učinite u svom životu jeste da prihvatite poznato i odbijete nepoznato. U stvari, treba da uradite sasvim suprotno. Poznato dovedite u pitanje i otkrijte nepoznato.”

Gay Kawasaki

Sve više organizacija kao stavku u svojoj agendi postavljaju menadžment znanja pri čemu nisu sigurne odakle početi, koje su koristi od toga, kako da to organizuju i koji sistem da primene. Postavljaju se i pitanja da li je menadžment znanja u koliziji sa postojećom poslovnom

strategijom ili deo nje kao i da li će imati sličnosti sa strategijom planiranja, ali više fokusiranim na znanju nego na poslovanju.

Efektivan menadžment znanja zahteva uslove u kojima se zaposleni mogu razvijati i primenjivati svoje znanje na optimalan način. On treba da omogući razmenu znanja kako bi se poboljšale performanse poslovanja izbegavajući funkcionalne, regionalne ili kulturološke barijere, povećanje efikasnosti i efektivnosti kroz kontinualno učenje i napredovanje ali i poboljšanje načina rada, infrastrukture, sistema i procesa. Time se unapređuje interna perspektiva i perspektiva učenja i razvoja kao osnove za formulisanje i kontinualno unapređenje strategije i njeno prevođenje u

operativne termine. Pojam „nematerijalna aktiva“ kao pokretač i glavni izvor konkurentskih prednosti danas je od presudnog značaja pri čemu u nematerijalnu aktivnu, između ostalog svrstavamo i informacione tehnologije, sposobnosti, znanje, veštine i motivaciju zaposlenih. Dakle, informacije i znanje (informacije primenjene kroz „najbolju praksu“) predstavljaju srž nematerijalne aktive, a posledice njene dominacije se ogledaju u promeni koncepta planiranja, promeni koordinacije i kontrole, značaju planskih odluka i značaju liderstva.

Prema tome dolazimo do zaključka da je efektivan sistem menadžmenta znanja, kao sredstvo za upravljanje nematerijalnom aktivom, u stanju da podrži strategiju i omogućiti transformaciju organizacije u cilju uspešnog prilagođavanja novim tržišnim uslovima i okruženju kroz kontinualno unapređenje poslovne strategije.

## 2. PREPOZNAVANJE POTREBA – NULTI NIVO

Pokušavati promeniti ponašanje i način rada zaposlenih bez obraćanja eksplicitne pažnje na promenu menadžmenta je jednako komandovati vojskom bez komandanta. To može biti veoma dug i mukotrpan proces. Da bi se obezbedila maksimalna podrška neophodno je ohrabriti posedovanje inicijative u okviru organizacije, čak i ako one nisu u potpunosti usklađene sa programom menadžmenta znanje. To znači da organizacija unutar sebe mora razvijati i motivisati „aktere promena“ kako bi i sama napredovala i razvijala se. Lakše je promeniti kurs kada je program u toku nego otpočinjati program uopšte.

Svaka organizacija ima svoje metode borbe na globalnom tržištu pri čemu znanje varira od jedne do druge organizacije u skladu sa njenim potrebama što oslikava potrebu za uspostavljanjem i razvojem sistema menadžmenta znanja. U identifikaciji potreba za znanjem, organizacija može uraditi SWOT analizu zasnovanu na znanju, praveći mapu resursa znanja i sposobnosti naspram strategijskih mogućnosti i opasnosti, kako bi i bolje razumela svoje prednosti i ograničenja. Identifikovanje koji resursi zasnovani na znanju i sposobnostima su dragoceni i jedinstveni, kao i to koliko oni podržavaju proizvod te kompanije i njeno tržišno pozicioniranje.

	Koristi u postizanju ciljeva	Štete u postizanju ciljeva
Interni aspekti	Snaga	Slabost
Eksterni aspekti	Šanse	Pretnje

Jednom kada se uspostave potrebe, organizacija može da razmotri pristupe za primenu sistema menadžmenta znanja. Razlikujemo dva pristupa koji se mogu primeniti:

- Stvaranje strategije menadžmenta znanja kao integralnog dela poslovne strategije. Plan znanja se razvija kroz postojeću infrastrukturu organizacije koristeći projektne timove. Aktivnosti se inicijalno mogu fokusirati u okviru divizije ili poslovne jedinice, ali sa dugoročnijom ambicijom da se to proširi na nivo cele kompanije.
- Stvaranje odvojene jedinice menadžmenta znanja u

okviru organizacije i imenovanje operativnog menadžera za identifikaciju i primenu projekata menadžmenta znanja, za koje često inicijativa kreće od IT. Čini se da ovaj pristup daje prednosti bliske kontrole i troškova za projekte, ali može biti spor za širenje kroz organizaciju.

*Van Der Speak* i *Kingma* su definisali menadžment znanja kao sredstvo, a ne cilj čime su pokušali da objasne da on treba da bude prirodan način u upravljanju proizvodnjom, sektorima i kompanijom i kao takav integrisan u svakodnevni rad odgovornih lica. Stoga je poželjnije da se novi koncept najpre uspostavi kao nezavisna jedinica, a kasnije da se inkorporira u svakodnevni rad organizacije.

Brojni su razlozi zbog kojih razvoj efektivnog menadžmenta znanja predstavlja veliki izazov.

Jedan od razloga jeste nepostojanje kulture koja podržava menadžment znanja. *Dunford* je u svom istraživanju sprovedenom na organizacijama visoko zavisnih od znanja, posebno konsultantskim firmama, otkrio da je prvi opšti izazov obezbeđivanje visokog kvaliteta informacija i podataka u sistemu, tkz. „ulazni izazov“. Kvalitet može biti pokvaren u bazičnoj fazi time što učesnici neće hraniti sistem informacijama. Razlozi ovakvom ponašanju mogu biti nemogućnost iznalaženja vremena da se zapišu naučne lekcije ili razvijena rešenja. Međutim, problem može biti dublje ukorenjen – nedostatak potrebnog mentalnog sklopa ili kulture da se podeli znanje. Ovaj otpor ili nesklonost ka dokumentovanju i podeli znanja sprečava interni transfer ideja i podataka i kao rezultat toga većina interno razvijenog znanja može biti izgubljena. Stoga, uspeh sistema menadžmenta znanja zahteva veliku kulturološku promenu kroz razvoj i implementaciju interne perspektive strategiskog razvoja ukoliko se želi da zaposleni rado i konzistentno razmenjuju jedinstveno stečeno znanje, ideje i utiske. Jedan od načina je i motivacija zaposlenih kroz razne oblike nagrađivanja.

Drugi izazov s kojim se organizacija suočava prilikom uspostavljanja efektivnog sistema menadžmenta znanja je da se jednom uspostavljen sistem i koristi. Pouzdana i jaka posvećenost da se ovakav sistem uspostavi ne mora garantovati i visoku korišćenost. Razlog tome može biti nevoljnost učesnika, pre svega senior menadžmenta, da prihvate druge kao eksperte – kompleks nižih vrednosti, ali i sama količina on line dostupnih informacija. Jedan od razloga zašto se količina podataka umnožava je usled toga što su organizacije inicijalno sklone da ohrabruju učesnike u novo uspostavljenom sistemu menadžmenta znanja. Doprinosi bazi podataka ili bazi znanja imaju za cilj da pokažu čin posvećenost zaposlenih čime se filtriranje podataka i selekcija pretvaraju u relativno benigni problem. Sam čin selekcije i filtriranja podataka povećava vremenski period pre nego informacije postanu dostupne u sistemu.

Organizacije ne mogu da nateraju zaposlene da uče ili dele dragoceno znanje. Moraju da ih motivišu, da im pokažu važnost tih aktivnosti i nagradu za razmenu istih, razvijajući prigodan sistem nagrada i stimulacija, raširiti poruku da su znanje i razmena suštinski za dugoročno poslovanje – perspektiva učenja i razvoja.

## 3. KREIRANJE INFORMACIONOG SISTEMA MENADŽMENTA ZNANJA (ISKM) – NIVO 1

Ako su strategija i zaposleni pokretači menadžmenta znanja onda je IT fundamentalni deo koji to omogućava. To je suštinski deo organizacije koji ne samo da prikuplja, organizuje i širi podatke unutar organizacije, već pomaže i omogućava razmenu, kreativnost i inovaciju. Organizacije moraju da razviju sposobnost za organizovanje i širenje podataka u ključnim oblastima poslovanja, ali i da se suoče sa neizbežnim posledicama propuštene mogućnosti i pada u

konkurentnosti. Nesumljivo postoji potreba da organizacija kapitalizuje napredak u sistemima i komunikacionim tehnologijama. Razvoj interne, ali i eksterne komunikacije pomaže u prikupljanju i prostiranju informacija. Znak pravog sistema menadžmenta znanja je proces i infrastruktura usmerena na podršku, stvaranje, skupljanje, skladištenje i prenos znanja.

ISKM predstavlja osnovu koja obezbeđuje da organizacija ima interne i eksterne resurse da brzo odgovori na poslovne potrebe kupaca i sistem koji će omogućiti zaposlenima da budu brzo povezani sa ekspertima koji mogu da pomognu u stvaranju rešenja novo nastalih problema. Model po svojoj strukturi liči na tradicionalan sistem baze podataka menadžmenta znanja, ali sa fokusom na ljude, resurse, znanje i veštine. Obezbeđuje ključnu platformu za okruženje u kome se znanje i informacije kreiraju, stižu, skladište i koriste. Model identifikuje na koji način se ostvaruje protok informacija između zaposlenih, sektora, organizacije, ali i njenih dobavljača, partnera i klijenata i kako podržava donošenje odluke.

Revizija internih resursa, iskustva i veština omogućava postavljanje prioriteta za menadžment. Pokazuje kako se delovi informacija uklapaju zajedno i pomaže u objašnjavanju ultimativnog cilja razmene informacija resursa znanja. Takođe identifikuje pitanja pristupa, koji formati su ispravni i na kom mestu, kao i ispravnost nivoa pristupa.

Sem internog protoka informacija, važno je priznati da veliki deo informacija koji se koristi dolazi iz spoljašnjeg sveta, što takođe zahteva upravljanje i po mogućstvu integraciju s internim izvorima informacija. Eksterne informacije dobijene preko trećih strana zahtevaju redovno revidiranje, posebno u vremenu brzih promena, novih usluga, povećane konkurencije i komplikovanih cenovnih pregovora.

Model takođe prepoznaje i važnu ulogu ekspertskih istraživanja u okviru sistema menadžmenta znanja. Često su organizacije preokupirane procesom unosa i izlaza podataka da bi pokazale veliku količinu aktivnosti i zanemaruju suptilniji proces reflektivnog učenja. Da bi se postiglo reflektivno učenje, neophodno je izgraditi infrastrukturu koja bi omogućila učesnicima (posebno ekspertima u sistemu) da se vrate korak unazad i porazmisle o prošlim iskustvima i bave se istraživanjem i benč markingom za najbolje iskustvo.

Nedavna studija, pokazuje da se u praksi mnogi programi menadžmenta znanja vode iz perspektive učenja i razvoja. Jasno je da je potrebno mnogo specijalnosti i tehničkog znanja da se kreira jedan ovakav sistem i infrastruktura. Naravno, pored velikih prednosti ovaj sistem ima i mane kao npr. opasnost da se proces odvija bez neke provere. Postoji mogućnost da su projekti uski, da nisu strateški usklađeni, da su određeni ljudi i sektori izuzeti. Isto tako, postavlja se pitanje kako se nositi sa velikim zahtevima podataka. Organizacije koje dozvole nesmotreno da im se to dogodi mogu rizikovati „curenje“ ili gubitak informacija, prezasićenost i gubitak kontrole.

#### **4. MODELI I PROCESI STVARANJA, NADOGRADNJE I PRENOSA ZNANJA – NIVO 2**

Važne komponente menadžmenta znanja su kodifikacija znanja, upravljanje ljudskim resursima i organizaciona kultura.

U predhodnom radu konstatovali smo dva oblika znanja: eksplicitno i prećutno. Prećutno (tecidno ili implicitno) znanje predstavlja pasivno razumevanje problema i ono ne mora biti verbalno izraženo. Eksplicitno znanje je formalno kodifikovano i kao takvo može da se koristi za unapređenje proizvodnje, proizvoda, procesa, organizacione kulture i sl. Ono može da se razmenjuje i prenosi na druge zaposlene čime se smanjuju posledice od odlaska kvalitetnih zaposlenih iz organizacije obzirom da je znanje istih preneto na drugog

zaposlenog.

Takođe, znanje možemo podeliti prema stepenu kodifikacije i stepenu distribucije. U skladu sa ovom podelom znanje možemo da podelimo u sledeće kategorije:

- nedistribuirano prećutno znanje – lično znanje;
- nedistribuirano eksplicitno znanje – specijalnost;
- distribuirano prećutno znanje – svakodnevna organizaciona rutina;
- distribuirano eksplicitno znanje – protokoli.

U okviru organizacije moguće je da dođe do promene forme znanja i to tako da se:

- prećutno znanje transformiše u javno beleženjem i snimanjem i prenosi kroz socijalizaciju odnosno podelu iskustva;
- kodifikovano znanje distribuira putem knjiga, intraneta, časopisima;
- eksplicitno znanje internalizuje učenjem kroz praksu;
- postojeće menja novim znanjem što predstavlja težak i dug proces.

Organizaciona kultura i veštine i znanje (know how) zaposlenih su jedni od najbitnijih nematerijalnih resursa. Stoga mnogi autori smatraju da se menadžment znanja treba koncentrisati upravo na upravljanje ljudskim resursima i stvaranju organizacione klime u kojoj će na najbolji način moći da se razvija i koristi znanje zaposlenih u cilju ostvarivanja strateških ciljeva organizacije. Organizacije treba da obrate pažnju na socijalne i kulturne vrednosti, motivaciju i sistem nagrađivanja, poverenje i spremnost da se deli znanje, individualno ponašanje i timski rad.

Dakle, neophodno je najpre stvoriti podlogu za razvoj znanja u okviru organizacije. *Nonaka* je definisao *BA* koncept koji podrazumeva stvaranje zajedničkog prostora (virtuelni, fizički ili mentalni) za razvijanje odnosa u kojem se stvara, razvija i deli prećutno i eksplicitno znanje. Time se jačaju stavovi i vrednosti, a grupa se više vezuje. Kada je *BA koncept* razvijen, znanje je otvoreno i lako se prenosi, više pažnje se posvećuje treningu i obrazovnim programima, jer uspešan transfer znanja zavisi od veština i kompetencija zaposlenih. Takođe, ulaganje u ljude i razvijanje ograničanih uslova, koji podržavaju razvoj zaposlenih, ključni su za razvoj programa menadžmenta znanja, ali i organizacije u celini.

Da bi se osigurao uspeh menadžmenta znanja, on mora da se posmatra kao strateški prioritet. Organizacije treba da ulažu u obrazovne programe i treba da privlače kvalitetne zaposlene da bi obogatili svoju bazu znanja. Što organizacija više ulaže u kvalitetne inpute (ljude, znanje, iskustvo,...) to je veći kvalitet outputa (inovacije, veći rast i razvoj konkurentne prednosti). Organizacije treba da usklade i sistem nagrađivanja sa ciljevima menadžmenta znanja.

Organizacija disbalans veština i znanja može otkriti primenom „portfolio matrice zaposlenih“ (slika 1).

Akteri promena poseduju poželjno i relevantno znanje i pokazuju potencijal za razvoj u budućnosti. Njihovo znanje ima sposobnost adaptacije i može da se koristi u različitim poslovnim funkcijama. Organizacije treba da zadrže i razviju "aktere promena" i ukoliko je moguće da ih pretvore u "ključne igrače".

Zvezda u usponu poseduju veliki potencijal za razvoj u bliskoj budućnosti. Uglavnom su neiskusni, a adaptabilnost njihovog znanja može biti velika ili mala. Organizacije treba da se koncentrišu na one koji imaju potencijal da postanu akteri promena, a nepodobne zvezde u usponu treba otpustiti.

Ključni igrači su najproduktivniji zaposleni. Oni poseduju portfolio veština i znanja koji su ključni za strategiju. Kod njih postoji velika adaptabilnost znanja i organizacije treba da ih zadrže i ulažu u njih.

Višak su oni zaposleni koji imaju nizak potencijal za



razvoj. U budućnosti ih treba pažljivo „odstraniti“ odnosno otpustiti sa jasno definisanim obrazloženjima.



Slika 1. Portfolio matrica zaposlenih

Menadžment znanja ne može da bude uspešan bez promena u organizacionoj kulturi preduzeća što podrazumeva uklanjanje kulturnih barijera koje se obično ogledaju u tome da zaposleni ne žele da podele svoje niti prihvate tuđe ideje već sebe same smatraju ekspertima za određene probleme zbog čega odbijaju svaku saradnju. Uloga lidera, menadžera i aktera promena u transformaciji organizacije, zauzimanju strateškog načina delovanja i rada kao i stvaranju otroganizacije koja uči je ogromna i predstavlja inicijalnu kapislu za dalji razvoj organizacije.

## 5. MERENJE PERFORMANSI – NIVO 3

Vrednost znanja priznata je uglavnom u svim organizacijama, ali ideja o merenju znanja relativno je nova. Razlog je činjenica da su tradicionalniji izvori konkurentske prednosti (tehnologija, patenti i sl.) sve više dostupni.

Tradicionalni računovodstveni modeli stvaranja vrednosti fokusiraju se na tzv. radni kapital i tangibilne (materijalne) resurse. Intangibilni (nematerijalni) resursi kao što su organizacioni troškovi, patenti, brendovi i sl. uključeni su bilans stanja, ali humani resursi i vrednovanje znanja nisu. Jaz između tržišne vrednosti kompanije i tangibilnih resursa postaje sve je veći i investitori sve više pažnje posvećuju nematerijalnim resursima.

Resursi znanja koje je potrebno vrednovati su:

- Humani kapital - najvažniji deo baze znanja u okviru organizacije. Obuhvata veštine, znanja i iskustvo zaposlenih – know how;
- Strukturalni kapital - patenti, infrastruktura i njihova međusobna interakcija. Strukturalni kapital sastoji se iz dva elementa: kako se elementi međusobno uklapaju u tehnološkom smislu i kako funkcionišu osobe koje njima upravljaju.
- Kapital kupca - razumevanje prirode i kvaliteta odnosa sa kupcima. Kapital kupca može da se meri na osnovu istorije odnosa s kupcem.

Kompanije su svesne da mora da postoji veza između ulaganja u menadžment znanja i poboljšanja performansi. Razumevanje prirode resursa dovodi do razumevanja kako odluke menadžmenta utiču na te resurse. Na ovaj način, moguće je brzo ukloniti prepreke koje oštećuju vrednost ili inicirati korektivne korake, ukoliko vrednost resursa opada.

## 6. ZAKLJUČAK

Razlozi za uvođenje menadžmenta znanja su jaki i ubedljivi. Određene organizacije počele su da implementiraju dugoročne programe zahvaljujući, današnjem, boljem protoku

informacija, tehnološkom napretku i konkurentskom pritisku. Mnogi i dalje ne prihvataju ideju o menadžmentu znanja i usredsređuju se na *ad hoc* projekte.

Svaka organizacija koja teži stvaranju konkurentskih prednosti, boljem tržišnom pozicioniranju, razvoju i strateškom napredovanju treba ići putem stvaranja „organizacije koja uči“. To podrazumeva pre svega motivaciju zaposlenih i ukazivanje na značaj učenja i prenošenja znanja unutar organizacije, a sve kroz razvijanje pogodnog sistema edukacije i treninga ali i sistema nagrada i stimulacije. Neophodno je organizacijom preneti poruku da su znanje i razmena istog od suštinskog značaja za dugoročno poslovanje, prosperitet i napredak organizacije. Time se omogućava da se menadžment znanja kao deo strategije i strateškog menadžmenta, kontinualno unapređuje čime obezbeđuje da se jednom primenjen ISMZ koristi i nadograđuje.

Perspektiva učenja i razvoja je sastavni deo jednog od pet principa organizacije vođene strategijom i kao takva važna za razvoj organizacije. Mogućnosti za stvaranje vrednosti se pomeraju sa upravljanja materijalnom na upravljanje nematerijalnom aktivom tj. strategijama zasnovanim na znanju. U nematerijalnu aktivu organizacije ulaze: odnosi sa kupcima, inoviranje proizvoda i usluga, operativni procesi visokog kvaliteta, informaciona tehnologija, sposobnosti, veštine i motivacija zaposlenih itd. Bolje rečeno, nematerijalnu aktivu predstavljaju informacije i znanje (primenjene informacije kroz „najbolju praksu“), a rezultat njene prisutnosti su: promena koncepta planiranja, promena koordinacije i kontrole, značaja planskih odluka i značaja liderstva.

Ekonomija danas, kada je nematerijalna aktiva glavni izvor konkurentske prednosti, zahteva sredstva kojima se objašnjava strategija bazirana na znanju. Ukoliko ne raspolažu takvim sredstvima, preduzeća imaju poteškoće u upravljanju onim što ne mogu objasniti.

U svakom slučaju, svi koji su okrenuti budućnosti uviđaju da strateški menadžment, a time i menadžment znanja, može da obezbedi značajnu konkurentsku prednost.

## 7. LITERATURA

- [1] D. Schwartz: *Encyclopaedia of Knowledge Management*, Idea Group Publishing & Harvard Business School Press, 1<sup>st</sup> Edition, 2004.
- [2] J.Liebowitz: *Strategic Intelligence: Business Intelligence, Competitive Intelligence & Knowledge Management*, Auerbach Publications, 1<sup>st</sup> Edition, 2006.
- [3] T.H.Davenport, L.Prusak: *Working Knowledge*, Harvard Business School Press, 2<sup>nd</sup> edition, 2000
- [4] B. Rakita: *Međunarodni biznis*, Ekonomski fakultet, Beograd, 2006.
- [5] J. Kotter : *The Leadership Factor*, Harvard Business School Publishing Corporation, 2<sup>nd</sup> Edition, 1998.

*Autori:* Pavićević A. Željko<sup>1</sup>, Mićunović Jelena<sup>2</sup>, Hamzić Damir<sup>3</sup>

<sup>1</sup> BAS a.d., Železnička 4, 11000 Beograd, Srbija, Tel: +381 63 16 28 067.

<sup>2</sup> Trgovinsko preduzeće Jasmin d.o.o., Andrićev Venac 2, 11000 Beograd, Srbija, +381 11 3234 984.

<sup>3</sup> CeMDI, Arčibalda Rajsa 18, 11030 Beograd, Srbija, +381 63 810 20 45

E-mail: [zeljko.pavicevic@cemdi.org](mailto:zeljko.pavicevic@cemdi.org)  
[jelenamicunovic@jasmin.co.yu](mailto:jelenamicunovic@jasmin.co.yu)  
[hamzic\\_damir@yahoo.com](mailto:hamzic_damir@yahoo.com)



Pavićević, A. Ž., Mićunović, J., Hamzić, D.

## PRELAZAK SA TRADICIONALNOG NA STRATEGIJSKO UPRAVLJANJE PROIZVODNIM SISTEMIMA

**Rezime:** Veliki broj preduzeća pod teretom tranzicije, dešavanjima na globalnom tržištu i pritiskom konkurencije, mogućnost za razvoj, izgradnju konkurentskih prednosti i tržišno pozicioniranje vide u napuštanju planskog, odnosno socijalističkog načina proizvodnje i operativnog planiranja i prelazak na jačanje međunarodne orijentacije, strategijski menadžment i menadžment znanja. Poslednje dve decenije mnogi teoretičari i konsultanti naglašavaju činjenicu da su formulacija i implementacija strategije od podjednake važnosti za uspeh jednog preduzeća. Svakoformulaciji strategije predstoji sagledavanje trendova i prekretnica u složenom i promenljivom okruženju ali i samom preduzeću koje je veliko i diversifikovano. Opstanak i prosperitet preduzeća pre svega zavisi od sagledavanja internih i eksternih faktora koji predstavljaju uvod u razvoj koncepta i alata startegijskog menadžmenta. Trendovi koji idu u prilog ovome su usloņnjavanje okruženja, investicija kao „cena opstanka“ i dominacija nematerijalne aktive nad materijalnom. Lista usklađenih ciljeva predstavlja alat koji povezuje preduzeća sa strategijom i strategiju (liderstvo) sa vođenjem poslova (menadžerstvom). Marketing i proizvodnja postaju pokretači ključnih indikatora performansi. Organizacija koja konvencionalni menadžment zamenjuje strategijskim, koja radi na kontinualnom unapređenju strategije stalnim preispitivanjima izazvanim dešavanjima na globalnom tržištu i koja razvija učenje i razmenu znanja kroz razvijeni menadžment znanja, postaje organizacija koja uči odnosno organizacija fokusirana na strategiju.

**Ključne reči:** strategija, lista usklađenih ciljeva, marketing, menadžment znanja, ključni indikatori performansi

## TRANSFORMATION FROM TRADITIONAL TO STRATEGIC MANAGEMENT OF CORPORATE SYSTEMS

**Abstract:** Large number of companies, under stress of transition, events on the global market, and pressure of the competition, see the possibility for development and building of competing advantages and marketing positioning in shifting from planned, i.e. socialistic mode of production and operative planning, to stronger international orientation, strategy enterprise management and knowledge management. During last two decades many theoreticians have been accenting the fact that formulation and implementation of strategy are equally important for the success of the company. Each formulation of strategy should start with overview of trends, and transformation within complex and changeable surrounding. But also large and diversified company must be changed from the inside. Survival and prosperity, above all, depends on perception of interior and exterior factors, which should be the introduction into development of concepts and tools of strategic management. Supporting trends are dictation of the environment, investment as the price for survival, and domination of non-material active over the material. The Balance Scorecard represents tool which connects the company with the strategy, and strategy (leadership) with conducting of the business (management). Marketing and production become the spiritus movement of key performance indicators. Organization which replaces conventional management with strategic, works on continual upgrading of strategy, constantly estimates events on global market, and develops learning and exchange of knowledge through developed knowledge management, becomes learning organization, i.e. strategic-focused organization.

**Key words:** strategy, list of confirmed goals, marketing, knowledge management, key performance indicators.

### 1. UVOD

“Successful companies do not just add value, they reinvent it!” Normann & Ramirez

Svedoci smo da veliki broj organizacija koje su ostale u društvenom vlasništvu i dalje funkcionišu po principu socijalnih ustanova odsečenih od globalnih ekonomskih dešavanja i bez bilo kakve perspektive. Tradicionalni model menadžmenta, oslonjen na pomoć države, bez vizije i strategije, u uslovima svetske ekonomske krize osuđen je na kolaps, a firma, ako ne na propast, onda na ogromne posledice za dalje funkcionisanje i poslovanje. Privatizacija koja se kod nas svela na „prodaju na doboš za male pare“ nije rešenje problema već njegovo produbljanje. Država, promenom stava u odnosu prema svojim preduzećima, treba istima ponuditi koncept strategijskog menadžmenta tako što će ispred sebe postavljati kompetentne i stručne ljude, biznismene, na rukovodeća mesta, a ne političare i politički podobne ličnosti bez imalo iskustva i znanja u onim sverama

i oblastima poslovanja preduzeća u kojima se isti nalaze kao rukovodioci ili članovi upravnih odbora. Dakle, polazeći od poslovice da „riba smrdi od glave, a ne od repa“, promenama u samom vrhu organizacije može se pristupiti radikalnim promenama unutar tromih, birokratskih i neefikasnih organizacionih sistema.

Prema M. Poteru, suštinu strategije čine aktivnosti u kojima preduzeće ima nameru da postigne perfekciju. Problem ne predstavlja formulacija već implementacija strategije. Nju moraju razumeti i izvršavati svi zaposleni jedne organizacije. Strategija povezuje sve zaposlene, a njeno izvršenje i implementacija se prati preko indikatora performansi. Marketing i proizvodnja moraju postati pokretači ključnih indikatora performansi. Lista usklađenih ciljeva postaje alat koji povezuje preduzeća sa strategijom i strategiju (liderstvo) sa vođenjem poslova (menadžerstvom).

U ovom radu pokušaćemo da objasnimo koji su to koraci koje je neophodno napraviti kako bi konvencionalni, odnosno tradicionalni i neefikasan menadžment zamenili strategijskim.

## 2. LIDERSTVO OBEZBEĐUJE UPRAVLJANJE PROMENAMA

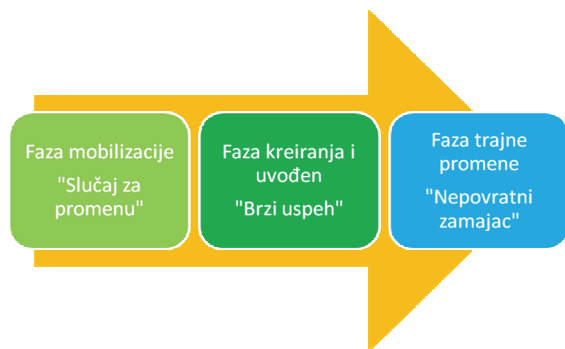
Svaka organizacija koja želi da postigne neki uspeh mora definisati svoje ciljeve koji predstavljaju željeno stanje i/ili nivo aktivnosti prema kojima se određuju sve ostale planske odluke. Cilj pokazuje šta se želi postići strategijom i njenom implementacijom. Formulisanje strategije obuhvata izbor skupa strateških ciljeva i definisanje skupa pretpostavki kako bi se oni ostvarili. U procesu strateškog menadžmenta ovi ciljevi se transformišu u operativne zadatke na različitim hijerarhijskim nivoima. Operativni zadaci se moraju izraziti pomoću ključnih indikatora performansi koji predstavljaju sponu između operativnih ciljeva u procesu planiranja i ostvarivanja konkretnih procesa. Korektivne akcije koje vode kontinualnom unapređenju strategije predstavljaju aktivnosti koje se preduzimaju ukoliko se odstupanja rano otkriju i korektno analiziraju.

Dakle, možemo doći do zaključka da se ovde radi o upravljanju pomoću ciljeva koje obezbeđuje integraciju kroz tri nivoa. Prvi nivo je povezivanje pojedinačnih ciljeva gde svi zaposleni uče kako da se pozicioniraju u „globalnom nadmetanju“. Drugi nivo koji podrazumeva razvoj spoljne motivacije povezivanjem sistema nagrađivanja sa ostvarivanjem pojedinačnih ciljeva i ciljeva organizacionih delova predstavlja povezivanje sa sistemom kompenzacija. Treći nivo predstavlja povećanje stepena razumevanja kroz koji se jača jednom uspostavljeni model ponašanja svih članova organizacije.

Dakle, ciljevi su kaskadno organizovani kroz organizacionu strukturu da bi se stvorio zajednički fokus i svest o strategiji, a indikatori performansi moraju važiti za svakog zaposlenog kako bi se obezbedila integracija sa strategijom.

Naravno, da bi preduzeće opstalo u izazovima koje mu nudi globalno tržište mora biti vođeno strategijom da brzo ostvari iznadprosečne rezultate te odgovori turbulencijama složenog i nemirnog okruženja, ali i fokusirano i integrisano oko strategije. Dve kritične veštine modernog preduzeća su liderstvo i menadžerstvo.

J.Kotter objašnjava kako transformacione promene počinju na vrhu putem tri diskretna poteza lidera: stvaranje osećaja urgentnosti, stvaranje vodeće koalicije, prenošenje vizije i strategije. Svi lideri uspešnih preduzeća slede ovaj model. Najpre treba svima u preduzeću razjasniti zašto je promena potrebna, a zatim stvoriti koaliciju koja će upravljati periodom tranzicije. Lideri su ti koji treba da upravljaju promenama, da prenesu viziju i stimulišu proces strateškog učenja. Ovim procesom, koji uključuje stvaranje strateških timova, održavanje sastanaka i top-down komuniciranje, se definišu, demonstriraju i uvode nove kulturne vrednosti preduzeća. Kako se proces odvija, tako se postojeći sistem sve više modifikuje dok ne bude zamenjen novim sistemom.



Slika 1. Faze transformacije tradicionalnog u strateški menadžment

Transformaciju tradicionalnog u strateški menadžment

možemo posmatrati kroz tri faze. Faza mobilizacije koja traje od 3 do 6 meseci predstavlja fazu posvećenu stvaranju zamaha na rukovodećem nivou. Faza kreiranja i uvođenja je ona u kojoj se strategija uvodi na najviši nivo organizacije i predstavlja period u trajanju od 6 meseci. Poslednja, treća faza, faza trajne primene čije trajanje je između 12 i 24 meseca predstavlja fazu u kojoj se strategija integriše u svakodnevni rad i kulturu organizacije kroz razumevanje i izvršavanje od strane svakog zaposlenog.

Povezivanjem tradicionalnog procesa kao što je kompenzacija i alokacija resursa sa lista usklađenih ciljeva, organizacije stvaraju strateški menadžment. Za dobre menadžere ne postoji "stanje stabilnosti". Pošto se okruženje stalno menja, strategije se moraju neprekidno razvijati kako bi reflektovale promene, što potvrđuje činjenicu da je strategija kontinuiran proces. Umetnost liderstva je delikatno održavati ravnotežu između stabilnosti i promene.

## 3. ULOGA LISTE USKLAĐENIH CILJEVA U STRATEGIJSKOM MENADŽMENTU

Osnovni nedostatak konvencionalnog menadžmenta jeste da on polazi od operativne kontrole pomoću budžeta odnosno kontrole na bazi finansijskih indikatora (ulaganja - bilans stanja, prihodi i troškovi – bilans uspeha) koja je neadekvatna obzirom da predstavlja merila prošlih performansi koja govore o rezultatima kao posledici ranijih aktivnosti. S druge strane, centralizovani sistem upravljanja gde se odluke donose na vrhu, a sprovode na nižim nivoima uz jaku kontrolu, sporo reaguju na promene i nije adekvatan za današnje turbulentno okruženje koje se rapidno menja.

Kod strateškog menadžmenta kontrola se vrši procenom efekata pokretača ključnih indikatora performansi (KPI) pomoću liste usklađenih ciljeva (LUC). LUC dakle zadržava finansijske indikatore i uvodi KPI kao merila budućih performansi. Svi ciljevi i merila performansi se izvode iz strategije koja se zasniva sada na repositioniranju u odnosu na kupce i konkurente, a ne, kao do sada, na stepenu korišćenja kapaciteta i redukciji troškova. Dakle novi sistem merjenja performansi se bazira na akcionarskoj vrednosti, satisfakciji kupca, efikasnosti poslovnih procesa i ključnoj kompetentnosti. Takođe na značaju dobija nematerijalna aktiva kao i nefinansijski indikatori performansi u koje ulaze vodeće vreme, tržišno učešće, kompetentnost, inovativnost i sl..

Finansijske indikatore performansi predstavljaju računovodstveni ili profitni indikatori, indikatori finansijskog tržišta i ekonomski ili vrednosni indikatori.

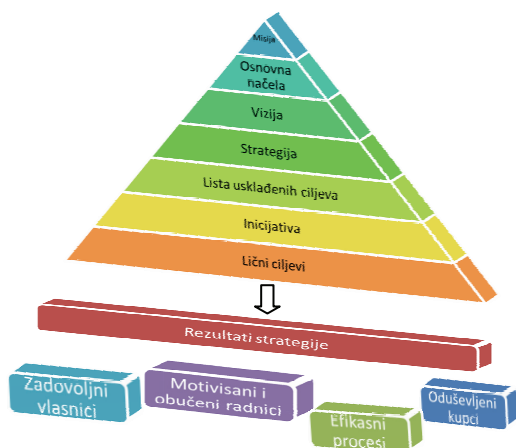
Pokretači ključnih indikatora performansi su marketing i proizvodnja; marketing kroz tržišno učešće, retencionu stopu i satisfakciju kupca, a proizvodnja kroz ciklus proizvodnje, razvoj i inovaciju i vreme razvoja novih proizvoda i procenat škarta.

Kod tradicionalnog menadžmenta sistem indikatora performansi je obično kratkoročno orjentisan i usmeren na taktičke i inkrementalne efekte; nejasna vizija, ciljevi i nagrade nisu u vezi sa strategijom kao ni alokacija resursa, ne postoji strateški feed-back.

S druge strane, LUC predstavlja operativni sistem strateškog menadžmenta. Ona sadrži „priču“ o strategiji preduzeća. Svako merilo performansi je deo lanca uzročno-posledičnih odnosa. LUC daje mogućnost sagledavanja uticaja merila performansi na opšte rezultate preduzeća, predstavlja balans između opštih merila rezultata i pokretača performansi i akcenat stavlja na ključne indikatore performansi – indikatore koji govore o tome kako se stvara nova vrednost kroz investicije u potrošače, dobavljače, zaposlene, tehnologiju i inovacije.

Praćenjem operativnih ciljeva u procesu planiranja i ostvarivanja konkretnih procesa, moguće je uočiti

odgovarajuće nepravilnosti ili promene usled delovanja interno-eksternih faktora i brzo reagovati kroz odgovarajuće korektivne aktivnosti, a sve u cilju kontinualnog unapređenja strategije.



Slika 2. Integracija strategije u menadžment pomoću LUC

LUC omogućava da se u organizaciji izgradi novi sistem upravljanja koji se koncentriše na strategiju kroz formulaciju strategije i njeno razumevanje i implementaciju korišćenjem adekvatnih procesa komunikacije – interna perspektiva. Njome se svaka aktivnost i proces preduzeća povezuje sa strategijom, i daje struktura novog organizacionog lančanog spoja među poslovnim jedinicama, sektorima i zaposlenima. Strategiju moraju razumeti i izvršavati svi zaposleni jedne organizacije i raditi na njenom kontinualnom unapređenju prilagođavajući je novim situacijama i promenama u okruženju.

Dakle, LUC integriše strategiju u menadžment (Slika 2.), odnosno omogućava organizacijama da se usredsrede na strategiju organizacije i da sa njom povežu svoj upravni odbor, poslovne jedinice, ljudske resurse, informacionu tehnologiju, budžet i kapitalne investicije - integracija strategije u menadžment.

#### 4. POKRETAČI KLJUČNIH INDIKATORA PERFORMANSI

Gore smo napomenuli da su pokretači ključnih indikatora performansi (KPI) marketing i proizvodnja. Marketing kroz tržišno učešće, retencionu stopu i satisfakciju kupca, a proizvodnja kroz ciklus proizvodnje, razvoj i inovaciju i vreme razvoja novih proizvoda i procenat škarta. Takođe, postoje mikro i makro pokretači KIP.

Retencionu stopu kao pokretača vrednosti možemo definisati kao verovatnoću da će kupac ponovo kupiti proizvod iz trenutne ponude pri čemu treba uzeti u obzir i životni ciklus proizvoda. Veoma je važno prilikom formulisanja strategije razmotriti i razviti metode održavanja i zadržavanja postojećih i pridobijanja novih kupaca kroz razvoj perspektive kupca. Tome svakako predhodi segmentacija potrošača. Osvajanje novog kupca preduzeće košta mnogo više (i do pet puta) od održavanja postojećeg pri čemu nismo gubiti iz vida činjenicu da prosečno preduzeće na godišnjem nivou gubi oko 10% kupaca.

Povećanje retencione stope ima iznadproporcionalan uticaj na dobit. Tako npr. povećanje retencione stope od 2% ima isti efekat na dobit kao smanjenje troškova od 10% odnosno povećanje retencione stope za 5% utiče na povećanje dobiti, u zavisnosti od grane, od 25-125%.

Satisfakcija kupca je veoma bitan aspekt perspektive kupca. Ukoliko uzmemo u obzir gubitak koji nastaje za organizaciju gubljenjem postojećeg kupca i potrebom

osvajanja novog, veoma je važno identifikovati faktore koji dovode do gubitka kupca.

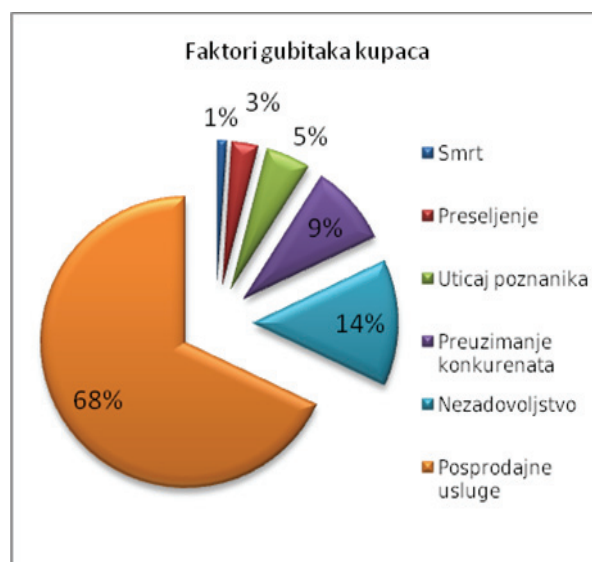
Najčešći faktori koji utiču na gubitak postojećih kupaca predstavljeni su na slici 3.

Takođe razlikujemo mikro i makro pokretači KIP. Njihovim uticajem se stvaraju determinante vrednosti, profit i potrebne investicije u proizvodnju, koje zajedno čine poslovni novčani tok. Ukoliko ovome dodamo i diskontnu stopu koja proizilazi iz troškova kapitala dobijamo vrednost jedne poslovne jedinice.

Makro ili finansijski pokretači vrednosti su rast prodaje, profitna stopa, dodatne kapitalne investicije, dodatna ulaganja u obrtna sredstva, stopa poreza, diskontna stopa, period strajanja rasta i dr.

Mikro pokretači vrednosti predstavljaju oni pokretači koji održavaju specifičnost svakog biznisa npr. veličina tržišta, tržišno učešće, maloprodajne cene, nivo plata, kupci, dobavljači, potrošnja, održavanje, cena sopstvenog kapitala i dr. Njihovo sagledavanje na nivou poslovne jedinice omogućava fokusiranje na aktivnosti koje maksimiziraju vrednost i eliminaciju aktivnosti koje nemaju potencijal uvećanja vrednosti.

Od velike važnosti nije samo to da pokretači bitno utiču na vrednost, već i da se na njih može uticati.



Slika 3. Faktori gubitka kupca - Izvor: American Society of Quality

#### 5. ZAKLJUČAK

“Poenta nije u više planiranja, već u više primene“

Prof. Dr Dragan Đurićin

Danas uspešne kompanije, lideri u svojoj grani, uveliko primenjuju koncept LUC kao osnovu u svom poslovanju. Strategijski menadžment se pokazao kao sredstvo koje je mnoge kompanije sa ivice ponora postavio ako ne među vodeće, onda svakako među jake i stabilne organizacije unutar svojih grana.

Fokus na finansijsku, internu i razvojnu perspektivu kompanije, ali i perspektivu kupca, omogućava kompaniji stalno preispitivanje i unapređenje strategije. Negativni autoriteti i negativna selekcija se zamenjuju liderima i menadžerima kojima je veoma važna uloga izvršioaca-zaposlenog kao i njegovo zadovoljstvo i satisfakcija. Motivacija postaje motor ostvarivanja izvanrednih rezultata.

Uloga nematerijalne aktive nad materijalnom postaje sve značajnija, a ogleda se u promeni koncepta planiranja, koncepta koordinacije, značaju liderstva, kontrole i planskih odluka.



Menadžment znanja, kao deo strategijskog menadžmenta, stvara uslove za razvojnu perspektivu i kreiranje organizacije koja uči. Informacije, znanje i know how postaju jedni od najbitnijih sredstava za ostvarivanje konkurentskih prednosti organizacije.

Brzopleta privatizacija fabrika i privrednih kapaciteta Srbije, nepostojanje strategije ekonomskog razvoja mašinske industrije Srbije i uticaj ekonomske krize iz dana u dan pokazuju koliko je veliko odsustvo strategijskog razmišljanja od strane vlasti i nemanje vizije o tome kako treba da izgleda privredna budućnost Srbije.

Tranzicija je mogla u mnogim organizacijama koje pripadaju duštvenom sektoru da posluži kao podstrek za formulisanje i implementiranje strategije i strategijskog menadžmenta u cilju napuštanja planskog, odnosno socijalističkog načina proizvodnje i operativnog planiranja. No nemanje znanja, svesti i volje omogućilo je da koncept tradicionalnog menadžmenta sa svim svojim elementima jedne birokratske, krute i neefikasne organizacije ostane osnovni model upravljanja preduzećima u društvenoj svojini u trenutku kada svet uveliko primenjuje SEM koncept upravljanja.

Da li vlast u Srbiji po drugi put od rušenja Berlinskog zida ne uviđa promene na globalnoj ekonomskoj sceni ili je njihova nemarnost i bezobrazluk tolika da rade protiv interesa ove zemlje, pokazaće istorija.

## 6. LITERATURA

- [1] R. Kaplan, D. Norton : *Balanced Scorecard: Translating Strategy Into Action*, Harvard Business School Publishing Corporation, 1996.
- [2] D.Norton, R.Kaplan:*The Strategy-Focused Organization: How Balanced Scorecard Companies Thrive in the New Business Environment*, Harvard Business School Publishing Corporation, 2000.
- [3] J. Kotter : *The Leadership Factor*, Harvard Business School Publishing Corporation, 2<sup>nd</sup> Edition, 1998.
- [4] D. Đuričin: *Menadžment i strategija*, Ekonomski fakultet, Beograd, 2006.
- [5] B. Rakita: *Međunarodni menadžment*, Ekonomski fakultet, Beograd, 2003.

**Autori: Pavićević A. Željko<sup>1</sup>, Mićunović Jelena<sup>2</sup>, Hamzić Damir<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> BAS a.d., Železnička 4, 11000 Beograd, Srbija, Tel: +381 63 16 28 067.

<sup>2</sup> Trgovinsko preduzeće Jasmin d.o.o., Andrićev Venac 2, 11000 Beograd, + 381 64 201 66 99

<sup>3</sup> Centar za moderno delovanje i integraciju – CeMDI, Arčibalda rajsa 18, 11030 Beograd, Srbija

E-mail: [zeljko.pavicevic@cemdi.org](mailto:zeljko.pavicevic@cemdi.org)  
[jelenamicunovic@jasmin.co.yu](mailto:jelenamicunovic@jasmin.co.yu)  
[hamzic\\_damir@yahoo.com](mailto:hamzic_damir@yahoo.com)



mr Zlata Bracanović

## **KREIRANJEM ZNANJA FORMIRAMO TRŽIŠNO USMERENA PREDUZEĆA**

*U dvadeset prvom veku preduzeća treba da zaborave na tradicionalne načine organizovanja i rada jer turbulentno okruženje zahteva fokusiranje na ekonomiju znanja. Neophodni novi stavovi preduzeća podrazumevaće poboljšanje sposobnosti preduzeća u brzim odgovorima na promene tržišta uz istovremeno predviđanje budućih potreba kupaca kao i kreiranje znanja i učenje iz sopstvenih iskustava. Informatička tehnologija omogućava bazno formiranje profesionalaca odnosno radnika znanja u preduzeću kao i efektivnost poslovanja u ekonomiji znanja gde se znanjem uvećavaju vrednosti. Da bi preduzeća postala bogatija po kapitalnoj vrednosti, koja se bazira na znanju, i tako poboljšala svoje performanse potrebne su nove kompetencije kao i novi profesionalci. Za svako preduzeće je važno zadržati profesionalce znanja odnosno stručnjake kao i privući nove radnike znanja jer je to početna faza za uvećavanje vrednosti preduzeća. Da bi sasvim iskoristili sopstvene potencijale u materijalnim i nematerijalnim resursima preduzeća treba da akcentuju procese i timovima u ne-funkcionalno organizovanoj sredini. Treba da se uspostavi ravnoteža između decentralizovane vlasti i centralizovanog znanja.*

*Ključne reči : ekonomija znanja, profesionalci znanja, kompetencije, tržište, timski rad, preduzeća, uvećanje vrednosti*

**M.A. Zlata Bracanovic, dip.dev.eng**

## **WITH THE CREATION OF KNOWLEDGE WE FORM COMPANIES DIRECTED TO THE MARKET**

*In the 21<sup>st</sup> century, companies should forget the traditional ways of the organization and work because turbulent surroundings demand the focusing to the economy of knowledge. Necessary new attitudes of the company will mean the improvement of the capabilities of the companies in fast answers to changes of the market together with the contemporary predicting of the future demands of the customers as well as the creation of knowledge and learning from the own experiences. Informatics technology makes possible basic formation of professionals and workers of knowledge in the company as well as an effective business in economy of knowledge where you enlarge the values with the knowledge. If we want for companies to become richer for their capital value, which is based on knowledge, and in that way to improve their performances, we need new competences as well as new professionals. For each company it is important to keep its professionals of knowledge or experts, and also to find new workers of knowledge because it is the beginning phase to enlarge the value of the company. To use completely own potentials in material and non material resources of the company we should put the accent on the process and teams in non-functional organized surroundings. We should make the balance between the decentralized government and centralized knowledge.*

*Key words: economy of knowledge, professionals of knowledge, competences, market, team work, companies, enlarge of value*

### **1. KREIRANJE ZNANJA**

Usled prelaznog tranzicionog perioda kada mnoga preduzeća prolaza kroz proces restrukturiranja što ima za posledicu višak zaposlenih pa dolazi do velikog broja otpuštanja ljudi. Kao rezultat toga kod stalno zaposlenih stvara se veliko nepoverenje prema preduzeću po je time i posao menadžmenta kompleksniji. Veoma odgovoran zadatak menadžmenta je uspostavljanje i implementacija stava prema znanju u preduzeću i njegovo transparento jačanje i korigovati.

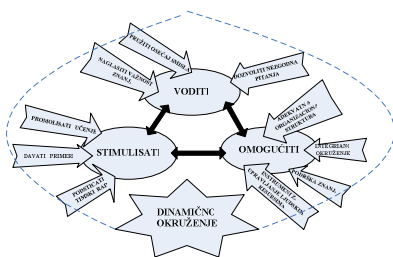
Najbitniji nematerijalni resurs je znanje. Njegova vrednost je u toliko veća ako se to znanje proizvede novo znanje. Znanje samo po sebi ako se ne kreira, oblikuje, razmenjuje i uvek dopunjava ostaje na nivou informacije koja kao takvo ne može da proizvede novo znanje i uveća postojeću vrednost. Menadžeri ljudskih resursa imaju veoma važan zadatak da vidi šta preduzeće zna, zatim da pribavi novo znanje odnosno zaposli ljude koji su poseduju potrebna i adekvatna znanja koja preduzeću mogu doneti korist a istovremeno da zadrži postojeća znanja.

Kreiranje znanja znači promena dosadašnjeg stava prema znanju koji prvo podrazumeva da svaki radnik znanja treba da radi na svojim vlastitim stubovima znanja. Lična odgovornost prema permanentnom učenju u pravcu

postizanja vrednosti za preduzeće. Sledeće po važnosti je razmena znanja gde leži glavna vrednost u uvažavanju znanja drugih kao i njihovih ideja i misli. Kada se znanje razmenjuje i deli ono raste, postaje bogatije, prilagođava se drugima i ta prirodna razmena treba da se dešava stalno putem dijaloga i/ili informatičkih tehnologija.

Danas se mnoga preduzeća suočavaju sa pitanjem kako uspostaviti adekvatan stav prema znanju koji će biti unosan i koristan. To zahteva promene uverenja i ponašanja kroz metode koje stimulišu, vode i omogućavaju kreiranje i kontrolisanje znanja a šematski blok prikaz dat je na slici 1. Vođenje znanja podrazumeva kreiranje vizije, misije, strategije i suštinskih vrednosti koje reflektuju važnost znanja. Omogućavanje je uspostavljanje integrisanog okruženja znanja kao podrška specijalizovanog znanja što naravno mora da istovremeno obezbedi adekvatne instrumente za upravljanje ljudskim resursima. Stimulisanje podrazumeva podsticanje učenja i vremena za razmišljanje kroz lični primer kao i ohrabrivanje timskog rada. Podsticanje multidisciplinovanih timova za širok spektar aktivnost. Naravno stimulisanje podrazumeva pohvale i nagrade koje ohrabruju razmenu znanja. Ljudi su spremni da razmenjuju znanje i saraduju jer je njihovu kompenzacija ulovljena kolegijalnim odnosom.

Potrebno je znanje učiniti dostupnim ljudima koji ga zapravo i kreiraju. Ekonomija znanja zahteva razumevanje da je stvaranje znanja na vrednosti zasnovanoj od suštinskog značaja. Kada se ovakav stav prema znanju prihvatiti svi u preuzeću onda će biti lako implementirati sistema za kreiranje i kontrolisanje znanja.



Slika 1. – Kreiranje i kontrolisanje znanja

## 2. TRŽIŠNO USMERENA PREDUZEĆA

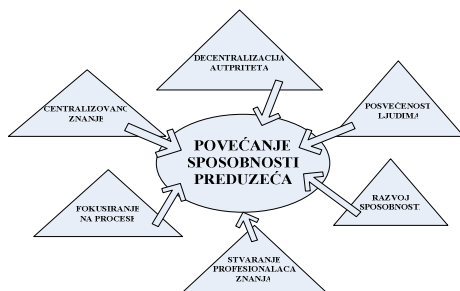
Dosadašnja preduzeća koja postaju prošlost imala su bogatsvo u opipljivim vrednostima, siromaštvo u kreiranju znanja, centralizovane odbore za donošenje odluka, ostavljanje znanja tamo gde je, čuvanje onoga što se zna za sebe, funkcionalne organizacije, intelektualni kapital rezervisan za rukovodstvo i izvršni menadžment, ograničen pristup eksplicitnim znanjima.

Preduzeća će u budućnosti imati uspeh ako su tržišno usmerena što podrazumeva stalno učenje i time povećanje vrednosti. To se postiže prvo promenom stava prema znanju, razmenom i upravljanjem znanja zaposlenih, razvijanju suštinskih sposobnosti preduzeća i stalnim aktivnostima preduzeća koja se moraju kontinualno odvijati.

Izgraditi stabilno preduzeće koje permanentno povećava svoje vrednosti koristeći veštine i znanje zaposlenih i tako odgovori izazovima okruženja. Kombinovanjem kreiranja znanja, usmeravanjem profesionalnog znanja ka stvaranju dodatne vrednosti, realizaciji profitabilnih strategija i uvek sve redizajnirati ako je povratna informacija odskočila od planirane.

### 2.1. SPOSOBNOSTI PREDUZEĆA

Kreiranjem i pravilnim kontrolisanjem znanja povećavamo sposobnosti preduzeća a na slici 2. dat je blok prikaz modela za povećanje sposobnosti preduzeća. Ovim modelom se usvaja izbalansiran pristup i istovremeno razvijaju suštinske sposobnosti preduzeća u kojima se mora postići uspeh ako se planira opstanak u budućnosti. Suštinske sposobnosti preduzeća se ogledaju brzinom reagovanju i smislenim odgovorima na promene na tržištu a istovremeno predviđanje buduće želje i potrebe kupca. Mora se proizvoditi proizvod i/ili pružati usluga dobro, kvalitetno kao i istovremeno učiti iz vlastitih iskustava.



Slika 2. – Model za povećanje sposobnosti preduzeća

Potrebno je razvijati i unapređivati sposobnosti zaposlenih stručnjaka koji mogu da kreiraju znanje koje će doneti vrednosti preduzeću kao i da paralelno svim aktivnostima preduzeće istraje u dinamičnom okruženju. Istrajnost preduzeća ogleda se u promenljivim zahtevima sa kojima se suočava preduzeće a pri tom mora usvojiti nove stavove kojima se doprinosi efektivnosti upotrebe znanja.

Sposobnost preduzeća da decentralizuje vlast omogućava da se jednostavnije i brže uspostave potrebni kontakti sa klijentima kao i da se pre uvide promene na tržištu. Da bi funkcionisala međusobna razmena znanja na svim nivoima potrebno je u preuzeću uspostaviti ravnotežu između decentralizovane vlasti i centralizovanog znanja. Na taj način može se u potpunosti iskoristiti svi potencijali znanja jer centralizovano znanje biće dostupno svima u svako vreme na nivoima.

Decentralizacija vlasti podrazumeva povećanje sposobnosti preduzeća na lokalnom tržištu kroz formiranje :

- manjih poslovnih jedinica kroz segmentaciju tržišta,
- regulisane funkcionalne discipline kroz stvaranje strukturirane mape znanja,
- stručnih timova kroz obim, naučnu oblast kao i strukturu vrednost performansi stručnosti.

Naći adekvatan odnos decentralizacije autoriteta sa centralizacijom znanja preduzeća je ključni korak ka uspešnosti. Ta ravnoteža podrazumeva :

- kreiranje znanja u oblasti koja će uvećanju vrednosti preduzeća - strategija preduzeća,
- određivanje veza znanja i njihovo uspostavljanje za preuzimanje i povećavanje poslovne vrednosti,
- segmentiranje znanja u vodećim oblastima – pojedinac i/ili sistem i/ili mapa znanja.

Kroz mapu znanja jasno se vidi za svakog pojedinca u preduzeću u kojim segmentima znanja neko doprinosi i koliko, pojedinačno za svakog zaposlenog izražen je lični potencijal za razvoj te se može koristiti kao baza za stvaranje profita i razvoj kompetencija. Naravno u mapi znanja se sagledava i oni ljudi koji ne doprinose strateškom unapređenju znanja preduzeća.

Da bi u potpunosti iskoristili potencijal znanja preduzeće istovremeno mora da svoj rad organizuje tako da se zasniva na timskom radu i procesima tako što će :

- uspostaviti operativne procese koji će biti rezidajnirani sa ograničavajućim faktorom postignutih rezultata - povratna informacija,
- fokusirati korporativne procese odnosno povezati operativne i strateške procese, kombinovati ih. Naći ravnotežu kroz koordinaciju, komunikaciju i kontrolu procesa timskim radom,
- odrediti strateške procese koji su direktna veza sa dugoročnim ciljevima preduzeća – jasno reflektovanje razvoja preduzeća.

Timski rad u svakom preduzeću doprinosi zaposlenima da razvijaju i obezbeđuju prave kompetencije jer su one ključna i pokretačka snaga preduzeća kojima se uvećavaju vrednosti preduzeća. Kompetencije daju stabilnost poslovanja svakog preduzeća. Razijanje pojedinačne kompetencije vodi ka stimulisanju stručnjaka a reflektuje se stvaranjem vrednosti preduzeća kroz timski rad. Timske kompetencije određuju profesionalnu oblast u kojoj preduzeće može da nadgrađuje znanje što vodi ka povećanoj radnoj efektivnosti preduzeća. Takvom pristupom stiče se sposobnost bržeg reagovanja na potrebe tržišta kao i brže i svrsishodnije proizvodnje proizvoda i/ili pružanje usluga.

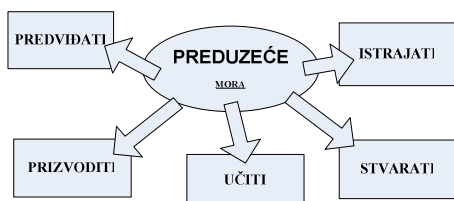
Organizacija procesa u preduzeću zasnovana na timskom radu doprinosi konkurentnosti, uvećanju efektivnosti a zaposleni razvijaju kompetencije koje im omogućavaju uvećanje ličnih vrednosti i preduzeća u celini.

## 2.2. AKTIVNOSTI PREDUZEĆA

Tržišno usmerena preduzeća odnosno preduzeća biće u budućnosti ona koja će imati puno umeća, malo resursa, decentralizovan proces donošenja odluka, centralizovano upravljanje znanjem, razmenu znanja, baziranje rada na timskom radu i procesima, intelektualni kapital koji razmenjuju profesionalci znanja odnosno stručnjaci, neograničen pristup eksplicitnim i implicitnim znanjima kao i mogućnost pretraživanja izvora znanja upotrebom najnovije informatičke tehnologije na svim nivoima.

Preduzeća svojim utemeljenim aktivnostima postaje orjentisano u željenom pravcu. U obilju informacija preduzeće da bi ovladalo mora da pronađe i definiše suštinu načina na koji će da znanje fokusira i usavršava za predviđanja koja će pomoći uvećanju vrednosti preduzeća. Zatim proizvodnja mora da teče nesmetano kao i pružanje usluga odnosno preduzeće mora da ima proizvod i/ili uslugu koja je korisniku potrebna. Trka za dobrim proizvodom i/ili uslugom neprestalno se dešava tako da preduzeća mora konstantno da prikuplja nova znanja da ih kreira, razmenjuje obnavlja, jednom rečju preduzeć mora da uči.

Na slici 3. dat je prikaz osnovnih aktivnosti koje preduzeće mora da favorizuje i unapređuje ako želi da se tržišno orjentiše za buduća vremena i tako osigura put ka efikasnom poslovanju. Uz konstantno učenje što kroz pojedinca i timski rad tako i kroz funkcionalne procese stalno mora da stvara nove i inovirane proizvode i/ili usluge, da predvidi potrebe korisnika, da istraje u svojim organizacionim strategijama ka predviđenim ciljevima.



Slika 3. – Kontinuirane aktivnosti preduzeća

Menadžment preduzeća, koje želi da bude tržišno orjentisano u budućnosti, moraće da se pristupi sopstvenoj reorganizaciji, reinžinjeringu, restilizaciji, analiziranju i redefinisanoj sopstvenih ciljeva, repozicioniranju i traženjem nove svrhe poslovanja, revitalizaciji i reviziji. Samo na ovakav način preduzeće može poslovati uspešno u nastupajućoj ekonomiji znanja.

Stvaranje stalno učećeg preduzeća je veoma kompleksan i težak posao i zahteva veliku promenu svakog zaposlenog u preduzeću. Od ljudi se očekuje da saraduju kroz otvorene dijaloge, da učestvuje u nesmetanoj razmeni znanja. Naravno da će biti i onih koji se ne mogu ili neće prilagoditi novoj situaciji.

## 3. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

Preduzeća treba da zauzmu stav prema znanju koji je utemeljen na činjenici da je znanje investicija koja dobija na vrednosti kada se deli sa timom. Znanje se tako sistematizuje, razmenjuje, uvećava i organizuje. Stav prema znanju baziran je na osnovu vrednosti koja se ogleda kroz samopuzdanje, poštovanja prema drugima i poverenja u preduzeće. Na ovakav način se stiču kodifikovana znanja koja istovremeno vode povećanju performansi preduzeća i tržišno ga usmeravaju.

Tržišno usmereno preduzeće mora da kontinualno okuplja znanje odnosno da privlače stručne ljude. Istovremeno menadžment preduzeća svojim zalaganjem uložiće dodatne

napore da privoli zaposlene raznim metodama da se posvete preduzeću da ga izgrađuju kroz uvećanje sveukupne vrednosti kroz upotrebu znanja.

Jednom kada se odrede glavne kompetencije preduzeća one postaju stabilan deo poslovanja. Istovremeno omogućavaju dodavanje vrednosti klijentima, društvu i preduzeću u nestabilnim tržišnim uslovima. Menadžment tržišno usmerenog preduzeća budućnost, kreira znanje u podsticanju i razvijanju pojedinačne i timske kompetencije što će uvećati vrednost i potencijal preduzeća u celini.

### Literatura :

1. *Mr. Knowledge*, *The Economist*, 31Maj1997.
2. *Intellectual capital, The new wealth of Ogranizatiois*, Thomas Stewart, Doubleday/Currency, 2003, page105.
3. *Andrieesen D., Tisen R.,- The Knowledge Dividend-Copyright Pearson Education Limited - 1999.*
4. *Source And Forms Of Organizational Change*, G.P.Huber, W. H.Glick, In: *Organizational Change And Redesign. Ideas And Insights For Improving Performance*, G.P.Huber, W. H.Glick Oxford University Press, 1993.
5. *Wellsprings of Knowledge*, D. Leonard-Barton, Harvard BuisnessSchool Press, 1995, page 75

**Autor: mr Zlata Bracanović dipl.inž.razvoja**

Institut IMR-a ,

Patrijarha Dimitrija 7-13,Rakovica, Beograd,

Tel / fax : 011-3564-031

e-mail : [zlabracanovic@yahoo.com](mailto:zlabracanovic@yahoo.com)

e-mail : [office@imr-institute.co.yu](mailto:office@imr-institute.co.yu)







Prof dr Lidija Romić

## PROCENA NOVČANIH TOKOVA PROJEKTA U MAŠINSTVU

**Rezime:** ovaj rad je dizajniran da pomogne nefinansijskim menadžerima da shvate instrumente i tehnike računovodstva, takođe ima nameru da pomogne čitaocu da razmišlja kritički o ulozi računovodstva koja je istorijski definisana. Takođe treba da pokrene čitaoce da računovodstvene informacije posmatraju kao prozor za stvarne aktivnosti koje se preduzimaju u preduzeću. Treba, takođe, naglasiti da postoje i drugi pristupi koji se ne baziraju na računovodstvenim informacijama.

**Ključne reči:** budžetiranje kapitala, procena novčanih tokova profitabilnost.

**Abstract:** this paper is designed to help non financial managers to understand the instruments and techincs of accounting, also intends to help the rider to think critically about the role of accounting which is historically defined. Also it must move riders that asccounting information see as the window for real activities which are going on in the firm. There are other approaches which are not based on accounting infomations.

**Key words:** budgeting of capital, valuing cash flows, profitability.

### UVOD

Procena novčanih tokova projekta je svakako najteži deo procesa budžetiranja kapitala. U daljem toku će biti potrebno utvrditi novčane tokove svih projekata. Novčane tokove projekata procenjivat će tim stručnjaka iz raznih delova preduzeća. Pri tome je važno odrediti skup konzistentnih ekonomskih pretpostavki na kojima će se temeljiti celokupna prognoza novčanih tokova projekata, i bitno je osigurati nepristrasnost svih učesnika u procesu procene.

### RELEVANTNI NOVČANI TOKOVI PROJEKTA

Relevantni novčani tok = novčani tok - novčani tok  
preduzeća preduzeća  
sa projektom bez projekta

### INKREMENTALNI NOVČANI TOK

Inkrementalni novčani tok se javlja kroz razliku novčanih tokova između međusobno koordiniranih poslovnih operacija sa projektom i novčanih tokova koji bi rezultirali koordiniranim poslovnim operacijama bez projekta. Pri tome se mogu pojaviti sledeći problemi pri prognozi novčanih tokova projekta:

1. Nataloženi troškovi
2. Oportunitetni troškovi
3. Eksternalije.

Nataloženi troškovi jesu troškovi koji su već nastali odnosno koji su već teretili poslovanje preduzeća pa su rezultirali nekom obavezom preduzeća. Njihovo postojanje ne zavisi od prihvatanja odnosno odbacivanja nekog projekta.

Oportunitetni troškovi su vezani s mogućnošću alternativne upotrebe resursa kojima raspolaže preduzeće. Oportunitetni troškovi su prezentirani njihovom tržišnom vrednošću.

U smislu inkrementalnih novčanih tokova pod eksternalijama treba razumeti međuzavisnost uticaja analiziranog projekta na druge delove preduzeća i obrnuto. Inkrementalni novčani tokovi se tretiraju kao novčani tokovi nakon poreza. Njihova procena se temelji na računovodstvenom konceptu profita, dakle razlike prihoda i troškova. Pri tome se ne računa sa kamatama kao imanentnim

troškovima projekta. Sama veličina inkrementalnih novčanih tokova određuje se prema stvarnom teretu poreza, a ne prema izveštajnoj računovodstvenoj dobiti.

### NOVČANI TOKOVI PROJEKTA

Novčani tokovi projekta se procenjuju na temelju prognoze računovodstvene dobiti. Najpre se prognoziraju relevantni prihodi i troškovi projekta. Novčani tokovi projekta se javljaju kao svojevrsni derivati računovodstvene dobiti (zarade nakon poreza). Na temelju tih zarada novčani se tokovi aproksimiraju veličinom zarada nakon poreza i amortizacije. Za izračunavanje poreskog tereta trebalo bi koristiti marginalnu poresku stopu dakle stopu poslednjeg sloja oporezive dobiti. Marginalna poreska stopa mora biti utvrđena prema odnosu iskazane dobiti prema poreskom zakonu i računovodstvenoj dobiti. Zbog toga mnogi analitičari koriste umesto računovodstvene dobiti, onu izračunatu prema poreskom zakonu da bi dobili realnu sliku čistog novčanog toka projekta. Amortizacija osigurava novčane uštede temeljene na poreskom zakonu zarada preduzeća, to će se i politika amortizacije odraziti na kreiranje različitih modela novčanih tokova projekta. Primena linearne metode amortizacije stvorit će konstantne novčane tokove projekta kroz stalan iznos poreskog zakona od amortizacije. Primenom degresivne metode amortizacije novčani tokovi od poreskog zakona bit će raspoređeni povoljnije, jer će veći iznosi biti bliži sadašnjosti. Tako će njihova sadašnja vrednost biti veća od sadašnje vrednosti novčanih tokova uz linearnu amortizaciju. Obrnuto bi bilo uz primenu progresivne amortizacije kod koje se amortizacioni iznosi stalno povećavaju.

Procena ulaganja u fiksnu imovinu se može tretirati jednostavnijim delom procene investicionih troškova. Ona se vrši na osnovu definisane specifikacije potrebnog zemljišta, zgrada, strojeva, uređaja i druge opreme za obavljanje proizvodno poslovnih operacija predviđenih projektom. Da bi se poslovni proces mogao odvijati kontinuirano potrebno je uložiti tj. osigurati određene oblike tekuće imovine, obrtna sredstva koja će biti stalno prisutna u veku njegovog efektuiranja. Reč je o zalihama i potraživanjima koja se moraju dugoročno finansirati da bi se poslovni proces mogao nesmetano odvijati, bez zastoja. Tekuća imovina koja se finansira dugoročno naziva se neto obrtnim kapitalom.

## TEKUĆA IMOVINA

Postoje dva temeljna pristupa prognozi veličine potrebne permanentne tekuće imovine, a time i potrebnog neto obrtnog kapitala. To su:

1. Direktni,
2. Indirektni pristup.

Direktni pristup procenjuje potrebnu veličinu permanentne tekuće imovine minimizacijom troškova držanja pojedinih oblika permanentne tekuće imovine. Ukupni troškovi držanja permanentne tekuće imovine sastoje se od troškova sticanja i troškova samoga držanja pojedinog oblika tekuće imovine. I jedna i druga količina ukupnih troškova zavisi od količine nabavke. Što je količina nabavke veća, fiksni troškovi sticanja su manji, ali su troškovi samoga držanja veći. Na taj način se optimalna nabavka postiže onda kada se ostvaruju minimalni ukupni troškovi držanja permanentne tekuće imovine.

Indirektni pristup procenjuje većinu permanentne tekuće imovine preko koeficijenta obrtaja. Tu se za svaku značajnu vrstu tekuće imovine najpre izračunaju dani vezivanja u poslovnim procesima. Deljenjem broja dana u godini sa brojem dana vezivanja pojedinog oblika tekuće imovine u poslovnom procesu izračunava se koeficijent obrtaja za takvu imovinu.

Metoda postotka od prodaje se odnosi na dinamiku potrebnog neto obrtnog kapitala koja zavisi od obima poslovne aktivnosti preduzeća, odnosno investicionog projekta u godinama njegovog efektuiranja. Što je obim poslovne aktivnosti veći, biće veći i potreban neto obrtni kapital i obrnuto. Zbog toga se povećanjem poslovne aktivnosti nekog projekta dolazi do povećanja potrebnog neto obrtnog kapitala, što zahteva dodatne investicije.

Prilikom investiranja u određene projekte se mogu pojaviti višekratna investiciona ulaganja. Da bi bila vremenski usporediva potrebno ih je korigovati za njihovu vremensku vrednost. Dva su načina za rešavanje problema višekratnih investicionih ulaganja. Prvi način rešava problem tako da se višekratna ulaganja svedu na vreme prvog investicionog izdatka. Drugi način svodi se na utvrđivanje svih novčanih tokova, investicionih i tekućih, na vreme početka efektuiranja, odnosno završetka razdoblja investiranja u projekat.

Prognoza varijabilnih troškova je slična prognozi veličine i dinamike prihoda. Prognoza čistih novčanih tokova se obavlja tako da se utvrdi veličina i dinamika dobiti projekta pre poreza.

Od te stope dobiti se oduzima porez iz dobiti prema marginalnoj poreskoj stopi na dobit preduzeća. Na taj način se prognozira veličina i dinamika čiste poslovne dobiti projekta.

Sintagmom rezidualna vrednost označava se vrednost projekta koju će imati istekom veka efektuiranja. Reč je o vrednosti zemljišta, zgrada i opreme koja će preostati nakon što projekat prestane davati efekte kao i o vrednosti neto obrtnog kapitala koji će se osloboditi prestankom eksploatacije projekta. Budući da se ta vrednost realizuje na kraju veka efektuiranja projekta naziva se još i konačnom vrednošću.

Procenom novčanih primitaka od rezidualne vrednosti fiksne imovine treba obuhvatiti ne samo neoporezivi deo koji bi se ostvario povećanjem dobiti nakon poreza od prodaje fiksne imovine. Pri tome veliku važnost ima knjigovodstvena vrednost fiksne imovine na kraju efektuiranja projekta, jer će se ona otpisati na teret oporezive dobiti preduzeća kao trošak rashodovanja fiksne imovine.

Investitori se nastoje zaštititi od rizika padanja vrednosti svojih ulaganja, stoga u zahtevane prinose na investicije uračunavaju i rizik inflacije uvećavajući stvarnu

stopu zahtevane profitabilnosti za stopu inflacije. Inflatorni dobiti nastaje zbog bržeg rasta prodajnih cena preduzeća u odnosu na prosečan rast nabavnih cena. Sa druge strane inflatorni gubici će nastati zbog bržeg rasta prosečnih nabavnih cena od porasta prodajnih cena.

Vek efektuiranja projekta jeste onaj broj godina ili drugih razdoblja u kojima on ostvaruje pozitivne efekte, dakle u kojem ga se ekonomski isplati eksploatisati. S ekonomskog aspekta vek efektuiranja je određen očekivanim pozitivnim ekonomskim učincima nekog projekta. To znači da bi projekat trebalo koristiti sve dok se njime mogu ostvariti godišnji prihodi veći od godišnjih troškova, jer se na taj način ostvaruje pozitivan poslovni rezultat, odnosno profit. Dakle, tada preduzeće zarađuje za svoje deoničare.

To možemo i formulom izraziti:

$$P_t > C_t \quad \Pi > 0$$

Uslov ekonomske isplativosti iskorišćavanja projekta je da preduzeće ostvaruje tekuće novčane primitke iz poslovanja veće od tekućih novčanih izdataka. Samo ako je diskontirana vrednost čistog novčanog toka i rezidualne vrednosti sledećeg razdoblja veća od čistog novčanog toka prethodnog razdoblja isplati se i dalje eksploatisati projekat. Takav način rezonovanja je povezan sa kriterijumom čiste sadašnje vrednosti.

Zamena je specifičan oblik projekta. Može se razmatrati kada je određeno sredstvo dotrajalo ili kada ono može osiguravati postizanje pozitivnih čistih novčanih tokova. Mnogo je bolja situacija kada donositelj odluke razmatra zamenu opreme ili druge imovine koja može i dalje ostvarivati pozitivne efekte čiste novčane tokove, ali se može zameniti sa efikasnijom opremom.

## ZAKLJUČAK

Prognozu novčanih tokova projekta je potrebno osigurati od mogućih jednostranih sklonosti pojedinih menadžera nekim projektima. Te sklonosti mogu rezultirati preceñivanjem profitabilnosti određenih projekata. Pri prognozi novčanih tokova projekata i njihova vrednovanja potrebno je obratiti pažnju na upravljačke opcije. One uključuju sledeće šanse koje se nameću menadžerima:

1. oportunitet razvoja drugih sličnih proizvoda
2. oportunitet povećanja tržišta za proizvode
3. oportunitet razvoja novih prerađivačkih postrojenja
4. oportunitet napuštanja projekata i sl.

Konceptualno istinska čista sadašnja vrednost projekta se može izraziti kao zbir tradicionalne čiste sadašnje vrednosti projekta i vrednosti upravljačkih opcija

$$iS_o = S_o + M_o$$

## LITERATURA

1. John Argenti, Systematic Corporate Planing, Van Nostrand Reinhold, Workingham Berkshire 1985;
2. Zvi Bodie, Compound interest depreciation on capital investment, Harward Business rewiev 1982;
3. R. A. Brealey S.C. Myers, Principles of corporate finance, McGraw Hill Book, New York 1982.

**Autor: Prof dr Lidija Romić, Ekonomski fakultet Subotica**

Milanović, D.D., Misita, M., Karić, M.

## PRIMENA AHP METODE ZA IZBOR ERP REŠENJA

**Rezime:** U radu je prikazan model odlučivanja za izbor odgovarajućeg ERP (Enterprise Resource Planning) rešenja. ERP predstavlja savremen softverski alat za realizaciju poslovnih ciljeva preduzeća. Na tržištu postoji preko 80 različitih ERP paketa. Izbor odgovarajućeg ERP rešenja za konkretno preduzeće zavisi od niza uticajnih kriterijuma. U radu smo pokušali da definišemo uticajne kriterijume na izbor ERP-a i na osnovu toga generisana je hijerarhija kriterijuma i alternativa. Korišćenjem sistema za podršku odlučivanju analizirani su rezultati pomoću AHP tehnike.

**Ključne reči:** Višekriterijumski model, AHP, ERP.

## APPLICATION AHP METHOD FOR ERP SOLUTION CHOOSING

**Abstract:** This paper presents a multicriteria model for ERP (Enterprise Resource Planning) solution choosing. ERP is actual software for realization enterprises goals. There are more than 80 ERP software on the market. Choosing adequate ERP solution depends on set of a influence criteria. In this paper we try to define these influence criteria and to generate hierarchy of criteria and alternatives. Using decision support systems and AHP techniques, results are analyzed.

**Key words:** Multicriteria model, AHP, ERP.

### 1. UVOD

ERP (Enterprise Resource Planning) sistemi predstavljaju nastavak odnosno proširenje MRP (Material Requirements Planning) sistema koji su pokrivali modul vezan za planiranje materijalnih potreba. ERP sistemi pokrivaju sve osnovne funkcije preduzeća. ERP sistemi predstavljaju integraciju nekoliko izvora podataka i procesa u jedan integrisan sistem. Klasični ERP sistemi koriste više softverskih i hardverskih komponenti, ali i jedinstvenu bazu podataka u kojoj se čuvaju podaci iz različitih modula. Dakle, ključna karakteristika ERP softvera je jedinstvena baza podataka i modularni softverski sistem. Osnovne prednosti primene ERP rešenja su: povećanje kvaliteta menadžmenta, eliminacija programskih grešaka, adaptacija je jeftinija od razvoja, profesionalna obuka, usklađivanje sa standardima i sl. Od nedostataka navodi se: prateće organizacione promene (što je ponekad i prednost), eventualna nabavka hardverske infrastrukture, prilagođavanja može biti neplanirano komplikovano, teško je predvideti posledice izmena itd [1,4].

### 2. TRŽIŠTE ERP

Prema istraživanju kompanije Gartner, udeo komercijalnih ERP rešenja bio je:

- SAP (28.7% tržišta),
- ORACLE Applications (10.2% tržišta),
- The Sage Group (7.4% tržišta),
- Microsoft Dynamics (3.7% tržišta) i
- Infor Global Solution (2.8% tržišta).

U odnosu na 2005 godinu, u 2006.g zabeležen je porast zastupljenosti ERP softvera za 7,9% što prevedeno u tržišnu vrednosti iznosi oko 17,5 milijardi dolara. prihoda od licenci i održavanja. U 2007. g. prihod na svetskom tržištu od ERP softvera uvećen je za 9,9% u odnosu na 2006. god. Procenjuje se da će 2008 prihod od ERP softvera biti 8,8% veći nego u prethodnoj godini, i da će sa istom stopom rasti do 2012.g. Navedeni podaci pokazuju rastući trend u primeni ERP

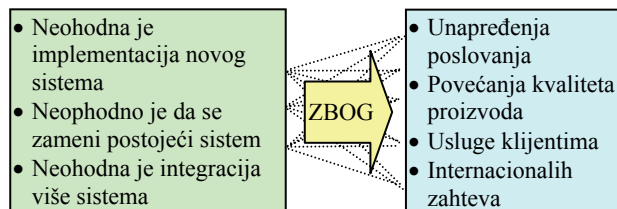
softvera, ali takođe i na tržištu pojavljuje se sve veći broj ERP dobavljača. Trenutno na svetskom tržištu registrovano je oko 80 ERP softvera.

Rastući broj ERP softvera usložnjava problem izbora adekvatnog alata za konkretno poslovno-proizvodno preduzeće. U daljem radu razmatrali smo samo izbor ERP softvera za preduzeća proizvodnog karaktera (određen broj ERP softvera namenjen je preduzećima koja se bave pružanjem usluge, distribucije, finansijke institucije, osiguravajuća društva, itd.)

### 3. DEFINISANJE UTICAJNIH KRITERIJUMA ZA IZBOR ERP REŠENJA

Razmatrali smo set uticajnih kriterijuma za proizvodna preduzeća u uslovima poslovanja u našoj zemlji. U daljem tekstu definisali smo 9 ključnih pitanja na osnovu kojih bi mogli da napravimo preliminarnu listu ERP paketa i sadržajnih modula koji u konkretnom proizvodnom preduzeću mogu da pruže adekvatnu podršku u skladu sa potrebama.

#### 1. Cilj uvođenja ERP sistema



Slika 1. Cilj uvođenja ERP

#### 2. Vrsta proizvodnje

- Pojedinačna proizvodnja
- Serijska proizvodnja
- Masovna proizvodnja

#### 3. Model proizvodnje



- Tačno-Na-Vrijeme proizvodnja (Just in time)
  - Proizvodnja prema planu
  - Proizvodnja prema narudžbi (Make to order)
  - Proizvodna prema zalihama (Make to stock)
  - Projektno orijentirana proizvodnja
  - Proizvodna linija
  - Mešoviti model proizvodnje
- Godišnji prihod
  - Broj zaposlenih
  - Broj korisnika ERP sistema
  - Od ERP dobavljača, očekuje se sledeća podrška?
    - Prilagodjavanje i integraciju kao deo procesa implementacije
    - Godišnje održavanje
    - Obuka i podrška
  - Veličina preduzeća i organizaciona struktura
    - Regionalna
    - Nacionalna
    - Multinacionalna
  - Neophodno je da ERP rešenje ima sledeće module:
    - Planiranje
    - Praćenje proizvodnih procesa
    - Analiza poslovanja
    - Upravljanje proizvodnim procesima
    - Podrška kupcima
    - Upravljanje rezervnim delovima
    - Upravljanje kadrovima
    - Upravljanje nabavkom
    - Upravljanje kalitetom
    - Upravljanje životnim ciklusom proizvoda
    - Marketing menadžment
    - Finansije i računovodstvo
    - E-poslovanje

Takođe, neohodno je definisati i niz tehničkih pitanja – kriterijuma, kao što su: postojanje informatičke infrastrukture (server, mreža, klijenti), postojeć DBMS (data base management system), itd.

U odnosu na kvalitet softvera prema internacionalnom standardu za evaluaciju kvaliteta softvera ISO 9126, definisani su sledeći kriterijumi i podkriterijumi [5]:

- Funkcionalnost
- Pouzadnost
- Upotrebljivost
- Efiksantost
- Održavanje
- Prenosivost

#### 4. GENERISANJE HIJERARHIJE

U skladu sa definisanim kriterijumima, generisali smo hijerarhiju za konkretan primer jednog preduzeća koje je na postavljeni set pitanja dalo sledeće odgovore:

- Neophodna je implementacija novog sistema radi unapređenja poslovanja i dostignuća internacionalnih standarda
- Proizvodnja je serijska
- Model proizvodnja je prema planu
- Godišnji prihod je ispod 2 mil. evra
- Zaposlenih u preduzeću ima oko 850
- ERP sistem koristilo bi 50 korisnika
- Od dobavljača se očekuje obuka i održavanje sistema
- Preduzeće je organizovano da ima distribuciju iz jednog centra, ali postoji strateški plan širenja veličine i organizacione strukture na inostrano tržište, od ERP softvera se očekuje da će upravo da adekvatno podrži rast i razvoj preduzeća
- Neophodno je da ERP rešenje ima sledeće module:
  - Planiranje

- Praćenje proizvodnih procesa
- Analiza poslovanja
- Upravljanje proizvodnim procesima
- Upravljanje rezervnim delovima
- Upravljanje kadrovima
- Upravljanje nabavkom
- Upravljanje kalitetom

Uži izbor predstavljaju ERP paketi koji podržavaju Make-to order model proizvodnje, podržavaju rad za predviđeni broj korisnika i imaju module koji su definisani kao neophodni za konkretan primer preduzeća. Finalni izbor između ERP paketa moguće je napraviti na osnovu razlika u mogućnostima pojedinih modula, cene ERP paketa, kvaliteta softvera, imidž (prepoznatljiv ERP dobavljač) i zahteva u pogledu tehničkih karakteristika (server, mreža, klijenti). U tom smislu formirana je hijerarhija kriterijuma i podkriterijuma u sistemu za podršku odlučivanju u cilju rangiranja ERP paketa dobavljača: SAP, Oracle, Microsoft Dynamics. Među alternativnima nisu razmatrana Open Source rešenja, u skladu sa zahtevom korisnika. Prepoznatljivo ERP rešenja ima značajnu ulogu i u strukturi kriterijuma na prvom nivou (slika 2).

#### 1. MODULI

- Planiranje
- Praćenje proizvodnih procesa
- Analiza poslovanja
- Upravljanje proizvodnim procesima
- Upravljanje rezervnim delovima
- Upravljanje kadrovima
- Upravljanje nabavkom
- Upravljanje kalitetom
- Finansije i računovodstvo

#### 2. CENA

#### 3. KVALITET SOFTVERA

- Funkcionalnost
- Pouzadnost
- Upotrebljivost
- Efiksantost
- Održavanje
- Prenosivost

#### 4. IMIDŽ

#### 5. TEHNIČKA PODRŠKA

- Server
- Mreža
- Klijenti

Na osnovu definisanih kriterijuma generisana je hijerarhijska struktura modela. Dalje, rešavanje problema odnosi se na ocenu uticajnih kriterijuma prema važnosti u ukupnoj strukturi kriterijuma i ocenu alternativnih rešenja u odnosu na definisane kriterijume, odnosno podkriterijume.

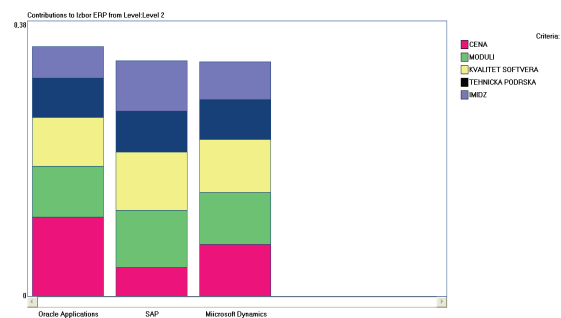
Cilj	Kriterijum	Skala	Oцена
Cilj - Izbor ERP rešenja	Moduli	Verbalna – stepen važnosti	Veoma važno
	Cena		Veoma važno
	Kvalitet softvera		Veoma važno
	Imidž		Manje važno
	Tehnička podrška		Manje važno

Kriterijumi I nivoa	Kriterijumi II nivoa	Skala	Oцена
Moduli	Planiranje	Verbalna – stepen važnosti	Veoma važno
	Praćenje proizvodnih procesa		Veoma važno
	Analiza poslovanja		Veoma važno
	Upravljanje proizvodnim procesima		Veoma važno
	Upravljanje rezervnim delovima		Veoma važno
	Upravljanje kadrovima		Veoma važno

	Upravljanje nabavkom		Veoma važno
	Upravljanje kvalitetom		Veoma važno
	Finansije i računovodstvo		Veoma važno
Kvalitet softvera	Fucionalnost	Numerička – ocena važnosti na skali 1-10	10
	Pouzadnost		9,79
	Upotrebljivost		7,50
	Efiksantost		9,87
	Održavanje		9,66
Tehnička podrška	Prenosivost		1,28
	Server	Verbalna – stepen važnosti	Veoma važno
	Mreža		Veoma važno
Klijenti	Manje važno		

Kriterijumi	Alternitive	Skala	Ocena
Moduli - Planiranje	SAP	Numerička – ocena važnosti na skali 1-100	100
	Microsoft Dymacies		74,90
	Oracle		73,74
Moduli - Praćenje proizvodnih procesa	SAP	Numerička – ocena važnosti na skali 1-100	100
	Microsoft Dymacies		97,17
	Oracle		86,94
Moduli - Analiza poslovanja	SAP	Numerička – ocena važnosti na skali 1-100	92,11
	Microsoft Dymacies		81,98
	Oracle		82,83
Moduli - Upravljanje proizvodnim procesima	SAP	Numerička – ocena važnosti na skali 1-100	100
	Microsoft Dymacies		89,07
	Oracle		83,70
Moduli - Upravljanje rezervnim delovima	SAP	Numerička – ocena važnosti na skali 1-100	98,18
	Microsoft Dymacies		84,08
	Oracle		81,82
Moduli - Upravljanje kadrovima	SAP	Numerička – ocena važnosti na skali 1-100	94,13
	Microsoft Dymacies		100
	Oracle		100
Moduli - Upravljanje nabavkom	SAP	Numerička – ocena važnosti na skali 1-100	87,20
	Microsoft Dymacies		88,19
	Oracle		78,72
Moduli - Upravljanje kvalitetom	SAP	Numerička – ocena važnosti na skali 1-100	90,08
	Microsoft Dymacies		77,94
	Oracle		82,83
Moduli - Finansije i računovodstvo	SAP	Numerička – ocena važnosti na skali 1-100	72,47
	Microsoft Dymacies		64,67
	Oracle		63,54
Cena	SAP	Numerička – 0-2,43mil\$	2,43
	Microsoft Dymacies		1,97
	Oracle		1,42
Kvalitet softvera - Funkcionalnost	SAP	Numerička – ocena važnosti na skali 1-100	99,80
	Microsoft Dymacies		89,07
	Oracle		87,88
Kvalitet softvera –Pouzadnost	SAP	Numerička – ocena važnosti na skali 1-100	100
	Microsoft Dymacies		89,07
	Oracle		84,51
Kvalitet softvera - Upotrebljivost	SAP	Numerička – ocena važnosti na skali 1-100	82,93
	Microsoft Dymacies		89,07
	Oracle		81,82
Kvalitet softvera –Efiksantost	SAP	Numerička – ocena važnosti na skali 1-100	86,10
	Microsoft Dymacies		75,00
	Oracle		75,00
Kvalitet softvera – Održavanje	SAP	Numerička – ocena važnosti na skali 1-100	94,53
	Microsoft Dymacies		82,93
	Oracle		62,67
Kvalitet softvera – Prenosivost	SAP	Numerička – ocena važnosti na skali 1-100	50,00
	Microsoft Dymacies		50,00
	Oracle		50,00
Imidž	SAP	Verbalna – stepen važnosti	Veoma važno
	Microsoft Dymacies		Manje važno
	Oracle		Manje važno
Tehnička podrška –Server	SAP	Num. ocena serverskih zahteva (1-100)	100
	Microsoft Dymacies		100
	Oracle		100
Tehnička podrška –Mreža	SAP	Num. ocena zahteva u pogledu mreže (1-100)	86,6
	Microsoft Dymacies		86,64
	Oracle		88,06
Tehnička podrška –Klijenti	SAP	Num. ocena zahteva u pogledu klijenata(1-100)	70,3
	Microsoft Dymacies		71,46
	Oracle		75,91

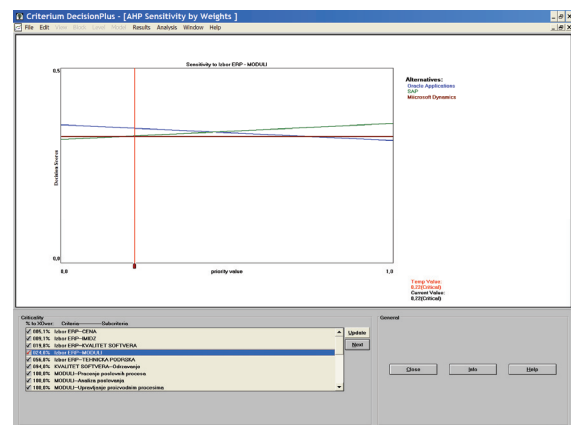
Tabela 1. Ocena kriterijuma i alternativa



Slika 2: Ranigranje alternativa

Na slici 2, prikazan je udeo uticajnih kriterijuma u ukupnom rangju alternativa prema značajnosti za konkretan primer preduzeća. Rezultati analize ukazuju da je za postavljene niz kriterijuma i definisanu uticajnu važnost pojedinih kriterijuma i podkriterijuma u ukupnom cilju, najpogodnije izabrati ERP rešenje koje nudi Oracle. Ukupna ocena alternativa dobijena je primenom AHP tehnike [3]. Struktura uticajnih kriterijuma na prvom nivou u ukupnom 'Score' kod svih alternativnih rešenja je približno ista, osim što po kriterijumu 'Cena' Oracle-ovo rešenje ima nešto veću prednost, što je i doprinelo da ova alternativa predstavlja najpovoljnije rešenje.

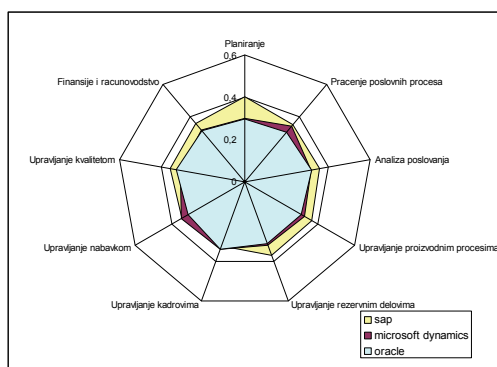
Na slici 3 prikazan je grafikon senzitivnosti za kriterijum – 'moduli', na osnovu kojeg može da se zaključi da u odnosu na posmatrani kriterijum rang alternativa nije senzitivna u odnosu na promenu relativne važnosti posmatranog kriterijuma. 'Šta-ako' analizom (what-if), tj. promenom praga značajnosti ili udela važnosti ovog kriterijuma u strukturi uticajnih kriterijuma na prvom nivou u generisanoj hijerarhiji kriterijuma, Oracle-ovo rešenje će ostati na prvom mestu u rangiranju alternativa, osim u slučaju da kriterijum 'moduli' ocenimo kao manje važan (što je predstavlja manje verovatnu situaciju).



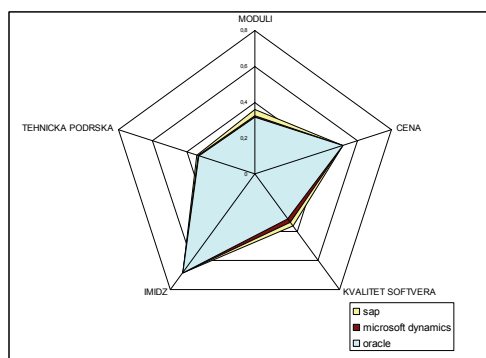
Slika 3. Grafikon senzitivnosti za kriterijum - moduli

Na slici 4 prikazana je analiza po kriterijumu– moduli. Na slici 5 data je značajnost svih kriterijuma na prvom nivou.

Ovi dijagrami omogućavaju donosiocu odluke, da sagleda prednosti i nedostatke pojedinih alternativnih rešenja u situacijama kada na izbor utiče više kriterijuma, a savremeni softverski alati poput sistema za podršku odlučivanju korisnicima olakšavaju čitav postupak projektovanja modela i analize rezultata [2,3].



Slika 4. Analiza po kriterijumu – moduli



Slika 5. Analiza po kriterijuma na prvom nivou

**Autori: Prof. dr Dragan D. Milanović, Doc. dr Mirjana Misita, Mladen Karić**, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Katedra za industrijsko inženjerstvo, Kraljice Marije 16, 11000 Beograd, Srbija, Tel.: +381 11 3302-312, Fax: +381 11 3370-364.

E-mail: [ddmilanovic@mas.bg.ac.rs](mailto:ddmilanovic@mas.bg.ac.rs)  
[mmisita@mas.bg.ac.rs](mailto:mmisita@mas.bg.ac.rs)  
[karićmladen@gmail.com](mailto:karićmladen@gmail.com)

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je prikazan model višekriterijumskog odlučivanja za izbor odgovarajućeg ERP rešenja. Model je razvijen tako što su definisani uticajni faktori koji predstajaju prvi korak u selekciji ERP rešenja za konkretno preduzeće. Nakon definisanja i ocene uticajnih faktora primenom sistema za podršku odlučivanju, izvršeno je rangiranje alternativnih rešenja. U posmatranom primeru prednost je dobio softer Oracle Application (histogram na slici 3) jer ima značajnu prednost u pogledu cene i približno iste vrednosti po drugim kriterijumima u odnosu na ostale dve alternative.

Oraclov E-Business Suite ver.12 (od januara 2007) sadrži nekoliko proizvoda (Oracle CRM, Oracle Financials, Oracle HRMS, Oracle Logistics, Oracle Mobile Supply chain Applications, Oracle Order Management, Oracle Transportation Management, Oracle Warehouse Management Systems) od kojih svaki sadrži nekoliko modula (svaki je moguće licencirati posebno).

Primena modela odlučivanja za izbor odgovarajućeg ERP rešenja, može da pomogne donosiocima odluka izaberu alat koji će da omogući bržu realizaciju postavljenih ciljeva.

## 11. LITERATURA

- [1] Bradford, M.: *Modern ERP: Select, Implement & Use Today's Advanced Business Systems*, H&M Books, NC, 2008.
- [2] Milanović, D.D., Misita, M.: *Informacioni sistemi podrške upravljanju i odlučivanju*, Mašinski fakultet, Beograd, 2008.
- [3] Milanović, D.D., Tadić, D., Misita, M.: *Informacioni sistemi menadžmenta sa primerima*, Megatrend, Beograd, 2005.
- [4] Norris, G. et al.: *E-Business and ERP: Transforming the Enterprise*, John Wiley & Sons, Canada, 2000.
- [5] Scalet et al.: *ISO/IEC 9126 and 14598 integration aspects: A Brazilian viewpoint*. The Second World Congress on Software Quality, Yokohama, Japan, 2000.



V. Komadinić, S. Trgovčević

## PRILOG IZBORU SOFTVERA ZA UPRAVLJANJE ODRŽAVANJEM

*Rezime* Izbor softvera za upravljanje održavanjem, koji treba da zadovolji funkcionalne i organizacione zahteve, se bazira na pažljivom planiranju i pripremi. U radu će biti ukratko prikazana ključna pitanja koja treba razmotriti pri donošenju odluke za nabavku softvera. **Ključne reči:** održavanje, softver, izbor, odluka

## MAINTENANCE MANAGEMENT SOFTWARE SELECTING

*Apstract* Selecting maintenance software that meets department and organizational demands centers on thorough planning and preparation. In this paper will be breafly shown key question which have to bi considered to make a decision for software purchasing. **Key words:** maintenance, software, selecting, decision

### 1. UVOD

Izbor softvera za upravljanje održavanjem, koji treba da zadovolji funkcionalne i organizacione zahteve, se bazira na pažljivom planiranju i pripremi. U današnjem poslovnom okruženju, menadžeri proizvodnje i održavanja moraju biti sposobni da prate i analiziraju operativne (radne) i troškove održavanja i mogućnost dobijanja koristi od poboljšanja pouzdanosti opreme i proizvodnih operacija. Upravljanje održavanjem podržano računom (CMMS - Computerized Maintenance Management System) je postalo suština takvih napora u mnogim industrijskim objektima.

CMMS obezbeđuje mogućnost dokumentovanja, terminiranja i praćenja troškova održavanja, popravki i rekonstrukcije pojedine opreme. Obezbeđuje istorijske podatke (zapise) o troškovima rada i materijala kao osnove za bolje planiranje budžeta održavanja i kapitalnih investicija, bolje planiranje radne snage i nivoa zaliha rezervnih delova. Pravilno izabran i implementiran CMMS je jedan od najmoćnijih alata u bilo kojoj organizaciji. Porastom broja softverskih rešenja i njihovog uticaja na ostala poslovna područja, menadžeri se suočavaju sa sve većim značajem odluke pri izboru "pravog" CMMS.

### 2. SISTEMSKI PRISTUP

Danas je na tržištu raspoloživ veliki broj CMMS proizvoda. Mada većina tih softverskih proizvoda nudi slične funkcije, neki od njih će bolje podržavati konkretno radno okruženje. Selekcija najpodesnijeg CMMS-a mora biti organizovan i precizan posao, čiji je cilj implementacija sistema koji će obezbediti efektivno planiranje i praćenje procesa održavanja. Osnovni koraci u izboru odgovarajućeg CMMS-a su:

- Odrediti CMMS tim za izbor.
- Odrediti zahtevanu funkcionalnost i definisati specifikaciju zahteva.
- Tražiti ponude od dobavljača i izvršiti njihovu reviziju.
- Zahtevati od odabranih ponuđača da demonstriraju njihov sistem.
- Izvršiti selekciju CMMS-a.

Ovaj proces zvuči prilično jednostavno, ali mnogo izazova čeka menadžere. U jednostavnom (jednostrokom) okruženju kao što je manje preduzeće, hotel ili bolnica, izbor CMMS-a može biti prilično jednostavan posao. Ali u višestrukome okruženju tipa velikih kompanija sa dislociranim fabrikama, školskog ili komunalnog sistema, menadžeri moraju razmatrati izbor sistema za upravljanje celokupnom opremom (EAM - Enterprise Asset Management) sposobnog da upravlja radovima održavanja svih filijala iz centralizovanog sistema.

Finalni izbor se mora bazirati na specificiranim zahtevima održavanja i funkcionalnosti, ne samo na tome kako je podržan računarskom mrežnom infrastrukturom ili na najnižoj ponudenoj ceni. Ako je izbor softvera uradilo IT (Informacione Tehnologije) odeljenje, a baziran je na kompatibilnosti sa softverom na postojećoj mreži, ili je izbor uradilo odeljenje nabavke na bazi najmanje cene, verovatno će izabrani CMMS biti neadekvatan da podrži potrebe održavanja.

### 3. TIM ZA IZBOR CMMS-A

Prvi korak u procesu izbora CMMS-a je definisanje tima. Tim mora uključiti predstavnike svih funkcionalnih područja organizacije koja koriste ili su u vezi sa sistemom, kao i članove IT grupe u smislu poboljšanja integracije baze podataka CMMS-a. Voden od strane menadžera održavanja, tim treba da uključi inženjera održavanja iz pogona, predradnika i planera održavanja, predstavnika radnika održavanja, predstavnika odeljenja nabavke i predstavnika skladišta rezervnih delova. Uključiti i više rukovodstvo u proces da bi se obezbedili ulazi u odnosu na željene izveštaje i metriku na upravljačkom nivou. Ako CMMS mora da funkcioniše u višestrukome okruženju, svaka filijala treba da ima predstavnika u timu.

Napraviti odgovarajući termin plan za proces izbora i implementacije CMMS-a. Ovaj proces ne mora i ne treba da bude urađen na brzinu. Statistike pokazuju da 90% greški pri implementaciji se dešavaju zbog nemanja plana, neopravdanih (nerazumnih) očekivanja i nerazumevanja zahteva implementacije.

Nerazumevanje zahteva za kreiranje i ažuriranje baza podataka CMMS-a prouzrokuje više grešaka nego bilo koji drugi razlog. Rezultat ovog neznanja (nerazumevanja) je evidentan kod većeg broja korisnika u poslednjih nekoliko godina. Oni su naručili CMMS sa najboljim namerama, imajući u vidu posebno loše godine sa puno otkaza i nemoći opravdanja zahtevanih troškova kroz proces budžetiranja. Ne sledeći bilo kakav plan procesa izbora i implementacije novog CMMS-a, za posledicu je imalo neotvorene knjige na policama, ili je CMMS instaliran i godinama kasnije ostao beskoristan.

### 4. ODREĐIVANJE FUNKCIONALNOSTI

Željena funkcionalnost softvera treba da bude dokumentovana u tri kategorije:

**Mora da ima.** Postoje čvrsti zahtevi za sistem i oni su prekidači za svakog dobavljača koji ga demonstrira.



**Treba da ima.** Ovi funkcionalni zahtevi treba da budu deo svakog CMMS-a, ali nisu svi dobavljači sposobni da ga obezbede. Korisnici treba da rade u okviru postojećih karakteristika softvera, ako dobavljač ne može da obezbedi željenu funkciju.

**Lepo bi bilo da ima.** Ako menadžer može da ima sve u CMMS-u, to bi bilo lepo. Menadžeri koji žele takav CMMS softver, smatraju da su njihovi željeni zahtevi bitni.

Menadžeri mogu koristiti ove kategorije pri definisanju željene funkcionalnosti koju softver treba da zadovolji. Oni moraju pristupiti svakom funkcionalnom području CMMS-a na isti način kao pri definisanju specifikacija za sistem.

Za većinu organizacija (preduzeća) primarna područja koja softver treba da podrži su: kompatibilnost softvera, zaštita sistema, modul za upravljanje opremom, modul za upravljanje nalogom, preventivno održavanje, modul zaliha, izveštaji i podobnost za rad na nivou celog preduzeća.

Obim krajnjih specifikacija za CMMS može značajno varirati, kao i vreme za završetak procesa selekcije. Manji klijenti (korisnici softvera) mogu imati specifikaciju na samo nekoliko stranica, a proces selekcije može trajati par nedelja. Velike organizacije sa višestrukim okruženjem mogu imati dokument od stotinu i više stranica detaljnih specifikacija, a proces selekcije može trajati do godinu dana.

## 5. PROCES NARUČIVANJA I REVIZIJE

U finalnoj fazi razvoja CMMS specifikacija, tim treba da napravi listu potencijalnih dobavljača koji su dali ponude. Menadžeri treba da imaju u vidu da tako urade dokument specifikacija, da svakom dobavljaču bude jasno šta od njega tim očekuje. Korektno prezentirana, svaka ponuda će imati svoju vlastitu metriku, omogućujući potencijalnom kupcu da napravi logičnu i jasnu odluku.

Pristizanjem ponuda odmah počinje i proces revizije. Tim treba da osigura nepristrasno ocenjivanje svakog dobavljača, kao što je numeričko vrednovanje po svakoj tački u specifikaciji za nabavku softvera.

Proces revizije ponuda je obično trenutak u kome nastupa realnost za sanjalice u timu za izbor softvera. Kroz proces definisanja CMMS specifikacije, članovi tima treba da pokušaju da navedu svaku moguću funkciju koju bi želeli da vide u novom CMMS-u. Ali nevolja može nastati ako sve ponude zadovoljavaju sve zahteve (specifikacije) u dokumentu, ili ako bilo koja ponuda zadovoljava želje svakog člana tima.

Na osnovu ove diskusije o troškovima (ceni) CMMS-a se može uopšteno govoriti. Ponude dobavljača pružaju timu, u prvo vreme, stvaran uvid u troškove (cenu) nabavke CMMS-a. Troškovi nabavke CMMS-a će varirati u zavisnosti od funkcionalnosti i mogućnosti sistema, kao i od broja radnih stanica i broja istovremenih korisnika softvera.

Dodatni troškovi uključuju instalaciju sistema od strane isporučioaca, kao i dogovorene godišnje troškove održavanja sistema i isporuke dodatnih karakteristika sistema (održavanje ažurnosti sistema, odnosno instaliranje poboljšanja sistema). Menadžeri treba da planiraju troškove instaliranja i godišnjeg održavanja sistema, kada prave budžet za novi CMMS.

Nakon ocene svih ponuđača CMMS-a, tim za izbor treba da skрати listu potencijalnih dobavljača na dva ili tri.

## 6. ŽIVA DEMONSTRACIJA

Kada je tim napravio listu potencijalnih CMMS softvera, članovi tima će želeći da vide sisteme u radu. Najpogodniji način da se ovo izvede je demonstracija sistema u realnom okruženju. Kroz fazu razvoja specifikacije zahteva, tim je

razvio scenario demonstracije koji će biti poslat dobavljačima finalistima. Scenario je tako dizajniran da dobavljačima daje identične informacije i instrukcije neophodne da demonstriraju njihov sistem.

Demo verzija paketa će se sastojati od nekoliko zapisa vezanih za opremu, za zalihe i poslove održavanja. Uključuje i nekoliko radnih scenarija koji zahtevaju od dobavljača da demonstrira sposobnost sistema da planira poslove, generiše radne naloge, vezuje materijal i poslove održavanja za radni nalog, i kompletira i zatvara radni nalog.

Pri donošenju logične odluke u vezi podobnosti CMMS-a za podršku poslovanju organizacije, tim takođe treba da zahteva od dobavljača da demonstrira i sposobnost izveštavanja njihovog sistema, kao i ostalih funkcionalnih karakteristika koje su od značaja.

Ovde je veoma važno jedno upozorenje. Treba biti vrlo obazriv pri raspitivanju o karakteristikama prilagodavanja CMMS-a zahtevima kupca. Veliki broj, na tržištu raspoloživih paketa, podržava većinu zahteva funkcije održavanja. Bilo koja karakteristika dodata stemu, sa dodatnim troškovima, naravno, mora biti reimplementirana pri svakoj sledećoj nadgradnji ili reviziji sistema - opet, sa dodatnom troškovima. Prilagodavanje bilo kog CMMS-a će postati periodičan trošak koji će brzo postati vrlo neprijatan.

Pošto su demonstracije sistema završene, tim je spreman da donese konačnu odluku. Ali članovi tima treba da budu pažljivi i da odvoje neko vreme za donošenje ove odluke. Oprema će morati da živi (da radi) sa odlukom tima puno godina.

## 7. ZAKLJUČAK

Izbor softvera za podršku upravljanju održavanjem tehničkih sistema (oprema u najširem smislu) je proces koji zahteva pažljivo planiranje i pripremu. Da bi se odabrao adekvatan softver i izvršila njegova uspešna implementacija neophodno je: odrediti tim za izbor koji čine članovi iz različitih funkcionalnih područja organizacije, definisati specifikaciju zahteva koje softver treba da zadovolji (funkcionalnost softvera), izvršiti reviziju ponuda potencijalnih isporučilaca i zahtevati od odabranih ponuđača demonstraciju softvera u realnom okruženju. Tek nakon sprovođenja navedenih aktivnosti moguće je napraviti "pravi" izbor. Cilj ovog rada je da se da skroman doprinos pri rešavanju ovog problema.

## LITERATURA

- [1] Spasić Ž., Komadinić V., ..., *MAPICS Modules in CIM Environment*, Internacional Conference on Computer Integrated Manufacturing CIM'96, Zakopane, 1996.
- [2] SAP R/3 System, Plant Maintenance, SAP AG, 2002.
- [3] Komadinić V., Vukićević V., *Analiza softverskih proizvoda za upravljanje održavanjem tehničkih sistema*, 29. JUPITER Konferencija, Beograd, 2004.
- [4] Vukićević V., Komadinić V., Bošković V., *Prilog izboru koncepcija održavanja tehničkih sistema*, 29. JUPITER Konferencija, Beograd, 2004.
- [5] Vasić B., *Menadžment i inženjering u održavanju*, IIPP, Beograd, 2004.
- [6] Jovanović B., Vasiljević D., *U susret sistemima održavanja četvrte generacije*, Tehnička dijagnostika br.1, Beograd, 2006.
- [7] <http://www.plant-maintenance.com>

**Autori:** Mr Velimir Komadinić, dipl.inž., Sanja Trgovčević, dipl.inž., LOLA Institut, Kneza Višeslava 70a, 11030 Beograd

Mircheski Ile, Sidorenko Sofija

## SYNCHRONIZATION OF FOUR BASIC ERGONOMIC PARAMETERS FOR THE DRIVER'S COMFORT IN VEHICLES

*In this paper a research about the determination of the basic components of comfort for the vehicle's driver is presented. The main goal of our research was to determine the placement of the pedals and the necessary space for foot controls in vehicles, as well as the ranges of adjustments of the driver's seat and steering wheel. The analysis has been made with digital human models – virtual mannequins. The starting points of the analyses were the differences between anthropometric characteristics of the human body - 5% tile woman and 95% tile man, as well as the angles of comfort for the legs and arms during driving. Four different concepts for the hand and foot controls positioning were examined and the best one was adopted for further improvement. The final concept was adopted as a guide for improving the design of the vehicles, especially the driver's comfort.*

**Key words:** comfort angles, digital human model, ergonomics, hand control, foot control, safety, vehicle, virtual mannequin;

**Authors:** Mircheski Ile, B.Sc, Assistant, Ss Cyril & Methodius University, Faculty of Mechanical Engineering, Karpos II - bb, 1000 Skopje, Republic of Macedonia; mail: ile\_mirceski@mf.edu.mk, Phone: +389 2 3099 245, Sidorenko Sofija, Ph-D, Associate professor, Ss Cyril & Methodius University, Faculty of Mechanical Engineering, Karpos II - bb, 1000 Skopje, Republic of Macedonia; mail: sofsido@mf.edu.mk, Phone: +389 2 3099 261

### 1. INTRODUCTION

The development process for vehicles as products was based on the specific producers' experience and knowledge in the past. The verification of the prototypes was performed mostly through real tests. The same process today is based on the virtual tools for design and verification testing [2]. Application of the software tools for virtual presentation of the design and software tools for process simulation and system behavior enables reduction of the time for physical prototype's testing. Reduced time for testing, on the other hand, enables obtaining of a new or improved product for a relatively short period with reduced price. Virtual tools for design and simulations today have a great importance in planning of the vehicle's interior components in accordance with the human body characteristics [1].

The main goal of our research is determination of the basic components of comfort for the vehicle's driver: placement of the pedals for foot controls, adjustment range for the driver's seat and adjustment range of the steering wheel. The four basic ergonomic criteria for the analysis of these components were established after the selection of the user population and their appropriated anthropometric data. The results of the analysis are usable ergonomic criteria for definition of the vehicle's interior space size and comfort.

### 2. DEFINITION OF THE ERGONOMIC AND TESTING CRITERIA

The initial point in the process of vehicle design is man or people who have to be transported. Sitting of the driver and other passengers, arrangement of all handling devices and controls, as well as application of all safety regulations and legislation, are very important initial points in order to perform the overall dimensioning of the vehicle. The process of design starts with definition of a user population and with obtaining of human body data.

Statistical information about body size is applicable to the problem of vehicle design. The ranges of seat and steering wheel adjustments are directly dependent of the body sizes of the smallest and biggest representative of the selected user population. The analyses will be applied on two extreme human sizes – 5% tile woman and 95% tile man.

Functional anthropometric data describe the movement of a body part with respect to a fixed reference point. Each functional anthropometric measurement represents possible angle range of the body part's movement.

The area swept out by the movement of the hand can be used to describe 'workspace envelopes', zones of easy or maximum reach around an operator. The size and shape of the workspace envelope depends on the position of the human's body. In the case of driver's work position in the vehicle several functional measurements are very important parameters: the angles in elbow joint, shoulder joint, hip joint, knee joint, ankle joint and torso orientation (fig.1).

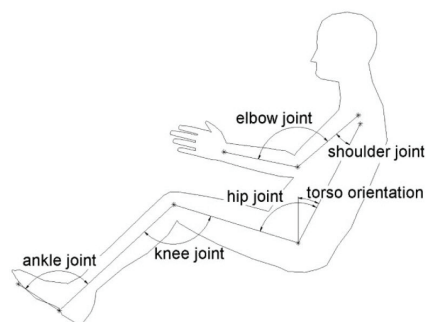


Fig. 1 Parameters of driver's work position

In order to obtain driving comfort the parameters of driver's position always have to be in the comfortable range [3]. A lot of researchers during the past few years have offered their recommendations about the ranges of comfortable angles [4]. There are big differences between their recommendations about the comfort angles. Some of them recommend discrete comfort angles, and the others recommend ranges of comfort. Using the fact that RAMSIS software [5] is specialized for the ergonomics in vehicles we decided to adopt the recommended discrete comfort angles included in the incorporated RAMSIS data bases (Table 1). They will describe the driver's seating posture for the following testing conditions.

Torso orientation	27 <sup>0</sup>
Angle of shoulder joint	22 <sup>0</sup>
Angle of elbow joint	127 <sup>0</sup>
Angle of hip joint	99 <sup>0</sup>
Angle of knee joint	119 <sup>0</sup>
Angle of ankle joint	103 <sup>0</sup>

Table 1. Adopted comfortable angles for the driver's seating posture

### 3. TESTING CONCEPTS

Virtual mannequins of several anthropometric sizes with adopted comfortable posture will be examined in four different testing situations with initial fixed point were established: fixed eye point, fixed hand point, fixed hip point and fixed heel point. The expected results of the testing will be the ranges of necessary horizontal and vertical adjustments of the seat and steering wheel in order to accommodate drivers of different human sizes.

At the end, the results from all four basic concepts will be summarized. Identification of the advantages and disadvantages of each concept separately will be discussed and the best one will be selected for further elaboration.

All of the concepts have to follow the main principle: perfect visual control. The vehicle can not be successfully controlled without fulfillment of this principle.

#### 3.1 Concept with fixed eye point

The criteria of fixed eye point for all anthropometric sizes is fulfilled by adjustment of the seat in the horizontal range of 43,31 mm and vertical range of 85 mm (fig. 2). The steering wheel has rectilinear trajectory of adjustment explained with the expression  $\sqrt{119,31^2 + 57,95^2} = 132,6$  mm.

There is also necessity of adjustments of the pedals in the horizontal range of 129,07 mm and in the vertical range of 218,06 mm. These adjustments are real problem because of the expenses and technical problems.

presented concept. The fact that foot pedal adjustments are not necessary is advantage of the concept.

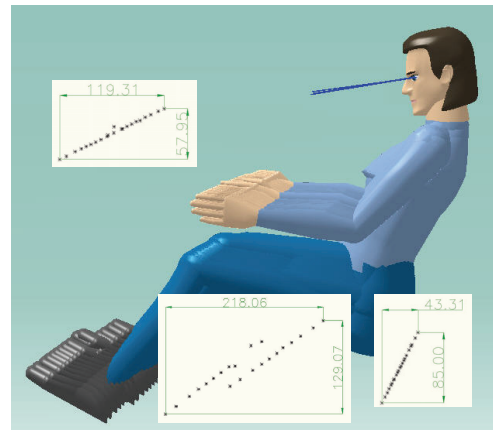


Fig. 2 Concept with fixed eye point

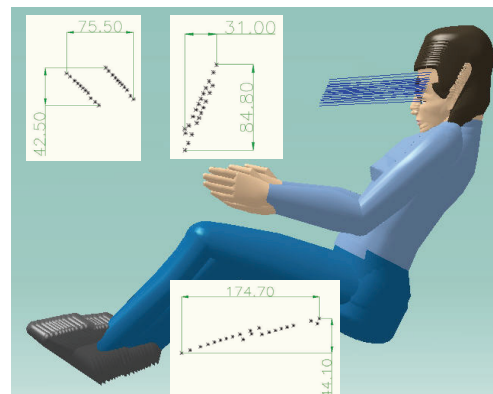


Fig. 3 Concept with fixed H-point

#### 3.2 Concept with fixed H-point

The second concept proposes fixed H-point, which means the driver's seat to be fixed in the vehicle (fig. 3). The advantages of the fixed seat in comparison with the adjustable one are: fixed vehicle length, belt positioning, stiffness, and crash safety.

In this case the seat is fixed and the driver can not reach the appropriate eye height that is very important for the visual driving control. The horizontal adjustment of 31 mm and vertical adjustment of 44.1 mm is missing.

The steering wheel has to be adjusted also: horizontal adjustment of 75,5 mm and vertical adjustment of 42,5 mm. It is not a problem for these adjustments to be designed and produced, but the real problem exists with the foot pedal adjustments, which are not so small to be neglected: 44,1 mm vertical adjustment and 174,7 mm horizontal adjustment.

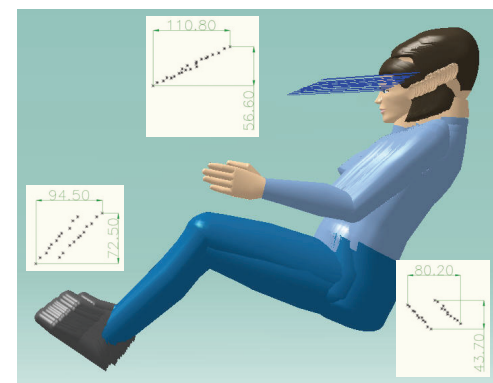


Fig. 4 Concept with fixed hand point

#### 3.3. Concept with fixed hand point

The concept with fixed hand point proposes fixed steering wheel, but the seat and the foot pedals have to be adjustable in two directions, horizontal and vertical (fig. 4). The eye point in this case can not be positioned on the recommended height, but it is not a big problem because the difference is only 56,6 mm and it can be neglected. From this point of view, it could be considered that the questions of view and visualization in this case are positive.

This concept is inapplicable for practical realization because the foot pedal adjustments are too expensive.

#### 3.4. Concept with fixed heel point

The concept with fixed heel point proposes fixed foot controls (fig. 5). The seat has to be adjustable 172.6 mm in horizontal direction and 58.3 mm in vertical direction. The steering wheel has to be adjustable 97.1 mm in horizontal direction and 87.4 mm in vertical direction. But, the problem has appeared with the visibility. The difference between the recommended and obtained eye height for the smallest driver is really big - 143.1 mm. This fact is disadvantage of the

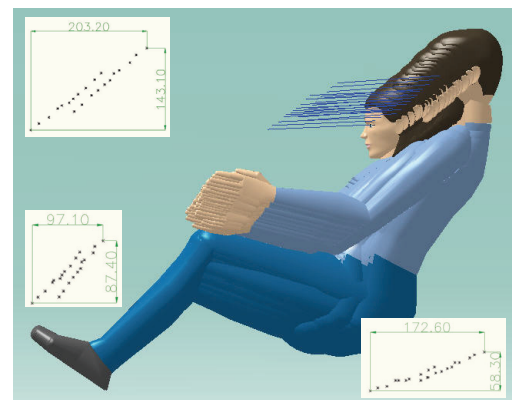


Fig.5 Concept with fixed heel point



### 3.5 Selection of the best concept

All of the presented concepts have advantages and disadvantages. Our goal is to find good, ergonomic and economically viable solution for the problem of driver's comfort.

The concept with fixed eye point is ideal from the ergonomic aspect, but the foot control adjustments are too complex and expensive. The vertical adjustment of the pedals means the adjustment of the floor under the driver's feet. This is the reasons for its rating as not acceptable for real production. It can be very useful and appropriate only in the special case of car design without foot controls. The vehicles for disabled, equipped only with hand controls, can be designed on the base of this concept.

The concept with fixed H-point and the concept with fixed hand point are also unacceptable. The necessary adjustments of foot controls are too complex and expensive, so they are not economically viable.

The concept with fixed heel point is the most appropriate as a solution of the problem, because there is no need for expensive and complex foot control adjustments. The adjustments of seat and steering wheel are already applied in the cars and there is no other problem of adjustability.

The best balance between function and driver's comfort and the best solution for our problem is the concept with fixed heel point.

### 4. IMPROVEMENT OF SELECTED CONCEPT

The examinations of the presented concepts for seating of the driver have been made using virtual mannequins in empty space. It means that the limitations of the vehicle's interior space were not taken into consideration.

For the integration of the human models in the vehicle's interior additional conditions has to be fulfilled. The first condition is to provide additional space between the driver's head and the car's roof. It has to be 50 mm minimum for all of the anthropometric types.

The second condition, that is very important in the vehicle's design, is the visual control. In order to ensure perfect visibility on the road the eye points of all of the anthropometric types have to be placed on or over the line that touches the front profile of the car's shell. The visual line can be defined as a tangent line over the front profile of the car's shell that begins in the eye point of a 95% tile man. The anthropometric type of a 95% tile man has a best view as a result of his highest eye position in comparison with other anthropometric types.

Analyzing the figure 6 it can be considered that depending on the movement of the H-point for all anthropometric types the necessary horizontal adjustment of the driver's seat is 206.8 mm (fig. 6). On the other hand, the necessary vertical adjustment is very small, only 24.1 mm, and it could be neglected in order to reduce the expenses for the design and production of the additional mechanism.

The analysis also shows the adjustment field of the steering wheel. The necessary adjustment of the steering wheel in horizontal direction has to be 168.2 mm, and in vertical direction 47.9 mm. This adjustment range is bigger in comparison with the adjustment range of the existing cars.

The final condition is positioning of the pedals for foot controls. In order to obtain a good driving comfort the positioning of the pedals has to be in accordance with the comfort knee angle.

The traditional positions of the pedals in the vehicles are presented on fig.7. Acceleration pedal is usually pressed with 1/3 of the possible force and the other two pedals with the maximum possible force.

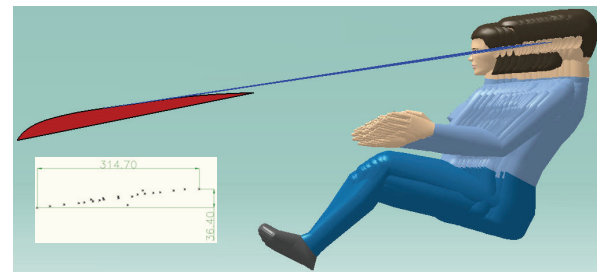


Fig. 6 Initial position with comfortable leg angles

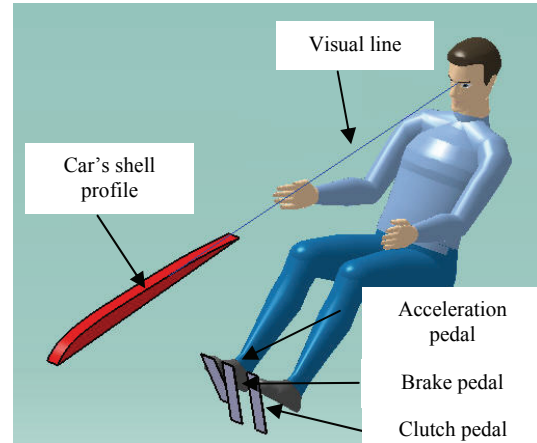


Fig. 7 Foot control positioning

In the further research several situations of different leg positions as a result of different pressing forces applied on the pedals will be examined.

The first examined situation is: the right foot in pressing position on the acceleration pedal and the left foot in relaxing position. Two different anthropometric sizes are examined – 5% tile woman and 95% tile man. The results are: comfort positions of two legs and no problems with the visual control (fig. 8).

The problem arises in the case of clutch pressing. In that case the angle in the left knee is  $180^{\circ}$ , not comfortable (fig. 9). This problem is a result of defining the initial position of the right knee with comfort angle of  $119^{\circ}$ , without taking care about the comfortable initial position of the left knee.

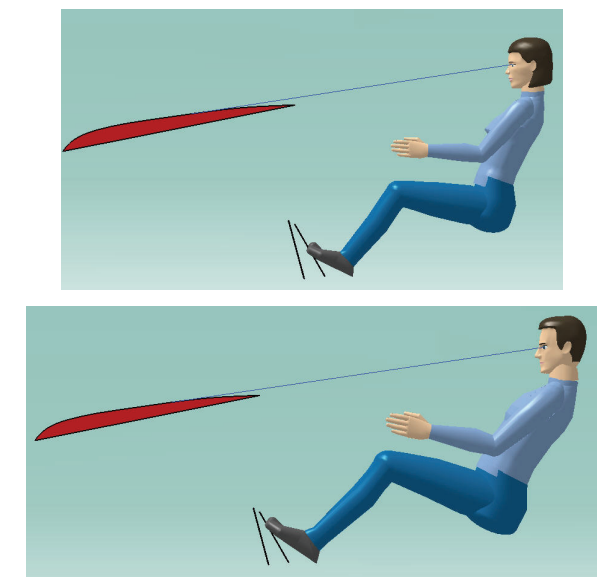


Fig. 8 The first examined situation



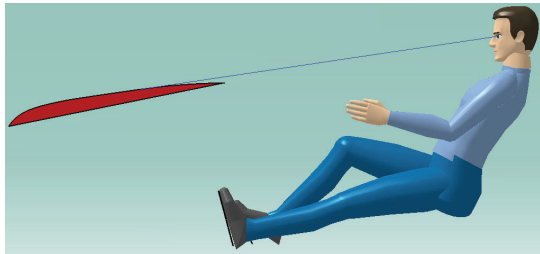
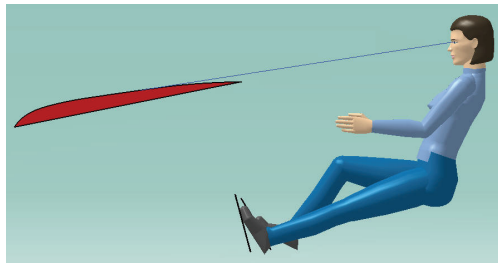


Fig. 9 The problem with clutch pressing

The second examined situation is: the right foot in pressing position on the acceleration pedal and the left foot in pressing position on the clutch pedal. The initial pressing position of the left knee is with comfort angle of  $119^{\circ}$ , without taking into consideration the comfortable initial position of the right knee. The result is discomfort of the right knee which obtain an angle of  $90^{\circ}$ . Because the right leg is almost all the time on the acceleration pedal, discomfort of the knee is not acceptable.

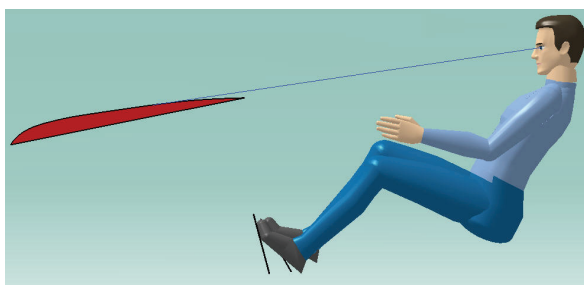
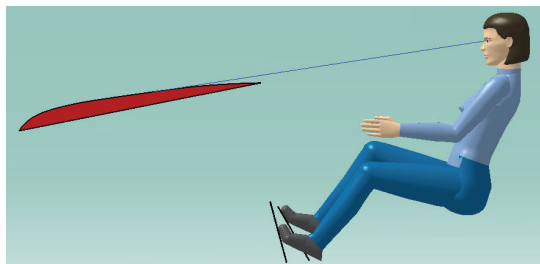


Fig. 10 The second examined situation

## 5. DEFINITION OF THE FINAL CONCEPT

Both of the models are not acceptable for the final concept: the first one is too far from the pedals, the other one is too close to the pedals. In the first case the left leg is too extended – the knee angle is  $180^{\circ}$ , in the second case the right knee angle is  $90^{\circ}$ .

The final decision about the positioning of the pedals was obtained as a result of taking into consideration the importance of the right foot control. Because of the long duration of the pressing position of the right leg on the acceleration pedal, the comfort angle of the right leg in pressing position will be the initial point.

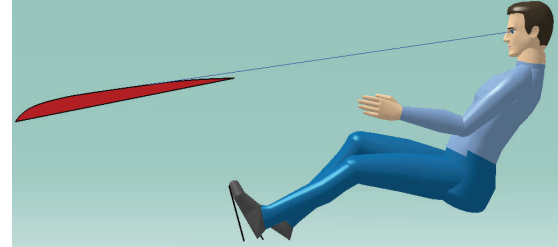
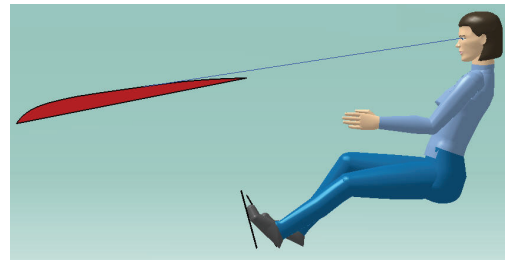


Fig. 11 Final concept

The left leg is used temporarily for pressing clutch or brake pedal and there is no need to have comfort angle. After the examination of two extreme anthropometric sizes – 5% tile woman and 95% tile man, the obtained knee angle for the left pedal is  $150^{\circ}$  – acceptable solution.

The final concept is obtained: the fixed heel point and initial comfort angle for the right leg determine the adjustable range for the seat and also adjustable range for the steering wheel. The vision control is on a high level and all the ergonomic criteria are fulfilled.

## 6. CONCLUSION

Determination of the basic components of comfort for the vehicle's driver was the main goal of our research. The obtained usable ergonomic concept for definition of the vehicle's interior space size and comfort could be a great help in vehicle's design. The placement of the pedals for foot controls, adjustment range for the driver's seat and adjustment range of the steering wheel could be efficiently determined following the obtained principles of the accepted concept.

Implementation of the virtual mannequins for the testing was a great chance to see how fast we can obtain very precise results. From the view point of the ergonomics, it is very important for the design process to predict all possible conditions, with different anthropometric sizes, in order to obtain comfortable product which could accommodate as much users as possible.

## 7. REFERENCES

- [1] Christian Vogt, Christian Mergl, and Heiner Bubb.: Interior Layout Design of Passenger Vehicles With RAMSIS, Lehrstuhl für Ergonomie, Technische Universität München, Boltzmannstr. 15, 85747 Garching, Germany
- [2] Dennis A. Attwood, Joseph M. Deeb, Mary E. Danz-Reece.: Ergonomic Solutions for the Process Industries, Elsevier Inc, 2004.
- [3] Jan Dul, Bernaer Weerdmeester: Ergonomic for beginners, Second Edition, 2001.
- [4] Karl H. E. Kroemer: "Extra – ordinary" Ergonomics, 2006.
- [5] Peter van der Meulen and Andreas Seidl.: Ramsis – The Leading Cad Tool for Ergonomic Analysis of Vehicles, Human Solutions GmbH Europaallee 10 67657 Kaiserslautern, Germany



Kheifetz M.L., Kusakin N.A., Prement G.B.

## TECHNOLOGICAL AND OPERATIONAL INHERITANCE OF PARAMETERS OF QUALITY AT RESTORATION OF DETAILS OF THE ENGINE OF INTERNAL COMBUSTION

**Abstract:** Influence of technological inheritance of physicomachanical and geometrical parameters of quality radical and crankpin a cranked shaft, cams and main journal a camshaft of the engine of internal combustion is investigated, during machining restored surfaces. Recommendations on change of consecutive technological transitions and recommendations of technical operations for maintenance of quality of processing are given.

**Key words:** Technological and operational inheritance, quality, restoration of details.

### 1. INTRODUCTION

A heredity in technology of mechanical engineering mean the phenomenon of carry of properties of processable object from previous operations and transitions to the subsequent which further affects operational properties of details of machines [Yashcheritsin P.I., et al. (1996), Vasilyev A.S., et al. (2003)]. Carriers of the hereditary information are a processable material and surfaces of a detail with all variety of parameters describing them. Data carriers actively participate in technological process, passing through various operations and transitions, testing influences of technology and operational factors [Yashcheritsin P.I., et al. (1977), Dalyskiy A.M. (1975)].

In a technological chain exist some kind of "barriers". Some technology factors overcome these "barriers" cannot and in that case their influence on final properties of object are absent. Other factors such "barriers" pass, but thus considerably lose the initial force and influence final properties very poorly [Yashcheritsin P.I., et al. (1996), Yashcheritsin P.I., et al. (1977)]. Most essential "barrier" are thermal operations, and also the operations accompanying with superficial deformation and hardening as they change a microstructure of a processable material, microgeometry of a formed surface, result to hogging details and to distortion of its form. During these operations various defects of a surface, such as structural heterogeneity, time, microcracks, can develop or «be healed». Hence, process of technological inheritance can be operated, so that the properties positively influencing quality of a detail to keep during all technological process and at operation, and the properties influencing negatively - to liquidate in its beginning [Vasilyev A.S., et al. (2003), Dalyskiy A.M. (1975)].

### 2. MODEL OF TECHNOLOGICAL INHERITANCE

Technological process of manufacturing of a detail can be submitted as the graph, allocating procuring, draft operations, and also fair and finishing operations [Vasilyev A.S., et al. (2003)]. Graph, as a rule, is focused, and parameters of quality are interconnected among themselves (fig. 1).

The initial top the graph, at the description of technological process represents preparation (P). Final top of technological process - a ready detail (D). Focused edges the graph show transfer of operational properties of a detail at processing. Transfer of an edge is described by the factor of inheritance  $K$  showing quantitative change of property and equal relation previous  $S_j$  and subsequent  $S_{j+1}$  of values of property [Dalyskiy A.M. (1975)]:

$$K = S_j/S_{j+1}.$$

Besides direct transfer of properties (fig. 1) at technological inheritance their interference (is expedient to estimate fig. 2). The general structure of technological process can be presented as complex multivariate system, as sequence of change of key parameters of quality of a detail [Vasilyev A.S., et al. (2003)]. On an input of technological system of processing various characteristics of preparation  $\{S_{10}, S_{20}, \dots, S_{m0}\}$ , and on its output the corresponding set of the same characteristics for a ready detail  $\{S_{1p}, S_{2p}, \dots, S_{mp}\}$ . These changes are defined by action of set technological  $\{t_{11}, t_{12}, \dots, t_{1n}\}$  factors for each operation  $\varphi_j$  of technological process [Yashcheritsin P.I., et al. (1977)]. So for parameter of quality  $S$  after final processing [Vasilyev A.S., et al. (2003)]:

$$S_p = a_p S_{p-1}^{b_p}$$

The quantitative connections of a technological heredity dependent on a choice of a method of processing, are defined by factors  $b$ , and the basic conditions of processing inside this method - factors  $a$ . Having executed transformations with the equations for previous operations  $\varphi_{p-1}, \varphi_{p-2}, \dots, \varphi_1$  receive the general mathematical model of change of parameter of quality for all technological process:

$$S_p = a_p a_{p-1}^{b_p} a_{p-2}^{(b_p b_{p-1})} \dots a_1^{(b_p b_{p-1} \dots b_2)} S_0^{(b_p b_{p-1} \dots b_1)}$$

The factor of a heredity  $a_i$  describes influence of technology factors  $t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in}$  on the considered parameter of quality  $S_j$  for operation  $\varphi_j$  also can be submitted [3]:

$$a_i = k_{i0} t_{i1}^{k_{i1}} t_{i2}^{k_{i2}} \dots t_{in}^{k_{in}}$$

Where  $k_{j0}, k_{j1}, k_{j2}, \dots, k_{jn}$  - empirical factors of influence of technology factors. The analysis of dependences shows, that all technological process can be expressed as the sum of action of final operation and some share of influence of previous operations on an initial condition of preparation  $S_0$  which are defined by factors of a heredity  $b_1, b_2, \dots, b_p$ . If on any operation  $\varphi_l$  factor of a technological heredity  $b_l = 0$  it means absence of influence of initial quality of a condition of preparation on a final condition after the given operation, that can serve as interpretation of action of operation  $\varphi_l$  as insuperable «a technological barrier» [Yashcheritsin P.I., et al. (1977), Dalyskiy A.M. (1975)].

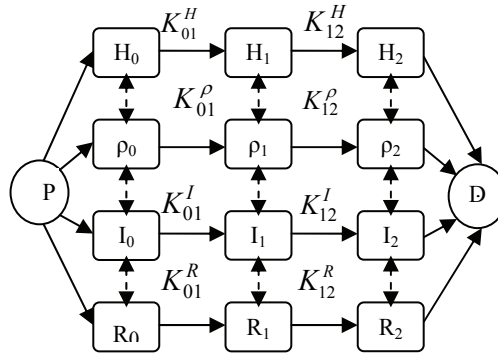


Fig. 1. Unwrapped graph of technological inheritance, a taking into account complex working parameters of quality

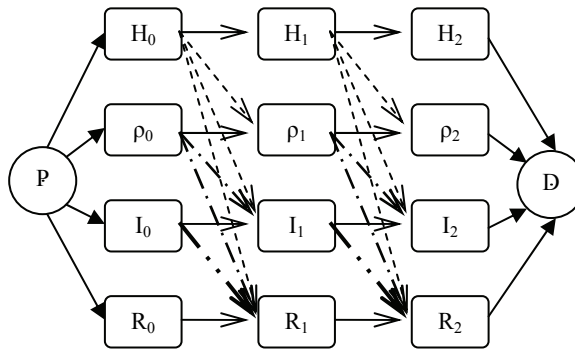


Fig. 2. Graph of technological inheritance, reflecting interferences physico-mechanical and geometrical parameters of quality of working surfaces

### 3. RESEARCH OF TECHNOLOGICAL INHERITANCE

For the description of technological inheritance of operational properties of a cranked shaft and a camshaft of the engine during restoration set of physico-mechanical and geometrical properties was considered: hardness ( $H$ ), rejections of the form ( $\rho$ ), accuracy of the sizes ( $I$ ) and a relief of a surface ( $R$ ). For this purpose as determining property of working surfaces the physico-mechanical characteristic - hardness on Brinell ( $HB$ ) as hardness is one of the most widespread and popular integrated criteria of an estimation of properties of the materials was accepted, allowing to judge about strengthening and tribotechnical characteristics of a material [Kheifetz M.L. (2005)]. As parameters dependent on hardness deviations of the form of surfaces (palpation  $\rho$ ), accuracy of the sizes (acceptance criteria  $IT$ ) and a roughness of a surface (an arithmetic-mean deviation of structure  $Ra$ ) were consistently considered.

Operational parameters of quality of working surfaces of a detail ( $HB/HRC, \rho, IT$  and  $Ra$ ) were measured after technological operations of machining: точения, grindings and polishing.

Measurements of hardness  $HB/HRC$ , deviations of the form  $\rho$ , accuracy of sizes  $IT$  and a relief of surface  $Ra$  were carried out on a party from fifty details. Thus the party was broken into ten groups, and as settlement value was accepted arithmetic-mean in group. On the basis of settlement results factors of transfer of inheritance  $K^H, K^\rho, K^I, K^R$  for the graph on fig. 1 and factors of interference of technological inheritance  $K^{Hp}, K^{Hl}, K^{HlR}, K^{\rho I}, K^{\rho R}, K^{IR}$  for the graph on fig. 2 were defined.

For an estimation of inheritance on a technological route the resulting factors  $Kp$  equal to product of corresponding factors for operational parameters of quality on all sequence of operations paid off. For definition of a degree of influence of inheritance on various technological operations the factors of comparison  $Kc$  equal to the relation of factors of interference on previous and subsequent operations paid off.

At restoration during repair both geometrical, and physicomachanical parameters all over again worsen, then improve. However as a whole on all technological process physicomachanical characteristics are restored, and geometrical (surfaces especially connected to a microrelief) even improve. Factors of interference allow to estimate the importance of technological operations, and also technology factors and parameters of separate operations. Hardness of a material as well as during manufacturing a detail, essentially influences geometrical parameters. This influence on initial operations for rejections of the form is especially strong. In other cases it is stable on all technological transitions.

Geometrical parameters of cylindrical surfaces are inherited poorly, especially it is visible on initial operations. For a microrelief of a surface of operation of restoration are technological "barriers". The further influence of the previous geometrical parameters on the subsequent also is not great and affects only accuracy of processing.

Change of hardness shows, that technological "barriers" at restoration of working surfaces are operations resurface welding, and final geometrical parameters of quality of surfaces are formed at grinding.

#### 4. CONCLUSION

The analysis of technological and at operation inheritance at restoration of working surfaces of a cranked shaft and a camshaft of the engine has allowed:

- to reconsider a heredity of technological transitions (to remove operation of editing),
- to regulate technological influences (on operations of metallization, build-up welding, trainings, grindings)
- to provide quality of restoration (stable hardness and accuracy) of working surfaces.

#### 5. REFERENCES

- Dalyskiy A.M. (1975) *Technological maintenance of reliability of precision details of machines*, Mashinostroenie, Moscow.
- Kheifetz M.L. (2005) *Designing of processes of the combined processing*. Mashinostroenie, ISBN 5-217-03171-9, Moscow.
- Vasilyev A.S., Dalyskiy A.M., et al. (2003) *Technological bases of quality management of machines*, Mashinostroenie, ISBN 985-418-111-1, Moscow.
- Yashcheritsin P.I., Ryizov E.V.& Averchenkov V.I. (1977) *Technological heredity in mechanical engineering*, Science and technics, Minsk.
- Yashcheritsin P.I., Kheifetz M.L., et al. (1996) *Technological bases of highly effective methods of processing of details*, PSU, ISBN 985-418-023-9 Novopolotsk.

**Authors: Kheifetz M.L., Kusakin N.A., Prement G.B., Polotsk State University, Belarus**







Stefanović, M., Aleksandrović, S., Stanojević, M.Đ., Adamović, D.

## EKOLOŠKI PRIHVATLJIVE TEHNOLOGIJE OBRADE METALA DEFORMISANJEM

**Rezime:** Poznato je da se u poslednjoj deceniji zaoštravaju pitanja zaštite i očuvanja životne sredine sa više aspekata, od kojih je, svakako značajno i pitanje uvođenja novih, tzv. "zelenih" tehnologija u obradi metala deformisanjem. Ovakve tehnologije podrazumevaju drugačiji pristup u rešavanju triboloških problema pri oblikovanju (efikasna obrada, visok kvalitet površine komada, produženje veka alata i sl.). U tom smislu, pored razvoja postupaka za nanošenje prevlaka, korišćenje suvih mazivih filmova i sl., posebna pažnja se posvećuje razvoju novih maziva, koja pri uklanjanju ne zagađuju okolinu, a po efikasnosti ne zaostaju za tradicionalnim sredstvima za podmazivanje. U radu se daje pregled istraživanja u ovoj oblasti sa preporukama za korišćenje ekoloških maziva ("Friendly lubricants") u pojedini postupcima obrade deformisanjem.

**Gljučne reči:** Plastično oblikovanje, obradivost, ekologija, podmazivanje

## ECOLOGICALLY ACCEPTABLE TECHNOLOGIES OF METAL FORMING

**Abstract:** It is well known that in the last decade the issue of environmental protection and preservation has gained extreme importance in many aspects; one of them, which is definitely important, is the introduction of the new, so called, "green" technologies in metal forming. Such technologies imply a different approach in solving tribological problems in forming (effective forming, high quality of piece surface, tool life prolongation etc.). To that purpose, in addition to the development of procedures for applying coatings, dry lubricate films and similar, particular attention is given to the development of new lubricants, which do not contaminate the environment when they are removed, and are as efficient as traditional lubricants. The paper presents the summary of researches in this area with recommendations for application of ecological lubricants ("Friendly lubricants") in particular procedures of metal forming.

**Key words:** Plastic forming, formability, ecology, lubrication

### 1. UVOD

Sa industrijskog aspekta, dvadeseti vek se može okarakterisati kao period masovne proizvodnje i visoke potrošnje. Prirodni resursi, formirani stotinama miliona godina ubrzano se troše. Posledice su poznate - uništenje ozonskog omotača, globalno zagrevanje i poremećaji u eko sistemima na različitim nivoima. Smatra se da se ovaj novi vek mora učiniti vekom zaštite okoline.

Proizvodne tehnologije, a posebno postupci plastičnog oblikovanja metala (TPO), poslednjih decenija doživljavaju buran razvoj. Osnovne karakteristike TPO su: razvoj postupaka numeričko-fizičkog modeliranja procesa oblikovanja-tečenja metala, definisanje naponsko-deformacionih polja i sl., u cilju optimizacije parametara obrade, primena sistema CAD/CAM za projektovanje i izradu alata, razvoj i primena veštačke inteligencije i ekspertnih sistema u osvajanju procesa obrade i konstrukcije alata, razvoj različitih postupaka, alata i mašina za delove koji se ne obrađuju naknadno ("Net Shape Forming" - NSF obrada) itd.

Sa ekološkog stanovišta, kao i u drugim tehnologijama, ključna pitanja u oblasti TPO su:

- zaštita raspoloživih resursa i
- smanjenje uticaja na životnu sredinu.

Ova dva glavna pitanja se mogu dalje razložiti na više složenih aktivnosti [2], koje je neophodno sistemski ugraditi u pojedine elemente industrijskih sistema :

- očuvanje bazičnih resursa i materijala,
- optimalna konstrukcija proizvoda,
- optimalna proizvodnja,
- smanjenje potrošnje energije,
- zaštita čovekove okoline.

Preporuke za optimalnu konstrukciju odnose se na korišćenje obnovljivih i materijala koji se recikliraju,

tribološki prihvatljive konstrukcije i materijale; optimalna proizvodnja podrazumeva automatsko upravljanje, visoku efikasnost i smanjenje potrošnje maziva. Najbolji načini za ostvarivanje zaštite okoline su: korišćenje ekološki prihvatljivih materijala (recikliraju se, lako se odlažu, ne utiču na okolinu ukoliko se ne recikliraju, pri njihovoj proizvodnji se ne generišu štetni otpaci), korišćenje maziva koja manje štetno utiču na okolinu (sprečavanje isticanja, produžavanje veka upotrebe maziva, upotreba-recikliranje-odlaganje, upotreba ekološki prihvatljivih maziva).

### 2. EKOLOŠKI ASPEKTI U OBLASTI TPO

Pojedine faze u osvajanju i eksploataciji novih proizvoda, kao što su konstruisanje, proizvodnja, servisiranje, održavanje i reciklaža se neprekidno ispituju i usavršavaju. Pri masovnoj produkciji, mora se preispitivati svaki detalj sa aspekta zaštite okoline. Na primer, prelaz sa toplog na hladno kovanje značajno štedi energiju. Net shape obrada smanjuje gubitke u materijalu.

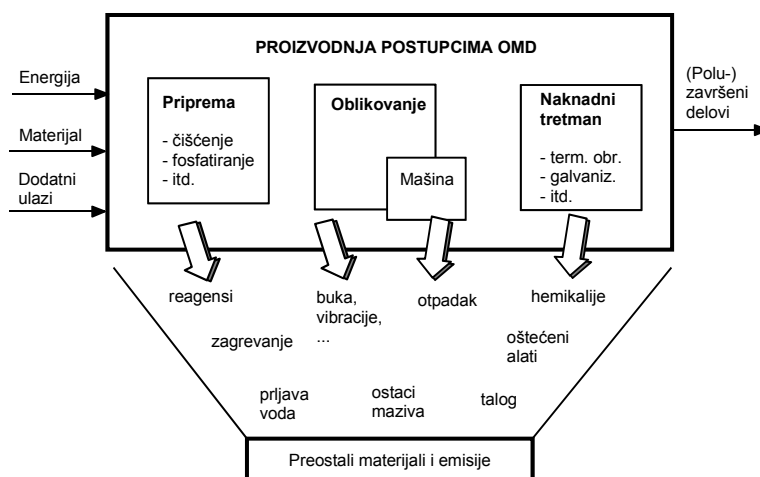
Tribološki pristup odnosi se na smanjenje zagađenja otpadnih voda i maziva, obezbeđenje prihvatljivog koeficijenta trenja, kako bi se dobila kvalitetna površina komada i umanjilo trošenje alata.

Ne ulazeći u sve detalje kompleksne eko-tribologije [1], na slici 1 pokazani su mogući izvori uticaja na okolinu pri proizvodnji postupcima TPO [2]. Posebne strategije i često visoka ulaganja su neophodna za rešavanje problema otpadnih materija i štetnih emisija, u oblasti odlaganja, recikliranja, zamene ili potpune eliminacije. Očigledna je složena priroda nastajanja i rešavanja iznetih problema, u cilju stvaranja tzv. „čistih“ TPO. U prvom koraku, po pravilu se razrešavaju poteškoće koje nastaju pri korišćenju i uklanjanju maziva, bez kojih je najčešće i nemoguće

relizovati proizvodnju.

Poznato je da se tribo-uslovi u kontaktu opisuju preko kontaktnog pritiska, relativne brzine klizanja u kontaktu i

temperature površine. U tabeli 1 pokazani su rangovi značajnih obradnih uslova pri različitim TPO.



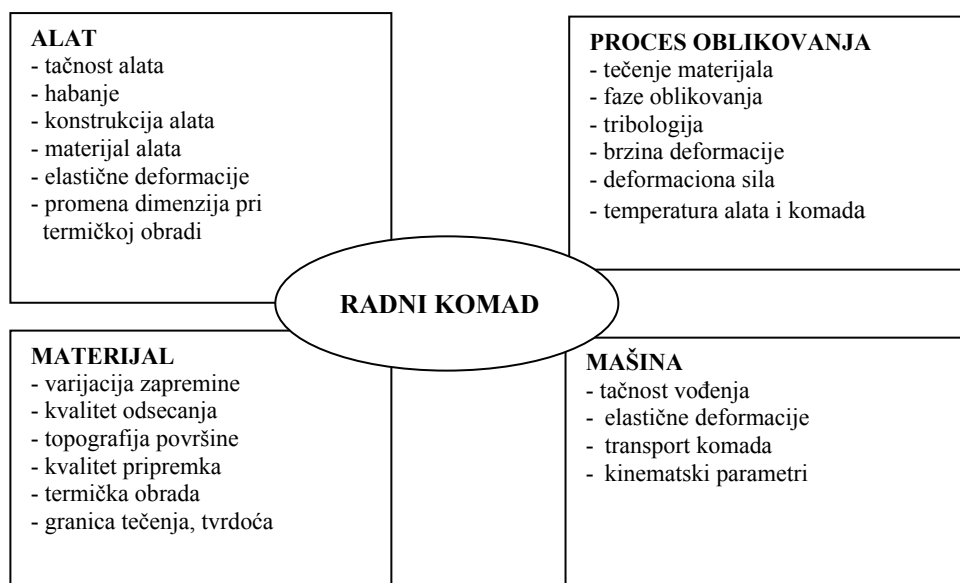
Slika1. Uticaji na okolinu u postupcima TPO [2]

PROCES → USLOVI ↓	Obrada lima	Vučenje, izvlačenje sa stanjenjem	Valjanje, orbitalna obrada	Kovanje, istiskivanje
Faktor pritiska, p/Rp	0,1-1	1-3	1-3	2-5
Kontaktni pritisak, p, MPa	1-100	100-1000	100-1000	100-3000
Brzina deformacije, ms <sup>-1</sup>	10 <sup>-3</sup> do 10 <sup>-1</sup>	10 <sup>-2</sup> do 10 <sup>2</sup>	10 <sup>-2</sup> do 10 <sup>2</sup>	10 <sup>-3</sup> do 10 <sup>-1</sup>
Relativna brzina klizanja	0 do 10 <sup>-2</sup>	10 <sup>-2</sup> do 10 <sup>2</sup>	10 <sup>-2</sup> do 0	0 do 10 <sup>-1</sup>
Temperatura kont. površine, °C	Sobna do 150	Sobna do 300	Sobna do 150 ili topla obrada	Sobna do 400 ili topla obrada
Promena površine	0,5-1,5	1-2	1-2	1-100

Tabela 1. Uslovi obrade u različitim postupcima TPO

U skladu sa obradnim uslovima, odnosno definisanim zahtevima, razvijena su i vrlo različita maziva za pojedine vrste tehnologija PO. Generalno, od maziva se zahtevaju sledeće funkcionalne karakteristike: smanjenje površine kontakta metala po metalu, posebno u zonama visokog pritiska, smanjenje habanja alata putem intenzivnog odvođenja toplote, kao i uklanjanje nečistoća, komadića metala i dr., obezbeđenje željenih otpora trenja, odnosno upravljanje tečenjem metala pri obradi, dobijanje željenog kvaliteta površine komada.

Razvoj metoda NSF može se reći, predstavlja pravi tehnološki pokret u okviru tehnologija plastičnog oblikovanja metala, pri čemu je za uspešnu realizaciju NSF neophodna integracija znanja iz oblasti novih materijala i proizvodnih tehnologija. Zbog potrebe za izradom delova visoke tačnosti, redovno u otežanim tribo-uslovima, potrebno je strogo kontrolisati faktore koji utiču na proces habanja alata. Na slici 2 su pokazani osnovni uticajni faktori na tačnost pri obradi postupcima NSF [3].



Slika 2. Uticajni parametri na tačnost pri NSF [3]

Pri hladnoj zapreminskoj obradi, npr. pri istiskivanju, lokalni pritisci dostižu vrednosti i do 3000 MPa, te se u ovakvim slučajevima na kontaktnoj površini komada mora formirati tzv. nosač maziva; kod čeličnih materijala je to često fosfat cinka. Formiranje ovakvog sloja, i naknadno odmaščivanje površina komada je dobro poznat problem, koji se i upotrebom novih generacija maziva ne može u potpunosti prevazići.

### 3. SAVREMENI PRINCIPI PRIHVATLJIVOG PODMAZIVANJA

Zahtev eko-okruženja je ultimativno korišćenje suvih tehnologija ili korišćenje maziva koja postoje u prirodi, ne menjaju se u procesu obrade i ne treba ih posebno uklanjati kasnije. Na primer, voda je vrlo prihvatljivo mazivo.

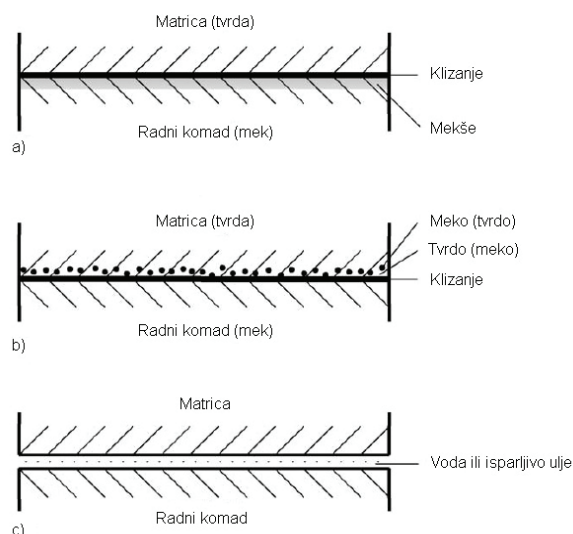
Međutim, u pojedinim postupcima TPO u uslovima visokih kontaktnih pritiska, režimi trenja su veoma nepovoljni, te ekološke TPO ne mogu imati za osnovu realizaciju suvog trenja. U prvom pristupu rešavanja ovih problema, mora se umanjiti trenje i zagađenje otpadnih tečnosti. Da bi se smanjilo trenje, mora se ostvariti granični film, odnosno meka prevlaka između kontaktnih površina. Ovaj film se kod klasičnih tehnologija može obezbediti uljem ili tzv. nosivim slojem (npr. cink fosfatom), ali je proces stvaranja i uklanjanja ovakvog filma redovno štetan za okruženje.

Na slici 3 su pokazana tri pristupa u realizaciji osnovnih principa „zelenog oblikovanja“ [4].

- na komadu je meka prevlaka koja igra ulogu maziva,
- na alatu je meka prevlaka,
- podmazivanje vodom ili isparljivim uljem

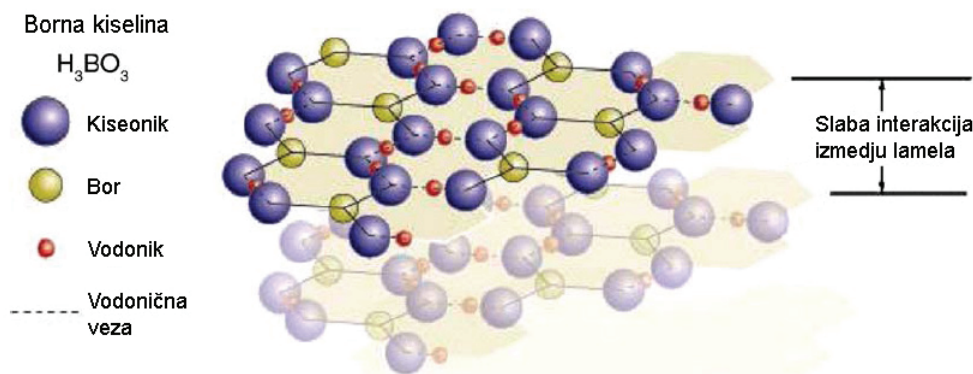
U oblasti prerade tankih limova, obrada dubokim izvlačenjem zauzima posebno mesto sa aspekta podmazivanja. U uslovima visokoserijske proizvodnje, kakva je automobilska industrija, pri korišćenju maziva postoje određene poteškoće. Za vreme obrade, mazivo se aplicira u zoni kontakta lima i alata, kako bi se povećala obradivost lima. Klasična maziva, koja obezbeđuju granični režim

podmazivanja pri obradi, najčešće su mineralnog porekla s dodatkom EP aditiva. Metalni sapuni koji se formiraju na površini lima omogućavaju dobro podmazivanje uz otežano uklanjanje i zagađenje vode pri odmaščivanju i čišćenju prebojenja.



Slika 3. Principi prihvatljivog podmazivanja [4]

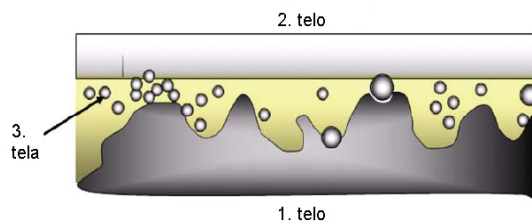
Mazivo koje se sve više koristi pri obradi limova i zadovoljava savremene ekološke zahteve ima u osnovi bornu kiselinu ( $H_3BO_3$ ). To je čvrsto mazivo i ima dobre mazive karakteristike i ne zahteva posebne troškove odlaganja. Razvoj i upotreba u TPO traje dvadesetak godina. Borna kiselina je uobičajeni termin za ortobornu kiselinu, koja je hidrat oksida bora  $B_2O_3$ . Na atmosferskom pritisku, borna kiselina dehidrira na temperaturi od  $170^{\circ}C$  i vraća se u vrlo slabo podmazujuću supstancu-oksidi bora. Za obradu limova na uobičajenoj, sobnoj temperaturi, mazivo zadržava dobre mazive karakteristike.



Slika 4. Lamelarna struktura borne kiseline [5]

Na slici 4 je pokazana lamelarna molekularna struktura borne kiseline na temperaturi ispod tačke dehidriranja. Kada kristališe, kod borne kiseline postoje jake vodonične veze unutar samih slojeva. To omogućava lako klizanje po slojevima, uz visoki kapacitet nošenja opterećenja u kontaktu.

Borna kiselina ima formu belog praha, rastvara se u zagrejanom vodi, stabilna je i lako se rukuje sa njom. Cena je oko 4,5 \$/kg. Najčešće se koristi u kombinaciji sa repičinim uljem, 5% težinski, sa česticama oko  $100 \mu m$ . Pri podmazivanju, čestice borne kiseline u biljnom ulju igraju ulogu trećeg tela, koje razdvaja površine alata i materijala i omogućava mešovito podmazivanje, slika 5 [5].



Slika 5. Borna kiselina – treće telo pri podmazivanju [5]



#### 4. ZAKLJUČAK

Razvoj tehnologije plastičnog oblikovanja metala podrazumeva i usaglašavanje sa savremenim zahtevima za uvođenje tzv. „čistih“ proizvodnih postupaka, koji se temelje na: očuvanju bazičnih resursa i materijala, optimalnoj konstrukciji proizvoda i proizvodnji, smanjenju potrošnje energije i zaštiti čovekove okoline, čime se i bavi ekotribologija. Korišćenje ekološki prihvatljivih maziva je samo jedan od aspekata globalnog pristupa u oblasti TPO.

Napredne TPO, usaglašene sa postupcima NSF, omogućavaju značajnu uštedu u materijalu i ekološki su prihvatljivije. Međutim, zbog obrade u uslovima visokih kontaktnih pritiska, neophodno je koristiti kvalitetna maziva, najčešće sa tzv. nosećom prevlakom, čije nanošenje i uklanjanje zahteva upotrebu rizičnih supstanci sa aspekta očuvanja životne sredine. U ovakvim slučajevima, reinžinjerinng procesa obrade se mora uskladiti i sa zahtevima ekološke prirode.

U pojedinim tehnološkim procesima, moguće je koristiti maziva na bazi biljnih ulja sa dodacima prirodnih materijala, koji ne zagađuju okolinu. Korišćenje ovakvih maziva zahteva i prilagođavanje proizvodne opreme i pratećih struktura. Npr. pri dubokom izvlačenju čeličnih i Al-limova, veoma uspešno se mineralna ulja sa EP-aditivima mogu zameniti mazivima na bazi biljnih ulja sa bornom kiselinom. Ovakva maziva su netoksična i bio-razgrađiva.

#### 5. LITERATURA

- [1] W. J. Bartz, *Ecotribology: Environmentally acceptable tribological practices*, Tribology International, Volume 39, Issue 8, August 2006, Pages 728-733.
- [2] M. Geiger, *Towards Clean Forming Techniques*, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Volume 44, Issue 2, 1995, Pages 581-588.
- [3] M. Stefanović, S. Aleksandrović, V. Mandić, *Aktuelni trendovi razvoja tehnologije plastičnog oblikovanja metala*, 30. Savetovanje Proizvodnog Mašinstva Srbije i Crne Gore sa međ. učešćem, Vrnjačka Banja, 2005, Zbornik radova po pozivu (uvodni referati) 57-82.
- [4] Z. G. Wang, *Tribological approaches for green metal forming*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 151, Issues 1-3, 1 September 2004, Pages 223-227
- [5] M. Lovell, C.F. Higgs, P. Deshmukh, A. Mobley, *Increasing formability in sheet metal stamping operations using environmentally friendly lubricants*, Journal of Materials Processing Technology, Volume 177, Issues 1-3, 3 July 2006, Pages 87-90.

**Autori: Prof. dr Milentije Stefanović<sup>1</sup>, prof. dr Srbislav Aleksandrović<sup>1</sup>, Spec.hem Mica Đorović-Stanojević<sup>2</sup>, prof. dr Dragan Adamović<sup>1</sup>,**

<sup>1</sup> - Mašinski fakultet u Kragujevcu, S.Janjić 6, 34000 Kragujevac, tel.: +381 034 336 001,

E.mail: [stefan@kg.ac.rs](mailto:stefan@kg.ac.rs), [srba@kg.ac.rs](mailto:srba@kg.ac.rs), [adam@kg.ac.rs](mailto:adam@kg.ac.rs)

<sup>2</sup> - Prva Kragujevačka Gimnazija, Daničićeva 1, 34000 Kragujevac, +381 034 335 506

E.mail: [majaslav@ptt.rs](mailto:majaslav@ptt.rs)



Dr Čedomir Avakumović, Dr Nebojša Jović, Srđan Skorup

## EKONOMSKI ZNAČAJ UPRAVLJANJA KVALITETOM U MALIM I SREDNJIM METALOPRERAĐIVAČKIM PREDUZEĆIMA

**Rezime:** U radu se ukazuje na ekonomski značaj kvaliteta metaloprerađivačkih preduzeća u skladu sa ISO-9000 i navode komponente kvaliteta koje su važne za uspostavljanje sistema upravljanja kvalitetom. Od početka primene standarda do sertifikacije, preduzeća obavljaju promene kako bi ispunila zahteve sistema upravljanja kvalitetom.

**Ključne reči:** kvalitet, sistem, upravljanje, klasifikacija, zadovoljstvo, metod

## ECONOMIC IMPORTANCE OF QUALITY MANAGEMENT IN SMALL AND MEDIUM METAL INDUSTRY ENTERPRISES

**Abstract:** The purpose of this paper is to point out the economic importance of quality management in metal industry enterprises and to identify quality components necessary for establishing of quality management system. Enterprises are reshaping themselves to change in order to meet the demands of quality management system, from the beginning of standard implementation to the moment of quality certification.

**Key words:** quality, system, management, categorization, satisfaction, method

### 1. UVOD

Kvalitet je postao veoma važno sredstvo za postizanje konkurentnosti. Kontinualno poboljšanje kvaliteta treba da bude jedan od osnovnih ciljeva menadžmenta svakog malog i srednjeg metaloprerađivačkog preduzeća. Veliki deo tržišta može biti izgubljen i prepušten konkurentima ako se na vreme ne shvati važnost kvaliteta. [1]

Shvatanje o tome šta je kvalitet se, u poslednjih 50-ak godina, paralelno sa velikim napretkom u tehnologiji i privredi od tehničkih standarda i tehničkih definicija, odnosno od „malog q“ do današnjeg „velikog Q“, dosta brzo menjalo.

Kvalitet se od pojma kvaliteta proizvoda ili usluge, razvija do praćenja i kontrole sveobuhvatnog procesa u preduzeću radi blagovremenog uočavanja problema i njihovog otklanjanja pre nego što negativno počnu da utiču na poslovanje. Sistemi upravljanja kvalitetom (QMS) podrazumevaju osam principa:

- Organizaciju usredsređenu na kupca
- Liderstvo
- Uključenost zaposlenih
- Procesni pristup
- Sistemski pristup upravljanju
- Stalno poboljšanje
- Donošenje odluka na osnovu činjenica
- Obostrano korisni odnosi sa dobavljačima

Potrebno je klasifikovati i okarakterisati metode merenja zadovoljstva kupaca. U radu smo istakli pet osnovnih kriterijuma za ocenjivanje metoda merenja, a kao poseban kriterijum postavljena je saglasnost sa zahtevima standarda ISO 9000:2000. Ističemo, da standardi ne propisuju metodu merenja, već samo obavezu preduzeća da vrše merenja. Zbog toga je moguće i različito tumačenje pojedinih metoda i njihove primene u praksi metaloprerađivačkih preduzeća.

Za svako malo i srednje metaloprerađivačko preduzeće važno je definisati kvalitet u skladu sa ISO:9000, zatim komponente kvaliteta na osnovu kojih se određuje kvalitet

metaloprerađivačkih preduzeća i usluga, kao i izvršiti klasifikaciju metode merenja zadovoljstva kupaca, i karakterizaciju metoda merenja zadovoljstva kupaca.

### 2. DEFINICIJA KVALITETA

Većina subjekata je pokušavala da, u oblasti svog interesovanja, daju sopstvenu definiciju kvaliteta. Jedna od mnoštva definicija je i sledeća: „Kvalitet znači da se vraća potrošač, a ne roba.“ Preduzeća se nalaze u globalnom okruženju, pa pored ove jednostavne definicije treba uvesti i onu koja će imati globalno značenje, kao na primer: „Kvalitet je skup karakteristika nekog entiteta da zadovolji utvrđene i izražene potrebe“.

Ova definicija kvaliteta je sveobuhvatna, celovita i integralna, ali nije dovoljno jasna ni jednostavna, ni lako primenjiva u praksi. Da bi kvalitet entiteta mogao da se vrednuje, skup karakteristika mora da se izmeri pomoću nekog merila, pa bi definicija kvaliteta bila sledeća:

„Kvalitet je skup karakteristika izmeren pomoću merila“. U međunarodnom standardu ISO 8402, revidiranom 1994. godine, kao merila mogu biti zahtevi. Da bi mogli da primenimo definiciju treba da znamo zahteve. U opštem slučaju merila su zahtevi zainteresovanih subjekata. Za najopštiji slučaj definicija kvaliteta bi bila:

„Kvalitet metaloprerađivačkih proizvoda/usluga bi bio skup svih karakteristika, iskazan preko zahteva zainteresovanih subjekata“. Kvalitet ne sme da se posmatra statički. Zahtevi potrošača kao i zakonski propisi se menjaju, pa se menja i merilo „skup svih karakteristika“. Znači, i da se skup mora dalje razvijati, kako bi ga činili zahtevi koji su u datom trenutku najbitniji.

Kada se skup svih karakteristika zadovolji, zainteresovani subjekti će imati koristi. Veća korist je povezana sa višim nivoom kvaliteta, odnosno zbirna mera za kvalitet može biti korisnost proizvoda i može se iskazati preko elemenata proizvoda, tj. komponentata kvaliteta.

## 2.1. Komponente kvaliteta

Elementi metaloprerađivačkog proizvoda/usluge bitni za kvalitet su veoma različiti od proizvoda/usluge do proizvoda/usluge. Posebno se ta raznolikost može uočiti kad posmatramo materijalne, nematerijalne i kombinovane proizvode. Razne zainteresovane grupe imaju različite potrebe u pogledu kvaliteta proizvoda/usluge, te se može zaključiti da proizvod/usluga ima razne dimenzije kvaliteta, zavisno od toga ko je za kvalitet proizvoda/usluge zainteresovan.

U tabelama 1 i 2 su navedene osnovne komponente kvaliteta za tri subjekta, za metaloprerađivačke proizvode/usluge.

Tabela 1: Neke dimenzije kvaliteta za metaloprerađivačke proizvode

Subjekat	Potrošač	Zajednica	Proizvođač
Komponente kvaliteta	- Funkcija - Pouzdanost - Konformnost - Trajnost - Način upotrebe - Način odlaganja i dr.	- Bezbednost života, zdravlja i imovine - Zaštita okoline - Očuvanje prirodnih resursa	- Produktivnost - Mogućnost montiranja - Fleksibilnost - Konformnost

Tabela 2: Neke dimenzije kvaliteta za metaloprerađivačke usluge

Subjekat	Potrošač	Zajednica	Proizvođač
Komponente kvaliteta	- Pouzdanost - Predusretljivost - Kompetentnost - Uslužnost - Poverljivost - Sigurnost - Dostupnost - Komunikacija - Razumevanje potrošača	- Bezbednost života, zdravlja i imovine - Zaštita okoline - Očuvanje prirodnih resursa	- Produktivnost - Fleksibilnost

Najvažniji subjekat su potrošači. Zbog važnosti zahteva potrošača, proizvođači metaloprerađivačkih proizvoda/usluga, treba neminovno da se bave potrebama potrošača, jer su upravo oni merilo kvaliteta njegove ponude.

Pri kupovini, potrošač ima sopstvena očekivanja u pogledu ispunjenja sopstvenih potreba. Ako su ta očekivanja ispunjena, potrošač će biti zadovoljan, a ako nisu, neće biti zadovoljan. Međutim, ako su njegova očekivanja nadmašena, on će biti veoma zadovoljan, iznenađen, oduševljen. Zato će se proizvođač koji ima u vidu zadovoljstvo potrošača, intenzivno baviti njegovim potrebama i očekivanjima.

## 3. ZADOVOLJSTVO KUPACA

Zadovoljstvo kupca se može definisati kao percepcija kupca – potrošača o stepenu ispunjenja njegovih očekivanja. Brojčano iskazano, zadovoljstvo kupca predstavlja količnik kvaliteta proizvoda /usluge i očekivanja.

$$Z_k = \frac{Q_{p/u}}{O_k} \quad (1)$$

gde je:

Zk-zadovoljstvo kupca

Qp/u-kvalitet proizvoda/usluge, i

Ok-očekivanje kupaca

Merenje zadovoljstva kupca – potrošača je ekspresivna i izuzetno promenljiva kategorija, na koju utiče veliki broj različitih složenih faktora. Zbog izrazite promenljivosti doživljaja zadovoljstva, potrebno je vršiti kontinuirano praćenje nivoa zadovoljstva kupca u određenim vremenskim intervalima i biti spreman prilagođavati proizvod/uslugu prema kupčevim očekivanjima.

Potreba merenja zadovoljstva kupca je već duže vreme u žiži interesovanja svetskih firmi, jer je zadovoljstvo kupca, ključ postizanja lojalnosti kupca a to je osnov sticanja konkurentske prednosti i obaveza preduzeća prema zahtevima standarda ISO 9000: 2000.

Zadovoljstvo kupca ugrađeno je i u kriterijume dva najpoznatija i najprihvaćenijih modela poslovne izvrsnosti (uspešnosti), EFQM (Evropska nagrada za kvalitet) i MBNQA (Boldridžova nagrada za kvalitet), čija je osnova zadovoljstvo kupaca. [2]

## 4. EKONOMSKI ZNAČAJ PRIMENE STANDARDA JUS ISO 9000:2000

Primena standarda JUS ISO 9000:2000, donosi opipljive koristi preduzećima i zaposlenima, i to:

### a) Koristi za preduzeće:

- Povećava tržišne mogućnosti (povećanje broja klijenata/kupaca, ispunjenjem zahteva za postizanje sertifikata),
- Blagovremeno upozorava na dobro ili loše poslovanje,
- Poboljšava kvalitet proizvoda/usluga,
- Omogućava praćenje rezultata i parametara uspešnosti poslovanja, u svakom trenutku,
- Poboljšava sistem upravljanja procesima,
- Smanjuje broj reklamacija kupaca/klijenata.

### b) Koristi za zaposlene

- Jasno definiše način obavljanja posla i olakšava najlakši mogući način, ali uz poštovanje određenih normativa;
- Obezbeđuje kretanje dokumentacije (poznavanje mesta i lica nadležnih za određenu informaciju ili dokument);
- Poboljšava internu komunikaciju;
- Omogućava uvid u sopstvene rezultate.

Da bi se mogli izmeriti ekonomski efekti uvođenja i primene sistema upravljanja kvalitetom u malim i srednjim metaloprerađivačkim preduzećima, potrebno je definisati procese i opisati ih, odnosno usvojiti procedure i zapise, tako što će se znati ko odgovara, šta ko radi i utvrditi način merenja primene ili ne-primene tih procedura.

## ZAKLJUČAK

Ekonomski značaj primene sistema upravljanja kvalitetom u malim i srednjim metaloprerađivačkim preduzećima, se može utvrditi i meriti na osnovu utvrđenih pokazatelja. Koristi od primene sistema upravljanja kvalitetom se mogu iskazati preko:

- Povećane odgovornosti i svesti zaposlenih,
- Veće lojalnosti kupaca,
- Bolje iskorišćavanje vremena i resursa,
- Zadovoljstvo potrošača,
- Bolja identifikacija i praćenje proizvoda i usluga,
- Veće tržišne mogućnosti,
- Smanjenje gubitaka i povećanje profita i dr.

## LITERATURA

- [1] Bergman, B. Klefsio, "Quality from Customer need to customer satisfaction", McGraw - Hill, London, 2004.
- [2] [www.afsmi.com/journal](http://www.afsmi.com/journal)
- [3] Gitlow, S. Howard, "Quality management systems: A practical guide", CRC, New York, 2000.
- [4] ReVelle, B. Jack, "Manufacturing handbook of best practices: An Innovation, Productivity and Quality Focus", CRC, New York, 2001.
- [5] Deming, E., "The New Economics", The MIT Press, Massachusetts, 2000.

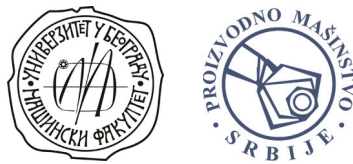
**Autori: Dr Čedomir Avakumović, Dr Nebojša Jović, Srdan Skorup**, Fakultet za industrijski menadžment u Kruševcu, Univerziteta Union u Beogradu, Kruševac, Majke Jugovića 4, [fimmanager@gmail.com](mailto:fimmanager@gmail.com)





**33. SAVETOVANJE PROIZVODNOG MAŠINSTVA SRBIJE  
SA MEĐUNARODNIM UČEŠĆEM**

**33<sup>rd</sup> CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING OF SERBIA  
WITH FOREIGN PARTICIPANTS**



**INDEX AUTORA**

**AUTHOR INDEX**





## Index autora

## Author Index

### A

Aćimović-Pavlović, Z.	279
Adamović, D.	51, 109, 331
Aleksandrović, S.	331
Alekseeva, T.	173
Antić, A.	27
Avakumović, Č.	335

### B

Babić, A.	147
Babić, B.	13
Baralić, J.	79
Bera, R.	143
Bojanić, P.	115
Bojović, B.	13
Borenović, M.	139
Borojev, L.	131
Borojević, S.	31, 233
Bracanović, Z.	311
Bradić, Z.	225
Brezočnik, M.	199, 207
Brzaković, R.	249, 291
Bughart, D.	139
Bulatović, M.	263

### C, Č, Ć

Cvetković, S.	237
Čiča, Đ.	31, 165
Ćirkovic, B.	161

### D, Đ

Deljanin, L.	17
Devedžić, G.	51, 109
Dimić, Z.	151, 195
Drndarević, D.	211
Đapić, M.	287
Đukanović, V.	135
Đukić, R.	215, 225
Đuričić, M.	279
Đurić, A.	287

### E

Erić, D.	105
Erić, M.	203

### G

Gatalo, R.	119
Glavonjić, M.	151
Globočki Lakić, G.	31, 165
Golubović, V.	165

### H

Hamzić, D.	303, 307
------------	----------

### I

Ilić, N.	147
Ilić, P.	283
Ivanović, L.	51

### J

Jakovljević, Ž.	219
Janković, M.	183
Janković, P.	39
Janjić, M.	75
Janjuš, Z.	283
Ječmenica, R.	295
Jokanović, S.	233
Josić, D.	101
Jovanović, D.	267
Jovanović, J.	215, 225
Jovičić, M.	3
Jovičić, R.	229
Jovičić, S.	101
Jović, N.	335
Jovišević, V.	233
Jovović, A.	283
Jurković, Z.	199

### K

Клименко, С.	43
Копеикина, М.	43
Кравчук, О.	47
Карларевић, М.	157
Karić, M.	317
Karpe, B.	123
Kheifetz, M.	173, 245, 327
Klarin, M.	259
Kojić, D.	13
Komadinić, V.	321
Koreshkov, V.	245
Kosec, B.	123
Kosec, L.	123
Koukhata, S.	173
Kovač, P.	79, 143, 207
Kraišnik, M.	83
Krošnjar, A.	195
Kusakin, N.	327
Kvrgić, V.	195



## L

Лоев, Е.	47
Lazarević, A.	35, 39
Lazarević, D.	35, 39
Liakhovich, A.	173, 245
Ličen, M.	123
Lukić, D.	127

## M

Мельничук, П.	47
Majstorović, V.	255
Makragić, S.	271
Mandić, D.	3
Maravić, I.	229
Marinković, V.	71
Marjanović, Z.	249, 291
Marković, S.	101, 105
Mićić, V.	61, 177
Mićunović, J.	303, 307
Mijušković, M.	119
Milačić, V.	3, 9
Milanović, D.	317
Milenković, Đ.	143
Miletić, O.	135
Milivojević, M.	211
Milosavljević, P.	241, 275
Milošević, M.	127
Milunović, S.	295
Milutinović, D.	151
Milutinović, I.	279
Milutinović, M.	67
Miljković, Z.	13
Mircheski, I.	323
Misita, M.	317
Mitrović, S.	203
Mohieldeen, .	87, 93
Movrin, D.	67, 229
Munćan, J.	183

## N

Nedeljković, M.	4
Nedić, B.	31, 79, 157, 267
Nenadić, M.	279
Nikolić, D.	3
Nuhodžić, S.	263

## P

Panić, S.	211
Pavićević, Ž.	303, 307
Pejović, B.	61, 177
Petrović, A.	147
Petrović, A.	283
Petrović, P.	27, 219
Petrović, S.	211
Pilipović, M.	189
Plančak, M.	67, 229
Pljakić, M.	147
Popović, B.	259
Prement, G.	327

## R

Raddad, B.	87, 93
Radonjić, S.	17, 21, 79, 139
Rančić, B.	35
Ranđelović, S.	241, 275
Ristić, B.	51
Romić, L.	315

## S, Š

Sekulić, M.	199
Sekulić, S.	25
Senkijević, A.	287
Seuček, I.	139, 143
Sidorenko, S.	323
Simonović, S.	169
Skakun, P.	229
Skorup, S.	335
Slavković, N.	151
Soković, M.	123
Sovilj Nikić, I.	17, 21, 139, 143, 207
Sovilj, B.	17, 21, 139, 143, 207
Spasić, Ž.	189
Sredanović, B.	31
Stamenković, D.	13
Stanković, B.	241, 275
Stanojević, M.	331
Stefanović, M.	109, 331
Stefanović, M.	225
Šibalić, N.	75
Šljivić, M.	83

## T

Tabaković, S.	119
Tadić, B.	203
Tanasijević, S.	101
Tanović, L.	5, 43
Tochilo, V.	245
Todić, A.	61, 161, 177
Todić, M.	135
Todić, T.	161
Todić, V.	127
Trbojević, I.	67
Trgovčević, S.	321
Trifković, S.	83

## U

Urošević, A.	287
--------------	-----

## V

Veličković, D.	105
Veljković, Z.	259
Vilotić, D.	67, 229
Vukčević, M.	75
Vukićević, M.	299

## Z, Ž

Zeljковић, M.	27, 119, 131, 165
Zeljковић, V.	287
Živanović, S.	151, 195
Živković, A.	119, 131
Živković, M.	109
Živković, P.	271



CIP - Каталогизација у публикацији  
Народна библиотека Србије, Београд

621.7/.9(082)  
621.7/.9:669(082)  
681.5(082)  
005.6(082)  
004.896(082)

**САВЕТОВАЊЕ производног машинства Србије са  
међународним учешћем (33 ; 2009 ; Београд)**

Zbornik radova = Proceedings / 33.  
savetovanje proizvodnog mašinstva Srbije sa  
međunarodnim učešćem = 33rd Conference of  
Production Engeneering of Serbia with Foreign  
Participants, Beograd, 16.-17. jun 2009. ;  
[organizator] Univerzitet u Beogradu,  
Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno  
mašinstvo ; [urednik, editor Ljubodrag  
Tanović]. - 1. izd. - Mašinski fakultet :  
Beograd =Belgrade =Faculty of Mechanical  
Engineering, 2009 (Beograd : Planeta print).  
- XVIII, 342 str. : ilustr. ; 30 cm

Dostupno i na:

<http://cent.mas.bg.ac.rs/spms09>. - Radovi na  
srp., engl. i rus. jeziku. - Tekst ćir. i  
lat. - Tiraž 200. - Dragan Milutinović: str.  
IX-X. - Milentije Stefanović: str. XI-XII. -  
Str. XIII-XIV: Predgovor / Ljubodrag Tanović  
= Preface / Ljubodrag Tanović. - Napomene uz  
tekst. - Bibliografija uz svaki rad. -  
Summaries. - Registar.

ISBN: 978-86-7083-662-4

1. Уп. ств. насл. 2. Машински факултет  
(Београд)

а) Производно машинство - Зборници б)  
Метали - Обрада - Зборници с) Системи  
аутоматског управљања - Зборници д)  
Управљање квалитетом - Зборници  
COBISS.SR-ID 167775500



## ZAHVALNICA

Organizovanje 33. Savetovanja proizvodnog mašinstva Srbije, sa međunarodnim učešćem, omogućeno je zahvaljujući razumevanju i finansijskoj pomoći donatora:

- **IKARBUS AD**, Beograd
- **OSA RAČUNARSKI INŽENJERING**, Beograd
- **NBS, Zavod za izradu novčanica i kovanog novca - Topčider**
- **METALAC AD**, Gornji Milanovac
- **FABRIKA REZNOG ALATA – Alatnica, Čačak**
- **CORUN doo**, Užice