

## 37. Savetovanje proizvodnog mašinstva Srbije

37th International Conference on Production Engineering of Serbia



**ZBORNIK RADOVA  
PROCEEDINGS**

**SPMS 2018  
ICPE - S 2018**

**25 – 26 Oktobar 2018, Kragujevac**





FAKULTET INŽENJERSKIH NAUKA  
UNIVERZITETA U KRAGUJEVCU  
Katedra za proizvodno mašinstvo  
Kragujevac, Srbija



**37. SAVETOVANJE PROIZVODNOG MAŠINSTVA SRBIJE**  
**- SPMS 2018 -**  
**37th INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRODUCTION**  
**ENGINEERING OF SERBIA**  
**- ICPE-S 2018 -**

25 – 26 October 2018, Kragujevac, Serbia

**ZBORNIK RADOVA**  
**PROCEEDINGS**

EDITORS: Bogdan Nedić, Slobodan Mitrović



**37. Savetovanje Proizvodnog Mašinstva Srbije - SPMS 2018**

**ZBORNIK**

**37th International Conference on Production Engineering Of Serbia - ICPE-S 2018**

**PROCEEDINGS**

**ISBN: 978-86-6335-057-1**

**Urednici:** **Bogdan Nedić**

**Editors:** **Slobodan Mitrović**

University of Kragujevac, Faculty of Engineering

**Izdavač:** **University of Kragujevac, Faculty of Engineering**

**Publisher:** Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac, Serbia

**Za izdavača:** **Dobrica Milovanović**

**For the Publisher:** University of Kragujevac, Faculty of Engineering

**Tehnička obrada:** **Suzana Petrović Savić**

**Technical editor:** **Dragan Džunić**

**Marko Pantić**

University of Kragujevac, Faculty of Engineering

**Printed by:** **Inter Print**

Jurija Gagarina 12, 34000 Kragujevac, Serbia

**Circulation:** 100 copies

Copyright © 2018 by Faculty of Engineering, University of Kragujevac

The publication of this Proceedings was financially supported by the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia.

**Supported by**

---



Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia



LOLA institute d.o.o. Belgrade, Serbia

---

## **NOSIOCI ORGANIZACIJE: ORGANIZING INSTITUTIONS:**

---

Zajednica naučno istraživačkih institucija proizvodnog mašinstva Srbije:

- Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno mašinstvo, Beograd
- Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, Novi Sad
- Fakultet tehničkih nauka, Departman za industrijsko inženjerstvo i menadžment, Novi Sad
- Mašinski fakultet, Katedra za proizvodno informacione tehnologije, Niš,
- Fakultet tehničkih nauka, Katedra za mehatroniku, Čačak
- Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Katedra za proizvodno mašinstvo, Kragujevac
- Fakultet tehničkih nauka, Katedra za proizvodno mašinstvo, Kosovska Mitrovica
- LOLA institut, Beograd

---

## **ORGANIZATOR: ORGANIZERS:**

---

UNIVERZITET U KRAGUJEVCU  
FAKULTET INŽENJERSKIH NAUKA UNIVERZITETA U KRAGUJEVCU  
Katedra za proizvodno mašinstvo  
Sestre Janjić 6  
34000 Kragujevac  
Tel. +381 (34) 335-990  
Web: [fink.rs](http://fink.rs)  
email: [spms@fink.rs](mailto:spms@fink.rs)

---

## **MESTO ODRŽAVNJA: CONFERENCE VENUE:**

---

FAKULTET INŽENJERSKIH NAUKA UNIVERZITETA U KRAGUJEVCU  
Katedra za proizvodno mašinstvo  
Sestre Janjić 6  
34000 Kragujevac  
Tel. +381 (34) 335-990  
Web: [fink.rs](http://fink.rs)  
email: [spms@fink.rs](mailto:spms@fink.rs)

**Naučni odbor:**  
**International Scientific Committee**

---

**President:**

Bogdan Nedić

Univerzitet u Kragujevcu, Srbija

**Members:**

Ljubodrag Tanović	Univerzitet u Beogradu, Srbija
Vidosav Majstorović	Univerzitet u Beogradu, Srbija
Bojan Babić	Univerzitet u Beogradu, Srbija
Petar Petrović	Univerzitet u Beogradu, Srbija
Radovan Puzović	Univerzitet u Beogradu, Srbija
Zoran Miljković	Univerzitet u Beogradu, Srbija
Dragiša Vilotić	Univerzitet u Novi Sad, Srbija
Milan Zeljković	Univerzitet u Novi Sad, Srbija
Pavel Kovač	Univerzitet u Novi Sad, Srbija
Miodrag Hadžistević	Univerzitet u Novi Sad, Srbija
Ilija Čosić	Univerzitet u Novi Sad, Srbija
Bojan Lalić	Univerzitet u Novi Sad, Srbija
Miroslav Radovanović	Univerzitet u Nišu, Srbija
Dragan Temeljkovski	Univerzitet u Nišu, Srbija
Miodrag Manić	Univerzitet u Nišu, Srbija
Miroslav Trajanović	Univerzitet u Nišu, Srbija
Milentije Stefanović	Univerzitet u Kragujevcu, Srbija
Miodrag Lazić	Univerzitet u Kragujevcu, Srbija
Tadić Branko	Univerzitet u Kragujevcu, Srbija
Slavko Arsovski	Univerzitet u Kragujevcu, Srbija
Srbislav Aleksandrović	Univerzitet u Kragujevcu, Srbija
Dragan Adamović	Univerzitet u Kragujevcu, Srbija
Goran Devedžić	Univerzitet u Kragujevcu, Srbija
Slobodan Mitrović	Univerzitet u Kragujevcu, Srbija
Miomir Vukićević	Univerzitet u Kragujevcu, Srbija
Ljubomir Lukić	Univerzitet u Kragujevcu, Srbija
Radomir Slavković	Univerzitet u Kragujevcu, Srbija
Slavica Cvetković	Univerzitet u Prištini, Srbija
Mirko Đapić	Lola institut, Srbija
Zoran Pandilov	Univerzitet "Sv. Kiril i Metodij" vo Skopje, Makedonija
Radomir Vukasojević	Univerzitet Crne Gore, Crna Gora
Janez Kopač	Univerzitet u Ljubljani, Slovenija
Mirko Soković	Univerzitet u Ljubljani, Slovenija
Gordana Lakić Globočki	Univerzitet u Banjoj Luci, RS, BiH
Simo Jokanović	Univerzitet u Banjoj Luci, RS, BiH
Aleksandar Bukvić	Univerzitet u Istočnom Sarajevu, RS, BiH
Vlatko Marušić	Sveučilište Josip Jurje Strossmayer u Osijeku, Hrvatska
Milan Jurković	Univerzitet u Bihaću, BiH
Radovan Kovačević	Southern Methodist University, SAD
Goran Putnik	Universidade de Minho, Portugalija
Frank Vollertsen	BIAS Bremer Institut für angewandte Strahltechnik, Nemačka

Viktor Starkov	Московский Государственный Технологический Университет «Станкин», Rusija
Sergei Alexandrov	Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Rusija
Mykola Ivanovych Bobyr	Національний технічний університет України, Ukrajina
Klimenko Sergei Anatolievich	Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля, Ukrajina
Klaus Kabitzsch	Technische Universität Dresden, Nemačka
Mircea Nicoara	Universitatea din Timišoara, Rumunija
<b>Herbert Osanna</b>	Technische Universität Wien, Austrija
Miroslav Badida	Technická univerzita v Košiciach, Slovačka
Alan Bramley	University Bath, VB
Peter Hartley	University Birmingham, VB
Kornel Ehmann	Northwestern University, SAD
Michael Kheifetz	Полацкі дзяржаўны ўніверсітэт, Belorusija

**Počasni odbor:**  
**The Honorary Committee**

---

Pavao Bojanić	Univerzitet u Beogradu
Milenko Jovičić	Univerzitet u Beogradu
Milisav Kalajdžić	Univerzitet u Beogradu
Dragan Milutinović	Univerzitet u Beogradu
Joko Stanić	Univerzitet u Beogradu
Žarko Spasić	Univerzitet u Beogradu
Miroslav Pilipović	Univerzitet u Beogradu
Miloš Glavonjić	Univerzitet u Beogradu
Dragutin Zelenović	member of SASA
Sava Sekulić	Univerzitet u Novom Sadu
Velimir Todić	Univerzitet u Novom Sadu
Dragoje Milikić	Univerzitet u Novom Sadu
Bogdan Sovilj	Univerzitet u Novom Sadu
Jelena Stankov	Univerzitet u Novom Sadu
Miroslav Plančak	Univerzitet u Novom Sadu
Miodrag Lazić	Univerzitet u Kragujevcu
Milentije Stefanović	Univerzitet u Kragujevcu
Ratko Mitrović	Univerzitet u Kragujevcu
Slavko Arsovski	Univerzitet u Kragujevcu
Branislav Jeremić	Univerzitet u Kragujevcu
Milorad Jovanović	Univerzitet u Kragujevcu
Vučko Mečanin	Univerzitet u Kragujevcu
Ljubodrag Đorđević	Univerzitet u Kragujevcu
Zoran Petrović	Univerzitet u Kragujevcu
Tihomir Pantelić	Univerzitet u Kragujevcu
Vujo Gordić	Univerzitet u Kragujevcu
Ratomir Ječmenica	Univerzitet u Kragujevcu
Snežana Radonjić	Univerzitet u Kragujevcu

Velibor Marinković	Univerzitet u Nišu
Vojislav Stojjković	Univerzitet u Nišu
Dragan Domazet	Univerzitet u Nišu
Svetislav Đekić	Univerzitet u Prištini sa privremenim sedištem u Kosovskoj Mitrovici
Vid Jovišević	Univerzitet u Banja Luci

## **Organizacioni odbor: Organising Committee**

---

Nastavnici i saradnici Katedre za Proizvodno mašinstvo Fakulteta inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu.

### **President:**

Bogdan Nedić

### **Members:**

Branko Tadić  
 Milan Erić  
 Slobodan Mitrović  
 Srbislav Aleksandrović  
 Vesna Mandić  
 Miladin Stefanović  
 Goran Devedžić  
 Dragan Adamović  
 Danijela Tadić  
 Miroslav Babić  
 Bogdan Vasiljević  
 Vukić Lazić  
 Nada Ratković  
 Petar Todorović  
 Ivan Mačužić  
 Snežana Nestić  
 Fatima Živić  
 Marko Đapan  
 Aleksandar Aleksić  
 Dragan Džunić  
 Suzana Petrović Savić  
 Marko Pantić  
 Stefan Đurić  
 Hrvoje Puškarić

**ORGANIZATORI SAVETOVANJA PROIZVODNOG MAŠINSTVA JUGOSLAVIJE / SRBIJE I CRNE GORE  
/ SRBIJE 1965 - 2018.**

**ORGANIZER OF CONFERENCE ON PRODUCTION ENGINEERING OF JUGOSLAVIA / SERBIA AND  
MONTENEGRO / SERBIA 1965 - 2018.**

<i>Broj</i>	<i>Mesto održavanja</i>	<i>Godina</i>	<i>Broj</i>	<i>Mesto održavanja</i>	<i>Godina</i>
I	Beograd	1965.	XIX	Kragujevac	1985.
II	Zagreb	1966.	XX	Beograd	1986.
III	Ljubljana	1967.	XXI	Opatija	1987.
IV	Sarajevo	1968.	XXII	Ohrid	1989.
V	Kragujevac	1969.	XXIII	Zagreb (nije održano)	1991.
VI	Opatija	1970.	XXIV	Novi Sad	1992.
VII	Novi Sad	1971.	XXV	Beograd	1994.
VIII	Ljubljana	1973.	XXVI	Podgorica	1996.
IX	Niš	1974.	XXVII	Niš	1998.
X	Beograd	1975.	XXVIII	Kraljevo	2000.
XI	Ohrid	1977.	XXIX	Beograd	2002.
XII	Maribor	1978.	XXX	Čačak	2005.
XIII	Banja Luka	1979.	XXXI	Kragujevac	2006.
XIV	Čačak	1980.	XXXII	Novi Sad	2008.
XV	Novi Sad	1981.	XXXIII	Beograd	2009.
XVI	Mostar	1982.	XXXIV	Niš	2011.
XVII	Budva	1983.	XXXV	Kraljevo	2013.
XVIII	Niš	1984.	XXXVI	Beograd	2015.
			XXXVIII	Kragujevac	2018.

## **DOSADAŠNJI DOBITNICI POVELJE I PLAKETE "PROF. DR PAVLE STANKOVIĆ"**

---

*za 1983. godinu*

Prof. dr Rudolf Zdenkovic, dipl. ing, Strojarski fakultet, Zagreb

Prof. dr Vladimir Šolaja, dipl. ing, Mašinski fakultet, Beograd

Prof. dr Julije Kremer, dipl. ing, Fakultet tehničkih nauka, Beograd

*za 1984. godinu*

Prof. dr Janez Peklenik, dipl. ing, Fakultet, 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, Mašinski fakultet

*za 1988. godinu*

Prof. dr Branislav Devedžić, dipl. ing, Mašinski fakultet, Kragujevac

Prof. dr Elso Kuljanić, dipl. ing, Mašinski fakultet, Rijeka

Prof. dr Zoran Seljak, dipl. ing, Mašinski fakultet, 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, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

*za 2002. godinu*

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

*za 2005. godinu*

Prof. dr Dragan Domazet, Mašinski fakultet, Niš  
Prof. dr Pavao Bojanić, 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

*za 2009. godinu*

Prof. dr Velimir Todić, dipl. ing., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad  
Prof. dr Velibor Marinković, dipl. ing., Mašinski fakultet, Niš  
Проф. др Сергею А. Клименко, Институт сверхтвердых материалов, НАН Украины

*za 2011. godinu*

Prof. dr Miodrag Lazić, dipl. inž., Mašinski fakultet, Kragujevac  
Prof. dr Ljubodrag Tanović, dipl. inž., Mašinski fakultet, Beograd

*za 2013. godinu*

Prof. dr Bogdan Sovilj, dipl. inž., Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad  
Prof. dr Miroslav Trajanović, dipl. inž., Mašinski fakultet, Niš

*za 2015. godinu*

Prof. dr Janko Hodolić, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad  
Prof. dr Bogdan Nedić, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac



**Prof. dr Vidosav MAJSTOROVIĆ**

Rođen je 16.10.1952 god., u Čačku. Mašinski fakultet u Beogradu je upisao 1971. godine, a diplomirao je 8. novembra 1976. godine. Na Mašinskom fakultetu je počeo da radi 9. novembra 1976. kao istraživač saradnik. Za redovnog profesora je izabran 2000. godine. Magistarski rad je odbranio 1981., a doktorsku tezu 1988. godine.

*Funkcije:* Predsednik Nacionalne organizacije za kvalitet – JUSK od 2009 - 2018. godine; Predsednik Nacionalne tehnološke platforme Manufuture od 2007. godine; Glavni i odgovorni urednik časopisa – International Journal "Advanced Quality", od 1995. god.; Predsednik i osnivač Međunarodne Konferencije "Total Quality Management – Advanced and Intelligent Approaches", od 2001. godine, Predsednik i osnivač Međunarodne Konferencije "The Balkan Conference of Quality – The Balkan as a region of Quality", od 2005. godine; Predsednik i osnivač Međunarodne Konferencije "Manufuture in Serbia", od 2009. godine. Predsednik i osnivač Međunarodne Konferencije "Industry 4.0 in Serbia", od 2016. godine Član Saveta za kvalitet RS (1994 - 2001. godina); Odbora za mašinstvo MNT R Srbije (1994 - 2000. godine), itd.

*Nastavna delatnost:* Menadžment kvalitetom; Proizvodna metrologija; Mašinska obrada; Teorija obrade; Integrisani menadžment sistemi; Numerički upravljane merne mašine; Ekspertni sistemi; Menadžmet sistemom kvaliteta; Tehnike inženjerstva kvaliteta, CAI sistemi; Digitalni kvalitet, Veštačka inteligencija i ekspertni sistemi.

*Publikacije/Projekti:* Objavio preko 500 radova, od toga preko 300 u međunarodnim časopisima, zbornicima međunarodnih Konferencija i knjigama izdatih i kod stranih izdavača; Uradio preko 200 projekata (domaćih, međunarodnih). Ima 31 referencu na SCI/WoS listi, sa 514 citata. Na CIRP GA i CIRP Procedia ima 11 referenci. Održao 84 predavanja po pozivu, u zemlji i u svetu (na Konferencijama, kao i za studente Doktorskih studija). Držao nastavu i bio član komisija za odbranu teza na: Univerzitetu u Beogradu, Novom Sadu, Kragujevcu, Prištini, Nišu, Podgorici, Sarajevu, Zenici, Rijeci, Budimpešti, Beču, Bukureštu. Objavio 42 knjige, monografije i priručnika, u zemlji i u svetu. Član je 32 IPC (EB) Međunarodnih Konferencija i Časopisa (domaćih / međunarodnih). Dobio oktobarsku nagradu PK za najbolji magistarski i doktorski rad. Na IFIP Konferenciji, održanoj 1990. godine u Bordou, dobio nagradu za najbolji rad – Expert Systems in Maintenance. Kod Elsevier i Nort Holand, The Netherlands, i Springer, Germany, kao autor/urednik, objavio 9 Mongrafija i Zbornika radova. Bio urednik specijalnih izdanja časopisa: International Journal "Computers in Industry" i International Journal "Total Quality Management". Član je IPC najprestižnije CIRP Konferencije "Manufacturing Systems", od 2002. godine, zatim "CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering", od 2006, itd.

**Članstvo:** CIRP (International Institution for Production Research), Paris, France (od 1995); IFIP (International Federation for Information Processing), Geneva, Swiss (od 1998); IFAC (International Federation for Automation and Control), Vienna, Austria (od 1999); IMEKO (International Confederation for Measuring), Budapest, Hungary (od 1998); JUSE (Japanese Union Scientist and Engineers), Tokyo, Japan (od 1996); ASQ (American Society for Quality), Milwaukee, USA (od 2000); Udruženja Srbije za kvalitet i standardizaciju (JUSK), generalni sekretar (od 1992 do 2007); Član EOQ (European Organization for Quality) Board (od 2000); Član JUPITER asocijacije, Beograd, Srbija (od 1977); Član TOS (Team of Specialists) UN (United Nations) ECE (Economic Commission for Europe), Geneva, Swiss (od 2002); Član WG EFQM / EOQ for Education, Brussels, Belgium (od 2000); Član Task Group – IQC IEEC for QA and NQP, (od 2001); Član jugoslovenske/srpske asocijacija za održavanje (od 1976); Član Borda NTP EU (od 2007). Zvanični recezent EK za FP program / Horizont 2020, Fabrike budućnosti, itd.

Profesor Majstorović je tokom svoje karijere je kroz objavljivanje velikog broja naučnih radova u međunarodnim časopisima i na međunarodnim konferencijama, članstvo u najznačajnijim svetskim asocijacijama, organizaciju većeg broja međunarodnih konferencijskih značajno uticao na podizanje naučnog ugleda Srbije u oblasti proizvodnog mašinstva. Takođe je dao značajan doprinos u razvoju naučno-istraživačkog kadra.



**Prof. dr Miroslav RADOVANOVIĆ**

Dr Miroslav Radovanović, dipl. inž., redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu, rođen je 1953. godine u Ćićevcu, Republika Srbija. Gimnaziju je završio u Paraćinu 1972. godine. Diplomirao je prvi u generaciji na Mašinskom fakultetu u Nišu početkom 1977. godine. Poslediplomske studije upisao je na Mašinskom fakultetu u Beogradu 1979. godine i iste završio 1987. godine odbranom magistarskog rada. Doktorsku disertaciju je odbranio na Mašinskom fakultetu u Nišu 1996. godine. Po diplomiranju, radio je kao inženjer u Industriji "14. oktobar" u Kruševcu od 1977. do 1989. godine na poslovima projektovanja tehnologije obrade rezanjem u svojstvu: tehnologa, šefa tehnologije, šefa tehnologije i pripreme proizvodnje i projektanta. Na Mašinskom fakultetu u Nišu radi od 1990. godine. U zvanje asistenta izabran je 1989. godine. U zvanje docenta izabran je 1996. godine. U zvanje vanrednog profesora izabran je 2001. godine. U zvanje redovnog profesora izabran je 2007. godine za užu naučnu oblast proizvodni sistemi i tehnologije. Dugo godina je bio šef Laboratorije za alatne maštine i mašinsku obradu. Izvodio je nastavu na osnovnim i master akademskim studijama iz predmeta: Tehnologija mašinogradnje, Proizvodne tehnologije, Proizvodne tehnologije II, Obrada rezanjem, Tehnologije obrade rezanjem, Nekonvencionalne obrade, Proizvodna sredstva, Alati i pribori, Planiranje tehnoloških procesa, Inženjerske metode, Organizacija proizvodnje, i dr. Na doktorskim studijama angažovan je na predmetima: Merenja u proizvodnim sistemima, Savremene proizvodne tehnologije, Napredne nekonvencionalne obrade, Modeliranje i optimizacija procesa.

Celokupni stručni i naučni rad profesora Radovanovića odvijao se u području proizvodnog mašinstva, posebno u oblastima: nekonvencionalne tehnologije obrade, tehnologije obrade rezanjem, planiranje i analiza eksperimenta, matematičko modeliranje i optimizacija obradnih procesa. Istovremeno je radio na školovanju podmladka. Formirao je grupu istraživača koja se bavi istraživanjima u oblasti nekonvencionalnih tehnologija obrade, po čemu je postala prepoznatljiva u zemlji i inostranstvu. Bio je mentor tri doktorske disertacije i dva magistarska rada. Bio je član više komisija za ocenu i odbranu doktorskih disertacija u zemlji i inostranstvu.

Član je redakcija naučnih časopisa: Nonconventional Technologies Review, FME Transactions, Journal of Production Engineering, IMK14 - Istraživanje i razvoj, International Journal of Modern

Manufacturing Technologies, The Annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, Optimum Technologies, Technologic Systems and Materials in the Machines Building Field, Modeling and Optimization in the Machines Building Field, Bulletin of the Polytechnic Institute of Iasi - Machine Construction, Fiability and Durability.

Aktivno je učestvovao na brojnim naučnim skupovima u zemlji i inostranstvu. Član je naučnih odbora mnogih međunarodnih konferencija.

Profesor Radovanović je autor više od 400 naučnih i stručnih radova. Od toga, u naučnim časopisima je 160 radova, a u zbornicima radova je 250 radova koji su saopšteni na konferencijama u zemlji i inostranstvu u: Japanu, Kini, Rusiji, Nemačkoj, Francuskoj, Portugaliji, Austriji, Italiji, Poljskoj, Ukrajini, Belorusiji, Slovačkoj, Mađarskoj, Rumuniji, Bugarskoj, Turskoj, Hrvatskoj, Bosni i Hercegovini i Makedoniji. Autor je 3 univerzitetska udžbenika i 2 monografije. Aktivno je učestvovao u radu i bio rukovodilac 11 nacionalnih i 7 međunarodnih naučno-istraživačkih projekata, kao i većeg broja stručnih projekata.

Rezimirajući stručne i naučne aktivnosti, profesor Radovanović je tokom 40 godina rada ostvario značajne rezultate u području proizvodnog mašinstva, podižući naučni ugled Srbije objavlјivanjem velikog broja naučnih radova u međunarodnim časopisima i na međunarodnim konferencijama. Značajni rezultati su i u razvoju naučno-istraživačkog kadra tj. u osposobljavanju mladih istraživača za naučna istraživanja prateći pri tome savremene trendove nauke u svetu.

Značajan je njegov doprinos na Savetovanjima proizvodnog mašinstva na kojima je redovno učestvovao sa radovima i u diskusijama. Posebno je ispoljio aktivnost kao član Izvršnog odbora Zajednice proizvodnog mašinstva Srbije u svojstvu predstavnika Katedre za proizvodno-informacione tehnologije Mašinskog fakulteta u Nišu.

## PREDGOVOR

Prvo Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije održano je u Beogradu 1965. na inicijativu prof. dr Vladimira Šolaje, kada je i formirana Zajednica naučno-istraživačkih institucija proizvodnog mašinstva, koju su sačinjavali Mašinski fakulteti i istraživački instituti proizvodnog mašinstva iz skoro svih republičkih centara tadašnje države.

37. Savetovanje proizvodnog mašinstva Srbije održava se u Kragujevcu, u organizaciji Katedre za proizvodno mašinstvo Fakulteta inženjerskih nauka Univerziteta. Prethodna Savetovanja u Kragujevcu su održana 1969. (5. Savetovanje), 1985. godine (19. po redu) i 2006. (31. Savetovanje).

Ovo Savetovanje, kao i nekoliko prethodnih, održava se u vreme intenzivnih društvenih promena, značajnih za šire aspekte proizvodnog mašinstva. Vlasnička transformacija i oživljavanje privrede u proizvodnim oblastima, posebno u metaloprerađivačkoj industriji, se nije desila na očekivani način. Do pokretanja proizvodnje u velikim industrijskim sistemima nije došlo ni posle privatizacije i najveći broj tih preduzeća je prestao da postoji.

37. Savetovanje proizvodnog mašinstva se organizuje kao jedna od mnogobrojnih konferencija u organizaciji Fakulteta i članova Katedri proizvodnog mašinstva. To posebno svedoči o vitalnosti istraživačkog kadra na ovim prostorima. Savetovanje proizvodnog mašinstva sa dugom tradicijom, svojim redovnim održavanjem doprinosida se još uvek sa velikom dozom optimizma razmišlja o budućnosti nauke i industrije kod nas.

Na ovoj konferenciji biće izloženi radovi autora iz Srbije i inostranstva. U želji da konferencija okupi na prvom mestu domaće autore koji će svojim radovima dati sliku stanja u istraživanjima i privredi Srbije zvanični jezik konferencije je srpski i engleski. Na Savetovanju će biti zastupljene sve aktuelne teme proizvodnog mašinstva sa akcentom na Industriju 4.0, odnosno na nove tehnologije i njihov značaj uvođenja u proizvodne procese. Integracija proizvodnih sa informaciono-komunikacionim tehnologijama treba da omogući revitalizaciju privrede Srbije i društva u celini i priključivanje Srbije četvrtoj industrijskoj revoluciji.

Pored osnovnog zadatka Savetovanja - upoznavanje se trenutnim stanjem istraživanja u oblasti proizvodnog mašinstva, nadamo se da će saopšteni rezultati i diskusija na okrugлом stolu, doprineti ponovnom oživljavanju industrije prerade metala na ovim prostorima, kao izuzetno značajne oblasti za dalji privredni razvoj naše države.

Zahvaljujemo se svim domaćim i stranim autorima, članovima recenzetskog tima, kao i institucijama i pojedincima, koji su doprineli kvalitetnoj realizaciji programa Savetovanja.

Kragujevac,  
25.10.2018.

Predsednik organizacionog odbora 37. SPMS  
Predsednik Izvršnog odbora Zajednice IPMS  
Prof. dr Bogdan Nedić

## PREFACE

The first Conference of Production Engineering of Yugoslavia was held in Belgrade in 1965 at the initiative of prof. dr Vladimir Solaja, when the Association of scientific-research institutions of productive engineering was founded, which consisted of the faculties of mechanical engineering and research institutes from almost all republic centres of the prior state.

The 37<sup>th</sup> Conference of Production Engineering of Serbia will be held in Kragujevac, organised by Department for production engineering of the Faculty of Engineering in Kragujevac. Previous conferences in Kragujevac were held in 1969 (5<sup>th</sup> Conference) and 1985 (19<sup>th</sup> Conference) and 2006 (31<sup>st</sup> Conference).

This Conference, as well as previous ones, will be held in the period of intensive social changes, significant for wider aspects of production engineering. Ownership transformation and revival of economy in production areas, especially in metal-processing industry, has not been realised as anticipated. Starting of production within large industrial systems did not occur even after the privatisation was completed and the largest number of those industries ceased their work.

The 37th Conference of Production Engineering is organised as one of the numerous conferences organised by the Faculty and members of the Department of production engineering. That is the proof of the vitality of researchers in this region. Conference of Production Engineering has long tradition and its regular organisation contributes to the optimistic view on scientific future and industry in this region.

At this Conference, papers of authors from Serbia and abroad will be presented. Wishing at the first instance to gather domestic authors who, in their papers, will provide the state of the research and economy in Serbia, the official languages of the conference is Serbian and English. All currently actual topics in production engineering will be present, with a focus on Industry 4.0, that is, on new technologies and significance of their introduction to production processes. Integration of production with information-communication technologies should enable revitalisation of economy in Serbia and society in general and inclusion of Serbia to the fourth industrial revolution.

Beside the main objective of the Conference, review of current research state in production engineering, we hope that presented results and round table discussion, will contribute to the reviving of metal processing industries in this region, being one of the significantly important fields for the further economy development of our country.

We appreciate contributions from all domestic and foreign authors, members of the peer-review team, and all institutions and persons who supported efficient realisation of the Conference.

Kragujevac,  
25.10.2018.

Chairman of the Organisation Board of 37th SPMS  
Chairman of the Executive Board of IPMS Association  
Prof. dr Bogdan Nedić

FAKULTET INŽENJERSKIH NAUKA  
UNIVERZITETA U KRAGUJEVCU  
**KATEDRA ZA PROIZVODNO MAŠINSTVO**

Školovanja na smeru započelo je školske 1962/63, prelaskom na II stepen studiranja prve generacije studenata Mašinskog fakulteta. Naziv, suština i ciljevi smera su se menjali u skladu sa razvojem smera: od Pripremno proizvodnog odseka (1962.), preko Organizaciono-tehnološkog smera (1966.), Smera za proizvodnju i organizaciju (1974.) i Odseka za proizvodno mašinstvo i organizaciju (1980.) do smera za Proizvodno mašinstvo (od 1989. do danas). 2000. započinje školovanje i na Smeru za Industrijski inženjering.

Danas na Katedri za proizvodno mašinstvo je 21 profesora i saradnika čiji se rad objedinjuje i realizuje kroz nastavni proces na: *osnovnim, master i doktorskim studijama mašinskog inženjerstva za module Proizvodno mašinstvo i Industrijski inženjering*. Zajedničkim angažovanjem sa ostalim katedrama, Katedra za proizvodno mašinstvo učestvuje u realizaciji studijskih programa na osnovnim i diplomskim akademskim studijama Vojnoindustrijskog inženjerstva, Automobilskog inženjerstva, Urbanog inženjerstva i Računarske tehnike i softverskog inženjerstva.

U okviru naučno istraživačke jedinice Katedri pripadaju laboratorije za:

- » obradu metala i tribologiju (LOMT) i
- » obradu metala deformisanjem i mašinske materijale.

Iz istraživačkih i razvojnih aktivnosti Katedre razvijeni su Centri za terotehnologiju, kompjuterom integrисано poslovanje (CIM centar), tribologiju, kvalitet, revitalizaciju industrijskih sistema, integrisani razvoj proizvoda i procesa i inteligentne sisteme, reciklažu dotrajale PC opreme, zavarivanje.

U oblasti naučno-istraživačkog rada članovi katedre su dali ogroman doprinos. Posebno se ističu projekti rađeni za potrebe mnogih preduzeća, projekti resornih Ministarstava i međunarodni projekti

Katedra je organizovala i mnoge naučne skupove i savetovanja, nacionalnog i međunarodnog karaktera, kao što su **Savetovanja proizvodnog mašinstva** (V 1969., XIX 1985., XXXI 2006.), Konferencije o tribologiji - **YUTRIB** i **BALKANTRIB**, **YUMO** (1998.), **Festival kvaliteta**, itd.

#### Časopis "Tribologija u industriji"

Koreni časopisa se protežu na prva saopštenja Laboratorije za obradu metala i tribologiju MFKg pod naslovom "Obrada metala i tribologija". 1979. je pokrenut časopis **Tribologija u industriji** kao časopis koji tretira problematiku tribologije, čiji je osnivač i glavni urednik bio prof. dr Branko Ivković. Urednik časopisa danas je prof. dr Slobodan Mitrović.

Časopis "International Journal for Quality Research" izdaje od 2007. Centar za kvalitet Mašinskog fakulteta u Kragujevcu zajedno sa Centrom za kvalitet Mašinskog fakulteta u Podgorici. Časopis pokriva širok spektar istraživanja u oblasti kvaliteta. Glavni urednici časopisa su prof. dr Zdravko Krivokapić i prof. dr Miladin Stefanović (dugogodišnji prethodni urednik je bio prof. dr Slavko Arsovski).

Časopisi su indeksirani u većini indeksnih baza

## Sadržaj Contents

---

Prof. Dr Vladimir R. Milačić (1934 - 2018).....	3
Prof. Dr Branko Ivković (1931 - 2016).....	5
<i>Uvodni rad / Plenary Presentation</i>	
<i>Vidosav D. MAJSTOROVIĆ, Slavenko STOJADINOVIC</i>	
CYBER-PHYSICAL MANUFACTURING – STATE OF THE ART .....	9
<i>Uvodni rad / Plenary Presentation</i>	
<i>Goran PUTNIK</i>	
HOLON RAZVOJA PROIZVODA MAŠINSTVA SRBIJE: PORUKE ZA BUDUĆNOST IZ ISTORIJE .....	14
<i>Uvodni rad / Plenary Presentation</i>	
<i>Petar PETROVIĆ</i>	
INDUSTRIAL RENAISSANCE AND GLOBAL ECONOMIC FRAMEWORK - Improtance, Role and Mission of Knowledge and Innovation Communities for Manufacturing in Europe and Serbia.....	15
<i>Dragan ADAMOVIC, Fatima ŽIVIĆ, Jelena ŽIVKOVIĆ, Miroslav ŽIVKOVIĆ</i>	
UTICAJ HABANJA NA RADNI VEK ALATA ZA DUBOKO IZVLAČENJE SA STANJENJEM ZIDA .....	19
<i>Srbislav ALEKSANDROVIĆ, Milan ĐORĐEVIĆ, Vukić LAZIĆ, Ružica R. NIKOLIĆ, Dušan ARSIĆ, Aleksandra PATARIĆ</i>	
MODEL KLIZANJA OBODA LIMA IZMEĐU RAVNIH KONTAKTNIH POVRŠINA U PROCESU DUBOKOG IZVLAČENJA PRI PROMENLJIVOM KONTAKTNOM PRITISKU .....	28
<i>Jovan ARANĐELOVIĆ, Pavle DRAŠKOVIĆ, Rajko TURUDIJA, Marko DIMITROV, Nikola BOŽIĆ, Nikola KORUNOVIĆ, Dragan MIŠIĆ, Miroslav TRAJANOVIĆ</i>	
TRIAL EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE AVERAGE TIMES OF ACTIONS EXECUTED IN A CAD APPLICATION .....	37
<i>Božica BOJOVIĆ, Ivan DANILOV, Nemanja GVOJIĆ, Petar PETROVIĆ</i>	
INTERAKTIVNI KORISNIČKI INTERFEJS ZA ELEKTROLUČNO ROBOTSKO ZAVARIVANJE - PRIMENA U EDUKACIJI INŽENJERA .....	44
<i>Zoran DIMIĆ, Dragan MILUTINOVIC, Saša ŽIVANOVIĆ, Stefan MITROVIĆ</i>	
CONTROL AND PROGRAMMING SYSTEM OF PARALLEL KINEMATIC MACHINE .....	50
<i>Mirko ĐAPIĆ, Ljubomir LUKIĆ</i>	
LEAN POSLOVNA PRAKSA KAO PODRŠKA IMPLEMENTACIJI QMS PO ZAHTEVIMA ISO 9001:2015 .....	60
<i>Stefan ĐURIĆ, Dragan ADAMOVIĆ, Bogdan NEDIĆ, Bratislav TRIFUNOVIĆ, Desimir JOVANOVIĆ</i>	
MATERIAL SELECTION OF PROTECTIVE COATINGS .....	69
<i>Dragan Džunić, Vladimir KOČOVIĆ, Ivan BIJELIĆ, Marko PANTIĆ, Suzana PETROVIĆ SAVIĆ, Slobodan MITROVIĆ</i>	
ANALYSIS OF BALL BURNISHING INFLUENCE ON TRIBOMECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINIUM.....	75

<i>Gordana GLOBOČKI-LAKIĆ, Branislav SREDANOVIĆ, Živko BABIĆ, Davorin KRAMAR, Janez KOPAČ, Franci PUŠAVEC</i>	
MOGUĆNOST OBRADE KALJENIH ČELIKA ALATIMA OD TRVDOG METALA PRIMJENOM TEHNIKE HLAĐENJA I PODMAZIVANJA VISOKIM PRITISKOM .....	81
<i>Marin GOSTIMIROVIC, Dragan RODIC, Pavel KOVAC, Milenko SEKULIC, Vlastimir PEJIC</i>	
AN OPTIMAL ENERGY CONTROL STRATEGY FOR ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING .....	91
<i>Elvis HOZDIĆ</i>	
SOCIOLOŠKI ASPEKTI INDUSTRije 4.0 U NAPREDNIM PROIZVODNIM SISTEMIMA .....	95
<i>Predrag JANKOVIĆ, Miloš MADIĆ, Miroslav RADOVANOVIC, Dušan PETKOVIĆ</i>	
USING THE GP IN THE ANALYSIS AND MODELING OF SPECIFIC CUTTING ENERGY IN AWJ .....	107
<i>Goran JOTIĆ, Branko ŠTRBAC, Igor BUDAK, Miodrag HADŽISTEVIC</i>	
IMPLEMENTACIJA TEHNIKE CAD-INSPEKCIJE NA PREDMETIMA SLOŽENOG GEOMETRIJSKOG OBЛИKA .....	113
<i>Desimir JOVANOVIĆ, Bogdan NEDIĆ, Predrag JANKOVIĆ, Stefan DJURIĆ</i>	
ZAMENA PREVLAKA KADMIJUMA PREVLAKAMA VOLFRAM-DISULFIDA .....	120
<i>Aleksandar JOVICIC, Radomir SLAVKOVIC, Nedeljko DUCIC, Radomir RADISA, Srećko MANASIEVIC</i>	
THE APPLICATION OF NUMERICAL SIMULATION IN THE IMPROVEMENT OF THE FLOTATION BALLS CASTING PROCESS USED IN THE MINING INDUSTRY .....	124
<i>Aleksandar JOVIČIĆ, Radomir SLAVKOVIC, Nedeljko DUČIĆ, Radomir RADIŠA, Srećko MANASIEVIĆ</i>	
PRIMENA NUMERIČKE SIMULACIJE U UNEPREĐENJU PROCESA LIVENJA FLOTACIJSKIH KUGLI KOJE SE KORISTE U RUDARSKOJ INDUSTRiji .....	130
<i>Nataša KABLAR</i>	
COMMUNICATION PROTOCOLS IN HOME AUTOMATION .....	136
<i>Nataša KABLAR</i>	
COMMUNICATION PROTOCOLS USED IN ENGINEERING .....	141
<i>Nataša KABLAR</i>	
WIRELESS CONTROL OF BLDC MOTOR VIA ARDUINO BOARD .....	153
<i>Nenad KULUNDŽIĆ, Borislav SAVKOVIĆ, Pavel KOVAČ, Marin GOSTIMIROVIĆ, Dušan JEŠIĆ</i>	
SIMULACIJA TEMPERATURNOG POLJA I SILA REZANJA PRI BUŠENJU .....	161
<i>Dragan LAZAREVIĆ, Bogdan NEDIĆ, Milan RADENKOVIĆ, Živče ŠARKOČEVIC, Bojan STOJČETOVIĆ</i>	
PRIMENA OPTIČKIH BESKONTAKTNIH MERNIH SISTEMA KOD INSPEKCIJE DELOVA DOBIJENIH OBRADOM REZANJEM .....	165
<i>Vukić LAZIĆ, Dušan ARSIĆ, Milorad RAKIČEVIC, Srbislav ALEKSANDROVIĆ, Milan ĐORĐEVIĆ, Petar MARINKOVIĆ, Nada RATKOVIĆ</i>	
UTICAJ VRSTE ZAVARENOG SPOJA NA BALISTIČKA SVOJSTVA PANCIRNOG ČELIKA ARMOX 500T .....	173
<i>Ljubomir LUKIĆ, Mirko ĐAPIĆ, Aleksandra PETROVIĆ</i>	
ISTORIJA RAZVOJA CNC MAŠINA ALATKI U SRBIJI .....	178

<i>Miroslav LUČIĆ, Bogdan NEDIĆ, Ivo VLASTELICA, Suzana PETROVIĆ SAVIĆ</i>	
EKSPERIMENTALNO MERENJE I NUMERIČKA ANALIZA TEMPERATURNOG POLJA U ZONI REZANJA U USLOVIMA KONTINUALNE I DISKONTINUALNE OBRADE STRUGANJEM .....	188
<i>Miloš MADIĆ, Srđan MLAĐENOVIĆ, Miroslav RADOVANOVIC, Predrag JANKOVIĆ, Dušan PETKOVIĆ</i>	
ANALYSIS OF KERF WIDTH IN CO <sub>2</sub> LASER CUTTING OF P265GH STEEL .....	197
<i>Vesna MANDIĆ</i>	
INTEGRACIJA TEHNOLOGIJA VIRTUELNOG INŽENJERINGA U SAVREMENOM PROJEKTOVANJU PROIZVODA I TEHNOLOŠKIH PROCESA .....	203
<i>Svetislav Lj. MARKOVIĆ, Ljubica MILOVIĆ, Dragoljub VELIČKOVIĆ, Bratislav N. STOJILJKOVIĆ</i>	
PRILOG ANALIZI TEHNOLOGIČNOSTI OBLIKA U RAZVOJU PROIZVODA .....	211
<i>Krsto MIJANOVIĆ, Goran LALOVIĆ</i>	
RECYCLING OF CUTTING OILS AND ADDITIVATION TO THE FILLING OF TRIBOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL REQUIREMENTS .....	218
<i>Aleksandar MILJKOVIĆ, Milan BLAGOJEVIĆ, Stefan ĐURIĆ</i>	
DESIGN CONCEPT OF IMPACT ATTENUATOR BASED ON COMPARATIVE ANALYSIS .....	224
<i>Jasmina MILJOJKOVIĆ, Milan ERIĆ, Aleksandar KOŠARAC, Vladimir KOČOVIĆ</i>	
SOFTVERSKA PODRŠKA UREĐAJU ZA ISPITIVANJE GUBITAKA USLED TRENJA U NAVOJNIM SPOJEVIMA .....	235
<i>Cvijetin MLAĐENOVIĆ, Aleksandar KOŠARAC, Milan ZELJKOVIĆ, Miloš KNEŽEV, Aleksandar ŽIVKOVIĆ</i>	
ANALITIČKO-EKSPERIMENTALNO DEFINISANJE KARTE STABILNOSTI OBRADNIH SISTEMA .....	241
<i>Dejan MOVRIN, Ognjan LUŽANIN, Mladomir MILUTINOVIĆ, Saša RANDELOVIĆ, Dragiša VILOTIĆ</i>	
UTVRĐIVANJE VREDNOSTI OPTIMALNIH PARAMETARA POSTPROCESIRANJA U PROCESIMA VEZIVNE 3D ŠTAMPE .....	247
<i>Bogdan NEDIĆ, Jelena BARALIĆ, Stefan ĐURIĆ</i>	
CUTTING SPEED AND LASER POWER INFLUENCE ON MACINED SURFACE ROUGHNESS AND DEPTH OF THE LASER MILLING .....	253
<i>Lazar OCOKOLJIĆ, Fatima ŽIVIĆ, Nenad GRUJOVIĆ, Bogdan VASILJEVIĆ</i>	
STATISTIČKA ANALIZA U UPRAVLJANJU KVALitetOM PROIZVODNOG PROCESA, SA ASPEKTA UTICAJA BROJA ZAPOSLENIH NA EFEKTIVNOST PROIZVODNOG PROCESA.....	259
<i>Dušan PETKOVIĆ, Miloš MADIĆ, Miroslav RADOVANOVIC, Predrag JANKOVIĆ</i>	
AN EXAMPLE OF MCDM SOLVER APPLICATION FOR SELECTION PROBLEMS IN MACHINING .....	265
<i>Suzana PETROVIC SAVIC, Marko PANTIC, Dragan DZUNIC, Vladimir KOCOVIC</i>	
3D MODELING PROCESS AUTOMATIZATION THROUGH MACROS IMPLEMENTATION.....	269
<i>Goran PUTNIK</i>	
LEARNING FACTORZ AS MODERN EDUCATION MODEL FOR EFFECTIVE COLLABORATIVE EDUCATION BETWEN ACADEMIA AND INDUSTRY, AND ITS “PROTO-MODEL” AT THE FME UB IN 80’S .....	274

<i>Vojislav RADONJIĆ, Svetislav Lj. MARKOVIĆ, Dalibor MARKOVIĆ</i>	
MATERIJALI ZA IZRADU TETRA BRIK AMBALAŽE .....	275
<i>Saša RANDOLOVIĆ, Aleksandar ĐORĐEVIĆ, Milan ERIĆ, Slobodan MITROVIĆ, Miladin STEFANOVIĆ</i>	
LEAN PROIZVODNJA – POLAZ ZAUSPEŠNU PRIMENU .....	281
<i>Saša RANDOLOVIĆ, Miloš MADIĆ, Mladomir MILUTINOVIĆ, Dejan TANIKIĆ</i>	
THE FORWARD EXTRUSION PROCESS ANALYSIS BASED ON PLASTIC DEFORMATION OF METAL GRAIN STRUCTURE .....	288
<i>Marija SAVKOVIĆ, Marko ĐAPAN, Ivan MAČUŽIĆ, Petar TODOROVIĆ, Milan RADENKOVIĆ</i>	
BARRIERS FOR IMPROVEMENT OF TRADITIONAL INDUSTRIAL SYSTEMS BASED ON AUTONOMOUS MAINTENANCE .....	292
<i>Varun SHARMA, Nikola PALIC, Fatima ZIVIĆ, Nenad GRUJOVIĆ</i>	
PRODUCTION OF METALLIC FOAM AND ITS MECHANICAL PROPERTIES .....	302
<i>Svetomir SIMONOVIĆ</i>	
O ELEMENTIMA NANOROBOTA SA POSEBNIM OSVRTOM NA NANOCEVNE NANOELEKTROMEHANIČKE SISTEME .....	307
<i>Miladin STEFANOVIĆ, Aleksandar ĐORĐEVIĆ, Hrvoje PUŠKARIĆ</i>	
GLAVNI IZAZOVI ZA KVALITET 4.0 U OKVIRU KONCEPTA INDUSTRIJA 4.0 .....	313
<i>Pavle STEPANIĆ, Aleksa KROŠNJAR, Radomir RADIŠA</i>	
AUTOMATIZACIJA VAKUUM PEĆI ZA TERMIČKU OBRADU METALA .....	319
<i>Konstantinos TSONGAS, Gabriel MANSOUR</i>	
VIBRATION ISOLATION BEHAVIOR OF POROUS ALUMINIUM AND NBR/MULTI-WALLED CARBON NANOTUBE COMPOSITE MACHINE MOUNTS .....	325
<i>Branko ŠTRBAC, Zorana LANC, Ivan MATIN, Miodrag HADŽISTEVIC</i>	
ISPITIVANJE TEMPERATURNOG UTICAJA NA MERNU NESIGURNOST I GREŠKU KMM MERENJA .....	331
<i>Miomir VUKIĆEVIĆ, Mišo BJELIĆ, Goran MIODRAGOVIĆ, Marina IVANOVIĆ, Mladen RASINAC</i>	
FORMS OF THE REPORTS FROM THE TESTING OF WELDED JOINTS (STRUCTURES).....	336



**U ZNAK SEĆANJA**





Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

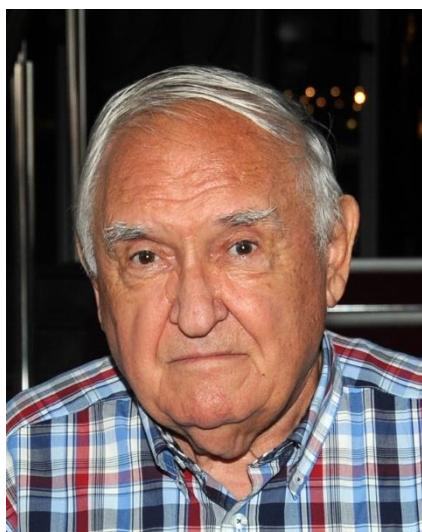
37<sup>th</sup> International Conference on Production  
Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## PROF. DR VLADIMIR R. MILAČIĆ (1934 - 2018)



Prof. Vladimir Milačić je rođen u Skoplju 20. jula 1934. godine. Školovao se u Beogradu, završio je Drugu mušku gimnaziju 1953. i iste godine upisao studije na Mašinskom fakultetu. Svoju nastavnu i naučno-istraživačku karijeru na Mašinskom fakultetu otpočeo je 1960. godine.

Profesor Vladimir Milačić je bio vizionar, jedan od pionira u domenu proizvodnog mašinstva i primene novih tehnologija na našim prostorima i ostavio je neizbrisiv trag u nauci i inženjerskoj praksi. Generacijama inženjera prenosio je znanja za budućnost.

Prof. Milačić je obeležio „zlatno vreme“ Mašinskog fakulteta i pripada plejadi profesora koji su doprineli razvoju ove visokoškolske ustanove. Bio je priznat i cenjen i u svetu i jedan je od retkih profesora Mašinskog fakulteta koji su pozivani da predaju na inostranim univerzitetima. Prof. Milačić svakako pripada generaciji profesora koji su stvorili trend Mašinskog fakulteta u Beogradu.

Prof. Milačić je bio nacionalni pionir i predvodnik u razvoju i primenama kompjuterski podržanih tehnologija. Davne 1969. godine inicirao je uvođenje kompjutera kao nove tehnologije, prvo na Mašinskom fakultetu, a zatim i u preduzećima domaće industrije prerade metala. Postavio je i izvodio naučnoistraživačke programe i razvoj novih programa za industriju u domenu novih tehnologija, kao što su NC-tehnologije, fleksibilni tehnički sistemi, CAD/CAM/CAE tehnologije, industrijski roboti, inteligentni sistemi za montažu, nova generacija obradnih sistema i dr.

Formirao je Centar za nove tehnologije - CeNT, jedinstveni istraživačko-obrazovni resurs na ovim prostorima. Tu su se prikupljala znanja iz svetskih istraživačkih centara, ali i generisale nove

ideje i rezultati koji su lansirani u svet. Ostvareni doprinosi nauci i inženjerskoj praksi prepoznati su u svetskim razmerama.

Dao je ogroman doprinos uvođenju potpuno inovativnih nastavnih metodologija, koje mnogi u svetu tek sada „otkrivaju“, a koje su studenti i asistenti početnici, zahvaljujući viziji prof. Milačića, svakodnevno živeli još 80-tih godina prošlog veka. Reč je o Project-led education (PLE) i Learning Factory, koje danas važe za veoma napredne nastavne tehnologije. Learning Factory je poslednjih godina bila predmet posebne radne grupe pri Međunarodnoj akademiji za proizvodno mašinstvo (CIRP). Proto-Learning Factory je pre 30 godina primenjivana upravo na Katedri za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta u Beogradu .

Po svim projektima, pionirskim u svom vremenu, prof. Milačić je nesumnjivo jedan od pionira proizvodnog mašinstva u Srbiji i regionu. Prof. Milačić je ostvario potpuni holon proizvodnog mašinstva na našim prostorima. Takođe, prof. Milačić je sinonim za epohu proizvodnog mašinstva koja je označila predvečerje onoga što danas nazivamo Industrija 4.0, i koja nas je uspešno pripremila za nadolazeće tehnološke izazove.

Prof. Milačić je bio član najznačajnijih svetskih udruženja i asocijacija u oblasti proizvodnog mašinstva: CIRP, IFAC, IFIP, Američke organizacije za precizno inženjerstvo, Inženjerske akademije Ukrajine. Uspostavio je saradnju sa najpoznatijim svetskim univerzitetima i istraživačkim centrima. Bio je osnivač i kopredsednik Svetskog kongresa Inteligentni tehnološki sistemi. U periodu 1990-1996. bio je gostujući profesor na univerzitetima u SAD: Džordž Vašington Univerzitet, Univerzitet Kentaki i Univerzitet Portoriko, na kojima je držao nastavu na poslediplomskim studijama iz teorije inženjerskog projektovanja, proizvodnih tehnologija, kompjuterski integrisanih tehnologija i drugih oblasti novih tehnologija. Održao je i veliki broj predavanja po pozivu u najznačajnijim svetskim centrima: Tokio, Moskva, Kijev, Masačusets....

Prof. Milačić je bio upravnik Zavoda za mašine alatke, šef Katedre za proizvodno mašinstvo i rukovodilac Instituta za proizvodno mašinstvo i kompjuterski integrisane tehnologije na Mašinskom fakultetu u Beogradu. Autor je preko 320 stručnih i naučnih radova, 350 projekata i 30 knjiga. Osnivač je JUPITER konferencije, jedne od najznačajnijih na prostorima bivše Jugoslavije. Ova konferencija i dalje traje, nedavno je održana 41 konferencija.

Po odlasku u penziju prof. Milačić intenzivno je radio na izgradnji programa tehnoloških platformi za fabrike budućnosti i napisao Intelektualni kapital, Menadžment tehnologija, Industrija znanja, Nova metafizika inženjerstva, Politička ekonomija industrije znanja. U ovim svojim knjigama istakao je značaj razvoja inženjerskih nauka i inženjerske struke koja jeste garant graditeljske filozofije i srpskog društva. Kroz primere iz svetske i domaće prakse, ukazao je na potrebu za globalnom zajedničkom odgovornošću za razvoj društva u skladu sa potrebama ljudi i prirode sa jedne strane i načina upravljanja resursima radi stvaranja bogatstva kao generatora održivog razvoja, sa druge strane. Njegova poslednja knjiga Nova metafizika inženjerstva 2 je izašla iz štampe na dan kada se upokojio.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Iz govora prof. dr Gorana Putnika - Univerzidade do Minho, Portugalija



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

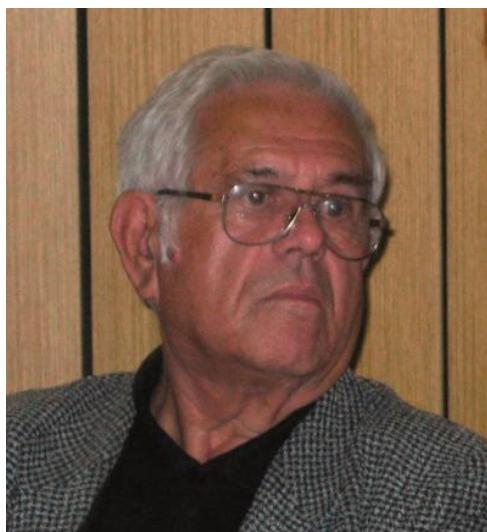
## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## PROF. DR BRANKO IVKOVIĆ (1931- 2016)



Profesor Dr Branko Ivković, rođen je 10. novembra 1931. godine, u Kragujevcu. Osnovnu i srednju školu završio je 1949. godine u Kragujevcu. Do 1954. godine radio je kao tehničar na poslovima projektovanja i konstruisanja alata u više organizacija namenske proizvodnje. Studirao je na Mašinskom fakultetu u Beogradu, gde je diplomirao 1960. godine na opštem mašinskom odseku iz predmeta MAŠINE ALATKE i INDUSTRJSKA PROIZVODNJA. Od 1960. godine radio je u Zavodima "Crvena zastava" na poslovima rukovodioca tehnološke grupe, upravnika pogona i načelnika tehnološkog odeljenja. Godine 1965. izabran je za honorarnog predavača za predmet MAŠINSKA OBRADA na Mašinskom fakultetu u Beogradu, Odeljenje u Kragujevcu. Godinu dana kasnije izabran je za stalnog predavača takodje za predmet mašinska obrada, a na istom predmetu, godine 1968. izabran je za docenta. Doktorsku disertaciju pod naslovom "DEFINISANJE USLOVA HABANJA CILINDRIČNIH GLODALA PRI SUPROTNOSMERNOM I ISTOSMERNOM POSTUPKU" odbranio je na Mašinskom fakultetu u Beogradu marta 1970. godine. Za redovnog profesora Mašinskog fakulteta u Kragujevcu na predmetima OBRADA METALA REZANJEM i TIRIBOLOGIJA, izabran je 1976. godine gde je ostao do svog penzionisanja, oktobra 1997. godine.

Tokom svog neprekidnog tridesetjednogodišnjeg rada na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu, kroz stalni uspon od predavača, preko docenta i vanrednog profesora do redovnog profesora i do kraja svog zvaničnog radnog veka, profesor Dr Branko Ivković je dao ogroman doprinos i trajni pečat podizanju kvaliteta nastavnog i naučno-istraživačkog rada, a posebno razvoju teritorijalno široko rasprostranjenog nastavnog, naučno-istraživačkog kadra, razvoju prostornih i laboratorijskih kapaciteta Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, a sve to kroz razvoj širokog spektra niza naučnih i nastavnih disciplina iz oblasti mašinske nauke i tehnike. Još kao mlad profesor i prodekan za

nastavu profesor Ivković je jedan od značajnih utemeljivača poslediplomskih studija na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu, koje su doprinele podizanju naučne misli kako u ovom regionu tako i u zemlji uopšte. Kroz poslediplomske studije i druge vidove naučno-istraživačke delatnosti, prof. Ivković je svojim savesnim i stručnim vodjenjem uzdigao relativno veliki broj mladih kadrova (više od 20 magistara i blizu toliko doktora tehničkih nauka), uz aktivno učešće u velikom broju komisija za odbranu doktorskih i magistarskih radova na skoro svim mašinskim fakultetima u zemlji, a i na nekim fakultetima van zemlje.

Pored rada na redovnoj, vanrednoj i poslediplomskoj nastavi, kao i na poslovima uzdizanja mladih kadrova, prof. Ivković je bio rukovodilac i aktivni učesnik u realizaciji niza naučno-istraživačkih projekata regionalnog, republičkog i saveznog značaja iz oblasti proizvodnog mašinstva, zatim nekoliko međunarodnih naučno-istraživačkih projekata kao i niza drugih projekata za potrebe jugoslovenske privrede. Autor i koautor je više od 90 elaborata i internih publikacija. Napisao je oko 15 knjiga, univerzitetskih udžbenika i priručnika, od kojih jedan udžbenik je preveden na ruski jezik i izdat od strane tehničke knjige u Minsku (SSSR). Pokretač je i jedan od autora edicije priručnika za metalce (No1 do No8), namenjenih pripremi teorijskog dela takmičenja metalkih radnika Jugoslavije. Pored ovoga Prof. Ivković je i autor više od 150 naučno-stručnih saopštenja, saopštenih na nizu jugoslovenskih i internacionalnih skupova, konferencija i savetovanja, štampanih u domaćim i medjunarodnim časopisima. Pored svog bogatog naučno-istraživačkog rada Prof. Dr Branko Ivković je osnivač i bio je dugogodišnji glavni i odgovorni urednik međunarodnog časopisa "Tribologija u industriji", sada "Tribology in industry".

Poseban dopinos prof. Ivkovića je u razvoju međunarodne saradnje Mašinskog fakulteta i Univerziteta u Kragujevcu.

Bez prof. Ivkovića, današnji laboratorijski prostor od oko 8.000 kvadratnih metara, kojim raspolaže Mašinski fakultet u Kragujevcu, ne bi postojao. Samo čovek takvog tipa, jake energije, visokog znanja, stručnosti i intuicije smeо je da se uhvati u koštaс sa takvim projektom, obezbedi potrebna sredstva i isti uspešno dovede do kraja.

Prof. dr Branko Ivković, je bio aktivni i na mnogim drugim poljima. Nalazio se na nizu odgovornih funkcija, oko 20 godina na mestu predsednika republičkog žirija za takmičenje metalkih radnika, člana Privredne komore Srbije, člana komisija veća sindikata, predsednika Izvršnog odbora zajednice proizvodnog mašinstva Jugoslavije itd.

Pored funkcija upravnika Pogona, načelnika tehnologije i drugih u privrednim organizacijama, Prof. Ivković je obavljao i ni2016z drugih odgovornih funkcija: u dva mandata dekan Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, prodekan za nastavu, upravnik laboratorije za obradu metala i tribologiju, šef Katedre za proizvodno mašinstvo, predsednik Saveta i niza komisija Mašinskog fakulteta, dok o članstvu velikog broja komisija i raznih tela opštinskog značaja teško je govoriti, jer je njihov broj veliki i značajan.

Za svoj rad i doprinos u sveukupnom radu prof. dr Branko Ivković je dobio niz priznanja u vidu ordena, diploma, medalja, zahvalnica i sl; a 1975. godine, odlikovan je Ordenom rada sa zlatnim vencem.

Iz govora prof. dr Ratka Mitrovića, 20.11.1997. godine

# **UVODNI RADOVI**

# **PLENARY PRESENTATIONS**





Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

Uvodni rad/Plenary presentation

## CYBER-PHYSICAL MANUFACTURING – STATE OF THE ART

Review paper

Prof. Dr. Vidosav D. MAJSTOROVIĆ<sup>1,\*</sup>, Ass. Prof. Dr. Slavenko STOJADINOVIĆ<sup>1</sup>

University of Belgrade, Mechanical Engineering Faculty, Belgrade, Serbia

\*Corresponding author: [vidosav.majstorovic@sbb.rs](mailto:vidosav.majstorovic@sbb.rs)

**Abstract:** The Cyber Manufacturing Systems (CMSs) are based on integration of the Cyber Physical Systems (CPSs) and connection between Internet of Things (IoTs) and Cloud technology (CT). These are high-level methodologies for development of new generation factories, which are more intelligent, flexible and self-adaptable. CMSs generates Big Data, horizontally by integration (network of machines, processes and sensors) and vertically by control (usually defined over five levels) which should be analytically processed and managed by the Cyber-Physical Manufacturing (CPM) or CPS. In this way, two functional entities, real and virtual, are established, through which: (a) the advanced connectivity that ensures real-time data acquisition from the physical world and information feedback from the cyber space; and (b) intelligent data management, analytics and computational capability that constructs the cyber space. Industry 4.0 is Program initiated by German Government and industry as a new model of automatization of manufacturing technologies. CPM is the key element of Industry 4.0. In this paper, a detailed analysis of the current level of development of the CPM and our research in this field.

**Keywords:** CPS, CPM, Industry 4.0, CPM<sup>3</sup> model.

### 1. INTRODUCTION

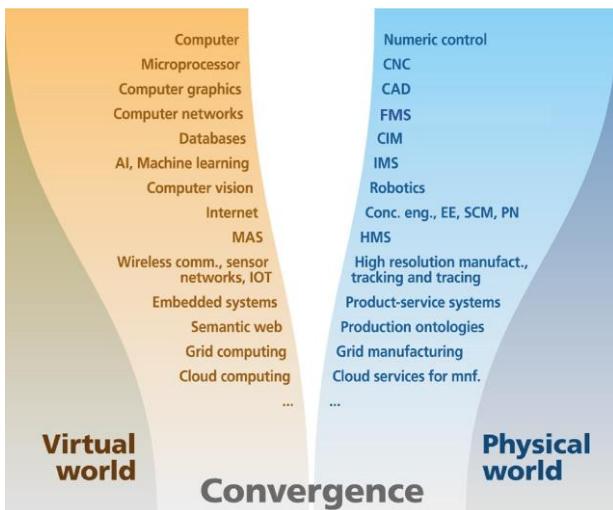
Cyber-physical systems (CPS) are systems of collaborating computational entities which are in intensive connection with the surrounding physical world and its on-going processes, providing and using, at the same time, data-accessing and data-processing services available on the Internet [1]. Cyber-physical manufacturing (CPM), relying on the latest and foreseeable further developments of computer science (CS), information and communication technologies (ICT), and manufacturing science and technology (MST)

may lead to the 4th industrial revolution, frequently noted as Industrie 4.0 [2].

High-level methodologies for development of new generation factories, that are more intelligent, flexible and self-adaptable are based on integration of CPS and connection between internet of thinks (IoT) and Cloud technology (CT). CPM generates Big Data, horizontally by integration and vertically by control which should be analytically processed and managed by CPM/CPS. Two functional entities are established: (a) the advanced connectivity that ensures real-time data acquisition from the physical world and

information feedback from the cyber space; and (b) intelligent data management, analytics and computational capability that constructs the cyber space [3].

Connection between the development of computer science, information and communication technologies, and manufacturing science and technology, is given on Fig.1.

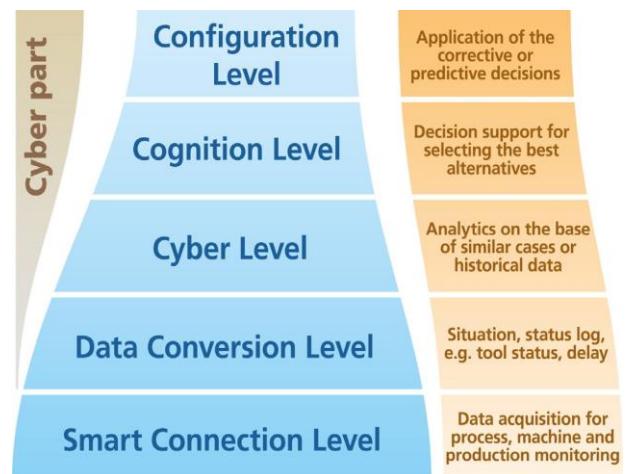


**Figure 1.** CPM, ICT and manufacturing (adapted [1])

The five-layer CPM/CPS architecture includes features and characteristics [4-7]: (a) smart connection - to collect accurate and reliable data at the lowest level of the sensor, as well as from the controllers from the drives: ERP, SPM (statistical parametric mapping), CMM, MES (manufacturing execution system), and their transfer to cloud, (b) data-to-information conversion - conversion and analysis of data and information generated at the previous level are carried out at this level, and in order to define the framework for intelligent management, (c) cyber level - this is the central information center (hub) in this architecture, in which a large amount of data is flooded, whose analysis is done immediately, creating databases on the current CPM state, now in the past (twin model, clustering and data mining) [5], (d) cognition level - at this level, knowledge (from the previous notes) is generated, for monitoring, management and decision making, and (e)

configuration level - at this level feedback is generated from cyber space, which is used for self-configure and self-adaptive machine in the physical space, Fig. 2.

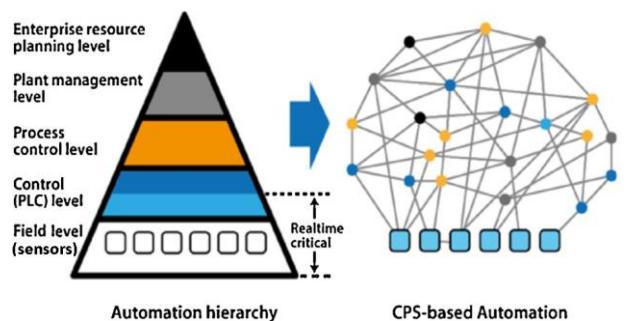
In a CPS/CPM approach Level I represents the physical space, Levels II-IV the "pure" cyber space, and Level V realizes the feedback from the cyber space to the physical space.



**Figure 2.** The five-layer of CPM [4]

## 2. CAYBER-PHYSICAL MANUFACTURING

CPM was exchange the traditional automation pyramid, because even before Industrie 4.0, in [22] described how the automation pyramid, which used to be the 'common sense' for industrial and automation IT architecture, is evolving into a new kind of architecture [1], Fig. 3.



**Figure 3.** Advanced model automation by CPM (adapted [1])

Today with CPM we are already more advanced: the typical control and field levels still exist which include common PLCs close to

the manufacturing processes in order to be able to provide the highest performance for critical control loops, while at the other, higher levels of the hierarchy a more decentralized way of functioning is characteristic in CPM (right side of Fig. 3).

In the last few decades, CIRP organization has developed several advanced manufacturing technology models that are today a framework for CPM. Those are: (i) *Intelligent Manufacturing Systems (IMS)* [8], based on used the results of artificial intelligence (AI), machine learning (ML) methods, the application of pattern recognition techniques, expert systems, artificial neural networks, fuzzy systems and hybrid AI techniques in simulation and control of manufacturing process and systems, (ii) *Biological Manufacturing Systems (BMS)* [9], aimed at dealing with dynamic changes in manufacturing system, based on biologically-inspired ideas such as self-growth, self-organization, adaptation and evolution, (iii) *Reconfigurable Manufacturing Systems (RMS)* [10], can operate both as a dedicated system or as a flexible one or, even as their transitions, (iv) *Digital Enterprise or Digital Factory* [11], mapping most of the technical and business processes into the digital world, including data mining procedures was described, where models based on discrete event simulation (DES), (v) *The Holonic (or agent-based) manufacturing systems (HMSs)* [12] consist of autonomous, intelligent, flexible, distributed, co-operative agents or holons. HMSs identifies three types of basic holons: resource, product, and order holons, (vi) “*Gentelligent*” components [13], are able to collect information of their lifecycle and to store and communicate them. The term “gentelligent” originates from the words “genetic” and “intelligent”, describing components with genetically intelligent properties, as in biology, (vii) *Emergent synthesis methodologies* [14] for manufacturing. Environmental conditions are changing, due to agents’ interactions as they compete/cooperate for the same resources or for achieving a given goal, (viii) *Open-architecture products (OAP)* [15] represent a

new class of products comprising a fixed platform and modules that can be added and swapped. Customers can adapt OAPs to their needs by integrating modules into the platform, and (ix) *cloud computing* will play a significant role in realizing CPM [16], because support the timely acquisition, distribution, and utilization of information from machines and processes across spatial boundaries.

### 3. OUR RESEARCHES OF CPM [17-21]

The framework of our cyber-physical manufacturing metrology model ( $CPM^3$ ) consists of the following sub-modules: (a) Module for recognition of geometrical features (GF) from CAD/GD&T model of the measurement part, (b) Intelligent inspection process planning (IIPP) module, that contains methods for prismatic parts presented in, and method for freeform surfaces from this paper, (c) Coordinate measuring machine (CMM) – generation of control data list for CMM that is transferred to CMM using cloud technology, and (d) Module for analysis of results and generation of the reports. Cloud services within the company provide the necessary information for integration of knowledge and data from various phases in product design and manufacturing into inspection planning, and make available information about inspection results to all interested parties in product lifecycle.

The starting point for the implementation of the  $CPM^3$  model is approaching the CU (Control Unit) architecture and source code for which the drivers generate CMM execution codes, using the high level programming skills and knowledge of the IoT Cloud technology. In the next step, system creates virtual clones of CU and CMM DEA in the Cloud. Virtual twins behave as physical devices and CMM programming can be done in the cloud, without using the physical CMM.

Using the smart devices (cell phones, tablets, notebook) user accesses the cloud by web-browser, with a unique username and password. In this research we have opted to employ Raspberry Pi3 since it is open to easy

programming of communication protocols. Using our CPM<sup>3</sup> method new control codes are generated and directly loaded on the CMM. For GD&T definition PMI (Product Manufacturing Information) can be utilized since it contains additional information about free-form surfaces. Cloud keeps the previously used control codes (GD&T for the previously measured parts, reports) in databases, and user can access and download it, at any time, to own device. Also, it is possible to monitor the work of CMM in real time. This is an important option, in the case of an error, since the user can stop the CMM remotely. After each measurement, report is generated and automatically sent to the Cloud where it is stored. The system sends the report to a user or a predefined group of users, via email or SMS service: start/end of measurement, various alarms, environment sensor readings and other important information.

The protocols used for communication in this concept, are very important. For example, due to poor communication of IoT devices (CMM or IoT devices) cloud may cause packet or data loss which may result in the breakdown of the machine. For these reasons, it is necessary to provide a good and reliable Internet connection. Also, it is necessary to establish parallel protocols to check all packages and compare them with the expected / required conditions. This mode eliminates the errors, and thus avoids potential accidents due to CMM collision. Nowadays, there exists wide range of security protocols for IoT.

#### 4. CONCLUSIONS

Review presented in this paper was concentrated on the: (a) defining CPM/CPM<sup>3</sup> model and its structure, (b) development of a model knowledge base for CPM<sup>3</sup> model, for chosen example for cyber level, and (c) the establishment of total hardware and software configurations for him. The next steps of this research of CPM<sup>3</sup> are: (a) developing software structure of the virtual part of the model, and (b) testing the IoT elements for this model.

#### REFERENCES

- [1] L. Monostori et al: Cyber-physical systems in manufacturing, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 65, pp. 621–641, 2016.
- [2] H. Kagermann et al: *Securing the Future of German Manufacturing Industry: Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0*, Final Report of the Industrie 4.0 Working Group, 2013.
- [3] Y. Chen: Integrated and Intelligent Manufacturing: Perspectives and Enablers, Engineering, Vol. 3, pp. 588–595, 2017.
- [4] J. Lee, B. Bagheri, C. J: Introduction to cyber manufacturing, Manufacturing Letters, Vol. 8, pp. 11-15, 2016.
- [5] Y. Cai, B. Starly, P. Cohen, Y.-S. Lee: Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing, Procedia Manufacturing, Vol. 10, pp. 1031 – 1042, 2017.
- [6] Y. SooCheol, S. - H. Suh: Manufacturing Information Bus from the Perspective of Cyber Physical Manufacturing System, IFAC-Papers On Line, Vol 49, pp. 103–108, 2016.
- [7] Y. Lu, F. Ju: Smart Manufacturing Systems based on Cyber-physical Manufacturing Services (CPMS), IFAC Papers On Line, Vol. 50, pp. 15883–15889, 2017.
- [8] C. Brecher, M. Fey, S. C. Gsell, N. Hennekes, J. - O. Hestermann, B. C. Höper, C. Krella, W. Lohse, F. Lubnau, D. Prust, H. Wille: Auf dem Weg zur selbstüberwachenden Werkzeugmaschine, in: *Integrative Produktion: Industrie 4.0 Aachener Perspektiven*, 2014, Shaker Verlag, Aachen, pp. 297 - 330.
- [9] K. Ueda, J. Vaario: The Biological Manufacturing System: Adaptation to Growing Complexity and Dynamics in Manufacturing Environment, CIRP Journal of Manufacturing Systems, Vol. 27, pp. 41-46, 1998.
- [10] Y. Koren, U. Heisel, F. Jovane, T. Moriwaki, G. Pritschow, G. Ulsoy, H. Van Brussel: Reconfigurable Manufacturing Systems, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 48, pp. 527–540, 1999.
- [11] B. Kádár, W. Terkaj, M. Sacco: Semantic Virtual Factory Supporting Interoperable Modelling and Evaluation of Production Systems, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 62, pp. 443–446, 2013.

- [12] P. Valckenaers, H. Van Brussel: *Design for the Unexpected, From Holonic Manufacturing Systems Towards a Humane Mechatronics Society*, 1st ed. Elsevier, 2015.
- [13] B. Denkena, T. Mörke, M. Krüger, J. Schmidt, H. Boujnah, J. Meyer, P. Gottwald, B. Spitschan, M. Winkens: Gentelligent Components Over Their Lifecycle, CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 7, pp. 139–150, 2014.
- [14] K. Ueda, A. Markus, L. Monostori, H.J.J. Kals, T. Arai: Emergent Synthesis Methodologies for Manufacturing, CIRP Annals – Manufacturing Technology, Vol. 50, pp. 535–551, 2001.
- [15] Y. Koren, S. J. Hu, P. Gu, M. Shpitalni: Open-architecture Products, CIRP Annals, Vol. 62, pp. 719–729, 2013.
- [16] J. Schlechtendahl, F.. Kretschmer, A. Lecher, A. Verl: Communication Mechanisms for Cloud Based Machine Controls, Procedia CIRP, Vol. 17, pp. 830–834, 2014.
- [17] V. Majstorović, M. Velimirović, M. Glišić, J. Kostić, E. Đura, M. Rančić, R. Mitrović: Cyber-Physical Manufacturing in Context of Industry 4.0 Program, in: *Proceedings of 3rd International Conference on the Industry 4.0 Model for Advanced Manufacturing*, Springer, Cham, 2018, pp. 227-238,
- [18] V. Majstorović, J. Mačužić, T. Šibalija, S. Živković: Cyber-Physical Manufacturing Systems – Manufacturing Metrology Aspects, Journal of Proceedings in Manufacturing Systems, Vol. 10, pp. 9–14, 2015.
- [19] T. V. Šibalija, S.P. Živkovic, N.A. Fountas, V.D. Majstorovic, J.Z. Macuzic, N.M. Vaxevandis: Virtual optimization of CAI process parameters for the sculptured surface inspection, Procedia CIRP, Vol. 57, pp. 574–579, 2016.
- [20] V. Majstorovic, S. Stojadinovic, S. Živkovic, D. Djurdjanovic, Z. Jakovljevic, N. Gligorijevic: Cyber-Physical Manufacturing Metrology Model (CPM<sup>3</sup>) for Sculptured Surfaces – Turbine Blade Application, Procedia CIRP, Vol. 63, pp. 658–663, 2017.
- [21] V. Majstorovic, S. Stojadinovic, Z. Jakovljevic, S. Živkovic, D. Djurdjanovic, J. Kostic, N. Gligorijevic: Cyber-Physical Manufacturing Metrology Model (CPM<sup>3</sup>) – Big Data Analytics Issue, 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems, Procedia CIRP, Vol. 72, pp. 503–508, 2018.
- [22] B. Vogel-Heuser, G. Kegel, K. Bender, K. Wucherer: Global Information Architecture for Industrial Automation, Automatisierungstechnik, Vol. 57, pp. 108–115, 2009.



Society of Production  
Engineering

**SPMS 2018**  
37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije  
**ICPE-S 2018**  
37<sup>th</sup> International Conference on Production  
Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

Uvodni rad/Plenary presentation

**HOLON RAZVOJA PROIZVODA MAŠINSTVA SRBIJE:  
PORUKE ZA BUDUĆNOST IZ ISTORIJE**

**Goran D. PUTNIK**

Department of Production and Systems Engineering, School of Engineering, University of Minho  
Campus of Azuram  
4804-533 Guimaraes  
PORTUGAL  
E-mail: [putnikgd@dps.uminho.pt](mailto:putnikgd@dps.uminho.pt)

**Apstrakt:** U prvom delu rada se predstavlja koncept holona. Štaje holon, u svetu teorije upravljanja kompleksnošću u organizacijama, i šta bi bila primena koncepta holona za problem razvoja proizvodnog mašinstva u Srbiji.

U drugom delu rada se predstavlja jedna kraći i kvalitativni pregled istorije proizvodnog mašinstva u Srbiji, posebno period razvoja 70-80-tih godina 20. veka, koji bi mogao da se nazove „zlatnim periodom“ proizvodnog mašinstva u Srbiji. Koji je obeležen radom Prof. V. Milačića, na Katedri za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta u Beogradu.

U trećem delu rada se predstavlja mogući „okvir“ za razvoj proizvodnog mašinstva Srbije u sledećim godinama.

**Ključne reči:** Proizvodno mašinstvo, Holon, Razvojni „okvir“, Upravljanje kompleksnošću, Istorija, Milačić V.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

Uvodni rad/Plenary presentation

## RENESANSA INDUSTRIJE U GLOBALIZOVANOM EKONOMSKOM KONTEKSTU - Značaj, uloga i misija zajednica proizvodnog inženjerstva u Evropi i Srbiji

Prof. dr Petar B. PETROVIĆ

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Katedra za proizvodno mašinstvo  
Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija

**Apstrakt:** Globalna ekonomска kriza koja se nenadano desila 2008. godine, najveća posle takozvane velike depresije koja je posle deset godina ekonomске agonije završila Drugim svetskim ratom, duboko je potresla fundamente globalne ekonomije i jasno pokazala da je utopijski koncept razvoja baziranog dominantno na uslugama u suštini pogrešan. Političkoj i ekonomskoj eliti je preko noći postalo jasno da se naša civilizacija i dalje dominantno zasniva na industrijskoj ekonomiji i proizvodnji materijalnih dobara kao ključnom preduslovu za održiv ekonomski rast, a da je koncept postindustrijskog društva nešto što tek treba da se desi. Ponovo je otkrivena industrija, fabrika kao njen ključni konstrukt, i proizvodne tehnologije bez kojih ni fabrika, a ni industrija nisu moguće. Međutim, otkrivene su i neke druge istine, koje su proces industrijalizacije, planski deindustrializovanih ekonomija Zapada, učinile mnogo težim nego što se to na prvi pogled činilo. Pre svega, pokazalo se da Fridmanova teza: 'The World is Flat', odnosno teza o potpuno globalizovanom svetu kojim dominira ultroliberalni koncept ekonomije, jednostavno nije tačna. Mnogo bliži realnosti je Gemavatov koncept sveta 'World 3.0', odnosno koncept delimično globalizovanog sveta, u kojem države i dalje ostvaruju dovoljno jak regulatorni uticaj na ekonomski procese, a dubina globalnih integracija je bitno manja od one koja se prepostavljala da jeste; Dalje, postepeni nestanak paradigme masovne proizvodnje i njena transformacija u prividni ekonomski oksimoron masovne kustomizacije; Zatim imperativ uspostavljanja novog ekonomskog režima vodjenog klimatskim promenama (regulacija emisije CO<sub>2</sub>) i sasvim izvesnim krajem raspoloživih depozita fosilnih izvora energije; Pa dalje kompleks velikih društvenih izazova, odnosno megatrendova, medju kojima su posebno kritični masovna urbanizacija i starenje populacije; I tako redom. Amerika je reagovala nacionalnim programom In-Shoring procesa, odnosno inverzije deindustrijalizacije za koji su izgradjeni vrlo opsežni nacionalni programi sa opštim okvirom ManufacturingUSA, medju kojima je svakako uspostavljanje mreže nacionalnih instituta za istraživanja u domenu proizvodnih tehnologija i lansiranja programa kibernetosko-fizičkih sistema, krajem prve decenije dvadeset prvog veka. Kina je lansirala svoju nacionalnu strategiju Made in China 2025, sa ciljem da se kineska ekonomija do 2049 godine (stogodišnjica

*formiranja moderne kineske države), transformiše iz vodeće svetske ekonomije u globalnu ekonomsku super silu, fokusirajući se na intenzivan tehnološki razvoj (robotika, veštačka inteligencija, kibernetički proizvodni sistemi, ...). Evropa je lansirala program European Industrial Renaissance, kao ključni politički okvir ekonomskih reformi i za to izgradila čitav niz politika, od koje su ključne industrijska politika sa svoja 4 stuba (tehnologije, tržiste, finansije i ljudski kapital) i istraživačko-razvojna-inovaciona politika, koja je kroz FP7 okvir lansirala program European Technology Platforms (posebno značajna individualna tehnološka platforma ManuFuture), a kroz FP8 / H2020 okvir uspostavljen je tematski prioritet H2020 Industrial Leadership sa budžetom od 20 MLRD EUR i programom Factories of the Future, formiranjem euRobotics aisbl asocijacije kroz okvir privatnog i javnog partnerstva, i posebno značajno, formiranje European Institute of Innovation and Technology (nezavisno telo Evropske Unije), sa svojim kompleksom programa Knowledge and Innovation Communities (KIC), fokusiranih na neki od tehnoloških/društvenih prioriteta kroz okvir izgradnje panevropskih istraživačkih struktura, dugoročnog (višedecenijskog karaktera) i operativnih u okviru takozvanog trougla razvoja: Istraživanje-Edukacija-Biznis/preduzetništvo/industrija. Za industrijalizaciju Evrope od posebnog značaja je EIT KIC Manufacturing, koji je kao kompetitivni poziv lansiran početkom 2018. godine, sa ciljem formiranje panevropske inovacione zajednice za domen proizvodnih tehnologija. Uzimajući prethodno definisan kontekst Srbija, kao i druge nacionalne ekonomije Evrope, mora da pronadje sebi prilagodjena reformska rešenja koja će pokrenuti njen ekonomski sistem i usmeriti ga ka industriji, posebno preradjivačkoj industriji i transformativnim procesima vodjenih masovnom digitalizacijom (Digital Manufacturing Innovation). Zajednica proizvodnog mašinstva Srbije, formirana pre pola veka, pojavljuje se danas kao sasvim moderan razvojni instrument, u svemu uporediv sa onim što Evropa želi da postigne formiranjem panevropske dugoročne inovacione infrastrukture EIT KIC Manufacturing. U ovom uvodnom predavanju se pored opštih aspekata koji su jednim delom navedeni u prethodnom delu teksta, detaljno razmatraju značaj, uloga i misija organizovanih nacionalnih i transnacionalnih inovacionih struktura dobijenih umrežavanjem istraživačkih i obrazovnih institucija koje su spregnute sa sferom biznisa i industrije/fabrika, odnosno zajednica specijalizovanih za domen proizvodnog inženjerstva i inovaciju industrijskih tehnologija. U ovom kontekstu razmatra se potencijalna uloga Zajednice proizvodnog mašinstva Srbije i transformacionih procesa koje je neophodno sprovesti (uključujući regionalni i evropski okvir saradnje i umrežavanja) kako bi se učinila realno dostižnom njena efektivna društvena uloga ključnog faktora u sprovodenju programa revitalizacije i razvojne ekspanzije industrije Srbije - četvrti talas industrijalizacije i sveopšte modernizacije srpskog društva u prvoj polovini dvadeset prvog veka.*

# **RADOVI PAPERS**





Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

### 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## UTICAJ HABANJA NA RADNI VEK ALATA ZA DUBOKO IZVLAČENJE SA STANJENJEM ZIDA

Dragan ADAMOVIC<sup>1</sup>, Fatima ŽIVIĆ<sup>1</sup>, Jelena ŽIVKOVIĆ<sup>1</sup>, Miroslav ŽIVKOVIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac, Srbija, [adam@kg.ac.rs](mailto:adam@kg.ac.rs),  
[zivic@kg.ac.rs](mailto:zivic@kg.ac.rs), [jelena.zivkovic@kg.ac.rs](mailto:jelena.zivkovic@kg.ac.rs), [zile@kg.ac.rs](mailto:zile@kg.ac.rs),

**Apstrakt:** Uticaj triboloških uslova pri dubokom izvlačenju sa stanjenjem debljine zida ima bitan uticaj, kako na geometrijske, kinematske i dinamičke uslove izvodjenja procesa, tako i na vek alata i predstavlja je predmet izučavanja niza istraživača proteklih godina, kako u realnim procesima tako i na tribo-modelima. Proces habanja alata, koje se uglavnom odražava (u slučaju abrazivnog habanja) na promenu dimenzija i oblika, dovodi do pogoršanja kvaliteta proizvoda što dovodi do dobijanja proizvoda sa većim dimenzijskim odstupanjem i sa lošijim kvalitetom površine.

Eksperimentalna istraživanja, na originalnom tribu-modelu, izvedena u ovom radu imala su za cilj da ukažu na promene koje nastaju na ispitivanim uzorcima od čelika i legure aluminijuma prilikom izvlačenja, sa različitim materijalima alata (alatni čelik, tvrdi metal) i različitim površinskim stanjem alata (prevlaka Cr, prevlaka TiN).

**Ključne reči:** duboko izvlačenje sa stanjenjem debljine zida, zaribavanje, trenje habanje, alatni čelik, tvrdi metal, sluminijum

### 1. UVOD

Velika intenzivnost habanja alata za obradu metala deformisanjem (OMD) čini da se problemu veka alata posvećuje sve veća pažnja. Ustanovljeno je da trenje ima važan uticaj, kako na geometrijske, kinematske i dinamičke uslove izvodjenja obrade deformisanjem, tako i na vek alata. Zajedno sa napredovanjem procesa habanja alata, koje se uglavnom odražava na promenu dimenzija i oblika, pogoršava se kvalitet proizvoda, dobijaju se proizvodi sa većim dimenzijskim odstupanjem, sa lošijim kvalitetom površine i čak proizvodi

sa vidljivim greškama u obliku zareza i zadebljanja. Vek alata takođe utiče na pouzdan rad mašina ili obradnih sistema. Česte promene alata dovode do neizbežnog zastoja mašina što takođe utiče na smanjenje produktivnosti, a samim tim i na cenu proizvodnje. Proces habanja alata je veoma složen, a razaranje alata može biti izazvano od strane više uzroka koji deluju povezano. Na proces habanja alata utiču, ne samo pojave trenja i sa tim u vezi abrazivnog habanja, već takođe i drugi procesi kao što su: zamor (termički i mehanički), korozija i oksidacija. Zbog toga će habanje alata za OMD biti

rezultat superpozicije svih fizičkih procesa koji deluju na alat, pa će to biti intenzivnije nego što bi proizilazilo iz samog toka procesa trenja.

## 2. HABANJE ALATA ZA OMD I METODI POVEĆANJA NJIHOVOG VEKA TRAJANJA I POUZDANOSTI

Da bi se efikasno suprostavili procesima razaranja koji određuju vek alata treba poznavati mehanizam i specifičnosti osnovnih procesa habanja. Ti se procesi razlikuju u slučaju različitih alata.

Alati za OMD na hladno trpe glavno mehaničko opterećenje, kao i opterećenje usled trenja i habanja. Karakter mehaničkih opterećenja (statička, dinamička) zavisi pre svega od upotrebljene mašine. Bitna odlika mehaničkih opterećenja je što su ona uglavnom ciklična; zato se u slučaju ove grupe alata može govoriti o mehaničkom zamoru. Ipak, kao bitan proces koji određuje vek alata za OMD uzima se abrazivno habanje. Porast temperature spoljnog sloja alata u osnovi je neznatan i nema značajnijeg uticaja na promenu mehaničkih osobina materijala. Zbog toga procesi termičkog zamora ovde mogu biti zanemareni.

Najčešći slučajevi habanja alata mogu se podeliti na: razaranje matrice i izvlakača, abrazivno habanje i plastično deformisanje određenih zona alata.

Razaranje matrice i izvlakača odvija se po pravilu po celom preseku, a uzroci mogu biti: nepravilna termička obrada (suvise visoki zaostali termički naponi), neodgovarajuća izrada alata (koncentratori napona) i neodgovarajuća eksploracija alata, a naročito loše postavljanje alata na telu mašine, preopterećenje alata itd.

Kod alata koji su namenjeni za OMD na hladno dominiraju uglavnom sledeće vrste habanja: adheziono, abrazivno i zamorno (krunjenje).

Adheziono habanje nastaje uglavnom kao rezultat velikog približavanja kontaktnih površina, znatnog porasta površine stvarnog kontakta (konačna vrednost površine kontakta može da bude 2 do 5 puta veća nego početna

površina) [1], kao i zbog uvođenja u kontakt sa alatom novih još ne oksidisanih slojeva materijala. To izaziva "hladno zavarivanje" što dovodi do pojave nalepina deformisanog metala na alat. Broj tih nalepina dalje raste i ubrzava se pri više puta ponovljenom procesu. Velika jačina nastalih adhezionih spojeva, uglavnom difuznog karaktera, utiče na mehanizam njihovog razaranja. Tragovi dubokog čupanja, zapaženi na površini alata, svedoče o tome da se razaranje spoja odigrava u gornjim slojevima alata, a ne na prvobitnoj površini kontakta [1]. Sa procesom pojave razaranja kontaktnih spojeva povezan je i znatan porast hraptivosti alata, što se prenosi u negativnom smislu na kvalitet površine proizvoda, jer na alatu nastala "ispupčenja" dovode do pojave ruseva na proizvodu.

Pored adhezionog habanja, kod alata za OMD, može se takođe pojaviti i abrazivno habanje. Ono je izazvano dejstvom nečistoća na limu, kao i delimičnim krunjenjem "ispupčenja". Intenzitet abrazivnog habanja u ovom slučaju nije ipak previše veliki, a taj proces zahvata samo odredjenu oblast alata.

Delovanje mikro okrunjenih delova na radnu površinu alata dovodi do zamornog habanja. Impulsni karakter opterećenja mikro kontaktnih zona, a takođe i spolnjih slojeva alata i potiskivanje slojeva maziva, dovode do pojave zamornog habanja, koje se pri trenju klizanjem ispoljava krunjenjem.

Intenzivno habanje alata u procesima obrade izvlačenja sa stanjenjem deblijine, proizlazi otuda što je cela radna površina alata u neprekidnom kontaktu sa materijalom koji se obradjuje. Iz tog razloga, intenzitet habanja je veći nego kod drugih alata. Slučajevi habanja kod ove vrste alata mogu se podeliti na sledeće vrste: adheziono habanje koje se ispoljava pojmom nalepina ("ispupčenja"), mikro i makro prsline, krunjenje i pojave gubitka materijala u obliku prstena što je efekat abrazivnog habanja.

Najuticajnija vrsta habanja za ovu vrstu alata je pojавa takozvanog prstenastog oštećenja na radnoj (koničnoj) površini za sabijanje što eliminiše uslove za normalno deformisanje i izaziva pojavu dodatnog otpora trenja i znatan

porast sile izvlačenja. Nastalo oštećenje može imati simetričan oblik ili pak nesimetričan pri nesaosnom vodjenju predmeta obrade ili pri prekomerno pohabanom alatu.

Ovakav mehanizam habanja alata proističe iz kinetike tečenja materijala i raspodele pritisaka u konusu za sabijanje. U ulaznoj zoni konusa materijal koji se sabija dostiže najveće deformisanje pa zato tu nastaju najveći jedinični pritisci. Osim toga sve nečistoće, oksidi itd. se zadržavaju na radnim ivicama na ulazu u konusni deo alata, pa te nečistoće mogu delovati kao abrazivi koji izazivaju abrazivno habanje, koje se odlikuje velikim intenzitetom i u središnjem delu konusa nastaje kontakt delimično deformisanog materijala oslobođenog oksida i materijala alata. U vezi s tim tu dominira proces adhezionog habanja.

Pored adhezionog habanja često se pojavljuju i oštećenja oblika naprslina i krunjenja. To se posebno odnosi na alate izradjene od sinterovanih karbida. Ova vrsta habanja uglavnom nastaje u donjem delu alata, tj. pri izlasku iz kalibracionog otvora, naročito pri neodgovarajućem profilu alata.

Od tehničkog stanja alata, a naročito od kvaliteta njegove radne površine zavise: kvalitet površine i mehaničke osobine finalnog proizvoda, produktivnost procesa i ekonomičnost proizvodnje.

Trajinost alata za OMD zavisi od veoma mnogo činilaca koji se uglavnom mogu podeliti na tri osnovne grupe: konstrukcione, proizvodne i eksploracione.

Ako se isključe konstrukcione i proizvodne greške koje se po pravilu mogu eliminisati, povećanje veka alata za OMD može se ostvariti:

- zamenom do sada korišćenih alatnih čelika, sa materijalima boljih svojstava otpornosti ali istovremeno i znatno skupljih,
- primenom pravilno odabranih metoda površinske obrade koje omogućavaju postizanje traženih osobina površinskih slojeva, a naročito veće otpornosti na habanje,
- primenom odgovarajućih tehnoloških maziva.

Deficit legirajućih elemenata, a naročito njihova visoka cena, čine da se visokolegirani alatni čelici primenjuju jedino u posebnim slučajevima i to za jako opterećene elemente alata. Stoga se efektno i efikasno povećanje trajnosti alata može ostvariti površinskom obradom. Ovakvim rešenjem problema male trajnosti produktivnih alata, procesi trenja i habanja, kao i zamaranja, oksidacije i korozije uglavnom se lokalizuju na površinske slojeve, pa se samo od njih traži veća otpornost na habanje, termički zamor, oksidaciju, koroziju itd., bez potrebe da te osobine ima ceo alat.

Treba ipak voditi računa o tome da površinski slojevi alata, dobijeni u procesu izrade, podležu stalnoj promeni u toku eksploracije, pri čemu te promene mogu proisteći iz kumulativnih procesa habanja ili poticati od skokovitih pojednačnih promena (npr. nagle promene temperature, preopterećenja alata i dr.). Stoga, pri razmatranju uloge površinskih slojeva i njihovog uticaja na trajnost alata treba imati u vidu dva aspekta:

1. prvobitno stanje površinskih slojeva, dobijeno pogodno izabranim postupkom obrade,
2. sekundarne promene koje nastaju u površinskim slojevima kao rezultat eksploracije, a izazivaju pad korisnih osobina alata.

Završno stanje alata, a naročito one njegove osobine koje su interesantne za korisnika, kao trajnost i pouzdanost, biće rezultat odredjene vrste superpozicije prvobitnih osobina površinskih slojeva i posledica habanja (zamora, korozije, oksidacije itd.) neizbežnih u toku eksploracije.

Da bi se stoga postigao traženi vek alata potrebno je, u zavisnosti od vrste prenošenja spoljašnjih opterećenja (mehanički, termički), kao i delovanja sredine (korozioni i oksidacioni procesi), odabrati optimalnu površinsku obradu.

Na alate za OMD, vrlo često, deluje više vrsta opterećenja zajedno, što u znatnom stepenu otežava izbor obrade površine. Procesi površinske obrade koji povećavaju otpornost prema habanju (npr. tvrde prevlake dobijene kao rezultat nitriranja, plazmene prevlake itd.)

nisu se pokazale efikasnim pri ciklično promenljivom opterećenju. Iz tog razloga treba, u svakom slučaju, identifikovati vodeće procese koji određuju trajnost grupe alata i na osnovu toga odabrati odgovarajuću površinsku obradu. Da bi se taj izbor olakšao, potrebno je poznavati osnovne karakteristike spoljnijih slojeva posle površinske obrade, a naročito: otpornost na habanje (u širokom opsegu parametara trenja), mehanički i termički zamor, sklonost ka oksidaciji, koroziji itd.

U traženju optimalnih osobina površinskih slojeva, danas je na raspolaganju više načina obrade koji omogućavaju postizanje korisnih osobina kontaktnih parova. Pored mehaničke obrade, gde se popravljanje triboloških osobina postiže uglavnom kao rezultat porasta tvrdoće spoljnijih slojeva (npr. postupcima gnječenja), u ostalim slučajevima jedan od bitnih ciljeva površinske obrade jeste promena hemijskog sastava (npr. putem obogaćivanja takvim sastojcima kao što su: karbidi Cr, karbidi B, nitridi Al, Cr, Mo, V itd.) usled čega se postiže znatno povećanje otpornosti na abrazivno habanje. Kao rezultat mnogih ispitivanja utvrđeno je da su najotpornije na abrazivno habanje fino-dispergovane tvrde faze (npr. karbidi, nitridi itd.) [1].

Legirajući elementi u čeliku: V, W, Mo, Cr znatno povećavaju otpornost čelika na abrazivno habanje jer obrazuju stabilne karbide, ako čelik ima dovoljno veliki sadržaj C i ako se pravilno odaberu parametri termičke obrade. Ipak, osnovni uslov postizanja dobre otpornosti na abrazivno habanje je taj da karbidi budu pravilno rasporedjeni u dovoljno otpornoj i istovremeno plastičnoj osnovi.

Jedna od pogodnijih metoda obrade površina, koja znatno povećava otpornost na abraziju, jeste metoda sulfatizacije (sulfonitriranje, ciano-sulfatiranje). Dobre osobine klizanja postižu se u tom slučaju obogaćivanjem spoljnijih slojeva sastojcima heksagonalne rešetke, koji obezbeđuju lako klizanje po bazičnim ravnima.

Posebnu grupu modifikacije površinskih slojeva predstavlja galvanska obrada. Tu se mogu navesti takvi postupci kao što su: tvrdo hromiranje, fosfatiranje itd.

Prevlaka dobijena tvrdim hromiranjem odlikuje se velikom tvrdoćom (1000-1200HV), kao i karakterističnom mrežom koja predstavlja prirodne kanale za podmazivanje. Kao rezultat ovakve obrade površinskih slojeva postiže se znatan porast otpornosti na habanje [2].

Nešto drugčije osobine imaju fosfatne prevlake, kod koji se stvara kristalna prevlaka sastavljena od fosfata Zn, Mn ili Fe. Osnovna karakteristika svih fosfatnih prevlaka jeste njihova velika poroznost i dobro upijanje maziva. Zahvaljujući svojoj poroznoj strukturi fosfatna prevlaka ima veoma dobru sposobnost ka absorpciji masti, ulja, sapuna itd. što joj obezbeđuje dobre klizne osobine [3]. S obzirom na te osobine, ona se koristi kao posebna podmazujuća prevlaka u procesima OMD, pri čemu se fosfatni slojevi nanose na materijal koji se plastično deformatiše.

U cilju postizanja dobrih triboloških osobina, kako na sobnim tako i na povišenim temperaturama, razradjene su plazmene tehnologije nanošenja prevlaka od teško topljivih metala kao što su: Cr, W, Co, Ti ili pak njihovih jedinjenja TiN, TiC itd. [4].

U grupi metoda obrade površina, koje zaslužuju pažnju, spadaju takodje elektropoliranje i hemijsko poliranje. Kao rezultat poliranja otklanjaju se defektni površinski slojevi nastali pri prethodnoj obradi (npr. obradi rezanjem) i dobijaju se novi površinski slojevi znatno manje hrapavosti i nižih, ili veoma niskih nivoa sopstvenih napona. Površinski slojevi dobijeni kao rezultat ovih procesa karakterišu se znatno manjim koeficijentom trenja, povećanom otpornošću na abrazivno habanje kao i na koroziju.

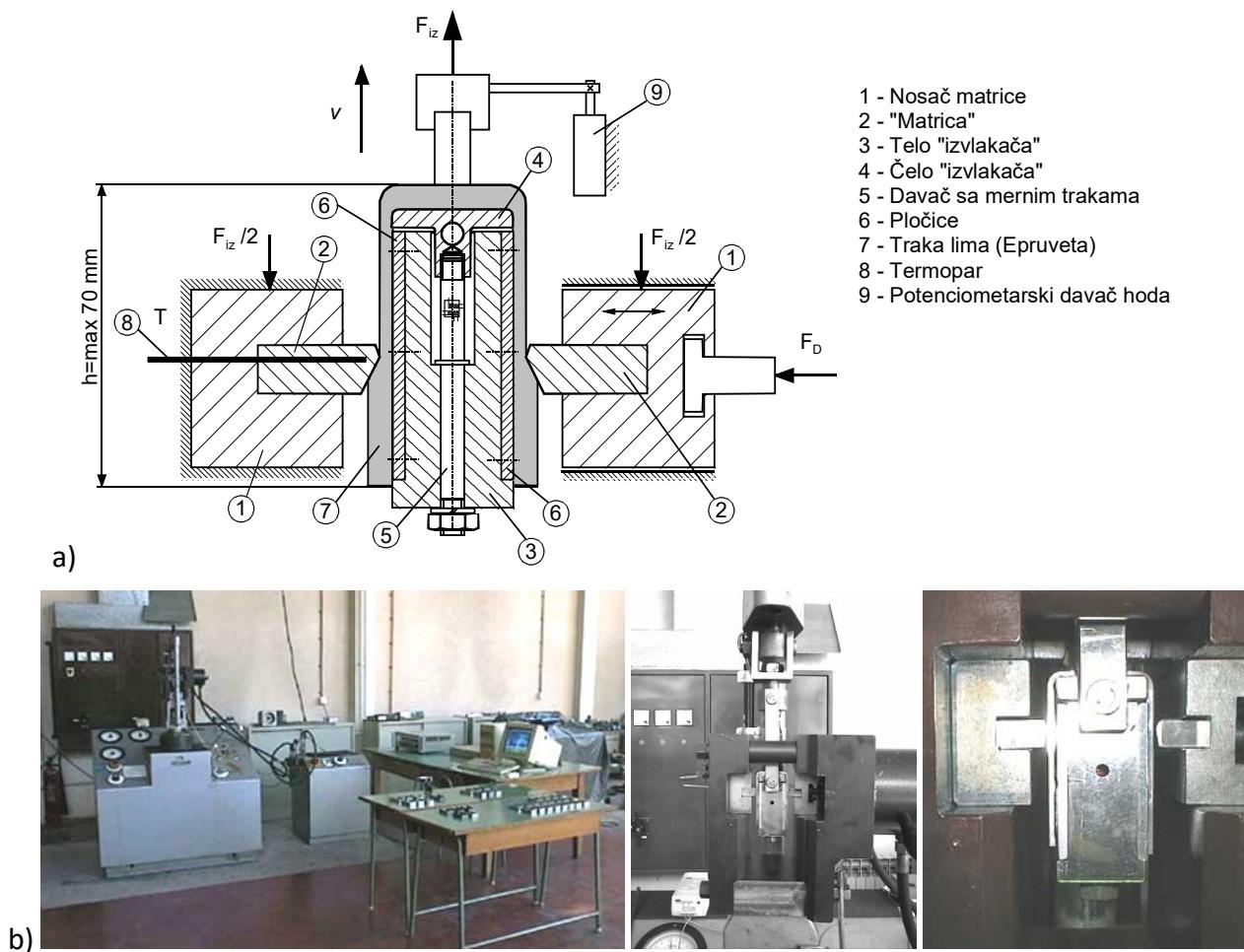
### 3. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

Eksperimentalna istivanja u ovom radu su izvedena na originalnom tribo-modelu dubokog izvlačenja sa stanjenjem debljine zida, koji dvostrano simetrično oponaša zonu kontakta sa matricom i izvlakačem [5]. 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 1a, a izgled uređaja na slici 1b.

Savijena traka od lima 7, u obliku slova U, (epruveta) postavlja se na "izvlakač". Na nju se deluje pomoću "matrica" 2 silom  $F_D$ . Matrice su postavljene u nosače, pri čemu je levi nosač nepokretan a desni pokretan zajedno sa matricom. Izvlakač se sastoji iz tela 3 i čela 4

koji su medjusobno spojeni pomoću davača sa mernim trakama 5. Epruveta se provlači (kliza) izmedju matrica, dejstvom sile  $F_{iz}$  na čelo izvlakača, pri čemu dolazi do stanjenja debljine zida epruvete. Tokom provlačenja spoljašnja površina epruvete kliza po, nagnutoj za ugao  $\alpha$ , površini matrice, a unutrašnja površina epruvete kliza preko pločica 6 pričvršćenih na telo izvlakača.



Slika 1. Shema i izgled modela korišćenog u ovom radu

Uredaj je napravljen sa mogućnošću lage izmene kontaktnih - pritisnih elemenata (matrice 2 i pločice 6), lakim čišćenjem kontaktnih zona i pogodnim postavljanjem epruveta.

Pločice 6 i matrice 2 mogu da budu napravljene od različitih materijala kao i sa različitom hrapavošću, a matrice i sa različitim uglom nagiba  $\alpha$ .

Na pomenutom uređaju moguće je simulirati i uzastpno (višefazno) izvlačenje pri

čemu se jedna te ista epruveta više puta provlači izmedju kontaktnih parova.

Za eksperimentalna ispitivanja u ovom radu izabrana su dva materijala: čelični materijal, u obliku lima, oznake Č0148P3 (oznaka prema EN: DC04) i materijal od Al-legure, u obliku lima, oznake AlMg3(.43)<sup>1</sup> (Stara oznaka: AlMg3-24; oznaka prema DIN-u: AlMg3 F24, oznaka prema EN AW-5754: AlMg3). Oba materijala predstavljaju veoma aktuelne materijale u savremenoj industriji. Mehaničke

<sup>1</sup> - U daljem tekstu korišćena je skraćena oznaka AlMg3

karakteristike čeličnog materijala određene za uzorke isečene u pravcu valjanja lima su:

$R_p=186.2 \text{ MPa}$ ,  $R_m=283.4 \text{ MPa}$ ,  $A=37.3 \%$ ,  $n=0.2186$ ,  $r=1.31915$ ,  $E=1.957 \times 10^5 \text{ MPa}$ , a mehaničke karakteristike materijala od Al legure, određene za uzorke isečene u pravcu valjanja lima su:  $R_p=201.1 \text{ MPa}$ ,  $R_m=251 \text{ MPa}$ ,  $A=12\%$ ,  $n=0.13545$ ,  $r=0.40510$ ,  $E=0.7 \times 10^5 \text{ MPa}$ .

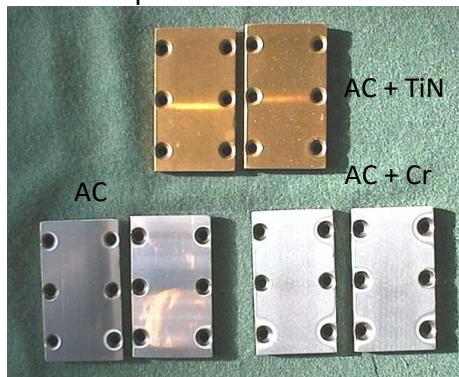
Kontaktni parovi ("matrica" i "izvlakač") napravljeni su od legiranog alatnog čelika (AC) sa velikom žilavošću i tvrdoćom, oznake Č4750 (DIN17006: X165CrMoV12). Ovaj čelik je otporan na habanje i predviđen je za rad na hladno. Pre mehaničke obrade brušenjem izvršeno je kaljenje u ulju i popuštanje.

Na jednom setu alata od termički obrađenog legiranog čelika Č4750 je nanešena tvrda prevlaka TiN.

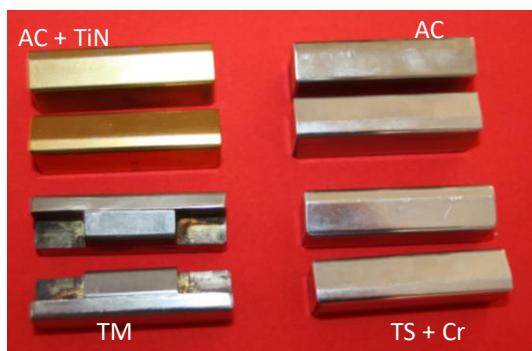
U cilju uporednih ispitivanja jedan komplet alata je tvrdo hromiran (Cr). Treba reći da je podloga (osnova) alata bio termički obrađen legirani alatni čelik Č4750.

Jedan komplet "matrica" napravljen je od tvrdog metala (TM) oznake WG30 (DIN 4990: G30). Tvrdi materijal ( $\alpha$ -faza) je volfram karbid (WC), a vezivni materijal je kobalt ( $\beta$ -faza).

Izgled "izvlakača" i "matrica" dat je na slikama 2 i 3 respektivno.



Slika 2. Fotografije pločica koje simuliraju površinu izvlakača



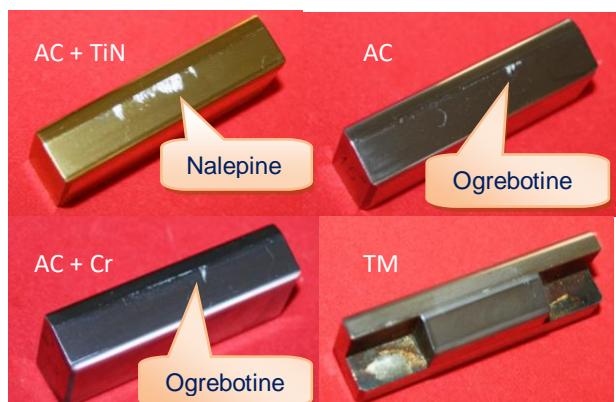
Slika 3. Fotografije „matrica“

#### 4. REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA

Pod uticajem većih normalnih pritisaka dolazi do približenja površina i obrazovanja adhezionih spojeva kao i znatnog porasta površine stvarnog kontakta. Rezultat takvog uzajamnog delovanja je izrazito nalepljivanje jednog metala na drugi, pri čemu se po pravilu nisko topljivi metal nalepljuje na metal više temperature topljenja.

Veliko nalepljivanje dovodi do toga da je otpornost nastalih adhezionih spojeva po pravilu veća nego otpornost bar jednog metala kontaktnog para. Razaranje spoja nastaje uglavnom u spoljnijim slojevima metala manje jačine a ne po prvobitnoj površini kontakta.

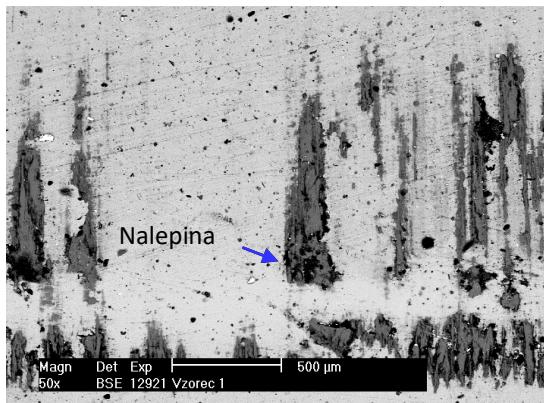
Izgled površine matrice sa nalepinama (AC+TiN), izgrebotinama (AC i AC+Cr) i bez oštećenja (TM) data je na slici 4.



Slika 4. Izgled površine matrice sa nalepinama (AC+TiN), izgrebotinama (AC i AC+Cr) i bez oštećenja (TM)

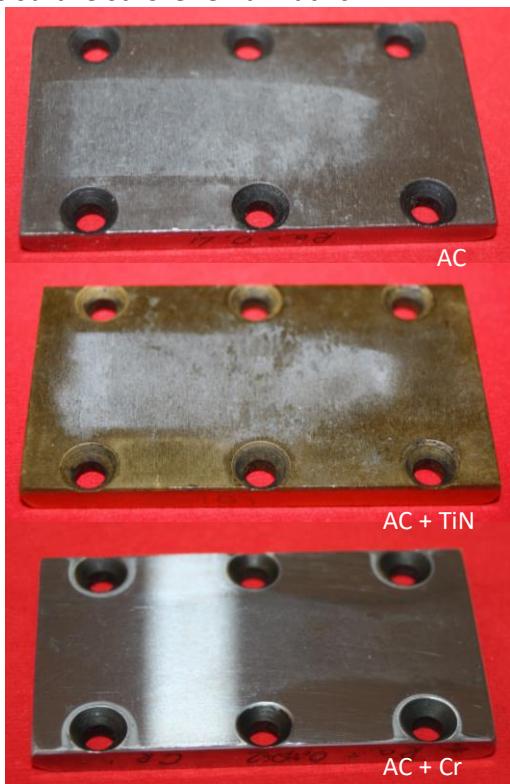
Pri izvlačenju lima od Al legura mazivo ima vrlo važnu ulogu; da razdvoji površinu lima od alata i da spreči stvaranje nalepina na alatu, s obzirom na veliku sklonost aluminijuma ka nalepljivanju. Ukoliko se ne koristi adekvatno mazivo dolaziće do intenzivnog nalepljivanja aluminijuma na alat. Stvorene nalepne na matrici dovode do grubog oštećenja površine lima (*galling*).

Mikroskopski izgled nalepina aluminijuma na matricu od alatnog čelika sa TiN prevlakom data je na slici 5.



**Slika 5.** Izgled nalepina aluminijuma na matricu od alatnog čelika sa TiN prevlakom

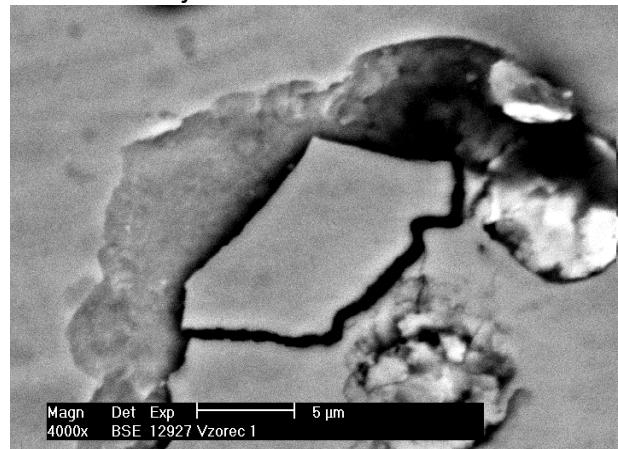
Upotrebom izvlakača sa većom hrapavošću i kada je izvlačenje izvodjeno bez podmazivanja na strani izvlakača, zapaženo je intenzivno nalepljivanje aluminijuma na površinu izvlakača. Pri upotrebi maziva nalepne su bile značajno manje ili se nisu pojavljivale. Izgled nalepina aluminijuma (svetla polja) na izvlakaču dat je na slici 6. Treba napomenuti da su se nastale nalepne na izvlakaču znatno lakše uklanjale od onih koje su bile stvorene na matrici.



**Slika 6.** Izgled površine izvlakača sa nalepinama

Usled visokih kontaktnih pritisaka i neprekidnog nastajanja i odvajanja nalepina dolazilo je do oštećenja (ljudspanja) prevlake

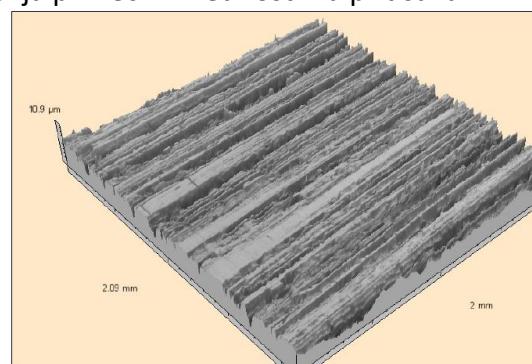
TiN. Izgled oštećenja prevlake TiN na površini matrice data je na slici 6.



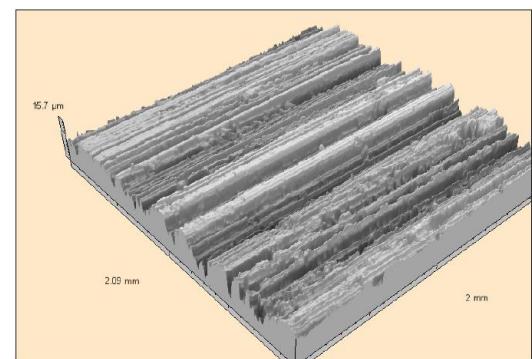
**Slika 6.** Izgled oštećenja prevlake TiN na površini matrice

Analiza promene topografije površine zbog dejstva trenja izvedena pri velikom povećanju može omogućiti veoma detaljno razaznavanje pojava koje nastaju u oblasti kontakta kao i ocenu mehanizma trenja

Ova analiza ima za cilj rasvetljavanje mehanizma deformisanja u mikro zonama kontakta i prenošenja materijala kao i načina njegovog uklanjanja sa kontaktnih površina, odnosno upoznavanje specifičnih mehanizama trenja pri većim vrednostima pritisaka.



**Slika 7.** Izgled topografije i 3D izbratzdane površine čeličnog lima

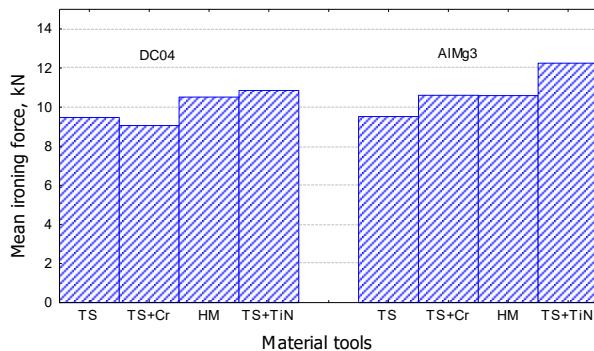


**Slika 8.** Izgled topografije i 3D izbratzdane površine lima od Al legure

Nalepljivanje na alatu pogoršava kvalitet površine i predstavlja jedan od glavnih problema u tehnologiji dubokog izvlačenja sa stanjenjem debljine zida, kako s obzirom na kvalitet proizvoda tako i s obzirom na habanje alata. Ova pojava se u literaturi naziva "galling".

Izgled topografije površine lima nastao usled brazdanja nalepina na alatu prikazan je na slikama 8 i 9.

Promena srednjih vrednosti sile izvlačenja za različite materijale alata data je na slici 10, kako za uzorce od DC04 tako i za uzorce od AlMg3. Treba napomenuti da je najveća vrednost srednje sile izvlačenja dobijena sa alatom na kome je nanešena prevlaka TiN. Razlog za to je najintenzivnije nastajanje nalepina na ovaj alat kao i zbog oštećenja prevlake koja su nastala usled nastajanja i krunjenja nalepina. Razlike u rezultatima dobijenim pri ispitivanju čeličnih i aluminijumskih uzoraka leže u njihovoj prirodi i interakciji u kontaktu pri visokim kontaktnim pritiscima.



**Slika 8.** Srednja vrednost srednje sile izvlačenja za različite materijala alata

## 5. ZAKLJUČAK

U cilju postizanja dobrih tribološkim osobina kontaktnih površina alata (matrice i izvlakača) za obradu ironing postupkom koriste se različite metode:

- Nanošenja prevlaka od teško topljivih metala kao što su: Cr, W, Co, Ti ili pak njihovih jedinjenja TiN, TiC itd.
- Mehaničkim otvrđnjavanjem površinskih slojeva (npr. postupcima gnječenja),

- Promenom hemijskog sastava površinskih slojeva (npr. putem obogaćivanja karbidima Cr i B, nitridima Al, Cr, Mo, V itd.)
- Izradom alata od visoko legiranih čelika (V, W, Mo, Cr znatno povećavaju otpornost čelika na habanje),
- Metodama hemijsko-termičke obrade površina (sulfo-nitriranje, ciano sulfatiranje),
- Modifikacijom površinskih slojeva galvanskom obradom (tvrdi hromiranje za površine alata, fosfatiranje za površine obradka itd),
- Obradom površina poliranjem (elektropoliranje i hemijsko poliranje).

Koja od prethodnih metoda ili kombinacija metoda će se koristiti zavisi i od materijala koji se obrađuje. Pri tome treba voditi računa i o postojanosti površinskog sloja i mogućem procesu nalepljivanja materijala obratka na površinu alata (kontakt raznorodnih metala).

Nalepljivanje na alatu pogoršava kvalitet površine i predstavlja jedan od glavnih problema u tehnologiji dubokog izvlačenja sa stanjenjem debljine zida, kako s obzirom na kvalitet proizvoda tako i s obzirom na habanje alata.

Pri izvlačenju i mazivo ima vrlo važnu ulogu. Ono služi da razdvoji površinu lima od alata i da spreči stvaranje nalepina na alatu.

## ZAHVALNOST

Deo ovog istraživanja podržava Ministarstvo prosvete i nauke Republike Srbije, Projekti TR32036 i TR33015.

## REFERENCES

- [1] Gierzynska M.: *Tarcie zużycie i smarowanie w obróbce plastycznej metali*, WNT, Warszawa, 1983
- [2] METALS HANDBOOK – Heat Treating, Cleaning and Finishing, Vol.2, ASM, Metals Park, Ohio, 1964.
- [3] Bay N.: The State of the Art in Cold Forging Lubrication, Journal of Materials Processing Technology, 46, 1994., 19-40

- [4] Dohda K.: *Tribological properties of thin hard coatings used in metal forming*, Proceedings of the Japan International Tribology Conference, Nagoya, 1990., 1973-1980
- [5] Adamović D.: *The behavior of materials in contact during the cold plastic forming processes with high working pressures*, PhD Thesis, Faculty of Mechanical Engineering in Kragujevac, Kragujevac, 2002. (in Serbian)

## INFLUENCE OF THE TOOL WEAR ON LIFETIME OF THE TOOLS FOR THE IRONING PROCESS

**Abstract:** *The influence of the tribological conditions in ironing has a significant influence, on the geometrical, kinematic and dynamic conditions which define conduction of the ironing process, as well as on the lifetime of used tools. In recent years a number of researchers studied this influence in both real processes and the tribo models. The process of tool wear, which is mainly reflected (in the case of abrasive wear) on the change in dimensions and shape, results in deterioration of the quality of the product. This deterioration leads to final products with greater dimensional deviation and a degraded quality of the surface.*

*Experimental research in the original tribo-model, implemented in this study was aimed to point out the changes occurring on the test samples of steel and aluminum alloys during the extraction, with a variety of materials of tools (tool steel, tungsten carbide) and a variety of surface states tool (Cr coating, TiN coating).*

**Keywords:** ironing, galling, friction, wear, tool steel, hard metals, aluminum,



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

### 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## MODEL KLIZANJA OBODA LIMA IZMEĐU RAVNIH KONTAKTNIH POVRŠINA U PROCESU DUBOKOG IZVLAČENJA PRI PROMENLJIVOM KONTAKTNOM PRITISKU

Srbislav ALEKSANDROVIĆ<sup>1</sup>, Milan ĐORĐEVIĆ<sup>2,\*</sup>, Vukić LAZIĆ<sup>1</sup>, Ružica R. NIKOLIĆ<sup>3</sup>, Dušan ARSIĆ<sup>1</sup>, Aleksandra PATARIĆ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac, Srbija, omdlab@kg.ac.rs, vlazic@kg.ac.rs, dusan.arsic@fink.rs

<sup>2</sup>Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Prištini, Kosovska Mitrovica, Srbija,  
milan.t.djordjevic@pr.ac.rs

<sup>3</sup>Istraživački centar Univerziteta u Žilini, Žilina, Slovačka, ruzicarnikolic@yahoo.com

<sup>4</sup>Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina ITNMS, Beograd, Srbija,  
a.pataric@itnms.ac.rs

\*Corresponding author: milan.t.djordjevic@pr.ac.rs

**Apstrakt:** Uticaj kontaktnog pritiska u postupcima dubokog izvlačenja je aktuelna istraživačka tema tehnologije oblikovanja limova. U ovom istraživanju razvijen je tribološki model baziran na procesu klizanja trake lima između ravnih kontaktih površina pri promenljivom pritisku za vreme procesa i realizovan je originalni eksperimentalni kompjuterizovani uređaj. Cilj je odrediti u kojoj meri je moguće uticati na trenje, a preko trenja i na proces oblikovanja. Izveden je složeni višefaktorni eksperiment, primenom lima od Al legure, kontaktih elemenata različitih hrapavosti, različitih maziva i promenljivog kontaktnog pritiska za vreme procesa. Pored opisa aparature, u radu je pokazan i način određivanja teorijskih zavisnosti pritiska. Na osnovu unapred zadatih, teorijskih promena pritiska za svaki od navedenih uslova dobijen je realni pritisak u kontaktu. Na osnovu toga je moguće odrediti uticaj triboloških faktora na stvarni pritisak. Dobijeni stvarni pritisak u kontaktu pokazuje pouzdanost eksperimentalne aparature, odnosno stepen prisutnih odstupanja teorijskih zavisnosti pritiska od stvarnih.

**Ključne reči:** test klizanja lima između ravnih kontaktih površina, duboko izvlačenje, promenljiv kontaktni pritisak, kompjuterizovana eksperimentalna aparatura

### 1. UVOD

Mogućnosti uticaja na proces dubokog izvlačenja za vreme njegovog trajanja su ograničene. Svode se na uticaje na obodu lima, uglavnom preko kontaktnog pritiska (sile držanja) i delovanjem zateznih rebara na

držaću. U većini dosadašnjih istraživanja iz ove oblasti zadavane su konstantne vrednosti sile držanja ili pritiska držaća u alatu za duboko izvlačenje. Kontinualno zadavanje promenljivog pritiska, preko unapred definisanih funkcija, za vreme procesa klizanja i razvoj odgovarajućeg fizičkog modela predstavlja predmet ovog

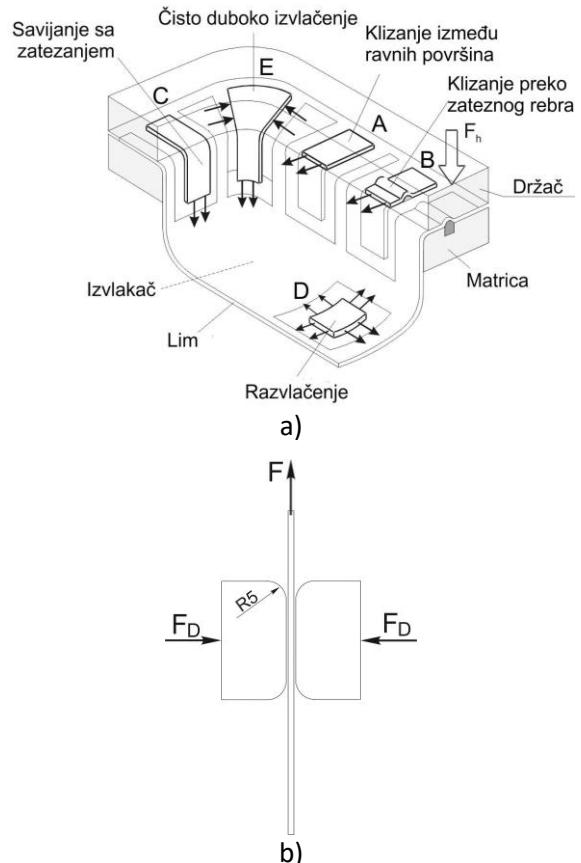
istraživanja sa ciljem da obuhvati uticaj promenljivog pritiska pored ostalih odgovarajućih uticaja (alat, kontaktni uslovi, materijal). Uticaj promenljivog kontaktnog pritiska u procesu dubokog izvlačenja predstavlja aktuelnu temu istraživanja u cilju otkrivanja novih mogućnosti za upravljanje ovim procesom. U tom cilju razvijaju se fizičko-tribološki modeli, od kojih je najzastupljeniji model klizanja trake lima između ravnih površina, o čemu svedoče brojni radovi iz ove oblasti [1, 2, 3, 4, 5]. U pomenutim radovima obrađena je problematika modeliranja procesa dubokog izvlačenja na obodu lima između ravnih kontaktnih površina držača i matrice. Tribološki modeli su formirani u potpuno realnom okruženju: materijal, alat, mašina, kontaktni uslovi, i dr. U većini istraživanja prati se promena koeficijenta trenja i deformacione (vučne) sile variranjem pomenutih realnih uslova u kojima se proces odvija. Primenjuju se alati različite hrapavosti ravnih površina. Kontaktni uslovi se, pored stanja kontaktnih površina alata, ostvaruju primenom više vrsta maziva za duboko izvlačenje i limovima sa raznim prevlakama (Al i čelični limovi). Pored toga, moguće je varirati brzinu klizanja lima [6, 7]. Cilj većine istraživanja je upravljanje izlaznim parametrima procesa dubokog izvlačenja uz težnju da se dobiju što niže vrednosti koeficijenata trenja i deformacionih sila, s jedne strane, i željena geometrija, bez defekata na obodu (nabori) [8, 9, 10].

## 2. TRIBOLOŠKI MODEL I EKSPERIMENTALNA APARATURA

### 2.1 Tribološki model klizanja između ravnih kontaktnih površina

Duboko izvlačenje delova složene geometrije prati mnoštvo relevantnih parametara. Zato je ovaj proces jedan od najsloženijih i najzahtevnijih u tehnologiji plastičnog oblikovanja. Za bolje razumevanje ovog procesa primenjuje se princip fizičkog modeliranja karakterističnih zona složenog dela (Sl.1a) koje se koristi kao osnova za potpuno tribološko modeliranje [11]. Klizanje

lima (provlačenje) između ravnih površina držača i matrice (model „A“, Sl.1a) odgovara zonama komada koji nisu izložene tangencijalnom sabijanju, već samo zatezanju u radikalnom pravcu. Sila zatezanja, kao posledica dejstva izvlakača, prenosi se preko zaobljenja ivice matrice na zone ispod držača (Sl.1b).



**Slika 1.** a) Šema fiz. modeliranja kod izvlačenja delova složene geometrije, b) Šema klizanja između ravnih kontaktnih površina

Vrednosti površinskih pritisaka pri klizanju su niže od napona na granici tečenja i odgovaraju vrednostima ispod držača. Lim klizi između pritisnutih površina, deformisanje je elastično, pošto udužni napon ne prelazi granicu tečenja. Promene na kontaktnim površinama (habanje, nalepljene čestice itd.) mogu da poremete stabilan tok procesa klizanja.

### 2.2 Eksperimentalna aparatura

Eksperimentalni uređaj, razvijen za potrebe ovog istraživanja, predstavlja simulator za realizaciju i izučavanje fizičkog modela bitnog

segmenta procesa dubokog izvlačenja u potpuno realnim uslovima. Strukturu uređaja u osnovi čine: laboratorijska presa trostrukog dejstva *ERICHSEN 142/12*, sklop hidraulično-mehaničkog modula, poseban hidraulični modul i elektro-elektronski modul.

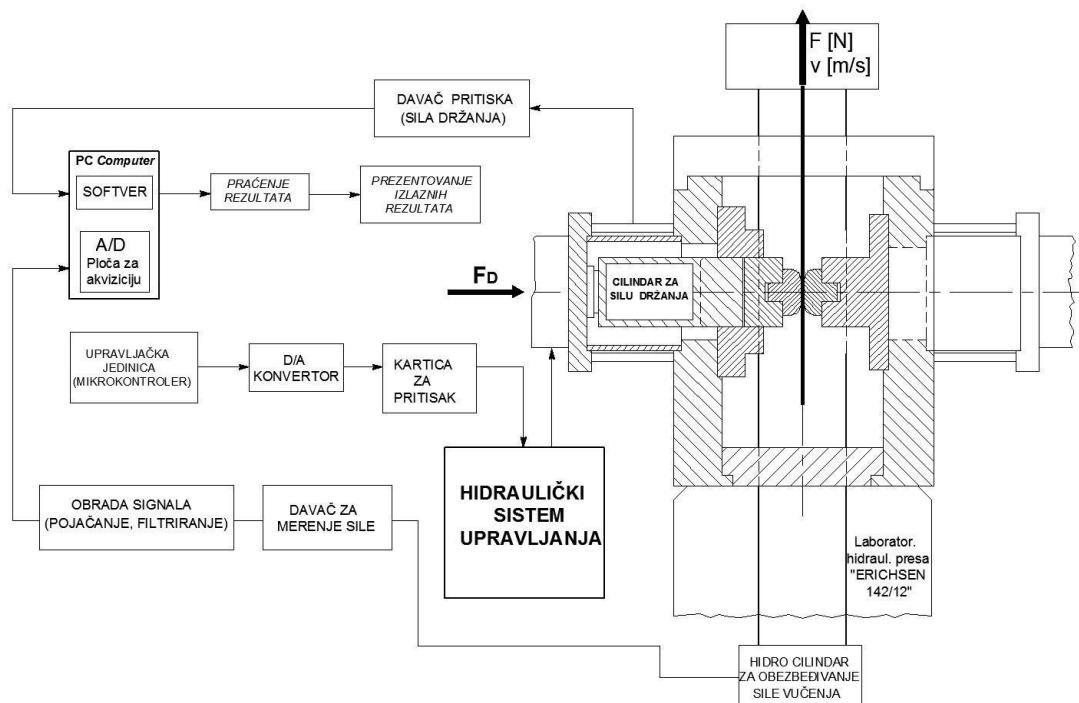
Poseban hidraulični modul se sastoji od hidrauličnog agregata (pumpa, rezervoar, filter, regulacioni ventil i tropoložajni razvodnik sa ručnim upravljanjem) koji obezbeđuje potreban pritisak (Sl. 2). Elektro-elektronskim modulom se obezbeđuje pouzdano napajanje svih komponenata i programsko (PLC) upravljanje hidrauličnog sistema kako bi se ostvarile funkcionalne promene pritiska.

različitim površinama (brušene, nitrirane, polirane i sa TiN prevlakom, Sl. 3b).

Laboratorijska hidraulična presa *ERICHSEN* sa svojim glavnim dejstvom korišćena je za ostvarivanje sile vučenja trake. Glavno dejstvo mašine poseduje senzor koji daje analogni (naponski) signal.

Naponski signal na izlazu ima relativno mali intenzitet, koji je pojačan, filtriran i prilagođen tipu A/D konvertora. A/D konvertor je ugrađen direktno na konektore matične ploče PC računara.

Upravljačka jedinica (mikrokontroler) je najbitniji segment elektro-elektronskog modula jer pomoću ugrađenog softvera pruža



Slika 2. Šema aparature za provlačenje trake lima između ravnih kontaktnih površina

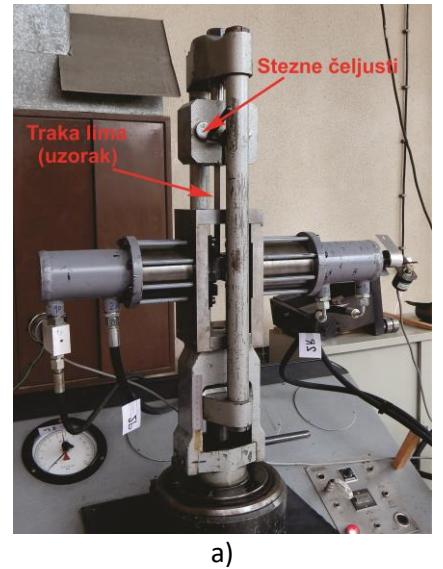
Mehaničko-hidraulični modul (Sl. 3a) je deo uređaja kojim se ostvaruje vučenje epruvete od lima između dva kontaktna elementa. Montiran je na hidrauličnoj presi koja obezbeđuje vučno dejstvo, a pritisak kliznih elemenata (Sl. 3b) ostvaruje se posredstvom hidrauličnih komponenata ovog modula [12].

Blok šema eksperimentalne aparature prikazana je na slici 2. Traka lima je pozicionirana između para kontaktnih elemenata sa ravnim površinama i radijusom od 5 mm (Sl. 1b), koji su izmenljivi i izrađeni sa

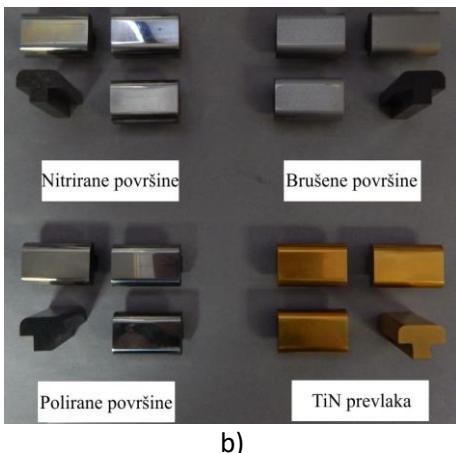
podršku sistemu upravljanja. Preko upravljačke kartice za pritisak generiše upravljačke signale izvršnim elementima hidrauličnog sistema [12]. U memoriju mikrokontrolera učitan je program za šest promenljivih zavisnosti pritiska i dve konstantne vrednosti pritiska (Sl. 2).

Ključni element u posebnom hidrauličnom modulu je naponski proporcionalni ventil. Za određenu vrednost naponskog signala iz upravljačke kartice dobije se određeni protok, odnosno određeni pritisak u cilindru koji

obezbeđuje silu držanja. Ta sila se prenosi na izmenljive kontaktne elemente u hidraulično-mehaničkom delu uređaja koji obezbeđuju držanje epruvete-trake lima. Traka lima je uklještena u čeljusti sa gornje strane nosača (Sl. 3a).



a)



b)

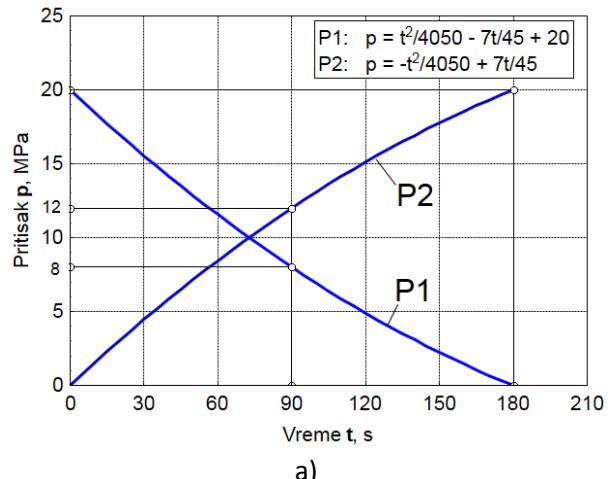
**Slika 3.** a) Mehaničko-hidraulični deo uređaja, b) Izmenljivi kontaktni elementi

Bitan deo elektro-elektronskog modula je uređaj za merenje pritiska i vučne sile. Davač pritiska postavljen je na hidraulični vod koji napaja cilindar za ostvarivanje sile držanja. Davač meri pritisak oslobođen od svih prethodnih gubitaka koji su nastali od regulacionog ventila do cilindra (Sl. 2).

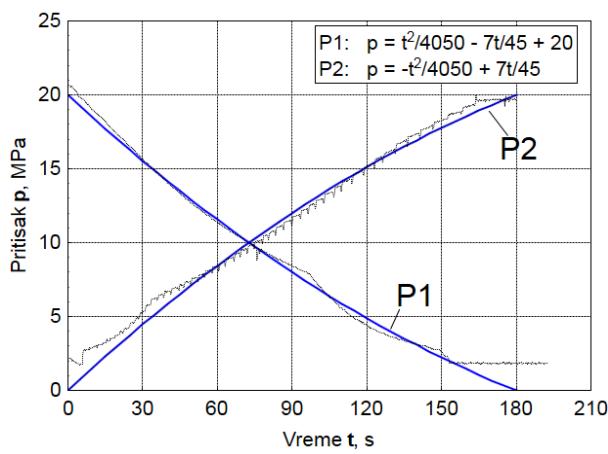
### 3. PRETHODNO DEFINISANE I REALNO OSTVARENE ZAVISNOSTI PRITISAKA

Za potrebe planiranog eksperimenta, definisano je 6 promenljivih zavisnosti kontaktnog pritiska od vremena. Zavisnosti su

date krivama prikazanim na slikama od 4 do 6. Pomenute krive su označene simbolima P1-P6. Zavisnosti P5 i P6 su linearne, a P1, P2, P3 i P4 su nelinearne. Funkcije su definisane na osnovu empirijskih vrednosti minimalnog i maksimalnog pritiska (0-20 MPa) [13, 14]. Hod klizanja iznosi 60 mm u skladu sa mogućnostima laboratorijske prese [15]. Odabrana je brzina vučenja trake od 20 mm/min, što je omogućavalo rešavanje upravljanja parametrima procesa. Na taj način dobijeno je maksimalno trajanje procesa od 180s. Parabolične kvadratne funkcije su definisane kroz tri tačke u empirijski definisanom okviru 20MPa - 180s. (Sl.4, Sl.5). Formiran je širok raspon funkcija pritiska različitog karaktera: monotono opadajuća (P1), monotono rastuća (P2), kombinovana rastuće-opadajuća (P3), kombinovana opadajuće-rastuća (P4), linearna opadajuća (P5) i linearna rastuća (P6).



a)



b)

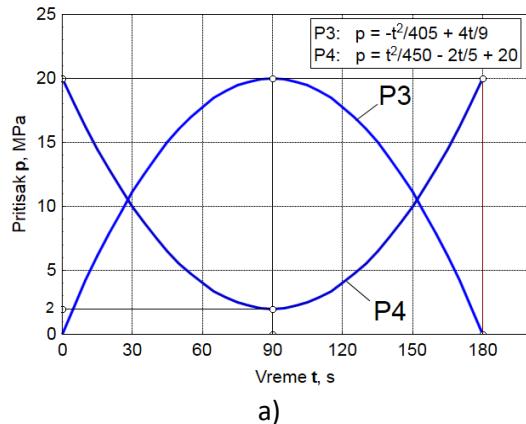
**Slika 4.** a) Analitički definisane funkcije, b) Uporedni prikaz analitičkih i eksperimentalnih zavisnosti

Na taj način stvorena je mogućnost istraživanja uticaja promenljivog kontaktnog pritiska na vučnu silu, koeficijent trenja i promenu hrapavosti lima simultano sa drugim uticajnim faktorima. Od tih faktora treba pomenuti vrstu materijala lima, tip prevlake na alatu i uticaj različitih maziva u kontaktu. Cilj je doći do odgovora na pitanja:

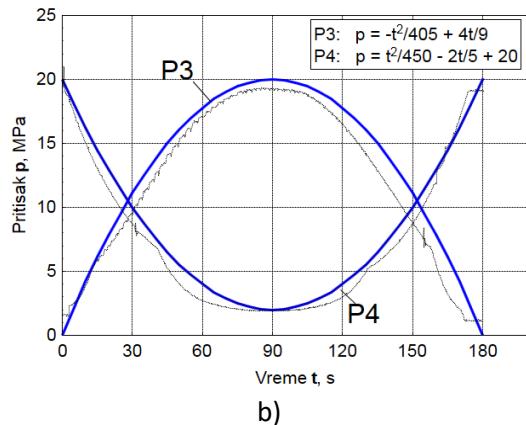
a) Da li je moguće promenom karaktera funkcije kontaktnog pritiska direktno menjati vučnu silu i koeficijent trenja?

b) Koliko drugi uticaji (materijali, prevlake, maziva) mogu da poremete delovanje pritiska i prenošenje karaktera funkcije pritiska na vučnu silu?

c) Kako promenljive funkcije pritiska deluju na hrapavost lima?



a)



b)

Slika 5. a) Analitički definisane funkcije, b) Uporedni prikaz analitičkih i eksperimentalnih zavisnosti

Osnovni oblik kvadratne funkcije pritiska dat je izrazom:  $p = a \cdot t^2 + b \cdot t + c$ , gde su a, b i c nepoznate konstante. Za krivu pritiska P1 (Sl. 4a) konstante su određene na sledeći način:

$$p = 20 \text{ MPa} \rightarrow t = 0 \rightarrow c = 20, \quad (1)$$

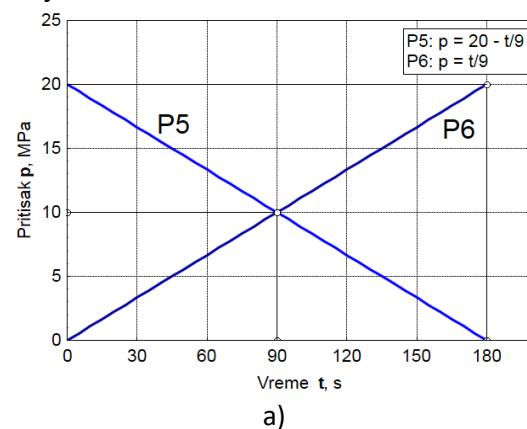
$$p = 0 \text{ MPa} \rightarrow t = 180 \text{ s} \rightarrow 0 = 32400a + 180b + 20, \quad (2)$$

$$p = 8 \text{ MPa} \rightarrow t = 90 \text{ s} \rightarrow 8 = 8100a + 90b + 20. \quad (3)$$

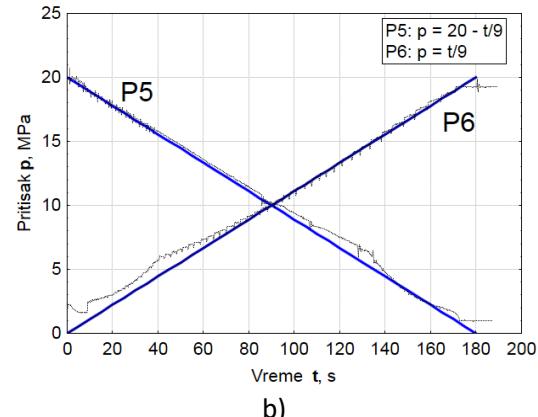
Na osnovu izraza u prethodnom koraku dolazi se do konstanti a, b i c, a time i konačne forme funkcija:

$$a = \frac{1}{4050}; b = -\frac{7}{45}, \quad p = \frac{1}{4050}t^2 - \frac{7}{45}t + 20. \quad (4)$$

Analognim postupkom moguće je doći do analitičkih izraza funkcija pritiska P2, P3 i P4 (Sl.5a i Sl.5b). Definisanje linearnih funkcija P5 i P6 je slično i jednostavno (Sl. 6). Prikazane realne zavisnosti pritiska na Sl.4b, Sl.5b i Sl.6b su ostvarene radi provere, bez aktiviranja hoda vučenja trake.



a)



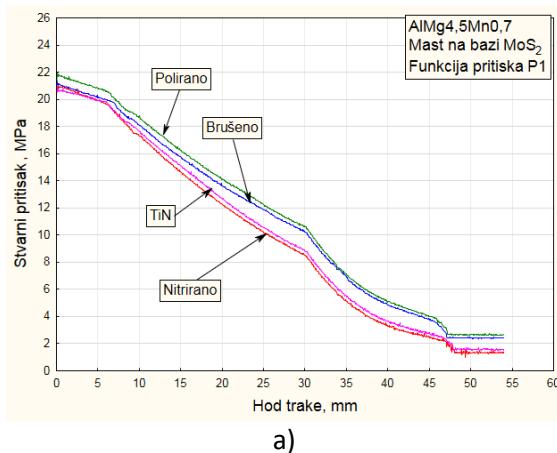
b)

Slika 6. a) Analitički definisane funkcije, b) Uporedni prikaz analitičkih i eksperimentalnih zavisnosti

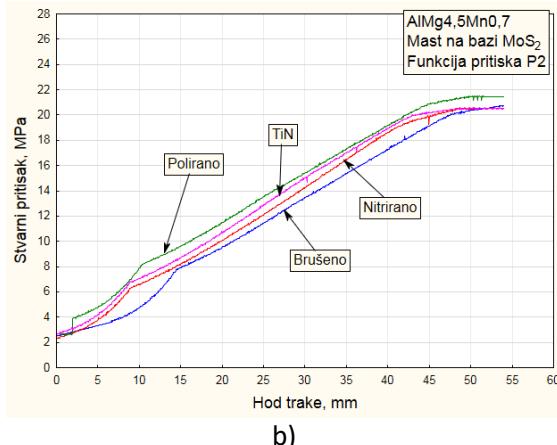
#### 4. EKSPERIMENTALNA REALIZACIJA ZADATIH FUNKCIJA PRITISAKA

Prikazanom aparaturom izveden je složeni višefaktorni eksperiment sa velikim brojem kombinacija triboloških uslova u kontaktu. To podrazumeva različite hrapavosti kontaktnih

površina kliznih elemenata, različite vrste limova i maziva [16, 17, 18] uz simultano zadavanje prethodno definisanih zavisnosti pritiska P1-P4 (Sl.4, Sl.5). Dobijen je veliki broj rezultata uslovljen različitim kombinacijama pomenutih uslova. U radu će biti pokazan jedan deo rezultata koji se odnosi na analizu realno ostvarenih zavisnosti pritiska od hoda na aluminijumskom limu AlMg4.5Mn0.7 (0.9 mm), za dva tipa maziva (ulje za duboko izvlačenje, maziva mast na bazi MoS<sub>2</sub>) za zadate funkcije pritiska P1-P4.



a)



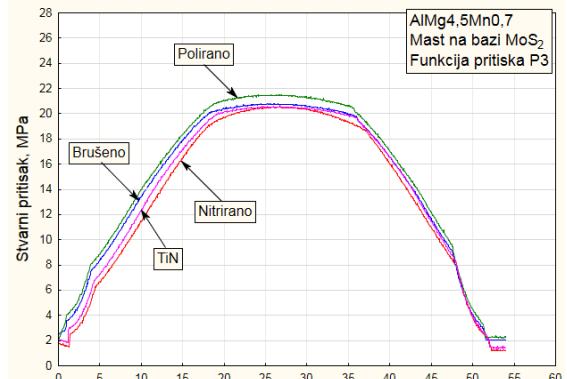
b)

**Slika 7.** Dobijene zavisnosti pritisaka primenom mazive masti na bazi MoS<sub>2</sub>: a) P1, i b) P2

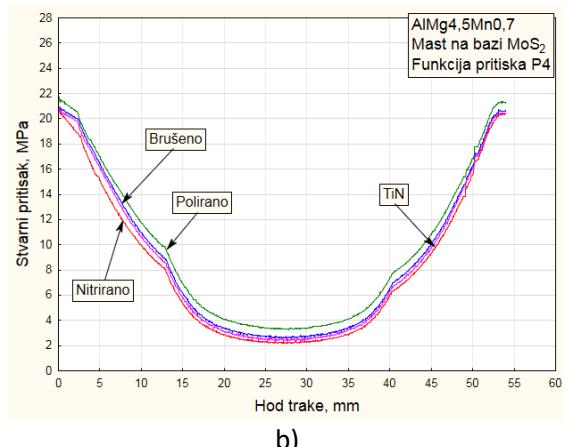
Akcentat je stavljen na proveru pouzdanosti realno dobijenih zavisnosti pritisaka za svaku od analitički zadatih funkcija (P1, P2, P3 i P4, definisanih u odeljku 3 rada). Primenjena su četiri tipa kontaktne površine kliznih elemenata (brušene površine, nitrirane površine, polirane površine i površine sa TiN prevlakom) (Sl. 7, Sl. 8, Sl. 9 i Sl. 10).

Na taj način mogu se izvesti zaključci o radu aparature, tj. u kojoj su meri prisutna odstupanja realno ostvarenih funkcija pritiska

pri pomenutim uslovima u odnosu na teorijske krive pritiska. Pored toga, moguće je odrediti koliki je uticaj triboloških uslova na realno ostvareni pritisak.



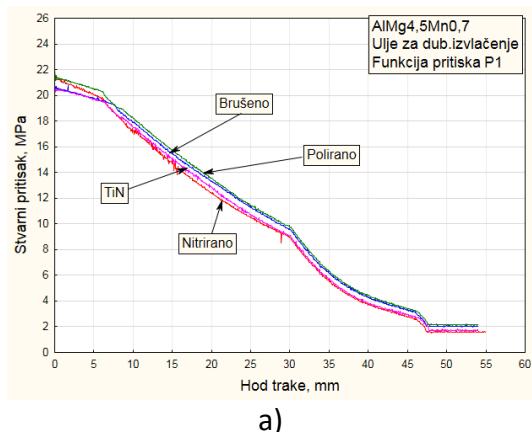
a)



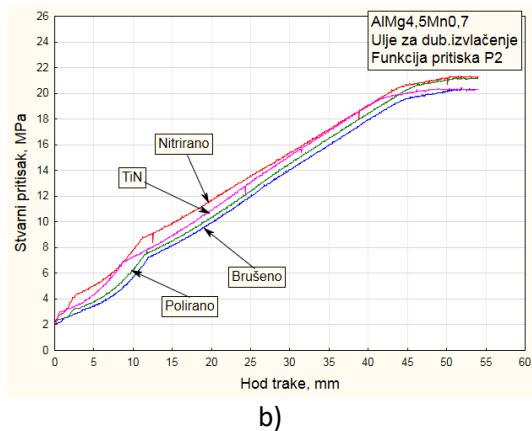
b)

**Slika 8.** Dobijene zavisnosti pritisaka primenom mazive masti na bazi MoS<sub>2</sub>: a) P3, i b) P4

Krive realno ostvarenog pritiska sa malim odstupanjima prate zadate analitičke zavisnosti kako za slučaj intenzivnijeg trenja (podmazivanje uljem) tako i za slučaj manjeg trenja (primena mazive masti na bazi molibden-disulfida). Uticaj tipa kontaktne površine kliznih elemenata na stvarni pritisak je minimalan. Poklapanje krivih je naročito izraženo za slučaj funkcije P4 pri podmazivanju mašću na bazi MoS<sub>2</sub> (Sl. 8b), a takođe i kod funkcije P1 (ulje za duboko izvlačenje, Sl. 9a). Manje odstupanje krivih primećeno je kod dijagrama na slici 9b i 10a, što se može pripisati nešto većoj hravavosti nitrirane površine i pojavi lepljenja čestica materijala lima na alat što je posledica dugotrajnog ispitivanja. Odstupanja su relativno mala i nalaze se u prihvatljivim granicama.

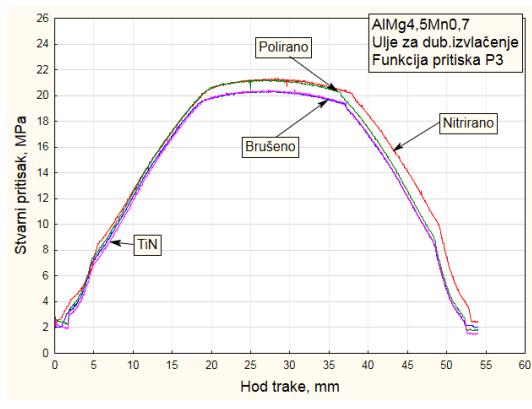


a)

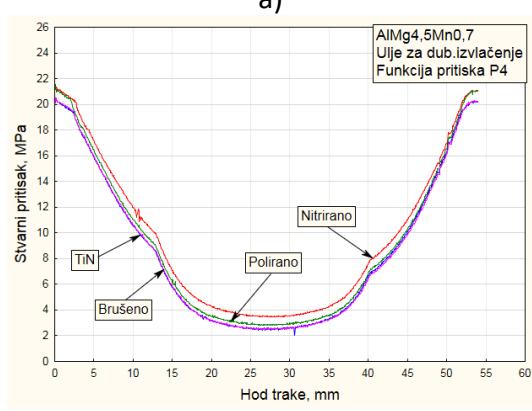


b)

**Slika 9.** Dobijene zavisnosti pritisaka primenom ulja za duboko izvlačenje: a) P1, i b) P2



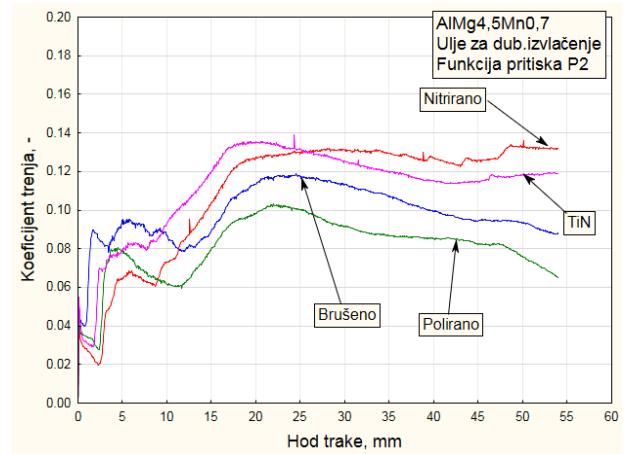
a)



b)

**Slika 10.** Dobijene zavisnosti pritisaka primenom ulja za duboko izvlačenje: a) P3, i b) P4

Funkcije promenljivih kontaktnih pritisaka primenjene na izračunavanje koeficijenta trenja biće date u nekom od narednih istraživanja. Jedan primer promene koeficijenata trenja biće prikazan na slici 11.



**Slika 11.** Dobijene zavisnosti koeficijenta trenja primenom funkcije pritiska P3 i ulja za duboko izvlačenje

## ZAKLJUČAK

U radu je opisana originalna eksperimentalna aparatura razvijena za realizaciju fizičkog modela izučavanja ponašanja lima na obodu pri dubokom izvlačenju. Prikazani rezultati svedoče da se odgovarajućim izborom funkcionalne zavisnosti kontaktnog pritiska i triboloških uslova može uspešno uticati na klizanje lima na obodu u procesu dubokog izvlačenja. Na taj način se doprinosi boljem razumevanju ponašanja materijala na obodu lima i minimiziranju mnogih problema koji prate ovaj proces u realnim proizvodnim uslovima. Zaključci izvedeni iz ovog istraživanja se mogu sažeti na sledeći način:

- Aparatura je u potpunosti funkcionalna i veoma uspešno realizuje zadate matematičke funkcije pritisaka, što je pokazano dijagramima realno dobijenih zavisnosti pritisaka (Sl.7, Sl.8, Sl.9, i Sl.10). Ponovljivost rezultata je veoma dobra i prisutna su minimalna odstupanja teorijskih funkcija pritiska u odnosu na realne zavisnosti (Sl. 4, Sl. 5, i Sl. 6);
- Uticaj vrste maziva i stanja kontaktnih površina na stvarno izmereni pritisak je

- zanemarljiv. Variranje pomenutih triboloških uslova bi dovelo do različitih zavisnosti vučne sile i koeficijenta trenja, što otvara prostor za dalja istraživanja i primenu ove aparature u te svrhe;
- c) Realizacija ove eksperimentalne aparature i ostvarenih rezultata ima širi značaj kao alternativni pristup u jednoj oblasti savremene tehnologije oblikovanja tankih limova. Uz odgovarajuće izmene u mehaničkom delu aparature, kao i u sistemu upravljanja, moguće je istraživati i druge uticaje, na pr. uticaj zateznih rebara na obodu;
  - d) U narednim istraživanjima planirano je korišćenje različitih materijala, kao što su čelični limovi povišene jačine, nerđajući čelični limovi itd.

## ZAHVALNOST

Istraživanja predstavljena u ovom radu delimično su finansirana od strane Ministarstva obrazovanja, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije kroz projekte TR34002 i ON174004.

## LITERATURA

- [1] L. Fratini, S. Lo Casto, E. Lo Valvo: A technical note on an experimental device to measure friction coefficient in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, pp. 16-21, 2006.
- [2] E. D. Szakaly, J. G. Lenard: The effect of process and material parameters on the coefficient of friction in the flat-die test, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, pp. 868-876, 2010.
- [3] L. Figueiredo, A. Ramalho, M. C. Oliveira, L. F. Menezes: Experimental study of friction in sheet metal forming, *Wear*, Vol. 271, pp. 1651-1657, 2011.
- [4] J. Coello, V. Miguel, A. Martinez, F. J. Avellaneda, A. Calatayud: Friction behavior evaluation of an EBT zinc-coated trip 700 steel sheet through flat friction tests, *Wear*, Vol. 305, pp. 129-139, 2013.
- [5] A. Yanagida, A. Azushima: Evaluation of coefficients of friction in hot stamping by hot flat drawing test, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 58, pp. 247-250, 2009.
- [6] A. V. Manoylov, M. J. Bryant, H. P. Evans: Dry elasto-plastic contact of nominally flat surfaces, *Tribology International*, Vol. 65, pp. 248-258, 2013.
- [7] J. Kondratuk, P. Kuhn: Tribological investigation on friction and wear behavior of coatings for hot sheet metal forming, *Wear*, Vol. 270, pp. 839-849, 2011.
- [8] A. Ghiotti, S. Bruschi: Tribological behavior of DLC coatings for sheet metal forming tools, *Wear*, Vol. 271, pp. 2454-2458, 2011.
- [9] B. H. Lee, Y. T. Keum, R. H. Wagoner: Modeling of the friction caused by lubrication and surface roughness in sheet metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 130-131, pp. 60-63, 2002.
- [10] L. Kirkhorn, V. Bushlya, M. Andersson, J. E. Stahl: The influence of tool steel microstructure on friction in sheet metal forming, *Wear*, Vol. 302, pp. 1268-1278, 2013.
- [11] S. Aleksandrović, M. Stefanović, D. Adamović, V. Lazić, M. Babić, R. Nikolic, T. Vujinovic: Variable tribological conditions on the flange and nonmonotonous forming in deep drawing of coated sheets, *Journal of the Balkan Tribological Association*, Vol. 17, No. 2, pp. 165-178, 2011.
- [12] T. Vujinović: *Duboko izvlačenje tankih limova pri upravljanju klizanjem na obodu*, Doktorska disertacija, Fakultet inženjerskih nauka Kragujevac, 2011.
- [13] M. Stefanovic: *Tribology of deep drawing*, monograph, Yugoslav Society for Tribology and Faculty of Mechanical Engineering, Kragujevac, 1994. (In Serbian).
- [14] W. Emmens: *Tribology of flat die contact*, PhD thesis, Netherlands, 1996.
- [15] S. Aleksandrović, M. Babić, B. Nedeljković, T. Vujinović, D. Taranović, V. Lazić, D. Milosavljević: Variable draw bead height and variable contact pressure as tribological influences in sheet metal stripe sliding test, *Journal of the Balkan Tribological Association*, Vol. 18, No. 2, pp. 184-194, 2012.
- [16] M. Djordjević, S. Aleksandrović, V. Lazić, D. Arsić, R. R. Nikolić, B. Hadzima: The variable contact pressure influence on the tensile force in the process of strip sliding in the flat die in ironing, *Materials Engineering - Materialove inžinierstvo*, Vol. 23, No. 2, pp. 74-83, 2016.

- [17] L. Peña-Parás D. Maldonado-Cortés, J. Tahar-Tijerina, P. García-Pineda, G. Tadeo Garza, M. Irigoyen, J. Gutiérrez, D. Sánchez: Extreme pressure properties of nanolubricants for metal-forming applications, Industrial Lubrication and Tribology, Vol. 68, No. 1, pp. 30-34, 2016.
- [18] J. Mucha, J. Jaworski: The tool surface wear during the silicon steel sheets blanking process, Maintenance and Reliability, Vol. 18, No. 3, pp. 332-342, 2016.

## FLAT DIE SLIDING MODEL WITH VARIABLE CONTACT PRESSURE IN DEEP DRAWING PROCESS

**Abstract:** The influence of contact pressure in deep drawing processes is the current research subject related to sheet processing technology. Within this research, a tribological model was developed based on the flat die sliding process between contact surfaces under variable pressure during the process, and an original experimental computerized device was made for this purpose. Main goal is to evaluate possibility of influencing on friction, and through friction on entire forming process. A complex multi-factor experiment was performed, using an Al alloy and contact elements of varying roughness, various lubricants and variable contact pressure during the process. In addition to the description of the machinery, this paper also presents the way in which theoretical variable contact pressure dependencies were determined. Based on the predefined, theoretical pressure variations for each of the conditions mentioned here, real contact pressure was obtained. Based on this, it was possible to determine the effect of tribological factors on real pressure. Obtained real contact pressure shows the reliability of the experimental machinery, i.e. the degree of present deviations of theoretical pressure.

**Keywords:** flat-die test, deep drawing, tribological model, variable contact pressure, computerized experimental apparatus



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## TRIAL EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE AVERAGE TIMES OF ACTIONS EXECUTED IN A CAD APPLICATION

Jovan ARANĐELOVIĆ<sup>1</sup>, Pavle DRAŠKOVIĆ<sup>1</sup>, Rajko TURUDIJA<sup>1</sup>, Marko DIMITROV<sup>1</sup>, Nikola BOŽIĆ<sup>1</sup>,  
Nikola KORUNOVIĆ<sup>1</sup>, Dragan MIŠIĆ<sup>1</sup>, Miroslav TRAJANOVIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Nis, Faculty of Mechanical Engineering, Serbia, jovan.arandjelovic3@gmail.com;  
drasko.pavle@gmail.com; turudija.rajko8@gmail.com; marko.dimitrov96@gmail.com;  
bozicnikolamail@gmail.com; nikola.korunovic@masfak.ni.ac.rs; dragan.misic@masfak.ni.ac.rs;  
miroslav.trajanovic@masfak.ni.ac.rs

**Abstract:** The efficiency of CAD programs largely depends of the efficiency of their user interface. Relative efficiency can be defined as the inverse value of the effort involved during the design process. One of the possibilities for expressing the effort is to calculate, i.e. to sum up, the time required to fulfil one design task. Such value depends on the physical characteristics of the specific designer and hence cannot be valid. Another possibility is to determine average times of typical actions in the design process, such as mouse click, mouse move, typing of a number etc., and then evaluate the total effort by summing the products of average action times and counted number of actions in a design session. This paper presents an original methodology for experimental determination of the average times of the actions executed in a CAD application. In order to conduct the experiment, a web application, based on the proposed methodology, was developed. Based on the first experiences, it can be concluded that the presented methodology and application are suitable for experimental determination of the average times of CAD modeling actions. However, there is still room for improvement in its usability.

**Keywords:** CAD, User interface, Efficiency, Effort, experiment

### 1. INTRODUCTION

Assuming that CAD programs of equal functionality are compared, the most important indicator of their usability, from the user point of view, is their efficiency. The same is valid for any other CAx program. Therefore, in order to compare the available CAD programs and select the best one, it is necessary to identify and adopt an appropriate indicator of their efficiency.

Efficiency can be defined as the ratio between the cost of design and the effort invested in design [1]. It is very hard to

accurately estimate the effort, because it comprises of mental and physical parts. Mental effort is more user related. It depends on the degree of intelligence, knowledge and skills of the user. Therefore, this part of effort is not directly related to the features of a CAD program. In this paper, only the physical effort will be taken into consideration.

In the previous work of the authors, various methods for expression of the effort were considered [1]. One of those, the time based method, is used in this paper. According to the time based method, the total physical effort is calculated as a function of times spent

in performing of the particular user actions during the design process. Those actions include mouse movements, typing on the keyboard and mouse clicks. Again, those times are user dependent. In order to express the efficiency of a CAD program independently of its user, it is necessary to evaluate the average times for typical actions that users perform during interaction with CAD programs.

This paper presents the first trial results of the experiment whose aim was to evaluate average times of a fore mentioned actions, performed using mouse and keyboard. To accomplish this task, a web-based application

was developed. Using this application, the times corresponding to typical user actions were measured. The home page of this application is presented in figure 1.

The obtained data were statistically processed in order to obtain the average values of action times.

In the next chapter, the Time based approach for estimation of physical effort is presented. Chapter three presents the results and finally, in chapter four, some conclusions and recommendations for future work are given.

## Aplikacija za merenje parametara interakcije sa korisničkim interfejsom računara

Na raspolaganju su različiti testovi koji će nam pomoći da odredimo prosečne karakteristike korisnika tokom unosa podataka.

**Aplikaciju mogu da koriste samo registrovani i prijavljeni korisnici. Molimo vas da se registrujete, a onda i prijavite.**

Spisak testova je prikazan ispod. Izaberite test koji želite da sprovedete i pratite uputstva.

### Testovi

Brzina pomeranja miša.



Vreme potrebno za izbor pomoćnog tastera.



Vreme potrebno za izbor dva tastera istovremeno.



Vreme potrebno za unos teksta.



Vreme potrebno za okretanje točića miša.



Vreme potrebno za naizmeničan izbor tastera miša.



Vreme potrebno prebacivanje ruke sa miša na tasturu i nazad.



**Figure 1.** Home page of the application for measuring times of actions

## 2. TIME BASED APPROACH TO DETERMINE PHYSICAL EFFORT OF DESIGN

As elaborated in [1], relative efficiency is defined as the inverse value of total effort:

$$Er = \frac{1}{E} \quad (1)$$

and total effort is ( $E$ ) expressed as the sum of particular efforts:

$$E = C + S + L + K + M + T \quad (2)$$

where  $C$ ,  $S$ ,  $L$ ,  $K$ ,  $M$  and  $T$  represent particular efforts related to mouse clicks, wheel scrolls, left hand keystrokes, usual keyboard typing, mouse movements and movement of the hand from mouse to keyboard, respectively.

Various methods for calculation of particular efforts were explored in [1]. One of those, the time-based approach, was used in this study for its simplicity and effectiveness. Compared with the definition given in [1], the method is slightly modified in the part that relates to calculating the particular effort

required to execute mouse clicks. This particular effort is split into partial efforts related to right, left and middle mouse clicks, as the latest experience showed that the times needed to perform these clicks were typically different, regardless of the user. Therefore, instead of (2), the following equation is used:

$$E = C_L + C_R + C_M + S + L + K + M + T \quad (3)$$

where  $C_L$ ,  $C_R$  and  $C_M$  are particular efforts related to left, right and middle mouse clicks, respectively.

The main assumption of the time based approach is that the effort is proportional to the total time required for the completion of the design process. The particular efforts, as well as the total effort, are expressed in time units, i.e. seconds. Each particular effort is calculated as the product of the average time needed to perform a specific action and number of specific actions in a design session. To make the calculations as independent from the specific user and computer hardware as possible, the average times are obtained using statistical methods. The calculations rely on an auxiliary experiment, involving a large number of users of different characteristics (age, gender, left-handed or right-handed people etc.), each of them using different hardware. Combining the experimental and statistical methods the following average times are obtained:

$t_{cl}$  – the average time required for one left click

$t_{cr}$  – the average time required for one right click

$t_{cm}$  – the average time required for one middle click

$t_s$  – the average time required for mouse wheel scroll,

$t_l$  – the average time required for left hand keystrokes (ctrl, alt, left side shift and esc),  
 $t_k$  – the average time required for typing with both hands,

$t_m$  – the average time required for mouse movement together with hand and

$t_t$  – the average time required for hand transfer from mouse to keyboard or vice versa.

Particular efforts related to various types of action are calculated using equations (5 – 12). For example, the particular effort (time) that corresponds to the left mouse clicks is calculated as:

$$C_L = \sum_{i=0}^{i=cl} t_{cl} \quad (5)$$

where  $t_{cl}$  is the average time required for one left mouse click and “c” is the number of left, right and middle mouse button clicks. In the same manner, the particular efforts for the rest of the actions are defined as:

$$C_R = \sum_{i=0}^{i=cr} t_{cr} \quad (6)$$

$$C_M = \sum_{i=0}^{i=cm} t_{cm} \quad (7)$$

$$S = \sum_{i=0}^{i=s} t_s \quad (8)$$

$$L = \sum_{i=0}^{i=l} t_l \quad (9)$$

$$K = \sum_{i=0}^{i=k} t_k \quad (10)$$

$$M = \sum_{i=0}^{i=m} t_m \quad (11)$$

$$T = \sum_{i=0}^{i=t} t_t \quad (12)$$

where  $cr$ ,  $cm$ ,  $s$ ,  $l$ ,  $k$ ,  $m$  and  $t$  are numbers of right clicks, middle clicks, scrolls, left hand keystrokes, both hand typing occurrences, mouse movements and hand transfers recorded in a CAD modelling session, respectively.

As already mentioned, the total effort is calculated as in equation (3), with the unit of  $E$  being the second.

### 3. RESULTS

#### 3.1 Time for left, right and middle mouse button clicks

The goal of this application module is to determine the mean time required for one left, right or middle mouse click. After the test has been initiated, the message is shown containing the name of the mouse button to be pressed. The first mouse button to be clicked is determined by random selection. If the user selects the correct button, a message about the selection of a new button is displayed. Selection of the left, rather than the right or middle mouse button, is required much more frequently. Thus the number of left clicks in a test is proportionally larger. The test lasts for 30 seconds.

Those data that deviated from the average value by 500% were considered to be irregular. Also, users who have incorrectly reported the year (for example year: 5) and users who did not perform the test for 30 seconds were excluded from calculations. The extreme values of time usually appear at the start of the test. This is probably due to the fact that the user needs some time to understand how the application works. Also, another cause of extreme values is the lack of user concentration, most frequently caused by: message on the phone, conversation with another person, not watching the command display or continuous clicking on the left mouse button.

**Table 1.** Statistical results for left mouse button clicks

Number of people tested	77
Total number of left clicks	11 243
Number of discarded clicks	212
Number of accepted clicks	11 031
Age range	18 - 64
Number of females tested	23
Number of males tested	54
Average time for left click (s)	0,351
Standard deviation	0,107

**Table 2.** Statistical results for right mouse button clicks

Number of people tested	79
Total number of right clicks	1240
Number of discarded clicks	31
Number of accepted clicks	1209
Age range	18 - 64
Number of females tested	24
Number of males tested	55
Average time for right click(s)	0,641
Standard deviation	0,158

**Table 3.** Statistical results for middle mouse button clicks

Number of people tested	77
Total number of middle clicks	641
Number of discarded clicks	13
Number of accepted clicks	628
Age range	18 - 64
Number of females tested	22
Number of males tested	55
Average time for middle click (s)	0,877
Standard deviation	0,199

From above tables it can be seen that the time needed for the left click is much less than the time required for the right and middle click on the mouse. The time that an average user needs to click on the right mouse button is typically two times longer than the time he needs to perform the left click, while the time needed for middle mouse click is three times longer. Years and gender of user also affect the average time of click, which will be described elsewhere.

#### 3.2 Time for mouse wheel scroll

This test implies scrolling of the text that is displayed in a separate text box. When scrolling the mouse, the number of rotating steps of the mouse wheel per second is

measured. The text should be scrolled in both directions. The test lasts 10 seconds.

The goal is to calculate the average time required for one rotating step.

**Table 4.** Statistical results for mouse wheel scroll

Number of people tested	87
Total number of samples	87
Number of the rejected samples	3
Number of the accepted samples	84
Total number of wheel scrolls	13648
Number of discarded scrolls	66
Number of accepted scrolls	13582
Age range	18-64
Number of females tested	24
Number of males tested	63
Average time for one scroll step (s)	0.080173
Standard deviation	0.050922

This test needs to be improved because it does not correspond to the real use of the mouse wheel during the scroll. In a revised test, the user should scroll up to strictly specified lines of text. Now the scrolling goes back and forth, without paying attention to cursor positioning precision.

### 3.3 Time for left hand keystrokes

This test is used for determining average time needed for pressing one keystroke on the keyboard with left hand. Buttons that are used are: Alt, Ctrl, Shift, Esc. By random principle the program displays the button that has to be pressed. When the test starts, program displays the first key, and only when user presses a correct key, the next key is shown. The test is 30 seconds long.

### 3.4 Time for combination of keystrokes

Within this test, users were asked to simultaneously press one of the auxiliary keys (Ctrl, Shift or Alt) in combination with a key representing a letter (for example, Ctrl+X, Alt+O, etc.). Upon starting the test, a

combination of keys (also known as keyboard shortcuts) that are meant to be selected by the subject is displayed in a specified space. If the subject inputs the designated combination successfully another combination is displayed and so on. As in previous cases, the combinations are chosen randomly, and the time required to enter the corresponding combinations is measured. The test lasts for 30 seconds.

**Table 5.** Statistical results for left hand keystrokes

Number of people tested	90
Total number of left hand keystrokes	2612
Number of discarded keystrokes	21
Number of accepted keystrokes	2591
Age range	14-66
Number of females tested	25
Number of males tested	65
Average time for one keystroke (s)	0,999
Standard deviation	0,492

During the analysis of this test, all recorded instances of keystroke combinations with a duration time greater than a fivefold value of the average time were discarded. We believe that these occurrences of longer time intervals (which were discarded) were caused due to subjects being distracted by various unforeseen elements, such as: phone calls, communication with other users, etc.

In this test we had eighty six right handed participants and one left handed participant. Because of a lack of representation of left handed subjects, we will not be making any comparisons with this criterion.

**Table 6.** Statistical results for combination of keystrokes

Number of people tested	86
Total number of combined keystrokes	1304
Number of discarded keystrokes	19
Number of accepted keystrokes	1285
Age range	19-64
Number of females tested	22

Number of males tested	64
Average time for one combined keystroke (s)	2.0765
Standard deviation	0.6008

### 3.5 Time required for typing regular text

Within this test, users were asked to type a pre-prepared specific text using both hands (for example, file name or part name). This test accepts all data typed in text box, with all possible mistakes, which makes this test imperfect. The data obtained are stored in the database for further processing. Before processing, two samples with too many errors were discarded. Data processing consists of calculating average times for one keystroke for every user and then average values for all users.

**Table 7.** Statistical results for typing regular text

Number of people tested	79
Total number of text samples	874
Number of discarded text samples	2
Number of accepted text samples	872
Total number of keystrokes	25266
Number of wrong keystrokes	1534
Number of correct keystrokes	23732
Age range	19-64
Number of females tested	22
Number of males tested	57
Average time for one keystrokes (s)	0.388
Standard deviation	0.179

### 3.6 Time required for typing numbers

The goal of this test is to see how much time it is needed for one keystroke of a number on the keyboard. By random principle the program displays a number made of three whole digits and one or two decimals separated by comma. Upon starting the test program displays the first number. When the user finishes pressing all number keys (and a comma that separates whole from decimal digits), user has to press Enter so the next

number can be displayed. The process is repeated for 30 seconds.

### 3.7 Mouse movement speed

This part of the application monitors the speed at which users move the cursor. The screen displays the small rectangle which needs to be selected with the mouse. After the rectangle is selected, it is drawn on some other part of the screen and the user needs to re-select it. The procedure is repeated 10 times. When choosing the rectangle, the time elapsed since the rectangle appears on the screen up to the moment the user selects that rectangle is recorded. In addition to the time, the distance of the mouse pointers (in pixels) is also being measured.

**Table 8.** Statistical results for typing numbers

Number of people tested	77
Total number of text samples	755
Number of discarded text samples	25
Number of accepted text samples	730
Total number of keystrokes	5285
Number of discarded keystrokes	175
Number of correct keystrokes	5110
Age range	20-58
Number of females tested	21
Number of males tested	56
Average time for one keystrokes (s)	0.382
Standard deviation	0.172

**Table 9.** Statistical results for mouse movement speed

Number of people tested	97
Total number of mouse movements	872
Number of discarded movements	0
Number of accepted movements	872
Age range	20-58
Number of females tested	26
Number of males tested	71
Average time for one movement (s)	1.039
Standard deviation	0.215

### **3.8 Time for transfer the right hand from the mouse to the keyboard and vice versa**

Within this test, the speed of moving the hand from the mouse to the keyboard and vice versa is determined. The user is shown the rectangle to be selected by the mouse. After choosing the rectangle, he is asked to enter a number in the text input field. After entering the number, the rectangle to be selected is displayed again, and so on. The procedure is repeated 10 times. The time follows from the selection of the rectangle to the entry of the number, as well as the time elapsed from entering the number to the rectangle selection. The user is also required to use only the numeric keypad.

**Table 10.** Statistical results for transfer the right hand from the mouse to the keyboard and vice versa

Number of people tested	96
Total number of transfers	2309
Number of discarded transfers	50
Number of accepted transfers	2259
Age range	19-64
Number of females tested	21
Number of males tested	75
Average time for transfers from mouse to the keyboard (s)	1,447
Average time for transfers from keyboard to the mouse (s)	1,069
Average time for one complete hand transfer (s)	2.516
Standard deviation for transfers from mouse to the keyboard	0,394
Standard deviation for transfers from keyboard to the mouse	0,351

Extreme values came out as a result of the user not reading the instructions on how the application is working, so the first samples of some users were very high values, but the later samples of users were correct because

they realized how the application worked. Another interesting case of high value for some users is when it is necessary to press the BACKSPACE. It is probably because the users were instructed to use only the numeric keypad and they were confused when they saw that the application insists on pressing the BACKSPACE button.

## **4. CONCLUSION**

The trial experiment demonstrated to be useful in testing of the methodology for experimental determination of the average times of the actions executed in a CAD application. The validity of the developed methodology is considered to be proved. Nevertheless, the trial experiment has indicated many possibilities for improvement, especially considering the methods of measuring the duration of specific activities during the design process.

The goal of the following research will be to further improve the methodology and perform a number of relevant measurements.

## **ACKNOWLEDGEMENT**

This paper is a part of the project "BestCAD" funded by Faculty of Mechanical Engineering, University of Nis.

## **REFERENCES**

- [1] J. Aranđelović, P. Drašković, R. Turudija, M. Dimitrov, N. Božić, D. Mišić, N. Korunović, M. Trajanović: Towards a methodology for cad program efficiency assessment, *4<sup>th</sup> International conference Mechanical Engineering in XXI century*, Nis, pp. 155-161, 2018.
- [2] F. Azman and H. Aris: Exploring the potential of programmable button mouse in improving programmers efficiency, *4<sup>th</sup> International Conference on User Science and Engineering (i-USER)*, pp. 29-34, 2016.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## INTERAKTIVNI KORISNIČKI INTERFEJS ZA ELEKTROLUČNO ROBOTSKO ZAVARIVANJE - PRIMENA U EDUKACIJI INŽENJERA

Božica BOJOVIĆ<sup>\*1</sup>, Ivan DANILOV<sup>1</sup>, Nemanja GVOJIĆ<sup>1</sup>, Petar PETROVIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Republika Srbija, [bbojovic@mas.bg.ac.rs](mailto:bbojovic@mas.bg.ac.rs);  
[idanilov@mas.bg.ac.rs](mailto:idanilov@mas.bg.ac.rs), [ngvojic@yahoo.com](mailto:ngvojic@yahoo.com), [pbpetrovic@mas.bg.ac.rs](mailto:pbpetrovic@mas.bg.ac.rs)

**Apstrakt:** Programiranje industrijskih roboti u malim i srednjim preduzećima najčešće se sprovodi obučavanjem, što je dugotrajna metoda, koja zahteva angažovanje robota van proizvodnih tokova. Stoga su fleksibilni, jeftini i jednostavni pristupi u programiranju svakako potrebni za proširenje robotike u malim i srednjim preduzećima. Pritom kognitivne infokomunikacije u interakciji između operatera i robota u projektovanju i nadzoru komplettnog procesa robotskog zavarivanja omogućava operateru uspešno programiranje korišćenjem računara. Istovremeno nivo kompetencija zaposlenih u malim i srednjim preduzećima ima ključnu ulogu u uspešnom suočavanju sa aktuelnim izazovima u industrijskoj proizvodnji, kao što su kraći ciklusi proizvoda, veći broj varijanti proizvoda, ambicije u pogledu efikasnosti i digitalizacija. Da bi se poboljšale postojeće kompetencije zaposlenih, ali i studenata kao budućih inženjera, postoji nekoliko mogućnosti za učenje. U poređenju sa učenjem kroz npr. klasična predavanja, studentima na praktičnim kursevima učenja (work-based education) se uvećavaju mogućnosti delovanja potkrepljenog praktičnim znanjem. Navedeni metod edukacije je lako primenjiv i u pripremi obuka za zaposlene na radnom mestu. Upravo radi lakše interakcije ljudi i robota, koja se može primeniti ne samo za programiranje robota, već i za obuku neiskusnih operatera, u ovom radu je predstavljen rezultat završnog master rada u vidu razvijenog korisničkog interfejsa za adaptivno upravljanje robotskog elektrolučnog zavarivanja. Time se daje doprinos u osmišljavanju inženjerske edukacije radi sticanja novih znanja i veština za potrebe Industrije 4.0, a praktično bazirane na eksperimentalnoj platformi za robotsko elektrolučno zavarivanje razvijene u okviru projekta TR 35007 u CMSysLab-u na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

**Ključne reči:** robotsko zavarivanje, edukacija, mala i srednja preduzeća, korisnički interfejs, programiranje

### 1. UVODNA RAZMATRANJA

Inženjerska praksa se sa različitostima između realnih i apstraktnih objekata [1] susreće u vidu odstupanja oblika gotovog dela od idealnog oblika ili položaja, koje se u okviru propisanog tolerancijskog polja proglašava dozvoljenim, a samim tim i prihvatljivim [2].

Suštinski problem koji se javlja u procesu robotskog zavarivanja su greške makrogeometrije sklopa koji se zavaruje i mikrogeometrije spoja/šava. Dodatno se

javljaju statičke i dinamičke greške pozicije delova sklopa i greške relativne lokacije kako sklopa tako i spoja/šava. Adaptivnim ponašanjem robotskog sistema moguće je kompenzovati sve navedene greške, koje utiču na kvalitet procesa zavarivanja.

Realizacija adaptivnog ponašanja robota u nedovoljno poznatom radnom okruženju, što podrazumeva različite oblike geometrijskih odstupanja koje zahtevaju promene na nominalnom radnom zadatku, su doveli do razvoja CyberFABRICATOR eksperimentalne

platforme za robotsko elektrolučno zavarivanje u CMSysLab na Mašinskom fakultetu u Beogradu. Sa istraživačko-razvojnog aspekta, praktična provera novih pristupa stvara uslove za efektivnu primenu robota u maloserijskoj i/ili ekstremno varijantnoj proizvodnji, što dalje razrešava problem finansijskih barijera i problem ljudskog resursa za primenu tehnologije robotskog zavarivanja u malim i srednjim preduzećima [3].

Sa edukativnog aspekta, navedena eksperimentalna platforma pruža jedinstvenu priliku studentima završne godine master akademskih studija, da kroz izradu završnog master rada kompletiraju veštine Kolbovog eksperimentalnog cikličnog modela učenja [4]. Posmatrajući revidiranu Blumovu taksonomiju ishoda obrazovanja inženjera u kognitivnom području [5], izrada završnog master rada pokriva tri kategorije na višim nivoima od ukupno šest hijerarhijski uređenih kategorija.

## 2. ROBOTSKO ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE

Robotsko zavarivanje podrazumeva zadovoljavajuću tačnost, ponovljivost i robusnost robota, a veća produktivnost, bezbednost, kvalitet i fleksibilnost su dokazane prednosti [6]. Konkretno, primena kod malih i srednjih preduzeća dovodi do najbolje jedinične cene rada u poređenju sa manuelnim radom ili krutom automatizacijom [6].

Za kvalitetno izведен postupak elektrolučnog zavarivanja, potrebno je da upravljačka jedinica robota vodi mlaznicu za zavarivanje definisanim putanjom i brzinom, uz određenu orientaciju i nagib u odnosu na zavareni spoj. Kretanje robotske ruke zadaje se definisanjem pozicije i orientacije završnog uređaja od strane operatera.

Za razliku od tradicionalnog korišćenja upravljačke konzole za obučavanje robota ili vođenje end efektora kao jednog od popularnih vidova kolaboracije čoveka i robota (eng. Programming by Demonstration - PbD), primena 3D CAD softvera omogućena je upotreba računara za programiranje (eng. Offline Programming) putanje zavarivanja sa

simulacijama van proizvodnih tokova. Pri tome simulacioni softver koristi 3D CAD modele radnog dela, pomoćnog pribora, robota za programiranje kompleksnih putanja. U tu svrhu generisan programski kod se može sačuvati, po potrebi lako modifikovati i ponovo pozivati čime se smanjuje zastoj u procesu proizvodnje prilikom programiranja putanje kod uvođenja novog dela.

U slučajevima koji se dešavaju u praksi, kao što je loše pozicioniranje komada, deformisanost komada ili međusobni odnos koji nije idealan, javlja se problemi iz razloga što robot nema informaciju o spoljašnjoj sredini. Ovakvi problemi zahtevaju primenu robota sa senzorima koji navedene greške mogu kompenzovati u tolerantnom vremenskom intervalu. Adaptivno upravljanje robota za zavarivanje. Sistemi poput ovih su izuzetno skupi i iz tog razloga se u proizvodnji mogu videti u nekim većim korporacijama ili u specijalizovanim laboratorijama [3, 7] gde se vrše testiranja i razvoj tehnologije.

### 2.1 Platforma za elektrolučno zavarivanje

#### *CyberFABRICATOR*

Platforma za elektrolučno zavarivanje CyberFABRICATOR se sastoji od robota Yaskawa Motoman MA1400 [3] i specijalno razvijenih senzorskih sistema organizovanih po stratumima, koje inteligentni korisnički interfejs povezuje sa operaterom. CyberFABRICATOR se neprestano hardverski i softverski dograđuje i proširuje. Ovde opisan korisnički interfejs za robotsko zavarivanje je jedan od dodatih softverskih modula, koji je realizovan u okviru postojećeg CAD sistema, konkretno SolidWORKS-a, sa ciljem olakšanog programiranja robota primenom računara.

### 2.2 Kreiranje inteligentnog korisničkog interfejsa u SolidWORKS okruženju

Interfejs, koji objedinjuje zasebno kreirane module za programiranje robotskog zavarivanja, je radi lakšeg snalaženja korisnika u ovom konkretnom programskom rešenju projektovan sa osnovnim ciljem da bude

jednostavan za upotrebu. Ekran inteligentnog korisničkog interfejsa generisan u CMSysLab je prikazan na slici 1.



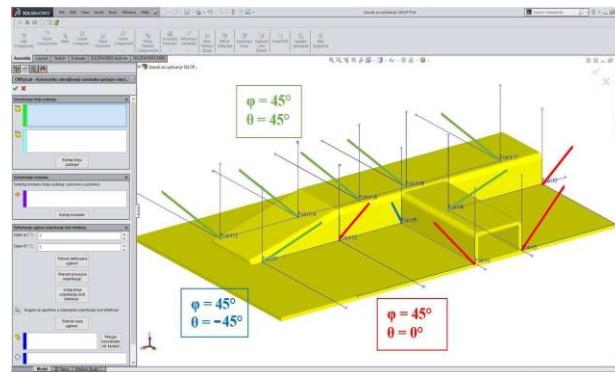
**Slika 1.** Prikaz ekrana CyberFABRICATOR korisničkog interfejsa

Prednost SolidWORKS-a da poseduje otvorenu arhitekturu dozvoljava korisnicima samostalnu automatizaciju i programiranje korišćenjem API (eng. Application Programming Interface) rutina, koje se koriste za automatizaciju redundantnog i dugotrajnog zadatka, kao i za kreiranje kompletnih inženjerskih aplikacija koje se pokreću unutar ili izvan samog SolidWorks aplikacije. API rutine sadrže veliki broj funkcija koje se mogu pozivati iz Visual Basic-a i obezbeđuju direktni pristup funkcijama SolidWORKS-a. U ovom konkretnom primeru to su kreiranje linija, unos već postojećih delova, verifikacija parametara površine i dr.

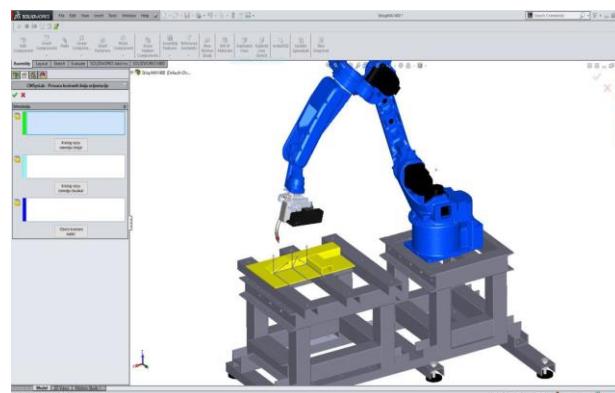
Inteligentni korisnički interfejs korisniku/operateru omogućava da kreira putanju za robotsko zavarivanje na samom CAD modelu i to selektovanjem površi u čijem preseku se dobijaju linije. Takođe je omogućeno da se definisu dva ugla nagiba mlaznice u odnosu na pravac kretanja ( $\theta, \phi$ ). Automatski se generišu tačke na putanji zavarenog spoja (x, y, z) i orijentacije mlaznice ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) za svaku od generisanih tačaka. Konačno se na osnovu vektora orijentacije end efektora, mogu odrediti uglovi orijentacije mlaznice, što je na slici 2 i prikazano crvenim linijama na modelu dela datog žutom bojom.

Dodatno je simulacijom omogućena automatska provera kreirane putanje zavarivanja i orijentacije mlaznice korišćenjem 3D modela robotske celije sa radnim komadom u okviru programskog paketa SolidWORKS (Sl. 3), čime se smanjuju troškovi

koji mogu nastati usled nepravilno definisane pozicije i orientacije mlaznice.



**Slika 2.** Model sa generisanim planom zavarivanja



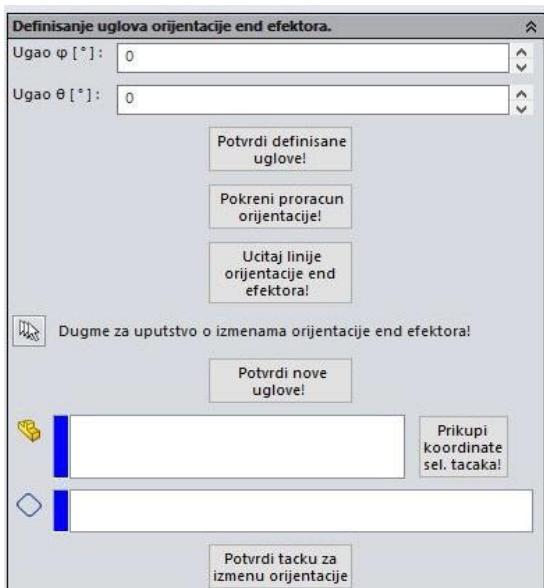
**Slika 3.** Grafički prikaz simulacije u okviru sklopa za ispitivanje

Algoritam rada inteligentnog korisničkog interfejsa je sledeći:

1. Ulaz u interfejs je CAD model dela za zavarivanje na kome se selektuju površi i zadaju dva ugla nagiba mlaznice ( $\theta, \phi$ ) u odnosu na pravac kretanja,
2. Generisanje vektora normale na površi,
3. Formiranje lokalnih koordinatnih sistema za svaki od šavova,
4. Automatsko generisanje putanje zavarenog spoja odnosno koordinata generisanih tačaka (x,y,z),
5. Određivanje orijentacije mlaznice ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) u koordinatnom sistemu robota na osnovu zadatih uglova mlaznice ( $\theta, \phi$ ) u lokalnom koordinatnom sistemu,
6. Automatsko generisanje programskog koda za zavarivanje na osnovu koordinata tačaka i orijentacije mlaznice (x, y, z,  $\alpha, \beta, \gamma$ ).

Na slikama 1-3, se grafički korisnički interfejs nalazi s desne strane ekrana sa

poljima za selekciju i unos podataka, što je izdvojeno i prikazano na slici 4.



Slika 4. Grafički prikaz korisničkog interfejsa

### 2.3 Prednosti inteligentnog korisničkog interfejsa u SolidWORKS okruženju

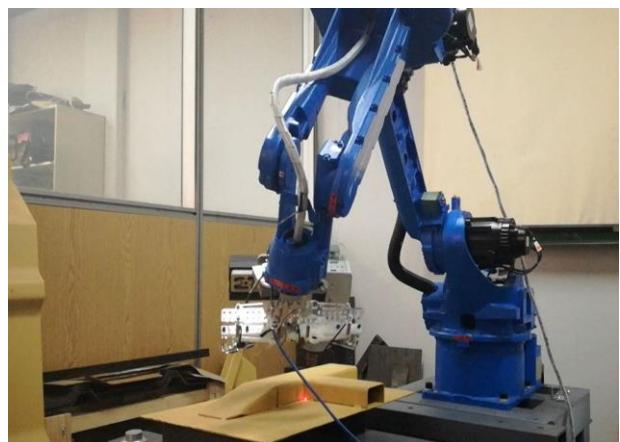
Prednost korisničkog interfejsa u okviru platforme za elektrolučno zavarivanje CyberFABRICATOR za operatera je višestruka:

- Kreirani korisnički interfejs se može koristiti kao zasebna celina ili kao dodatak već postojećim komandama SolidWORKS-a. Svakoj grupi korisničkog interfejsa se može zasebno pristupati, kao i dobijenim podacima, koji se smeštaju u spisak elemenata modela.
- Operater ima absolutnu kontrolu nad kodovima kroz korisnički interfejs, tako da nije potrebna posebna veština i znanje u programiranju. Neophodno je samo da je operater upoznat sa osnovama programa SolidWORKS, kako bi bez problema mogao da odredi nominalnu putanju robotskog elektrolučnog zavarivanja. Samim tim operater niže stručne spreme može biti angažovan na ovom radnom mestu.
- Nakon unosa dva ugla nagiba mlaznice u  $(\theta, \phi)$ , koji su definisani tehnološkim postupkom, kao izlaz dobijaju se automatski generisane orijentacije mlaznice  $(\alpha, \beta, \gamma)$  za svaku od tačaka  $(x, y, z)$  na putanji zavarenog spoja.

Takođe, postoji mogućnost pojedinačne izmene uglova  $(\theta, \phi)$  orijentacije mlaznice za određene šavove u slučaju kada je to tehnološkim postupkom zahtevano. Navedeno, omogućava uštedu u vremenu.

- Kroz simulaciju procesa robotskog zavarivanja, omogućeno je automatsko prepoznavanje kolizione situacije mlaznice i dela. Interfejs nudi korisniku alternativna rešenja parametara zavarivanja. Time se i robot i deo čuvaju od oštećenja i otkaza.
- Obuka za korisnički interfejs za robotsko zavarivanje je laka, s obzirom da koristi prednost poznatog grafičkog interfejsa postojećeg CAD sistema, a samim tim i upotreba dodatnih komandi za programiranje nominalne putanje je lakša u odnosu na korišćenje softvera specijalne namene.

Verifikacija korisničkog interfejsa je sprovedena u laboratorijskom okruženju u CMSysLab na opisanoj platformi za robotsko elektrolučno zavarivanje CyberFABRICATOR. Na slici 5 je prikazana scena zavarivanja gde je zrak simuliran laserskim snopom, na slici predstavljen crvenom tačkom na realnom objektu za zavarivanje.



Slika 5. Eksperimentalni rezultati za uglove  $\phi=45^\circ$  i  $\theta= -45^\circ$ .

### 3. ZAKLJUČAK

Na kraju dvogodišnjih master akademskih studija u oblasti mašinskog inženjerstva,

podrazumeva se da student poseduje kognitivne sposobnosti (matematičko i logičko rasuđivanje, kognitivna fleksibilnost, kreativnost, vizuelizacija) i osnovne veštine (aktivno učenje, razumevanje pročitanog, usmeno i pismeno izražavanje, tehnička pismenost), koje je razvio i/ili unapredio tokom studija. Izrada završnog master rada je prilika da se dodatno razviju multifunkcionalne tehničke i socijalne veštine i to one koje će kod budućeg inženjera činiti „jaču stranu“. U konkretnom slučaju, koji je predstavljen u ovom radu, izrada korisniku usmerenog interfejsa je zahtevala tehničke veštine za korišćenje opreme i programiranja, veštine za rešavanje kompleksnih problema i tzv. „meke“ veštine neophodne za pripremu operatora za adaptivno robotsko elektrolučno zavarivanje.

Celoživotno učenje koje je neizbežni deo koncepta Industrije 4.0 podstiče prvo samostalno učenje za posao, čime se stiču sposobnosti i veštine za pronalaženje i zadržavanje zaposlenja i drugo, učenje na poslu kroz obuku, što podiže nivo kompetencija zaposlenih kao odgovor na aktuelne izazove u industrijskoj proizvodnji. Prvo se upravo i postiže rešavanjem aktuelnih problema iz prakse kroz predstavljeni master rad, a za drugo se korisnički interfejs iz master rada može uspešno primeniti.

## ZAHVALNOST

Ovaj rad je rezultat aktivnosti na Projekatu „Inteligentni robotski sistemi za ekstremno diverzifikovanu proizvodnju“ TR35007, koje je finansiralo Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## INTERACTIVE USER INTERFACE FOR ROBOTIC ARC WELDING - APPLICATION IN ENGINEERING EDUCATION

**Abstract:** On-line programming of industrial robots in SME as often used method is time-consuming and production breaking method. Therefore, flexible, cost-effective and easy-to-use programming approaches are certainly needed to expand robotics in SME. The approach of cognitive info-communication in the human/robots interface in designing and monitoring the complete robotic welding process enables successful off-line programming. At the same time, the level of competence of employees in SME plays a key

## LITERATURA

- [1] Z. Pizlo, T. Sawada, Y. Li, W.G. Kropatsch, R.M. Steinman: New Approach to the perception of 3D shape based on verticality, complexity, symmetry and volume, *Vision Research*, Vol. 50, No. 1, pp. 1-11, 2010.
- [2] SRPS EN ISO 1101, *Geometrijske specifikacije proizvoda (GPS) – Geometrijsko propisivanje tolerancija – Tolerancije oblika, orientacije, položaja i bacanja*, 2017.
- [3] I. Danilov, P.B. Petrović, F. Korać, N. Lukić: Stratified Visual 3D Feedback for Adaptive Robotic Arc-Welding, *Proceedings of 2st International Conference on Electrical, Electronic and Computing Engineering, IcEtran 2015*, pp. ROI4.3 1-6, Silver Lake, Serbia, June 8 – 11, ISBN 978-86-80509-71-6. 2015.
- [4] D.A. Kolb: *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 1984.
- [5] B.S. Bloom, D.R. Krathwohl: *Taxonomy of Educational Objectives, Handbook 1: Cognitive Domain*, Addison-Wesley, New York, 1984.
- [6] P. Kah, M. Shrestha, E. Hiltunen, J. Martikainen: Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, Vol. 10, No 13, 2015.
- [7] A.L. Ames, E.M. Hinman-Sweeney, J.M. Sizemore: Automated generation of weld path trajectories in: *Proceedings of the 6th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning: From Nano to Macro Assembly and Manufacturing*, 9-21.07.2005, Montreal, Canada, rr. 182-187
- [8] N. Gvojić: *Inteligentni interfejs za interaktivno generisanje plana zavarivanja u tehnologiji robotske montaže zavarenih sklopova*, Master rad, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 2018.

*role in successful response to current challenges in industrial production, such as shorter product cycles, a greater number of product variants in terms of efficiency and digitization. In order to improve the existing competencies of employees and students as future engineers, there are several learning opportunities. Compared to learning through e.g. conventional lectures, students in practical work-based education increase the possibilities of action supported by practical knowledge. The mentioned method of education is easily applicable in employees training preparation at the workplace. In order to simplify human/robots interface, which can be applied not only for robot programming, but for training of inexperienced operators, this paper presents the developed user interface for adaptive control of robotic arc welding as result of the Master work. This contributes to the engineering education design for obtain new knowledge and skills required for Industry 4.0 and practically based on the robotic arc welding experimental platform developed within project No.TR 35007 at CMSysLab in Faculty of Mechanical Engineering, University of Belgrade.*

**Key words:** Robotic welding, Education, SME, User interface, Programming



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## CONTROL AND PROGRAMMING SYSTEM OF PARALLEL KINEMATIC MACHINE

Zoran DİMİC<sup>1,\*</sup>, Dragan MILUTINOVIĆ<sup>2</sup>, Saša ŽIVANOVIĆ<sup>2</sup>, Stefan MITROVIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LOLA Institute, Belgrade, Serbia, zoran.dimic@li.rs, stefan.mitrovic@li.rs

<sup>2</sup>University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Belgrade, Serbia,  
dmilutinovic@mas.bg.ac.rs, szivanovic@mas.bg.ac.rs

\*Corresponding author: zoran.dimic@li.rs

**Abstract:** The paper presents research and development results of control and programming system of parallel kinematic machine (PKM). The control system is based on G-code and two separate units: a real-time control system and an off-line system for G-code writing and editing, checking programme syntax and semantics and discovering and avoiding singular positions by simulating the machining programme in accordance with machine tool kinematics.

**Keywords:** Parallel Kinematic machine tools, Control system, Programming system, Off-line programming, G-code

### 1. INTRODUCTION

G-code programming has survived since the very beginning of numerical control until today. Numerous CAD/CAM tools used for 3D modelling and generating G-code programmes for machine tools of all types have been developed and are in use. G-code has become synonymous with machine tools and today it represents an intuitive and widely accepted programming model [1]. Modern and fast hardware with an efficient real-time operating system is an ideal platform for software-oriented CNC [2, 3, 4].

The revolution in the development of machine tools was brought about by the appearance of parallel kinematics machine (PKM) [5]. Their lower weight compared to conventional machine tools for the same stiffness of mechanism due to their closed kinematics loops with the possibility of

achieving far greater machining speeds is the main advantage that the technology of parallel kinematics machines brings [6]. On the other hand, the complexity of kinematic modelling largely impedes configuring the control of machine tools with parallel kinematics [7]. The inverse kinematics equations associated with singularities in the PKM workspace render the conventional machine tool control system useless. G-code interpretation during machining, without any previously performed simulations, could lead to unforeseen effects caused by mechanism singularities of PKM.

The paper proposes a control system based on G-code interpretation, which consists of a real-time software system for control of PKM and an off-line system for G-code writing and editing, checking programme syntax and semantics and simulating the machining programme in accordance with machine tool kinematics.

## 2. 2. CONTROL SYSTEM STRUCTURE

### 3.

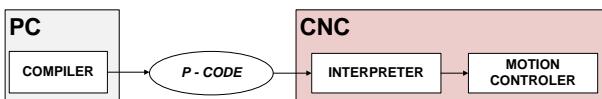
The complex kinematic structure of PKM indicates the construction of a control system that encapsulates the system kinematics. This enables the programming of PKM to be kinematically independent. It must be taken into account here that, before being executed in the machine, G-code must pass appropriate checks aimed at:

- Discovering and avoiding singular positions;
- Positioning the workpiece within the boundaries of PKM workspace;
- Identifying and eliminating collision situations of the machine and the workpiece, the machine and its environment and the machine elements with each other.

To overcome the difficulties in PKM programming, a control system has been proposed that consists of two software and hardware units. Figure 1 shows the structure of the proposed control system that includes:

Off-line programming and simulation system with the following tasks:

1. G-code syntax and semantics check;
2. Generating appropriate motion instructions at the simulator level and interpolating the programmed path;
3. Emitting a P-code as set of machining instructions checked by simulation in the previous steps.



**Figure 1.** Control System Structure

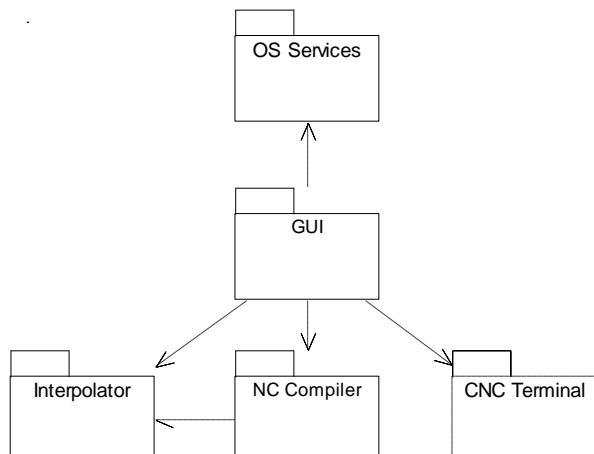
The CNC system, which, by analogy with the off-line system, interprets the P-code in real time, translating the code instructions into:

1. Motion by means of real-time interpolators and inverse kinematics;
2. Sequential functions by means of real-time sequential automaton.

## 3. OFF-LINE PROGRAMMING AND SIMULATION SYSTEM

Figure 2 shows a Unified Modelling Language (UML) package diagram of developed off-line programming system. The functionality of all software packages in the system is integrated by the GUI through several tasks delegated to it:

- G-code document browsing, opening, editing and saving;
- Interfacing G-code compiler (NC Compiler) functionality by using visual command elements;
- Displaying messages during the compilation, such as current compiling G-code programme line during the compilation, error messages etc.;
- Displaying results of interpolation task through graphical representation of programmed tool path;
- Hosting CNC Terminal which is transferring P-code file to controller and interfacing CNC controller functionality.



**Figure 2.** UML package diagram of NC Compiler developed off-line programming system

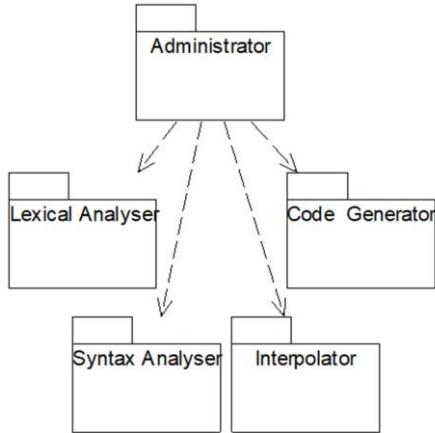
The compiler design is preceded by defining the Backus - Naur Form (BNF) notation for programming language, in our case G-code.

Tabel 1. BNF notation for G-code provides the BNF notation for the basic set of G-code instructions necessary and sufficient for programming one vertical milling machine.

**Table 1.** BNF notation for G-code

Rule No.	BNF notation	Limitations
1.	<b>Program</b> = ProgramBorder StartProgram ProgramBody ProgramEnd ProgramBorder	
2.	<b>ProgramBorder</b> = "%"	
3.	<b>StartProgram</b> = "L" "INTEGER"	StartProgram = "L" "INTEGER"- "INTEGER" must contain four digits
4.	<b>ProgramBody</b> = Line {Line}	
5.	<b>ProgramEnd</b> = "M30"   "M02" "NEW_LINE"	In single line can be M02 or M30
6.	<b>Line</b> = "NEW_LINE" LineNumber [ExactStopInstruction   StopInstruction   InstructionQueue]	
7.	<b>LineNumber</b> = "N" "INTEGER"	LineNumber = "N" "INTEGER"- Line numbers must be in ascending
8.	<b>InstructionQueue</b> = { GInstruction   MInstruction   Coordinates   SCode   SRCode   FCode   HCode}	
9.	<b>ExactStopInstruction</b> = G09   ( G04 [ PCode ] )	
10.	<b>StopInstruction</b> = "M00"	
11.	<b>SCode</b> = "S" " INTEGER  "	SCode = "S" "INTEGER"- SCode can be only one in single line - INTEGER range is: 00 - 99999
12.	<b>HCode</b> = "H" "INTEGER"	HCode = "H" "INTEGER" - HCode can be only one in single line - INTEGER range is: 00 - 99
13.	<b>FCode</b> = "F" "Real"	FCode = "F" "Real"- FCode can be only one in single line - "Real" is in format 5.1
14.	<b>PCode</b> = "P" "INTEGER"	PCode = "P" "INTEGER" - PCode can be only one in single line
15.	<b>Coordinate</b> = ( "X"   "Y"   "Z"   "I"   "J"   "K"   "R" ) SimpleExpression	
16.	<b>SimpleExpression</b> = [Sign] Monom {AddOperatorAndMonom}	
17.	<b>Sign</b> = "+"   "-"	
18.	<b>Monom</b> = Factor {MulOperatorAndFactor}	
19.	<b>AddOperatorAndMonom</b> = AddOperator Monom	
20.	<b>MulOperatorAndFactor</b> = MulOperator Factor	
21.	<b>Factor</b> = SimpleExpressionWithBrackets   "Real"   Variable	
22.	<b>SimpleExpressionWithBrackets</b> = "OPEN_BRACKET" SimpleExpression "CLOSED_BRACKET"	
23.	<b>GInstruction</b> = P0Group   P1Group   P3Group   4Group   P5Group   P6Group   P7Group   P8Group	
24.	<b>P0Group</b> = "G15"   "G16"	
25.	<b>P1Group</b> = "G00"   "G01"   "G02"   "G03"	
26.	<b>P3Group</b> = "G17"   "G18"   "G19"	
27.	<b>P4Group</b> = "G20"   "G21"	
28.	<b>P5Group</b> = "G43"   "G44"	
29.	<b>P6Group</b> = "G53"   "G54"   "G55"   "G56"   "G57"   "G58"   "G59"	
30.	<b>P7Group</b> = "G61"   "G62"   "G64"	
31.	<b>P8Group</b> = "G90"   "G91"	
32.	<b>MInstruction</b> = "M03"   "M04"   "M05"   "M07"   "M07"   "M08"   "M09"   "M10"   "M11"   "M60"	

A compiler generator is usually used when developing a compiler for structured programming languages. Due to the specific structure and semantics of G-code, the NC Compiler proposed in this paper was developed manually (Fig.3).



**Figure 3.** UML package diagram of NC Compiler

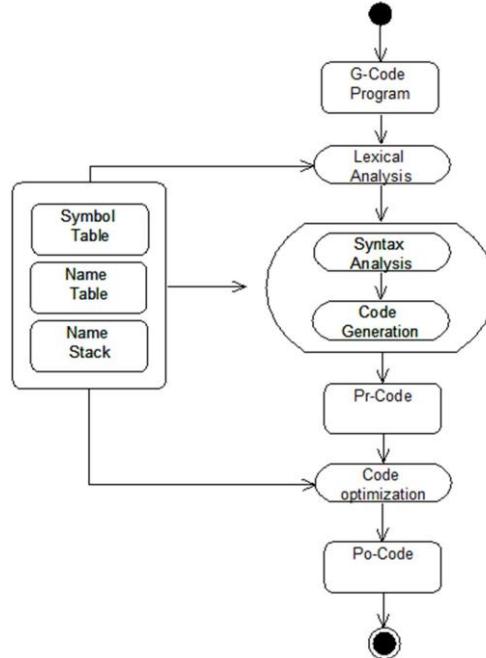
The recursive descent method was selected for developing the compiler [8,9]. An intermediate code (P-code) corresponding to the source G-code logic was defined to make the developed compiler portable and adaptable. The compiler translates the source code into the intermediate code, P-code, which is interpreted on the CNC during programme execution.

The compilation is executed in two passes (Fig. 4). In the first pass, the Lexical Analyser package, whose component model is shown in Fig. 5, reads character by character from the G-code file, forms words and, using the Hash algorithm, finds them in the Symbol Table. Afterwards, according to the rules defined in the BNF, a syntax and semantics analysis is performed and the intermediate code is generated.

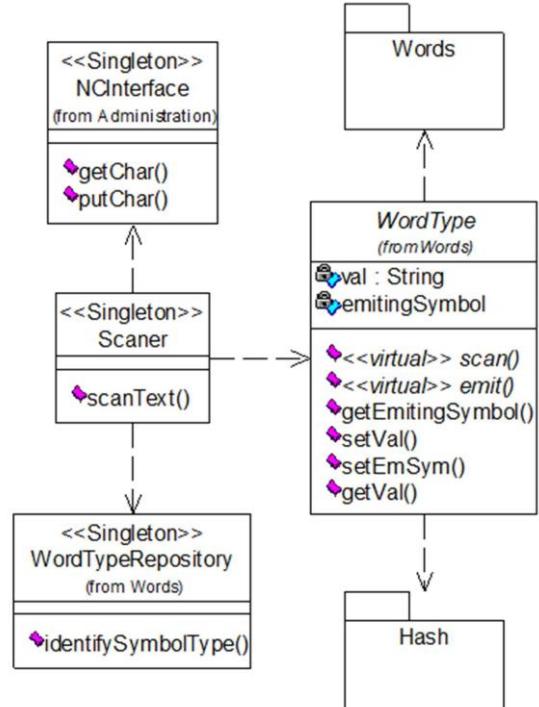
In the second pass, look a heads are solved and the code generated in the first pass is optimised. The compilation steps, characteristic of higher-level programming languages, are kept to be able to expand G-code with the elements of structured programming languages. All of the above activities are coordinated by the Administrator programming package.

The recursive descent requires observing certain restrictions in language grammar. The

language grammar must be LL(1)<sup>1</sup> grammar. Furthermore, the compiler must be developed in a higher-level language that allows recursion. The G-code compiler was developed in the spirit of object-oriented programming in C++.



**Figure 4.** UML activity model of NC Compiler



**Figure 5.** UML component model of Lexical Analyser

<sup>1</sup> Top-down parser which uses 1 token of lookahead when parsing a sentence

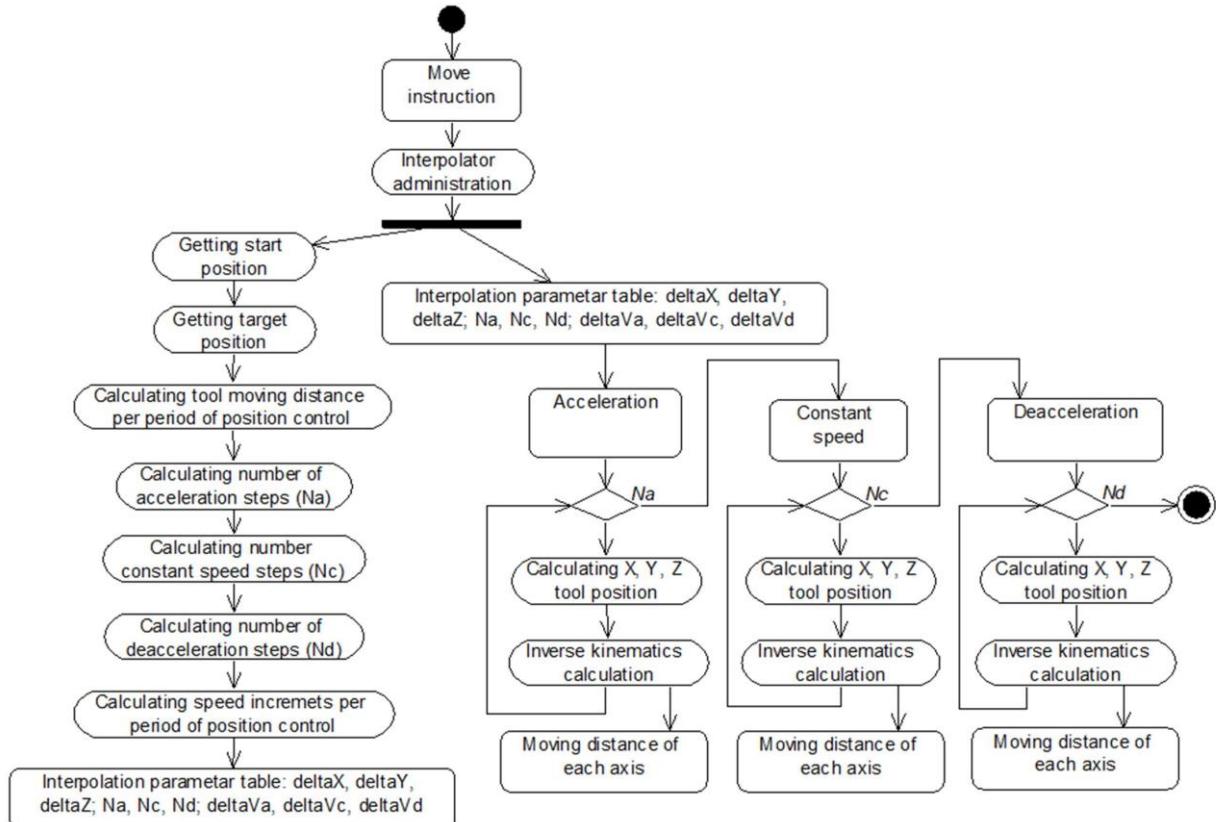


Figure 6. UML activity model of Interpolator

$P_0$ -code was obtained by  $P_r$ -code optimisation.  $P_0$ -code was adapted to support real-time machining programme execution, motion commands and modularity.  $P$ -code was treated as a separate language having a code syntax that defines code commands and code sentences. When designing the code syntax, it was strived to make the code commands correspond directly to the concepts and the source syntax of G-code.

In order for  $P_0$ -code to be designated as valid for the execution on a PKM, it must pass one more check, Fig.6.

This check involves interpolation of motion instructions in the off-line system. Then the off-line system becomes a virtual CNC that executes the motion instructions by generating the tool tip path and the profiles of tool tip speeds and acceleration as well as individual joints of the PKM. It is also checked whether the joints are within their defined ranges of motion, speed and acceleration. In the case of detecting any collision situations, the compiler execution stops and an appropriate error message is created. The proposed control system interpolates the path

using the Sampled-Data interpolation method [10].

System integrators are provided with the possibility to define maximum joints acceleration for the specific PKM as well as the method of connecting the two motions in the cases where continuous path interpolation is required. It is necessary to set a parameter that defines the radius of the approximate motion area, i.e. the radius of the area in which the tool deviates from the programmed path, in order to reduce inertial forces and maintain the programmed machining speed (Fig.7).

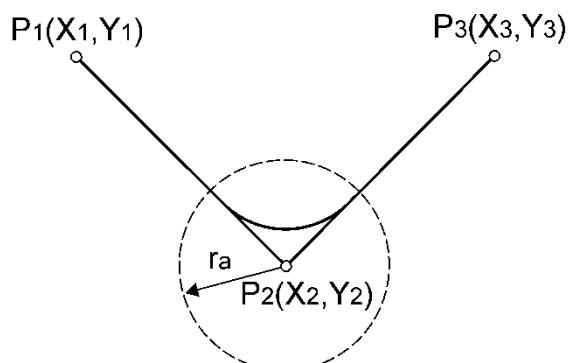


Figure 7. Approximate motion

The GUI of the off-line programming and simulation system is designed and executed under Windows (Fig.8). The CAM-generated G-code is compiled in the off-line system, and the results obtained by the compilation are a

simulated tool path (Fig. 8) and a P<sub>t</sub>-code, which is transferred by means of the CNC Terminal (Fig. 9) to the CNC, where it is interpreted in real time.

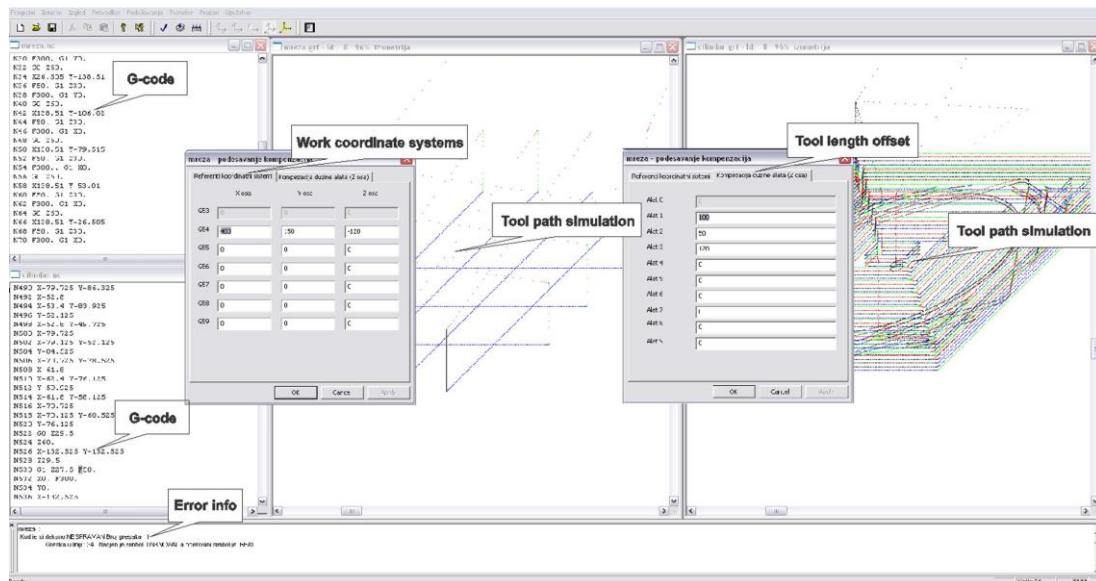


Figure 8. G-code programme and simulated tool path in off-line programming environment

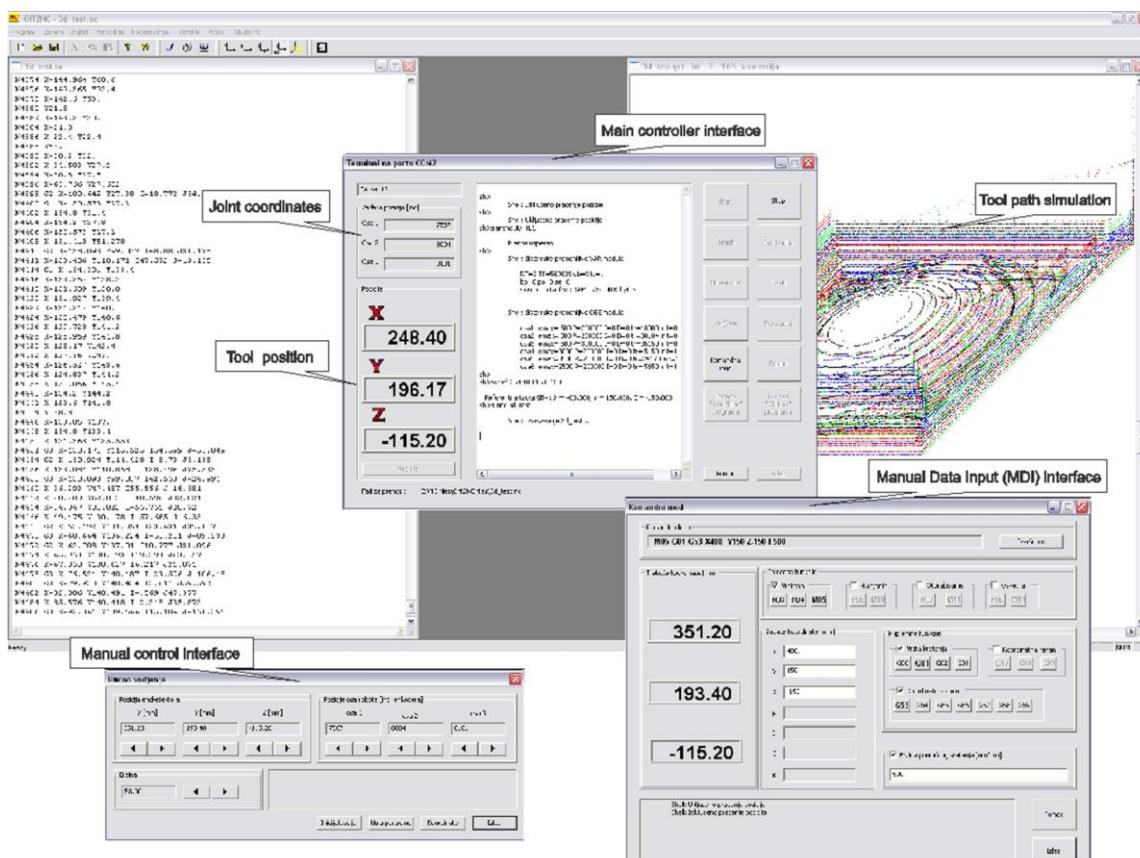


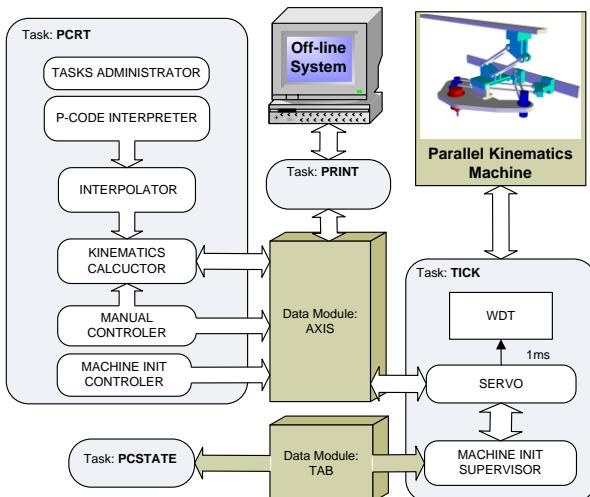
Figure 9. Off-line system with interface for communication with real-time controller

#### 4. REAL-TIME PKM CONTROL SYSTEM

Real-time PKM control system is a software system segment responsible for:

- Maintenance of position servo loops;
- Real-time interpretation of P<sub>t</sub>-code commands;
- Communication with the GUI through displaying basic status information about PKM;
- Manual control of PKM in a Cartesian coordinate system;
- Manual control of PKM in the joints coordinate system;
- PKM initialisation.

As software that operates in real time, the real-time PKM control system consists of several competitive tasks of different priorities (Fig.10). Real-time system tools such as signal and event were used for inter-task synchronisation and data modules were used for inter-task data exchange.



**Figure 10.** Structure of real-time PKM control system

PCRT (PKM Control Real-time Task) is the main task in the system that is executed periodically every 5ms. It performs all necessary computer system hardware initialisations, creates necessary resources, sets system parameters and initiates other tasks:

- TICK task with servo control loops;

- PCSTATE task for scanning the status of digital inputs;

- PRINT task for communication with GUI.

TICK is the top priority task that is executed periodically every 1ms by using an installed cyclical alarm. Being the first task, it is started from PCRT and contains an initialisation algorithm and a servo loops.

The PRINT task creates a communication channel to the off-line system GUI. PRINT performs the following functions:

- Provides the protocol for communication with the off-line system GUI;
- Forwards information to the off-line system on the sensor status before and during the PKM initialisation;
- Periodically forwards data to the off-line system on the tool tip position as well as on the positions of PKM joints.

PCSTATE is a task that is activated every 5ms and performs the following functions:

- Scans the status of digital inputs and forwards the information to other tasks;
- Installs the FINISH intercept routine, which waits for the operation end signal from PCRT;

#### 5. EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE CONTROL SYSTEM

For the purpose of experimental verification, the control system was configured to control LOLA pn101\_4 V.1. vertical parallel kinematics milling machine (Fig. 11).



**Figure 11.** Vertical 3-axis parallel kinematics milling machine

Kinematic modelling was performed for the parallel mechanism of the machine tool. Since the system should enable the use of the existing CAD/CAM systems, it was necessary to:

- Establish coordinate systems of the machine, tool and workpiece according to the machine tool conventions (Fig. 12);
- Define position and joint coordinates;
- Solve the direct and inverse kinematics problem;
- Analyse singularities and define the workspace [11,12].

Figure 12 represents a geometric model of a vertical milling machine prototype for which the developed control system is configured.

Coordinate frames  $\{B\}$  and  $\{P\}$  attached to the base and mobile platform are always mutually parallel due to the mechanism's nature. Vectors  $v$  referenced in frames  $\{B\}$  and  $\{P\}$  are denoted by  ${}^Bv$  and  ${}^Pv$ . Coordinate frame  $\{P\}$  is attached to the mobile platform in a way that may later offer advantages for platform manufacturing and calibration of the machine.

Vectors defined by the machine's parameters:

- The position vectors of the midpoints  $P_i$  between joint centres at the mobile platform are defined in the frame  $\{P\}$  as  ${}^Pp_{pi}$ ,  $i = 1, 2, 3$ , where  ${}^Pp_{p1} = [c_4, d, z_{p2}]^T$ ,  ${}^Pp_{p2} = [0, 0, z_{p2}]^T$ ,  ${}^Pp_{p3} = [x_{p3}, 0, z_{p3}]^T$ ;
- The position vector of the tool tip is defined in the frame  $\{P\}$  as  ${}^Pp_T = [x_T, y_T, z_T]^T$ ;
- The position vectors of driving axes reference points  $O_i$  and the position vectors of the midpoints of joint centres on the sliders are defined in the coordinate frame  $\{B\}$  as  ${}^Bp_{0i}$  and  ${}^Bd_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ , where  ${}^Bp_{01} = {}^Bp_{02} = 0$ ,  ${}^Bp_{03} = [0, -y_{03}, z_{03}]^T$ ,  ${}^Bd_1 = {}^Bd_3 = 0$  and  ${}^Bd_2 = [0, -d, 0]^T$ .

Joint coordinates vector:

- $p = [p_1, p_2, p_3]$ , where  $p_i, i = 1, 2, 3$  are scalar variables controlled by actuators

while  ${}^B\alpha_i = [1, 0, 0]^T, i = 1, 2, 3$  are unit vectors.

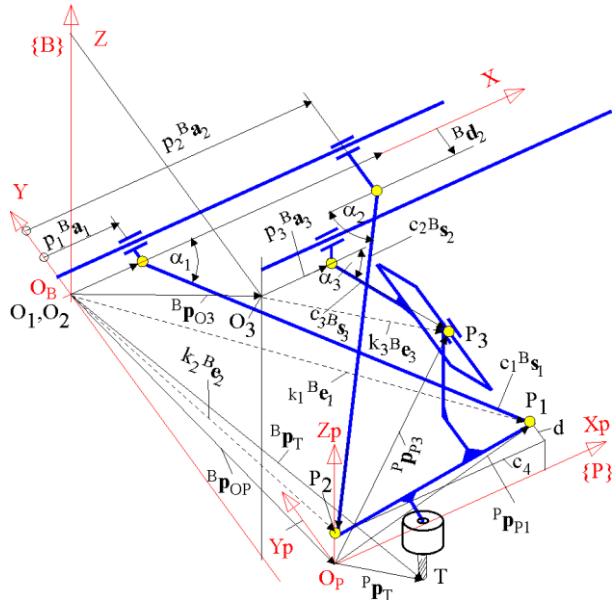


Figure 12. Kinematic model of parallel mechanism

World coordinates vector:

- ${}^Bp_T = [x_T, y_T, z_T]^T = x$  represents the position vector of the tool tip, while  ${}^Bp_{OP} = [x_p, y_p, z_p]^T$  represents location of the platform, i.e. origin  $O_P$  of the coordinate frame  $\{P\}$  attached to it. The relationship between these two vectors is obvious since coordinate frames  $\{B\}$  and  $\{P\}$  are always mutually parallel, i.e.

$${}^Bp_T = {}^Bp_{OP} + {}^Pp_T, \quad (1)$$

Other vectors and parameters are defined as shown in Fig. 12, where  ${}^Bw_i$  and  ${}^Bz_i$ ,  $i = 1, 2, 3$  are unit vectors while  $c_i, i = 1, 2, 3$  are fixed lengths of joint parallelograms [13].

Based on geometric relations shown in Fig. 12, the following equations are derived:

$$\begin{aligned} k_i {}^Bw_i &= {}^Bp_{OP} + {}^Pp_{pi} - {}^Bp_{0i} \\ k_i {}^Bw_i &= p_i {}^B\alpha_i + {}^Bd_i - c_i {}^Bz_i, \end{aligned} \quad (2)$$

As the vectors  ${}^B\alpha$  and  ${}^Bd_i$  are orthogonal to each other if the square of both sides in Eq. (3) is taken, the following relation is derived:

$$c_i^2 = p_i^2 - 2p_i({}^B\alpha_i k_i {}^Bw_i) + (k_i {}^Bw_i - {}^Bd_i)^2, \quad (3)$$

By substituting the machine's parameters in Eq. (4), the system of the following three equations is obtained:

$$p_1^2 - 2p_1(x_T - x_{TP} + c_4) + (x_T - x_{TP} + c_4)^2 + (y_T - y_{TP} + d)^2 + (z_T - z_{TP} + z_{p2})^2 - c_1^2 = 0, \quad (5)$$

$$p_2^2 - 2p_2(x_T - x_{TP}) + (x_T - x_{TP})^2 + (y_T - y_{TP} + d)^2 + (z_T - z_{TP} + z_{p2})^2 - c_2^2 = 0, \quad (6)$$

$$p_3^2 - 2p_3(x_T - x_{TP} + x_{p3}) + (x_T - x_{TP} + x_{p3})^2 + (z_T - z_{TP} + z_{p3} - z_{03})^2 - c_3^2 = 0, \quad (7)$$

from which are derived:

- inverse kinematics equations as

$$p_1^2 = x_T - x_{TP} + c_4 - \sqrt{c_1^2 - (y_T - y_{TP} + d)^2 - (z_T - z_{TP} + z_{p2})^2}, \quad (8)$$

as well as

- direct kinematics equations as

$$x_T = x_{TP} + \frac{p_2^2 + c_1^2 - c_2^2 - (p_1 - c_4)^2}{2(p_2 - p_1 + c_4)}, \quad (9)$$

$$z_T = z_{TP} + z_{03} - z_{p3} - \sqrt{c_3^2 - (p_3 - (x_T - x_{TP} + x_{p3}))^2}, \quad (10)$$

$$y_T = y_{TP} - d - \sqrt{c_2^2 - (p_2 - x_T + x_{TP})^2 - (z_T - z_{TP} + z_{p2})^2}, \quad (11)$$

The solution of the direct kinematics problem for the machine general case in explicit form is impossible, although this may be achieved, as shown, by the suitable selection of machine's parameters in order to simplify nominal geometric model [11, 12].

Bringing the machine to reference position was preceded by integrating the inverse and direct kinematics equations into the control

system. The main objective of the experimental verification is to test the performance of the control system prototype. A PTC Creo CAD/CAM system was used for generating G-code of the programme and the idea was to programme the vertical parallel



**Figure 13.** Machined test pieces

kinematics milling machine in the same way as the conventional vertical milling machine. Prior to machining, the programme was first compiled and tested in an off-line system. Figure 13 shows CAD model and the first machined test piece.

## 5. CONCLUSIONS

This paper presents a control system designed for controlling PKM. Advantages have been confirmed of the control system that encapsulates the kinematics of parallel machine, which enables programming using G-code processed for conventional machining. It has been pointed out that it is necessary to have an off-line system for programming and checking the programming code in order to prevent breakdown situations in PKM. The software system designed as platform-independent provides the possibility for it to be integrated in an open-architecture hardware platform in future implementations.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia for providing financial support that made this work possible.

## REFERENCES

- [1] B. Arthaya, A. Setiawan, S. Sunardi: The design and development of G-code checker and cutting simulator for CNC turning operation, *Journal of Mechanical Engineering Research* Vol. 2, No. 3, pp. 58–70, 2010.
- [2] H. Ji, Y. Li, J. Wang: A software oriented CNC system based on Linux/RTLinux, *The international journal of advanced manufacturing technology*, Vol. 39, pp. 291–301, 2008.
- [3] T. Staroveski, D. Brezak, T. Udiljak, D. Majetic: Implementation of a Linux-based CNC open control system, in: *Proceedings of the 12th International Scientific Conference on Production Engineering – CIM2009*, 2009, Biograd, Croatia, Croatian Association of Production Engineering, Zagreb, pp 210–216.
- [4] S. Park, S.H. Kim, H. Cho: Kernel software for efficiently building, re-configuring, and distributing an open CNC controller, *The international journal of advanced manufacturing technology*, Vol. 27, pp. 788–796, 2006.
- [5] Y. Koren, S. Kota: *Reconfigurable Machine Tool*. US Patent 5 943 75, 1997.
- [6] M. Weck, D. Staimer: Parallel Kinematic Machine Tools – Current State and Future Potentials. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 51, No. 2, pp.671-683, 2002.
- [7] J-P. Merlet, F. Pierrot: *Modeling of Parallel Robots. In Modeling, Performance Analysis and Control of Robot Manipulators*. London UK: ISTE Ltd, 2007.
- [8] A. Aho, R. Sethi, J. Ullman: *Compilers Principle, Techniques and Tools*, Addison Wesley, 1986.
- [9] H.P. Brinch: *Brinch Hansen on Pascal Compilers*, New Jersey, Prentice-Hall Inc, 1985.
- [10]S-H. Suh, S-K. Kang, D-H. Chung, I. Stroud: *Interpolator. In: Theory and Design of CNC Systems*, pp. 69–106. Springer-Verlag London Limited, 2008.
- [11]D. Milutinovic, M. Glavonjic, V. Kvrgic, S. Zivanovic: A New 3-DOF Spatial Parallel Mechanism for Milling Machines with Long X Travel. *Annals of the CIRP*, Vol. 54, No.1, pp.345–348, 2005.
- [12]M. Glavonjic, D. Milutinovic: Parallel structured milling machines with long X travel. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* Vol. 24, pp. 310–320. 2008.
- [13]T. Arai, T. Tanikawa, J-P. Merlet, T. Sendai: Development of a new parallel manipulator with fixed linear actuator, in: *Proceedings of the Japan/USA Symposium on Flexible Automation (ASME 1996)*, pp. 145–149, 1996.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

### 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## LEAN POSLOVNA PRAKSA KAO PODRŠKA IMPLEMENTACIJI QMS PO ZAHTEVIMA ISO 9001:2015

Mirko ĐAPIĆ<sup>1</sup>, Ljubomir LUKIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Srbija

[djapic.m@mfkv.kg.ac.rs](mailto:djapic.m@mfkv.kg.ac.rs), [lukic.lj@mfkv.kg.ac.rs](mailto:lukic.lj@mfkv.kg.ac.rs)

**Apstrakt:** Savremeni tržišni uslovi nameću organizacijama sve strože zahteve. Orientacijom na kvalitet proizvoda je jedna od optimalnih strategija koja omogućava opstanak i razvoj na tržištu koje se sve više globalizuje. Poslovna praksa zahtevana standardom ISO 9001 je često nedovoljna da bi organizacija opstala na tržištu. Zbog toga mnoge organizacije uporedno sa razvojem i implementacijom QMS-a operativne procese optimiziraju implementacijom Lean alata. U rad je dat koncept povezivanja zahteva standarda ISO 9001:2015 sa potencijalnom primenom Lean alata koja treba da doprines unapređenju efektivnosti implementiranog QMS-a.

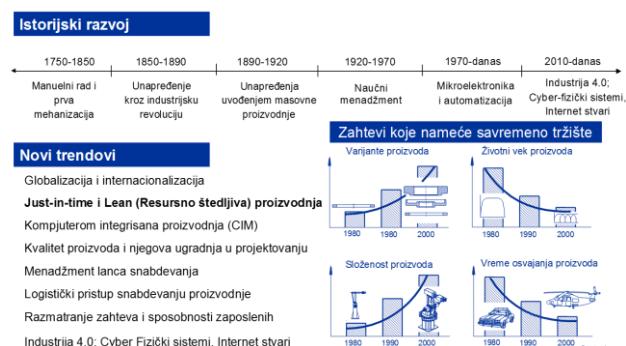
**Ključne reči:** QMS, Lean, ISO 9001, Poslovna praksa, Lean alati

### 1. UVOD

Porast produktivnosti je danas doveo do značajne disproportcije između ponude i potražnje većine industrijskih proizvoda. Instalirani kapaciteti za proizvodnju su u mogućnosti da proizvedu mnogo više proizvoda nego što sadašnjoj populaciji ljudi treba. Kada se tome doda unapređenje sistema transporta i komunikacija dolazimo do osnovnog razloga zašto se razvijeni svet opredelio za proširenja zone slobodne trgovine koji se danas naziva globalizacija.

Proizvodnim organizacijama se nameću novi i sve stroži zahtevi (Slika 1.) koji se ogledaju s jedne strane u sve većoj konkurenčiji a s druge strane u stalnim promenama zahteva kupaca. Da bi organizacija bila konkurentna, mora da isporuči proizvode koji u potpunosti ispunjavaju zahteve kupaca, da to uradi u najkraćem vremenskom roku i sa

najnižim troškovima proizvoda u životnom veku. Opstanak organizacije je u vezi sa njenom sposobnošću da se transformiše i ispuni ove uslove. Ko se ne prilagodi ovim promenama i ko ne nađe put za zadovoljenje kupaca nema veliku šansu da prezivi.



Slika 1: Razvojni trendovi u proizvodnji

Opredeljujući se da zadovoljenje svojih kupaca ostvare kroz kvalitet proizvoda ili usluga predstavlja veliku stratešku promenu

kod mnogih organizacija. Tako kvalitet postaje strateški alat pomoću koga se ostvaruje konkurenčna pozicija, odnosno unapređenje i održavanje kvaliteta postaje važan segment poslovne strategije svake organizacije koja želi da bude lider na tržištu.

U ostvarivanju kvaliteta proizvoda danas se u najvećem broju slučajeva organizacije oslanjaju na međunarodne standarde serije ISO 9000 ([1] do [3]), odnosno na zahteve standarda ISO 9001:2015 ([1] i [7] do [9])).

Da li je poslovna praksa [4] koju nameću standardi serije ISO 9000 dovoljna da odgovori na zahteve savremenog tržišta. Izgleda da ne [5]. Zbog toga mnoge organizacije u pokušaju da dosegnu najbolju poslovnu praksu implementiraju Lean koncept koji bazira na konceptu Toyota proizvodnog sistema koji se razvija od početka pedesetih godina prošlog veka do danas ([10] do [21]).

Ovaj rad je u osnovi proširenje rada [22] koje su autori objavili na skupu DQM-2018. U odnosu na prethodni rad daje se koncept povezivanja Lean alata, zahteva standarda ISO 9001:2015, PDCA ciklusa i nivoa planiranja što sigurno može da doprinese unapređenju implementacije QMS-a (Quality Management System) u organizacijama. U tom cilju prvo se daje odgovor na pitanje: Šta je to najbolja poslovna praksa i kako se definiše? Na bazi toga predstavljena je poslovna praksa koju zagovaraju ISO 9001:2015 standard i Lean koncept. Na kraju se daje koncept (radni okvir) na bazi koga je moguće integrisati Lean alate u postupku implementacije QMS.

## 2. ŠTA JE TO NAJBOLJA PRAKSA I KAKO SE DEFINIŠE

Najbolja praksa je pojам sa kojim se srećemo u svakodnevnom životu i radu. Pretragom po Internetu moguće je naći na hiljade knjiga, radova, studija itd. koje u naslovu između ostalog imaju najbolju praksu. U vrlo malo njih se može naći eksplicitna definicija šta se podrazumeva pod tim pojmom. Razlozi za to su verovatno što autori smatraju da je to opšte prihvaćen pojам, koga većina

ljudi razume na približno isti način i nema potrebe da bude posebno definisan.

Slična je situacija i sa napr. pojmom „dobra inženjerska praksa“ koja se javlja u direktivama Novog pristupa u okviru Tehničkog zakonodavstva Evropske Unije.

Da bi se smanjila konfuzija i pogrešno tumačenje potrebno je neke termine eksplicitno definisati. Kao potvrda ovog poslužićemo se Van Haren Publishing pristupom [4]. Oni su uočili da postoji velika konfuzija u korišćenju i značenju termina kao što se „standard“, „najbolja praksa“, „korpus znanja“ (body of knowledge), „radni okvir“ (framework), „upustvo“ (guidance), metod, model itd. U cilju promocije i uspostavljanja konsistentnog korišćenje ovih termina u svojim publikacijama definisali su značenje prethodnih termina na osnovu opsežne analize najbolje prakse i doprinosa široke grupe zainteresovanih strana.

U tom cilju najbolje je prvo definisati šta je to „praksa“? Tako je „praksa“ definisana [4]: „*Kao opisan način na koji profesionalci obavljaju poslove u domenu svoje struke u cilju realizacije specificiranih zadataka*“. Vezano za to „najbolja praksa“ se može definisati kao opis najboljeg načina odvijanja poslova u organizaciju u trnutnoj situaciji.

S druge strane jedna od najuglednijih organizacija u oblasti kvaliteta u svetu ASQ (American Society of Quality) definiše „najbolju praksu“ [6] kao: „*Napredni metod ili inovativna praksa koja doprinosi unapređenju performansi organizacije i koja je obično prepoznata kao najbolja od srodnih organizacija*“. Ovde su važne dve stvari. Prvo, da bi se poslavna praksa mogla smatrati najboljom mora da omogući značajno unapređenje performansi organizacije. Drugo takva praksa mora da bude prepoznata od srodnih organizacija kao najbolja.

Dobra praksa koju zagovaraju, odnosno zahtevaju međunarodni ISO standardi za sisteme menadžmenta je prepoznata od najšireg kruga zainteresovanih strana kao praksa koja doprinosi unapređenju performansi organizacije. Procedura usvajanja ISO standarda to potvrđuje jer kao što je

poznato kroz standarde se definišu proizvodi, procesi i sistemi koji su prihvatljeni za najširi krug korisnika.

Prva konstatacija da poslovna praksa mora da doprinosi unapređenju performansi organizacije u slučaju prethodno pomenutih ISO standarda ne zavisi od onoga ko je postavio zahteve za tom praksom već od spremnosti organizacija i načina na koji se ona implementira.

### 3. NAJBOLJA POSLOVNA PRAKSA I ZAHTEVI STANDARDA ISO 9001

Poslovni sistemi menadžmenta se uspostavljaju i implementiraju da bi omogućili:

1. **Dobru praksu za odvijanje poslova i upravljanje na menadžment nivou organizacijom** i da bi obezbedili
2. **Konsistentno** (dosledno, stalno na isti način, posmatrana na duge staze) **odvijanje aktivnosti**

Sadrže više funkcija/disciplina. Metodi implementacije se razlikuju.

Šta su to standarizovani sistemi menadžmenta?

“*Skup međusobno povezanih i međusobno delujućih elemenata neke organizacije koji se odnose na uspostavljanje politike kvaliteta, ciljeva i procesa za postizanja tih ciljeva.*” (ISO 9000:2015 definicija)

Drugim rečima.....TO SU SISTEMI FOKUSIRANI NA REZULTATE KOJI AKO SE IMPLEMENTIRAJU NA PRAVI NAČIN OMOGUĆAVAJU:

- ISO 9001 – “Konsistentnost u isporuci usaglašenih proizvoda/usluga”
- ISO 14001 – “Zaštitu od zagadženja”
- ISO 45001 – “Bezbednost radnih uslova”
- ISO 50001 – “Efikasno korišćenje energije”
- ISO 22000 – “Bezbednost hrane”
- ISO/IEC 27001 – “Bezbednost informacionih resursa”
- Itd.

Tako napr. Quality Management System (menadžment sistem za kvalitet po zahtevima standarda ISO 9001) QMS – predstavlja deo menadžment sistema organizacije koji je orijentisan na kreiranje novih i zadržavanje

postojećih kupaca kroz procese: razumevanja potreba kupaca, planiranja, projektovanja i isporuka proizvoda i/ili usluga koji zadovoljavaju ove potrebe.

Kao što je napred navedeno dobra praksa je potrebna da bi se obezbedio optimalni izlazni rezultat, odnosno ona je postala optimalni metod za osiguranje tih izlaza. Dobra praksa je vremenom ugrađena u zahteve standardzovanih sistema menadžmenta.

Prema [7] napr. u standard ISO 9001 ugrađeni su zahtevi za dobrom praksom (Slika 2.) iz tri oblasti:

1. Dobra praksu za kontrolisanje proizvoda/usluga i izlaza iz procesa.
2. Dobra praksa za aktivnosti top menadžmenta u cilju podrške dobroj praksi za kontrolisanje proizvoda/usluga i izlaza iz procesa.
3. Dobra praksa za transparentnost odvijanja poslova u organizaciji.



Slika 2: Dobra poslovna praksa ugrađena u standard ISO 9001 (Adaptirano na osnovu [7])

Dobra praksa je kao „pokretna meta“ stalno se menja, evaluira što uslovjava da menadžment sistemi doživljavaju neki oblik revizije svakih desetak godina. U njih se ugrađuju zahtevi za poslovnom praksom koja se pokazala validnom u prethodnom periodu. Sada se očekuje od organizacija da implementiraju tu praksu kroz razvoj, unapređenje i sertifikaciju svojih menadžment sistema čime obezbeđuju odvijanje poslovnih procesa na savremen i transparentan način.

**Ili bi tako trebalo da bude???**

Tako ako posmatramo standard ISO 9001:2015 i njegovu promenu u odnosu na verziju iz 2008 godine može se konstatovati da postoje promene u strukturi, terminologiji,

zahtevima i u elementima koji su više naglašeni ali nema promene u nameni, ciljevima i opsegu primene standarda.

Najznačajnije promene su prema [8]:

- Struktura standarda je prilagođena strukturi standarda za sisteme menadžmenta na najvišem nivou koja je data u Aneksu SL ISO Direktive 1;
- Uvedeni su eksplizitni zahtevi za razmišljanje na bazi rizika kao podrška i unapređenje razumevanja u primeni procesnog pristupa;
- Smanjen je obim propisujućih zahteva;
- Veća je fleksibilnost u pogledu dokumentacije;
- Poboljšana je primenljivost standarda u proizvodnji usluga;
- Postavljen je zahtev za definisanje granica QMS-a;
- Povećan je naglasak na kontekst organizacije;
- Postavljeni su obimniji zahtevi u pogledu liderstva;
- Veći naglasak je na postizanju željenih rezultata procesa kako bi se poboljšalo zadovoljstvo kupaca.

Ove promene u zahtevima od organizacija zahtevaju da u oko 18 % implementiraju novu poslovnu praksu, oko 25% modifikuju postojeću praksu, 50% zadržavaju postojeću praksu i oko 7% zahteva nameću povlačenje ranije implementirane poslovne prakse prema zahtevima verzije iz 2008 [8]. Ako se uzme u obzir promena u strukturi standarda, definicijama termina, novim i modifikovanim zahtevima može se konstatovati da je prelazak sa verzije 2008. na verziju iz 2015. predstavlja najobimniju modifikaciju (reviziju) standarda ISO 9001 do sad.

#### 4. LEAN KONCEPT – NAJBOLJA POSLOVNA PRAKSA SAVREMENE PROIZVODNJE

Koncept Lean proizvodnje ili prevedeno na Srpski jezik **“Resursno štedljiva proizvodnja”** je razvijen od strane japanske auto industrije. Inicijativu je predvodila Tojota kroz razvoj Tojota proizvodnog sistema [Toyota Production System (TPS)] u pokušaju

da se posle Drugog svetskog rata obnovi japanska industrija. Lean koncept je predstavljen ostatku sveta kroz knjigu *Womack, Jones, i Roosa “Mašine koje menjaju svet (The Machine That Changed the World)”* 1990 [11].

Danas u svetu postoji obimna literatura koja pokriva sve aspekte Lean-a bilo da se radi o objašnjenju šta je to do toga kako implementirati koncept u relnim uslovima. Tako, autori ovog rada poseduju elektronsku biblioteku koja obuhvata mnoštvo elektronskih knjiga, radova, studija implementacije Lean koncepta koja je samo u malom obimu iskorišćena za pripremu ovog rada. U nastavku se predstavlja Lean koncept onako kako je dat u referencama [10] do [21].

**Lean predstavlja poslovnu filozofiju** koja zagovara eliminaciju nepotrebnih gubitaka u svim proizvodnim aktivnostima koje su povezane sa: radnom snagom, dobavljačima, tehnologijama, menadžmentom materijala i zalihamama.

Lean u osnovi predstavlja sistematski pristup identifikaciji i otklanjanju gubitaka kroz kontinualno unapređenje načina tako da se pojedinačni predmeti koji se proizvode (delovi, sklopovi ili proizvodi) pomeraju u proizvodnji u ritmu koji određuju (odnosno koji „vuku“) zahtevi kupaca (eksterni / interni) u težnji za dostizanje savršenstva u poslovnom smislu [10].

Lean proizvodnja predstavlja sve suprotno u odnosu na masovnu proizvodnju. Proizvodni proces treba da kontinualno “teče” tako da je: protok materijala što je moguće više linearan, bez turbolencija, nepotrebnog skretanja, zadržavanja i povratnih putanja. Mnoge kompanije danas pokušavaju da implementiraju Lean proizvodnju napuštajući koncept masovne proizvodnje u cilju: (1) unapređenja kvaliteta, (2) eliminisanja proizvodnih gubitaka, (3) redukovanja vremena isporuke proizvoda kupcima i (4) smanjenja ukupnih troškova. Kroz Lean proizvodnju ističe se prevencija od mogućih gubitaka koji se ogledaju u dodatnim: vremenima, radnoj snazi ili utrošenim materijalima koje kupci plaćaju a koja ne doprinose uvećanju vrednosti proizvoda.

Proizvodnja je okrenuta zahtevima stvarnih kupaca a ne zahtevima imaginarnih, potencijalnih kupaca koje organizacije treba da nađe. Dakle, ništa se ne proizvodi za zalihe.

Lean preduzeće je bilo koja organizacija koja kontinualno nastoji da eliminiše gubitke, redukuje troškove, unapređuje kvalitet i na vreme isporuku svojih proizvoda primenjujući pri tom Lean principe. Ona neguju koorporativnu kulturu u kojoj svi zaposleni neprestano unapređuju svoje veštine i proizvodne procese. Sve što se radi u preduzeću je fokusirano na ispunjenje zahteva kupaca pa se proizvodi i usluge isporučuju u odgovarajućim količinama na pravom mestu u pravo vreme i u odgovarajućem stanju.

Na kraju: *"Lean proizvodnja koristi svega upola manje u odnosu na masovnu proizvodnju: upola manje ljudskih resursa, upola manje proizvodnog prostora, upola manje investicija u alate, upola manje inženjerskih sati za razvoj novog proizvoda. Takođe ona zahteva držanje upola manjih zaliha što sve zajedno rezultira značajnom smanjenju neusaglašenih proizvoda, odnosno škarta... [11]*

Da bi organizacija mogla da preživi (ostvari uspeh) na globalnom tržištu mora da se:

- Orientiše na kupce, njihove želje, zahteve i očekivanja - pošto danas na tržištu ima mnogo više proizvoda nego kupaca koji su spremni da ih kupe;
- Da brzo reaguje na ispunjenje zahteva kupaca;
- Da se razlikuje u odnosu na konkureniju. Proizvodi organizacije moraju da budu inovativniji u odnosu na konkureniju i/ili da se razlikuju po ceni, kvalitetu itd.
- Kontinualno unapređuje svoj sistem.

Sve ovo se može ostvariti ispunjavanjem ciljeva Lean proizvodnje, primenom Lean principa, odnosno izgradnjom i održavanjem **Lean proizvodnih sistem**. Sada kada je definisano ono što je potrebno da bi organizacija bila uspešna u savremenim uslovima, da vidimo kako se Lean uklapa u ove zahteve?

Osnovna ideja Lean-a je da se maksimizira vrednosti za kupca a s druge strane da se to

ostvari uz minimiziranje gubitaka (zastoja, rasipanja). Drugim rečima, fokus je da se stvori veća vrednost za kupca, koristeći: manje resursa, kraće vreme ciklusa, brže obradne procese i viši kvalitet.

Lean inicijativa u bilo kojoj organizaciji ima četri glavna cilja:

1. Unapređenje kvaliteta
2. Eliminacija proizvodnih gubitaka – rasipanja (wast)
3. Redukovanje vodećeg (glavnog) vremena proizvodnje
4. Redukovanje ukupnih troškova proizvodnje

Da bi organizacija dosegla ciljeve Lean-a mora u poslovnu praksu da implementira set Lean principa (Slika 3.):



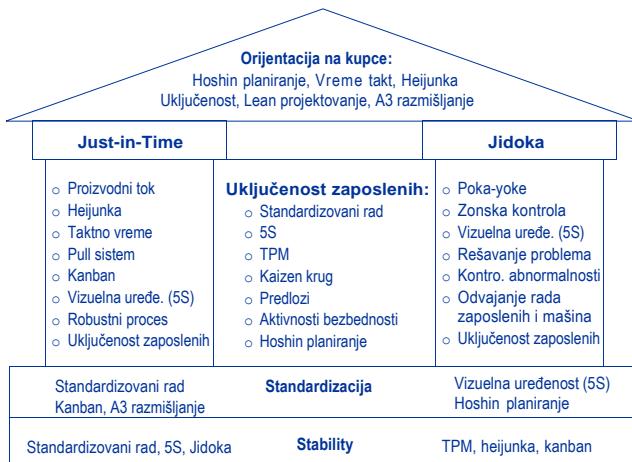
**Slika 3:** Principi Lean proizvodnje

Ti principi su:

- Lean inicijativa počinje tako što organizacija specificira vrednosti za svoje kupce;
- Nakon toga identifikuje tok vrednosti kroz poslovno-proizvodne procese koji omogućavaju kreiranje vrednosti za kupca;
- Zatim mora se omogućiti da aktivnosti kreiranja vrednosti za specifični proizvoda teku kontinualno;
- Proizvodnju moraju da "vuku" zahtevi kupaca i
- Sve prethodne korake kontinualno unapređivati dok se ne postigne savršenstvo u poslovnom smislu.

U cilju ispunjenja prethodnih ciljeva Lean-a Tojota je razvila i implementirala čav niz alata,

metoda i tehnika koje su delimično prikazane na Slici 4.



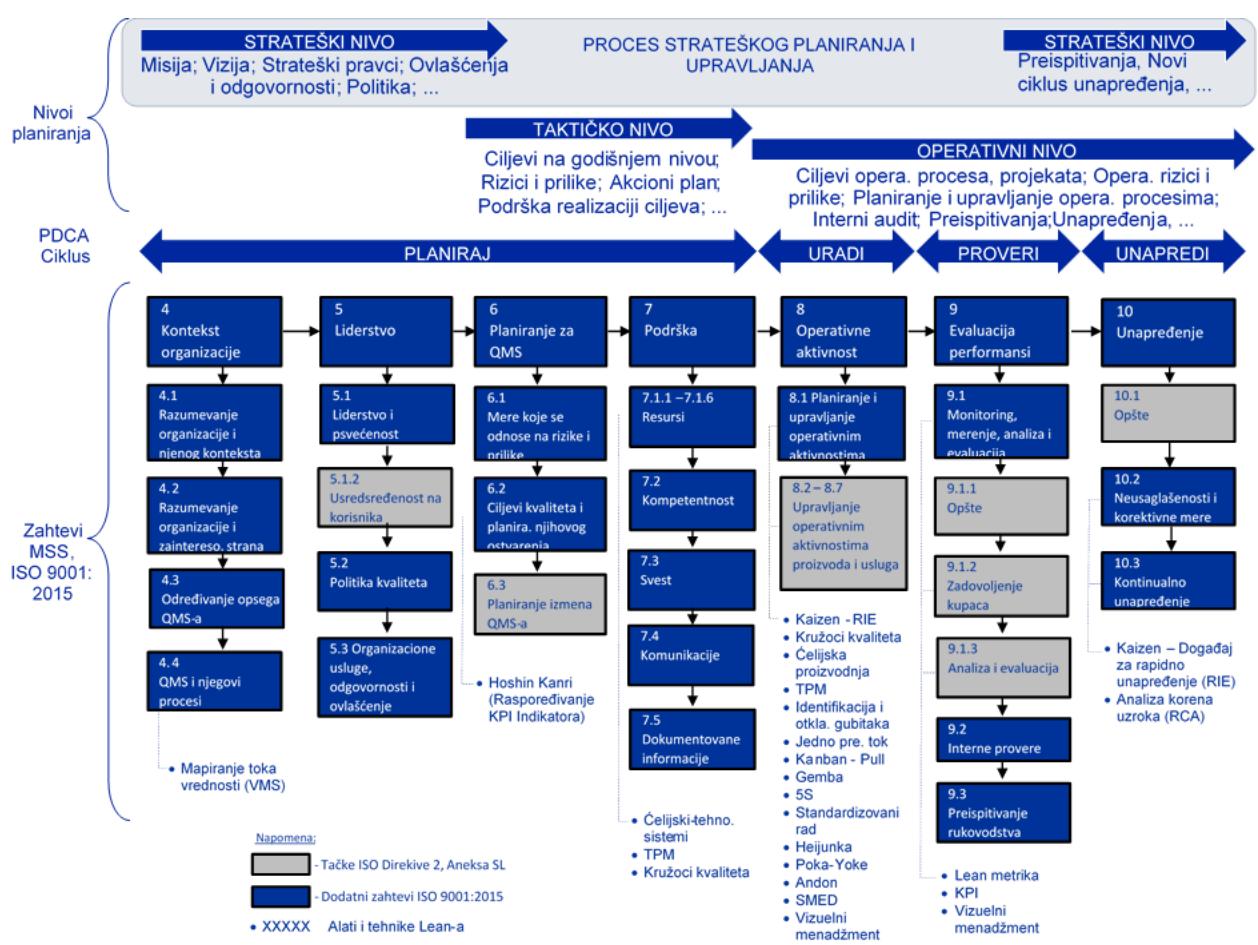
Slika 4: Kuća Tojota proizvodnog sistema  
(Adaptirano na osnov [14])

Implementacija Lean alati i tehnike omogućava kompaniji da zadovolji potražnju svojih kupaca u pogledu kvaliteta proizvoda ili usluga, vremena kada je potrebno isporučiti proizvode i po kojoj ceni to uraditi. Proizvodne

metode Lean kreiraju poslovne i proizvodne procese koji su agilni i efiksni. Lean poslovna praksa pomaže kompanijama da upravljaju svojim ukupnim troškovima a deoničarima povraćaj uloženih sredstava.

## 5. LEAN POSLOVNA PRAKSA KAO PODRŠKA IMPLEMENTACIJI QMS-a

Kao što je poznato Lean poslovni koncept bazira na Toyota proizvodnom konceptu koji se intenzivno razvija od pedesetih godina prošlog veka do danas. **Ova poslovna praksa se danas smatra najboljom poslovnom praksom** u industriji pojedinačnih materijalnih proizvoda što je obuhvaćeno pojmom „manufacturing“. Odlični rezultati koje je Lean koncept pokazao u proizvodnji pojedinačnih materijalnih proizvoda omogućio je njegovo intenzivno širenje u ostale industrije i industriju usluga pre svege u zdravstvo i državnu upravu.



Slika 5: Koncept povezanosti nivoa planiranja u organizaciji, metodologije PDCA ciklusa, zahteva standarda ISO 9001:2015 i potencijalne primene Lean alata

Zahtevi ISO 9001:2015 **ako se implementiraju na pravi način** će sigurno unaprediti organizaciju, odnosno dovešće do implementacije **dobre poslovne prakse**. Ako se napr. pogledaju operativni procesi realizacije proizvoda koji su pokriveni zahtevima Klauzule 8 (ISO 9001:2015), može se konstatovati da su ovi zahtevi nedovoljni da bi operativni procesi odgovorili zahtevima savremenog tržišta. Ovo se može videti ako se uporede dve grupe zahteva. Prva grupa zahteva se odnosi na zahteve definisane u standardima ISO 9001, a druga grupa su zahtevi koje postavlja samo tržište a odnose se na uslove opstanka na njemu. Ovu manjkavost standarda ISO 9001 su uočili mnogi među prvima Juran u verziji standarda iz 2000-te [5].

Zbog toga da bi organizacija odgovorila zahtevima savremenog tržišta operativni procesi moraju značajno da se unaprede, odnosno mora da se **implementira najbolja poslovna praksa koju nude metode i alati Lean-a zajedno sa implementacijom koncepta Šest sigma**. Kroz Lean se procesi čiste od uočenih nedostataka odnosno gubitaka, rasipanja a kroz Šest sigma stabilizuju.

Implementacijom Lean koncepta poslovni procesi se čiste od grešaki, proizvodi se samo ono što kupci zahtevaju, na zalihamu se drži samo ono što je potrebno za tu proizvodnju, proizvodnja se „vuče“ u ritmu koji određuju zahtevi kupaca bez zastoja i čekanja. Uvodi se novi „ćelijski“ raspored opreme, održavanju opreme se poklanja posebna pažnja. Prelazak sa proizvodnje jedne serije proizvoda na drugu je optimiziran. Zaposleni značajno participiraju u otkrivanju i otklanjanju uočenih greški. Implementacija Lean-a podrazumeva proces stalnih unapređenja organizovanjem i implementacijom „Događaja za rapidno unapređenje performansi“ (Rapid Improvement Event – Kaizen) u kojima učestvuju neposredni izvršioci.

S druge strane kao što je dato na Slici 5 implementacija QMS-a po zahtevima ISO 9001:2015 podrazumeva implementaciju PDCA ciklusa. Tako je moguće identifikovati klauzule Standarda koje se odnose na segment

„Planiraj“ klauzule 4, 5, 6 i 7, segment „Uradi“ klauzula 8, „Proveri“ klauzula 9 i segment „Unapredi“ klauzula 10.

Takođe, Razvoj i implementacija QMS-a podrazumeva aktivnosti organizacije na strateškom, taktičkom i operativnom nivou.

Na strateškom nivou se definiše poslovanje organizacije kroz definisanje misije, vizije i strateških pravaca razvoja organizacije u periodu od tri do pet godina. Tako definisano poslovanje dopunjuje se definisanjem ovlašćenja i odgovornosti, politike, principa i vrednosti koje će „negovati“ članovi organizacije, odnosno kojih će se oni pridržavati u postupku dosezanja strateških ciljeva definisanih u viziji. Sve prethodno je sastavni deo dokumenta koji se zove „Strateški plan unapređenja/razvoja organizacije“. Vezano za prethodno, na strateškom nivou u fazi razvoja QMS-a definišu se poslovni procesi i njihove međusobne veze u postupku isporuke proizvoda koji treba da zadovolje kupce i ostale zainteresovane strane organizacije. U realizaciji ovih aktivnosti vrlo je korisno primeniti VMS alata Lean-a koji se odnosi na mapiranje toka vrednost (Value Stream Mapping).

Na taktičkom nivou se razrađuje Strateški plan, definišu se ciljevi na godišnjem nivou, određuj se rizici vezani za njihovu realizaciju i potencijalne prilike za nova unapređenja. Određuju se neophodni resursi, definišu ovlašćenja i odgovornosti, vremenski okvir i resursi koji su potrebni za realizaciju ciljeva, definiše se Godišnji akcioni plan. U fazi razvoja QMS-a određuju se rizici i prilike koje su identifikovani u fazi kreiranja mape poslovnih procesa a odnose se na izlaze iz procesa i njihove međusobne veze.

S stanovišta Lean alata na taktičkom nivou moguće je primeniti nekoliko alata. Među privima je to Hoshin Kanri koji omogućava raspoređivanje ciljeva kvaliteta sa vrha ka nižim organizacionim celina, odnosno poslovno proizvodnim procesima. Takođe u postupku definisanja resursa za realizaciju Akcionog plana korisno je primeniti koncept ćeljske proizvodnje odnosno instalasati povezane

ćelijske tehnološke sisteme koji će biti održavani saglasno konceptu totalnog produktivnog održavanja (TPM). Kod unapređenja svesti, znanja i sposobnosti zaposlenih moguće je primeniti koncept „Kružoka kvaliteta“ (Quality Circle).

Na operativnom nivou se planira i upravlja izvršenjem poslovno/proizvodnih (operativnih) procesa. Procenjuju se rizici vezani za realizaciju ciljeva ovih procesa i identifikuju se potencijalne prilike za njihovo unapređenje. Vrši se monitoring njihovih performansi i definišu potencijalna unapređenja.

Najveći deo razvijenih i masovno implementiranih Lean alata, naročito u automobilskoj industriji se primenjuje na operativnom nivou. Tako u implementaciji Klauzule 8 standarda ISO 9001:2015 može se koristiti čitav set Lean alata kao što je prikazano na Slici 5. Analiza mogućnosti primene ovih alata prevazilazi ciljeve i opseg ovog rada jer za detaljnu analizu mogućnosti primene Lean alata u zadovoljavanju klauzula 8, 9 i 10 je potrebno mnogo više prostora.

Na kraju treba reći da ovi alati nisu nastali kao rezultat „ad-hoc“ inovativne sposobnosti inžinjera i ostalih zaposlenih koji su radili u Tojoti već kao sistematska rešenja koja su vodila ispunjenju globalnog cilja koji je Toyota postavila početkom pedesetih godina prošlog veka. Jer kao što je Taiichi Ohno jednom rekao „*Jedino što smo mi radili (misleći pri tome na Tojotu) je to da smo želeli da skratimo vreme od trenutka kad je kupac zahtevaо naš proizvod do trenutka kad novac za isporučeni proizvod bude na našem računu. Da bi smanjili ovu vremensku liniju morali smo eliminisati sve gubitke, sva rasipanja odnosno sve aktivnosti koje ne dodaju vrednost kupcu*“. To je bio globalni pokretač i cilj koji je doveo do sistematskog razvoja i implementacije svih ovih alata.

## 6. ZAKLJUČAK

Savremeni tržišni uslovi postavljaju nove i sve strožije zahteve organizacijama. U situaciji kad na tržištu ima mnogo više proizvoda od kupaca koji su spremni da ih kupe mnoge

organizacije nalaze optimalnu strategiju opstanka i rasta u orientaciji na kvalitet proizvoda pa i na kvalitet kompletne organizacije.

Danas je najrasprostranjeniji pristup ostvarivanju kvaliteta proizvoda kroz menadžment proces razvoja i implementacije menadžment sistema za kvalitet (QMS-a) po zahtevima standarda ISO 9001:2015. Tako uspostavljena poslovna praksa je nedovoljna da bi organizacija postala lider na tržištu. Orientacija na Lean & Šest sigma proizvodnu filozofiju je ono što je mnogim organizacijama omogućilo da ostvare taj cilj.

Sledeći to u radu je analizirana poslovna praksa koju nameću zahtevi nove verzije standarda ISO 9001:2015 i proizvodna praksa Lean koncepta, odnosno njihova kompatibilnost. Implementacija ISO 9001:2015 u realizaciji operativnih procesa, analiza i unapređenje ovih procesa imaju najviše koristi od implementacije Lean alata. Zbog toga se zagovara pristup implementaciji Lean-a na operativnom nivou pa kad se poslovno-proizvodni procesi očiste od greški i njihove performanse optimiziraju takvo stanje se standardizuje i ugrađuje kao sastavni deo QMS-a. Vezano za to mnoge organizacije uporedno sa razvojem i implementacijom QMS operativne poslovno-proizvodne procese optimiziraju implementacijom Lean alata.

## ZAHVALNOST

Istraživanja koja su predstavljena u ovom radu su delimično podržana od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije kroz projekte br. TR-35031 i TR-35023 Tehnološkog razvoja.

## LITERATURA

- [1] ISO 9001:2015 – *Quality Management System – Requirements*, 2015.
- [2] ISO 9000:2015 – *Quality management systems — Fundamentals and vocabulary*, 2015;
- [3] BSI, PD ISO/TS 9002:2016 - *Quality management systems — Guidelines for the application of ISO 9001:2015*, The British Standards Institution, 2016.

- [4] Van Haren Publishing: *Best practices, Model, Framework, Method, Guidance, Standard: towards a consistent use terminology – revised*, raspoloživo na: [www.vanharen.net](http://www.vanharen.net), pristupljeno 26.03.2018.
- [5] M. Đapić: *Evidencioni sistemi u razvoju proizvoda i procesa*, Monografija br. 9 u seriji monografskih radova „Inteligentni tehnološki sistemi”, LOLA institut, Beograd, 2005.
- [6] ASQ, *Quality Glossary*, raspoloživo na: [www.asq.org](http://www.asq.org), pristupljeno 26.03.2018.
- [7] Ames, M., *Quality Management System: Background, Evolution, and Future of ISO 9001*, ASQ Webiner, raspoloživo na: [www.asq.org](http://www.asq.org), pristupljeno 15.07.2017.
- [8] D. Hoyle: *ISO 9000 Quality System Handbook – Updated for the use ISO 9001:2015 standard, (7th Edition)*, Routledge, 2017.
- [9] I. Abuhav: *ISO 9001:2015 – Complete Guide to Quality Management Systems*, CRC Press, 2017.
- [10] L.R. MacInnes: *The Lean Enterprise Memory Jogger: Create Value and Eliminate Waste Throughout Your Company*, GOAL/QPC, 2002.
- [11] J. Womack, D. Jones, D. Roos: *The Machine that Change the World*, Raw Associates and Collier Macmillan, 1990;
- [12] G. Koenigsaeker: *Leading the Lean enterprise transformation*, Taylor & Francis Group, 2009.
- [13] A. Manos, C. Vincent, (editors): *The Lean Handbook, A Guide to the Bronze Certification Body of Knowledge*, ASQ Quality Press, 2012.
- [14] P. Dennis: *Lean Production Simplified: A Plan Language Guide to the World's Most Powerful Production System (Third Edition)*, Productivity Press, 2015.
- [15] H. Hirano: *JIT Implementation Manual, Volume 1 – Just-in-Time Production Systems, second edition*, CRS Press, Taylor&Francis Group, 2009.
- [16] H. Hirano: *JIT Implementation Manual, Volume 2 – Waste and the 5S's*, CRS Press, Second edition, Taylor&Francis Group, 2009.
- [17] H. Hirano: *JIT Implementation Manual, Volume 3 – Flow Manufacturing – Multi-Process Operations and Kanban, Second edition*, CRS Press, Taylor&Francis Group, 2009.
- [18] H. Hirano: *JIT Implementation Manual, Volume 4 – Leveling – Changeover and Quality Assurance, Second edition*, CRS Press, Taylor&Francis Group, 2009.
- [19] H. Hirano: *JIT Implementation Manual, Volume 5 – Standardized Operations – Jidoka and Maintenance/Safety*, CRS Press, Taylor&Francis Group, 2009.
- [20] H. Hirano: *JIT Implementation Manual, Volume 6 – JIT Implementation Forms and Charts, Second edition*, CRS Press, Taylor& Second edition, Group, 2009.
- [21] Y. Monden: *TOYOTA Production System, An Integrated Approach to Just-In-Time, Fourth Edition*, CRS Press Taylor & Institute of Industrial Engineers, 2012.
- [22] M. Đapić, Lj. Lukić: Kompatibilnost Lean poslovne prakse i zahteva standard ISO 9001:2015, Međunarodna DQM konferencija, Upravljanje kvalitetom i pouzdanošću ICDQM-2018, 28-29. 06. 2018, Prijevor, Srbija, pp. 14-27.

## LEAN BUSINESS PRACTICE AS SUPPORT TO IMPLEMENTATION OF QMS AS REQUIRED ISO 9001: 2015

**Abstract:** Contemporary market conditions impose ever more stringent requirements on organizations. Orientation on product quality is one of the optimal strategies that allows survival and development in the market that is increasingly globalized. The business practice required by the ISO 9001 standard is often insufficient for the organization to survive on that market. As a result, many organizations, along with the development and implementation of QMS, optimize the operational processes by implementing Lean methods, techniques and tools. In regards to that the concept of linking the requirements of ISO 9001: 2015 with the potential application of the Lean tool, which should contribute to improving the efficiency of the implemented QMS, is given in the paper.

**Keywords:** QMS, Lean, ISO 9001, Business practices, Lean tools.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## MATERIAL SELECTION OF PROTECTIVE COATINGS

Stefan ĐURIĆ<sup>1\*</sup>, Dragan ADAMOVIĆ<sup>1</sup>, Bogdan NEDIĆ<sup>1</sup>, Bratislav TRIFUNOVIĆ<sup>2</sup>, Desimir JOVANOVIĆ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Engineering University of Kragujevac, Serbia, [sdjuric@kg.ac.rs](mailto:sdjuric@kg.ac.rs); [adam@kg.ac.rs](mailto:adam@kg.ac.rs);  
[nedic@kg.ac.rs](mailto:nedic@kg.ac.rs);

<sup>2</sup> Zastava arms AD, Serbia, [trifunovicbratislav@gmail.com](mailto:trifunovicbratislav@gmail.com), [tehnologija@zastava-arms.rs](mailto:tehnologija@zastava-arms.rs)

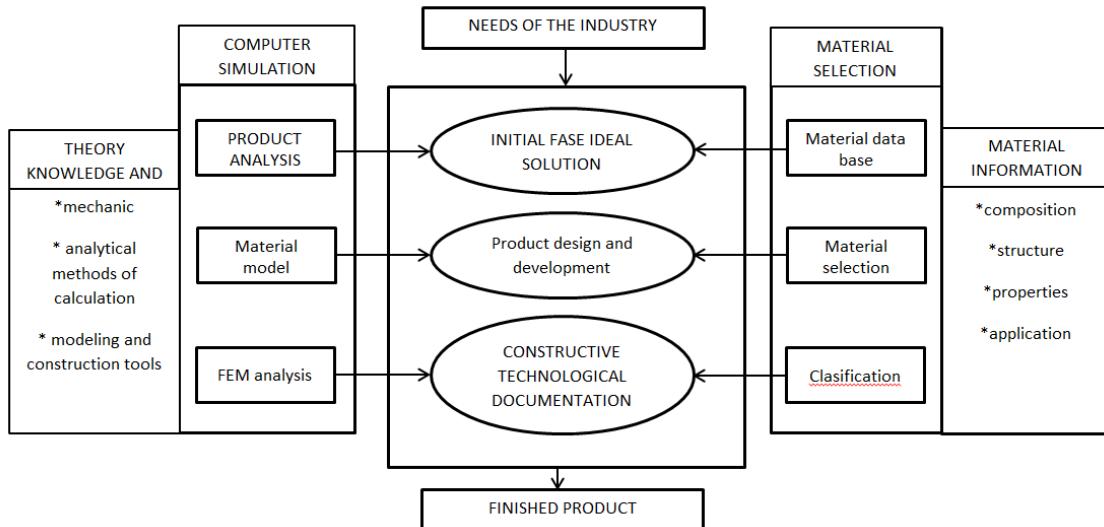
**Abstract:** In this paper, tribological testing of protective galvanized Cd, Zn, Cr coatings and WS2 based on inorganic fullerene nanostructures, were carried out. The aim of the work is selection of protective coating materials for replacement of toxic protective Cd coatings. Selection of protective coating materials is done by the method of influence of characteristics, in order to fully see all the properties of examined materials. Tested tribological characteristics should enable better exploitation conditions, longer lifespan and ecological cleaner coating. Data of current research of protective coatings, search for the possibilities of application of alternative Cd coatings. For selection of materials in this paper one-layer metal coatings without alloys are selected, due to the possibility of serial and mass production and due to existing technology that enables the quick adaptation of the drive for wider production. Protective WS2 coatings represent one of the newer coatings whose properties for certain conditions of exploitation, need to be researched more, but according to the available results, they show great perspective. In order to replace harmful Cd coatings with alternative coats, existing results should be systematized, and perform tests of critical characteristics that are most exposed to load during exploitation. The selection of material by standardized methods allows us to see a large number of properties of the coating used so far, while at the same time it opens a space for the introduction and application of new coatings based on the comparison of the values of the given characteristics. The results show indicate the possibility of replacing Cd coatings with WS2 inorganic coating and galvanic Zn coating which satisfy the required criteria.

**Keywords:** selection of materials, tribological characteristics, coatings, cadmium.

### 1. INTRODUCTION

The right choice of materials at the stage of the development of engineering application is one of the key factors that directly affect the life of the product and the reliability of the products. The primary task of each production process is to achieve high product quality with lower cost. The development of military, air and space industries is primarily based on the development of new materials, as well as the

improvement of characteristics and properties of existing materials. Special emphasis is placed on the development of nano materials, the examination of the possibilities and the application of these materials [2, 3]. The right choice of materials in large part dictates the flow and application development, gives guidelines in the initial stages of such design and construction of the product. Selection of material through the whole cycle of product development is shown on Figure 1.



**Figure 1.** Material selection through product development cycle

For purpose of adequate material selection a large number of methods for the selection of materials have been developed [5, 6]. Electronic database with material data as well as expert systems are increasingly represented [7].

The composition of the material, application and characteristics are defined by following properties [2]:

1. mechanical properties,
2. physical properties,
3. technological properties,
4. chemical properties,
5. material surface properties.

For the purpose of protective coating selection, the material surface properties were tested. These properties define material characteristics such as coefficient of friction, wear resistance, adhesion coating, oxidation, corrosion resistance and other characteristics which affect the exploitation process [8]. These properties depend on physical-mechanical properties of material in thin surface layers. Microstructure, macro and micro geometry of surface are formed during the technology processing [9].

Tribological tests that are carried out aim at reducing the consumption of materials and energy in industrial processes, which in material selection phase can lead to large money and time savings. A special emphasis is placed in the field of nano materials, new

materials, composites, polymers and ceramic materials [10]. When selecting the material, the data that are most reliable to the real values are data obtained in the laboratory is tests of samples, tubes and other parts extracted directly from semi-finished or finished product [11].

## 2. CRITERIA AND METHODS FOR SELECTION OF MATERIAL

In the development of a new product, according to requirements, technical, economic and other realization plans are performed, which are significantly influenced by proper selection of materials. Often, production requirements are contrary to the requirements of use function and exploitation. This is where characterization and selection of materials have a key role [1, 11].

Defining the properties of materials in the function of material characterization, is done in following way:

- By examining the chemical composition of material structure,
- Blefining physical propreties (electric, magnetic, heat...),
- By determining the resistance to chemical and physical effects,
- Testing tribological properties (friction, wear, adhesion).

An important factor for material selection is the update database and the systematic collection of information on the behavior of materials, that are in the active use. This eliminates unwanted phenomena and defects during exploitation [12].

In order to select the material according to the defined methods, the tribological characteristics of the coatings were tested. Methods for determining the tribological characteristics of the coating are standardized. Standards that include tribological testing are DIN 50324, DIN V 1071 T3 and other methods defined by ASTM standards. The most of tribological testing was developed for testing sliding surface. In the paper, the determination of the friction coefficient and wear resistance was carried out using the BLOCK-ON-DISC method (Figure 2) [9, 10].



**Figure 2.** Method BLOCK-ON-DISC for testing coefficient friction and wear volume [10]

Protective coatings that were selected by methods for the material selection were considered galvanic Cd, Zn and Cr coatings and WS<sub>2</sub> protective coating based on inorganic fullerene nanostructured. Galvanic coatings are the most commonly used, but ecological aspects require significantly different exploitation and use [13-16]. Galvanic Cd coating according to European regulations must be completely removed from use until 2020 [17]. On the other hand, with WS<sub>2</sub> protective coating based on nanoparticle, more and more researches are being carried out and examined for application [18, 19]. Given the current situation in the field of application of protective coating, the methodology for material selection will consider the compatibility of used coatings with

exploitation conditions, as well as take into consideration the introduction of new coatings.

One of the methods of selecting materials is quantitative methods. These methods are based on the values assigned to the properties of the material on the basis of which classification is made. The advantage of quantitative methods is to look at all the characteristics and possibilities, which greatly contributes to the achievement of positive results. In the literature [1, 12] examples of material selection can be found according to the following methods:

1. method of influence of material characteristics,
2. limit value method,
3. method of least deviation of material properties from the required values,
4. method of material price,
5. Pahl-Beitz estimation method.

In this paper, selection of material according to the method of influence of characteristics, will be shown. The selection is made according to the most influential characteristics of the material for the defined area of application and exploitation of the material.

### 3. MATERIAL SELECTION BY METHODS OF EFFICIENCY CHARACTERISTICS

The method of influence of material characteristics is applied in the assessment of a number of characteristics. The numerical value of the characteristics is multiplied by the corresponding factor of importance  $B_i$ , in order to determine the relative importance of each. Summing all values gives an indication of the working characteristics  $V_r$ , which is taken in the comparison. The material with the highest performance indicator is taken as the most favorable for the given condition. However, due to the large number of characteristics for different measurement units, it is necessary to introduce the notion of a scaled value of a characteristics that allows the conversion of dimensional values into non-dimensional ones [1].

The values for the ranking are calculated according to the following form:

$$S_V = \frac{N_{min}}{P} \cdot 100 \quad (1)$$

$S_V$  - scaled characteristics of the material,

$N_{min}$  - the minimum value in the list,

$P$  - numeric value of the property.

The non-dimensional characteristics of the material are assigned the corresponding numerical values. Evaluation is done by assessing the behavior of the material (excellent, very good, good, satisfactory and unsatisfactory) and numerical values (5, 4, 3, 2, 1) are added to the characteristics. Below, the procedure is the same as for dimensional characteristics.

The operating value of the  $V_r$  characteristics is calculated according to the following expression:

$$V_r = \sum_{i=1}^n B_i \cdot S_{vi} \quad (2)$$

$V_r$  - value of material characteristics,

$B_i$  - factor of importance,

$S_{vi}$  - sum of scaled values of all material chara.

In order to eliminate the possibility of wrong assessment based on experience defined by the importance factor, the systemic approach of the digital-logical method is applied. In the digital-logic method, each characteristics is compared with each, where to the more important value 1 is being assigned and value 0 to the less important.

For the material selection according to the method of influence of characteristics the following characteristics were selected:

1. coefficient of friction,  $\mu$ ,
2. wear volume,  $\text{mm}^3 \times 10^{-2}$ ,
3. adhesion coating, mm
4. corrosion protection,
5. environmental damage.

Experimental tests were carried out at the Faculty of Engineering University of Kragujevac, while the protective coatings were applied in the companies Zastava arms AD -  $C_r$  coatings, Technical Overhaul Works Kragujevac -  $Z_n$

coatings, Krusik AD -  $C_d$  coatings, SPEEDUP International AD -  $WS_2$  coatings.

Tribological testing of protective coatings were implemented according to the ASTM G77.

## 4. RESULTS AND DISCUSSION

The selection of material was performed in order to analyze the possibility of replacing the galvanic Cd coating due to its harmful properties. Protective coatings were analyzed based on the results obtained by tribological testing and available results in the literature. The characteristics of the material on the basis of which, the method of influencing characteristics is applied are:

- coefficient of friction,  $\mu$ ,
- wear volume,  $\text{mm}^3 \times 10^{-2}$ ,
- adhesion coating, mm
- corrosion protection,
- environmental damage.

In the process of material selection, a digital-logical method is first applied in order to define the importance factor. The definition of the number combinations is determined by the following form:

$$k_m = \frac{n \cdot (n-1)}{2} \quad (3)$$

$k_m$  - number combinations,

$n$  - number of given characteristics.

According to the form (3) the number of given characteristics for the calculation by digital-logical method is 10. Defining the factor of importance by using the digital-logic method is shown in table 1.

According to the form (3) the number of given characteristics for the calculation by digital-logical method is 10. Defining the factor of importance by using the digital-logic method is shown in table 1.

The scaled values are in relationship with the corresponding factor of importance, giving an indication of the performance characteristics for a particular material. The values of the performance characteristics are shown in Table 2.

**Table 1.** Digital-logic method of determining the factor of importance

Characteristics	coefficient of friction	wear volume	adhesion coating	corrosion protective	Environmental damag.	sum
1	0	1				
2	0		1			
3	0			1		
4	1				0	
5		0	1			
6		0		1		
7		1			0	
8			1	0		
9			1		0	
10				0	1	
Pos. decis.	1	2	4	2	1	10
Factor of import.	0,1	0,2	0,4	0,2	0,1	1,00

**Table 2.** Scaled values of characteristics and performance indicator

Characteristics	coef. friction, $\mu$	wear volume, $\text{mm}^3 \times 10^{-2}$	adhesion	corrosion protective	Environmental dam.
$C_d$	69,67	6,77	75	75	25
$Z_n$	92,78	78,41	75	75	75
$C_r$	90,61	100	100	25	50
$WS_2$	100	31,14	100	100	100

Final tests and research results, according to the method of influencing characteristics for all tested protective coatings are shown in

**Table 3.** The protective Cd coating, based on the tests, has the lowest performance rating.

Protective  $WS_2$  coating based on inorganic fullerene nanostructures has the highest performance characteristics compared to the remaining three, which applied by galvanization.

**Table 3.** Results of impact characteristics

	Coating protective	Final assessment of performance
1.	$WS_2$	86,22
2.	Cr	79,06
3.	$Zn$	77,46
4.	Cd	55,82

Protective  $WS_2$  coatings are suitable primarily for application in specific exploitation conditions where high operating temperatures and contact pressures are common. Protective coatings based on nanoparticles have a lower coefficient of friction and less heating material, which reduces the wear volume.

At the same time, the contact pressure leads to the separation of the nano-sphere, thus releasing the tribofilms that connect the surface imperfections and the cavities, which smooths the surface and improves the overall mechanical efficiency [4].

## 5. CONCLUSION

Material selection by the method of influencing characteristics, for tribological properties tested according to the ASTM G77 standard, separately distinguished the protective  $WS_2$  coating.

Protective coatings, for which the material selection was performed, have shown:

- The best results in experimental tests showed an inorganic  $WS_2$  coating based on fullerene nanostructures,
- Galvanic  $Zn$  i  $C_r$  also showed better results in relation to the Cd for which an alternative substitution is sought,

- All tested protective coatings are less harmful to the environment than  $C_d$  coating.

Tribological tests that have been performed show that performed show that there is possibility of application exiting coatings, but also the implemetation of new coatings based on nanomaterial.

It is especially important to emphasize that for all tested coatings there is possibility of mass production with appropiate economic conditions.

## ACKNOWLEDMENT

The part of this research is supported by Ministry of Education, Science and Tehnological Development, Republic of Serbia, Grant TR 35 034.

## REFERENCES

- [1] T. Filetin: *Izbor materijala pri razvoju proizvoda*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2006.
- [2] M. Jovanović, D. Adamović, V. Lazić, N. Ratković: *Mašinski materijali*, Mašinski fakultet Univerzitet u Kragujevcu, Kragujevac, 2003.
- [3] D. Askeland, P. Fulay, W. Wright: *The science and engineering of materials*, Brooks/Cole Publishing Co, Stanford, USA, 2006.
- [4] D. Simić: *Ballistic hybrid nanocomposite materials reinforced with inorganic fullerenes*, PhD thesis, Faculty of Technology and Metallurgy University of Belgrade, Belgrade, 2017.
- [5] M. F. Ashby: *Materials Selection in Mechanical Design*, Elsevier, Oxford, 2005.
- [6] A. Jahan, K. Edwards: *Multi-criteria decision analysis for supporting the selection of engineering materials in product design*, Elsevier, Oxford, 2013.
- [7] I. Hajro, D. Hodžić: *Elektronske baze podataka i eksperimentni sistemi za izbor materijala*, Mašinstvo, Vol. 1, pp. 17-32, 2004.
- [8] I. Granić: *Galvanizacija Zaštita metala od korozije*, Tehnička knjiga nova, Beograd, 2013.
- [9] B. Vasiljević, B. Nedić: *Modifikovanje površina*, Mašinski fakultet Univerzitet u Kragujevcu, Kragujevac, 2013.
- [10] S. Đurić, B. Trifunović, B. Nedić, A. Kostić: *Tribološke karakteristike galvanskih prevlaka i prevlaka volfram disulfida*, 15th International conference on Tribology, 17-19. 05. 2017, Kragujevac, pp. 698-703.
- [11] S. Golubić, A. Čikić, B. Hršak: *Primjena kvantitativnih metoda kod izbora materijala*, Tehnički glasnik, Vol. 6, No. 1, pp. 1-6, 2012.
- [12] T. Filetin: *Inoviranje proizvoda i materijali*, Bilten Razreda za tehničke znanosti Hrvatske akademije znanosti i umjetnosti, Vol. 2, pp. 7-32, 2009.
- [13] K. Sriraman, H. Strauss, S. Brahimi, S. Chromik, J. Szpunar, J. Osborne, S. Yue: *Tribological behaviour of electrodeposited Zn, Zn-Ni, Cd and Cd and Cd-Ti coatings on low carbon steel substrates*, Tribology International, Vol. 56, pp. 107-120, 2012.
- [14] A. Zhirnov, S. Karimova, L. Ovsyannikova, O. Gubenko: *New protective coatings for replacing cadmium coatings on steel parts*, Metal Sciense and Heat Treatment, Vol. 45, No. 1-2, pp. 21-24, 2003.
- [15] H. Hadjltaief, A. Sdiri, W. Ltaief, P. Costa, M. Galvez, M. Zina: *Efficient removal of cadmium and 2-chlorophenol in aqueous systems by natural clay: Adsorption and photo-Fenton degradation processes*, Comptes Rendus Chimie, pp. 1-10, 2017.
- [16] C. Zhao, S. Ren, Q. Zuo, S. Wang, Y. Zhuo, W. Lui, S. Liang: *Effect of nanohydroxyapatite on cadmium leaching and environmental risks under simulated acid rain*, Sciense of Total Environment, Vol. 627, pp. 553-560, 2018.
- [17] A. Aguero, J. C. del Hoyo, J. Garcia de Blas, M. Garcia, M. Gutierrez, L. Madueno, S. Ulargui: *Aluminum slurry coatings to replace cadmium for aeronautic applications*, Surface & Coatings Technology, Vol. 213, pp. 229-238, 2012.
- [18] T. W. Scharf, S. V. Prasad, M. T. Dugger, P. G. Kotula, R. S. Goeke, R. K. Grubbs: *Grown, structure and tribological behaviour of atomic layer-deposited tungsten disulphide solid lubricant coatings with applications to MEMS*, ACTA Materialia, Vol. 54, pp. 4731-4743, 2006.
- [19] B. Andre, F. Gustavsson, F. Svahn, S. Jacobson: *Performance and tribofilm formation of a low-friction coating incoporating inorganic fullerene like nano-particleless*, Surface and Coatings Technology, Vol. 206, pp. 2325-2329, 2012.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

### 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## ANALYSIS OF BALL BURNISHING INFLUENCE ON TRIBOMECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM

Dragan DŽUNIĆ<sup>1\*</sup>, Vladimir KOČOVIĆ<sup>1</sup>, Ivan BIJELIĆ<sup>2</sup>, Marko PANTIĆ<sup>1</sup>, Suzana PETROVIĆ SAVIĆ<sup>1</sup>,  
Slobodan MITROVIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Mechanical Engineering in Kragujevac, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac, Serbia

<sup>2</sup>Technical College of Professional Studies, Bulevar Zorana Đindjića 152a, 11070 Novi Beograd,  
Serbia

\*Corresponding author: dzuna@kg.ac.rs

**Abstract:** In recent years, modern industry has been paying great attention to the environmental aspects of processing that relate to the elimination of processes requiring cooling and lubricating agents, whenever possible. Used equipment for cooling and lubrication, according to modern legal regulations, must be stored and destroyed in an appropriate manner, i.e. recycled, which increases the costs of business entities. On the other hand, the demands of the market in terms of geometric and dimensional accuracy are getting tougher, and it is therefore desirable that coarse and finishing workpieces are carried out in one clamping in order to eliminate baseline errors. To this end, a finishing tool has been developed without removing the chips from material, i.e. plastic deformation of the surface layer of the object of processing. This paper deals with the study of the influence of this type of treatment on the micro-hardness of the surface layer as well as on the wear resistance. The tests were carried out on aluminum alloy EN AW-6082 (AlMgSi1) T651.

**Keywords:** one clamping, plastic deformation, finishing, micro-hardness.

### 1. INTRODUCTION

Methods of mechanical treatment are classified into two groups, to processes with chip removal, and methods without removing material. If the above division of mechanical treatment is taken into account, then the metal finishing process based on rolling a ball on the surface of the processing object can be classified into processing operations without removing excess material. The main goal of the final mechanical processing is to achieve the maximum level of processing quality. The quality of processing is a very complex indicator and the function is the quality of the

construction workpiece, the quality of the processing system, the projected production process, the quality of the semi-finished products, etc. [1, 2].

"Ball burnishing" is a process in which the ball is rolling over the surface of the processing object, with high contact pressures. High contact pressures lead to plastic deformation of the surface layer of the processing object, resulting in material leakage and the uneven surfaces fill the dents of the profile of the surface to be processed. In addition to significantly reducing surface roughness, this method also leads to hardening of the surface layer due to the reinforcement effect. The

depth of the reinforced layer depends on the material of the processing object and the parameters of the "ball burnishing" process. [3].

The "Burnishing" process can be applied to various types of materials such as: steel [Rao et al., 4; Bougharriou et al., 5; Ibrahima et al., 6], aluminum alloys [El-Axir, 7; Gharbi et al., 8; Travieso-Rodriguez et al., 9, Esme et al., 10; Basak and Goktas, 11], brass alloys [El-Taweel and El-Axir, 12], titanium alloys [Mohammadi, 13], etc.

El-Axir [14] examined the dependence of residual stresses and fatigue on materials depending on the parameters of the "burnishing process" (speed, force, etc.). Sayahi et al. [15] presented the 2D and 3D model of finite elements. They considered the ability of the proposed model to consider the residual stresses generated by the processing process. The results show that the 3D model provided residual stress with the information on processing parameters used. Rao et al. [16] examined the dependence of the "burnishing" parameters on the surface hardness and the strength of low-alloy steels. It has been proven that the lubricant, speed and diameter of the ball had a significant impact on the surface hardness of the workpiece. Basak and Goktas [17] considered the effect of the number of passages, forces and rpm on the surface roughness and hardness of Al 7075 T6 material. El-Taweel and El-Axir [12] applied the "Taguchi" method to determine the optimal parameters of the "burnishing" process in terms of surface roughness and microhardness. Abu Shreehah [18] compares the influence of the different method of "burnishing" the process on microhardness and surface roughness. Empirical formulas have been developed that predict surface roughness and microhardness on mesing. Babu et al. [19] evaluate the effects of the different parameters of the "burnishing" process on the characteristics of the steel and brass surface. "Taguchi" technique was used to determine the most influential parameter on surface roughness.

Tadić et al. [20] examined the impact of the "burnishing" process on the roughness of the surface. The processing was done using a specially designed high-stiff tool. The authors have proven that the high rigidity of the tools increases the quality of the processing. El-Tayeb et al. [21] designed a tool with which carried out the burnishing process on aluminum 6061 workpieces with different processing parameters. The experiment was carried out with the aim of determining the optimal processing parameters for the tribological properties of the surface. The aim of this paper is to examine the influence of surface treatment by "Ball Burnishing" on the mechanical and tribological characteristics of aluminum. To determine these characteristics of the tested surfaces, the Scratch Test was selected due to the concept of the test procedure as well as counter body, which is a Rockwell diamond cup with a radius at the top of 120 °. These tests were preceded by tests on the Nanotribometer, which indicated the tendency of aluminum to be transferred to the surface of the counter body [22], with the tribological parameters of the contact being drastically changed after the material transfer occurred. Accordingly, the scratch test proved to be a very reliable way of characterizing tribological characteristics of aluminum.

## 2. MATERIAL

The experiment was carried out on a plate 62x62x25 mm from the aluminum alloy EN AW-6082 (AlMgSi1) T651. The processing was carried out with a ball diameter of 7 mm from A 295 52100 (USA/ASTM).

The machining of the "ball burnishing" was preceded by the preparation of the surface by milling with a 20 mm diameter milling cutter. The rolling treatment is carried out in a field of 10x10 mm, with the feed  $f = 0.2 \text{ mm} / \text{min}$  and the speed  $v = 2000 \text{ mm} / \text{min}$ . The depth of the ball piercing in the material of the processing object was  $\delta = 2 \mu\text{m}$ . Figure 1 shows the tool in the procedure during the experiment.



**Figure 1.** Displays the tools in the procedure

The "ball burnishing" procedure was performed on a single-spindle vertical milling machine HAAS Toolroom Mill TM-1HE.

A solid surface treatment tool with "ball burnishing" was used to perform the experiment.

The rigidity of the tool is very high and is determined by the size of the deformations that occur in the contact of the ball and the three radial bearings that are arranged under a spatial angle of  $120^\circ$  in relation to the direction of penetration of the ball into the material of the object of the treatment. With this concept of the tool with the reliance of the ball around the three points, it is ensured that the ball is completely rolling at the level of processing.

## 2.1 Experiment

The tribomechanical characterization of the prepared samples was carried out using the CSM (Anton Paar) Scratch tester (Figure 2) using a progressively increasing normal load, from a starting value of 0.01 N to a maximum value of 5 N. The length of the slip route was 2.5 mm, with a slip speed of 0.5 mm /min, i.e. a normal power increment was 1 N/min. On both surfaces, the previously milled surface and the surface area processed by Ball Burnishing, 5 tests were performed with identical values of the starting parameters. Accordingly, the values shown represent the middle value of all five examinations of the obtained surfaces.

The Scratch test is performed in three phases. The first phase involves the analysis of

the investigated surface with a minimum force of 0.01N, in order to determine the roughness profile of the surface, based on which the values of the depth of penetration of the impeller (Rockwell Coupe) are determined at the next stage. The first phase is called Pre-scan. The next phase, represents the scratch test during which penetration of the impellers in the examined surface layer occurs in accordance with the predetermined parameters. The second phase result is the penetration depth of the impeller as well as the friction coefficient value. The final, third phase or post-scan is also performed using a minimum load of 0.01 N in order to determine the value of the elastic relaxation of the material, that is, the residual depth values.

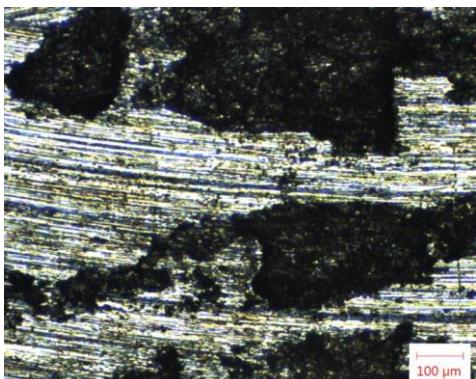


**Figure 2.** CSM (Anton Paar) Micro Scratch Tester (MST)

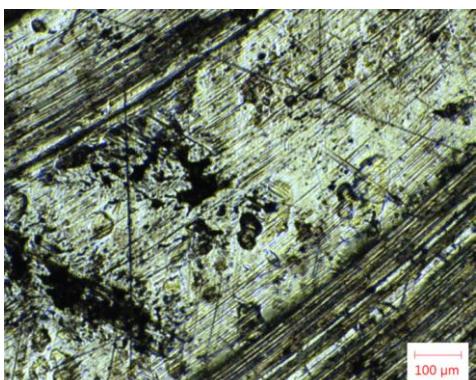
## 2.2 Results and Discussion

The tests themselves were preceded by an analysis of the examined surfaces by the use of an optical microscope, so in Figures 3a and 3b, the appearance of the surfaces obtained by milling and the application of a ball burnishing process with a penetration depth of  $2 \mu\text{m}$  can be seen. On the surface obtained by pre-treatment milling, in addition to the traces of the rotary movement of the tool, there are also visible surface damage, which partly arises from the selection of the parameters of the

technological process, and partly from the transfer of materials to the tool. In the area obtained by "ball burnishing" there are also traces of the previous processing of the milling machine, which leads to the conclusion that with the penetration depth of 2  $\mu\text{m}$ , the traces of the previous processing have not been completely removed, that is, the processing of the peaks of the roughness has occurred. Also, it is noticeable that the surface damage is largely eliminated, but not completely, which probably requires greater penetration depth in the "ball burnishing" process.



a)

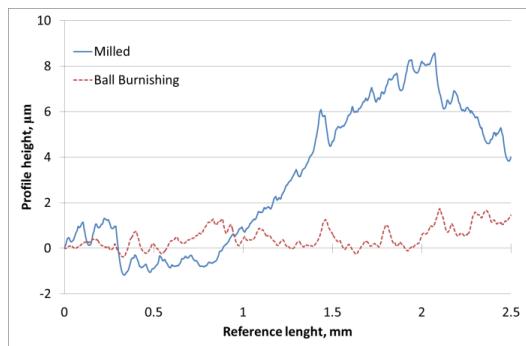


b)

**Figure 3.** The area of the examined methods of milling and "ball burnishing"

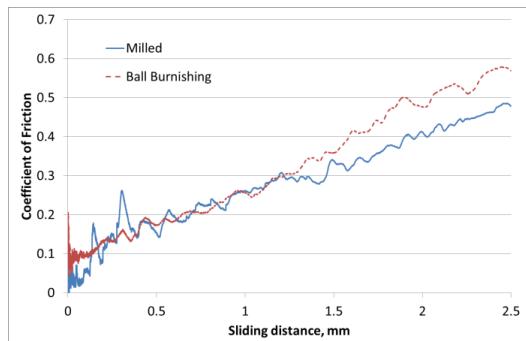
That this conclusion is justified is shown in Figure 4, which shows the profiles of the roughness of the investigated surfaces. From these diagrams it can be concluded that the surface roughness profile obtained by treating milling oscillates in a much larger range than the roughness profile obtained by the "ball burning" process. The ball burnishing process corrected the roughness profile and removed the surface damage. This is what is based on the assumption that the compression of the

material in the surface layer led to improvements tribomechanical material characteristics.



**Figure 4.** Profiles of roughness of examined surfaces, obtained by milling and "ball burnishing".

The basic tribological phenomena are friction and wear. The friction in this case is expressed through a friction coefficient, and the diagrams of this size for both tested surfaces are shown in FIG. 5.

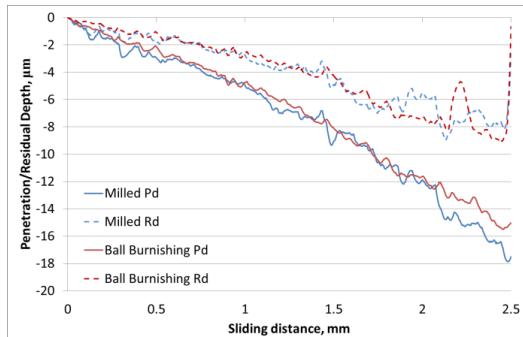


**Figure 5.** Coefficient of friction of surfaces obtained by milling and "ball burnishing"

From the picture, it is noticeable that the friction coefficient for the surface obtained by "ball burnishing" in the initial moments almost overlaps with the values of the coefficient of friction of surfaces obtained by milling. In the areas obtained by milling the oscillations in the values of the friction coefficient, they are significantly higher in the initial phase than the friction coefficient of the surfaces obtained by "ball burnishing", which is due to the application of small load values as well as the expressed surface roughness. In the second half of the slip time, the situation is reversed, since the effect of surface roughness ceases and the value of the friction coefficient depends solely on the characteristics of the surface layer through which the indenter slides. As the surfaces obtained by "ball

“burnishing” make this surface layer more compact, the resistance of penetration and movement through such a surface layer is greater, so the value of the friction coefficient is higher.

As an indication of the resistance to wear of the examined surfaces, the depth of penetration of the indenter by pirlic sliding is taken, and in addition to the value of the depth of the trace of wear, after the elastic relaxation of the material (Figure 6). The penetration depth of indenter thru surfaces obtained by “ball burnishing” is smaller compared to the surfaces obtained by milling. A small difference and the measured values of this parameter is due to the fact that in the case of “ball burnishing” with a penetration depth of 2  $\mu\text{m}$ , the entire surface is not fully processed, which can be clearly seen in Figure 3b. Also, the degree of elastic relaxation of the material is more pronounced in the milled surfaces, since the material in the surface layer in “ball burnishing” is further deformed by the movement of the ball.



**Figure 6.** Penetration and residual depth of surfaces obtained by milling and “ball burnishing”.

### 3. CONCLUSION

Based on the experimental results, the following conclusions were drawn:

Surface machining with “ball burnishing” positively influences the quality of treated surfaces and in this way it is possible to eliminate traces and defects that occur on surfaces after conventional material processing. The results of the study showed that the roughness of the surfaces significantly improved, which also affects the visual or

decorative aspect of the treated surfaces. By applying “ball burnishing”, a greater compactness of the contact surface layer is achieved.

The sliding friction coefficient on surfaces treated with “ball burnishing” is greater than the friction coefficient of surfaces obtained by milling, as a result of increased resistance of penetration and slip through the material of higher density.

From the abrasion resistance, the obtained penetration depth results indicate increased resistance to penetration and wear of surfaces obtained by “ball burnishing”, while the degree of elastic relaxation is lower in relation to surfaces obtained by milling.

The application of “ball burnishing” with a penetration depth of 2  $\mu\text{m}$  has shown that with the application of this technique with significantly greater depths of penetration, it is possible to achieve significant improvements in the surface layer of the material both in the decorative and in the sense of improving the tribomechanical characteristics.

### ACKNOWLEDGEMENT

This paper is a result of the researches within the project TR35021 financed by the Ministry of Science and Technological development of the Republic of Serbia.

### REFERENCES

- [1] Lazić M., Tehnologija obrade metala rezanjem, Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Jugoslovensko društvo za tribologiju, Kragujevac, 2002.
- [2] Lazić M., Obrada metala rezanjem, monografija, Mašinski fakultet, Kragujevac, 2002.
- [3] M. Babić, V. Kočović, Đ. Vukelić, G. Mihajlović, M. Erić, B.Tadić, Investigation of ball burnishing processing on mechanical characteristics of wooden elements, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science, ISSN: 0954-4062, Vol 231, pp. 1-8, 2016.
- [4] Rao, D.S., Hebbar, H.S., Komaraiah, M.: Surface hardening of high-strength low alloy

- steels (HSLA) dual-phase steels by ball burnishing using factorial design, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 22, No. 7-8, pp. 825-829, 2007.
- [5] Bougharriou, A., Sai, W. B., Sai, K.: Prediction of surface characteristics obtained by burnishing, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 51, No. 1-4, pp. 205-215, 2010.
- [6] Ibrahima, A.A., Abd Rabbob, S.M., El-Axirc, M.H., Ebiedb, A.A.; Center rest balls burnishing parameters adaptation of steel components using fuzzy logic, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 5, pp. 2428-2435, 2009.
- [7] El-Axir, M.H.: An investigation into the ball burnishing of aluminium alloy 6061-T6, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 221, No. 12, pp. 1733-1742, 2007
- [8] Gharbi, F., Sghaier, S., Hamdi, H., Benameur, T.: Ductility improvement of aluminium 1050A rolled sheet by a newly designed ball burnishing tool device, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 60, No. 1-4, pp: 87-99, 2012.
- [9] Travieso-Rodriguez, J.A., Dessein, G., Gonzalez-Rojas, H.A.: Improving the Surface Finish of Concave and Convex Surfaces Using a Ball Burnishing Process, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 26, No. 12, pp. 1494-1502, 2011.
- [10] Esme, U., Sagbas, A., Kahraman, F., Kulekci, M.K.: Use of artificial neural networks in ball burnishing process for the prediction of surface roughness of AA 7075 aluminum alloy, *Materiali in Tehnologije*, Vol. 42, No. 5, pp. 215-219, 2008.
- [11] Basak, H. Goktas, H. H.: Burnishing process on al-alloy and optimization of surface roughness and surface hardness by fuzzy logic, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 4, 1275-1281, 2009.
- [12] El-Taweel, T. A., El-Axir, M. H.: Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 41, No. 3-4, pp. 301-310, 2009.
- [13] Mohammadi, F., Sedaghati, R., Bonakdar, A.: Finite element analysis and design optimization of low plasticity burnishing process, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 70, No. 5-8, pp. 1337-1354, 2014.
- [14] El-Axir, M.H.: An investigation into the ball burnishing of aluminium alloy 6061-T6, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 221, No. 12, pp. 1733-1742, 2007.
- [15] Sayahi, M., Sghaier, S., Belhadjsalah, H.: Finite element analysis of ball burnishing process: comparisons between numerical results and experiments, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 67, No. 5-8, pp. 1665-1673, 2013.
- [16] Rao, D.S., Hebbar, H.S., Komaraiah, M.: Surface hardening of high-strength low alloy steels (HSLA) dual-phase steels by ball burnishing using factorial design, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 22, No. 7-8, pp. 825-829, 2007.
- [17] Basak, H. Goktas, H. H.: Burnishing process on al-alloy and optimization of surface roughness and surface hardness by fuzzy logic, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 4, 1275-1281, 2009.
- [18] Abu Shreehah, T.A.: Developing and investigating of elastic ball burnishing tool, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 36, No. 3-4 pp. 270-279, 2008.
- [19] Babu, P.R., Ankamma, K., Prasad, T.S., Raju, A.V.S, Prasad, N.E.: Optimization of burnishing parameters and determination of select surface characteristics in engineering materials, *Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences*, Vol. 37, No. 4, pp. 503-520, 2012.
- [20] Branko Tadic, Petar M. Todorovic, Ognjan Luzanin, Dragomir Miljanic, Branislav M. Jeremic, Bojan Bogdanovic, Djordje Vukelic: Using specially designed high-stiffness burnishing tool to achieve high-quality surface finish, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 1-4, Volume 67, pp. 601-611, 2013.
- [21] El-Tayeb, N.S.M., Low, K.O., Brevern, P.V.: Enhancement of surface quality and tribological properties using ball burnishing process, *Machining Science and Technology*, Vol. 12, No. 2, pp. 234-248, 2008.
- [22] S. Tarasov, A. Filippov, E. Kolubaev and T. Kalashnikova, "Adhesion transfer in sliding a steel ball against an aluminum alloy", *Tribology International*, vol. 115, pp. 191-198, 2017.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

### 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## МОГУЋНОСТ ОБРАДЕ КАЛЖЕНИХ ЧЕЛИКА АЛАТИМА ОД ТВРДОГ МЕТАЛА ПРИМЈЕНОМ ТЕХНИКЕ ХЛАЂЕЊА И ПОДМАЗИВАЊА ВИСОКИМ ПРИТИСКОМ

Gordana GLOBOČKI-LAKIĆ<sup>1</sup>, Branislav SREDANOVIĆ<sup>1\*</sup>, Živko BABIĆ<sup>1</sup>, Davorin KRAMAR<sup>2</sup>, Janez KOPAČ<sup>2</sup>, Franci PUŠAVEC<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka, BiH, [gordana.globocki@gmail.com](mailto:gordana.globocki@gmail.com), [branislav.sredanovic@mf.unibl.org](mailto:branislav.sredanovic@mf.unibl.org), [zivko.babic@mf.unibl.org](mailto:zivko.babic@mf.unibl.org)

<sup>2</sup>Univerzitet u Ljubljani, Fakultet za strojništvo Ljubljana, Slovenija, [davorin.kramar@fs.uni-lj.si](mailto:davorin.kramar@fs.uni-lj.si), [janez.kopac@fs.uni-lj.si](mailto:janez.kopac@fs.uni-lj.si), [franci.pusavec@fs.uni-lj.si](mailto:franci.pusavec@fs.uni-lj.si)

**Apstrakt:** U radu se analiziraju mogućnosti obrade struganjem kaljenih čelika alatima od tvrdog metala primjenom specijalne tehnike dovođenja rashladne tekućine u zonu rezanja pod mlazom visokog pritiska 50MPa (High Pressure Jet Assisted Machining-HPJAM). Analizirani su: ugljenični čelik C45E (45 HRc), čelik C45E površinski kaljen na 58 HRc i čelik za ležajeve 100Cr6 (AISI 52100) tvrdoće 62 HRc. Eksperimentalna ispitivanja su vršena pri različitim režimima rezanja (dubina rezanja, korak, brzina rezanja) uz praćenje izlaznih parametara procesa: sile rezanja, habanje alata, kvalitet obrađene površine, oblik strugotine i količina skinute strugotine u jedinici vremena. Rezultati ispitivanja ukazuju na brojne prednosti primjene alata od tvrdog metala i tehnike hlađenja i podmazivanja mlazom visokog pritiska (HPJAM) u odnosu na konvencionalne tehnike hlađenja sa aspekta povećanja produktivnosti, smanjenja habanja alata, manjih sila rezanja, boljeg kvaliteta obrade ali i manjih troškova obrade. Izvršena su i izvjesna poređenja troškova obrade i postignutih izlaznih efekata obrade pri obradi ispitivanih čelika sa alatima od tvrdog metala i primjenom specijalne tehnike hlađenja mlazom visokog pritiska i alata od kubnog bor nitrida (CBN) koji se dominantno koriste u obradi tvrdim struganjem.

**Ključне речи:** struganje, kaljeni čelici, tvrdi metal, HPJAM

### 1. UVOD

Obrada materijala visoke tvrdoće (engl. *hard machining*) podrazumijeva obradu dijelova visoke tvrdoće (iznad 45 HRc), obično od 55-68 HRc. Obrada se vrši alatima od visokokvalitetnih materijala sa specijalno oblikovanom reznom oštricom. Dominantni alatni materijali za ovu obradu su polikristalni kubni bor nitrid (PCBN), miješana keramika ( $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiC}$ ) ili cermet [1]. Izbor alata se vrši prema konkretnoj operaciji obrade i željenom

obimu proizvodnje, pri tome vodeći računa o troškovima proizvodnje. Cilj savremene proizvodnje, u kojoj je sve više proizvoda i dijelova vrlo složene geometrije, je postići što veću produktivnost, bolji kvalitet i tačnost obrade uz što niže troškove. Povećanje produktivnosti i efikasnosti procesa može se postići optimizacijom geometrije alata za rezanje, optimizacijom obrade i optimalnim izborom parametara rezanja. U savremenoj obradi kombinuju se prednosti uklanjanja što

veće količine materijala pri gruboj obradi, te visokobrzinske obrade u završnim operacijama sa srednjim vrijednostima brzinama rezanja i visokim vrijednostima koraka.

Struganje materijala visoke tvrdoće se koristi kao zamjena za tradicionalni postupak obrade materijala visoke tvrdoće - struganje, termička obrada i brušenje. Prednosti ove vrste struganja u odnosu na tradicionalnu metodu obrade kaljenih materijala su: veća produktivnost i efikasnost procesa, te manja potrošnja energije. Troškovi alata (PCBN, CBN, keramika) koji se uobičajeno koriste za struganje kaljenih čelika su vrlo visoki. Struganje materijala visoke tvrdoće sa uobičajenim parametrima obrade, alatima od tvrdog metalra sa prevlakama, konvencionalnim hlađenjem, prate izraziti mehanizmi adhezivnog habanja i formiranje izuzetno duge strugotine.

Jedan od načina smanjenja visokih troškova alata jeste ispitati mogućnost korišćenja jeftinih alata od tvrdog metalra (TM) uz primjenu specijalne tehnike hlađenja i podmazivanja gdje se mlaz rashladne tečnosti pod visokim pritiskom dovodi između grudne površine alata i strugotine (HPJAM). Pri tome fluid istovremeno djeluje kao rashladna tekućina i kao sredstvo za podmazivanje. Ova tehnika datira iz pedesetih godina prošlog vijeka. U savremenoj obradi koriste se sistemi alata visokog pritiska gdje je dovod tekućine pod pritiskom do 15 MPa. S druge strane, HPJAM obezbjeđuje pritisak od 40 do 200 MPa, tako da sam mlaz tečnosti učestvuje u formiranju strugotine [2, 3, 4]. Prednost ove metode je smanjenje temperature rezanja i trošenja alata, te poboljšanje lomljivosti i odvođenja strugotine [3, 5, 6]. Brojni autori su se bavili istraživanjem mogućnosti primjene HPJAM u obradi kaljenih čelika [7 – 12], [13] [14] i [15].

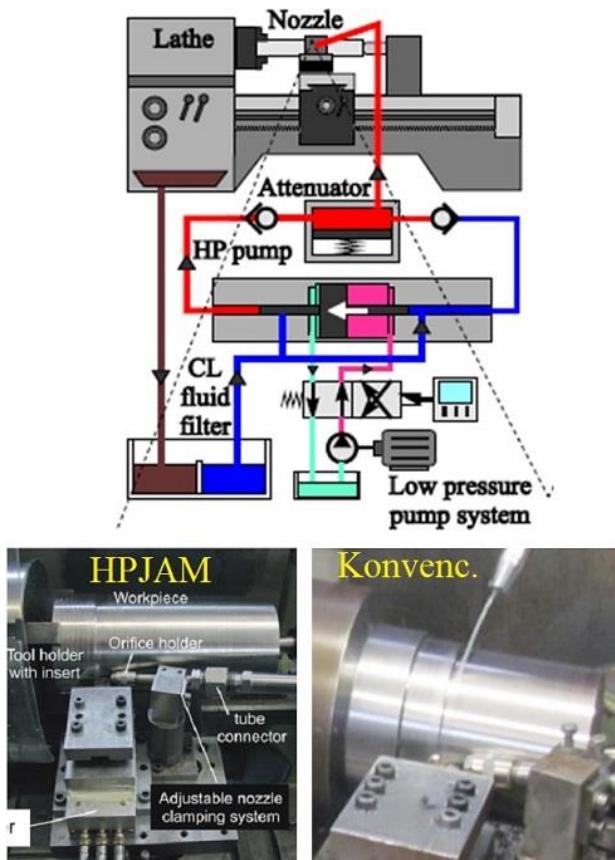
U ovom radu prikazana je mogućnost korišćenja jeftinih alata od TM uz korišćenje specijalne tehnike HPJAM za tvrdo struganje čelika: čelika C45E (45 HRc), čelika C45E površinski kaljenog (58 HRc) i čelik za ležajeve 100Cr6 (62 HRc).

## 2. POSTAVKA EKSPERIMENTA

Eksperimentalna istraživanja su se odvijala u tri faze u zavisnosti od ispitivanog materijala. Prva faza istraživanja je bila sa ugljeničnim čelikom C45E (45 HRc), druga faza se odnosila na ispitivanje čelika C45E površinski kaljenog na 58 HRc, dok se zadnja faza ispitivanja odnosila na ispitivanje čelika za ležajeve 100Cr6 (62 HRc) visoke otpornosti na habanje. Sva ispitivanja su uključivala obradu sa primjenom konvencionalnog načina hlađenja i podmazivanja (obljevanje) i primjenom specijalne tehnike HPJAM. Obradu čelika 100Cr6, tvrdoće 62 HRc, bilo je nemoguće izvesti sa konvencionalnim načinom hlađenja tj. obljevanjem. Eksperimentalna ispitivanja su vršena na univerzalnom strugu BOEHRINGER opremljenog sa pumpom visokog pritiska HAMMELMANN, slika 1.

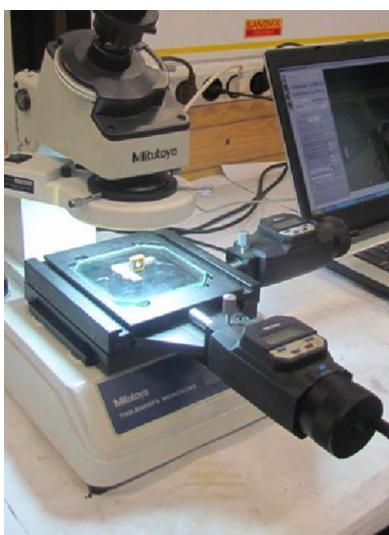
Pri obljevanju, sredstvo za hlađenje i podmazivanje (CLF) je dovođeno na približno 150 mm udaljenosti od vrha zone obrade sa protokom od 6 l/min. Mlaz je usmjeren na neobrađenu površinu obratka i grudnu površinu alata. Pri primjeni specijalne tehnike hlađenja i podmazivanja (HPJAM), mlaz je usmjeren prema reznoj oštici pod malim uglom od 5° u odnosu na grudnu površinu alata, direktno između grudne površine alata i strugotine. Pritisak CLF-a je podešen na 50 MPa i protok 2 l/mim. Standardna safirna mlaznica prečnika 0,4 mm, postavljena je na udaljenosti od 30 mm od oštice alata kako bi se izbjegle varijacije prečnika mlaza i radikalne raspadjele pritiska. Korišćena je tekućina na bazi biljnog ulja, PRIMOL 3000, bez hlora, gustine 1,01 g/cm<sup>3</sup> pri 20°C, koja posjeduje dobra antioksidacijska svojstva. U ispitivanjima, ova tekućina je korištena kao vodena emulzija u koncentraciji od 3%.

Prilikom eksperimentalnih istraživanja praćeni su sljedeći parametri procesa: komponente sile rezanja ( $F_c$ ,  $F_f$  i  $F_p$ ), trošenje alata odnosno širina pojasa habanja (VB), kao i kvalitet obrade odnosno srednja visina neravnina ( $R_a$ ) i maksimalnu visinu neravnina ( $R_y$ ). Za vrijeme izvođenja eksperimenta praćen je i postupak oblikovanja strugotine.



Slika 1. Postavka eksperimenta

Za mjerjenje sila rezanja korišćen je piezoelektrični trokomponentni dinamometar *KISTLER 9257B*. Za obradu izmjerениh signala korišten je softver *LabVIEW*. Obrada podataka obavljena je pomoću *MATLAB* softverskog paketa. Praćenje i mjerjenje trošenja alata izvršeno je pomoću alatnog mikroskopa *Mitutoyo TM-510* (slika 2), opremljenog kamerom visoke rezolucije. Hrapavost površine mjerena je pomoću mobilnog mjernog uređaja *Mitutoyo SURFTEST SJ-301*.

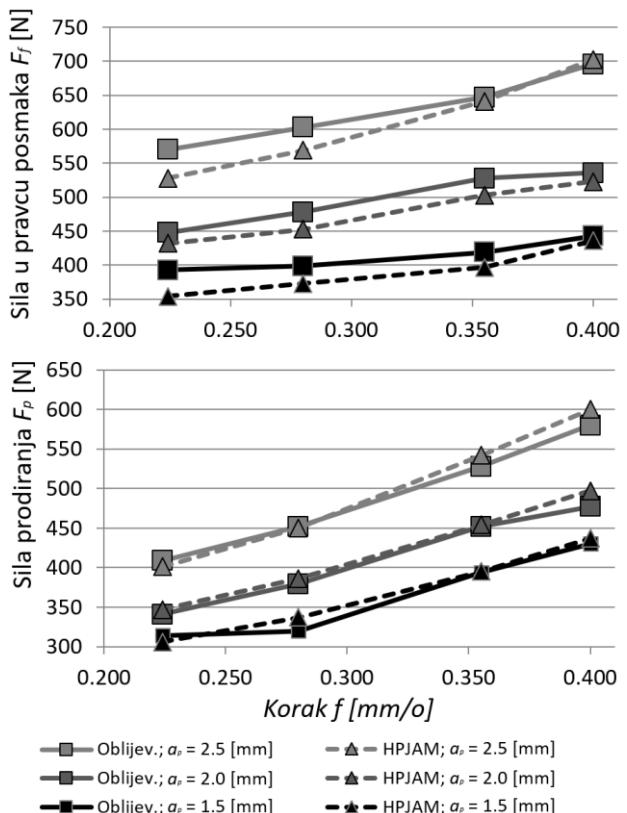


Slika 2. Alatni mikroskop TM Mitutoyo 510

## 2.1 Prva faza ispitivanja

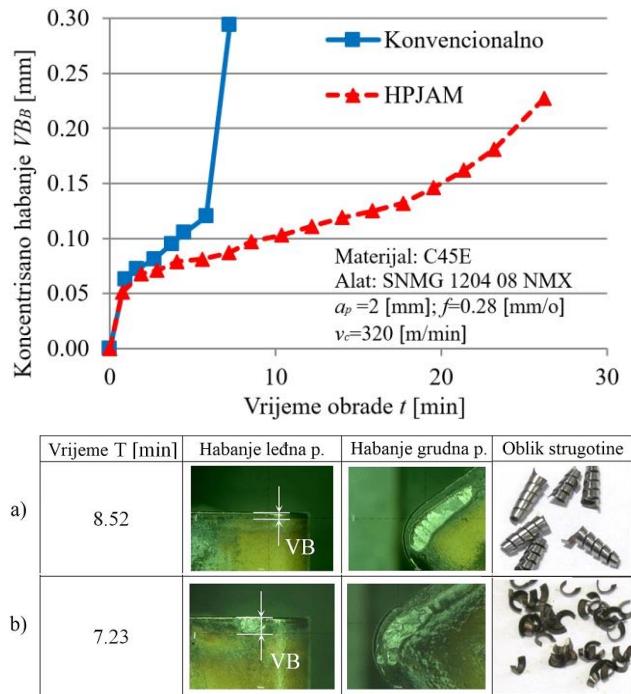
U prvoj fazi istraživanja korišćen je termički neobrađen ugljenični čelik C45E zatezne čvrstoće  $820 \text{ N/mm}^2$  i tvrdoće 45 HRc. Korišćen je rezni alat od TM označe SNMG 1204 08 NMX i držač alata PSDN 2525 M12, sa ugлом  $45^\circ$ . Parametri rezanja su izabrani u cilju postizanja veće produktivnosti pri struganju: dubina rezanja  $a_p$  [mm]: 1,5; 2,0 i 2,5; korak  $f$  [mm/o]: 0,224; 0,280; 0,355 i 0,400; i brzina rezanja  $v_c$  [m/min]: 210, 310 i 400. U radu sa tehnikom HPJAM sa safirnom mlaznicom prečnika 0,4 mm, korišćen je pritisak od 50 MPa i protok od 2 l/min.

Modeliranje sila rezanja je izvršeno primjenom regresione analize. Analizom sila rezanja može se zaključiti da pri primjeni obe tehnike dovođenja rashladne tekućine u zonu rezanja (obljevanje i HPJAM) sile rezanja rastu sa porastom koraka i dubine rezanja. Analizom eksperimentalnih rezultata može se zaključiti da su vrijednosti sila rezanja niže oko 7% kod primjene HPJAM nago pri obljevanju, slika 3.

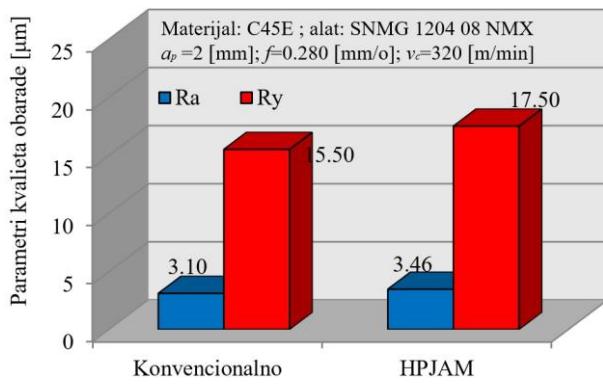


Slika 3. Vrijednosti sila posmaka i sila prodiranja pri obradi termički neobrađenog C45E

U toku eksperimentalnih istraživanja praćen je proces habanja alata na leđnoj površini (VB) i oblik strugotine, kao bitan pokazatelj stanja procesa rezanja. Kriterijum pohabanosti alata je  $VB_k = 0.3$  mm, prema kome je određena postojanost alata ( $T$ ), slika 4. Primjenom HPJAM-a povoljni oblici strugotine su postignuti u svim kombinacijama režima rezanja. Svijetlija strugotina ukazuje na bolju provodljivost toplotne. Prilikom primjene HPJAM-a, vijek trajanja alata bio je gotovo četiri puta duži, a proces habanja ujednačeniji u poređenju sa tehnikom oblijevanja.



**Slika 4.** Habanje alata i oblik strugotine pri obradi C45E (45 HRc) za različite tehnike hlađenja a) oblijevanje, b) HPJAM [16]



**Slika 5.** Parametri hrapavosti pri obradi C45E (45 HRc) za različite tehnike hlađenja

Prilikom poređenja parametara hrapavosti površina ( $R_a$  i  $R_y$ ) može se uočiti nešto bolji

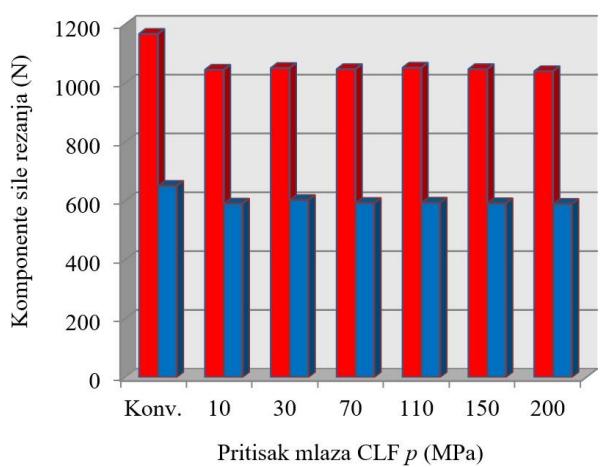
kvalitet obrađenih površina pri primjeni konvencionalne tehnike oblijevanja, slika 5.

## 2.2 Druga faza ispitivanja

U drugoj fazi, ispitivanja su vršena na čeliku C45E površinski kaljenim na 58 HRc. Obrada je vršena sa alatom od tvrdog metala sa  $\text{Al}_2\text{O}_3$  prevlakom, SNMA 120408 KR 432, nosač alata 2020K 12 (proizvođača reznog alata Sandvik). Kao sredstvo za hlađenje i podmazivanje korišćena je 5,5% emulzija biljnog ulja. Rezna pločica nije imala geometriju za lomljjenje strugotine.

Prilikom praćenja sila rezanja analiziran je uticaj pritiska mlaza tečnosti u rasponu od 10-200 MPa pri HPJA tehnici hlađenja, dok su brzina rezanja,  $v_c = 98.5$  mm/min, posmak  $f = 0.25$  mm/o i dubina rezanja,  $a_p = 2$  mm, bili konstantni. Utvrđeno je da se pri pritiscima od 10 MPa i 30 MPa postiže relativno dobra lomljivost strugotine. Također je primijećeno da sa porastom pritiska iznad 110 MPa ne dolazi do daljnog poboljšanja u lomljenu strugotine tako da je testiranje habanja alata i hrapavosti površine vršeno pri sljedećim uslovima: brzina rezanja  $v_c = 98.5$  mm/min, posmak  $f = 0.25$  mm/o i dubina rezanja  $a_p = 2$  mm, pritisak 110 MPa, prečnik mlaznice 0,3 mm.

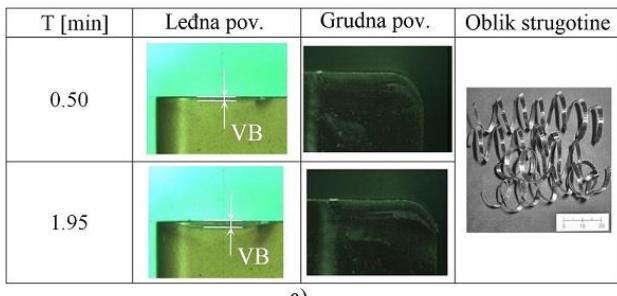
Materijal: C45E (58 HRc);  
Alat: SNMA 12 04 08 - KR;  
 $ap = 2.0$  mm;  $f = 0.25$  mm/o;  
 $vc = 98.5$  m/min



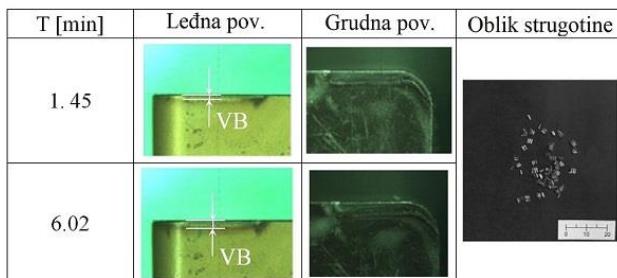
**Slika 6.** Uticaj pritiska tečnosti pri HPJAM na promjenu sile posmaka i sile prodiranja

Pri primjeni HPJAM tehnike hlađenja uočeno je smanjenje sile posmaka i sile

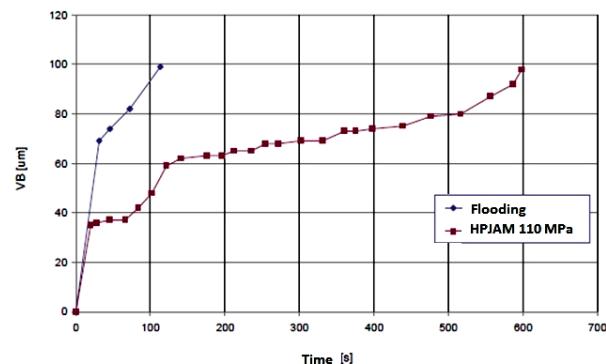
prodiranja oko 10% (za obe sile) u poređenju sa konvencionalnom tehnikom oblijevanjem. Međutim nije uočen trend značajnijeg smanjenja sila rezanja sa porastom pritiska tečnosti za hlađenje pri HPJAM tehnički, slika 6. Za vrijeme eksperimentalnih istraživanja praćen je proces habanja alata na leđnoj površini ( $VB$ ) i oblik strugotine. Kriterijum pohabanosti alata je  $VB_k = 0.1$  mm, prema kome je određena postojanost alata ( $T$ ), slika 7. Na slici 8 su prikazane krive habanja alata za obe tehnike hlađenje pri struganju čelika C45E (58 HRc).



a)



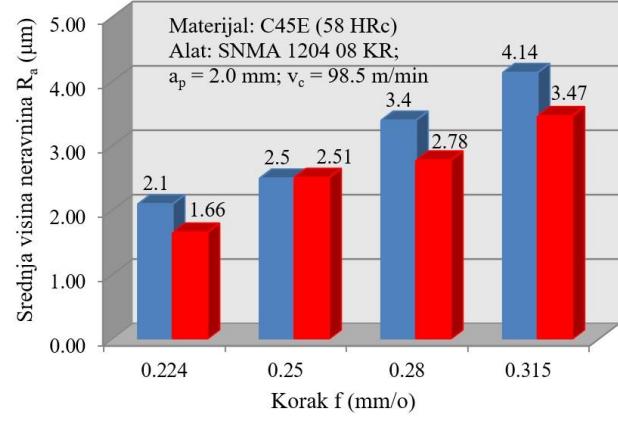
Slika 7. Habanje alata i oblik strugotine pri struganju C45E (58 HRc) a) oblijevanje i b) HPJAM [16]



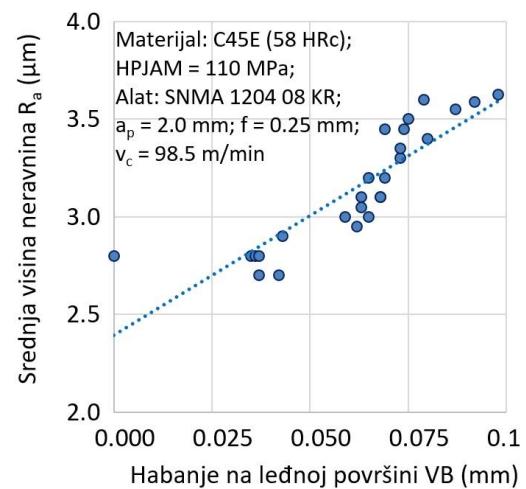
Slika 8. Krive habanje alata SNMA 1204 08 KR pri struganju C45E (58HRc),  $a_p=2\text{mm}$ ,  $v_c=98,5\text{m/min}$ ,  $f=0.25\text{mm/o}$  [5]

Sa slike 9 se može uočiti da je neznatno bolji kvalitet površine kada se koristi HPJAM u poređenju sa oblijevanjem. S obzirom da je primjena u operacijama srednje obrade efekat

hrapavosti obrađene površine nije naročito važan. Sa slike 10. gdje je prikazan uticaj habanja alata na hrapavost površine Ra pri obradi čelika C45E (58 HRc), prema očekivanjima, vidimo da se sa povećanjem habanja alata povećava hrapavost površine.



Slika 9. Promjena parametra hrapavosti Ra za različite tehnike hlađenja pri struganju C45E (58HRc)



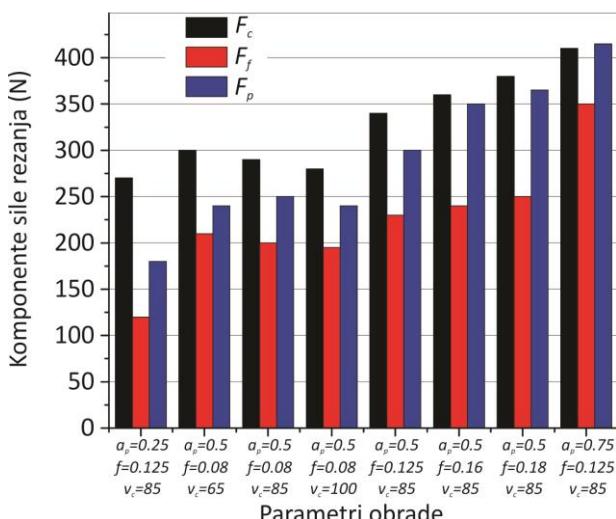
Slika 10. Uticaj habanja alata na hrapavost površine Ra pri obradi čelika C45E (58 HRc)

Na osnovu rezultata ispitivanja može se zaključiti da se pri struganju čelika C45E površinski kaljenog na 58 HRC sa alatom od tvrdog metala sa Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> prevlakom i primjenom HPJAM postiže vrlo dobro lomljenje strugotine i obrada se može vršiti sa reznim pločicama koje nemaju lomače strugotine. Za ispitivane uslove je pokazano da se primjenom HPJAM vijek trajanja alata povećava gotovo 5 puta, a potrošnja rashladne tekućine je približno 4 puta manja u odnosu na rad sa oblijevanjem. Obe tehnike hlađenja daju približno iste rezultate hrapavosti površina za ispitivane uslove.

## 2.3 Treća faza ispitivanja

U trećoj fazi, ispitivanja su vršena na čeliku za ležajeve 100Cr6 zatezne čvrstoće 1100 MPa i tvrdoće 62 HRc izrazito visoke otpornosti na habanje. Obradu ovog čelika bilo je nemoguće izvesti sa konvencionalnim načinom hlađenja tj. oblijevanjem jer je katastrofalno habanje alata nastupilo već nakon 20 s rada. Obrada je vršena sa alatom od tvrdog metala sa nano prevlakom CNMG 1204 08 MF5, proizvođača SECO (interna oznaka proizvođača TH1000); nosač alata PCBNR 2525 M12. Rashladna tekućina 3% emulzija biljnog ulja. Tehnika hlađenja i podmazivanja HPJAM, pritisak 50 MPa, protok 2.0 l/min, prečnik mlaznice 0,5 mm. Ispitivanja su vršena za različite vrijednosti brzine rezanja  $v_c$  (65, 85, 100, 120 m/min), posmaka  $f$  (0,08; 0,125; 0,16; 0,18; 0,2 mm/o) i dubine rezanja  $a_p$  (0,25; 0,5; 0,75 mm).

Na slici 11 su prikazane izmjerene vrijednosti glavne sile rezanja  $F_c$ , sile posmaka  $F_f$  i sile prodiranja  $F_p$  za različite vrijednosti režima rezanja pri struganju čelika 100Cr6 (62 HRc) i primjeni HPJAM.

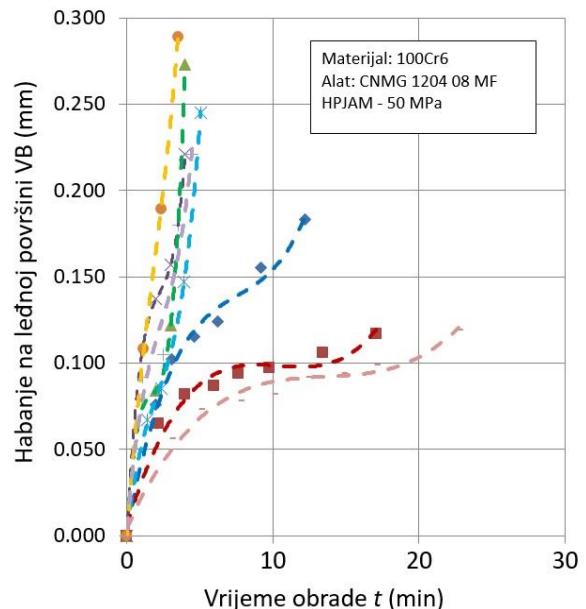


Slika 11. Vrijednosti komponenti sila rezanja za različite režime obrade pri obradi 100Cr6

Analizom rezultata sa slike 11 može se zaključiti da se vrijednosti svih komponenti sila rezanja povećavaju sa porastom dubine rezanja i posmaka, a opadaju sa porastom brzine rezanja. Najveće vrijednosti ima glavna sila rezanja, ali su uočava da je sila prodiranja  $F_p$  veća od sile posmaka u svim kombinacijama režima obrade. Razlog za to je geometrija

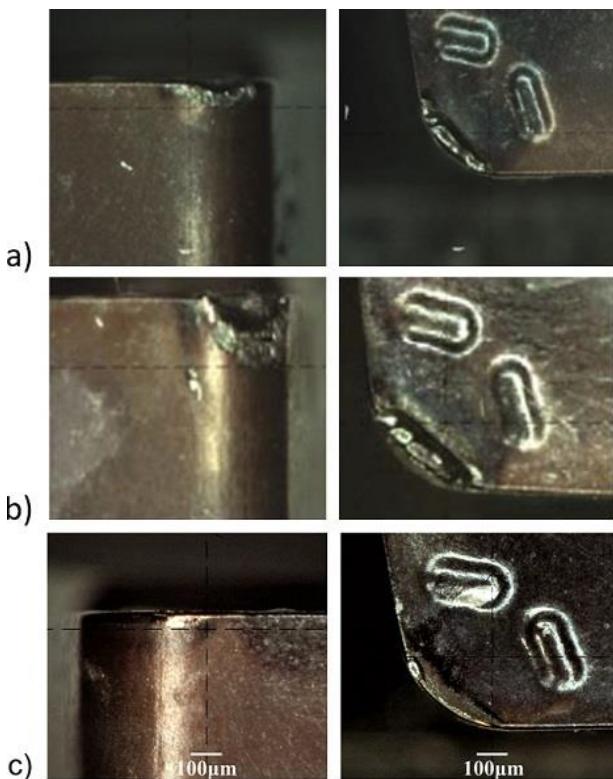
kontakta između vrha alata i radnog predmeta. Sa dijagrama na slici 11 također se može zaključiti da za iste vrijednosti brzine i dubine rezanja, promjena posmaka ne utiče značajno na promjenu sile posmaka  $F_f$ , što je također posljedica geometrije kontakta.

- ✖  $f=0.2 \text{ mm/o}; v=85 \text{ m/min}$
- ▲  $f=0.125 \text{ mm/o}; v=120 \text{ m/min}$
- $f=0.125 \text{ mm/o}; v=65 \text{ m/min}$
- +  $f=0.16 \text{ mm/o}; v=85 \text{ m/min}$
- ◆  $f=0.125 \text{ mm/o}; v=85 \text{ m/min}$
- \*  $f=0.125 \text{ mm/o}; v=100 \text{ m/min}$
- $f=0.18 \text{ mm/o}; v=85 \text{ m/min}$
- $f=0.08 \text{ mm/o}; v=85 \text{ m/min}$



Slika 12. Habanje alata za različite posmake i brzine rezanja i  $a_p=0,5 \text{ mm}$  pri obradi 100Cr6

Analizom krivih habanja, slika 12, može se vidjeti da habanje po leđnoj površini alata izrazito brzo napreduje sa vremenom rezanja i da je intenzivnije sa porastom brzine rezanja i posmaka pri konstantnoj dubini rezanja, pri čemu je veće procentualno učešće brzine rezanja na habanje alata. Razlozi za to su intenzivno trenje, visoke kontaktne temperature i pritisci koji se javljaju sa porastom brzine rezanja i posmaka. Zbog intenzivnog i brzog trošenja alata, vijek trajanja alata je definisan kao trenutak kada pojedinačna habanja na leđnoj površini pređe vrijednost 0,25 mm ili trenutak kada nastupi katastrofalno trošenje i lom alata. Sa slike 13. se može uočiti da se pri najmanjim vrijednostima posmaka i brzina rezanja ostvaruje i najmanje habanje alata. Praćenjem procesa habanja alata je uočeno da pred samim otkazom i lomom alata dolazi do promjene oblika strugotine, odnosno stvaraju se neprihvativiji oblici strugotine.

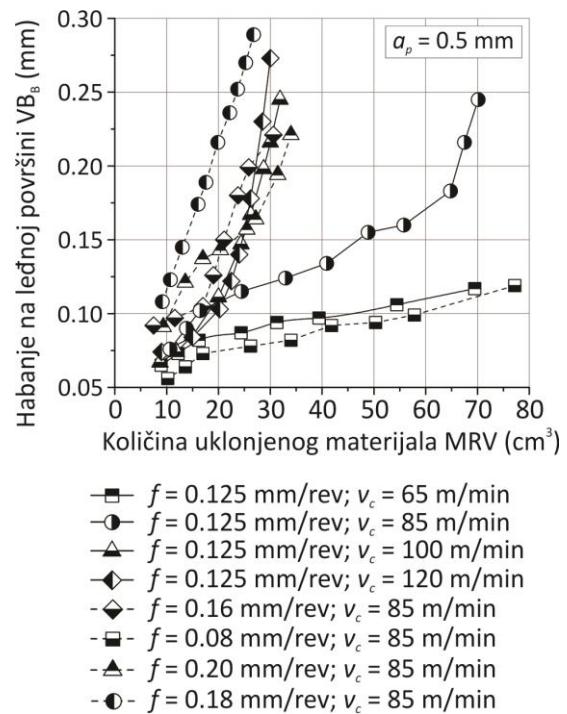


Slika 13. Habanje alata pri obradi 100Cr6;

a)  $a_p = 0.5\text{mm}$ ,  $f = 0.125 \text{ mm/o}$ ,  $v_c = 85 \text{ m/min}$ ;  
 b)  $a_p = 0.5 \text{ mm}$ ,  $f = 0.125 \text{ mm/o}$ ,  $v_c = 120 \text{ m/min}$ ;  
 c)  $a_p = 0.5 \text{ mm}$ ,  $v_c = 85 \text{ m/min}$  i  $f = 0.08 \text{ mm/o}$  [17]

Stepen i veličina habanja alata po leđnoj površini zavisi od zapremine uklonjenog materijala  $MRV (\text{cm}^3)$ , odnosno sa povećanjem  $MRV$  značajno raste i veličina habanja alata, što se može vidjeti sa slike 14 [17]. Najveća istrošenost, ali i najveći stepen uklanjanja materijala ( $MRR$ ) se događa kod obrade s brzinom rezanja od 120 m/min i korakom od 0,125 mm/o. Pri brzini rezanja od 85 m/min i posmaku 0,08 mm/o, ostvareno je minimalno trošenje alata. Kombinacija brzine rezanja  $v_c = 85 \text{ m/min}$  i posmaka  $f = 0,125 \text{ mm/o}$  predstavlja granicu između kombinacija ova dva parametra koji vode katastrofalnom habanju alata i kombinacija koje obezbeđuju niži stepen trošenja alata.

Rezultati iz Tabele 1 pokazuju da posmak značajno utiče na hrapavost i kvalitet obrađene površine. Naime, sa porastom posmaka, pri istoj brzini rezanja dolazi do povećanja parametra hrapavosti  $R_a$  i lošijeg kvaliteta obrade. Dalje, za istu vrijednost posmaka, a sa porastom brzine rezanja parametar hrapavosti  $R_a$  se smanjuje i dobija se bolji kvalitet obrade.



Slika 14. Zavisnost habanja alata od zapremine uklonjenog materijala pri obradi 100Cr6

Tabela 1. Eksperimentalne vrijednosti habanja alata i hrapavosti površine za ispitivane uslove pri obradi 100Cr6

R <sub>b</sub>	Posmak [mm/o]	Brzina [m/min]	T [min]	VB [mm]	R <sub>a</sub> [µm]
1	0.08	85	3.3	0.056	0.36
2	0.08	85	7.7	0.078	0.39
3	0.08	85	14.8	0.094	0.49
4	0.16	85	1.1	0.092	0.85
5	0.16	85	2.8	0.126	0.83
6	0.16	85	3.8	0.199	0.93
7	0.18	85	1.4	0.123	0.87
8	0.18	85	2.3	0.189	0.91
9	0.18	85	3.1	0.252	0.95
10	0.2	85	1.1	0.091	0.59
11	0.2	85	2.4	0.143	0.95
12	0.2	85	3.7	0.194	2.51
13	0.125	65	2.2	0.065	0.68
14	0.125	65	6	0.087	0.63
15	0.125	65	13.4	0.106	0.61
16	0.125	85	2.6	0.09	0.56
17	0.125	85	6.2	0.124	0.49
18	0.125	85	13.2	0.245	0.49
19	0.125	100	2.4	0.085	0.54
20	0.125	100	4.2	0.167	0.55
21	0.125	100	5.1	0.245	0.58
22	0.125	120	2.7	0.103	0.53
23	0.125	120	3.5	0.178	0.55
24	0.125	120	4	0.213	0.57

Na osnovu prikazanih rezultata istraživanja sa čelikom 100Cr6 tvrdoće 62 HRc može se zaključiti da se ovaj čelik može uspješno obrađivati i sa jeftinijim alatima od tvrdog metala primjenom HPJAM tehnike hlađenja u uslovima srednje i grube obrade. Svakako da to favorizuje, u određenim uslovima, primjenu ove tehnike hlađenja ako uzmemu u obzir činjenicu da se teškoobradivi materijali dominantno obrađuju alatima od CBN koji su znatno skuplji od alata od tvrdog metala.

### 3. ZAKLJUČAK

Cilj rada je bio da se ukaže na mogućnost obrade kaljenih čelika sa jeftinijim alatima od tvrdog metala uz primjenu specijalne tehnike dovođenja rashladne tekućine u zonu rezanja, u poređenju sa skupljim alatima od kubnog bor nitrida koji se dominantno koriste u obradi ovih materijala. Eksperimentalna istraživanja su rađena sa konvencionalnom tehnikom hlađenja oblijevanjem i tehnikom dovođenja rashladne tekućine u vidu mlaza visokog pritiska direktno u zonu kontakata alata i strugotine, HPJAM. Istraživanja su provedena kroz tri faze u zavisnosti od tvrdoće ispitivanih čelika kako je i pokazano u radu. U toku istraživanja su praćeni izlazni parametri procesa: sile rezanja, habanje alata, kvalitet obrade, oblik strugotine i zapremina uklonjenog materijala i na osnovu njih su određene mogućnosti obe tehnike hlađenja. Uspostavljene su određene relacije između habanja alata, kvaliteta obrade i zapremine uklonjenog materijala, kao i oblika strugotine kao indirektnog pokazatelja stanja procesa.

Pri obradi čelika C45E tvrdoće 45HRc i 58HRc može se zaključiti da HPJAM daje dobre rezultate u pogledu habanja alata, lomljenja strugotine, potrošnje rashladne tekućine. Pri obe tehnike hlađenja (oblijevanje i HPJAM) postignuti su približno isti rezultati u pogledu kvaliteta obrade.

Pri obradi čelika 100Cr6 kaljenog na 62 HRc pokazano je da se primjenom HPJAM tehnike hlađenja mogu postići zadovoljavajući rezultati u pogledu habanja alata, kvaliteta obrade, lomljenja strugotine u uslovima srednje i grube

obrade. Također, uočena je značajna zapremina uklanjanja materijala, što daje prednost ovoj tehnici hlađenja u smislu povećanja produktivnosti. Pored toga, značajno se smanjuje potrošnja tekućine za rezanje u poređenju sa konvencionalnim hlađenjem. Na osnovu prikazanih rezultata istraživanja izdvaja se sljedeća kombinacija režima obrade:  $a_p = 0,5 \text{ mm}$ ,  $f = 0,08 \text{ mm/o}$  i  $v_c = 85 \text{ m/min}$ , jer obezbjeđuju dobru hraptavost površine  $R_a = 0,35 \mu\text{m}$ , najduži vijek alata  $T = 22,7 \text{ min}$  i veliku zapreminu uklanjanja materijala  $MRV = 77,1 \text{ cm}^3$ .

U radu [18] prikazani su rezultati istraživanja koji se odnose na struganje čelika visoke tvrdoće, kao što je 100Cr6 kaljenog na 63 HRc sa istim režimima rada kao u istraživanjima koja su prezentovana u ovom radu, ali sa alatom od kubnog bor nitrida CBN. Rezultati tih istraživanja su: vijek trajanja alata 49 min, stepen uklanjanja materijala  $48 \text{ cm}^3/\text{min}$  i hraptavost oko  $0.85 \mu\text{m}$ . Uzimajući u obzir troškove CBN alata u poređenju sa troškovima alata od TM (koji su oko deset puta viši) onda ne treba posebno naglašavati prednosti primjene tehnike HPJAM hlađenja u kombinaciji sa alatima od tvrdog metala.

Uopšteno, može se zaključiti da primjena HPJAM tehnike hlađenja pri tvrdom struganju kaljenih čelika obezbjeđuje duži vijek trajanja alata, manje sile rezanja i parametre hraptavosti obrađenih površina na zadovoljavajućem nivou.

### ZAHVALNOST

Rezultati istraživanja prikazani u ovom radu su dio istraživanja koja su realizovana kroz projekte bilateralne saradnje između Laboratorije za tehnologiju obrade rezanjem i obradne sisteme Mašinskog fakulteta u Banjoj Luci i Laboratorije za odrezavanje Fakulteta za strojarshtvo iz Ljubljane.

### LITERATURA

- [1] J.P. Davim, W. Grzesik,: *Machining of hard materials*, Springer, 2015.
- [2] V. Sahma, M. Dogra, N. Suri: *Cooling techniques for improved productivity in*

- turning, Int J Mach Tool Manuf, Vol. 49, No. 6, pp. 435–453, 2010.
- [3] P. Dahlman, M. Escursell: High-pressure jet-assisted cooling: a new possibility for near net shape turning of decarburized steel, Int J Mach Tools Manuf, Bol. 44, No. 1, pp. 109–115, 2004.
- [4] E.O. Ezugwu, J. Bonney: Effect of high-pressure coolant supply when machining nickel-base, Inconel 718, alloy with coated carbide tools, J Mater Process Technol, Vol. 153, No. 1, pp. 1045-1050, 2004.
- [5] D. Kramar, J. Kopac: High pressure cooling in the machining of hard-to-machine materials, Journal of Mechanical Engineering, Vol. 55, No. 11, pp. 685-694, 2009.
- [6] C. Courbon, D. Kramar, P. Krajnik, F. Pusavec, J. Rech, J. Kopac: Investigation of machining performance in high-pressure jet assisted turning of Inconel 718: an experimental study, Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol. 49, No. 14, pp. 1114-1125, 2009.
- [7] R.J.S. Pigott, *Method of applying cutting liquids*, US patent 2,653,517
- [8] M. Mazurkiewicz: A manufacturing tool for a new century, Journal of Materials Processing Technology, Vol.106, No. 1-3, pp. 112-118, 2000.
- [9] J. Kaminski, O. Ljungkrona, R. Craford, S. Lagerberg: Control of chip flow direction in high pressure water jet assisted orthogonal tube turning, Proc. Instn. Mech. Engrs., Part B, Journal of Engineering Manufacture, Vol. 2214, No. B7, pp. 529-534, 2000.
- [10] G.K. Yankoff, *Method and apparatus for machining*, US Patent 4,621,547.
- [11] D. Kramar, P. Krajnik, J. Kopač: High pressure jet assisted turning of surface hardened piston rods, Int. J. Materials and Product Technology, Vol. 38, No. 4, pp. 399-417, 2010.
- [12] A.E. Deniz, R. Micaroni: Influence of the Direction and Flow Rate of the Cutting Fluid on Tool Life in Turning Process of AISI 1045 Steel, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, No. 2, pp. 247-254, 2007.
- [13] V.T.G. Naves, M.B. DaSilva, F.J. DaSilva: Evaluation of the effect of application of cutting fluid at high pressure on tool wear during turning operation of AISI 316 austenitic stainless steel, Wear, Vol. 302, No. 1–2, pp. 1201–1208, 2013.
- [14] M. Bicek, F. Dumont, C. Courbon, F. Pusavec, J. Rech, J. Kopac: Cryogenic machining as an alternative turning process of normalized and hardened AISI 52100 bearing steel, J Mater Process Technol, Vol. 212, No. 12, pp. 2609–2618, 2012.
- [15] M.A. Yallese, K. Chaoui, N. Zeghib, L. Boulanouar, J.F. Rigal: Hard machining of hardened bearing steel using cubic boron nitride tool, J Mater Process Technol, Vol. 209, No. 2, pp. 1092–1104, 2009.
- [16] G. Globočki Lakić, B. Sredanović, D. Kramar, J. Kopač: Machinability of C45E Steel-Application of minimum quantity lubrication an High pressure jet assisted machining techniques, Trans of FAMENA, Vol. 40, No. 2, pp. 45 - 58, 2016.
- [17] B. Srednović, G. Globočki Lakić: Hard turning of bearing steel AISI 52100 with carbide tool and high pressure coolant supply, J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng, Vol. 39, No. 11, pp. 4623-4632, 2017.
- [18] G.S. Galloppi, MS Filho, G.F. Batalha, Hard turning of tempered DIN 100Cr6 steel with coated and no coated CBN inserts. J Mater Process Technol, Vol. 179, No. 1–3, pp. 146–153, 2006.

## POSSIBILITY OF HARDENED STEEL MACHINING BY APPLICATION OF HIGH PRESSURE COOLING AND LUBRICATION TECHNIQUE

**Abstract:** The paper analyzes the possibilities of processing the hardened steel with carbide tools by applying a special technique for dosing the coolant in cutting zone, the high pressure jet assisted machining (HPJAM). Carbon steel C45E (45 HRc), steel C45E surface hardened at 58 HRc and steel for bearings 100Cr6 (AISI 52100) hardness 62 HRc are analyzed. Experimental tests were carried out in different cutting conditions (cutting depth, step, cutting speed) with monitoring of process output parameters: cutting forces, tool wear, surface quality, chip shape and amount removed material in unit time. The results of the study indicate the numerous advantages of using hard metal tools and high-pressure jet cooling and lubrication

*techniques (HPJAM) versus conventional cooling techniques from the aspect of increasing productivity, reducing tool wear, smaller cutting forces, better machining quality and less processing costs. Comparisons of the processing costs and the achieved output processing effects in the tested steel machining with the carbide tools and the application of special high-pressure jet cooling versus machining cubic boron nitride (CBN) tools, which are predominantly used in hard scrubbing, have been performed.*

**Keywords:** turning, hardened steels, hard metal, HPJAM



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## AN OPTIMAL ENERGY CONTROL STRATEGY FOR ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

**Marin GOSTIMIROVIC<sup>1\*</sup>, Dragan RODIC<sup>1</sup>, Pavel KOVAC<sup>1</sup>, Milenko SEKULIC<sup>1</sup>, Vlastimir PEJIC<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> University of Novi Sad, Faculty of Technical Science, Novi Sad, Serbia, maring@uns.ac.rs,  
rodicdr@uns.ac.rs, pkovac@uns.ac.rs, milenkos@uns.ac.rs

<sup>2</sup> College of Business and Technical Education, Doboj, Bosnia and Herzegovina,  
vlastimirpejic@gmail.com

\*Corresponding author: maring@uns.ac.rs

**Abstract:** Electrical discharge machining (EDM) is a material removal process based on the conversion of electrical energy to thermal energy. Therefore, investigation of electrical energy efficiency which in the discharge zone is transformed into heat is of key importance in EDM. In this paper it has been taken a different approach towards the modeling and optimization of the thermal process in the EDM. The finite element method was used for modeling of the thermal energy generation and distribution processes. In addition to the temperature, this method allows the determination of heat flux density distribution on the workpiece. For the optimization of the energy efficiency process is used the optimal control problem which leads to the optimal solution for the discharge energy considering the main input machining parameters. With this action, we can say that different access has been made to identification of the discharge energy efficiency to achieve the highest possible output performance of the EDM process.

**Keywords:** EDM process, discharge energy, temperature, heat flux, optimal control problem.

### 1. INTRODUCTION

Electrical discharge machining (EDM) is one of the advanced nonconventional technologies from the group of thermo-electric processes. In recent years, EDM has become a most popular choice for machining of electrically conductive difficult-to-machine materials with the complicated geometry and good accuracy profile. So this method is especially suitable for the production of tools, dies, molds and other critical parts to roughing and finishing operations.

In EDM process, the material is removed by a series of successive discrete discharges

between a pair of electrodes (tool and workpiece) which are submerged in a dielectric fluid. The process of controlled spark generation between the electrodes forms hot plasma with temperature to 40.000°C within a small zone of the discharge area. Such very high temperature causes heating, melting and evaporation of a small amount of material from the workpiece. After material is removed due to a spark, the next spark shifts to a different point on the workpiece surface where the minimum electrical resistance is. In this way craters occur at various locations over the entire surface of the workpiece material [1].

Regardless of its distinguished importance, EDM has some disadvantages like low process efficiency and poor surface integrity, what is the basic limitation of further successful application in practice. Thus, investigation and control of the electrical discharge energy which in the machining zone is transformed into heat is of key importance in EDM process.

A review of the recent research shows that most attempts to explain the discharge energy efficiency of EDM process have been based on theoretical concepts of physics. The first analysis included the simple electro-thermal analytical models [2]. Then followed more works utilizing different numerical methods [3]. Recently, a large number of researchers have described EDM process by using some of the advanced techniques [4].

Despite the availability of the mentioned studies, investigation of the discharge energy efficiency of EDM is fairly complex and not completely solved yet. Research shows that non-linear and non-stationary processes, such as the EDM, can be successfully solved using approaches based on the solution of optimal control problem. The optimal control problem allows the closest possible approximation of the complicated electro-thermal behaviour, i.e. mathematical modeling and optimization of the EDM process [5, 6].

In the case of EDM, the optimal control problem is so far rarely used. In the present paper, the EDM optimal energy strategy based on finite element method and optimal control solution has been developed. In this respect, thermal model has been developed to determine the heat flux density and the workpiece temperature in EDM process. In contrast to previous research, this approach with using the heat flux enables the optimal control of the energy efficiency of a single pulse discharge. The main aim in using this strategy was to predict the energy performance of the EDM process for determination of the optimal electrical discharge performance considering the machining input parameters. The performance of optimal control approach is compared to

the experimental results and good agreement was found between them.

## 2. OPTIMAL CONTROL PROBLEM

The optimal control problem represents an innovative paradigm in research of complex processes and systems. This approach allows the closest possible mathematical approximation of the real variables based on limited experiments. In this context, the optimal control problem is used to overcome the ill-posed nature of the some process.

The optimal control is concerned with the modeling of problem and minimization or maximization of a certain objective quality function, in order to find characteristics that will result in desired results. There are numerous optimization techniques that could be employed in this problem.

The formulation of the optimal energy control problem of the EDM implies mathematical model with boundary conditions and specification of performance criterion. In this problem, the optimal control has been generally associated with the estimation of an unknown temperature or heat flux of the surface workpiece.

For the mathematical formulation of the optimal energy control problem, the simplified numerical thermal model to simulate a single electrical discharge is used, Fig. 1. In that case, heat conduction equation in two-dimensional cylindrical coordinate system is given as follows:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right) \quad (1)$$

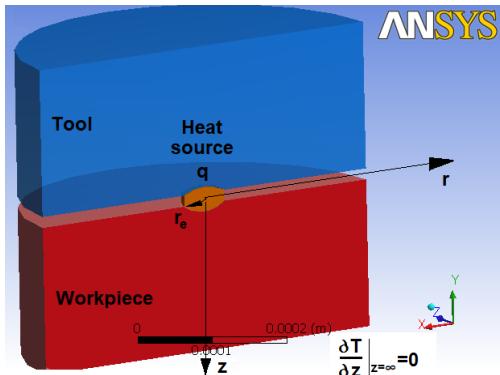
with initial:

$$T(r, z, t)|_{t=0} = T_0 \quad (2)$$

and the boundary conditions:

$$\begin{aligned} -k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0, r \leq r_e} &= q \\ -k \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=\infty, r=\infty} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

where  $T$  is the temperature,  $r$  is the radial coordinate,  $z$  is the axial coordinate,  $t$  is the time,  $k$  is the thermal conductivity,  $\rho$  is the material density,  $c$  is the specific heat,  $q$  is the heat flux density on surface workpiece and  $r_e$  is the radius of the heat source.



**Figure 1.** Thermo-physical model of EDM process

The heat flux applied to the model is uniformly distributed point source heat:

$$q(t_e) = \frac{U_e \cdot I_e}{r_e^2 \pi} \quad (4)$$

where  $U_e$  is the discharge voltage,  $I_e$  is the discharge current and  $t_e$  is the discharge duration.

Heat distribution factor  $f_q$  is another important parameter in the electro-thermal analysis of EDM process. It shows how much of the total heat reaches to the workpiece. The heat distribution factors are extremely difficult to be measured experimentally. In this present work is used proposed approach by researchers in the literature [6].

A mathematical description for adequate definition of the optimal energy control problem of the electrical discharge machining is given as:

$$q_{k+1} = f(q_k, u_k) \quad k = 0, 1, \dots \quad (5)$$

with the objective quality function based on the mean-square deviation

$$J(q, u) := \sum_k [q_k - \bar{q}]^2 \quad (6)$$

where  $u \in U(I_e, t_e)$  is the control input,  $q$  is the state variable and  $\bar{q}$  is the desired goal state.

The optimal control approach is solved as minimization of the objective function, i.e. finding an admissible optimal control  $u^* \in U$ :

$$u^* = \arg \min_u J(q, u) \quad (7)$$

Establishing the optimal control problem, through gradual approach to the optimum level over a number of successive steps, gives exact solution using a standard iterative gradient-based method.

### 3. RESULTS AND ANALYSIS

The optimal energy control problem of the electrical discharge machining is performed on the basis of the experimental results. The experiments were conducted on a die-sinking EDM Fanuc machine tool. The workpiece material was manganese tool steel AISI O2 with a hardness of 62 HRC. The tool was made of 99.9% pure electrolytic copper. The dielectric was petroleum with the natural flushing.

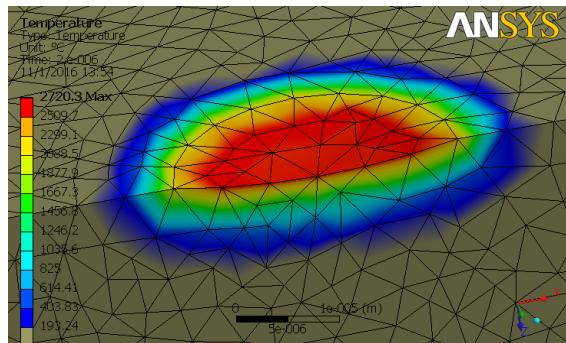
Measuring material removal rate and surface roughness were conducted in different machining conditions. The machining conditions setting system includes the parameters of the discharge energy, i.e. the discharge current and the pulse duration.

In the model for the numerical analysis, following input parameters were taken: the initial condition is ambient temperature of  $T_0=20^\circ\text{C}$  and the boundary condition is heat flux in the discharge zone of the surface workpiece defined with Eq. (4). In addition, the heat distribution factor  $f_q=28\%$  and the radius of the heat source  $r_e=12.3\mu\text{m}$  were constant regardless of the discharge conditions and are estimated on the basis of the previous work [6].

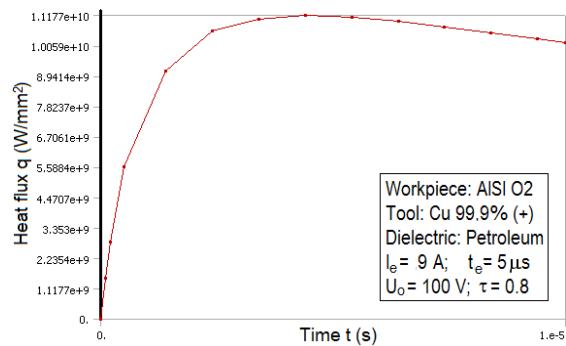
Based on the previous steps, software ANSYS R16.1 is used to create a finite element model of the EDM process. The temperature distribution in the workpiece of a single pulse for one machining condition ( $I_e=9\text{ A}$ ,  $t_e=5\mu\text{s}$ ) is shown in Fig. 2.

With a temperature distribution, the optimization of the energy efficiency EDM process is concerned with the optimal control of the heat flux density to the workpiece surface. The change of the heat flux density

during discharge duration of a single pulse is shown in figure 3.



**Figure 2.** The workpiece temperature distribution



**Figure 3.** The heat flux distribution on workpiece

The distribution of heat flux density shows the direct relationship between discharge energy parameters, i.e. discharge power and its time duration. The most favourable EDM machining parameters are calculated through gradual approach to the optimum level via constrained minimization of a chosen functional. In this case was found to be the optimal discharge current  $I_e=5.3$  A and the discharge duration  $t_e=3.4 \mu\text{s}$ .

#### 4. CONCLUSION

The proposed optimal control problem is practical way to modeling and optimization of the energy discharge in the EDM process. The thermal modeling was solved using finite element method, while for the energy optimization was used the optimal control of the temperature field and the heat flux density distribution in the EDM discharge zone.

Concretely, the optimal discharge energy control problem deals with the optimization of the EDM machining parameters. The proposed

procedure provides the optimization of the discharge current and discharge duration based on the mean-square deviation method. Discharge current and discharge duration predicted by the optimal control approach agree with the experimental results, so it can thus be concluded that this strategy gives satisfactory EDM performance compared to the other models.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This paper presents a part of researching at the project of number TR 35015 financed by the Republic of Serbia.

#### REFERENCES

- [1] M. Gostimirovic, P. Kovac, M. Sekulic, D. Rodic, V. Pucovsky: Machining characteristics of electrical discharge machining – A review, Journal of Production Engineering, Vol. 19, No. 1, pp. 1-10, 2016.
- [2] R. Snoeys, F. Van Dijck: Investigation of electro discharge machining operations by means of thermo-mathematical model, Annals of the CIRP, Vol. 20, No. 1, pp. 35-36, 1971.
- [3] N.B. Salah, F. Ghanem, K.B. Atig: Numerical study of thermal aspects of electric discharge machining process, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 46, No. 7-8, pp. 908-911, 2006.
- [4] P.S. Rao, K.E. Prasad, B.S. Reddy: Fuzzy modelling for electrical discharge machining of aluminium alloy, International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences, Vol. 9, pp. 112-125, 2011.
- [5] W.Y. Chiou, C.I. Chen, W.S. Lu: The Inverse Numerical Solutions of the Nonlinear Heat Transfer Problem in Electrical Discharge Machining, Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, Vol. 59, No. 4, pp. 247-266, 2011.
- [6] M. Gostimirovic, M. Radovanovic, M. Madic, D. Rodic, N. Kulundzic: Inverse electro-thermal analysis of the material removal mechanism in electrical discharge machining, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 97, No. 5-8, pp. 1861-1871, 2018.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## SOCIOLOŠKI ASPEKTI INDUSTRIJE 4.0 U NAPREDNIM PROIZVODNIM SISTEMIMA

Elvis HOZDIĆ

University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering  
Department of Control and Manufacturing Systems, Sloveniae, hozdic@yahoo.com

**Apstrakt:** Nove proizvodne strukture, koje će se temeljiti na principima nove industrijske revolucije - Industrije 4.0., zahtevaju razvoj novih referentnih modela proizvodnih sistema na svim upravljačkim razinama u proizvodnom preduzeću. Takvi modeli moraju omogućiti (1) odgovarajuću ulogu čoveka u proizvodnom sistemu, (2) vertikalno povezivanje u integrirane radne strukture, (3) horizontalno povezivanje u mrežne strukture na različitim razinama delovanja, (4) povezivanja u „pametna okruženja“, (5) digitalizaciju i kibernetizaciju postojećih radnih procesa i (6) razvoj i realizaciju „pametnih“ funkcija koje omogućavaju digitalizacija i kibernetizacija rada. Uloga čoveka u budućim generacijama proizvodnih sistema će se značajno promeniti. Kroz tematiku ovog rada je dat fokus na socioološke aspekte koje sa sobom donosi nova industrijska revolucija i na sistematičan način prikazana nova uloga čoveka u proizvodnim sistemima. Rad predstavlja dio istraživačkog rada na području istraživanja i razvoja modela kibernetosko-fizičkih proizvodnih sistema.

**Ključne reči:** kibernetosko-fizički sistemi, industrija 4.0, ICT, proizvodni sistem, Subjekt

### 1. UVOD

U zadnji dvadeset godina, na području industrijske proizvodnje, su se događale značajne promene; izbrisane su granice među državama u pogledu tržišta, zavladala je sveobuhvatna globalizacija, ponuda i potražnja za industrijskim proizvodima je veća nego ikada pre. Globalno tržište karakteriziraju ponude velikog broja novih proizvoda, brzo zastarevanje postojećih proizvoda, pre svega visokotehnoloških, zahtevi za visokom kvalitetom i kratkim rokovima isporuke kao i stalni pritisci na cene proizvoda. Takve razmere povećavaju nesigurnost i kompleksnost proizvodnje i teraju ka transformaciji proizvodnih industrijal u

industriju koja će se temeljiti na savremenim konceptima, tehnologijama i komunikacijama.

Proizvodne industrie se nalaze pred novom industrijskom revolucijom imenovanom *Industrija 4.0*<sup>1</sup>, koja ukazuje na korenite promene u industrijskim strukturama [1].

Terminološko značenje *Industrije 4.0* [2] je horizontalna integracija prenosa podataka, informacija i znanja između partnera, dobavljača i potrošača, kao i vertikalna integracija unutar samih proizvodnih organizacija – od razvoja proizvoda do njegove izrade, upotrebe, servisne potpore pa sve do kraja njegovog životnog ciklusa.

<sup>1</sup> *Industrija 4.0* – izraz proizašao iz projekta kojeg je podržala nemačka vlada sa Strategijom usmerenosti u visoku tehnologiju; Startegija je predstavljena na Hannover Messe 2011.

Prema Broy [3] industrije u razvijenim državama Evrope i Severne Amerike će se u budućnosti temeljiti na razvoju i eksploraciji kibernetko-fizičkih sistema. Pri tome će značajnu ulogu igrati tehnologije utemeljene na povezivanju bežičnih komunikacijskih sistema, bežičnih nadzornih sistema i senzorskih mreža, savladavanje masivnih količina podataka, rudarenje podataka i mašinskom učenju [4]. Razvijene industrijske države već razvijaju nacionalne platforme za nove napredne proizvodne sisteme sa ciljem približavanja ka konceptu *Industrije 4.0*.

Brisanje tržišnih granica, pojava interneta i razvoj informacionih tehnologija su stvorili uslove za razvoj novih struktura proizvodnih sistema [5], kao što su distribuirani adaptivni proizvodni sistemi, proizvodne mreže i autonomni proizvodni sistemi. Zbog razvoja raznovrsnih naprednih proizvodnih sistema se posledično stvara veliki broj komunikacijskih interakcija između sudionika u proizvodnim sistemima, s čime takvi proizvodni sistemi postaju nepredvidivi, njihovo ponašanje sve više kompleksno i upravljanje sve više zahtevno.

U današnjem vremenu sveobuhvatne globalizacije, koja značajno uteče na konkurentnost proizvodnih preduzeća, proizvodna preduzeća se nalaze pred izazovima: *Kako biti i ostati konkurentan na globalnom tržištu?* Ti izazovi generiraju potrebu da se istraživanje i razvoj na području naprednih proizvodnih sistema usmjeri u razvoj inovativnih koncepata proizvodnje, pri kojima će biti prevaziđena tradicionalna fizička i časovna ograničenja i na taj način omogućavati povezivanje geografski dislociranih elemenata, resursa i usluga kao i njihovu integraciju u „pametna okruženja“.

Takva okruženja, integrirana pomoću interneta, kao okosnice novih informacijsko-komunikacijskih tehnologija (eng. *Information-communication Technologies – ICT*), omogućava distribuiran rad, sudeovanje i zajedničko stvaranje nove vrednosti. To znači, da takvo integrirano socijalno-tehnološko okruženje obezbeđuje proizvodnom preduzeću povećanje učinkovitosti i konkurentnosti kroz:

(1) umrežavanje proizvodnih preduzeća u smislu komunikacije i razmene informacija, (2) razvoj proizvodnih sistema i njihovih uslužnih sistema u otvorenom mrežnom okruženju, što omogućava mogućnosti rekonfigurabilnosti u svakom pogledu, s tim, da se pri tome ne ugrožava integritet postojećega sistema, (3) kooperaciju i interakciju na relaciji *čovek – sistem*, na različitim razinama sudeovanja, kroz brz i učinkovit pristup informacijama.

Današnji kompleksni proizvodni sistemi su sastavljeni iz brojnih elemenata koji pokušavaju doseći međusobnu komunikaciju, interakciju i distribuciju proizvodnih aktivnosti [6]. Elementi kompleksnih proizvodnih sistema nisu samo realni, tj. fizički elementi, kao što su strojevi, oruđa, obradci i sl, već također, digitalni i komunikacijski elementi, kao što su internet [7], razne komunikacijske mreže, programska oprema, protokoli, datoteke, kompjuterski kontrolirani uređaji, roboti, mehatronski sistemi i mnogi drugi. Taj sklop elemenata je doneo nov pogled, pristup i opis proizvodnih sistema kroz prizmu povezivanja fizičkih i digitalnih, odnosno virtualnih komponenata, na čemu se temelje tzv. *Kibernetko-fizički proizvodni sistemi* (eng. *Cyber-Physical Manufacturing Systems*).

Kibernetko-fizički proizvodni sistemi [8] predstavljaju novo područje proizvodni sistema, koji se temelje na načelima kibernetko-fizičkih sistema, a koje je prvi put definirala H. Gill [9] 2006 godine.

Autori u radu [10] ističu da kibernetko-fizički sistemi predstavljaju nove temelje za savladavanje kompleksnosti u proizvodnji, učinkovito projektovanje proizvodnih sistema i procesa, te njihov visok stepen automatizacije. Pri tome je od ključnog značaja njihova sposobnost za procesiranje, razmenu i prenos informacija [3], [11].

Na temelju dosadašnjih istraživačkih dostignuća i tehnološkog razvoja na području kibernetko fizičkih sistema [12], otvaraju se mogućnosti uvođenja tih koncepata u proizvodno okruženje u obliku pametnih tvornica [13], [14], [15]. Pri tome je potrebno uvažavati specifičnu ulogu čoveka u

proizvodnom sistemu, koja postaje sve više značajna, opasna i vrlo osetljiva.

Uloga ljudi odnosno *Subjekt-a*<sup>2</sup> će se u budućoj generaciji proizvodnih sistema suštinski promeniti. Zbog automatizacije i digitalizacije su u nekim procesima neposredne radne aktivnosti ljudi već potpuno isključene. Postavlja se pitanje: *Kakva će biti uloga Subjekt-a u proizvodnim sistemima budućnosti?*. Pri tome moramo uvažavati činjenicu da je samo *Subjekt* taj koji ima motiv i korist od operiranja proizvodnih sistema.

Zbog toga je veoma važno da se pri zasnivanju i modeliranju buduće generacije proizvodni sistema poseban naglasak da na sociološki aspekt novih proizvodnih sistema, odnosno na ulogu čoveka u takvim sistemima.

Iz takvog imperativa se rađa ideja i potreba za oblikovanjem novog koncepta kibernetosko-fizičkih proizvodnih sistema koji će tretirati socijalnu komponentu proizvodnog sistema jednako vredno preostalim dvema, tj. kibernetiskom i fizičkom delu proizvodnog sistema. Na taj način će se omogućiti strukturiranje i modeliranje naprednih proizvodnih sistema u duhu kibernetosko-fizičkih sistema, a proizvodni sistemi na temelju toga postati tzv. *Socijalno-kibernetosko-fizički proizvodni sistemi (SKFPS)*<sup>3</sup> (eng. *Socio-Cyber-Physical Manufacturing Systems – SCPMS*).

Razvoj novog koncepta socijalno-kibernetosko-fizičkih sistema u proizvodnoj domeni predstavlja velik korak u evoluciji organizacijskih i sistemskih oblika proizvodnih struktura i njihovu transformaciju iz socijalno-tehničkih u socijalno - kibernetosko - fizičke sisteme.

Socijalno - kibernetosko - fizički proizvodni sistemi će obezbediti sisteme sa određenim stepenom inteligencije, odnosno oni postaju

tzv. „*pametni sistemi*“, te će biti u mogućnosti obezbediti suštinski veću agilnost i adaptivnost elemenata proizvodnih preduzeća potrebama savremenog tržišta i društva u globalnom pogledu. Sa ovakvim očekivanjima SKFPS predstavljaju sisteme koji se temelje na principima najavljene nove industrijske revolucije, *Industrije 4.0*. Preduzećima će omogućiti delovanje na globalnom tržištu pod konkurentnim uslovima. Pri tome treba očekivati da će promenjena uloga *Subjekta*, koji je sposoban upravljati proizvodnim sistemom u realnom vremenu, utecati na odzivnost, robustnost i učinkovitost proizvodnih sistema strukturiranih po načelima socijalno - kibernetosko - fizičkih sistema.

Za razumevanje nekadašnje, sadašnje i buduće uloge *Subjekta* u proizvodnim sistemima u nastavku je predstavljen dio istraživačkog rada na doktorskom studiju<sup>4</sup> autora kroz sledeće tematike: (1) razvoj proizvodnih sistema od socijalno-tehničkih do socijalno - kibernetosko - fizičkih proizvodnih sistema, (2) evolucija proizvodnih sistema od najranijih početaka pa sve do danas i (3) koncept socijalno - kibernetosko - fizičkih proizvodnih sistema.

## 2. OD SOCIJALNO - TEHNIČKIH DO SOCIJALNO - KIBERNETOSKO - FIZIČKIH PROIZVODNIH SISTEMA

Svi proizvodni sistemi imaju karakter *socijalno - tehničkih sistema*<sup>5</sup> [16] s tri glavne vrste relacija između njihovih elemenata: (1) između naprava (strojeva), (2) između samih ljudi i (3) između ljudi i strojeva.

Poznato je, da tehnički i socijalni sistemi slede različitim zakonima. Tehnički sistemi su

<sup>2</sup> Termin *Subjekt* uvodi Peklenik i definira da taj termin može označavati pojedinca kao i skupinu ljudi (operater, tehnolog, inžinjer isl.).

<sup>3</sup> Koncept socijalno-kibernetosko-fizičkih proizvodnih sistema je razvijen u okviru istraživačkog rada na doktorskom studiju autora Elvisa Hozdića u okviru doktorske teme: *Model kibernetosko-fizičkih proizvodnih sistema*, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, 2013-2018.

<sup>4</sup> Doktorski rad pod naslovom: *Model kibernetosko-fizičkih proizvodnih sistema* obrađuje tematiku razvoja koncepta i modela kibernetosko-fizičkih sistema u proizvodnoj domeni sa aspekta definiranja uloge čoveka – *Subjekta* u novim proizvodnim strukturama. Nove proizvodne strukture nastaju transformacijom tradicionalnih proizvodnih struktura po načelima kibernetosko-fizičkih sistema i načela Industrije 4.0.

<sup>5</sup> Izraz socijalno-tehnički sistem je skovao Erik Trist, Ken Bamforth i Fred Emery

podvrgnuti zakonima prirodnih znanosti, dok socijalni sistemi slede zakone socijalnih i humanističkih znanosti. U proizvodnom sistemu su ta dva sistema u korelaciji zbog prirode procesa koja zahteva međusobne interakcije. To ukazuje da s unapređenjem samo tehničkog sistema nije moguće dostići značajna poboljšanja u proizvodnom sistemu. Samo sa razvojem oba sistema skupa je moguće očekivati značajne rezultate [17].

Osnovno načelo proizvodnje mora se korenito promeniti i u buduće temeljiti na imperativu, da mora proizvodnja služiti čoveku, a ne čovek proizvodnji. To, do danas, u proizvodnoj filozofiji nije bio slučaj.

U želji da obezbede konkurentnost, koja se u prvom redu odnosi na količine, cenu i kvalitet proizvoda i usluga, proizvodna preduzeća najčešće snižavaju troškove poslovanja sa ukidanjem radnih mesta, što u konačnici vodi ka preopterećenju ljudskih resursa i s tim u pad kvalitete proizvoda i uslova rada. Preopterećenje ljudskih resursa preko prirodnih normativnih granica kod ljudi stvara nezadovoljstvo i pritiske, što se neposredno odražava na proizvod ili uslugu. U današnjem svetu ljudi predstavljaju „oruđe“ za proizvodnju, što neizbežno vodi u pogrešan smer. Generalno, položaj čoveka u proizvodnom sistemu je, u času ekspanzije ICT i posledično rastuće kompleksnosti, pre svega zahtevan.

Informacijska preopterećenost je jedna od otežavajućih faktora, koji otežava rad ljudi u toku uvođenja razno-raznih tehnologija u proizvodne sisteme. Potreba za razumevanjem sve više zapletenih informacija može pri čoveku prouzrokovati paranormalna stanja, što prevazilazi sposobnosti pojedinca, da pomoći svojih čula i razuma spoznaje i razume sve informacije koje ga okružuju. Nova tehnologija je potpuno „gluva“ za čovekov razum i ponašanje, jer čoveka unutar proizvodnog sistema neprestano sile u bezizlazno stanje. Za prevazilaženje ovakvih poteškoća, koje pridonose ICT, u novim proizvodnim sistemima su nužno potrebne promene u proizvodnoj filozofiji iz vidika ljudskih resursa. Ljudska kreativnost ne sme

biti diktirana, kao ni ograničena, već je treba podržavati i motivirati. Obezbeđenje zdravog, sigurnog i ljudima prijaznog radnog okruženja mora biti imperativ i jedan od osnovnih ciljeva. Težnja ka ostvarivanju dobiti nikako se ne sme temeljiti na iskorištavanju ljudskog potencijala, već ljudski resursi, njihovo znanje i potencijali moraju biti istaknuti u prvi plan pri razvoju budućih generacija naprednih proizvodnih sistema. Uspeh u budućnosti ne sme biti ovisan od ekonomsko-marketinških diktatura, već od harmonije proizvodnih sistema i tržišta s osnovnim, prirodnim potrebama ljudi, kao i svesti koja je glede na evoluciju tehničko-tehnoloških dostignuća još uvek u zaostanku.

Socijalno - tehnički vidici nisu značajni samo pri projektovanju proizvodnog sistema, već su jednakо značajni pri kreiranju platforme za učenje i razvoj proizvodnih sistema. Težnja ka takvим sistemima, koji bi bili uspešni i koji bi mogli prosperirati u globalnom svetu, je povezna sa zadovoljavanjem potreba pojedinačnih učesnika, sudionika, a koje se manifestuju preko nivoa realizacije zajedničkih ciljeva i brzega odziva na neprestane promene. To je razlog, zašto je neizbežno potrebno razvijati i uvoditi nove modele *socijalno-tehničkih sistema*, a koji su povezani sa savremenim proizvodnim sistemima i koji se temelje na naprednim ICT kao i iskorištavanju njihovih mogućnosti [18].

U razvijenom konceptu *socijalno-kibernetičko-fizičkih proizvodnih sistema*, koji je razvijen u *Laboratoriji za kibernetiku obradne sisteme – LAKOS, na Fakulteti za strojništvo Ljubljana*, dolazi do promene uloge *Subjekta* (pojedinca, grupe i/ili celog kolektiva), s čime se iz perspektive savremenih dostignuća, znatno menjaju načela strukturiranja *socijalno-tehničkih sistema*.

Uloga *Subjekta* u predloženom konceptu se oblikuje pre svega u dva smera: (1) u smeru generiranja novih ideja i inovacija uz intenzivnu upotrebu eksplisitnog znanja, socijalnih tehnologija, kreativnost i intuicije (nosioc znanja – *knowledge worker*) te (2) u smeru upravljanja sa kibernetičko-fizičkim sistemima u realnom vremenu na osnovu *on-*

*line* informacija, diagnostike, prognostike i modela za odlučivanje (nosioč odluke).

Pri strukturiranju novih socijalno-kibernetičko-fizičkih sistema povezani su fizički, kibernetički i socijalni elementi sistema, kako bi se obezbedilo dostizanje zajedničkih ciljeva, a pri čemu se istovremeno otvara novi prostor koji poprima karakteristike „*pametnog okruženja*“. Dakako, ovakav vid združivanja može da ima različite učinke na proizvodne sisteme, njihove procese i generalno na pojedinačne elemente proizvodnog sistema. Po jednoj strani moguće je očekivati pozitivne učinke, koji vode ka dostizanju pozitivnih, očekivanih ili željenih rezultata; po drugoj strani moguće je očekivati da takvo združivanje izazove i negativne efekte kroz nemogućnost nadzora samoga združivanja [19].

Iz svega navedenog može se zaključiti da je u analiziranju, strukturiranju, modeliranju, simulaciji i optimizaciji budućih naprednih proizvodnih sistema neizbežno potrebno poštovati znanje i psihosocijalne pokazatelje čovekovog potencijala. Ovakav razvoj događaja implicira potrebu za strukturiranjem proizvodnih sistema budućnosti iz perspektive socijalnoga faktora, što opravdava konceptualni pristup u smeru strukturiranja socijalno-kibernetičko-fizičkih proizvodnih sistema. U takvim sistemima je uloga i mesto ljudskih resursa isturena u prvi plan i takav smer razvoja proizvodnih sistema predstavlja put u takav razvoj koji mora obezbiti ravnotežu između ekonomskih, socijalnih i ekoloških vidika proizvodnje.

Ljudski resursi imaju u konceptu socijalno-kibernetičko-fizičkih proizvodnih sistema velik značaj, koji se odražava u upravljačkim aktivnostima čoveka u realnom času. Njegova uloga u takvim naprednim proizvodnim sistemima otvara široko polje za analizu pozitivnih učinaka, koje sa sobom donose napredne ICT. Može se zaključiti da će uloga čoveka u budućim proizvodnim sistemima nedvosmisleno utjecati na agilnost, učinkovitost, prilagodljivost i robustnost novih proizvodnih sistema. Jasno definiranje uloge i mesta čoveka u naprednim proizvodnim

sistemima će omogućiti dostizanje boljih performansi sistema u globalnoj nesigurnosti.

### 3. EVOLUCIJA ULOGE ČOVEKA U PROIZVODNIM SISTEMIMA

Kroz posmatranje (r)evolucijskog razvoja proizvodnje i proizvodnih sistema, kroz industrijske revolucije moguće je ustanoviti, da se pri takvom razvoju uloga čoveka u proizvodnoj domeni značajno menjala. Takva evolucija uloge čoveka u proizvodnom sistemu je predstavljena na Slici 1, koja prikazuje funkcione razine, na kojima je bila utemeljena uloga čoveka u proizvodnom sistemu kroz vremenske distance<sup>6</sup>.

U vremenu samih začetaka industrijske proizvodnje, uloga čoveka je tesno povezana sa samim procesom, na implementacijskoj razini. Čovek – Subjekt je bio taj koji je proces realizirao, kontrolirao ga i istovremeno upravljao s njim. Takva uloga čoveka je zahtevala naporan fizički rad i istovremeno je ograničavala njegovu kreativnost. Iz tog vremena izvire, pojam „*radna sila*“, koja označava osnovnu ulogu čoveka u proizvodnom sistemu. Zahvaljujući tehnološkom napredku, na području mehanizacije rada, izvođenje procesa su preuzeli strojevi (mašine) i naprave, dok je Subjekt distanciran od samog izvođenja procesa na nivo operiranja odnosno upravljanja i kontroliranja naprave.

Druga industrijska revolucija je također pridonela precizniju raspodelu rada i operacija po principima znanstvenog upravljanja, koje se temelji na principima koje je definirao F.W. Taylor [20] i s tim korenito promenilo sistem upravljanja u proizvodnji. Čovek je bio rasterećen teškog fizičkog rada. Njegovo mesto zauzima naprava za implementaciju procesa (*eng. Process Implementation Device – PID*). Čovekove aktivnosti su bile ograničene na izvođenje jedne operacije, tačno određene i normirane. To je rezultiralo s velikim povećanjem učinkovitosti i produktivnosti u

<sup>6</sup> Tekst na svim slikama u ovom radu je dat u izvornom engleskom jeziku zbog zadržavanja originalnosti značenja pojedinih termina.

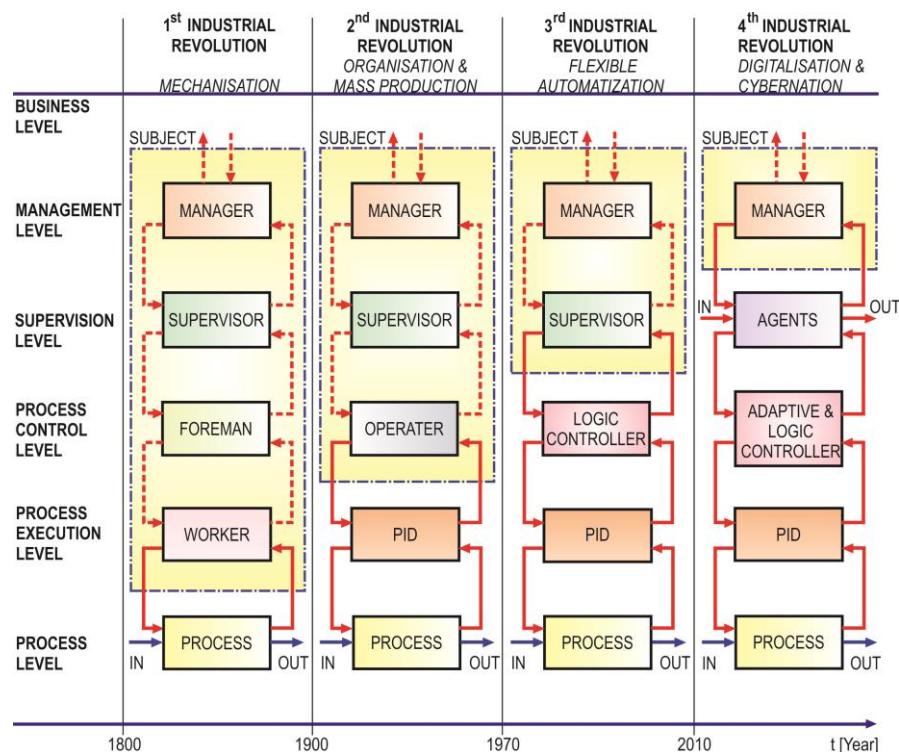
uslovima masovne proizvodnje, uz reduciranje kreativnosti i iskorištenosti umnog potencijala čoveka na minimum. Pojam „radna sila“ se je još uvek zadržao.

Razvoj NC tehnologije i fleksibilna automatizacija radnih mašina na osnovu računarskog upravljanja i kontrole su rezultirali pojavu treće industrijske revolucije. Funkciju kontrole strojeva i naprava su preuzeли NC, CNC i PLC kontroleri. Sa računarskim upravljanjem i kontrolom je uvedena fleksibilnost u proizvodnju, pri čemu se je s promenom upravljačkog programa menjao i sam proces. *Subjekt* se je pri tome još više odmakao od neposrednog procesa i pri tome se je mogao usredotočiti na upravljanje i nadzor sistema, jer su se počela razvijati rešenja za računarsku podršku tim aktivnostima (kao što su sistemi za planiranje i raspoređivanje, CAD/CAM sistemi, računarske baze podataka i sl.). To je dodatno povećalo fleksibilnost proizvodnje. Pojam „radna sila“ za označavanje ljudskih resursa je u kontekstu fleksibilne proizvodnje počeo gubiti značenje.

će *Subjekt* realizirati i izvoditi pre svega kreativne razvojne (inženjerske) procese na osnovu znanja (nosioč znanja – eng. *knowledge worker*) i procese upravljanja i odlučivanja, koje će zbog intenzivne tehnološke potpore moći izvoditi u realnom vremenu i od bilo kuda. U tom kontekstu pojam „radna sila“ će u potpunosti izgubiti svoj značaj.

Slika 1 detaljno prikazuje kako se uloga *Subjekt-a* s vremenom postepeno menjala, od izvora snage, što je zahtevalo trivialni rad čovekovog intelektualnog potencijala, do nosioca odlučivanja i znanja, gde se potencijal iskorištava u punoj meri. Teški fizički rad je preuzeila tehnologija (npr. agentska tehnologija, web tehnologije isl.) ili bolje rečeno fizički elementi: mehaničke naprave (naprave za implementaciju procesa), aktuatori, kompjuterski procesori, senzori, nadzorni sistemi itd.

Na prelazu u novu industrijsku revoluciju Industriju 4.0., ispostavlja se pitanje: *Šta je moguće očekivati u budućnosti? Kako će*



**Slika 1.** Evolucija uloge *Subjekta* u proizvodnim sistemima

U okviru četvrte industrijske revolucije – Industrije 4.0 je za očekivati da će se, zbog intenzivne digitalizacije i kibernetizacije rada, većina rutinskih procesa automatizirati. Tako

digitalizacija i kibernetizacija rada doprineti ka razvoju i promeni uloge *Subjekta* u proizvodnji?

Kao što je označeno na Slici 1 moguće je očekivati da će *Subjekt* imati funkciju samo još

na najvišem upravljačkom nivou. Na tom nivou će biti podržan raznovrsnim sistemima i tehnologijama koje će mu omogućavati upravljanje sa sistemima u realnom času i od bilo kuda. To uključuje definiranje ciljeva proizvodnog sistema, praćenje i posmatranje ponašanja sistema preko analitičkih, dijagnostičkih, prognostičkih i vizualizacijskih sistema i sistemsko praćenje kriterija uspešnosti i ostalih elemenata poslovne inteligencije. To omogućuje *Subjekt-u* visok stepen odlučivanja u relatom času i komunikaciju, sodelovanje i koordinaciju sa drugim *Subjek-tima*. Sve preostale aktivnosti će preuzeti i izvoditi fizički i kibernetiski podsistemi.

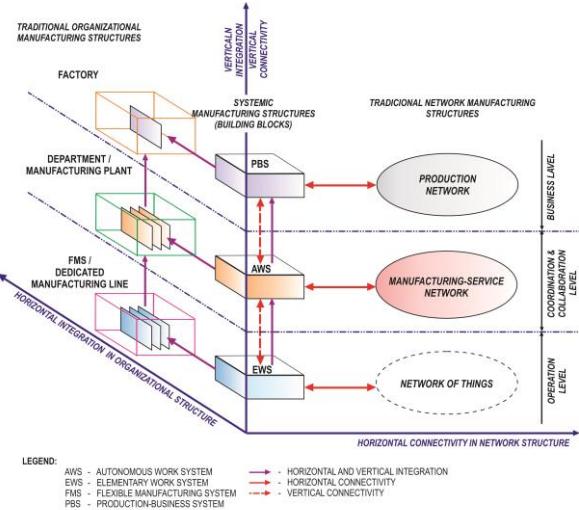
Ovakva vizija konvergencije socijalnih, kibernetičkih i fizičkih elemenata u proizvodnim sistemima buduće generacije nakazuje razvoj novih koncepata i modela proizvodnih sistema, koji omogućavaju razvoj novih proizvodnih struktura i novih funkcionalnosti potrebnih za realizaciju buduće generacije proizvodnih sistema. U nastavku ovog rada je prikazan deo razvijenog koncepta socialno-kibernetičko-fizičkih sistema sa akcentom na mesto i ulogu *Subjekt-a* u takvom konceptu.

### 3.1 Koncept socijalno-kibernetičko-fizičkih sistema u proizvodnoj domeni

Za razumevanje novog koncepta naprednih proizvodnih sistema koji se temelje na povezivanju socijalnog, kibernetičkog i fizičkog okruženja proizvodnog sistema je potrebno definirati osnovne sistemske proizvodne strukture, a koje su prisutne u tradicionalnim preduzećima. Takve sistemske strukture predstavljaju elementarni radni sistem (*eng. Elementary Work System – EWS*) [21], autonomni radni sistem (*eng. Autonomous Work System – AWS*) [22] i proizvodno - poslovni sistem (*eng. Production-Business System – PBS*).

Preduzeće, odnosno fabriku, kao kompleksni adaptivni proizvodni sistem (CAMS) definiraju autori u radu [23]. Koncept CAMS predviđa tri organizacijska nivoa unutar proizvodnog preduzeća (1) operativni nivo u

kojem je osnovni element EWS, (2) koordinacijski nivo koji sadrži AWS i (3) poslovni nivo u kojem je središnji element proizvodno-poslovni sistem (PBS). Takva struktura je prikazana na Slici 2.



**Slika 2.** Horizontalna i vertikalna povezivanja tradicionalnih sistemskih proizvodnih struktura [24]

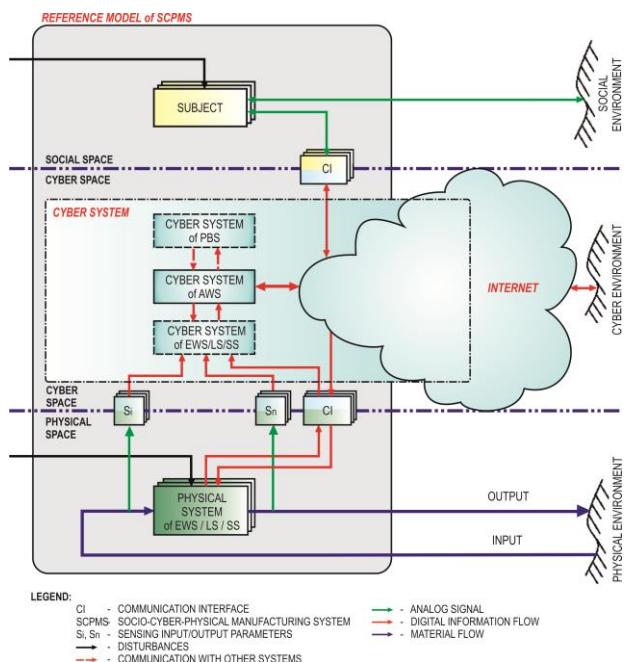
EWS je horizontalno integriran u tradicionalnu organizacijsku strukturu kao što je fleksibilni obradni sistem (FOS) ili proizvodna linija te horizontalno povezan u mrežnu proizvodnu strukturu (mrežu stvari). Vertikalno povezivanje operativnog i kibernetičkog nivoa tradicionalnog proizvodnog preduzeća je omogućeno kroz komunikacijsko povezivanje sistemskih proizvodnih struktura (AWS i EWS). Vertikalna integracija organizacijskih proizvodnih struktura operativnog nivoa u više organizacijske forme na koordinacijskom nivou je omogućeno kroz integraciju FOS i proizvodnih linija u odelenja i proizvodne pogone.

AWS predstavlja sistemsku proizvodnu strukturu srednjega dela proizvodnog preduzeća, odnosno koordinacijskog nivoa preduzeća. Omogućava vertikalno povezivanje EWS u više sistemske proizvodne strukture (proizvodni sistem) ili mrežne proizvodne strukture, kao što su proizvodno-servisna mreža i proizvodna mreža. AWS je horizontalno integriran u proizvodni pogon/odelenje te horizontalno povezan u mrežnu proizvodnu strukturu koju u konceptu [25] imenuju proizvodno-orientirana servisna mreža.

Sistemska proizvodna struktura tradicionalnog preduzeća koja predstavlja nadređenu strukturu AWS (i njihovih EWS) je proizvodno-poslovni sistem (PBS).

Proizvodno poslovni sistem kao gradbeni element poslovnog nivoa tradicionalnog proizvodnog preduzeća omogućava horizontalnu integraciju u organizacijsku proizvodnu strukturu imenovanu fabrika, te horizontalno povezivanje preduzeća u mrežnu proizvodnu strukturu – proizvodnu mrežu (PM) (*eng. Production Network – PN*).

Konceptualna zasnova proizvodnog sistema zasnovana na integraciji socijalnog, kibernetiskog i fizičkog proizvodnog okruženja je predstavljena na Slici 3.



**Slika 3.** Model povezivanja socijalnog, kibernetiskog i fizičkog proizvodnog okruženja

Na Slici 3 je prikazan generični model povezivanja socijalnih, kibernetskih i fizičkih prostora i njihovih sistema u kibernetizirane funkcionalne sistemske proizvodne strukture tzv. *Socijalno-kibernetско-fizičке производне системе (SKFPS)* (*eng. Socio - Cyber - Physical Manufacturing Systems – SCPMS*). Prikazana sistemska proizvodna struktura je sastavljena iz tri razine, odnosno tri prostora: socijalnog, kibernetiskog i fizičkog prostora.

Fizički prostor, u kojem egzistiraju fizički elementi proizvodnog sistema, je dio fizičkog okruženja. Fizički prostor SKFPS sadrži sistemske strukture kao što su fizički sistem

elementarnog radnog sistema, fizički sistem logističkog sistema, fizički sistem servisnih sistema, itd.

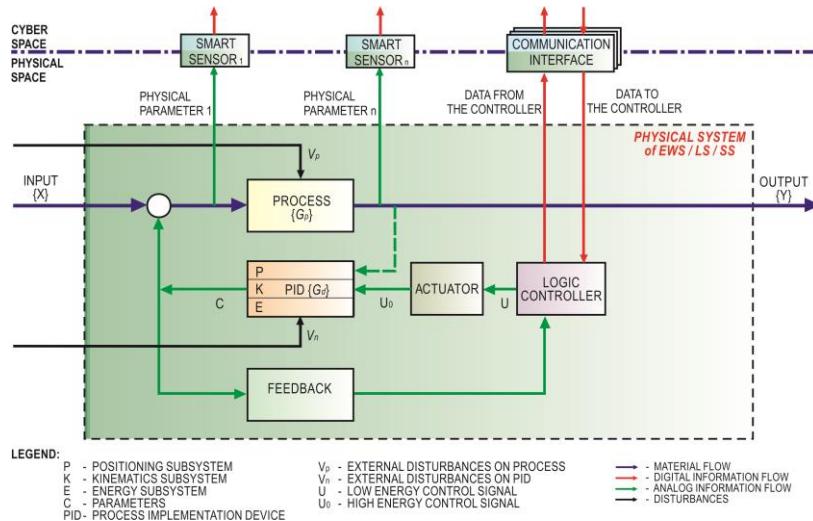
Fizički sistem elementarnog radnog sistema (PWS) u konceptu SKFPS sadrži iste elemente koji su ranije definirani u konceptu Peklenikovog EWS [21] sa određenim modifikacijama. Peklenik je u radu definirao osnovne elemente EWS, bez kojih rad ne može biti izведен: proces sa ulaznim i izlaznim vrednostima, naprava za implementaciju procesa (PID), *Subjekt* i okruženje. Struktura PWS u konceptu SKFPS je prikazana na Slici 4.

Povezivanje PWS u kibernetsko okruženje je omogućeno kroz senzoriranje i preuzimanje analognih signala te njihov prenos u kibernetiski prostor komunikacijske interfejse i pametne senzore. Pametni senzori ( $S_i, S_n$ ) preuzimaju analogne vrednosti fizičkih veličina te ih prenose u digitalnom obliku u kibernetiski prostor (npr. senzoriranje sile, tlaka, temperature itd.).

Komunikacijski interfejs omogućava dvosmernu komunikaciju elemenata kibernetiskog prostora sa logičnim kontrolerom u fizičkom radnom sistemu. Ta komunikacija obezbeđuje preuzimanje podataka iz logičkog kontrolera i njihovo memorisanje u bazu podataka i znanja u kibernetiskom prostoru (stanje naprave, vrednosti dostignutih procesnih parametara itd.) te prenos podataka iz kibernetiskog prostora (sistema) i nameštanje na logični kontroler u fizičkom radnom sistemu (nameštanje procesnih parametara, NC code itd.). PWS je povezan sa LS preko materialnog toka.

U razvijenom konceptu SKFS je definirana nova uloga *Subjekt-a*, vidi Sliku 3, te je *Subjekt* postavljen u posebni prostor odnosno socijalni prostor u kojem je povezan sa ostalim socijalnim sistemima kao i sa kibernetiskim sistemom.

Socijalni prostor je deo socijalnega okruženja u kojem egzistiraju socijalne mreže i socijalni sistemi sa *Subjekt-om* kao osnovnim elementom takvih mreža i sistema. Socijalni sistem karakteriziraju socijalni procesi koji se odvijajo unutar sistema. *Subjekt*, kao osnovni element takvog sistema, uspostavlja



Slika 4. Struktura fizičkog radnog sistema (PWS) i povezivanje sa kibernetičkim svetom

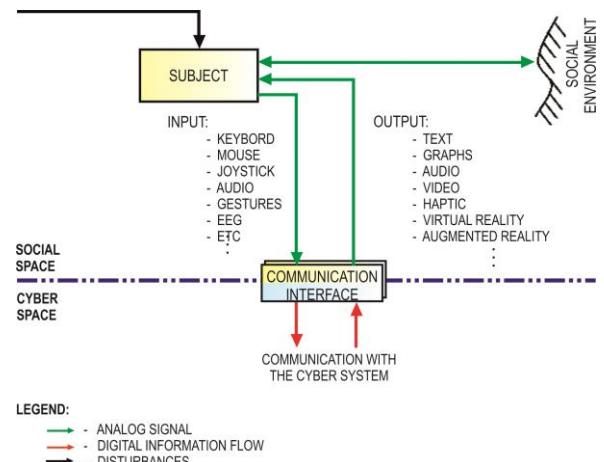
kolaborativne veze sa ostalim učesnicima socijalne prostora s ciljem izvođenja poslovnih procesa. Interakcije unutar socijalnog sistema u današnjem globalnom svetu nisu samo unutar socijalnog okruženja. Napredna ICT je omogućila prenos međusobnih interakcija između učesnika u kibernetičko okruženje. Iz takvog pristupa proizlazi *kibernetička socijalna mreža* (eng. *Cyber Social Network – CSN*) koja omogućava napredniji način komunikacije i deljenja znanja i veština. Kibernetičke socijalne mreže i napredna ICT su omogućile kolaborativnu komunikaciju između *Subjekata* kao i njihovih agentskih struktura koje ih zastupaju u kibernetičkom sistemu. Kolaborativna komunikacija *Subjekt-a* u socijalnom sistemu se odvija preko socijalnih medija (facebook, twiter, itd.).

Komunikacija *Subjekt-a* sa elementima kibernetičkog prostora je obezbeđena kroz komunikacijski interfejs koji se razlikuje od komunikacijskog interfejsa između kibernetičkog i fizičkog prostora, Slika 5.

Komunikacija *Subjekt – komunikacijski interfejs* omogućava prenos naredbi od strane *Subjekt-a* do kibernetičkog prostora kroz različite ulaze komunikacijskog interfejsa (npr. tipkovnica, miš, računarska palica, zvuk, mimika, elektroencefalografija itd), vidi Sliku 5.

Komunikacija, *komunikacijski interfejs – Subjekt* se ostvaruje preko različitih izlaza komunikacijskog interfejsa kao što su tekst,

grafika, audio, video, virtualna realnost, obogaćena realnost itd.



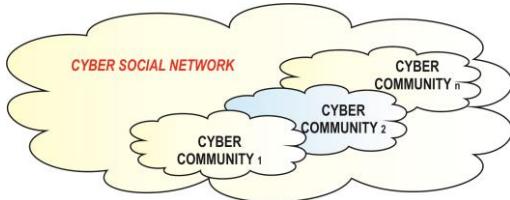
Slika 5. Povezivanje kibernetičkog i socijalnog sveta

Pored komunikacije sa kibernetičkim elementima, u kibernetičkom sistemu, koncept SKFPS omogućava komunikaciju *Subjekt-a* sa drugim *Subjekt-ima* u mrežnoj strukturi, a koja se oblikuje u kibernetičkom prostoru u obliku kibernetičke socijalne mreže.

Kibernetička socijalna mreža, prikazana na Slici 6, je globalna mrežna struktura unutar koje se mogu oblikovati različite kibernetičke grupe ili zajednice (eng. *Cyber Community*). Kibernetičke zajednice su kibernetička kopija različitih socijalnih grupa ili zajednica koje se formiraju u socijalnom okruženju (društvene, političke, stručne, kulturne, poslovne, itd.).

Ključna osobina za sve kibernetičke zajednice je ta, da članovi takvih zajednica komuniciraju i međusobno razmenjuju informacije. Kibernetička zajednica je hibridna

struktura koja sadrži *Subjekt-e* i naprednu tehnologiju koja zastupa *Subjekt-a* u kibernetiskom okruženju (kao što su npr. agentske tehnologije i sl), te omogućava međusobnu komunikaciju i razmenu informacija i znanja na temelju napredne ICT.



**Slika 6.** Kibernetika socijalna mreža i kibernetiske zajednice

Kibernetiske socijalne zajednice se implementiraju u kibernetiskom okruženju kroz različite platforme, koje predstavljaju medije za implementaciju (facebook, skype, itd).

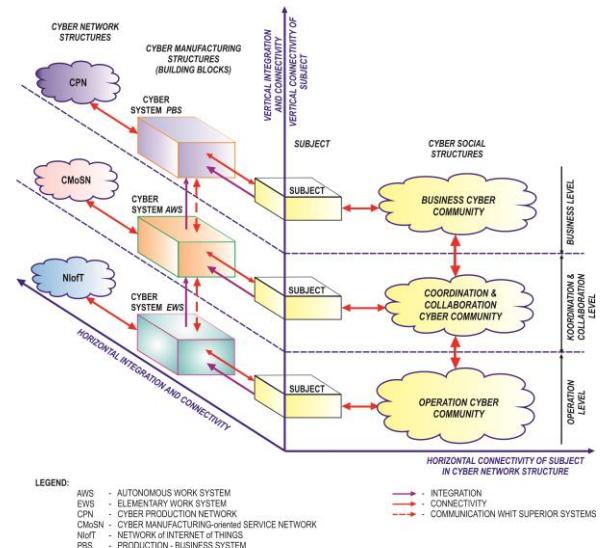
Socijalne mreže predstavljaju web servise sa akcentom na širenju čovekovog socijalnog kapitala. Socijalne mreže imaju ulogu da potpomognu ka velikoj dinamici i interaktivnosti interneta, te iz tog vidika u današnjem globalnom svetu njihova uloga postaje veoma značajna, kako u pojedinačnom životu čoveka, tako i u proizvodnom i poslovnom okruženju pojedinca integriranog u različite kibernetiske zajednice. Infrastruktura za realizaciju socijalnih mreža je utemeljena na različitim platformama koje podupire napredna ICT.

Kibernetiske zajednice u proizvodnoj domeni nastaju na različitim razinama upravljanja, te se prepliću sa mrežom interneta stvari, interneta servisa, proizvodim mrežama, proizvodno - servisnim mrežama i sl.

Iz vidika prikupljanja podataka, obrade informacija i izgradnje potrebnoga znanja kibernetiske zajednice, kroz socijalne mreže, otvaraju još jedan komunikacijski kanal unutar proizvodnog okruženja čime se poboljšava upravljanje i vođenje SKFS. Horizontalna i vertikalna komunikacija *Subjekt-a* u kibernetiskom sistemu i kibernetiskim zajednicama je prikazana na Slici 7.

Opisani pristup, kroz koji se htelo definirati mesto i uloga čoveka u naprednim proizvodnim sistemima *Industrije 4.0*, kao i opisani koncept socijalno - kibernetisko -

fizičkih sistema u proizvodnoj domeni, predstavlja značajan korak u evoluciji organizacijskih i sistemskih struktura proizvodnih sistema kroz njihovu transformaciju iz socijalno - tehničkih u socijalno - kibernetiko - fizičke proizvodne sisteme.



**Slika 7.** Povezivanja i komunikacija *Subjekt-a* sa ostalim sistemima u konceptu SKFPS [24]

Može se zaključiti da socijalno - kiberneticko - fizički proizvodni sistemi predstavljaju sisteme koji će biti u mogućnosti ponuditi odgovore na izazove koje zagovara i predlaže nova industrijska revolucija – *Industrija 4.0*.

#### 4. ZAKLJUČAK

Predstavljeni rad imao je za cilj izneti deo istraživačkog rada autora na području kiberneticko - fizičkih sistema i ukazati na važnost uloge čoveka u proizvodnim sistemima, a koja se često zanemaruje, kako u znanstvenim krugovima, tako i u realnim industrijskim okruženjima.

Generalno, ispostavilo se je pitanje: *Kako učinkovito povezati tri osnovna tipa elemenata koje nalazimo u svakom proizvodnom okruženju, tj. fizičke (strojeve, naprave, transportna sredstva itd), socijalne (operatere, tehnologe, inženjere, itd) i danas sve više prisutne kibernetiske elemente (procesore, digitalne kontrolere, senzore i senzorske mreže, baze podataka i znanja, itd.) u radne sisteme na različitim razinama i njihovo povezivanje u*

*mrežne strukture?* Delimičan odgovor na ovakvo pitanje leži u samoj tematiki predloženog rada.

Područje kibernetičko - fizičkih sistema i njihova upotreba u domeni proizvodnje je relativno novo područje, neistraženo i nesistematično definirano, te otvara velike mogućnosti za istraživanja i razvoj na tom području.

Budući rad je potrebno usmeriti ka sistematičnom pristupu implementaciji temeljnih načela razvijenog koncepta socijalno - kibernetičko - fizičkih sistema te na taj način kvalitativno i kvantitativno validirati predloženi koncept.

## ZAHVALNOST

Ovaj rad je podržan od strane: *Javni sklad R Slovenije za izobrazbo kadrov in štipendije*, Grant No. 11011-79/2013.

Posebna zahvala pripada mojim mentorima prof. dr. Peter Butali i emeritus. prof. dr. Milanu Jurkoviću.

## LITERATURA

- [1] H. Kegermann, W. Wahlster, and H. Johannes, Recommendations for Implementing the Strategic Initiative INDUSTRIE 4.0 Final Report of the Industrie 4.0 Working Group, 2013.
- [2] E. Westkämper, *Towards the Re-Industrialization of Europe*, Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 2014.
- [3] M. Broy, *Cyber-Physical Systems*, Springer, 2010.
- [4] P. Wright, Cyber - physical product manufacturing, *Manufacturing Letters*, Vol. 2, pp. 49–53, 2014.
- [5] K. K. B. Hon, Performance and Evaluation of Manufacturing Systems, *CIRP Annals*, Vol. 54, pp. 139–154, 2005.
- [6] R. Vrabič, D. Husejnagić, and P. Butala, Discovering autonomous structures within complex networks of work systems, *CIRP Annals*, Vol. 61, pp. 423–426, 2012.
- [7] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, M. Palaniswami, Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions, *Future Generation Computer Systems*, Vol. 29, pp. 1645–1660, 2013.
- [8] L. Monostori, B. Kádár, T. Bauernhansl, S. Kondoh, S. Kumara, G. Reinhart, O. Sauer, G. Schuh, W. Sihn, K. Ueda: Cyber-physical systems in manufacturing, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Vol. 65, pp. 621–641, 2016.
- [9] H. Gill: NSF Perspective and Status on Cyber-Physical Systems. In *National Workshop on Cyber-Physical Systems*, 2006.
- [10] T. Bauernhansl, M. ten Hompel, B. Vogel-Heuser: Industrie 4.0, in *Produktion, Automatisierung Und Logistik*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [11] B. Vogel-Heuser, G. Bayrak, U. Frank: Agenda CPS - Scenario Smart Factory (Agenda CPS - Szenario Smart Factory), in "Increased Availability and Transparent Production" 2011.
- [12] H. Fei: *Cyber - Physical Systems: Integrated Computing and Engineering Design*, Taylor & Francis Group, 2014.
- [13] D. Lucke, C. Constantinescu, E. Westkämper: Smart Factory - a Step towards the next Generation of Manufacturing, in *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*, Springer, 2008.
- [14] A. Radziwon, A. Bilberg, M. Bogers, E. S. Madsen: The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions, *Procedia Engeering*, Vol. 69, pp. 1184–1190, 2014.
- [15] D. Zuehlke: SmartFactory—Towards a factory-of-things, *Annual Reviews in Control*, Vol. 34, pp. 129–138, 2010.
- [16] S. Long: *Socioanalytic Methods: Discovering the Hidden in Organisations and Social Systems*, Karnac Books Ltd, 2013.
- [17] F. Frei, M. Hugentobler, S. Schurman: *Work Design for the Competent Organization*, Praeger, Westport, CT, 1993.
- [18] K. Eason: *Sociotechnical systems theory in the 21st Century: another half - filled glass?*, in Sense in Socal Science: A Collection of essays honour Dr. Lisl Klein, Desmond Graves, Broughton, pp. 123–134, 2008.
- [19] S. Omohundo: Autonomous technology and the greater human good, *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence*, Vol. 23, pp. 303–315, 2014.
- [20] F. W. Taylor: *The Principles of Scientific Management*, 1919.
- [21] J. Peklenik: *Fertigungskibernetik, Eine Neue Wissenschaftliche Disziplin Fur Die Produktionstechnik*, Festvortrag anlässlich der Verleihung des Georg - Schlesinger Preises

- 1988 des Landes Berlin, 1988.
- [22] P. Butala, A. Sluga: Autonomous work systems in manufacturing networks, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 55, pp. 521–524, 2006.
- [23] A. Sluga, P. Butala, J. Peklenik: A Conceptual Framework for Collaborative Design and Operations of Manufacturing Work Systems, CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 54, pp. 437–440, 2005.
- [24] E. Hozdić: Cybernetization of manufacturing systems, in *Proceedings of 13the International Scientific Conference MMA2018 Flexible Technologies*, 2018.
- [25] R. Zupančič, A. Sluga, and P. Butala: A service network for the support of manufacturing operations, International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 25, pp. 790–803, 2012.

## SOCIOLOGICAL ASPECTS OF THE INDUSTRY 4.0 IN ADVANCED PRODUCTION SYSTEMS

**Abstract:** *New manufacturing structures, which will be based on the principles of the new industrial revolution – Industry 4.0, require the development of new reference model of manufacturing systems at all management levels in the manufacturing enterprise. Such models must enable (1) the appropriate role of man in the manufacturing system, (2) vertically connecting in the integrated working structure, (3) horizontal connecting to network structures at different levels of action, (4) connectivity to smart environment, (5) digitalization and cybernetization of existing work processes, and (6) development and implementation of “smart” functions that enable digitalization and cybernetization of work. The role of humans in the future generations of the manufacturing system will be significantly changed. Through the theme of this paper is given the focus on the sociological aspects that bring with it a new industrial revolution and systematically present the new role of man in manufacturing systems. The paper is part of the research work in the field of research and development of cyber-physical manufacturing systems.*

**Keywords:** *cyber-physical systems, Industry 4.0, ICT, manufacturing system, Subject*



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## USING THE GP IN THE ANALYSIS AND MODELING OF SPECIFIC CUTTING ENERGY IN AWJ

Predrag JANKOVIĆ<sup>1</sup>, Miloš MADIĆ<sup>1\*</sup>, Miroslav RADOVANOVIC<sup>1</sup>, Dušan PETKOVIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering, Niš, Serbia, p.jankovic@masfak.ni.ac.rs, madic@masfak.ni.ac.rs, mirado@masfak.ni.ac.rs, dulep@masfak.ni.ac.rs

\*Corresponding author: madic@masfak.ni.ac.rs

**Apstrakt:** Development and application of machining mathematical models is of great practical importance, particularly in the case when different performance criteria are to be achieved including quality, productivity and costs. For establishing mathematical relationships between process parameters and performance characteristics using experimental data from empirical studies different approaches are proposed. Among regression analysis, artificial intelligence (AI) methods such as artificial neural networks, adaptive neuro fuzzy inference systems and genetic programming (GP) represent the most popular modeling approaches. This paper presents the application of genetic programming (GP) approach for deriving explicit relationship between process parameters, and specific cutting energy in AWJ cutting of aluminium alloy. Using the developed model an analysis of the specific cutting energy with respect to process parameters as well as surface roughness was performed.

**Ključne reči:** specific cutting energy, abrasive water jet cutting, modeling, genetic programming.

### 1. INTRODUCTION

The last decades witnessed an increasing industrial use of contemporary materials with improved properties [1]. Machining of these materials inevitably involves the application of different non-conventional machining processes such as laser cutting, abrasive water jet (AWJ) cutting, electrical discharge machining (EDM), plasma cutting, etc [2]. The development of AWJ technology made this machining process state-of-the-art technology able to provide high productivity, cutting of a number of materials including complex profiles. The great advantage of this technology is the fact that in the processing zone there is no significant increase in

temperature and that the cutting forces are very small [3]. However, effective application of the AWJ cutting technology requires excellent knowledge of the process as well as the determination of the most suitable set of AWJ parameters for each workpiece material and its thickness. This issue is not trivial given that AWJ cutting technology is a complex machining process which is governed by a set of parameters which, both qualitatively and quantitatively, differently affect process performances such as productivity, costs, processing time, kerf profile characteristics, surface profile of the cut edge, dross formation, etc. In many cutting operations the situation is even more complex when attempting to satisfy multiple objectives

(productivity, cut quality characteristics, cost, etc.), since the AWJ cutting conditions, i.e. set of the main AWJ cutting parameter values, that are suitable for one performance characteristic may deteriorate other performance characteristics. For example, increase of cutting speed will increase amount of removed material from the workpiece, and, on other hand their decrease will increase the workpiece quality. Therefore, finding the balance between the cutting speed, which has a direct relation with the machining cost, and the required quality has to be found in AWJ cutting [4].

The use of AWJ cutting technology in manufacturing companies is usually not optimal because there is lack of technological basis in a specific production condition [5]. But this should not be a reason for not using relatively simple optimization approaches which integrate mathematical models and certain optimization algorithms for determining (near) optimal AWJ cutting conditions for a given operation.

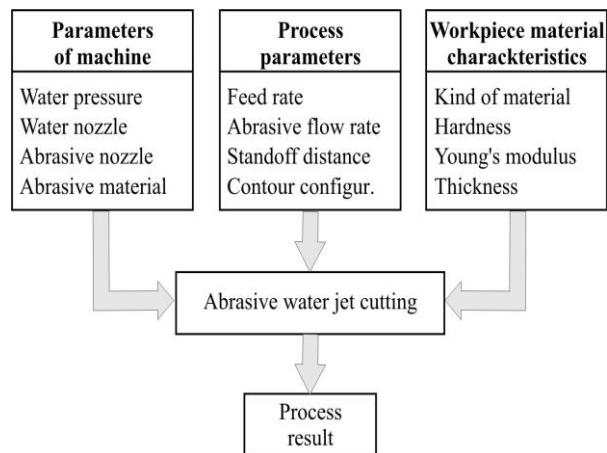
Considerable research studies have been carried out to model, analyze and optimize AWJ process parameters with respect to different performance indicators such as quality, productivity, cost and some specific process performance indicators. The main objective of this paper is to develop a prediction model for the specific cutting energy in AWJ cutting of aluminium alloy. By exploring the advantages of the AI methods, this study is based on the use of genetic programming (GP) modeling approach. Previously, this approach has been successfully applied for modeling different performance characteristics of traditional and non-traditional machining technologies. Čuš and Zuperl [6] applied GP method in order to find the correlation between surface roughness and the cutting force and to provide a functional relationship with controllable factors. The authors developed control strategy for assuring constant surface finish by controlling cutting forces in end milling. Zigzag machining surface roughness modelling in milling operation using GP was demonstrated

by Göloğlu and Arslan [7]. It was seen that the surface roughness model produced by GP not only outperforms but also enables to produce more explicit models than of the other techniques such as artificial neural networks (ANNs) and Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS). Gostimirović et al. [8] applied ANFIS and GP for modeling surface roughness in electrical discharge machining. It was pointed out that one of the most important advantages of GP in modelling is that specific equations are obtained and models can be used independently.

The derived GP model in this paper relates the specific cutting energy and main AWJ process parameters such as abrasive flow rate, cutting speed and material thickness. Upon the development the model was statistically assessed and used for comprehensive analysis.

## 2. EXPERIMENTAL SETUP

Process optimization, as a background of its successful application, is provided by correct choice of influencing process parameters. First step toward to this goal is identification and understanding of process influencing parameters. Effectiveness, accuracy and quality of the cutting process depend on a wide range of parameters and technological effects of these parameters. These parameters can be classified according to the Figure 1.



**Figure 1.** Parameters of AWJ cutting process

Although AWJ cutting involves a large number of parameters and virtually all these variables affect the cutting results (geometry and surface quality of cuts, material removal

rate, separation cutting speed, productivity, costs), only few major and easy-to-adjust dynamic variables were considered in the present study. Those are: feed rate, material thickness and abrasive flow rate. The other process parameters were kept constant using the standard machine configuration. Feed rate (cutting speed) is the speed of the relative movement of the cutting head relative to the workpiece.

The abrasive flow rate is the amount of abrasive material per unit of time, which is added to water jet, for mixing and forming abrasive water jet. In the newer machines abrasive flow can be regulated during operation, specified by the program. Higher flow rates lead to higher productivity and better quality of the cut, but with the increased processing costs. Depending on the desired productivity and quality of cut, in practice, abrasive flow rate takes values between  $Q = 300 \text{ g/min}$  and  $Q = 400 \text{ g/min}$ .

A series of water jet cutting experiments were conducted using a Byjet 4022 abrasive water jet cutting machine (manufacturer Bystronic AG, Switzerland). It is equipped with a dual intensifier high output pump with power of 37 kW and a five axis positioning system. The machine was used to cut 40 mm long slots on 700×50 mm test specimens with thickness of 6 mm, 8 mm and 10 mm. As workpiece material, aluminium alloy AA-ASTM 6060 (EN AW-6060; ISO Al MgSi) was used. Alloy 6060 is one of the most popular of the 6XXX series alloys. Typical uses include architectural sections, sections fit for forming processes, automotive parts and sports equipment.

## 2.1 Specific cutting energy

In the AWJ cutting process the energy required for cutting materials is obtained by pressurizing water to high pressures (usually up to 600 MPa) and then forming a high-intensity stream of water by focusing through a small orifice [9]. Speed of water jet is critical because the water jet serves primarily as an energy transmission medium for accelerating

the particle of abrasive material. By adding small particles of very hard abrasive materials in the pure water jet, abrasive water jet is formed. The abrasive water jet has enough energy to get through the solid material. Insertion of the abrasive particles into the water flow is carried into the mixing chamber, a part of cutting head. Predetermined quantities of abrasive particles are introduced into the mixing chamber. During mixing process, the abrasive particles are gradually accelerated due to transfer of momentum from the water phase to abrasive phase and when the jet finally leaves the cutting head, phases, water and abrasive, are assumed to be at same velocity. The higher the speed with which the solid particles hit against the material to be cut, the higher the removal rate is.

The law of conservation of momentum shows that the total momentum of any closed system, i.e., the vector sum of the momentum vectors of all the constitutive factors in the system, is a constant. It is assumed that after mixing both water and abrasive phases attain the same velocity of AWJ. The abrasive flow rate determines the number of impacting abrasive particles as well as their kinetic energies. The power of the abrasive water jet ( $E_{awj}$ ) can then be expressed as:

$$E_{awj} = \frac{1}{2} Q v_{awj}^2 = \frac{1}{2} Q \eta^2 \frac{v_{wj}^2}{\left(1 + \frac{Q}{Q_w}\right)^2}. \quad (1)$$

where:  $Q_w$  – water flow rate in g/min,  $Q$  – abrasive flow rate in g/min,  $v_{wj}$  – speed of pure water jet in mm/min,  $v_{awj}$  – speed of abrasive water jet,  $\eta$  – momentum loss factor, whose values lies around 0.65-0.85 [10].

Specific cutting energy (J/g) values are determined by dividing the energy of the jet by the mass of the material removed from workpiece material in unit time:

$$e_c = E_{awj} / m' \quad (2)$$

where  $m'$  represents mass of the material removed from workpiece in unit time (also called as material removal rate in g/s). In the

mass calculation, kerf geometry is considered based on the measurement of the width of the cut at its top and its bottom side of the workpiece material.

### 3. GP MODELING APPROACH

#### 3.1 GP basics

GP was developed by J. Koza at Stanford in 1991 [11]. It is a genetic algorithm (GA) based symbolic regression tool aimed at discovering both the functional form of the approximation (model) and all of its free parameters. While GA are primarily used for optimization on developed models GP searches for a “best” model in the hyper-space of all possible models that solve the given problem. Modeling based on GP starts with a set of randomly generated models (population) built from a library of available mathematical functions. By following Darwinian principle of survival of the fittest and with the application of genetic operators such as selection, crossover and mutation these models evolve during modeling process. The assessment of each model during evolution is made by the use of fitness function. Each model is composed of nodes that are elements from a terminal set (independent variables  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) and a functional set consisting of mathematical operators that are used within the model (+, -, \*, /,  $x^n, \dots$ ). Which set of mathematical operators are to be used is problem dependent, however, considering specific knowledge of process being modeled may lead to more efficient search of the best model [12]. In the process of models evolution selection mechanism is responsible for determining two individuals (models) for reproduction, in most cases based on fitness values. Crossover mechanism exchanges and recombines randomly chosen parts from selected individuals and creates two new individuals. After crossover, a small number of random nodes are changed with mutation operator.

#### 3.2 Developed GP model

The modeling process based on GP is implemented using experimental data wherein the entire set of data was divided into two sets. Training set contained 25 combinations of different values of abrasive flow rate, cutting speed and material thickness and corresponding specific cutting energy values. The validation set constituted 6 experimental trials and was used to assess the measure the accuracy of the developed model. In order to check the performance of the developed model for the prediction of specific cutting energy, Mean Absolute Percentage Error (MAPE) was calculated as follows:

$$MAPE = \frac{1}{n} \left| \frac{y_r - y_p}{y_r} \right| \cdot 100\%. \quad (3)$$

where  $y_r$  is experimental value,  $y_p$  is the predicted value and  $n$  is number of samples.

The average MAPE on the entire data was found to be 11.6%. These results indicate the validity of the developed mathematical model for further use and analysis.

Table 1 lists the values of the control parameters and the functional set that are used in modeling the specific cutting energy.

**Table 1.** Set of GP parameters used

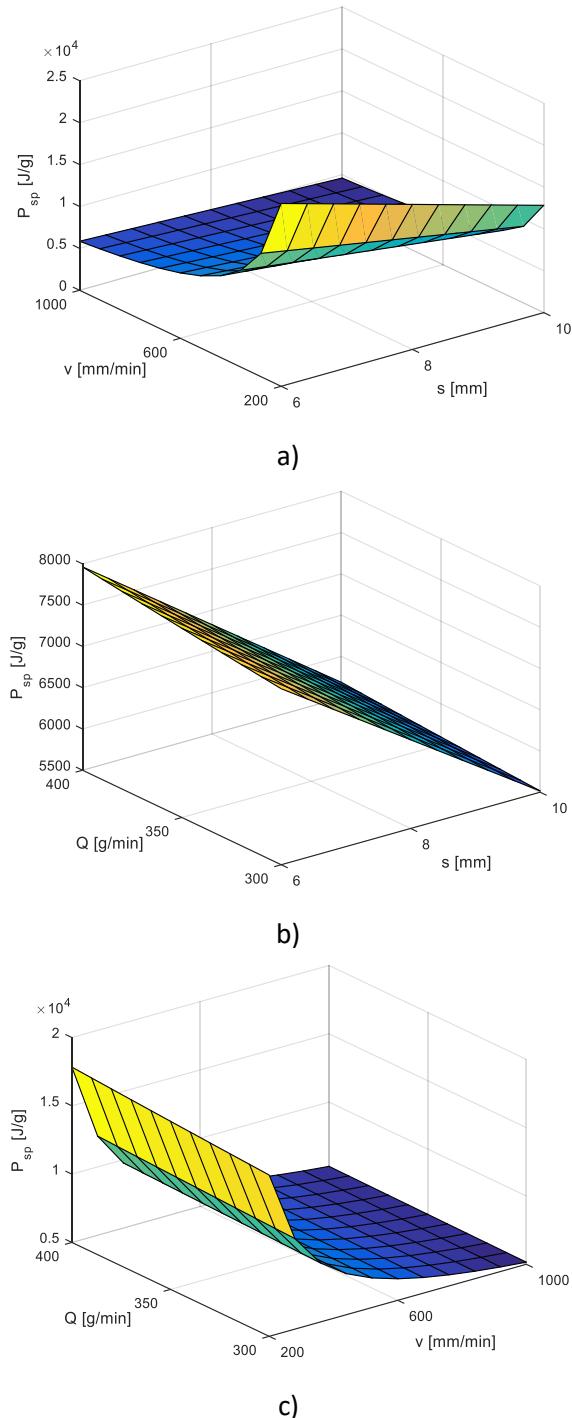
Generation	500
Population	500
Fitness function	Mean squared error (MSE)
Terminal set	s, Q, v
Functional set	+, -, *, /, $x^2$
Selection	Roulette wheel
Crossover rate	0.9
Mutation rate	0.05

The structure of the developed approximation model using the given control GP parameters was as follows:

$$P_{sp} = ((k_6 - s) / (((k_1 - Q) + (k_2 + k_4)) * ((k_2 / k_4) + v))). \quad (4)$$

where  $P_{sp}$  is the specific cutting energy,  $s$  is material thickness,  $Q$  is abrasive flow rate,  $v$  is cutting speed and  $k_1, k_2, \dots, k_6$  are GP model constants.

The derived functional relationship has been used to predict the specific cutting energy values for different combinations of AWJ parameters (Figure 2).



**Figure 2.** Interaction effects of the process parameters on the specific cutting energy

As shown in Figure 2a, the cutting speed has more pronounced effect on the specific cutting energy with respect to material thickness. For high cutting speeds, the effect of material thickness on the specific cutting energy is negligible, wherein for low cutting

speeds an increase in material thickness produces linear decrease in the specific cutting energy. In the case of smaller material thicknesses, the increase in the cutting speed results in quicker decrease in the specific cutting energy. It could be observed from Figure 2b that there is no significant interaction effect of abrasive flow rate and material thickness on the specific cutting energy. For a given material thickness the change in abrasive flow rate produces negligible change in the specific cutting energy due to small variation interval of this parameter. The same observation one can make by analyzing Figure 2c. It could also be observed that for different abrasive flow rates there is strong linear correlation between material thickness and the specific cutting energy. In the abrasive mass flow and the cutting speed interaction plot (Figure 2c), it can be seen that increase in the cutting speed consistently decreases the specific cutting energy, wherein the decrease is nonlinear for lower cutting speeds and approximately linear for high cutting speeds.

From the analysis of Figure 2 and covered experimental hyper-space one can conclude that the specific cutting energy is mostly affected by cutting speed and material thickness whereas the effect of abrasive flow rate is negligible. For each material thickness the minimal specific cutting energy is obtained in combination of high cutting speed and low abrasive flow rate. This combination of AWJ cutting parameters is also favorable with respect to cutting time and cutting costs. However, these cutting conditions do not produce smooth cut surface. Namely, based on experimentally obtained values, the following surface roughness mathematical model was developed:

$$R_z = e^{0.921} \cdot s^{0.725} \cdot v^{0.681} \cdot Q^{-0.41}. \quad (5)$$

As could be observed for a given material thickness surface roughness, in terms of ten-point mean roughness ( $R_z$ ), increases with an increase in cutting speed and decrease in abrasive flow rate. Therefore, one can conclude that the specific cutting energy and

surface roughness are contradictory optimization criteria and different cutting conditions are needed for their optimal values (Table 2).

**Table 2.** Minimal and maximal values of  $P_{sp}$  and  $R_z$

s [mm]	Q [g/min]	v [mm/min]	$P_{sp}$ [J/g]	$R_z$ [μm]
6	300	1000	5758	40.37
6	400	200	21149	29.13
8	300	1000	5155	120.81
8	400	200	16805	35.88
10	300	1000	4552	142.1
10	400	200	12460	42.18

#### 4. CONCLUSION

From the analysis of results it has been revealed that the functional dependence between specific cutting energy and the cutting speed is nonlinear whereas in the case of the abrasive flow rate and thickness this dependence is nearly linear. The developed GP model can be used for the specific cutting energy estimation and optimization of AWJ parameters. The integration of the derived model with other process performance model may serve as a basis for reduction of the amount of energy spent on the removal of material in the unit time, flexibility in machining parameter selection, and overall improvement of cutting process.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

This work was carried out within the project TR 35034, financially supported by the Ministry of Science and Technological Development of the Republic of Serbia.

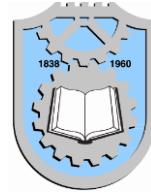
#### REFERENCES

- [1] M. Madić, M. Kovačević, M. Radovanović, V. Blagojević: Software Tool for the Laser Cutting Process Control – Solving Real Industrial Case Studies, *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, Vol. 14, pp. 135-145, 2016.
- [2] P. Chatterjee, S. Mondal, S. Boral, A. Banerjee, S. Chakraborty: A Novel Hybrid Method for Non-Traditional Machining Process Selection Using Factor Relationship and Multi-Attributive Border Approximation Method, *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, Vol. 15, pp. 439-456, 2017.
- [3] T. Machiada, T. Okai, J. Ozaki: Potentiality of Water Jet Method for Cutting of Sheet Materials, in: *Proceedings, 9<sup>th</sup> American Water Jet Conference*, St. Louis, USA, August 26-29, Vol. 1, pp. 343-358, 1997.
- [4] J. Baralić, V. Nedić, M. Radovanović, P. Janković: *Machinability of Materials by Abrasive Water Jet Cutting*, Monography, University of Kragujevac, ISBN 978-86-6335-013-7, pp. 204, 2015. (in Serbian)
- [5] A. Cekić, D. Begić-Hajdarević: Definition of Mathematical Models of High Alloyed Steel 1.4828 in CO<sub>2</sub> Laser Cutting, *Procedia Engineering*, Vol. 100, pp. 435-444, 2015.
- [6] Č. Franci, U. Župerl: Control strategy for assuring constant surface finish by controlling cutting forces, *Transactions of FAMENA*, Vol. 37 No.3, pp. 41-52, 2013.
- [7] C. Göloğlu, Y. Arslan: Zigzag machining surface roughness modelling using evolutionary approach, *Journal of Intelligent Manufacturing*, Vol. 20, No. 2, pp. 203–210, 2009.
- [8] M. Gostimirovic, D. Rodic, P. Kovac, V. Pucovsky, V. Savkovic: Application of neuro-fuzzy systems and genetic programming for modelling surface roughness in electrical discharge machining, *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, Vol. 12, No. 1, pp. 137-140, 2014.
- [9] P. Janković, M. Radovanović: Nontraditional Machining by Abrasive Water Jet Cutting, *Proceedings, International Conference Heavy Machinery*, Kraljevo, Serbia, Vol. 2, pp. 55-58, 2005.
- [10] S. Zhang, P. Nambiar: Accurate Hole Drilling Using an Abrasive Water Jet in Titanium, in: *Proceedings of American Waterjet Conference*, Houston, Vol. 7, pp. 1-12, 2005.
- [11] J. Koza: Evolving a computer program to generate random numbers using the genetic programming paradigm, in: *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*, Morgan Kaufmann, La Jolla, CA, 1991.
- [12] L. F. Alvarez: *Design Optimization based on Genetic Programming*, PhD thesis, Department of Civil and Environmental Engineering,



# SPMS 2018

37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije



# ICPE-S 2018

Society of Production  
Engineering

37<sup>th</sup> International Conference on Production  
Engineering of Serbia

Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## IMPLEMENTACIJA TEHNIKE CAD-INSPEKCIJE NA PREDMETIMA SLOŽENOG GEOMETRIJSKOG OBLIKA

Goran JOTIĆ<sup>1</sup>, Branko ŠTRBAC<sup>2</sup>, Igor BUDAK<sup>2</sup>, Miodrag HADŽISTEVIĆ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>University of Banjaluka, Faculty of Mechanical Engineering, Banja Luka, BiH.

<sup>2</sup>University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Novi Sad, Serbia

\*Corresponding author: [goran.jotic@mf.unibl.org](mailto:goran.jotic@mf.unibl.org)

**Sažetak:** *Inspekcija predstavlja važan dio procesa proizvodnje. U osnovi, ona obuhvata procjenu stepena usaglašenosti sa specifikacijama, obezbeđivanje izvještaja o nedostacima i pomoći pri zadovoljavanju traženih zahtjeva o kvalitetu. Razvoj tehnologija u oblasti proizvodnog mašinstva, prije svega CAx sistema i sistema za 3D digitalizaciju, kao i sve većih zahtjeva tržišta u pogledu estetike, ergonomije i aerodinamike, uslovili su pojavu geometrijski sve kompleksnijih proizvoda. Ovaj trend je značajno uticao i na razvoj metoda inspekcije. Složena geometrija i otežan proces obrade materijala povišenih mehaničkih karakteristika, sa jedne strane, a visoki zahtjevi u pogledu tačnosti i efikasnosti sistema za mjerjenje, sa druge strane, nameću pitanje izbora optimalne metode inspekcije. Predmet analize u okviru ovog rada su dva mašinska elementa složenog geometrijskog oblika izrađenih od aluminijuma Al 7075. Izvršen je sistematski pristup analizi geometrije koji podrazumijeva izradu površinskih modela predmeta primjenom tehnike reverzibilnog inženjerstva (RE), a zatim i solid modela. Nakon toga izvršeno je poređenje geometrije digitalizovanih modela. Ova vrsta Inspekcije, zasnovana na CAD modelu, poznata je kao CAD-inspekcija. U tu svrhu korištena je 3D mjerna ruka Nikon MCAX20+ sa integriranim linijskim laserskim skenerom. Nakon izvršenog poređenja geometrije na konkretnim primjerima i analize dobijenih rezultata potvrđeno je da ovaj sistem utiče na značajno poboljšanje efikasnosti kontrole proizvodnog procesa.*

**Ključne riječi:** Koordinatna mjerjenja, reverzibilno inženjerstvo, CAD-inspekcija

### 1. UVOD

Tendencije u smislu smanjenja vremena provedenog u procesu mjerjenja i kontrole, zatim porast zahtjeva u pogledu tačnosti i fleksibilnosti mjernih sistema rezultovali su velikim istraživačkim naporima u cilju razvoja i implementacije novih mjernih

uređaja/sistema. Tačnost u detektovanju položaja mjernih tačaka zavisi prije svega od tipa koordinatnog mjernog sistema (hadverska struktura), sistema uzorkovanja (mjerni senzor), načina uzorkovanja tačaka, itd. Koordinatni mjerni sistemi (KMS) se mogu podijeliti u dvije grupe: sistemi koji uzorkuju tačke na diskretan način i sistemi koji prikupljaju tačke u vidu skeniranja [1]. U prvu

grupu spadaju mašine sa serijskom kinematikom (konvencionalne koordinatne mjerne mašine (KMM) i mjerne ruke), jednodužinski sistemi sa dva ugla (laser trakeri, laserski radar i laserske stanice) i sistemi sa više uglova (mapiranje zasnovano na triangulaciji, konvergentna fotogrametrija i GPS sistemi). Sistemi za skeniranje obuhvataju: tačkaste skenere, linijsko – laserske skenere, sistemi ivičnih projekcija i kompjuterska tomografija [2]. Iako su pomenuti mjerni sistemi široko zastupljeni u industriji, pokazalo se da svaki od njih ima svoje prednosti ali i ograničenja prilikom izvršenja određenih mjernih zadataka. U oblasti proizvodne metrologije najveću primjenu imaju koordinatne mjerne mašine (KMM), zatim mjerne ruke koje mogu biti opremljene različitim tipom sistema senzora. Senzori koji se koriste kod KMM i mjerne ruke se mogu podijeliti na kontaktne i bezkontaktne. Najzastupljeniji kontaktni mjerni senzori kod KMM su senzori „tačka po tačka“ dok kod mjerne ruke je tzv. „kruti senzor“. Postoje i skenirajući mjerni senzori kod KMM koji imaju mogućnost skeniranja radnog predmeta dok je senzor u stalnom kontaktu sa radnim predmetom. Mjerni senzori koji koriste skenirajući mod mogu biti manje precizni zbog ubrzanja i promjenjivog trenja tokom skeniranja ali imaju mogućnost da mijere veći broj tačaka za manji period. Pored niza prednosti u oblasti dimenzionalne metrologije kontaktni senzori imaju i određene nedostatke. Primjena kontaktnih senzora u procesu inspekcije predmeta složenog geometrijskog oblika zahtijeva znatno veći utrošak vremena. Sveobuhvatniji pristup ovom problemu podrazumijeva primjenu bezkontaktnih senzora, najčešće linijsko-laserskog skenera [2]. Linijsko-laserski skener je optički uređaj koji na principu triangulacije generiše oblak tačaka i vrši njihovo prevođenje u digitalni oblik. Dobra strana ovih uređaja je da za kratak period mogu da umjere veliki broj tačaka. Na osnovu toga uobičajen su izbor u RE aplikacijama i metodama kontrole kvaliteta površina složenog geometrijskog oblika kao što su: alati za livenje metala i plastike, alati za

obradu plastičnom deformacijom, karoserije vozila, itd. Nedostaci laserskih skenera su nemogućnost digitalizacije segmenata kao što su: žljebovi, otvor malih dimenzija, ozubljenja, zatim osjetljivi su na boju predmeta, refleksiju svjetlosti sjajnih površina [3]. Nedostatke dosad navedenih mjernih sistema moguće je prevazići primjenom multi-senzorskih mjernih sistema. Ova kombinacija omogućava efikasnu kontrolu šireg opsega objekata od bilo kojeg pojedinačnog senzora, a ograničenja određenog senzora nadoknađuje drugi [3]. Preciznost i tačnost različitih mjernih sistema se oslikava u ispravnosti detektovanja koordinata tačaka. Nakon toga, u nezavisnim softverskim analizama, na bazi izmjerениh tačaka, se procjenjuju karakteristike kvaliteta proizvoda.

U ovom radu izvršena je analiza geometrije dva predmeta složenog geometrijskog oblika. Primjenom tehnike RE izvršena generisani su CAD modeli predmeta nakon obrade. U tu svrhu korišten je multi-senzorski mjerni sistem koordinatna merna ruka sa kontaktnim senzorom i linijskim-laserskim skenerom. Zatim metodom CAD inspekcije izvršeno je poređenje digitalizovanih modela (realna geometrija nakon izrade). Dobijeni rezultati komparacije mogu da posluže kao osnova za analizu: tačnosti obradnog sistema, tehnologije izrade, opravdanosti primjene multi-senzorskih mjernih sistema.

## 2. MATERIJAL I METODE

### 2.1. Predmeti analize i oprema

Analizirani predmeti su izrađeni od aluminijuma metodom mašinske obrade rezanjem, u jednakim uslovima i parametrima obrade (Sl. 1). Materijal uzorka je aluminijumska legura Al 7075 (AlZnMgCu1.5), koju odlikuju visoke mehaničke karakteristike, kao i veoma velika otpornost na zamor i koroziju. Osnovne mehaničke karakteristike su: zatezna čvrstoća (560 MPa), Rp0.2 (500 MPa), granica razvlačenja (7%) i tvrdoća (150 HBW) [4]. Primijenjena je linearna putanja obrade generisana u programskom sistemu SolidCAM,

Hoffman Garant®, oznake 202480, a predmeti su izrađeni na obradnom centru EMCO Concept Mill 450. Parametri obrade prilikom izrade su konstantni i iznose: vrijednost koraka 250 mm/min i broj okretaja glavnog vretena 4000 o/min.



**Slika 1.** Analizirani predmeti

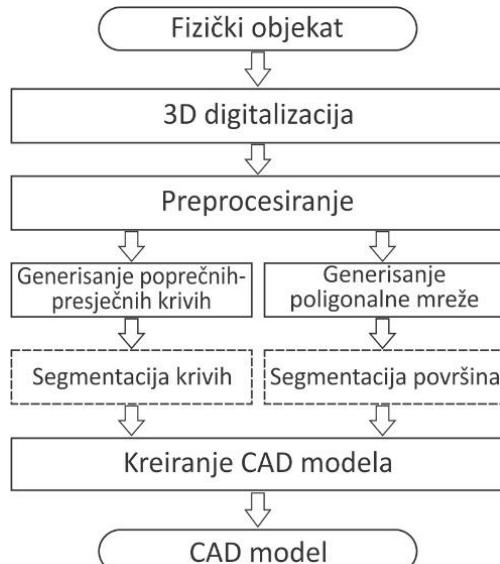
Za analizu geometrije predmeta korištena je koordinatna mjerna ruka Nikon, model MCAX 20+ koja raspolaže sa dva mjerna senzora: kontaktni senzor i linijsko-laserski skener (Sl. 2). Korišten je kontaktni mjerni senzor TESA Styli M3 3 mm×10 mm, opseg mjerjenja mjerne ruke 2000 mm, tačnost u kombinaciji sa kontaktnim mjernim senzorom  $\pm 0,033$  mm. Linijsko-laserski skener MMDx100, klasa 2 660 nm, tačnost 10  $\mu\text{m}$ , tačnost u kombinaciji sa mjernom rukom 0,048 mm [5]. Mjerne ruke su nesumljivo jedne od najnovijih i najbrže rastućih koordinatnih mernih sistema. Ovi KMS su stekli ogromnu popularnost uglavnom zbog mobilnosti i relativno dobre tačnosti.



**Slika 2.** Koordinatna mjerna ruka Nikon MCAX20+

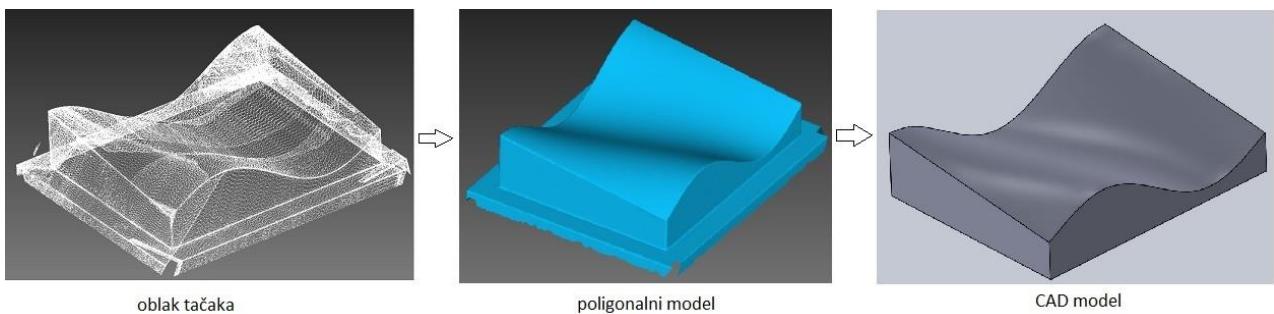
## 2.2. Reverzibilno inženjerstvo

Tehnika reverzibilnog inženjerstva (RE) podrazumijeva generisanje inženjerskih projektnih podataka iz postojećih komponenti. Za razliku od "klasičnog" inženjerskog projektovanja koje počinje od apstraktnog – ideje i podrazumeva njenu razradu kroz konceptualno, a zatim i detaljno CAD projektovanje, RE projektovanje počinje sa fizičkim objektom koji se zatim prevodi u CAD model (Sl. 3).



**Slika 3.** Osnovne faze procesa RE, [6]

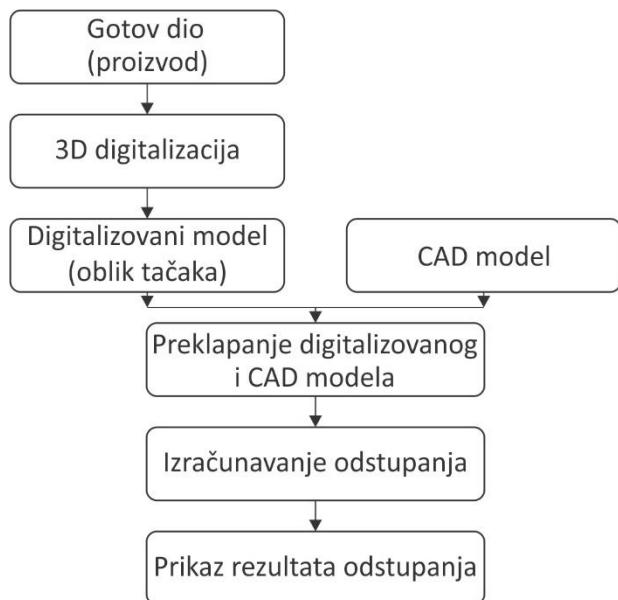
Prva faza procesa RE jeste akvizicija podataka o geometriji fizičkog objekta, tzv. 3D digitalizacija ili skeniranje. U okviru ove faze vrši se prikupljanje podataka o koordinatama tačaka na površini fizičkog objekta i njihovo prevođenje u digitalni oblik. Rezultat 3D digitalizacije je skup tačaka, tzv. oblak tačaka. S obzirom da se radi o velikom broju podataka u drugoj fazi se vrši pre-procesiranje, odnosno odstranjivanje grešaka, uklanjanje pikova, redukovanje nepotrebnih podataka koji bi usporavali kasnije procesiranje. U slučajevima vrlo složenih površina vrši se i segmentacija podataka. Nakon pripreme podataka vrši se rekonstrukcija skeniranog fizičkog modela, odnosno generisanje površinskog 3D modela, a zatim se na osnovu njega generiše solid model (Sl. 4). Primjenom RE, 3D model predmeta se može brzo generisati u digitalnoj formi, remodelirati i eksportovati u neki od sistema za kontrolu, izradu i sl. [6].



**Slika 4.** Realizacija procesa RE u konkretnom slučaju

### 2.3. CAD inspekcija

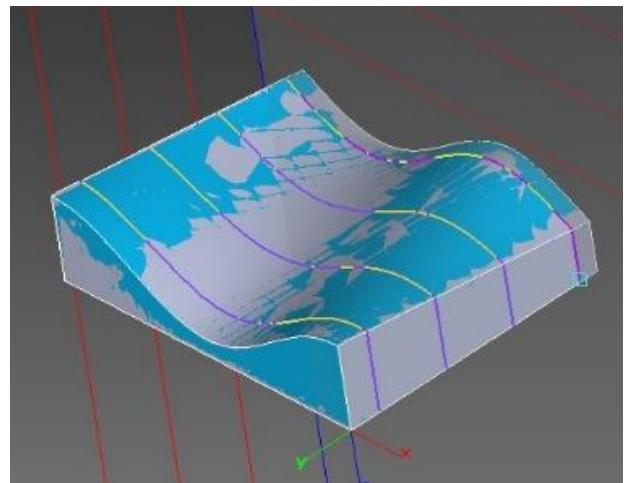
Evaluacija rezultata mjerjenja podrazumijeva izračunavanje odstupanja stvarnih tačaka sa površine obrađenog dijela, u odnosu na odgovarajuće nominalne tačke i prikaz rezultata u odgovarajućem obliku. Osnovne faze procesa evaluacije su: 1) orijentisanje izmjerih tačaka u odnosu na CAD model, 2) izračunavanje odstupanja, 3) analiza odstupanja i 4) prikaz rezultata. Kod predmeta složenog geometrijskog oblika se najčešće primjenjuje evaluacija tipa „površinsko odstupanje“ poznata kao CAD inspekcija [6] (Sl. 5). Takav pristup podrazumijeva poređenje digitalizovanog modela obratka (oblak tačaka-realna geometrija) u odnosu na solid model (CAD-nominalna geometrija).



**Slika 5.** Etape u postupku CAD inspekcije, [6]

U cilju dobijanja vjerodostojnijih rezultata odstupanja neophodno je izvršiti adekvatno

međusobno orijentisanje digitalizovanog i CAD modela, slika 6. Odstupanja se izračunavaju na bazi poređenja sa odgovarajućim tačkama, krivama ili površinama na nominalnom (CAD) modelu, određivanjem rastojanja u pravcu upravnog na površinu nominalnog modela u odgovarajućoj tački [6].

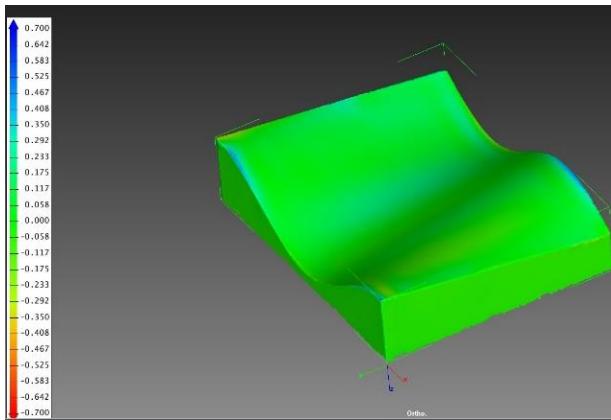


**Slika 6.** Preklop digitalizovanog i CAD modela

### 3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Prikaz vrijednosti odstupanja je u specijalizovanim programskim sistemima ove namjene mogući i u grafičkom i u numeričkom obliku. Grafička predstava rezultata obuhvata nekoliko formi: 1) mape regiona u boji, 2) mjernih tačaka u boji i 3) vektora odstupanja u boji. Prikazana odstupanja u ovom radu predstavljaju rezultat međusobnog poređenja digitalizovanih modela aluminijumskih predmeta 1 i 2 nakon procesa obrade. Na slici 7 prikazani su rezultati odstupanja u vidu mape regiona u boji. Osnovne prednosti prikaza rezultata odstupanja u ovoj formi su brza i jednostavna analiza kvaliteta obrade

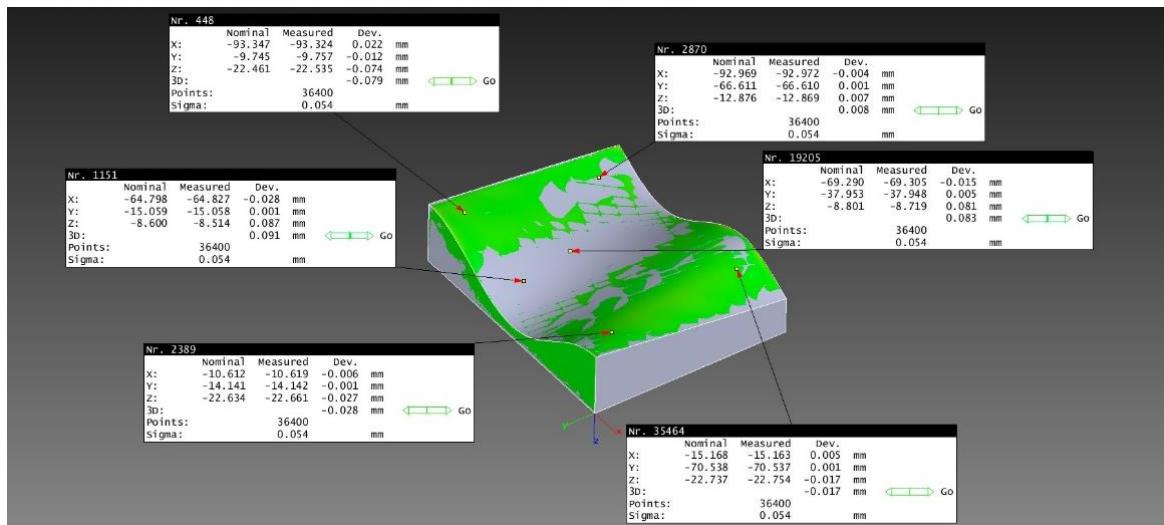
dijelova, posebno kada se radi o dijelovima visoke geometrijske složenosti površina.



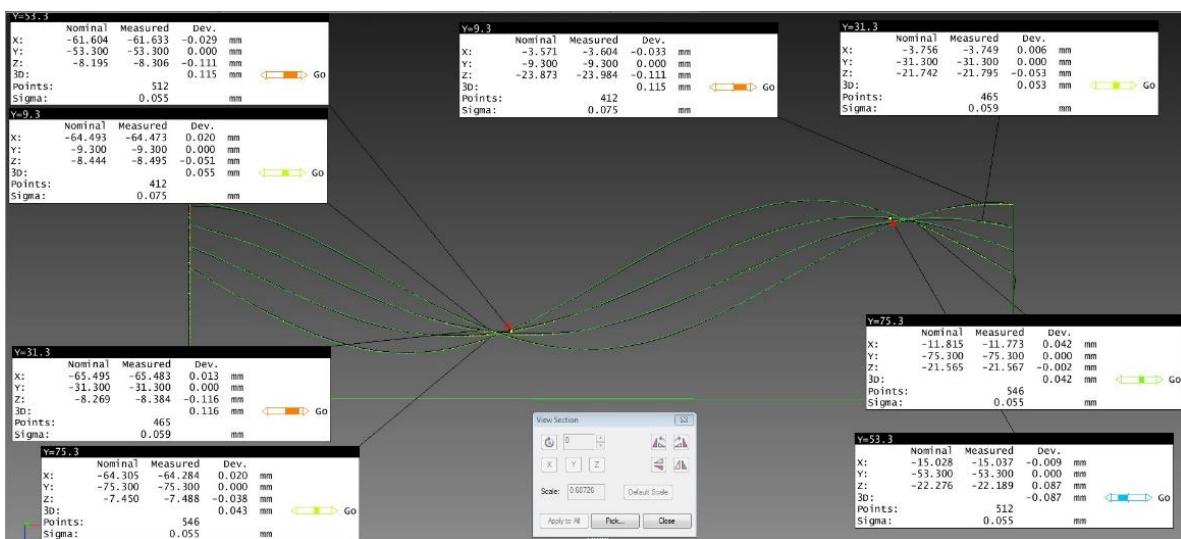
Slika 7. Resultati odstupanja u vidu mape regiona u boji

Na slici 8. prikazana je numerička forma odstupanja u proizvoljno izabranim tačkama na površini predmeta. Prednost ovog načina

poređenja je bolji prikaz nominalnog CAD modela, ali je sa druge strane u slučaju manjeg broja mjernih tačaka manje uočljiv nivo odstupanja. Evaluacija odstupanja u presjeku se razlikuje u tome što se odstupanja predstavljaju preko vektora odstupanja čiji intenzitet odgovara nivou odstupanja (Sl. 9, 10. i 11). Ova forma je sa vizuelnog aspekta manje pregledna, ali sa druge strane daje bolji osjećaj nivoa odstupanja u pojedinim područjima. Analizirana su odstupanja u četiri presjeka, odnosno u četiri vertikalne ravni (Sl. 6). Na osnovu predstavljenih formi prikaza rezultata odstupanja može se zaključiti da do najvećih odstupanja dolazi u zonama prevoja (prelaz iz konveksnog u konkavno područje i obrnuto).



Slika 8. Prikaz odstupanja u proizvoljnim tačkama



Slika 9. Zone najvećih odstupanja

#### 4. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

U ovom radu predstavljen je efikasan pristup procesu 3D digitalizacije predmeta obrade kao i način određivanja i prezentovanja odstupanja od unaprijed definisanih specifikacija. Razlozi sve češće primjene tehnike RE, odnosno evaluacije rezultata odstupanja na bazi CAD modela su: tačnost, pouzdanost, brzina i mogućnost primjene kako na dijelovima konvencionalnih geometrijskih oblika tako i na dijelovima složenog geometrijskog oblika izrađenih različitim tehnologijama (obrade rezanjem, deformisanjem, injekcionim livenjem plastike i sl.). Analizirana su dva predmeta koji sadrže površine složene geometrije. Težište analize je usmjereni upravo na navedene površine s obzirom na složenost, kako procesa obrade tako i procesa kontrole.

Prezentovani rezultati ukazuju na područja u kojim dolazi do najvećih odstupanja između poređenih predmeta. Porijeklo evidentiranih odstupanja moguće je odrediti detaljnijom analizom tačnosti obradnog sistema kao i primijenjenog mjernog sistema. Jedan od načina provjere tačnosti obradnog sistema jeste obrada etalon predmeta, koju može izraditi proizvođač mašine ili korisnik za provjeru tokom perioda eksploracije. Da bi se korišteni mjerni sistem klasifikovao u pogledu tačnosti potrebno je izvršiti kalibraciju analiziranih predmeta u cilju dobijanja referentnih vrijednosti.

#### LITERATURA

- [1] Weckenmann, A., Estler, T., Peggs, G., McMurtry, D.: *Probing systems in dimensional metrology*, CIRP Annals-

Manufacturing Technology, Vol. 53 (2), pp. 657-684, 2004.

- [2] Belgiu, G., Carausu, C.: *Management of the reverse engineering process in the plastics industry*, Procedia - Social and Behavioral Sciences Vol. 238, pp. 729 – 736, 2018.
- [3] Feng, L., Longstaff, A., Fletcher, S., Myers, A.: *Rapid and accurate reverse engineering of geometry based on a multi-sensor system*, Int. J. of Advances Manufacturing Technology, Volume 74, (1-4), pp 369–382, 2014.
- [4] Budak, I., Trifkovic, B., Puskar, T., Vukelic, Dj., Vučaj-Cirilovic, V., Hodolic, J., Todorovic, A.: *Comparative analysis of 3d digitization systems in the field of dental prosthetics*, Technical Gazette, Vol. 20(2), pp. 291-296, 2013.
- [5] Qiong, W., Da-Peng, L., Lei, R., Shuai, M.: *Detecting milling deformation in 7075 aluminum alloy thin-walled plates using finite difference method*, Int. J. of Advances Manufacturing Technology, Vol. 85 (5-8), p.p. 1291-1302, 2016.
- [6] Certification of calibrations, issued by: TRAC Measurement Systems Ltd, date of issue: 18.7.2017., Serial No.: 005749.
- [7] Budak, I., Vukelić, Dj., Bračun, B., Hodolič, J., Soković, M.: *Pre-Processing of Point-Data from Contact and Optical 3D Digitization Sensors*, Sensors, Vol. 12(1), pp. 1100-1126, 2012.
- [8] Budak, I.; Hodolič, J.; Bešić, I.; i dr.: Koordinatne merne mašine i CAD inspekcija, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Tempus projekat br. IB\_JEP-41120-2006, Novi Sad, 2009.

## CAD INSPECTION AS A SOLUTION FOR INSPECTING FREE-FORM SURFACES

**Abstract:** Inspection is an important part of the production process. Basically, it includes the assessment of the degree of compliance with specifications. The development of technologies in the field of manufacturing engineering, for example CAx and systems for 3D digitization, as well as the increasing market demands in terms of aesthetics, ergonomics and aerodynamics, have resulted in the emergence of geometrically more

*and more complex products. This trend has significantly influenced the development of inspecting methods. Complex geometry and difficult machining process for materials with high mechanical properties, on the one hand, and high demands on the accuracy and efficiency of measuring systems, on the other, impose the choice of optimal inspection method. In this paper, two parts with free-form surfaces were analyzed. A systematic approach to the analysis of geometry has been applied, which implies that the surface models of objects, as well as solid models later, are developed by using reverse engineering (RE). After that, comparison of the geometry of digitized models was done. This type of inspection, based on the CAD model, is known as the CAD Inspection. The 3D Nikon MCAX20 + measuring arm with an integrated laser scanner was used for this purpose. After the geometry comparison and the analysis of the obtained results, it has been confirmed that this approach leads to significant improvement in the efficiency of the production process control.*

**Key words:** Free-form surfaces, coordinate measuring arm, laser scanner, reverse engineering, cad inspection.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## ZAMENA PREVLAKA KADMIJUMA PREVLAKAMA VOLFRAM-DISULFIDA

Desimir JOVANOVIĆ<sup>1</sup>, Bogdan NEDIĆ<sup>2</sup>, Predrag JANKOVIĆ<sup>3</sup>, Stefan DJURIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Zastava oružje AD, Srbija, [tehnologija@zastava-arms.rs](mailto:tehnologija@zastava-arms.rs)

<sup>2</sup>Fakultet inženjerskih nauka Univerzitet u Kragujevcu, [nedic@kg.ac.rs](mailto:nedic@kg.ac.rs),  
[stefandjuric992@gmail.com](mailto:stefandjuric992@gmail.com)

<sup>3</sup>Mašinski fakultet Univerzitet u Nišu, [jape@masfak.ni.ac.rs](mailto:jape@masfak.ni.ac.rs)

**Apstrakt:** Galvanske prevlake kadmijuma se nanose da bi površina osnovnog materijala dobila odgovarajuća svojstava, kao što su: otpornost prema koroziji, poboljšana tribološka svojstva, hemijska postojanost, i dr. U radu su razmotrene osobine prevlake kadmijuma i osobine prevlaka koje mogu da je zamene. Kadmijum je veoma toksičan, pa se njegova upotreba u zemljama EU i širom sveta ograničava ili potpuno eliminiše. Tokom procesa taloženja prevlake kadmijuma neophodno je pridržavati se odgovarajuće zakonske regulative, u cilju zaštite životne i radne sredine. Kao jedna od mogućih zamena prevlake kadmijuma je i prevlaka volfram-disulfida na bazi nano čestica. U radu su prikazani rezultati ispitivanja karakteristika prevlaka volfram-disulfida u nano obliku i njihovo poređenje sa prevlakama kadmijuma.

**Ključne reči:** prevlake kadmijuma, prevlake volfram-disulfida, nano čestice, tribologija

### 1. UVOD

Galvanske prevlake kadmijuma se koriste za zaštitu delova od čelika, bakra i livenog gvožđa od korozije. Kadmijum se ponaša anodno u odnosu na čelik i štiti ga od korozije, iako prevlaka kadmijuma može biti porozna ili mehanički oštećena.

Prevlake kadmijuma, debljine od 5 do 12 µm, nanose se kao završne prevlake u cilju zaštite od korozije, a ređe kao podsloj. Prevlake se uglavnom nanose iz cijanidnih kupatila, a cijanidi se, kao i kadmijum, nalaze na listi 17 najtoksičnijih hemikalija. Na prevlake kadmijuma se redovno nanosi hromatni sloj kao dopunska zaštita (pasivacija), što zahteva korišćenje veoma toksične hromne kiseline.

Vrlo je pogodan za zaštitu u morskoj vodi i u lužnatim otopinama, a nepogodan je za

kisele medije. Prema čeliku ima anodni karakter. Debljina zaštitnog sloja je 8-25 µm.

Pored toga što poseduju visoku otpornost prema koroziji, prevlake kadmijuma imaju i druge poželjne osobine: dobru adheziju, duktilnost, sposobnost podmazivanja. Prevlake kadmijuma se primenjuju za zaštitu čelika visoke čvrstoće od pojave vodonične krtosti u uslovima eksploatacije. Kadmijum ima izuzetno visoku električnu i topotnu provodljivost, pa se može lako lemiti. Proizvodi korozije kadmijuma nisu voluminozni, tako da su promene dimenzija zaštićenih delova tokom vremena minimalne. Navedene osobine omogućavaju široko korišćenje prevlaka kadmijuma na različitim pokretnim delovima, elektronskim komponentama, u avio industriji, na vijčanoj robi itd [1, 2].

Međutim, kadmijum je veoma toksičan, zbog čega se nastoji da se njegova primena

ograniči, pa i potpuno eliminiše. Naročito je opasno unošenje kadmijuma u organizmam preko disajnih organa, jer može direktno da prouzrokuje oboljenja kao što su rak pluća, disfunkcija bubrega itd. Kad se jednom unese u krvotok kadmijum se akumulira u bubrežima izazivajući njihovo oštećenje i prestanak rada. [3, 5]. Prevlake kadmijuma zamenjuju se ekološki prihvatljivim prevlakama ili se vrši zamena osnovnog materijala metalom koji je otporan prema koroziji (nerđajući čelik, legure nikla.) Ovakav trend je naročito izražen u poslednjoj deceniji [5, 6].

Ako se u tehnološkom postupku nanošenja alternativnih prevlaka koriste ekološki neprihvatljive hemikalije (hromna kiselina, cijanidi itd.) neophodno je striktno primenjivati odgovarajuću zakonsku regulativu vezanu za zaštitu životne i radne sredine. Pored ekološke prihvatljivosti zamena za prevlake kadmijuma mora da ima dobra tribološka svojstva i otpornost na koroziju.

U ovim istraživanjima ispitane su tribološke karakteristike prevlaka volfram-disulfida u nano obliku. Cilj istraživanja je uporedna analiza prevlake kadmijuma sa prevlakom volfram-disulfida u cilju pronalaženja zamene za prevlaku kadmijuma zbog njenih štetnih svojstava.

Preliminarna ispitivanja u istim uslovima za prevlake kadmijuma i volfram disulfida pokazuju mogućnost uspešne zamene štetnih prevlaka kadmijuma.

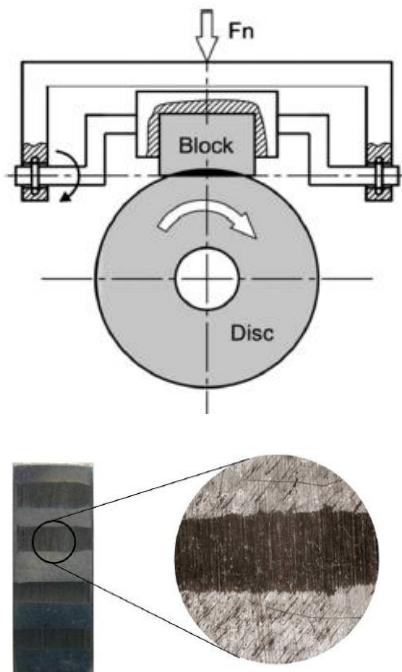
## 2. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

Kao osnova za nanošenje prevlaka odabran je čelik Č5730 (prema GOST-u 30HN2FA1). Uzorci za ispitivanje su pločice dimenzija 15 x 10 x 6.3 mm (prema ASTM G 77).

Završna obrada uzorka vršena je brušenjem. Mikrogeometrija podlage za nanošenje prevlaka snimana je na kompjuterizovanom mernom uređaju TalySurf-6, koji omogućava kompleksno praćenje kontaktnih površina. Korišćenjem ovog mernog sistema dobijena je informacija o početnoj mikrogeometriji kontaktnih površina uzorka. Nanošenje galvanske prevlake kadmijuma je izvršeno u pogonu za galvanizaciju fabrike Krušik u Valjevu a prev-

lake volfram-disulfida u preduzeću SPEEDUP internacional AD u Beogradu. Normalno opterećenje je bilo 6 N, a brzine klizanja 0,5 m/s, Ukupan put klizanja je bio 450 m.

Tribološkim ispitivanjima na tribometru blok-on-disk meren je koeficijent trenja i širina traga habanja na bloku i na taj način određivana otpornost na habanje kao parametar habanja površine sa prevlakom na ispitivanim blokovima (Sl. 1).

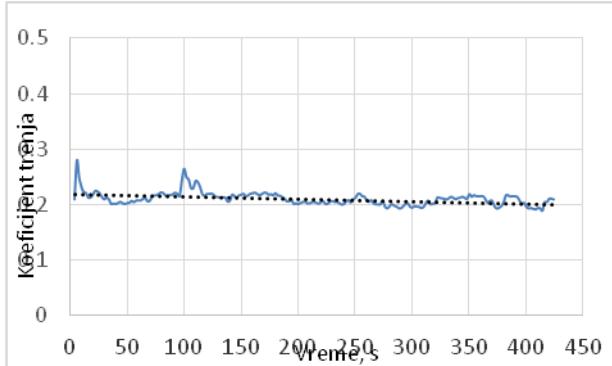


**Slika 1.** Trag habanja na bloku

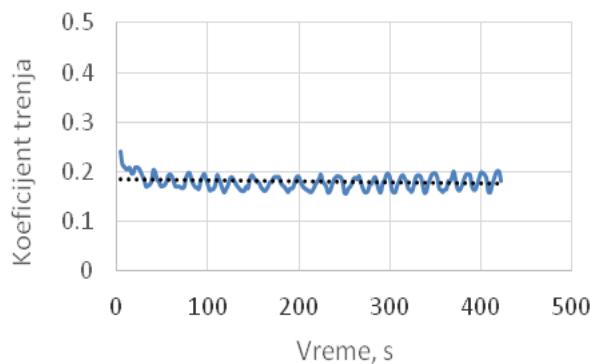
Vrednosti koeficijenta trenja i zapremine pohabanog materijala za ispitivane uzorke prikazane su u tabeli 1, a signalni koeficijenta trenja za uzorke br.1 i 7 na slikama 2 i 3.

**Tabela 1.** Vrednosti koeficijenta trenja

Prevlaka	Uzorak	Koeficijent trenja	zapremina pohabanog materijala, mm <sup>3</sup> x10 <sup>-3</sup>
Kadmijum	1	0.2184	19.63588
	2	0.2350	30.34072
	3	0.2396	19.50134
	4	0.2419	32.42814
	5	0.2235	38.82106
Volfram-disulfid	6	0.1803	64.52893
	7	0.1756	60.55432
	8	0.1625	51.01728
	9	0.1799	52.49307
	10	0.1659	52.22280



Slika 2. Signal koeficijenta trenja, kadmijum



Slika 3. Signal koeficijenta trenja, volfram-disulfid

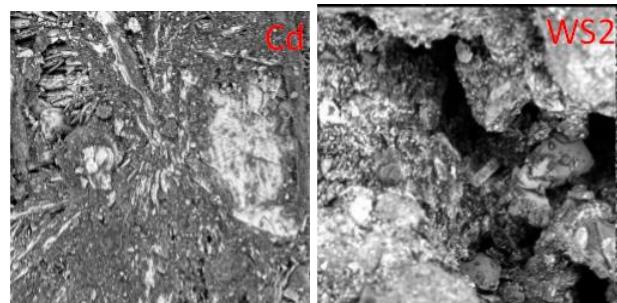
### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

Volfram disulfid ima niži koeficijent trenja od kadmijuma. U kontaktu bloka i diska dolazi do abrazivnog habanja a kontakt se javlja po vrhovima neravnina zbog velike hrapavosti prevlake. Tokom ispitivanja vrednost koeficijenta trenja nema većih oscilacija što je rezultat samopodmazujućih svojstava prevlake čvrstog maziva.

Volfram-disulfid ima daleko krupnije čestice od galvanskih prevlaka kadmijuma što ima za posledicu hrapaviju površinu i kontaktna površina su isključivo vrhovi neravnina. Tokom ispitivanja volfram-disulfida izraženo je abrazivno habanje, gde produkti habanja prilikom odnošenja ispunjavaju pore u materijalu.

Na slici 4. prikazan je SEM snimak površine prevlaka kadmijuma i volfram-disulfida pre ispitivanja. Analizom površina prevlaka kadmijuma vidi se da je tokom nanošenja prevlake došlo do čvrstog sjedinjavanja čestica koje čine zajedničku strukturu. Čestice su različitih veličina bez definisanog opsega u

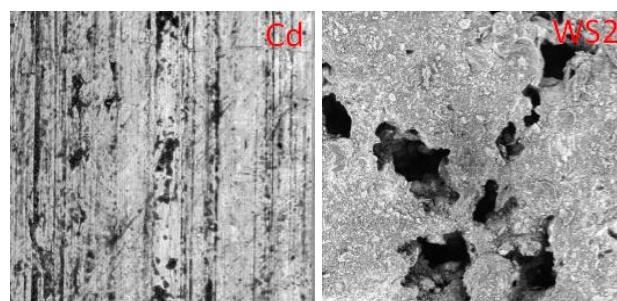
kojem se kreću. Veličina čestica i formiranje prevlake se može kontrolisati tokom procesa nanošenja prevlake.



Slika 4. SEM površina prevlaka pre ispitivanja

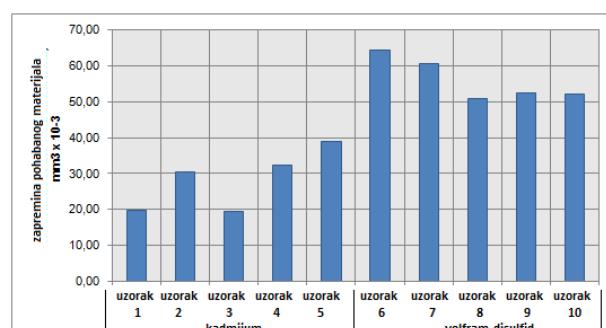
Trag habanja prevlake kadmijuma na slici 5 pokazuje da dolazi do plastičnih deformacija i odnošenja materijala delaminacijom. Kontakt čeličnog diska sa osnovnim materijalom ukazuje na poptuno odnošenje prevlake kadmijuma.

Promena širine traga habanja ima isti karakter za sve ispitivane uzorce samo je razlika u nivou njihove pohabanosti. Proces habanja karakteriše postizanje određenog nivoa, stabilizaciju i usporeni porast širine traga habanja tokom vremena ispitivanja.



Slika 5. SEM površina nakon opterećenja

Grafički prikaz vrednosti zapremine pohabanog materijala za ispitivane prevlake kadmijuma i volfram-disulfida dat je slici 6.



Slika 6. Zapremina pohabanog materijala

#### 4. ZAKLJUČAK

Kao ishod istraživanja dobijeni su sledeći rezultati:

- Koeficijent trenja prevlake volfram-disulfida je niži od prevlake kadmijuma.
- Habanje je takođe manje kod prevlake na nano-bazi u odnosu na galvansku prevlaku kadmijuma.

Dobijeni rezultati u istraživanja ukazuju na širok spektar mogućnosti primene prevlake volfram-disulfida na nano bazi. Tokom opterećenja ne dolazi do većih oštećenja i odnošenja prevlake, što uz mali koeficijent trenja i relativno dobru korozionu otpornost ovu prevlaku u potpunosti kvalificuje kao potencijalnu zamenu za štetnu prevlaku kadmijuma. Univerzalna zamena za prevlake kadmijuma još uvek ne postoji.

#### ZAHVALNOST

This paper is part of project TR35034 The research of modern non-conventional technologies application in manufacturing companies with the aim of increase efficiency of use, product quality, reduce of costs and save energy and materials, funded by the

Ministry of Education and Science of Republic of Serbia.

#### LITERATURA

- [1] K. Sriraman, H. Strauss, S. Brahimi, S. Chromik, J. Szpunar, J. Osborne, S. Yue: Tribological behavior of electrodeposited Zn, Zn–Ni, Cd and Cd–Ti coatings on low carbon steel substrates, *Tribology International*, Vol. 56, pp. 107-120, 2012.
- [2] A. Agüero, J.C. del Hoyo, J. García de Blas, M. García, M. Gutiérrez, L. Madueño, S. Ulargui: Aluminum slurry coatings to replace cadmium for aeronautic applications, *Surface & Coatings Technology*, Vol. 213, pp. 229-238, 2012.
- [3] R. Kovačević, S. Milačić, D. Jovičić, I. Tanasković: Savremeni aspekti patogenetskih mehanizama delovanja metala na ljudski organizam tokom profesionalne ekspozicije, *Zaštita Materijala*, Vol. 46, No. 1, pp. 51-54, 2005.
- [4] Z. Šegrt: *Otvorne hemikalije*, Punto-Beograd, 2004.
- [5] G. Y. Du, D.C. Ba, Z. Ta, K. Lui: Research on frictional behavior of tungsten disulfide thin films prepared by RF magnetron sputtering on restless steel, *Physics Procedia*, Vol. 32, pp. 532-538, 2012.
- [6] S. Đurić, B. Trifunović, B. Nedić, D. Jovanović, A. Kostić: Tribološke karakteristike galvanskih prevlaka i prevlaka volfram disulfida, 15<sup>th</sup> International conference on Tribology, 17-19. 05. 2017, Kragujevac, pp. 698-703.

## THE REPLACEMENT OF CADMIUM COATINGS WITH TUNGSTEN-DISULPHIDE COATING

**Abstract:** The galvanic coatings of cadmium are applied so that the surface of the base material gets the corresponding properties, such as: corrosion resistance, improved tribological properties, chemical stability, and so on. The paper deals with the properties of the cadmium coating and the properties of the coating that can be replaced. Cadmium is very toxic, so its use in EU countries and around the world is limited or completely eliminated. During the process of deposition of cadmium coating, it is necessary to comply with the relevant legislation in order to protect the living and working environment. As one of the possible replacement of the cadmium coating, there is a coating of nano-based tungsten-disulfide. The paper presents the results of testing the properties of tungsten-disulfide coatings in nanoparticles and their comparison with cadmium coatings.

**Key words:** cadmium coatings, tungsten-disulfide coatings, nano particles, tribology



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## THE APPLICATION OF NUMERICAL SIMULATION IN THE IMPROVEMENT OF THE FLOTATION BALLS CASTING PROCESS USED IN THE MINING INDUSTRY

Aleksandar JOVICIC<sup>1\*</sup>, Radomir SLAVKOVIC<sup>2</sup>, Nedeljko DUCIC<sup>2</sup>, Radomir RADISA<sup>3</sup>, Srecko MANASIJEVIC<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Faculty of maritime academic studies, Belgrade, Serbia, aleksandar.jovicic@vbs.edu.rs

<sup>2</sup>Faculty of technical sciences, Cacak, Serbia, radomir.slavkovic@ftn.kg.ac.rs

<sup>3</sup>Research and development organization Lola, Belgrade, Serbia, radomir.radisa@li.rs;  
srecko.manasijevic@li.rs

\*Corresponding author: aleksandar.jovicic@vbs.edu.rs

**Abstract:** The paper presents the improvement of the flotation balls casting process based on the application of numerical simulation - modern software systems for optimization and control of casting process parameters. The concept includes virtual production, practical realization of the technological process by using an advanced version of casting tools and final check of casting parts quality - flotation balls. By applying the presented production methodology, the time, necessary for the development of new product and its production, is reduced compared to traditional testing methods through attempts and errors.

**Keywords:** flotation balls, casting process, numerical simulations, hardness.

### 1. TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS AND APPLICATION OF FLOTATION BALLS

#### 1.1 The overview of the numerical simulation application in casting process

Casting process is a very old production technology that has evolved over time into many different casting processes. The development of the foundry field is based on scientific results, many of which are the product of the use of specialized modern software systems. The aforementioned software systems enable virtual production based on numerical simulation, with the goal to optimize process parameters, to improve

quality of the casting part and to reduce production cost.

Nimbalkar and Dalu (2016) presented the application of Auto-CAST X1 software for simulation of the casting process. Namely, authors emphasize the importance of gating system and feeding system designs for validity of the casting part through numerous simulations in the aforementioned software [1]. Jie and its co-authors (2014) used the Pro Cast software package to improve aluminum alloy casting process and they concluded that increasing of the molten metal temperature and casting process velocity solves the porosity problem [2]. Dabade and its associates (2013) used MAGMASoft casting simulation software to analyze various defects

in the casting process, by detecting their cause through simulations of dimensionally and positionally different variants of casting and feeding systems [3]. Dučić et al. (2017) presented a methodology of optimization of the gating system for sand casting by using the genetic algorithm (GA). The subject of optimization was the geometry of the gating system, in fact, the cross section of ingate and the casting height. The main goal of optimization was to minimize casting process time. Numerical simulation (software MAGMA<sup>5</sup>) was used to verify the validity of the optimized geometry of the gating system [4].

## 1.2 Permanent-mould casting of flotation balls

Permanent-mould casting is one of the methods of flotation balls production of low-chromium white cast iron. Produced flotation balls are used for grinding the copper ore (the ball with 2,5%Cr). Flotation balls, beside ores grinding, find their application at cement plants, refineries, power plants and quartz plants. Flotation balls, that are used at preparing the copper ore technology, have ordinary chemical composition [C=(3.2-3.8)%], Si=(0.4-0.8)% Cr=(2.2-2.8)% Mn=(0.4-0.8)% Pmax=0.1%, Smax=0,1%. The surface of the flotation ball for grinding must not have defects from the casting process, such as: cracks and obvious porosity, cavities, cold welds, poor joints, rough surfaces, etc. The most common mistakes are that the ball does not have the proper spherical shape, the diameters vary by  $\pm 2$ mm, and in the zone of the ingate remains, a 2-4mm lump can be seen. The diameter in the mold joint zone is clearly visible. It happens that the surface of the ball is extremely rough. In terms of internal quality at ball cross section, porosity, air caps, ball material non-homogeneity, holes (cavities) in casting part that arose the voltage concentration, which dramatically shortens the ball's life, as well as other internal defects are not permitted.

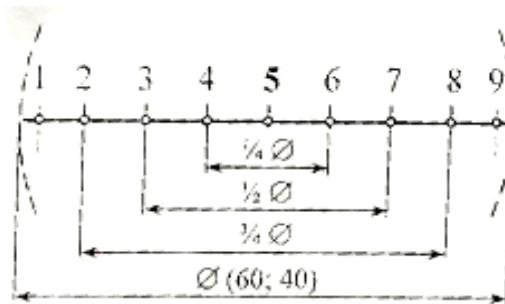
## 1.3 Determination of flotation ball surface and volume hardness

The volume hardness is calculated according to the formula A.V.H. (Average Volumetric Hardness)[5]:

$$A.V.H. = 0.289A + 0.437B + \\ + 0.203C + 0.063D + 0.008E \quad (1)$$

where:

A - the mean value of measured surfacehardness in points 1 and 9 (Fig. 1),  
 B - the mean value of measured surface hardness in points 2 and 8 (Fig. 1),  
 C - the mean value of measured surface hardness in points 3 and 7 (Fig. 1),  
 D - the mean value of measured surface hardness in points 4 and 6 (Fig. 1), and  
 E - the value of measured surface hardness in point 5 (Fig. 1).



**Figure 1.** Disposition of measuring points

For testing surface hardness, based on defined planes, the cross-section along the ball diameter in the plane of the mold joint has been made. Thereafter, an irregular shape hole (a cavity) of 13x8(mm) and a depth of 4-6(mm) were observed. The hole is caused by formation of air bubble inside the ball, caused by non-homogeneous molten metal and irregular cooling speed.

**Table 1.** Table of the surface and volume hardness results of the balls molded with the previous version of the tool

Measuring point									
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	
56	54	55	54	<20	54	56	56	57	
Volume hardness: A.V.H.=55,19HRc									
Surface hardness: 56,5 HRc									

Based on data access that emphasize world's largest manufacturers (USA, Canada,

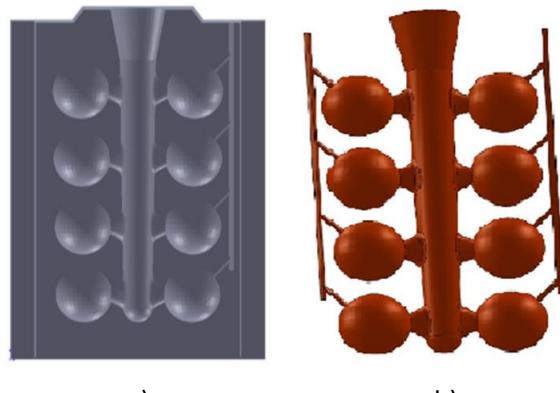
China...), regarding surface and volume hardness, the limit hardness values for balls, which have diameter 25 to 150mm, are 58 - 65HRc for surface hardness and 56 - 64HRc for volume hardness. By analysing the mean value of surface hardness of balls, that were obtained by permanent-mould casting, by using tools shown in Fig. 2, the realized value is 56.5HRc, which is less than minimal recommended value – 58HRc. The value of volume hardness (A.V.H.) is 55.19HRc, which is also less than minimal recommended value 56 HRc [6]. Considering the structure of the sample results, it is noted that at the measuring point number 5, the value of the measured hardness is <20HRc, which is a consequence of the microcavity in the casting part (Fig. 6). It should be noted that cavities occur only on some casting parts. If the cavities are eliminated in casting part, the surface and volume hardneses will increase, and the assumption in that case is the flotation balls hardness would be within the prescribed limits required by world manufacturers of balls for grinding ores.

## 2. ERRORS IN FLOTATION BALLS CASTING PROCESS

Proper and complete mold filling is an important task in the casting process, on the basis of which high quality casting part is achieved. The role of ingate system design and feeding system design in achieving this goal is very significant. Improper design of ingate system leads to numerous defects in casting process, which results in poor quality of casting part. Thus, the task of the gating system is to provide a smooth, equal and full filling of the mold with a pure, molten metal [7].

In order to drain gases from the casting part, in the existing version of tools, channels for the discharge of gases are used. The tools are made on CNC mill machine.

Generation of the G code was performed by the software package Solid CAM. The dimensioning of the ingate system was carried out according to foundry standards.



**Figure 2.** a) Layout of the half of the tool - 3D model, and b) Layout of casting part with gating system and channel for the discharge of gases

Smooth filling of the mold eliminates turbulence, equal filling ensures continuous filling over time, and complete filling involves leading the molten metal to the thin and end parts of the mold. During the cooling of the casting part, the metal shrinkage occurs, i.e. reducing the volume of the casting part. The significance of the feeders is reflected in their function to compensate to the casting part the deficit of liquid metal due to volume shrinkage.

Due to exploitation of flotation balls, the possibility of occurrence of internal cavities (lunkers) and micro porosity, which are very sensitive to the concentration of the voltage and often are the cause of fracture of flotation balls, must be eliminated. The occurrence of these errors is consequence of inadequate solution of ingate system.

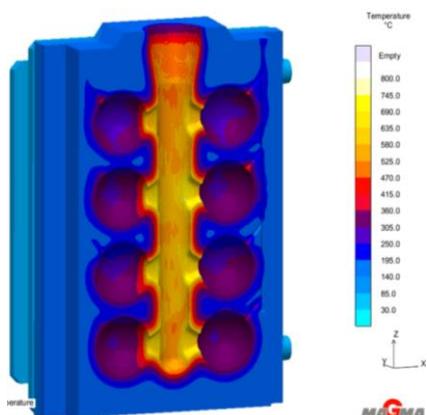
In such cases, it is very important before creating the tools, necessary for shaping the mold, to perform simulation of casting process, i.e. to perform a virtual casting process, based on which a wide range of technical and technological characteristics of the casting part can be checked. In a series of possible criteria for assessing the quality of the casting part, in this case are given the results of simulation according to criteria „Solidification“, „Fstime“, „Hotspot“ and „Porosity“ based on which conclusions on internal mistakes in the casting part are made.

The simulation results are shown in the 3D graphical environment where, by the X-ray view into the mold, are noticed the filling of the mold cavity, the filling speed of the mold

as well as the temperature areas. The hardening front and possible porosity positions due to hardening of the metal are obtained by cross sections through casting parts. For the casting process simulation by using MAGMAsim, was made a 3D CAD model of all mold cavity elements, that is filled with liquid metal, gating system, feeders and channels for the discharge of gases.

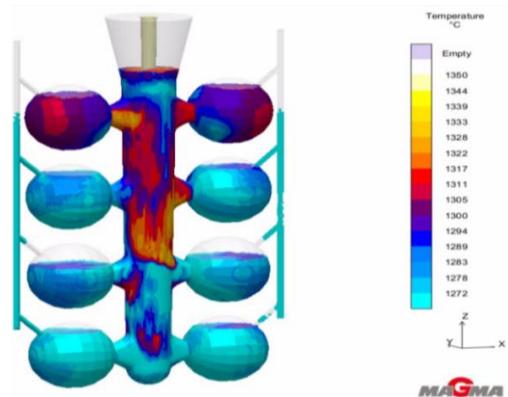
In addition to the above-mentioned 3D geometric models (STL standard graphic format) for simulation casting technology parameters (casting process temperature, material of the mold, type of coating, casting part material, type of casting pot etc.) are also given. After processing the casting process, recommendations and conclusions are given. Based on them, simulations with changed parameters were performed until the final solution was reached. Also, when reviewing the results of the simulation, the images of the critical and interesting parts, needed by the user of the simulation result, are given.

The flotation ball casting tool (Fig. 3), before pouring molten metal, is heated on temperature of at least 120°C. The temperature of the tool ranges up to 700°C. It can be clearly seen (Fig. 3) that the highest temperatures of tool are at the places where the ingate system is located and for this reason the tool should be protected by thermal insulation coatings. If the coating was not applied, there would be significant damage to the tools, the use of thermal insulating coatings significantly prolongs the lifespan of the tool.



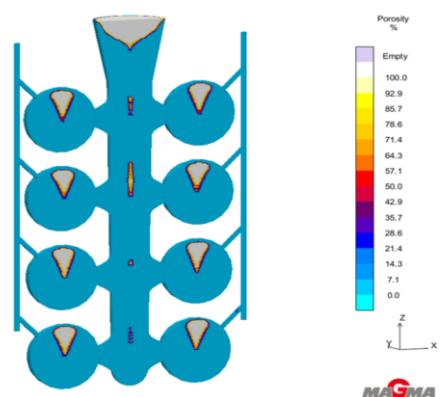
**Figure 3.** Tool temperature after casting process

The “Solidification” criteria provides the possibility to display hardening phases with isotherms of temperature hardening fields, temperature gradients, liquid, dough or solid state (Fig. 4) where can be seen that the casting part is hardened from the thinner to the more massive part, while ingate is hardening the last, which ensures necessary casting part feeding.



**Figure 4.** Casting part solidification

When cooling the casting part (Fig. 4), the channels for the discharge of gases are becoming closed, thereby they loose their function and the air remains trapped in the mold, resulting in a porosity in the casting part. The cause of the formation of gaseous bubbles should be sought in the insufficient diameter of channels for the discharge of gases as well as in vortex flow of molten metal, which is the result of an inadequately solved ingate system.



**Figure 5.** Criteria “Porosity “

The occurrence of porosity on castings parts (Fig. 5) directly affects the reduction of the casting part hardness, and therefore the reduced wear resistance, which directly affects the increased consumption of casting parts during exploitation. The “Porosity” criterion

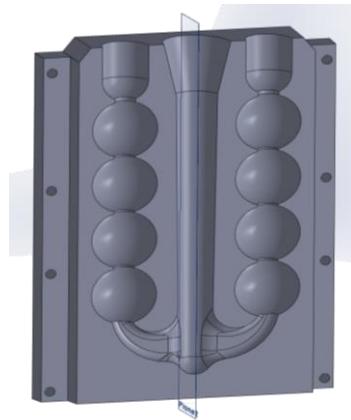
allows analysis of porosity and cavity in the casting part. Results obtained by using the MAGMAsoft software package have been confirmed in practical application (Fig. 6). In the cross-section of the ball (Fig. 6), molded in the tool according to the previous version, gaseous inclusions that occur in the form of trapped, resulting in porosity.



**Figure 6.** Casting part - flotation ball after impact testing

### 3. FLOTATION BALLS CASTING PROCESS IMPROVEMENT

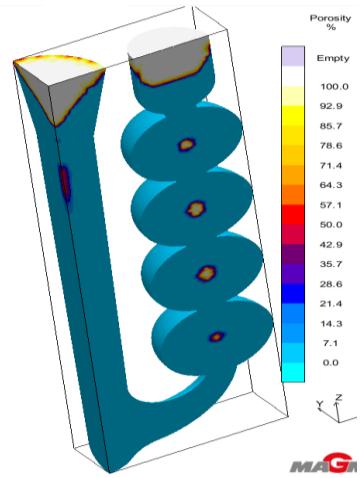
The new solution of the casting tool "from below" (Fig. 7) avoids the vortex flow of the molten metal. By casting process a ball through ball method, through the simulation it is confirmed that no air bubbles are formed, i.e. does not appear porosity in the upper zones of the casting part, as was the case with the previous versions of the tools.



**Figure 7.** Layout of tool for flotation balls casting process “from below”

After performed casting process simulation in software package MAGMAsoft, according to “Porosity” criteria (Fig. 8) porosity in the center of the ball is noticeable. Porosity in the center of the

ball does not have a significant impact on wear because the ball never wear until the end (Fig. 9) and it is not detected in casting (Fig. 10), because it obviously refers to microporosity that the software detects.



**Figure 8.** Porosity at 100% hardened metal

In order to confirm the conducted researches, in real conditions, with the strict control of casting technology parameters (casting temperature, mold material, coating type, casting part material, type of casting pot...) used in the simulation casting of flotation balls according to the new version of the tool was conducted.



**Figure 9.** Flotation ball wear level

In the cross-section of the flotation ball, molded with a new version of the tool, no porosity was noticed (Fig. 10).



**Figure 10.** Half of the ball - molded according to new version of tool

**Table 2.** Table with results of surface and volume hardness of balls molded according to new version of tool

Measuring point									
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	
58	54	55	54	52	54	56	56	58	
Volume hardness: A.V.H.=56,40HRc									
Voltage hardness: 58 HRc									

By analyzing the results, mean value of surface hardness of sample 2, of balls, made according to new version of tool (measuring points 1 and 9)  $58\text{HRc} = 58\text{HRc}$  and value of volume hardness  $A.V.H. = 56,4\text{HRc} > 56\text{HRc}$ , the conclusion is that the hardness of this ball is equal to the minimum recommended value, which was the goal of improvement.

#### 4. CONCLUSION

Modern foundries can not be imagined without implementation of numerical simulation in the product development process. In the concrete case, during the flotation balls casting process, during the exploitation, cavities in casting parts that are very sensitive to the voltage concentration were noticed and they are often the cause of the fracture i.e. cracking of flotation balls. With the application of virtual production, simulation of casting process, it was determined that the occurrence of these errors causes an inadequate solution of the ingate system. The improvement of the flotation ball casting process was carried out by using MAGMASoft software package. Based on various criteria („Solidification“, „Fstime“, „Hotspot“ and „Porosity“) it was concluded that the flotation balls casting technology was improved.

By constructing a new tool, casting process is done "from below". The tool has been modified to eliminate the vortex flow of the molten metal [8]. By ball through ball casting process, through simulation, as well as casting process under strictly controlled conditions, it was confirmed that air bubbles nor porosity do not appear in the casting part. By application of numerical simulation, the flotation ball casting

process has been improved and minimal recommended values of surface and volume hardness have been achieved.

#### ACKNOWLEDGEMENT

The authors thank to Industrial Complex Foundry Guca and to Research and development organization Lola Belgrade for help with the realization of the casting process, experimental measurements in work, as well as for the use of the MAGMASOFT software package during the casting process simulation.

#### REFERENCES

- [1] S.L. Nimbalkar, R.S. Dalu: Design optimization of gating and feeding system through simulation technique for sand casting of wear plate, Perspectives in Science, Vol. 8, pp. 39-42, 2016.
- [2] Z. Jie, Z. Dongqi, W. Pengwei, W. Gang, L. Feng, D. Penglong: Numerical simulation research of investment casting for  $\text{TiB}_2/\text{A356}$  aluminum base composite, Rare Metal Materials and Engineering, Vol. 43, pp. 47-51, 2014.
- [3] U.A. Dabade, R.C. Bhedasgaonkar: Casting defect analysis using design of experiments (DoE) and computer aided casting simulation technique, Procedia CIRP, Vol. 7, pp. 616-621, 2013.
- [4] N. Dučić, Ž. Ćojbašić, S. Manasijević, R. Radiša, R. Slavković, I. Milićević, Optimization of the gating system for sand casting using genetic algorithm, International Journal of Metalcasting, Vol. 11, pp. 255–265, 2017.
- [5] About Handnes, available at: [www.zgffty.com/list-41-1.html](http://www.zgffty.com/list-41-1.html), accessed: 17.07.2018.
- [6] High hardness, available at: <http://energosteel.com/en/productsspecification/grinding-balls-5-grouphardness/>, accessed: 17.07.2018.
- [7] S. Manasijević, Z. Pavlović-Aćimović, R. Radisa: Optimizacija parametara livenja klipova koriscenjem softverskog paketa MAGMASoft, Metalurgija, Vol. 13, No 3, pp. 221-230, 2007.
- [8] I. Vasková, D. Fecko, L. Eperješi: Comparison of simulation programs MAGMASoft and NOVAFLOW & SOLID in terms of results accuracy, Archives of Foundry Engineering, Vol.11, pp. 51-54,2011.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## PRIMENA NUMERIČKE SIMULACIJE U UNEPREĐENJU PROCESA LIVENJA FLOTACIJSKIH KUGLI KOJE SE KORISTE U RUDARSKOJ INDUSTRIJI

Aleksandar JOVIČIĆ<sup>1\*</sup>, Radomir SLAVKOVIĆ<sup>2</sup>, Nedeljko DUČIĆ<sup>2</sup>, Radomir RADIŠA<sup>3</sup>, Srećko MANASIEVIĆ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Visoka brodarska škola akademskih studija, Beograd, Srbija, aleksandar.jovicic@vbs.edu.rs

<sup>2</sup>Fakultet tehničkih nauka, Čačak, Srbija, radomir.slavkovic@ftn.kg.ac.rs

<sup>3</sup>Istraživačko-razvojni institut Lola, Beograd, Srbija, radomir.radisa@li.rs; srecko.manasijevic@li.rs

\*Kontakt adresa autora: aleksandar.jovicic@vbs.edu.rs

**Rezime:** U radu je prikazano unapredjenje procesa livenja flotacijskih kugli bazirano na primeni numeričke simulacije - savremenih softverskih sistema za optimizaciju i upravljanje parametrima procesa livenja. Koncept obuhvata virtualnu proizvodnju, praktičnu realizaciju tehnološkog procesa korišćenjem unapredjene verzije alata za livenje i konačnu proveru kvaliteta odlivaka - flotacijskih kugli. Primenom metodologije prikazane u radu skraćuje se vreme razvoja novog proizvoda i njegove proizvodnje u odnosu na tradicionalne metode testiranja putem pokušaja i pogreški.

**Ključne reči:** flotacijske kugle, livenje, numeričke simulacije, tvrdoča.

### 1. TEHNOLOŠKE KARAKTERISTIKE I PRIMENA FLOTACIJSKIH KUGLI

#### 1.1 Pregled primene numeričke simulacije u procesu livenja

Proces livenja je veoma stara proizvodna tehnologija koja je evoluirala tokom vremena u veliki broj raznovrsnih postupaka livenja. Razvoj oblasti livarstva zasnovan je na naučnim rezultatima od kojih su mnogi proizvod upotrebe specijalizovanih savremenih softverskih sistema. Pomenuti softverski sistemi omogućuju virtualnu proizvodnju zasnovanu na numeričkoj simulaciji, s ciljem da se optimizuju procesni parametri, poboljša kvalitet odlivka i smanji trošak proizvodnje.

Nimbulkar i Dalu (2016) predstavljaju primenu softvera Auto-CAST X1 za simulaciju

procesa livenja. Naime, autori ističu značaj dizajna ulivnog sistema i sistema hranjenja za ispravnost odlivka kroz brojne simulacije u pomenutom softveru [1]. Jie i njegovi koautori (2014) koriste softverski paket Pro Cast u unapredjenju livenja legure aluminijuma i donose zaključak da povećanjem temperature liva i brzine livenja rešavaju problem poroznosti [2]. Dabade sa svojim saradnicima (2013) koristi softver za simulaciju procesa livenja MAGMAsoft, za analizu različitih nedostataka u procesu livenja, detektujući njihov uzrok kroz simulacije dimenzionalno i poziciono različitim varijanti sistema livenja i hranjenja [3]. Dučić i drugi (2017) prezentuju metodologiju optimizacije ulivnog sistema za livenje u pesku upotrebom genetskog algoritma. Predmet optimizacije je geometrija ulivnog sistema, konkretno, poprecni presek

ulivnika i visina livenja. Cilj optimizacije je minimizacija vremena livenja. Numericka simulacija je korisena kao verifikacija valjanosti optimizovane geometrije ulivnog sistema [4].

## 1.2 Kokilno livenje flotacijskih kugli

Kokilno livenje je jedan od postupaka izrade flotacijskih kugli od niskohromnog belog livenog gvožđa. Proizvedene flotacijske kugle se koriste za mlevenje rude bakra (kugla sa 2,5%Cr). Livene flotacijske kugle pored mlevenja rude svoju primenu nalaze u cementarama, rafinerijama, elektranama i kvarcnim postrojenjima. Flotacijske kugle koje se koriste u tehnologiji pripreme rude bakra su obično sledećeg hemijskog sastava [C=(3.2-3.8)%, Si=(0.4-0.8)%, Cr=(2.2-2.8)%, Mn=(0.4-0.8)%, Pmax=0.1%, Smax=0,1%]. Površina livene flotacijske kugle za mlevenje ne sme imati defekte od livenja kao što su: pukotine i očigledna poroznost, šupljine, hladne varove, loše spojeve, hrapavu površinu itd. Najčešće greške su da kugla nije pravilnog sferičnog oblika, prečnici variraju  $\pm 2\text{mm}$ , a u zoni ostatka ulivnog kanala uočava se breg visine 2-4mm. Jasno je izražen prečnik u zoni spoja kalupa. Događa se da površina kugle bude izrazito hrapava. U pogledu unutrašnjeg kvaliteta na isečku kugle nije dozvoljena poroznost, gasoviti mehuri, nehomogenost materijala kugle, rupe (šupljine) u odlivku koje pobuduju koncentraciju napona što dramatično skraćuje vek trajanja kugle, kao i drugi unutrašnji defekti.

## 1.3 Određivanje površinske i zapreminske tvrdoće flotacijske kugle

Zapreminska tvrdoća se izračunava prema formuli A.V.H. (Average Volumetric Hardness)[5]:

$$A.V.H. = 0.289A + 0.437B + 0.203C + 0.063D + 0.008E \quad (1)$$

gde je:

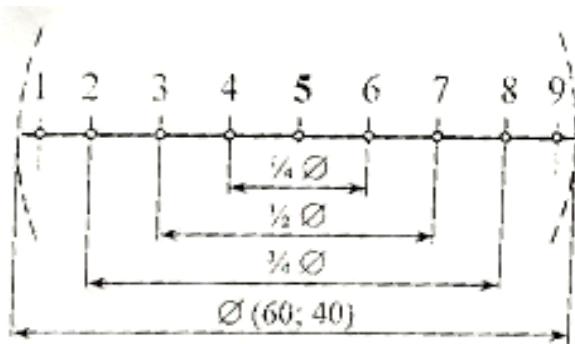
A - srednja vrednost izmerene površinske tvrdoće u tačkama 1 i 9 (Sl. 1),

B - srednja vrednost izmerene površinske tvrdoće u tačkama 2 i 8 (Sl. 1),

C - srednja vrednost izmerene površinske tvrdoće u tačkama 3 i 7 (Sl. 1),

D - srednja vrednost izmerene površinske tvrdoće u tačkama 4 i 6 (Sl. 1), i

E - vrednost izmerene površinske tvrdoće u tački 5 (Sl. 1).



Slika 1. Raspored mernih mesta

Za ispitivanja površinske tvrdoće, na osnovu definisanih ravni, izrađen je isečak po prečniku kugle u ravni spoja kalupa. Tom prilikom je uočena rupa (supljina) nepravilnog oblika 13x8(mm) i dubine 4-6(mm). Rupa je posledica stvaranja gasovitog mehura unutar kugle, nastalog usled nehomogenog liva i nepravilne brzine hladjenja.

Tabela 1. Prikaz rezultata površinske i zapreminske tvrdoće kugli livenih prethodnom verzijom alata

Merno mesto									
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	
56	54	55	54	<20	54	56	56	57	
Zapreminska tvrdoća: A.V.H.=55,19HRc									
Površinska tvrdoća: 56,5 HRc									

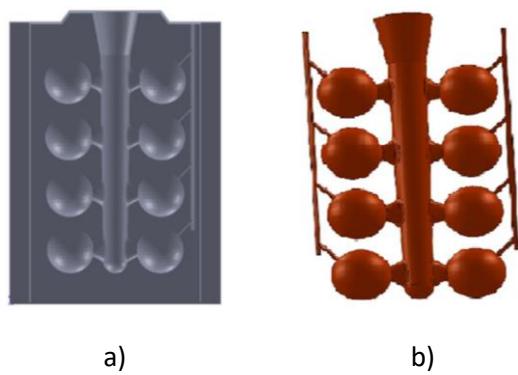
Na osnovu uvida u podatke koje po pitanju površinske i zapreminske tvrdoće ističu najveći svetski proizvodjači flotacijskih kugli za mlinove (SAD, Kanada, Kina...), granične vrednosti tvrdoće za kugle, prečnika od 25 do 150mm, su od 58 - 65HRc za površinsku tvrdoću i 56 - 64HRc za zapreminsku tvrdoću. Analizirajući rezultate srednje vrednosti površinske tvrdoće kugle livene kokilnim livenjem, korišćenjem alata na slici 2, ostvarena vrednost je 56.5HRc, što je manje od minimalne preporučene vrednosti od 58 HRc. Vrednost zapreminske tvrdoće (A.V.H.) je 55.19HRc, što je takođe manje od minimalne preporučene vrednosti

od 56HRc [6]. Sagledavajući strukturu rezultata uzorka uočava se da je na mernom mestu broj 5 vrednost izmerene tvrdoće <20HRc što je posledica mikro šupljine u odlivku (Sl. 6). Treba napomenuti da se šupljine javljaju na pojedinim odlivcima. Ukoliko se eliminišu šupljine u odlivku doći će do povecanja površinske i zapreminske tvrdoće a pretpostavka je da bi tada tvrdoća flotacijskih kugli bila u propisanim granicama, koje zahtevaju svetski proizvođači kugli za mlevenje rude.

## 2. GREŠKE U PROCESU LIVENJA FLOTACIJSKIH KUGLI

Pravilno i potpuno popunjavanje kalupa predstavlja važan zadatak kod procesa livenja, kojim se postiže visok kvalitet odlivka. Uloga dizajna ulivnog sistema i dizajna hranitelja u ostvarenju ovog cilja veoma je značajna. Nepravilan dizajn ulivnog sistema dovodi do brojnih nedostataka u procesu livenja, što za posledicu ima nizak kvalitet odlivka. Dakle, zadatak ulivnog sistema je da obezbedi glatko, ujednačeno i potpuno punjenje kalupa čistim, istopljenim metalom [7].

Za odvodjenje gasova iz odlivka, u postojećoj verziji alata, korišćeni su odvodnici gasova. Alat je izradjen na CNC glodalici.



**Slika 2.** a) Izgled polovine alata - 3D model i b) izgled odlivka sa ulivnim sistemom i odvodnikom

Generisanje G - koda izvedeno je softverskim paketom Solid CAM. Dimenzionisanje ulivnog sistema izvršeno je prema livačkim standardima.

Glatko punjenje kalupa eliminiše turbulentije, ujednačeno punjenje obezbeđuje kontinuirano punjenje u toku vremena, a

potpuno punjenje podrazumeva vođenje istopljenog metala do tankih i krajnjih delova kalupa. Tokom hladjenja odlivka dolazi do zapreminskog skupljanja metala, tj. smanjenja zapremine odlivka. Značaj hranitelja ogleda se u njihovoj funkciji da nadoknadjuju odlivku manjak tečnog metala usled zapreminskog skupljanja.

U uslovima eksploracije flotacijskih kugli moraju biti eliminisane mogućnosti pojave unutrašnjih šupljina (lunkera) i mikro poroznosti koje su veoma osetljive na koncentraciju naponu i često su uzročnik loma odnosno pucanja flotacijskih kugli. Pojava ovih grešaka posledica je neadekvatnog rešenja ulivnog sistema.

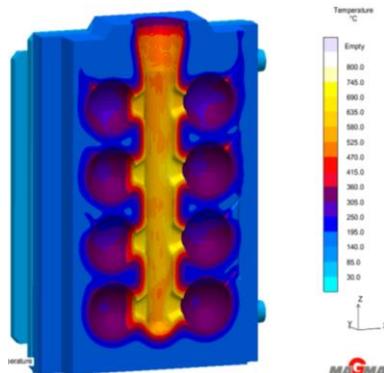
U ovakvim slučajevima veoma je značajno pre izrade alata, potrebnih za oblikovanje kalupa, izvršiti simulaciju procesa livenja odnosno izvršiti virtualni proces livenja na osnovu kojeg se može proveriti širok spektar tehničko-tehnoloških karakteristika odlivka. U nizu mogućih kriterijuma za ocenu kvaliteta odlivka, u ovom slučaju dati su rezultati simulacije po kriterijumima „Solidification“, „Fstime“, „Hotspot“ i „Porosity“ na osnovu kojih se doneti zaključci o unutrašnjim greškama u odlivku.

Rezultati simulacije prikazni su u 3D grafičkom okruženju, gde se rendgenskim pogledom u kalup vidi tok punjenja kalupne šupljine, brzina punjenja kalupa kao i temperaturne oblasti. Presecima kroz odlivke dobijen je front očvršćavanja i moguća mesta poroznosti usled očvršćavanja metala. Za ulaz u simulaciju procesa livenja primenom MAGMAsoft uradjen je 3D CAD model svih elemenata kalupne šupljine koju popunjava tečni metal, ulivni sistem, hranitelji i odvodnici gasova.

Pored prethodno navedenih 3D geometrijskih modela (STL standardnog grafičkog formata) za simulaciju potrebni su i parametri tehnologije livenja (temperatura livenja, materijal kalupa, vrsta premaza, materijal odlivka, vrsta livačkog lonca i sl.). Nakon procesiranja livenja date se preporuke i zaključci. Na osnovu njih, izvodjene su simulacije sa promenjenim parametrima dok

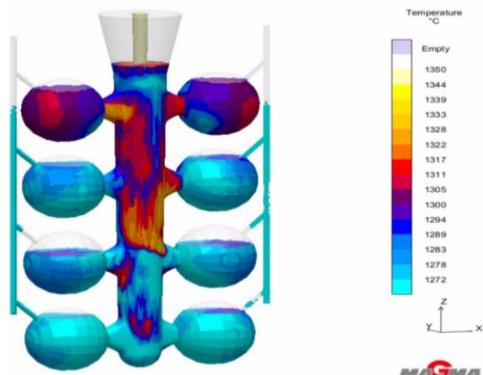
se nije došlo do konačnog rešenja. Takođe, pri pregledu rezultata simulacije u nastavku date su slike kritičnih i zanimljivih delova, potrebnih korisniku rezultata simulacije.

Alat za livenje flotacijske kugle (Sl. 3) pre ulivanja liva zagrejan je na temperaturu od minimum 120°C. Temperatura alata kreće se i do 700°C. Jasno se uočava (Sl. 3) da su najveće temperature alata na mestima gde se nalazi ulivni sistem pa iz tog razloga alat treba zaštiti termoizolacijskim premazima. Ukoliko se ne bi vršilo premazivanje došlo bi do značajnog oštećenja alata. Upotreboom termoizolacijskih premaza značajno se produžava vek alata.



Slika 3. Raspored temperatura u alatu nakon livenja

Kriterijum „Solidification“ daje mogućnost prikazivanja faza očvršćavanja sa izotermama temperturnih polja očvršćavanja, temperturnih gradijanata, tečnog testastog ili čvrstog stanja (Sl. 4) gde se vidi da odlivak očvršćava od tanjeg ka masivnije delu, dok ulivnik poslednji očvršćava čime je obezbeđeno potrebno hranjenje odlivka.

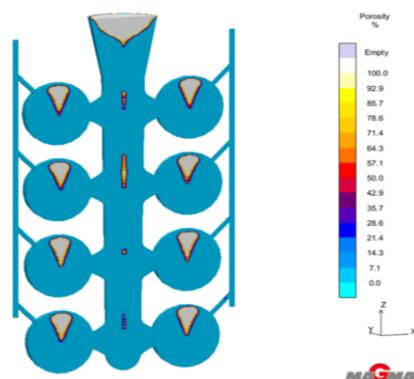


Slika 4. Izgled odlivka pri očvršćavanju

Prilikom hlađenja odlivka (Sl. 4) dolazi do zatvaranja kanala za odvođenje gasova čime oni gube svoju funkciju i gasovi ostaju

zarobljeni u kalupu što za posledicu ima pojavu poroznosti u odlivku. Uzrok nastanka gasovitih mehurova treba tražiti u nedovoljnom prečniku odvodnika gasova kao i vrtložnom strujanju liva što je posledica neadekvatno rešenog ulivnog sistema.

Pojava poroznosti na odlivcima (Sl. 5) direktno utiče na smanjenje tvrdoće odlivaka, samim tim i smanjenu otpornost na habanje što direktno utiče na povećanu potrošnju odlivaka tokom eksplotacije. Kriterijum „Porosity“ omogućava analizu poroznosti i šupljina u odlivku. Rezultati dobijeni primenom softverskog paketa MAGMAsoft potvrđeni su u praksi (Sl. 6). U poprečnom preseku kugle (Sl. 6), livene u alatu prema prethodnoj verziji, jasno se uočavaju gasoviti uključci koji se javljaju u obliku zarobljenog gasa kao „naduvani“ otvori sto za posledicu ima poroznost.



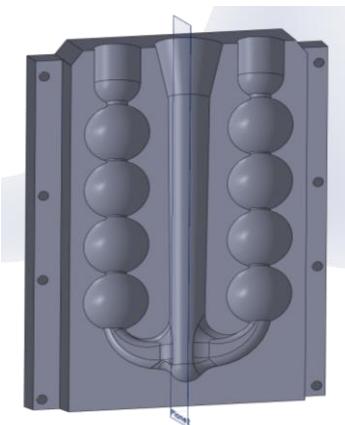
Slika 5. Kriterijum „Porosity“



Slika 6. Izgled odlivka - flotacione kugle nakon ispitivanja na udar

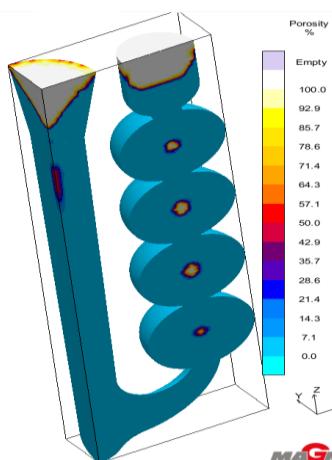
### 3. UNAPREĐENJE PROCESA LIVENJA FLOTACIJSKIH KUGLI

Novim rešenjem alata za livenje "odozdo" (Sl. 7) izbegava se vrtložno strujanje liva.



**Slika 7.** Izgled alata za livenje flotacionih kugli sa načinom livenja “odozdo”

Punjene alate vršeno je livenjem kugle kroz kuglu. Numeričkom simulacijom je potvrđeno da ne dolazi do stvaranja vazdušnih mehura, odnosno, ne dolazi do pojave poroznosti u gornjim zonama odlivka kao što je bio slučaj sa prethodnim verzijama alata.



**Slika 8.** Poroznost pri 100% očvrslog metalra

Nakon sprovedene simulacije procesa livenja u softverskog paketu MAGMAsoft, prema kriterijumu “Porosity” (Sl. 8) uočava se poroznost u centru kugle. Poroznost u centru kugle nema značajnijeg uticaja na habanje jer se kugla nikada ne pohaba do kraja (Sl. 9) a ista nije uočena pri livenju (Sl. 10) jer se očigledno radi o mikro poroznosti koju softver detektuje.



**Slika 9.** Nivo habanja flotacijske kugle

Radi potvrde sprovedenih istraživanja, u realnim uslovima, uz strogu kontrolu parametara tehnologije livenja (temperatura livenja, materijal kalupa, vrsta premaza, materijal odlivka, vrsta livačkog lonca...) korišćenih u simulaciji sprovedeno je livenje flotacijskih kugli prema novoj verziji alata.



**Slika 10.** Polovina kugle - livena prema novoj verziji alata

U poprečnom preseku flotacijske kugle, livenе sa novom verzijom alata, nije uočena poroznost (Sl. 10).

**Tabela 2.** Prikaz rezultata površinske i zapreminske tvrdoće kugli livenih prema novoj verziji alata

Merno mesto								
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
58	54	55	54	52	54	56	56	58
Zapreminska tvrdoća: A.V.H.=56,40HRc								
Površinska tvrdoća: 58 HRc								

Analizirajući rezultate, srednja vrednost površinske tvrdoće uzorka 2, kugli radjenih prema novoj verziji alata (merna mesta 1 i 9)  $58\text{HRc} = 58\text{HRc}$  i vrednost zapreminske tvrdoće  $\text{A.V.H.} = 56,4\text{HRc} > 56\text{HRc}$ , zaključuje se da je tvrdoća ove kugle jednaka preporučenim vrednosti što je i bio cilj unapredjenja.

#### 4. ZAKLJUČAK

Savremene livnice se ne mogu zamisliti bez primene numeričke simulacije u postupku razvoja proizvoda. U konkretnom slučaju, prilikom livenja flotacijskih kugli, tokom

eksploatacije uočene su šupljine u odlivcima koje su veoma osetljive na koncentraciju napona i često su uzročnik loma odnosno pucanja flotacionijskih kugli. Primenom virtuelne proizvodnje, simulacijom procesa livenja, utvrđeno je da pojavu ovih grešaka prouzrokuje neadekvatno rešenje ulivnog sistema. Unapredjenje procesa livenja flotacijskih kugli sprovedeno je primenom softverskog paketa MAGMAsoft, a na osnovu različitih kriterijuma (Porosity, Fstime, Hotspot, itd.) izведен je zaključak o poboljšanoj tehnologiji livenja flotacijskih kugli.

Konstrukcijom novog alata, livenje se vrši "odozdo". Alat je modifikovan tako da se eliminiše vrtložno strujanje liva [8]. Ulivanjem kugle kroz kuglu, simulacijom kao i livenjem u strogo kontrolisanim uslovima potvrđeno je da ne dolazi do stvaranja vazdušnih mehura u odlivku, samim tim i poroznosti u odlivku. Primenom numeričke simulacije unapredjen je proces livenja flotacijskih kugli i dostignute su potrebne preporučene vrednosti kako površinske tako i zapreminske tvrdoće.

## ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju IKL Industrijski kombinat livnica d.o.o. Guča i Istraživačko-razvojnom institutu Lola Beograd na pomoći oko realizacije procesa livenja, eksperimentalnih merenja u radu kao i na korišćenju softverskog paketa MAGMAsoft tokom procesa simulacije livenja.

## LITERATURA

- [1] S.L. Nimbalkar, R.S. Dalu: Design optimization of gating and feeding system through simulation technique for sand casting of wear plate, Perspectives in Science, Vol. 8, pp. 39-42, 2016.
- [2] Z. Jie, Z. Dongqi, W. Pengwei, W. Gang, L. Feng, D. Penglong: Numerical simulation research of investment casting for TiB<sub>2</sub>/A356 aluminum base composite, Rare Metal Materials and Engineering, Vol. 43, pp. 47-51, 2014.
- [3] U.A. Dabade, R.C. Bhedasgaonkar: Casting defect analysis using design of experiments (DoE) and computer aided casting simulation technique, Procedia CIRP, Vol. 7, pp. 616-621, 2013.
- [4] N. Dučić, Ž. Ćojbašić, S. Manasijević, R. Radiša, R. Slavković, I. Milićević, Optimization of the gating system for sand casting using genetic algorithm, International Journal of Metalcasting, Vol. 11, pp. 255–265, 2017.
- [5] About Handnes, available at: [www.zgffty.com/list-41-1.html](http://www.zgffty.com/list-41-1.html), accessed: 17.07.2018.
- [6] High hardness, available at: <http://energosteel.com/en/productsspecification-pr-grinding-balls-5-grouphardness/>, accessed: 17.07.2018.
- [7] S. Manasijević, Z. Pavlović-Aćimović, R. Radisa: Optimizacija parametara livenja klipova koriscenjem softverskog paketa MAGMAsoft, Metalurgija, Vol. 13, No 3, pp. 221-230, 2007.
- [8] I. Vasková, D. Fecko, L. Eperješi: Comparison of simulation programs MAGMAsoft and NOVAFLOW & SOLID in terms of results accuracy, Archives of Foundry Engineering, Vol.11, pp. 51-54,2011.

## THE APPLICATION OF NUMERICAL SIMULATION IN THE IMPROVEMENT OF THE FLOTATION BALLS CASTING PROCESS USED IN THE MINING INDUSTRY

**Abstract:** The paper presents the improvement of the flotation balls casting process based on the application of numerical simulation - modern software systems for optimization and control of casting process parameters. The concept includes virtual production, practical realization of the technological process by using an advanced version of casting tools and final check of casting parts quality - flotation balls. By applying the presented production methodology, the time, necessary for the development of new product and its production, is reduced compared to traditional testing methods through attempts and errors.

**Keywords:** flotation balls, casting process, numerical simulations, hardness.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## COMMUNICATION PROTOCOLS IN HOME AUTOMATION

Nataša KABLAR

Lola Institute, Belgrade, Serbia, natasa.kablar@li.rs

**Abstract:** Today, home automation systems attracts attention. Whether security cameras, door locking, door or window contacts security measures, actuating curtains on windows, lighting systems with possibility of dimming, temperature system with prevention from smoke or carbon monoxide, sound system for preventing noise, many people are interested to implement one or more of these home installation systems. They can be automated, and remotely controlled from smartphones, computers or joysticks. Furthermore many devices and home appliances can be connected in home networks, either individually or in system. For the home automation system it is important to choose communication network or protocol and corresponding devices that can work together on the chosen network. In this paper we explain X10, UPB, Infeon, ZigBee, Z-Wave, Bluetooth, Wi-Fi, and Thread communication protocols that are used and are developed for home automation. Many of these protocols is under the research and are the improvements. Home automation systems are under the development also, like AppleHome Kit, and Thread. This is still field attracted by enthusiasts that want to make home automation systems by themselves.

**Keywords:** communication protocols, ZigBee, Z-Wave, Thread, Wi-Fi, home automation systems, connected devices, communication network

### 1. COMMUNICATION PROTOCOLS

There exist large number of technological platforms for wireless communication, that serves for building home automation systems. Each of them has its own language of communication. Every language conversate with different interconnected devices and sends them instructions that has to perform.



Figure 1. Communication protocols

Choice of protocols for home automation can be difficult. It is desirable to have possibility of connections large number devices, and the best performance. Other factors that are of importance are power consumption, range and price.

Here we present some of communication protocols for home automation like X10, UPB, Insteon, Z-Wave, ZigBee, Bluetooth, WiFi, and Thread.

### 2. X10

X10 is protocol used for communication between electrical devices that are used for home automation. Generally, there are used electrical wires for home signalization and automation. Signals that can be used are radio

frequent since they can pass through electrical wire safely. Bursts of RF signals can be decoded by 0 or 1 in device in order to transfer digital data. Wireless protocol for radio transmission is also defined.

X10 is developed in 1975 by Pico Electronic of Glenrothes, in Scotland, in order to provide wireless control of home devices. That was the first developed technology for home automation. It is also used today although there exists more advanced alternatives with wider range. There exist millions of devices all around the world that use this technology, which is cheap for new components.



**Figure 2.** How X10 technology works

Across electrical wires there are sent digital data between home devices, for which it is possible for example to provide lighting and operating of home devices. These devices are encoded on 120 kHz and are transferred by bursts of RF signals on frequency 50-60 Hz of alternating current. One bit of data is transferred on every zero transmission.

Across the electric wires for home devices that enables lightening data are transferred between devices. These devices are encoded on 120 kHz which are transferred via bursts of RF signal while zero transmission is on 50-60 Hz of alternating current. One bit of data is transferred for every zero transition. Digital data is consisted of address and command that is sent from controller to device that is being controlled. Their status can be on or off, or current level of dimming or lightening, and temeprature or data reading from senosor. Devices are turned on in wall on place for lamp, television or other hjoe device. Embedded controllers are also available for wall switches or plafon installations for lightenning.

### 3. INSTEON

Insteon is introduced in 2005. Devices with Insteon protocol communicates accross the cables with power supply (wired connection) or wirelessly, so that message can be sent across many paths. Insteon protocol is compatible with X10 protocol, so that devices that use these two protocols can be interconnected. This reperesents effective and cheap, and also better used way of connecting devices. Insteon technology os easy for set up and for begginers in field of home automation.

There are almost 200 Insteon devices that are used for home automation. Insteon devices does not need to be part of network of home automation, but can be self started in home automation after installation. There is no limitations in network size that can be consisted from Insteon devices. There can be more than 400. Insteon network has double range so that repetitors prolong length and range of signals.

### 4. UPB

Other wired technology, called Universal Powerline Bus, is similar to X10 technology, which is coined with attention to change it, because of high reliability (less sensitivity to noise and widen range to 1 mile). UPB technology use existing cables for power supply, what reduce costs in order to send signals for control of device INSIDE AND OUTSIDE HOME. Howeover, UPB and X10 products are not compatible. Special controller is needed for their inter communication.

While UPB represent reliable system tht goes through power lines, it is difficult to combine it with the newest technologies like WiFi is, smart phones, etc. Platform has safety 90% but has relatively narrow range, so that performance is low. Also, it does no provide encryption what means that is not completely safe like wireless communication. Technical complexity of system makes it difficult for begginers. There are small number UPB compatible devices then in case of other technologies.

## 5. Z-WAVE

Z-Wave is one of the most popular wireless protocols for home automation that works on frequency of 908.42 MHz. Since much less frequency of 2.4 GHz is used for majority of wireless protocols, there is no interference or traffic jam. Advantage of Z-Wave protocol is interoperability. All devices that work communicate with each other through Z-Wave protocol, and are called Z-Wave devices. Communication is possible no matter of brand, version or type. Interoperation of devices is possible with those that are made one decade ago, and will be possible with those that will be made in future – this property is called back and forth compatibility, and is happening in Z-Wave ecosystem.

There are currently 1200 different Z-Wave compatible devices. There are known according to low power consumption, and are designed for easy set up and usage, and predicted for communication and automation of home devices, ie. For home automation. Z-Wave network as with Infeon protocol, makes that all devices are doubled for repeaters.

## 6. ZIGBEE

There are many similarities between Z-Wave and ZigBee technology. Like Z-Wave, ZigBee is exclusively dedicated for home automation. It is still not well solved interconnection between ZigBee devices, that have problems in communication especially if they are from different manufacturers. Also, there exists different versions of ZigBee devices that can not communicate.

Like Z-Wave, ZigBee is cheap technology of small consumption, in order for battery to work longer. It operates on communication 802.15.4. ZigBee also uses network structure that enables excellent range and high speeds of communications between ZigBee devices. Last version of ZigBee is 3.0 on which it is tried improvement of interoperability between devices and different versions.

## 7. BLUETOOTH

Bluetooth is in core of hundreds of products, from lighting to wireless zvučnika or keys. It has wider range of data from ZigBee or Z-Wave protocols, but smaller range from WiFi protocols.

Conversely, it has quite limiting range, and for devices that require constant connection, like motion sensors, safety systems, etc. it might not be ideal platform. However, it is announced that newest version of Bluetooth – Bluetooth Low Energy, BLE, will be able to use networks, in order to widen its range, in order not to be beaten from concurrent ZigBee or Z-Wave protocols. Bluetooth does not require central node, and is therefore suitable for use. It is predicted large usage of Bluetooth devices in home automation in next decade.

## 8. WI-FI

Known to have wide range, WiFi is used very much so that many manufacturers enthusiastically make devices for home automation based on this protocol. Large number of homes has already WiFi node or modem, so that WiFi devices can be added easily. However, in WiFi communication appears problem of interference and problems with range. If there are many devices in home, like television, games consoles, laptops, tablets, or else, then smart devices have to fight for access to range and node, so that response can be slower. Also, WiFi is consumer, so if device works on batteries, batteries have to be changed more often and exchange.

## 9. THREAD

Thread is new wireless protocol for devices in home automation. Thread Group is formed 2014. More than 250 devices can be connected on Thread network. It is the aim to manufacture devices that work on batteries, so that Thread technology is very limiting in usage of wired power supply.

Thread protocol use the same frequency and radio chips like ZogBee. It is intended to have better reliability and smaller consumption, self healing, and safe network that provides to people to interconnect more than 250 devices in home. Also, devices can be connected on Cloud for wide access. Devices that already exists are Net learning Thermostat and Nest Protect, and more products is expected next years.

## 10. HOME AUTOMATION

Today, there exists companies that produce smart devices for home automation. Examples are SmartThings, Wink, Lowe's Iris, iRule, Universal Devices, Vera, Insteon, and others. These devices is very easy to install, set up and use. Also, there are more accessible due time and available to people. Today, they are interesting to enthusiasts that makes projects for home automation by themself, and in future will be accessably to everybody. Of course, there exists difference between home automation system that makes enthusiasts and professionally maden and installed system of home automation.

First consideration when system of home automation is built is answer on question: What we want for our system to do? Why we need this system or Why we desire it?

- a) From safety reasons,
- b) Certain temperature in home is desired,
- c) Lightening in home – light deeming or lightening,
- d) Certain level of sound of radio or television.

Many safety systems overlap with smart home automation system. If safety of home is priority, it is needed to look for systems that are compatible with necessary sensors for safety, like contact sensors for doors or windows, motion detectors or noise detectors, water sensors, smoge or carbon monoxide detectors, or wireless safety cameras.

If controlling of temperature is priority, you should be aware to support home

thermostats that you intend to use, like Nest or Honeywell Lyric WiFi thermostats.

If you want that home automation system control the lamp, bulbs or lightening, then it is needed to support systems that offer variety of switches for lightening or light dimmers that are needed, and which have to be compatible with light source like CFL or LED.

If you want that system control level of noise in radio, music or television devices, then choices of systems are more limiting, and is better to use professionally installed system.

Majority of systems for home automation communicates via wireless networks. Sometimes there are based on characteristics of WiFi network that is installed in home, but majority of systems use protocols like Z-Wave, ZigBee or other. In development are systems for home automation called Apple Home Kit Thread.

While majority of gadgets are used in system of home automation including wireless safety cameras, motion detectors, smart bulbs or adapters for wall switches, presents simple devices plug and play type, other request little knowledge about soldering. During soldering there exists risks, even being small, and is needed to be careful, and call professional serviser. There exists solutions that use magnets like in case of light switch that communicates with Bluetooth communication.



Figure 3. Magnetic light switch with Bluetooth protocol

Large number of devices are available today for enthusiasts thanks to companies like Kickstarter and Indiegogo. There are many start up companies that are being developed for these types of devices, and it is needed to be careful how these devices works, does they have error, or are damaged. Better trust should be given to tested products.

One should be aware that communication systems nodes with wireless communication are used since they will be used for devices to be installed in home automation system. If you choose Insteon node, small number of devices are available. However, you can combine Z-Wave, ZigBee and other protocols.

It might not be possible to build whole home system automation, but only to use certain products. For example, rolling carpetners can be automated, or safety camera. If needs are small, You can use only individual components that can work in individual applications on smart phone. If it is needed to build more integrated system , then it is needed to build central node for home automation and centralized application for control of all devices.

WiFi network can serve for home automation system, however problem with this network is to turn on many devices that compete for node access and signal transfer is slower, so it may be stuck. For that reason, wireless technologies are developed specially for home automation system that work on lower frequencies like 900 MHz, for difference to WiFi network that work on 2.4 GHz.

In developed countries there exists system providers for home automation systems that can be chosen and payed monthly for monitoring. In that case it should be considers what provider have to offer prior choice of safety system for home automation system.

For building home automation system it is needed to build on sensors, light switches, motorized carpetners, and safety cameras. If you can not to that by yourself, help of servicer is needed.

## 11. CONCLUSION

In this paper we have described basic communication protocols used for devices or machines. Namely, they are: *X10, UPB, Insteon, Z-Wave, ZigBee, Bluetooth, WiFi, and Thread*. On concrete example of Home automation we have explained systems that can be used – safety, temperature, lighting, sound, and communication protocols used.

## REFERENCES

- [1] X10,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/X10\\_\(industry\\_standard\)](https://en.wikipedia.org/wiki/X10_(industry_standard))
- [2] UPB,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Universal\\_powerline\\_bus](https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_powerline_bus)
- [3] Insteon,  
<http://cache.insteon.com/pdf/insteondetails.pdf>
- [4] Z-Wave,  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Z-Wave>  
ZigBee,  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Zigbee>
- [5] Bluetooth,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/List\\_of\\_Bluetooth\\_protocols](https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Bluetooth_protocols)
- [6] Wi-Fi,  
<https://en.wikipedia.org/wiki/Wi-Fi>
- [7] Thread,  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Thread\\_%28network\\_protocol%29](https://en.wikipedia.org/wiki/Thread_%28network_protocol%29)



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## COMMUNICATION PROTOCOLS USED IN ENGINEERING

Natasa KABLAR

Lola Institute, Serbia, natasa.kablar@li.rs

**Abstract:** Communications in technique are today unavoidable way of data transfer between devices, machines, and computers. With development and advancement of wireless communication large number of interconnected computers and devices have been used. We are in front of fourth industrial revolution that will further connect machines and devices. Therefore, in this paper we give short definition of communication, and their classification on analog and digital, and wired or wireless. Further we give short description of different kinds of wireless communications: satellite communication, infrared communication, radio communication, microwave communication, Bluetooth or Wi-Fi communication, fiber optical communication, and laser communication. We emphasize advances and disadvantages of wireless communications. Further, applications of wireless communications are given. Our frame of research is on communication, control and actuation of devices used in mechanical and electrical engineering. On example of wireless control of brushless direct current motor (BLDC motor) is shown application of Wi-Fi communication for control. Further examples of applications will be of interest in future.

**Keywords:** communications, wired communication, wireless communication, satellite communication, infrared communication, bluetooth, microwave communication, wireless control of BLDC motor

### 1. INTRODUCTION

Communications today are unavoidable way of data transfer between devices, machines and computers. With development of wireless communications number of connected computers or devices is increased. We are in front of fourth industrial revolution that will connect many devices or machines. For interconnected communication of devices, machines or computers there are needed to develop corresponding communication protocols in order to realize communication. Here we consider basic and advanced ways of communications that are used for majority of devices.

Technical communication is realized through communication devices,

communication media, and communication language, what represents basic elements in process of communication. Communication devices are devices that transfer data or information from one location to other. Communication media is way, technology or channel that serves for sending and receiving data and information. Difference in communication devices and communication media is in different role that every plays in process of data transfer and communication. Without communication media, device will not be possible to function and creates connections toward other devices, machines or computers.

Examples of communication devices in computer systems are network card, modem, point of access, WiFi network card, Bluetooth

devices, infrared devices, smartphones, WiFi router, etc.

Communication device is engineering device that can transfer analog and digital signals through wire for wired communication, or wirelessly. Communication device need to have location and address (IP, DSN, sub-net mask), driver for starting communication, and provided wired or wireless communication. Computer is able to work without communication devices, but if it is needed to establish communication with other devices or computers it is needed to have communication device, like communication network card. It is also needed to have communication media, like WiFi and language for communication, in order to establish communication process, and read data – what is main communication task.

Examples of communication media are microwave transmission, transmission via optical fibers, audio signals, or wires. Mobile phone represents communication device across which communication media converts words into digital signals inside mobile phone and transfer them in form of 0 or 1. Message is transferred by signal wave.

## 2. WHAT IS TECHNICAL COMMUNICATION?

Any system that enables communication is consisted of three basic parts: 1. *sender*, 2. *channel for transfer*, and 3. *receiver*.



**Figure 1.** Three parts of communicating system: sender, communication channel, and receiver

Sender can be transmitting station from where signal is sent. Receiver can be receiving unit where signal is received. Channel for transmitting is medium across which signal is sent in order to come to target. Transmitting of any information via waves, sounds, or other is called signaling. Signal can be source of energy that transfers information. Signal connects sender and receiver in order to realize

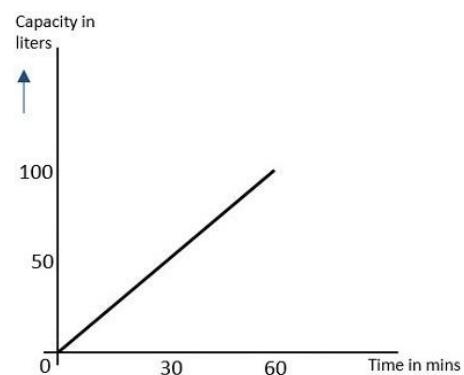
transmission of message or communication. Electrical input or electromagnetic wave transfer certain distance in order to send message, and can be named as signal in communication systems.

According to their characteristics, signals can be quantified as analog or digital. Their further classification is on *periodic* and *aperiodic*.

## 3. ANALOG VS DIGITAL COMMUNICATION

### 3.1 Analog signal

**Analog signal** is continual time varying signal which values are changed due time. Change of value of signals in certain moment is manifested on signal representation on whole time interval. Example: If we consider tanker that is filled in with 100 liters of volume per hour in certain point of time at 6-7 am, we will notice that amount of filling varies with time. That means that after 15 minutes, in 6.15 am – one quarter of tanker is filled in, while in 6.45 am – three quarters of tanker is filled in. This is graphically shown on Figure 2 with linear signal. On graphic is shown analog signal which values increase with time as tanker is filled. Communication that is based on analog signals and their values is called *analog communication*.



**Figure 2.** Analog signal, example

### 3.2 Digital signal

Signal that is non continual by nature and has different discrete values in different points of time is called **discrete signal**. These signals have values that hold for discrete points of

time, do not depend from values from previous points of times, and are derived in certain point of time.

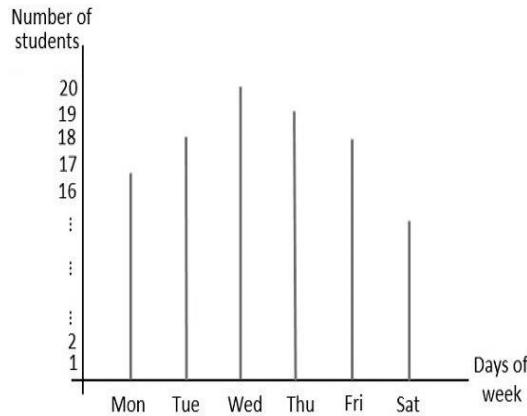


Figure 3. Discrete signal, example

**Example:** Let us consider classroom with 20 students. If we follow number of students in class every day in week, we will get graphic with discrete values where for every day is given value that represent number of students that come to class. Graphic is shown in Figure 3. Values of discrete signal are separate and have distinct values for each day.

Signals that have value only 0 or 1, are called discrete signals, with two discrete signals, but with two possible binary values. These signals are called binary. Communication that is based on discrete signals and their values is called *digital communication*.

### 3.3 Periodic vs. Aperiodic signal

Any analog or discrete signal that repeats with the same pattern in time is called **periodic signal**. These patterns are easy to assume and calculate.

**Example:** If we consider machinery in industry, processes that happening one by one represents continual procedures. For example, supply and grading of raw material as one process, processing of material in series as second process, packing the product in boxes as third process, one after other, etc., follows certain pattern where procedure is repeated on the same manner. This process either analog or digital can be graphically represented as periodic signal. Graphic is shown in Figure 4.

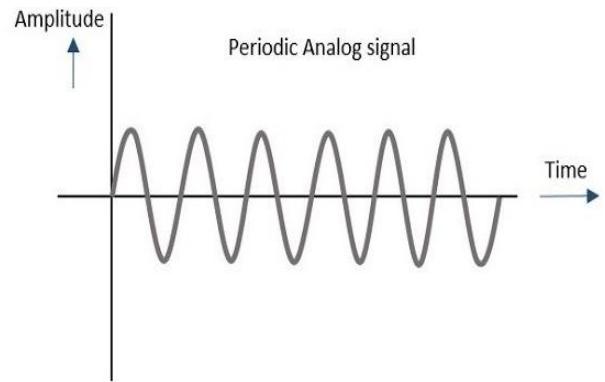


Figure 4. Periodic signal, example

Any analog or digital signal which does not repeat with the same pattern in time is called **aperiodic signal**. Signal has the pattern, but it is not the same and is not repeating on the same manner. Although, it is not easy to assume and calculate aperiodic signal, given on Figure 6.

**Example:** Daily routine of person is consisted of different types of work that are happening in different times for different tasks. Time interval or tasks can not be repeated always and at the same time. For example, product will not be produced from start to end time, and with the same time interval, with the same timing period of processes. This process either analog or digital can be graphically represented with aperiodic signal, and is given on Figure 7. Generally, signals that are used in communication systems are analog by nature and are transferred via analog way, or are converted in digital signal and then transferred what depends on equipment and requests.

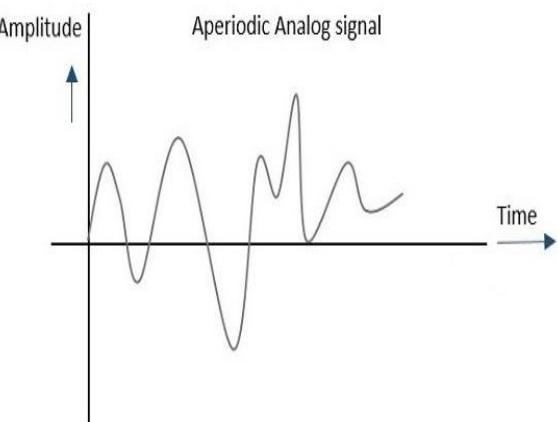
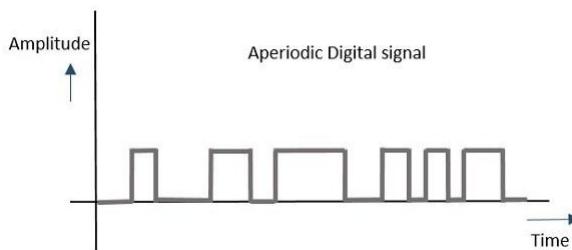


Figure 5. Aperiodic signal, example



**Figure 6.** Aperiodic digital signal, example

#### 4. EXAMPLES OF COMMUNICATION DEVICES

Communication devices can be Bluetooth devices that use Bluetooth technology, like mobile phones, computers, and personal digital assistants, etc. Further, infrared devices use infrared technologies for data transfer like television remote controller, computer mouse and keyboard. Further, WiFi devices that use WiFi technologies for communication, like modem, network card, sound speakers, tablets, laptops, computers, cameras, etc. Other communication technologies use other and these kinds of devices.

#### 5. WIRED COMMUNICATION

Wired communication represents data transfer by communication method using wire. Examples are telephone lines, cable television, internet point of access, or fiber optic communication. Electromagnetic waves are also considered as wired communication and are used for application of high power [23]. Generally, wired communication is considered as unstable comparing to other types of communication. Strength and velocity of transfer is superior on other solutions like satellite or microwave communication. These characteristics have enabled ordinary usage of wired communication, comparing to wireless although they are advanced. Wired communication is communication via physical media that is realized via cables. Cables can be from copper wires, or from 2-3 twisted wires, or from fiber optical cables. Wired communication is used for transfer of different forms of electric signals from one location to another.

**Example:** LAN (eng. Local Area Network) is local network of interconnected computers via Ethernet cables. Data are transferred via cables from network card of one computer to network card of another computer. For computer network are used routers for interconnecting different numbers of computers [24].

#### 6. WIRELESS COMMUNICATION

Wireless communication is type of communication that is performed wirelessly. It assumes procedures and methods of connecting and communication between two or more devices by using wireless signal. Corresponding wireless technologies are used. Wireless communication is generally performed by using electromagnetic signals that are transferred by using communication devices, air, physical environment and atmosphere. Transmitting device has abilities to send signals. Communication between two devices is enabled on different distances creating communication bridge between sender and receiver. Wireless communication has different forms, technologies and ways of transmission including satellite communication, mobile communication, wireless network communication, infrared communication, bluetooth communication, etc. Although, these kinds of communication have different architectures of realization and transfer, neither have wires or physical connections between devices for initialization and performing communication [13].

Wired communication is safer than wireless communication that needs to have different levels of encryption from security reasons. Wireless communication is unlimited, comparing to physical communication via wires [25].

There also exists division on internal and external wireless communications. Internal wireless communications are wireless LAN and WiFi, Bluetooth, IrDA, ZigBee, Zwave, etc. External wireless communications are GSM, CDMA; WiMAX, LTE, Satellite, etc.

## 6.1 Satellite Communication

Satellite communication is type of wireless communication technologies, which is widely present in world and enables to users to be interconnected from any place on Earth. Satellite signal is beam of modulated microwaves. When signals come near satellite station they are amplified and returned to receiver antenna which is placed on Earth station.

Satellite communication has two segments – segment on space and segment on Earth. Segment on Earth have receiver for fixed or mobile transmission, receiver, and additional equipment. Segment in space is satellite itself.

*In satellite communication data be transferred to satellite that orbits on 22300 miles above the Earth. Stations on Earth sends and receive signals of data on frequency that is in range 11-14 GHz, with rate of transmission 1-10 Mbps. In Earth method are used two microwave towers with clear line of transmission without obstacles. When there is need privacy I data transmission it is often used. Frequency range of Earth system is 4-6 Ghz with with rate of transmission 1-10Mbs.*



Figure 7. Satellite wireless communication

## 6.2 Infrared Communication

Infrared communication is method of data transferring without use of wires. Ordinary example of device use infrared communication between computer and mouse or keyboard.

Infrared communication enables exchange of information through devices and systems via infrared radiation. Infrared electromagnetic energy is of different wavelengths that are longer then of red light. It is used for

protection, television remote control, and communication of short range. In electromagnetic spectra IR radiation is between microwaves and visible light. It can be therefore used as source of communication.

For successful infrared communication it is requested to have photo LED transmitter, and photo LED diodes as receptor. LED transmitter transmit IR signal in form of invisible light that is received in photo receptor. On that way information is transferred. Source and target of sender and receiver signals can be mobile phone, television, safety systems, laptops, and other devices that supports wireless IR communication. Example of remote control is given in Figure 9.



Figure 8. Infrared wireless communication



Figure 9. Remote control

## 6.3 Radio Communication

Radio communication is data transfer via radio waves as method of signal transfer wirelessly. First wireless technology is open radio communication which is widely used today no meter of other communication technologies development. Radio with many channels enables transfer of voice on short distances.

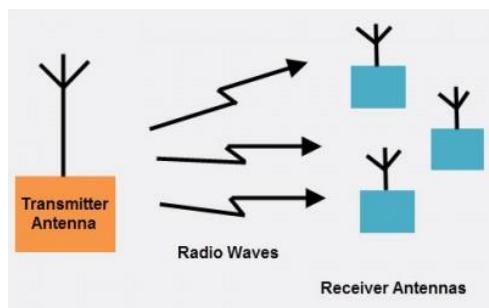
Radio device use transmitter that transfers data in form of radio waves to antenna that receives data. Transfer of radio signals can be

via cable FM, network or satellite. Transfer is used to transmit information on long distances of 2 Mb/sec (AM/FM radio).

Radio waves are electromagnetic signals that are transferred by antenna. These waves have completely different frequency segments, while audio signals can be obtained by changing frequency system.

Examples of devices for radio communication are radio facsimile, radio telegraph, radio telephone, and teletyping machine.

Radio communication requires the use of both transmitting and receiving equipment. The transmitting equipment, which includes a radio transmitter and a transmitting antenna, is installed at the point from which messages are transmitted. The receiving equipment, which includes a radio receiver and a receiving antenna, is installed at the point at which messages are received. Radion transmission is shown in Figure 10.



**Figure 10.** Radio transmission

In the transmitter, sinusoidal oscillations are generated at a carrier frequency belonging to some range of radio frequencies. These oscillations are modulated in accordance with the information being transmitted. The modulated radio-frequency oscillations constitute the radio signal. The signal passes from the transmitter to the transmitting antenna, which excites correspondingly modulated electromagnetic waves in the surrounding space.

The radio waves travel to the receiving antenna, in which they excite electrical oscillations. These oscillations are passed on to the receiver. The signal thus received is very weak, since only a very small fraction of the radiated energy reaches the receiving antenna.

For this reason, in the receiver the signal first is fed into an amplifier and is then demodulated, or detected. As a result, there is obtained a signal analogous to the signal used to modulate the carrier-frequency oscillations in the transmitter. Usually after an additional amplification, the signal is converted by an appropriate reproduction device into a message equivalent to the original message.

At the reception point electromagnetic oscillations from extraneous sources of radiation may be superposed on the signal. These superposed oscillations can interfere with the correct reproduction of a message and are therefore called radio interference.

#### 6.4 Microwave Communication

Microwave communication is effective way of communication which is mainly used for radio waves. Wavelengths of radio waves can be measured in centimeters.

Main disadvantage of microwave communication is atmospheric influence, especially rainfalls.

We will note here that microwaves and radio waves are very important for communication and data transfer. Microwave data transmission is usual way of data transmission decades ago.

#### 6.5 Wi-Fi Communication

Wi-Fi is wireless communication of low power, that is used in different electronic devices like smart phones laptops, etc. There is router that enables communication of many devices, Users have to be physically close to router. Wi-Fi is usual way of communication of network applications. Networks has to be protected with passwords for safety reasons, in order not to be accessed by others.

Wi-Fi is wireless protocol that enables devices to communicate without internet cables. Name is used for industrial standard that represents type of wireless network local internet which is based on 802.11 IEEE network standard [26]. Wi-Fi communication is shown in Figure 11.



**Figure 11.** Wi-Fi Communication

Wi-Fi is today the most popular way of transmitting data wirelessly within fixed location. It represents symbol that is formed by international WiFi alliance of companies with business in LAN technologies and products. Correct name is Wi-Fi or wireless communication, Figure 12.

The simplest example for understanding of Wi-Fi communication is home automation or business office, where it is needed to provide device that will transfer data via wireless signal, like router, telephone, or computer. Signals that are sent to router and can be audio (for telephone, music player), video (for TV, video player), or digital, and can be transferred by waves. In computer or electronic device data are decoded in digital signals that transfer data. Electrical current in devices enables operating of electronic circuits and integrated electronic modules which by using adapters use lower current and voltage for operating, in order to convert, process, use or memorize digital data. Way of data storage can be magnetic or optical, for example.

Router sends data to internet connection which comes from outside in network of internet provider, and delivers this service to nearby devices that can receive wireless signal. Second way of usage is Wi-Fi hotspot in order that telephone or computer devices share the same wireless or wired internet connections, similarly to work of router. No matter how Wi-Fi is used or what is source of connection, result is the same: wireless signal enables other devices to be connected to main transmitter because of communication like data transmission or voice messages. Wi-Fi represents only internet access to wireless

device that is able to wirelessly receive and send data, like are telephone, tablet, or laptop. Majority of modern devices supports Wi-Fi connection in order to access to internet and share the contents. Wi-Fi connection have to be installed prior usage in home or on other place.



**Figure 12.** Wireless communication

## 6.6 Mobile Communication

Advantage of mobile network is witnessed by generations. Many users communicate through one frequency by using phone. Mobile phones are devices that use wireless communication. Some mobile phones use satellite communication, as GPS devices. This is separate field, and here we will emphasize possibility of smartphone usage for wireless control, by using integrated circuits, boards, modules, etc.

## 6.7 Bluetooth Communication

Bluetooth is specification or standard in computer and telecommunication industries that enables to devices like mobile phones, computers, or personal digital assistants (like smart watch, smart key, etc.) communicate with each other. Symbol Bluetooth is consisted from two and half triangles turned to right, and is given on Figure 13. It can be noticed two letters X and B, that have roots to name of Harald Bluetooth, Denmark viking king that ruled 958-970 and helped to unite Denmark and Norway. It is named after Danish king, since Bluetooth technology is designed as universal wireless technology that can be used from everybody.



**Figure 13.** Symbol for Bluetooth

Bluetooth is radio frequent technology that operates on wavelengths of 2.4 GHz, and have effective range of 10 meters, which depend of class of power, and can transfer 1 Mbps data, with flow of 721 Kbps.



**Figure 14.** Bluetooth communication

Good example how Bluetooth can be used is possibility of connecting computers with mobile phone without wires. Other example is Bluetooth communication between Wi-Fi devices for data storage USB and computer. Examples are Bluetooth headphones that can wirelessly communicate with computer, bluetooth mouse and keyboard that communicate with computer, Bluetooth circuits that enables calls from mobile phones without hands, Bluetooth wrists that enables receiving and sending fitness data (number of calories, number of kilometers, sleep rhythm, etc.), Bluetooth key for door. Main function of Bluetooth technology is to enable connection of different electronic devices wirelessly because of data transfer. Mobile phones can be connected via this technology with wireless headphones, computer with wireless mouse, and keyboard. By using Bluetooth device information can be transferred from one computer to another. This technology has different functions that are often used. Examples are shown in Figure 14.

## 6.8 Fiber Optical Communication

Fiber optical communication is method for information transfer from one location to other, by sending pulses of light via optical fibers. Light forms electromagnetic waves that is modulated and carry information. Optical fibers are more desirable from electrical cables in cases when wide range is requested, or data transfer on longer distances, or resistance on electromagnetic interference [26].

Optical fibers are used from telecommunication companies for transfer of phone signals, for internet communication, for cable signals. It is achieved velocity of 100 petabytes in km per second.

Optical fibers are developed first in 1970, and are revolutionized telecommunication industry and played the main role in information revolution. Because of advantages that have in front of data transfer by electrical way, optical fibers represents key elements in networks in developed world.



**Figure 15.** Network card for fiber communication

The basic steps in communication by using optical fibers are:

1. Creating optical signals that carries transmitters, usually in form of electric signal,
2. Transfer of signals along optical fibers, by providing to signal not to be too much disturbed or weak,
3. Receiving optical signal,
4. Conversion into electrical signal.

Modern system for communication via optical fibers generally includes optical transmitter that converts electrical signal in optical in order to be sent through optical fiber, cable that contain more optical fibers that are placed below surface or buildings, more kinds of signal amplifiers, and optical

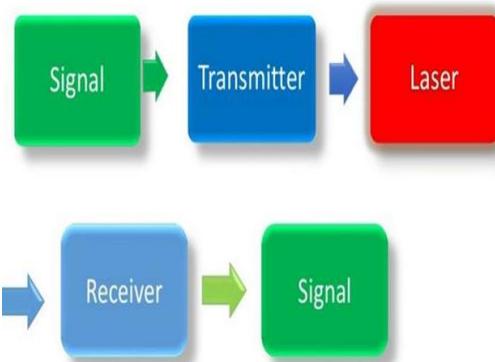
receiver which converts optical signal in electrical. Information are typically transferred as digital information which is generated from computer, telephone line, or cable television.

Optical fibers are used from many telecommunication companies in order to transfer telephone signals, for internet communication and cable television signals. Due to much lower attenuation and interference, optical cables have advantages comparing to existing copper cables for transfer on large distances, or for applications with high requests. However, development of infrastructure inside cities is relatively hard and requests time, and fiber optical systems are complex and expansive in order to be installed and operate. Due to these difficulties, systems of optical communication are preliminary installed for applications where long distance is needed, and where can be used their capacity of transmission, no meter of costs. Price of optical fiber communication fell down from 2000.

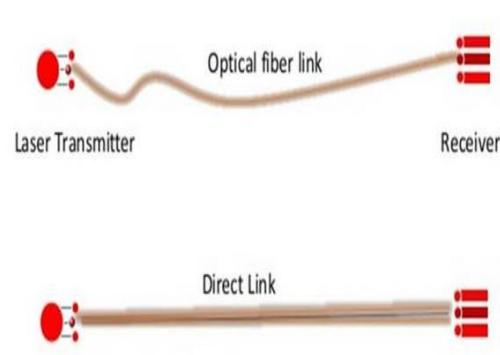
Optical amplifying systems are commercially available from 1990. From that period large number of lines for optical communication is installed between cities and under the ocean. Until 202 intercontinental network of 250,000 km of undersea communication cables with capacity of 2,56 Tb/s is finished. It is dedicated to specific information, and reports about investments in telecommunications indicates that capacity of networks is considerably increased from 2004, so that they have other usages. Example is given in Figure 15.

## 6.9 Laser Communication

Laser communication is wireless communication through atmosphere. It is used for laser beams in order to carry information between two places. There are no need for cables, and is used wireless technology. Communication is realized on large distances, for example between planets. Laser communication terminals are capable to send and receive laser beams [27]. Graphic is shown in Figure 16 and 17.



**Figure 16.** Transfer of laser beam



**Figure 17.** Laser transmitter and receiver

Transmitter have processing unit for signal processing and laser. Laser diode is used for creating laser signal. Laser diode has photodiode that sense laser signal and feedback in order to provide consistent signal output. It is shown in Figure 18.

Receiver has telescope (antenna), processor for signal processing and detector. It is shown in Figure 19.



**Figure 18.** Laser transmitter

Fiber optical cables are not capable to be placed on satellites, combat zones, can be physically and economically not affordable, and for emergencies.



Figure 19. Receiver

Radio frequent waves have limitations in permeability range, while range of laser communication is one hundred times greater. In laser communication it is requested lower power supply since laser signal is directed to target. Also, in laser communication transfer losses are lower than in case of radio frequent communication. In laser communication antenna is smaller. Due to small divergence of laser beam, laser communication is safer than radio frequent communication.

Current applications are:

1. Laser defence systems are installed all over the world and can detect enemy ships and missiles and to disable them.
2. Laser communication system on airplane paths can send signals on central station headquarters for officers to know when the airplane landed.
3. Laser communication is used for mass communication, that includes telephone and television communication.
4. NASA have created many different technologies that includes laser communication, as well. One of last inventions is successful exchange of laser pulses between earth observatory and space shuttle Messenger, where new record in laser transmission in space is achieved.

Importance of laser use in space for communication purposes is in incapability of signal capture when it is emitted by laser light what is case if it is transferred via optical fibers.

Instead of usage of one color for information transfer, satellite could have many different lasers where each of them is able to transfer information with different color. Methods for increasing different colors would increase amount of transferred information, and this method of information transfer with different wavelengths multiplexing information.

Disadvantages of laser transfer communication is that laser link can be absorbed in atmosphere, since it is disturbed by fog, rainfall, and smog, and physical obstacles as well.

Laser communication in two directions was second aim of NASA in order to prevent data transfer with velocities 10-1000 times higher than traditional radio waves. While radio transmission travels with speed of light, laser can transfer more data. It is similar to transition from dial up internet connection to wide area network (broadband).

## 7. ADVANTAGES AND DISADVANTAGES OF WIRELESS COMMUNICATION

**Advances of wireless communication are:**

1. Any data or information can be transferred faster and with high velocity,
2. Maintaining and installation is less costly for these networks,
3. Internet can be accessed from everywhere,
4. It is very useful for work.

**Disadvantages of wireless communication:**

1. Unauthorized persons can access data easily if they are transferred through air,
2. It is very important to provide wireless networks such that information can not be misused from unauthorized users.

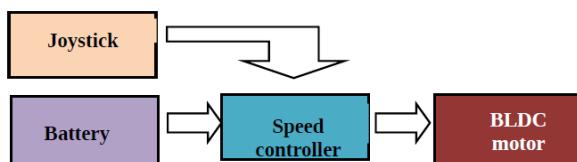
## 8. APPLICATIONS OF WIRELESS COMMUNICATION

Applications of wireless communication includes safety systems, remote control of television, Wi-Fi, mobile phones, power

transmission wirelessly, devices for computer interface (wireless mouse and keyboard) and different projects that works by using different wireless technologies. Wireless communication protocols are mainly included in different wireless technologies like are Bluetooth, GPS, GSM; RFID and Zigbee, like control of induction motor via Android smartphone, home automation based on Arduino board, robot control by using smartphones, control of home appliances and else.

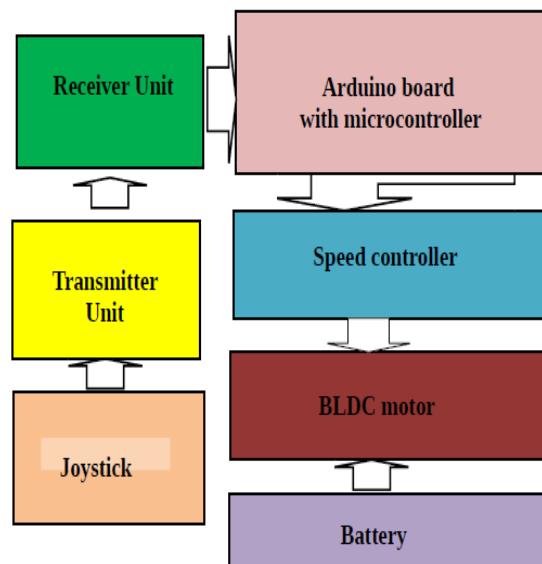
## 9. WIRELESS CONTROL OF BLDC MOTOR VIA WI-FI MODULE

Today it is a choice of many electricians to use brushless direct current motor, or BLDC motor for different projects. BLDC motor can be controlled wirelessly or by using wires. Wired connection is consisted from joystick, battery, speed controller and BLDC motor. Schema is given in Figure 20.



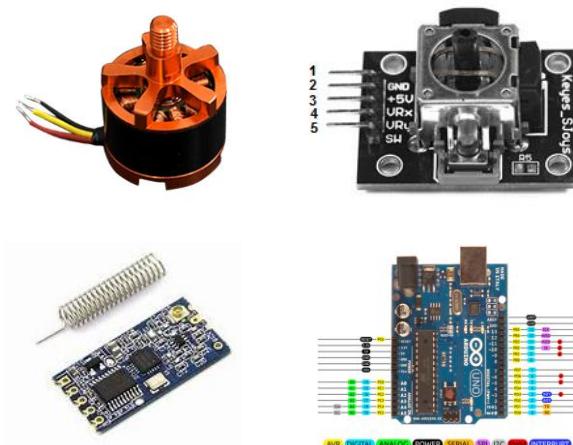
**Figure 20.** Block diagram of wired BLDC motor control

Wireless control of BLDC motor can be realized by using wireless communication protocol HC-12 and Arduino board with microcontroller (Arduino pro mini). Electronic components are joystick with transmitter, wireless communication module HC-05, receiver, Arduino board with microcontroller (for which is also need to write program), speed controller and BLDC motor. Joystick or program in controller is first used in order to calibrate electronic speed controller and BLDC motor. For communication it is used wireless HC-12 module. Wireless communication can be also realized via Bluetooth module HC-05, or via radio signals. For communication it is needed to provide transmitter and receiver. Schema is given in Figure 21.



**Figure 21.** Block diagram of wireless communication

On Figure 22 there are shown electronic components that are used in this project BLDC motor, two-axis joystick, wireless module HC-12, and Arduino board with microcontroller.



**Figure 22.** BLDC motor, two-axis joystick, wireless module HC-12, Arduino board with microcontroller

## 10. CONCLUSION

In this paper we have presented basics of technical communication with main elements in signal transfer. We have emphasized difference between analogue and digital communication, wired and wireless. Short description of satellite, radio and infrared communication, Bluetooth, Wi-Fi, fibre optic

and laser communication is given. We gave examples of applications of wireless communication with concrete example of wired and wireless control of BLDC motor. It is the aim to explain different communication protocols that are used in engineering. In future work we will consider further communications protocols that are used or being developed for communication between devices, machines, and computers. This is also in focus of fourth industrial revolution.

## REFERENCES

- [1] Technical Communication, Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Technical\\_communication](https://en.wikipedia.org/wiki/Technical_communication)
- [2] Difference between Communication devices and Communication media, <https://www.reference.com/business-finance/difference-between-communication-devices-communication-media-b40fb589e73717bf#>
- [3] Communication Device, <https://www.computerhope.com/jargon/c/communication-devices.htm>
- [4] Bluetooth, <https://www.computerhope.com/jargon/b/bluetooth.htm>
- [5] Infrared, <https://www.computerhope.com/jargon/i/infrared.htm>
- [6] Radio frequency, <https://www.computerhope.com/jargon/r/rf.htm>
- [7] Modem, <https://www.computerhope.com/jargon/m/modem.htm>
- [8] Definition of Communication Device, <https://www.techwalla.com/articles/definition-of-communication-devices>
- [9] Radio Communication, <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Radio+Communication>
- [10] What is radio Wave?, <https://www.taitradioacademy.com/topic/what-is-a-radio-wave-1/>
- [11] Wireless Communication, <https://www.techopedia.com/definition/10062/wireless-communications>
- [12] Wireless, <https://en.wikipedia.org/wiki/Wireless>
- [13] Types of Wireless Communication Applications, <https://www.elprocus.com/types-of-wireless-communication-applications/>
- [14] Analog Communication, <http://www.timbercon.com/Analog-Communication.shtml>
- [15] Digital Communication, <http://www.timbercon.com/Digital-Communication.shtml>
- [16] Digital, <http://www.timbercon.com/Digital.shtml>
- [17] Analog, <http://www.timbercon.com/Analog.shtml>
- [18] Analog signal, <http://www.timbercon.com/ANALOG-SIGNAL.shtml>
- [19] Introduction to Analog Communication, [https://www.tutorialspoint.com/analog\\_communication/analog\\_communication\\_introduction.htm](https://www.tutorialspoint.com/analog_communication/analog_communication_introduction.htm)
- [20] Internet address, <https://www.mmumullana.org/downloads/files/n5474480f52906.pdf>
- [21] Wired Communication, [https://en.wikipedia.org/wiki/Wired\\_communication](https://en.wikipedia.org/wiki/Wired_communication)
- [22] Wired network vs. wireless network, <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/wired-network-vs-wireless-network.html>
- [23] Main differences between wired and wireless communications, <https://www.quora.com/What-are-the-main-differences-between-wired-and-wireless-communications>
- [24] Internet address, [https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber-optic\\_communication](https://en.wikipedia.org/wiki/Fiber-optic_communication)
- [25] Laser Communication, <http://www.authorstream.com/Presentation/srikrishnamothy-2976788-laser-application-communication/>
- [26] What is Wi-Fi?, <https://www.lifewire.com/what-is-wi-fi-2377430>



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## WIRELESS CONTROL OF BLDC MOTOR VIA ARDUINO BOARD

Nataša KABLAR

Lola Institute, Belgrade, Serbia, natasa.kablar@li.rs

**Abstract:** Today, brushless DC motors (BLDC) are used instead of inductive and traditional DC motors with brushes due to better efficacy, heat loss, no wearing, and ability to achieve high speeds. They are preferred in many applications that require actuation by rotational movement. They are driven with Electronic Speed Controllers (ESC) in order to achieve desired speed. Orientation is chosen and set by physical switching of supply and ground wires on BLDC motor. In order to set desired speed joysticks or other remote control devices, smartphones, or computers are used. Signal of desired speed is sent to ESC in order to be transmitted to BLDC motor. This connection can be wired or wireless. Wired connection is used for applications where it is physically possible to install the wires. Wireless connection can be set up in case when it is choice of application, it is flight related application, or when wired connection is not possible to install. For wireless control transmitter and receiver of communication signal have to be chosen, and communication protocol as well. Depending on communication protocol Radio, Bluetooth, Wi-Fi, ZigBee, Z-Wave, etc. corresponding devices have to be chosen in order to transmit the signal. In order to make wireless connection (also used in wired connection) Arduino board with microcontroller is used. Connections have to be made with receiving unit consisted of wireless module, and with actuating device ESC or BLDC motor. Further it is needed to program microcontroller in Arduino IDE software environment in order to be able to receive analogue signals from remote controller, process it, and to deliver to ESC for BLDC motor operating. Connection diagram is stated for wired and wireless control of BLDC motor by using Arduino board and programming sketch.

**Keywords:** brushless DC motor, Electronic Speed Controller, joystick, wireless module, Arduino board, wired control, wireless control, transmitter, receiver

### 1. INTRODUCTION

In this paper we are interested in wired and wireless control of brushless direct current, BLDC motor. Wired control is realized through joystick connected to Electronic Speed Controller of BLDC motor, that is also connected to battery as power supply. If connection between joystick and Electronic Speed controller is realized wirelessly by using transmitting and receiving unit organized around wireless module HC-12 and Arduino

board, then BLDC motor is wirelessly controlled.

Prior testing it is important to physically calibrate Electronic Speed Controller, ESC with BLDC motor. This can be done physically by using hardware like joystick or transmitter unit (ex. AT-09 Radio Link Transmitter), or by using software in Arduino IDE environment. It is needed to set maximal and minimal rotation velocity of BLDC motor. By using hardware this is realized through max position of joystick and min position of joystick, with careful calibrating.

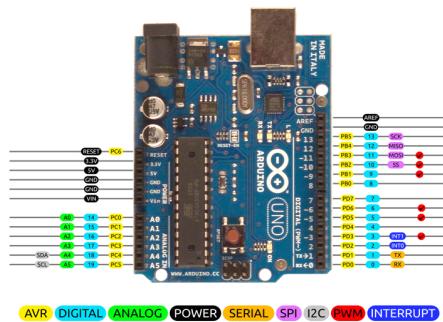
We will describe basic components first – *Arduino board*, *Joystick*, *wireless HC-12 module*, *Electronic Speed Controller, ESC* and *BLDC motor*. Then we will present integral part.

## 2. ARDUINO UNO BOARD

Arduino Uno is integrated circuit board that has microcontroller ATmega328P. It has six analog and fourteen digital pins. It has special pins for voltage supply of 5V and 3,3 V, and two pins for ground. Analog pins are used for sensors in order to read analog data. Digital pins can be used for actuating devices like step or DC motors, LED diodes, displays, etc. It has pins for receiving RX and transmitting TX data. Arduino Uno can be extended via shields or different modules, in order to become Arduino platform. Supply of Arduino board is via USB cable or battery of 9V. It receives supply voltage in range 7-20 V. Arduino Uno board realizes communication via STK500 protocol. It is shown on Figure 1. Details can be found in [1] and [7].

**Table 1.** Pins on Arduino Uno board

PIN	Description
13	LED diode
Vin	external supply
5V	Supply of 5V
3.3V	Supply of 3.3 V
GND	ground
I/Oref	Referent voltage
Reset	reset
RX, TX	Serial transmission
2, 3	External interrupts
3,5,6,9,10,11	PWM signal
10,11,12,13	Peripheral interface
A/REF	Analog reference



**Figure 1.** Arduino Uno board

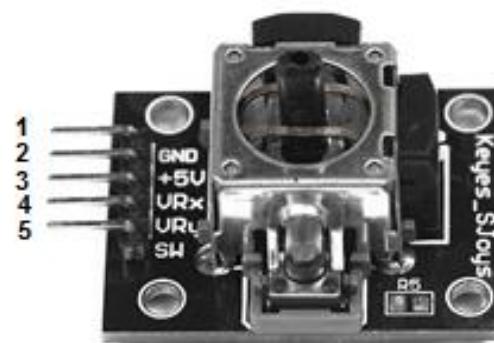
In the following sections we will briefly describe few electrical components with wiring diagrams in order to connect them with Arduino Uno board. This will be used in prototyping integral unit of wired and wireless control of BLDC motor.

Microcontroller of Arduino board has to be programmed in Arduino IDE (Integrated Development Environment) environment. Arduino software has serial monitor that enables receiving command and transmitting them via serial communication, and writing the output in order to display text messages.

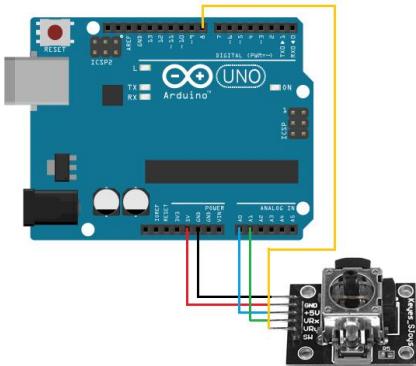
Arduino has line of boards with different purpose that are designed specifically for different needs. Arduino Uno is the basic board. Here can be applied Arduino Nano board. List of boards with explanations can be found at [www.arduino.cc](http://www.arduino.cc).

## 3. JOYSTICK

Module with joystick is consisted from three parts: joystick, soft rubber in form of mushroom, and electronic circuit. Two axis joystick have possibility to set commands in two directions, x or y, ie. Horizontal and vertical. Here we need only one output for setting motor speed. Joystick is potentiometer with variable resistor which generates variable voltage/current on output. This command signal is further transferred via Wi-Fi modules HC-12 (as parts of transmitting and receiving units) to Arduino board and after processing in microcontroller, to output digital pins and corresponding Electronic Speed Controllers and BLDC motors. It is shown on Figure 2.



**Figure 2.** Joystick with two axis, x and y



**Figure 3.** Connection Diagram of Joystick and arduino Uno board

In brief, joystick is electronic input device where input commands in range 0-1023 are mapped in program of microcontroller into speed range of 40-140 rps in order to drive the motor and rotate it.

Connection diagram of Joystick and Arduino Uno board is shown on Figure 3. Details can be found in [2].

#### 4. WIRELESS HC-12 MODULE

HC-12 is wireless electronic module that represent integrated circuit and serves for transmitting and receiving data through Wi-Fi communication protocol. Integrated circuit of Wi-Fi module HC-12 is given on Figure 4.

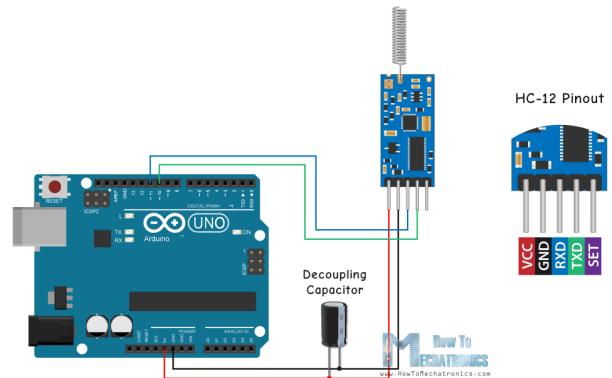
HC-12 presents new generation of modules for transmitting and receiving data and it works on frequency of 433.4-473 MHz. It can be set on 100 different canals. Maximal power of transmitting is 100mW (20dB), with receiving sensitivity of 117 dBm with speed of transmitting of 5000 bps in air, on communication distance of 1000 m in open air. Details and User manual are given in [3].



**Figure 4.** WI-FI module HC-12

Electronic module HC-12 is suitable for many applications. It has two antenna pins, ANT1 – for PCB antenna, and ANT2 for antenna of spring type.

Further, we give connection diagram of wireless HC-12 module with Arduino Uno board on Figure 5.



**Figure 5.** Connection diagram of HC-12 module with Arduino Uno board

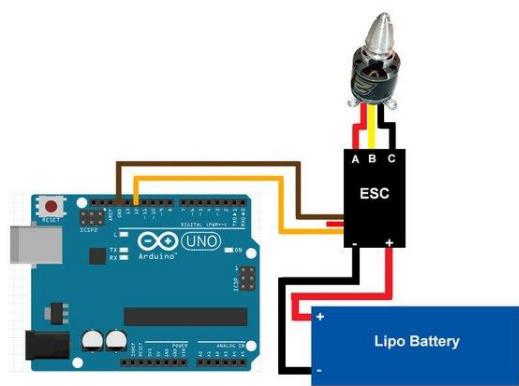
#### 5. BLDC MOTORS WITH ELECTRONIC SPEED CONTROLLERS

DC motor is actuating device which receives data from speed controller. Data are received either directly or indirectly. Directly, from remote controller or indirectly, from Arduino board which receive input from remote controller. Data are first transferred to speed controller that transmits data of desired speed to DC motor in order to realize desired motion. In case we are consider here, DC motor transfer direct current to alternating current in order to provide rotational motion. Details can be found in [4-6].



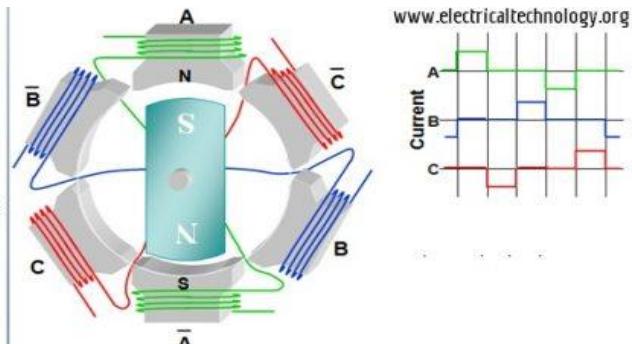
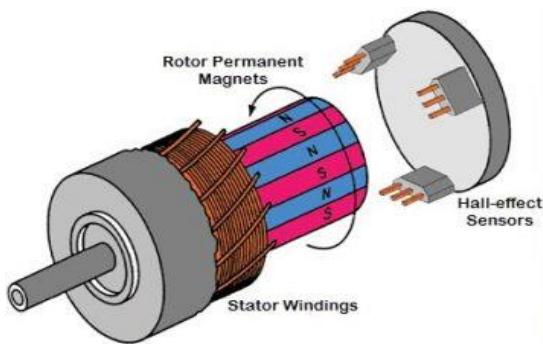
**Figure 6.** Brushless DC motor, type A2212, BLDC

DC motor is shown on Figure 6. Connection diagram is shown on Figure 7.



**Figure 7:** Connection diagram of DC motor and speed controller with Arduino Uno board

Brushless DC motors that are used today are produced from many manufacturers. They are choice for many applications, especially in field and technology of motor control. They have advantages over DC motors with brushes since they are more effective, can operate on higher speed, and have better heat loss. BLDC



**Figure 8.** Construction, Working Principle and Operation of BLDC Motor

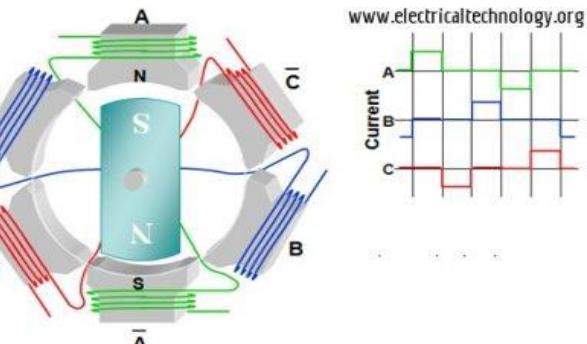
motors are unavoidable part of modern technology that are most often used for actuators, machine tools, electrical propulsion, robotics, computer peripheral devices, and for electricity generation. With advance of sensor technology these devices become effective, cheap, and safe. BLDC motor is synchronous electric device with permanent magnet which is driven with one way electric current and possess electronically controlled commutation system (commutation is process of production of rotational moment in motor by changing current phases in corresponding times) instead of mechanical commutation system.

Differently from conventional DC motors with brushes no meter whether brushes have mechanical contact with commutator on rotor

they form electrical path between DC motor electrical current source and wedges on armature of rotor. BLDC motors are used for electrical commutation with rotor permanent magnet and stator with sequence of coils. In this motor, permanent magnet rotates while conductors carry the current and are fixed.

Coils on armature are switched electronically by using transistor and controlled silicon rectifiers on correct position of rotor on such a way that field of armature is in space quadrature on poles of rotor field. Force that act on rotor provide rotation. Halls sensors and rotational encoders are usually used to sense the position of rotor and are positioned around stator. Rotor position is returned via sensor in order to determine when current to be switched on armature of rotor.

#### Arrangement of electrical commutation



eliminates arrangement of commutator and brushes which are used in conventional DC motors. Due to brushes absence BLDC motor is capable to work on high speeds. Efficacy of BLDC motor is usually 85-90% while conventional DC motor has efficacy of 75-80%. There exist different models of BLDC motors, with different ranges of voltage supply. BLDC motors can be used with different physical configurations.

Depending on choice of stator wending realization, it can be derived as motor with one phase, two phases, or three phases. BLDC motor with three phases is used the most. Construction of BLDC motor has many similarities with construction of three phases inductive motor, and conventional DC motors.

It has stator and rotor. On stator is placed electrical wirings through which electrical current pass when DC motor is connected to external electrical circuit or battery.

Stator of BLDC motor can be constructed from complex steel laminations in order to carry winding of electrical wirings. These windings are placed in slots that are axially positioned inside inner circle of stator. These windings are arranged in star or delta. Majority of BLDC motors have three phases star models connected to stator. Every coil is constructed to have many interconnected windings, each of them being placed in one slot. In order to form even number of poles, every of these coils is placed on periphery of stator. Stator has to be chosen with correct voltage supply which depends on ability of supply. For applications in robotics and small applications for actuation, has 48 V or less is preferred. For industrial applications and automated systems, 100 V or more is requested for motor supply.

BLDC motor has rotor which is made from magnet. Number of poles varies between 2-8 while there are alternatively placed as south, north, etc. In order to achieve maximal moment, density of magnetic flux of material has to be high. Adequate magnetic material for rotor is needed in order to produce requested density of magnetic field.

Ferrite magnetic materials are not expensive; however they have low density of magnetic flux for given volume.

Rare earth magnet materials in form of leaguers are usually used in design. Some of leaguers are Samarium Cobalt, Neodmyum, Ferrite and Boron. Rotor can be constructed with different physical configurations like circular core with permanent magnet, or else.

Hall sensor gives information how to synchronize excited armature of stator with rotor position. Since commutation of BLDC motor controlled electronically, windings of stator have to be energized in sequence in order for motor to be rotated. Before energizing of certain winding of stator, information of rotor position is needed. Since sensor of Hall Effect is embedded in stator, sensor senses the position of rotor. Majority

of BLDC motors has three Hall sensors which are placed in stator. Every sensor generates low and high signals when poles of rotor pass near the sensor. Exact sequence of commutation in stator can be determined according to combination of three responses from sensor.

BLDC motor works on principle which is similar to conventional DC motors, ie. Law of Lorenz forces tells that current that passes through conductor placed in magnetic field experience the force. As consequence of reactive force magnet experience the same force but of opposite direction. In case of BLDC motor electrical current that is conveyed through conductor is stationer (stator) while permanent magnet (rotor) is rotated. When coils are electronically switched, stator becomes electromagnet which starts to produce uniform magnetic field in space with air.

Although supply is direct current, switching does enable generating of alternating current in trapezoidal form of signal. Due to force of interaction between electromagnet of stator and permanent magnet rotor, rotor continues to rotate. On the Picture 4 it is shown the stator that is excited according to different states of switching. By switching coils with high and low signals, corresponding windings are energized as north or South Pole. Rotor with permanent magnet is aligned with poles of stator causing motor to rotate.

Let us note that motor produce torque due to generating attracting forces, when North-South poles, and South-North poles are aligned, and repulsion forces when North-North poles, and South-South poles are aligned, On this way motor is rotated in clockwise direction.

Here we can ask question: How do we know which stator coils has to be energized and when to do energizing? This is due continual movement of motor – ie. rotation, that depends on sequence of switching around windings. As stated above Halls sensor gives position about shaft to the unit of electronic controller.

According to signal obtained from sensor controller decides which concrete winding has to be energized. Hall sensors generate low and high voltage signals when poles of rotor pass near nearby. These signals determine position of shaft. As stated above circuit with electronic controller energize corresponding winding of motor that turns on transistor or other switch to rotate motor continually. ON the Figure below is shown BLDC motor circuit driver which possess MOSFET bridge, known as bridge invertor, electronic controller, sensor of Hall effect and BLDC motor. Here, sensors of Halls effect are used for determining and feedback of position and speed. Electronic controller can be microcontroller unit or microprocessor, or DSP processor, or FPGA unit or any other controller. This controller receives these signals; process it on electronic circuit MOSFET driver.

As addition to switching for requested desired speed of motor, additional electronic circuits for change of speed of motor are used according to requested application on which they are working. These control units are generally implemented as PID controllers in order to have precise control. Also it is possible to produce motor operating in four quadrants while good efficacy through variation of speeds by using modern devices.

BLDC motor has several **advantages** above conventional DC motors, and there are: it does not have mechanical commutator and problems that are caused by it.

It has high efficacy due to usage of rotor as permanent magnet operating with high speeds even when they are loaded, due to absence of brushes smaller geometry of motor and lighter weight from DC motor with brushes and inductive AC motor longer life without inspection and maintaining which is requested for commutator system response with higher dynamics due to low inertia and weight of winding which are placed on stator smaller electromagnetic interference quiet operating due to brushes absence.

**Disadvantages** of BLDC motors are:

1. they are expensive

2. electronic controller which is requested for control of this motor is expensive
3. it has no many integrated circuits available for such small motors
4. it requests complex electronic circuit driver
5. it needs additional sensors

### Applications of BLDC motors

BLDC is used for large number of applications that require variable load, constant load, or positioning in fields of industrial control, automotive industry, aviation, automated systems, medical equipment, etc. Some specific applications of BLDC motors are

- computer hard drive and DVD/CD players,
- electrical vehicles, hybrid vehicles, electrical bicycles,
- industrial robots and CNC machines,
- washing and drying machines, and compressors,
- fans, pumps, and water boilers, etc.

Electronic speed controller is used in order to transmit requested speed of motor rotation to BLDC motor. Speed controller monitor that speed do not to exceed maximal and minimal allowable (threshold) speed.

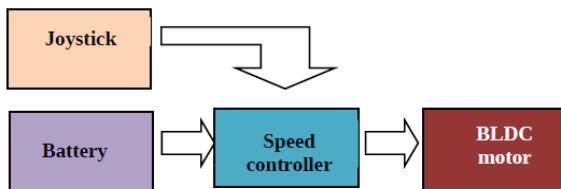


Figure 9. Electronic Speed Controller (ESC)

Electronic Speed Controller (ESC) is given in Figure 9. Connection diagram is shown above, in Figure 7. ESC has to be also connected to battery or power supply of 7.8-12 V (for the particular type of BLDC motor used here, A2212). Input to ESC is also receiver unit with VCC, GNS, and Signal wires. Signal wire is connected with Arduino Uno output, or directly to remote controller, through which signal of speed input command is received.

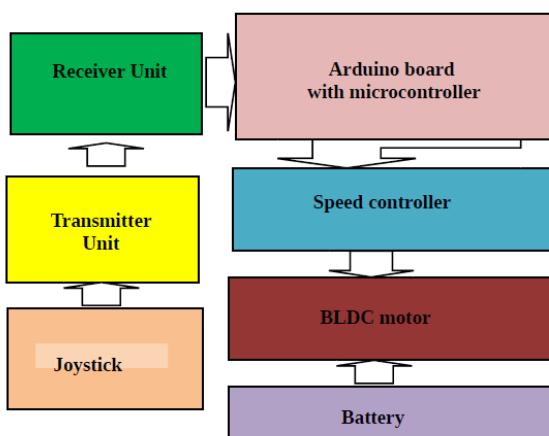
## 6. INTEGRAL UNIT

Today it is a choice of many electricians to use brushless direct current motor, or BLDC motor for different projects. BLDC motor can be controlled wirelessly or by using wires. Wired connection is consisted from joystick, battery, speed controller and BLDC motor. Schema is given in Figure 10.



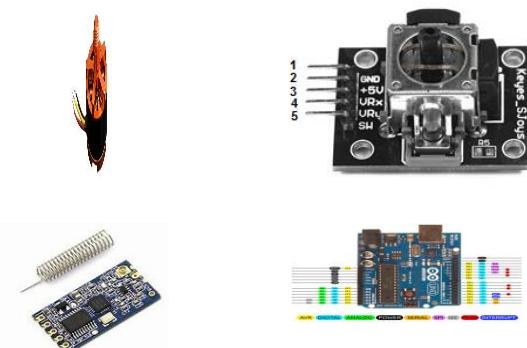
**Figure 10.** Block diagram of wired BLDC motor control

Wireless control of BLDC motor can be realized by using wireless communication protocol HC-12 and Arduino board with microcontroller (Arduino pro mini). Electronic components are joystick with transmitter, wireless communication module HC-05, receiver, Arduino board with microcontroller (for which is also need to write program), speed controller and BLDC motor. Joystick or program in controller are first used in order to calibrate electronic speed controller and BLDC motor. For communication it is used wireless HC-12 module. Wireless communication can be also realized via Bluetooth module HC-05, or via radio signals. For communication it is needed to provide transmitter and receiver. Schema is given in Figure 11.

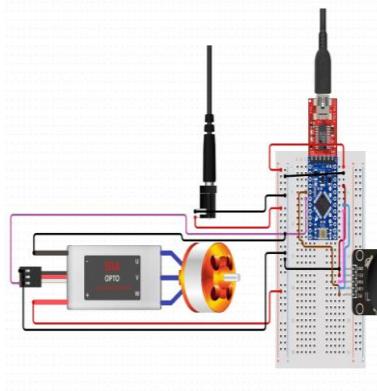


**Figure 11.** Block Diagram of Integral Unit

On Figure 12 there are shown electronic components that are used in this project BLDC motor, two-axis joystick, wireless module HC-12, and Arduino board with microcontroller.



**Figure 12.** BLDC motor, two-axis joystick, wireless module HC-12, Arduino board with microcontroller



**Figure 13.** Connection Diagram of Integral Unit

## 7. PROGRAMMING CODE FOR ARDUINO MICROCONTROLLER

Program or sketch to be uploaded to microcontroller is built in Arduino IDE (integrated Software Environment). The basic set of commands that are physically understandable is used. Library with commands that is needed to be included in program is servo.h. Program is consisted of two parts setup() and main program loop(). Initialization is done in setup part, while main commands of speed or calculation of position angles and speed are programmed depending on desired data and formulas that convert input signals from remote controller, and

feedback position data, into output angles with speeds of each BLDC motor.

## 8. CONCLUSION

In this paper we have described wired and wireless control of BLDC motor. Basic parts – transmitting and receiving unit, joystick, HC-12 module, Arduino board, ESC and BLDC motor. We have presented brief explanation of each of the components and connection diagram with Arduino board. Further, integral unit is described, block diagram is provided, with connection diagram of all components. In future work these elements will be used to design prototype of Quadcopter and bipedal robot.

## REFERENCES

- [1] Arduino Uno board,  
<https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoUno>
- [2] Joystick, User Manual,  
[file:///C:/Users/admin/Downloads/usr\\_attachm ent\\_BB-PSJ\\_User's\\_Manual.pdf](file:///C:/Users/admin/Downloads/usr_attachm ent_BB-PSJ_User's_Manual.pdf)
- [3] Wi-Fi HC-12 Module, User Manual,  
<https://www.elecrow.com/download/HC-12.pdf>
- [4] Brushless DC Motors – Part I: Construction and Operating Principles,  
<https://www.edn.com/design/sensors/4406682/Brushless-DC-Motors---Part-I--Construction-and-Operating-Principles>
- [5] Brushless DC Motors--Part II: Control Principles,  
<https://www.edn.com/design/sensors/4407580/Brushless-DC-Motors-Part-II--Control-Principles>
- [6] Electronic Speed Controller BTZ 30 A, BEC, User Manual,  
<http://airtekhobbies.com/downloads/ZTW.pdf>
- [7] N. Kablar: Arduino microcontroller with applications, *Proceeding from ETRAN Conference*, Palić, June 2018, in print.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## SIMULACIJA TEMPERATURNOG POLJA I SILA REZANJA PRI BUŠENJU

Nenad KULUNDŽIĆ<sup>1</sup>, Borislav SAVKOVIĆ<sup>1</sup>, Pavel KOVAC<sup>1</sup>, Marin GOSTIMIROVIĆ<sup>1</sup>, Dušan JEŠIĆ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, Novi Sad, Srbija,

kulundzic@uns.ac.rs.com, savkovic@uns.ac.rs, pkovac@uns.ac.rs, maring@uns.ac.rs

<sup>2</sup> Međunarodno Tehnološko-Menadžerska Akademija, Novi Sad, Srbija, dusanjesic@hotmail.com

**Apstrakt:** U radu je prikazan savremeni prostorni pristup simulacije i analize formiranja strugotine, sile rezanja, deformacija i toplotnih pojava pri obradi bušenjem metodom konačnih elemenata u programskom paketu Third Wave AdvantEdge. HSS je korišćen kao materijal alata, dok materijal obratka bio čelik 34CrNiMo6. Alat je standardna spiralna burgija, koja je kreirana u programskom paketu Third Wave AdvantEdge, kao i sam obradak. Definisanjem mreže konačnih elemenata, brzine rezanja, broj obrtaja i karakteristika materijala, omogućena je detaljna analiza temperaturnih polja, naponskih stanja, stanja deformacija, kao i prostorno odvijanje samog procesa rezanja.

**Ključne reči:** metoda konačnih elemenata, bušenje, toplotna pojava, sila rezanja, deformacija, strugotina

### 1. UVOD

Bušenje je jedan od najtraženijih procesa obrade i ima značajnu ekonomski značaj u industriji. Proces bušenja čini 40-60% ukupnih procesa ukljanjanja materijala i to bitna tehnika u vazduhoplovnoj industriji [1].

Na ovaj process utiču mnogi ulazni parametri, a jedan od najvažnijih parametara je temperatura, jer utiče na habanje alata. Alati za obradu iziskuju velike troškove u procesu obrade [2, 3, 4, 5].

Godine 1798. je B. Rumford ispred Royal Society of England u delu istraživanje vezano za izvor topote koja je izazvana trenjem predstavio svoje eksperimentalne rezultate u vezi toplotnih pojava pri bušenju topovskih cevi. Ovo delo se smatra prvim pokušajem teoretskog istraživanja procesa obrade [6].

U radu je prikazan savremeni prostorni pristup simulacije i analize formiranja

strugotine, sile rezanja, deformacija i toplotnih pojava pri obradi bušenjem metodom konačnih elemenata u programskom paketu Third Wave AdvantEdge.

### 2. METODA KONAČNIH ELEMENATA

Metoda konačnih elemenata (MKE) spada u savremene metode numeričke analize. Primena MKE prvo je započeto u oblasti proračuna statičkih i dinamičkih opterećenja kod inženjerskih konstrukcija [7]. Osnovna ideja o tzv. fizičkoj diskreditaciji kontinuma, na kojoj se zasniva MKE je vrlo stara, otprilike koliko i ljudsko nastojanje da se teško rešivi problemi zamene jednostavnijim, za koje se lakše nalaze rešenja.

Među numeričkim metodama, metoda konačnih analiza (MKA) se često uspešno koristi. Međutim, ovakva analiza zahteva generisanje velikog broja podataka kako bi se

dobilo razumno precizne rezultate i trošili velike investicije kao što je inženjersko vreme i računarske resurse [8].

Kompleksni geometrijski oblici i složena opterećenja elemenata za prateću i prenosne elemente od mašine izazivaju kompleksnost njihove analize i kalkulacija. Osnovna podela na analitičkom i numeričkom nivou, razvijena je u nekoliko pravaca.

Jedan od savremenih metoda numeričke analize je MKE, koja se kod složenih geometrija ne može izvršiti bez računarskih resursa. Teorijske osnove MKE postavljene su pedesetih godina prošlog veka. Potreba za izračunavanjem stresa i deformacija, dovela je do razvoja MKE i do povećanja broja varijabli koji se mogu izračunati unutar staticke, dinamičke, termičke, elektromagnetne i drugih analiza [9].

Simulacije koje su obrađene pomoću MKE se sve više koriste za istraživanje i optimizaciju. Mnogi dugotrajni i skupoceni eksperimenti mogu se zameniti kompjuterskim simulacijama. Zbog toga, visoko precizne rezultate simulacije obrade metala mogu se dobiti korišćenjem simulacija pomoći MKE [10].

## 2.1 Simulacija procesa u programskom paketu AdvantEdge

Računarska analiza temperaturnog stanja pri procesu bušenja realizovana je korišćenjem programskog paketa Third Wave AdvantEdge.

Materijali koji su korišćenu u eksperimentu uvezeni iz sopstvene biblioteke programskog paketa. Materijal alata je brzorezni čelik, a materijal pripremka je 34CrNiMo6.

Third Wave AdvantEdge je jedan od programske pakete koji je zasnovan na MKE, koji se koristi za virtualnu analizu procesa odvajanje strugotine i dizajniranje alata koji se koriste u procesima obrade.

## 3. KARAKTERISTIKE MATERIJALA I PARAMETRI PROCESA BUŠENJA

Dimenzije obratka koji je korišćen u simulaciji su 18x14x14mm. Nijanse od plave do crvene boje grafički prikazuju raspon

temperaturnog polja u testiranom delu obratka, strugotine i alatu.

U tabeli 1 prikazane su toplotne osobine materijala 34CrNiMo6. Standardna burgija je korišćena kao alat u simulaciji. Glavne karakteristike su prikazane u tabeli 2. Početna temperatura pri simulaciji iznosi 20°C. Burgija je izvršila 20 obrtanja oko svoje ose, što iznosi 7200 stepeni, a pomak po obrtaju iznosi 0,4 mm. U tabeli 3 su prikazani osnovni parametri procesa bušenja, a u tabeli 4 prikazani su osnovni podaci o elementima mreže koja je korišćena u simulaciji.

**Tabela 1.** Toplotne osobine materijala

Kovanje ili vruće valjanje	1100 - 850°C
Normalizacija	850 - 880°C/vazduh
Meko žarenje	650 - 680°C/furnace
Kaljenje	830 - 860°C/ulje
Ojačavanje	540 - 660°C/vazduh

**Tabela 2.** Karakteristike burgije

Prečnik burgije	6 mm
Ugao zavojnice	30 stepeni
Rub	1mm
Radius zavojnice	1,45mm
Radius sečiva	0,04
Ugao vrha	135 stepeni
Grudni ugao	9 stepeni
Ugao rezne ivice	120 stepeni

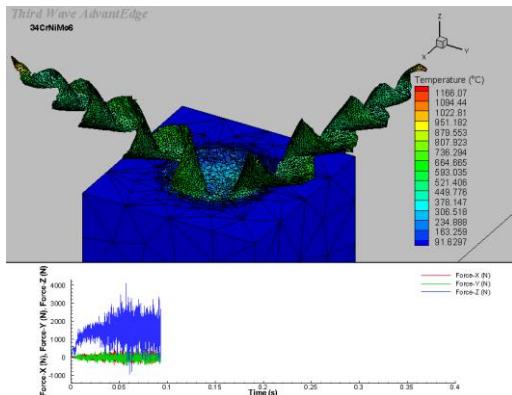
**Table 3.** Proces bušenja

Brzina vretena	3000 rpm
Pomak po obrtaju	0,4mm
Početna temperatura	20°C
Ukupan ugao rotacije	7200 deg

**Table 4.** Parametri mreže

Maksimalna veličina elementa	3mm
Minimalna veličina elementa	0,1mm
Zakrivljenost-sigurnost	2,5
Segment po ivici	2
Minimalna dužina ivice	0mm

Na slici 1 je prikazana mreža koja je korišćena na obratku pri procesu obrade i formiranje strugotine. Zbog brže obrade i manje obrade podataka, mreža se automatski generiše u zoni deformacije obratka i na vrhu alata.

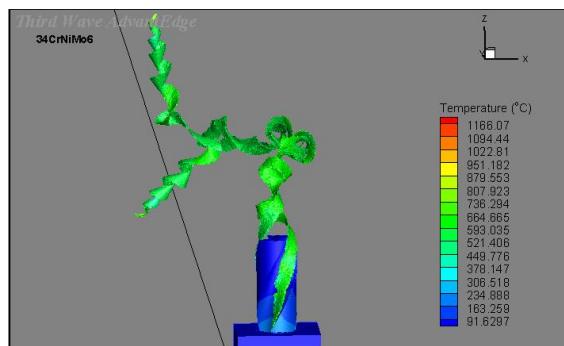


**Slika 1.** Automatski generisana mreža u zoni rezanja i na strugotini

#### 4. REZULTATI SIMULACIJE PROCESA BUŠENJA

Nakon unetih svih parametara koji su prethodno definisani, pristupilo se obradi same simulacije.

Obrađena je simulacija sa 20 obrtaja u trajanju od 0.4s, podeljeno na 1000 programske korake. Izdvojena i predstavljena su tri preseka u određenim intervalima na 183, 393 i 544 koraka, odnosno na 0.073 s, 0.156 s i 0.217 s. Na slici 2 je prikazana simulacija procesa bušenja nakon 0.4s, pri 1000 programskih koraka.

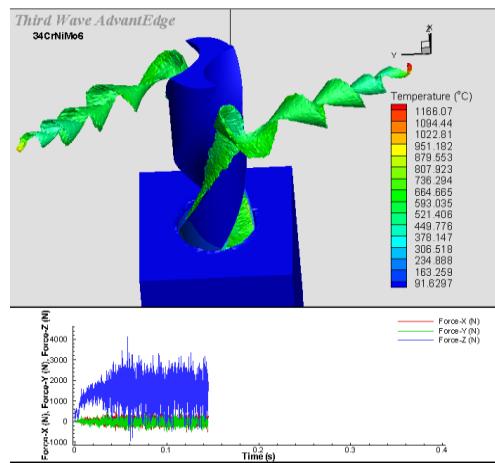


**Slika 2.** Prikaz procesa bušenja nakon 0,4 s, pri 1000 koraka

Na slici 3 je prikazan temperaturno polje pri procesu bušenja posle 356 programskih koraka, odnosno 1.42s. Temperaturna polja variraju na

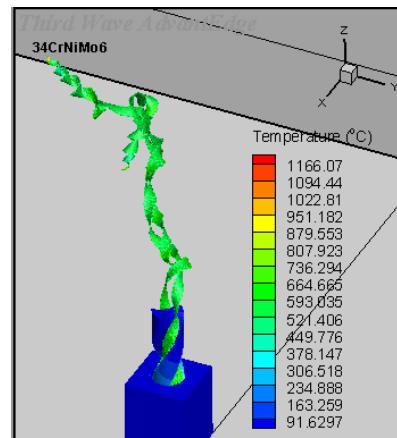
strugotini oko 650°C, dok je na samim krejevima ta temperature znatno veća.

Najveća sila koja se javlja pri procesu bušenja je u pravcu Z ose. Simetrična vrednost je oko 1500N, a maksimalna do trenutka prikazanog na slici je oko 3500N. Može se primetiti da sila postepeno raste pri prodiranju alata u obradak. Sile koje se javljaju po X i Y osi se takođe postepeno povećavaju pri sve dubljem prodiranju burgije u obradak. Maksimalne sile po X i Y osi su do 500N u negativnom i pozitivnom pravcu osa.



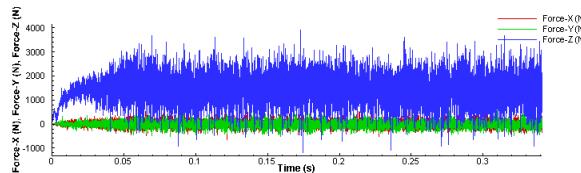
**Slika 3.** Temperaturno polje pri procesu bušenja nakon 356 programskih koraka, 1,42 s

Na slici 4 je prikazano temperaturno polje pri procesu bušenja nakon 815 programskih koraka, odnosno 3.33s. Temperaturna polja variraju na strugotini oko 600°C. Može se ustanoviti da je temperatura na strugotini podjednaka i da je stugotina kontinualna. Ovakav oblik strugotine nije povoljan za alat, jer se temperatura prenosi na alat, što uzrokuje skraćivanju veka trajanja samog alata.



**Slika 4.** Prikaz procesa bušenja nakon 3,33s, pri 815 programskih koraka

Na slici 5 prikazan je dijagram sila po osama X, Y i Z pri procesu bušenja. Najveća sila pri bušenju se javlja u pravcu Z i iznosi oko 4000N. Kao što su dosadašnja istraživanja pokazala, sile u pravcu X i Y ose su jako male.



Slika 5. Prikaz sila u pravcu X, Y i Z ose pri procesu bušenja

## 5. ZAKLJUČAK

Analizom je utvrđeno da se temperature, sila rezanja mogu uspešno simulirati uz pomoć programskog paketa *Third Wave AdvantEdge*.

Promenom geometrije alata, variranjem parametara rezanja, može se postići velika ušteda u samom ispitivanju. Pomoću programskog paketa *Third Wave AdvantEdge*, lako i efikasno se dolazi do potrebnih simulacija sa svim potrebnim informacijama za dalja istraživanja.

Rezultati dobijeni metodom koja je prikazana u radu treba uzeti sa određenim stepenom sigurnosti, zbog nehomogenosti u materijalu koji se formiraju tokom proizvodnje materijala, kao i ostalih uticaja, kao što su vibracije mašina, temperaturna razlika itd.

## LITERATURA

- [1] P.T. Schroeder: Widening interest in twist drill. Modern Mach. Shop, Vol. 71, No. 4, pp. 106–113, 1998.

- [2] K. Sakurai, K. Adachi, K. Ogawa, and R. Niba: Drilling of Ti-6Al-4V Alloy. J. Jpn. Inst. Light Met., Vol.42 No.7, pp. 389–394, 1992.
- [3] I. Korkut, M. Boy, I. Karacan, U. Seker: Investigation of chip back temperature during machining depending on cutting parameters. Mater Des, Vol. 28, pp. 2329–2335, 2007.
- [4] S. Jaspers, J. Dautzenberg, D. Taminiau: Temperature measurement in orthogonal metal cutting. Int J Adv Manuf Technol, Vol. 14, pp. 7–12, 1998.
- [5] T. Ueda, M. Huda, K. Yamada, K. Nakayama: Temperature measurement of CBN tool in turning of high hardness steel. CIRP Ann, Vol. 48, No. 1, pp. 63–66, 1999.
- [6] P. Kovac, B. Savkovic, A. Mijic, M. Sekulic: Analytical and experimental study of cutting force components in face milling, Journal of Production Engineering, Vol.14, No.1, pp. 15-18, 2011.
- [7] A. Mitrovic, P. Kovac, N. Kulundzic, B. Savkovic: 3D finite element simulation of milling, Journal of Production Engineering, Vol.19, No.1, pp.31-34, 2016.
- [8] P. Kovac, M. Gostimirovic, M. Sekulic, B. Savkovic: A review to advanced modeling and simulation of machining process, Journal of Production Engineering, Vol. 12, No. 1, pp. 17-22, 2009.
- [9] M. Samuel: FEM simulations and experimental analysis of parameters of influence in the blanking process, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 84, pp. 97-106, 1998.
- [10] L. Tang, J. Huang, L. Xie: Finite element modeling and simulation in dry hard orthogonal cutting AISI D2 tool steel with CBN cutting tool, Int J Adv Manuf. Technol, Vol. 53, pp. 1167–1181, 2011.

## SIMULATION OF TEMPERATURE DISTRIBUTION AND CUTING FORCES DURING DRILING PROCESS

**Abstract:** In the current paper presented was a novel approach to study of temperature distribution and cutting force in the drilling process using finite element analysis (FEM) in *Third Wave AdvantEdge* software. For modeling and simulation is a necessary to understand the material flow, temperatures distribution and cutting force in cutting tool. For this procedure was use standard drill as tool, made of HSS, while workpiece was alloy steel 34CrNiMo6. Both elements were modeled in the software package *AdvantEdge Third Wave*. By defining the finite element mesh, cutting speed, feed and performance materials, provided was a detailed analysis of temperature fields, stress state, strain state and appearance of the cutting process.

**Keywords:** Finite element analysis, drilling, temperature, cutting force, chips



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

### 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## PRIMENA OPTIČKIH BESKONTAKTNIH MERNIH SISTEMA KOD INSPEKCIJE DELOVA DOBIJENIH OBRADOM REZANJEM

Dragan LAZAREVIĆ<sup>1\*</sup>, Bogdan NEDIĆ<sup>2</sup>, Milan RADENKOVIĆ<sup>2</sup>, Živče ŠARKOĆEVIĆ<sup>1</sup>,  
Bojan STOJČETOVIĆ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Fakultet tehničkih nauka Kosovska Mitrovica, Srbija, dragan.lazarevic@pr.ac.rs,  
zivce.sarkocevic@pr.ac.rs

<sup>2</sup>Fakultet inženjerskih nauka Kragujevac, Srbija, nedic@kg.ac.rs, radenkovic@kg.ac.rs  
<sup>3</sup>Visoka tehnička škola Zvečan, Srbija, bstojcetovic@yahoo.com

**Apstrakt:** Iako koordinatne merne mašine (CMM) još uvek postižu najtačnije rezultate merenja, sve češće se u industriji primenjuju bezkontaktni laserski i optički merni sistemi (skeneri). Razlozi korišćenja skenera se nalaze u većoj brzini akvizicije, većoj gustini podataka-tačaka i boljem opisu površine, mogućnošću skeniranja složenih i mekih površina itd. Ovaj rad daje kratak opis kontaktnih i nekontaktnih uređaja, principa i sisteme koji se primenjuju pri akviziciji podataka i navedene su osnovne prednosti i nedostaci. U okviru eksperimenta prikazani su rezultati ispitivanja mogućnosti primene (verifikacije) uređaja za 3D skeniranje za inspekciju dimenzionalne i geometrijske tačnosti delova prizmatičnog oblika dobijenih obradom na CNC globalici. Prikazan je postupak generisanja površina iz oblaka tačaka dobijenog na skeneru i postupak merenja u Gom Inspect softveru. Upoređeni su analizirani rezultati merenja dobijeni rezličitim optičkim skenerima u odnosu na rezultate dobijene pomoću CMM.

**Ključne reči:** skener, cmm, merenje, inspekcija, odstupanje, uređaj

### 1. UVOD

Merenje dimenzija i preciznosti oblika u industrijskoj praksi tradicionalno se vrši konvekcionalnim metodama kao što je kontaktna metoda koju primenjuju koordinatne merne mašine (CMM). Iako ove mašine pružaju jedan od najtačnijih rezultata [1], u nekim slučajevima se ne mogu koristiti. Primer može biti merenje površina sa veoma složenim oblicima. Štaviše, kontaktno-tačkasti proces je veoma dugotrajan za veliki 3D oblik [2].

Zbog prethodno navedenog, u industriji se sve češće koriste laserski i optički merni sistemi, tzv. 3D skeneri. Ovi skeneri digitalizuju

deo, a sama inspekcija se vrši na virtuelnom modelu dobijenom procesom digitalizacije [3,4] i poređenjem sa idealnim 3D CAD modelom u nekom od softvera za inspekciju. Odnosno, kao rezultat skeniranja dobija se oblak tačaka, koji zahteva procesiranje i generisanje površina u cilju merenja i kontrole. Inspekcija koja koristi ove sisteme nudi nekoliko ključnih prednosti kao što su brzo merenje delova, čak i složenih oblika, sa velikom gustinom podataka i, pre svega, nezavisnošću rezultata od tvrdoće delova. Zbog ukupnog opisa merenog dela, takođe, omogućeno je izvođenje kompleksne i objektivne analize. Uprkos poznatim prednostima koje ovi sistemi nude, takođe

postoje i poteškoće, kao što je nedefinisana i nestandardizovana preciznost [5] i merna nesigurnost [6] u poređenju sa tradicionalnim sistemima inspekcije baziranim na dodirno-prekidnoj (*touch-trigger*) sondi.

U industriji se sve više primenjuje i kompjuterska tomografiju (CT) koja predstavlja još uvek jedinu tehnologiju koja može izmeriti kako unutrašnju tako i spoljašnju geometriju komponente ili sklopa bez potrebe da se seče i ošteti.

## 2. UREĐAJI ZA PRIKUPLJANJE PODATAKA, PRINCIPI I SISTEMI

3D uređaj za prikupljanje (akviziciju) podataka je instrument koji prikuplja 3D koordinate sa određenog područja površine [7]. Na osnovu tehničkog principa koji primenjuju, sistemi za prikupljanje podataka se dele na [8]: kontaktne i beskontaktne.

**Kontaktni** uređaj dodiruje površinu objekta pomoću mehaničke sonde i kao rezultat daje koordinate izmerenih tačaka. U kontaktne uređaje spadaju koordinatne merne mašine (CMM) koje mogu biti stacionarne i pokretne. Kako se povećavaju zahtevi o složenosti i tačnosti dimenzionalne metrologije, sve češće se primenjuju i multisenzorska merenja, tako što se na CMM kombinuju kontaktne i nekontaktne sonde.

**Beskontaktni** uređaj koristi medije kao što su svetlo, zvuk ili magnetno polje. Beskontaktni uređaji se dalje dele na [9]: pasivne i aktivne sisteme.

**Aktivni** sistemi, koji spadaju u nekontaktne sisteme (najčešće korišćene u metrološkim aplikacijama), dalje se mogu klasifikovati u smislu osnovnih fizičkih principa koji primenjuju i to na: triangulacione (*triangulation*), sisteme bazirane na vremenu leta (*time-of-flight* ili *laser pulse*) i interferometrijske (*interferometry*) sisteme.

**Triangulacija** se zasniva na principu triangulacije mernog mesta na objektu od fizički odvojene kamere optičkog izvora i detektora. Jednostavnom geometrijom, izračunavaju se (x, y, z) koordinate osvetljenog mesta na objektu [10]. Senzori na bazi

triangulacije mogu biti *single-point* ili *slit* senzori. *Single point* senzor prikuplja podatke tačku po tačku, dok *slit* senzor omogućava projekciju laserske linije i istovremenu detekciju kompletног profila tačaka [11].

**Time-of-flight** ili **laser puls** skeneri rade na principu da se sa površine objekta reflektuje svetlost natrag ka prijemniku koji zatim meri vreme (ili faznu razliku) između prenosa i prijema. Rastojanje se meri kao direktna posledica kašnjenje elektromagnetsnih talasa. Glavna prednost metode *time-of-flight* je da tačnost merenja ne zavisi od udaljenosti (što nije slučaj sa triangulacijom) [12].

**Interferometrijske metode** funkcionišu projiciranjem vremenskog ili vremenski promenljivog periodičnog uzorka na površinu, nakon čega se meša reflektovano svetlo sa referentnim uzorkom. Referentni obrazac demoduliše signal da otkrije varijaciju geometrije površine. Rezolucija merenja je veoma visoka, jer je deo talasne dužine laserskog zračenja [13].

Svaki pasus je uvučen za 5 mm prema uputstvu.

Ostavite jedan prazan red pre i posle naslova i podnaslova. Izbegavajte naslove na dnu kolona, sa pretećim tekstrom koji počinje u sledećoj koloni ili na sledećoj strani.

## 3. EKSPERIMENT

U okviru eksperimenta prikazani su rezultati ispitivanja mogućnosti primene (verifikacije) uređaja za 3D skeniranje za inspekciju dimenzionalne i geometrijske tačnosti delova prizmatičnog oblika dobijenih obradom na CNC glodalici. Takođe je prikazano odstupanje rezultata merenja dobijenih rezličitim optičkim mernim uređajima u odnosu na rezultate dobijene pomoću CMM.

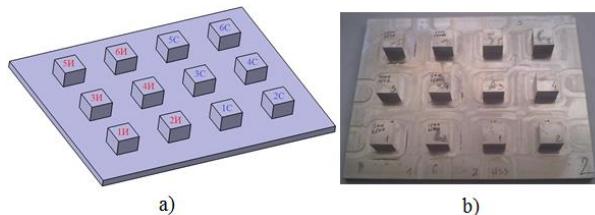
Obrada dela je vršena glodanjem sa različitim parametrima rezanja (brzina rezanja i pomoćno kretanje - korak), a obrađivana je legura aluminijuma. Primjenjene su strategije istosmerno i suprotnosmerno glodanje sa alatom vretenastim glodalom prečnika  $\phi 10$  mm od tvrdog metala (VHM). Ovako izrađeni izdanci delova mereni su na CMM, a zatim

primenom tri različita optička skenera. Softveri koji su korišćeni za obradu izmerenih podataka i izračunavanje dimenzionalnih odstupanja su PC DMIS (za CMM) i Gom Inspect (za skener).

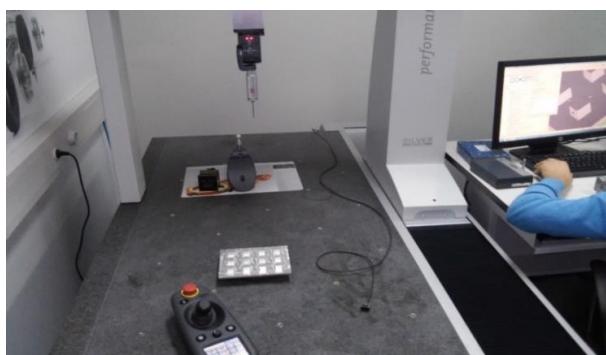
### 3.1. Materijal i oprema

Mašina na kojoj je vršena obrada je vertikalna glodalica Haas VF-3SS sa tri CNC kontrolisane ose. Kao rezni alati korišćeno je vretenasto glodalo 20 2243 Garant od tvrdog metala (VHM) prečnika 10 mm, ugla spirale 45°, dužene reznog dela 13 mm, ukupne dužine 57 mm i broja zuba 3. 3D Model dela (slika 1-(a)) kao i sve staze (putanje kretanja) alata i simulacija obrade, dobijene su korišćenjem softvera CATIA P3 V5-R62014. Generisane putanje alata simulirane su u softveru CIMCO Edit v7.0.7. Materijal obrađivanih delova je legura aluminijuma 6005A-T6 Al (AlSiMg(A) 3.3210).

Obrađeni deo (slika 1-(b)) meren je na koordinatnoj CNC mernoj mašini (CMM) DEA GLOBAL Silver Performance (slika 2). Rezultati merenja u vidu koordinata tačaka obrađeni su pomoću softvera PC DMIS i tako dobijena dimenzionalna odstupanja bočnih površina izdanaka u X i Y pravcu kao i geometrijska odstupanja od ravnosti, upravnosti i paralelnosti.



Slika 1. CAD model i deo nakon obrade



Slika 2. Merenje delova na koordinatnoj mernoj mašini

Deo je skeniran sa tri različita optička skenera i to skenerom: ATOS II, ATOS IIe i ATOS Compact Scen M5. Geometrijske konfiguracije senzora ATOS II i ATOS IIe su identične, dok razlika postoji u hardverskim verzijama kontrolera, kamere i projektila. Prah kojim je posut deo kako bi se moglo skenirati reflektujuće površine dela je NORDTEST, Endringprufsystem, Entwickler U 89.

Rezultati merenja sa skenera, u vidu oblaka tačaka (stl formata), uvezeni su i obrađeni korišćenjem softvera Gom Inspect i dobijena su dimenzionalna odstupanja bočnih površina izdanaka u X i Y pravcu kao i geometrijska odstupanja od ravnosti, upravnosti i paralelnosti.

### 3.2. Plan eksperimenta

Radni komad (pripremak) je dobijen iz ploče dimenzija 180x140x20 mm, iz koje su prethodnom obradom dobijeni prizmatični izdanci (slika 1-b). Prvo grubom, a zatim finom obradom vretenastim glodalom φ16 mm, dobijen je finalni deo sa izdancima dimenzija 20x20x12 mm. Izdanci dela obrađivani su zatim vretenastim glodalom (φ10 VHM) uz primenu različitih parametara rezanja po izdanku i to: koraka ( $f$ , mm/min), broja obrtaja ( $n$ , o/min), dubine  $a$  (mm) i širine  $b$  (mm) rezanja, istosmernom (IS) i suprotnosmernom (SS) strategijom obrade. Parametri rezanja i plan eksperimenta prikazani su u tabeli 1. Obrada je vršena sa dva prolaza sa dubinom rezanja od 0,875 mm i završnim prolazom od 0,25 mm.

Tabela 1. Parametri eksperimentalnih ispitivanja

Parametri rezanja	Izdanci					
	1	2	3	4	5	6
$f$ (mm/min)	500	1500	2000	500	1500	2000
$n$ (o/min)		3500			5500	
$a$ (mm)			0,875/0,875/0,25			
$b$ (mm)				12		

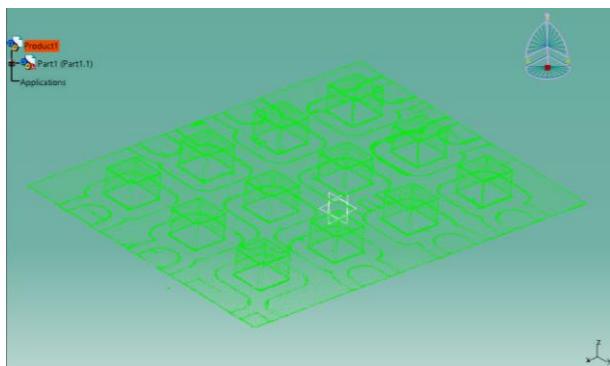
### 3.3. Inspekcija primenom CMM

Merenje na CMM je vršeno po matrici 7x5 tačaka po svakoj vertikalnoj površini izdanka. Rezultati merenja obrađeni su korišćenjem softvera PC DMIS. Primenom softvera, kroz skup (35) tačaka svake vertikalne površine izdanka, najpre je kreirana aproksimativna ravan. Aproksimacija je vršena metodom najmanjih kvadrata. Zatim je izvršeno merenje rastojanja između centralnih tačaka susednih aproksimativnih površina u X i Y pravcu. Na osnovu aproksimativnih ravni izmereno je i geometrijsko odstupanje od ravnosti, upravnosti i paralelnosti.

### 3.4. Inspekcija 3D skenerima

Deo je skeniran sa tri različita optička skenera i to: ATOS II, ATOS IIe i ATOS Compact Scen M5.

Za razliku od obrade podataka kod CMM, koja za rezultat daje koordinate određenog broja korisnički definisanih tačaka na uniformnom rastojanju, skeneri generišu stl fajl oblaka tačaka koji sadrži veliki broj neravnomerno raspoređenih tačaka po celokupnoj površini dela. Dobijeni oblik tačaka (stl fajl) je uvezen u softver za inspekciju Gom Inspect. Na slici 3 prikazan je oblik tačaka dela dobijen pomoću skenera modela ATOS II.

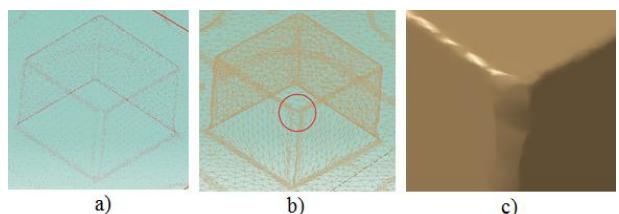


Slika 3. Oblak tačaka dela dobijen pomoću skenera ATOS II

Dobijeni oblik tačaka najčešće sadrži brojne nepravilnosti koje je postupkom preprocesiranja potrebno pročistiti. Na obliku nije bilo tačaka van opsega, a greške na mreži se nalaze uglavnom na ivicama izdanaka. Na celokupnoj mreži primećeno je jedno *non-manifold* (koje koje deli dve nepovezane mreže) teme i jedna šupljina, nalazili su se na

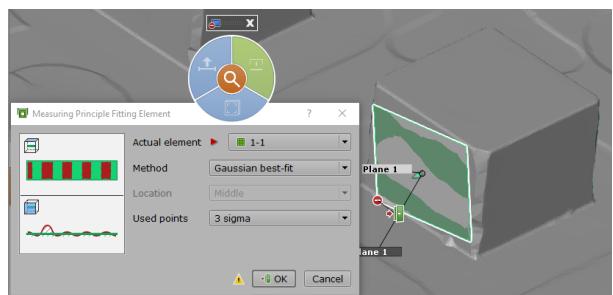
graničnim površinama, pa nisu uzeti u razmatranje.

Jedan od nedostataka skeniranja optičkim skenerom predstavlja nedostatak skeniranih tačaka na ivicama i prelaznim površinama dela. Na slici 4-a jasno se vide ovi nedostaci. Ovaj nedostatak se dalje komplikuje triangulacijom, koja preko algoritma spaja postojeće tačke (slika 4-b). Na ovaj način dobio bi se deo bez jasno definisanih ivica (slika 4-v), odnosno nameće se potreba za naknadnim izvlačenjem ivica.



Slika 4. Triangulisanje oblaka tačaka i karakteristične nepravilnosti na ivicama

Površine od intresa za inspekciju su bočne površine izdanaka, pa su samo one posmatrane. Tako su kreirane aproksimativne ravni (*Plane 1* na slici 5) i provučene kroz određene oblasti oblaka tačaka. Oblasti oblaka tačaka ne uzimaju u obzir tačke na graničnim prelazima površina pa nije bilo potrebe za preprocesiranjem.



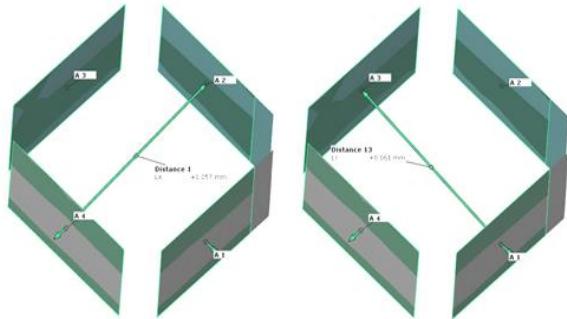
Slika 5. Aproksimiranje ravni površine izdanka

GOM Inspect nudi mogućnost izbora između dve metode aproksimacije najmanjeg kvadrata i to Gausovu (koja je korišćena u eksperimentu) i Čebašijevu.

Ponavljanjem navedenog postupka na bočnim površinama svih izdanaka, postupak generisanja površina je završen i pristupilo se merenju dimenzionalnih i geometrijskih odstupanja.

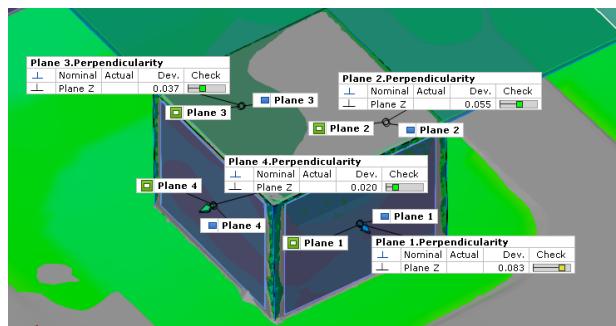
Kod merenja odstupanja od dužinske mere, kao i kod postupka merenja na SMM (pomoću

PC DMIS softvera) izabrana su rastojanja između srednjih tačaka aproksimativnih ravnih. Zadavanjem nominalne mere program izračunava i ispisuje odstupanje (*Distance X/Y*) u okvir (slika 6).



**Slika 6.** Izmerena odstupanja ( $\Delta X$  i  $\Delta Y$ ) između srednjih tačaka aproksimativnih ravnih

Na slici 7 prikazane su izmerene vrednosti geometrijskog odstupanja bočnih površina izdanka od upravnosti u odnosu na referentnu ravan koja prolazi kroz gornju površinu izdanka.



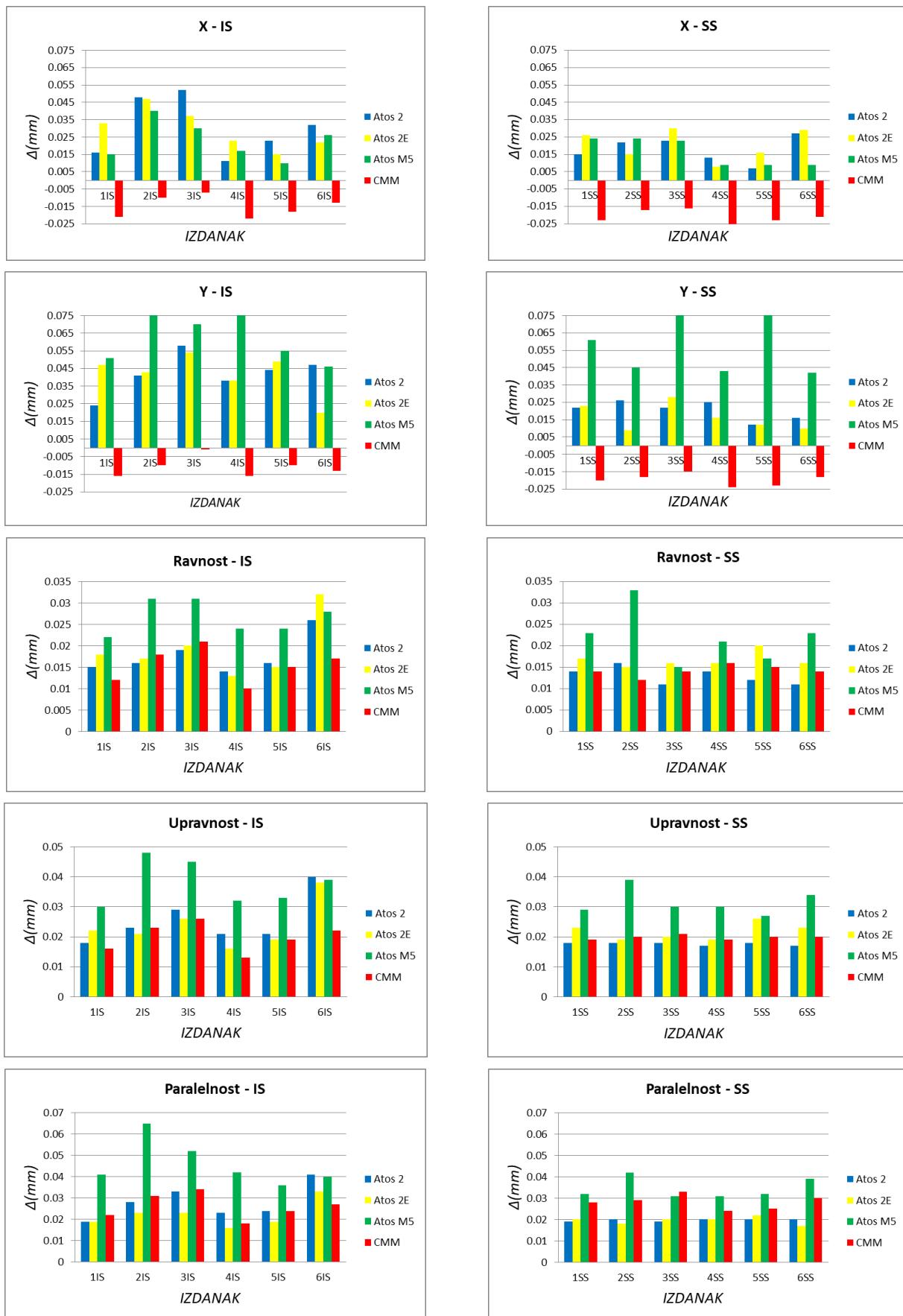
**Slika 7.** Izmerena odstupanja od upravnosti bočnih površina izdanka u odnosu na referentnu gornju ravan

### 3.5. Rezultati i analiza rezultata

Rezultati izmerenih prosečnih vrednosti dimenzionalnih odstupanja u  $X$  i  $Y$  pravcu ( $\Delta X$ ,  $\Delta Y$ , mm) i prosečnih geometrijskih odstupanja (– - od ravnosti,  $\perp$  - od upravnosti i  $\parallel$  - od paralelnosti, sve u mm) po izdanku, dati su u tabeli 2.

**Tabela 2.** Rezultati merenja dimenzionalnih i geometrijskih odstupanja

Odstupanje, mm	Uredjaj	Izdanci – Istosmerno glodanje						Izdanci – Suprotnosmerno glodanje					
		1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
$\Delta X$	CMM	-0,021	-0,010	-0,007	-0,022	-0,018	-0,013	-0,023	-0,017	-0,016	-0,027	-0,023	-0,021
	ATOS II	0,016	0,048	0,052	0,011	0,023	0,032	0,015	0,022	0,023	0,013	0,007	0,027
	ATOS IIe	0,033	0,047	0,037	0,023	0,015	0,022	0,026	0,015	0,030	0,008	0,016	0,029
	ATOS M5	0,015	0,040	0,030	0,017	0,010	0,026	0,024	0,024	0,023	0,009	0,009	0,009
$\Delta Y$	CMM	-0,016	-0,010	-0,001	-0,016	-0,010	-0,013	-0,020	-0,018	-0,015	-0,024	-0,023	-0,018
	ATOS II	0,024	0,041	0,058	0,038	0,044	0,047	0,022	0,026	0,022	0,025	0,012	0,016
	ATOS IIe	0,047	0,043	0,054	0,038	0,049	0,020	0,023	0,009	0,028	0,016	0,012	0,010
	ATOS M5	0,051	0,085	0,070	0,081	0,055	0,046	0,061	0,045	0,115	0,043	0,086	0,042
–	CMM	0,012	0,018	0,021	0,010	0,015	0,017	0,014	0,012	0,014	0,016	0,015	0,014
	ATOS II	0,015	0,016	0,019	0,014	0,016	0,026	0,014	0,016	0,011	0,014	0,012	0,011
	ATOS IIe	0,018	0,017	0,020	0,013	0,015	0,032	0,017	0,015	0,016	0,016	0,020	0,016
	ATOS M5	0,022	0,031	0,031	0,024	0,024	0,028	0,023	0,033	0,015	0,021	0,017	0,023
$\perp$	CMM	0,016	0,023	0,026	0,013	0,019	0,022	0,019	0,020	0,021	0,019	0,020	0,020
	ATOS II	0,018	0,023	0,029	0,021	0,021	0,040	0,018	0,018	0,018	0,017	0,018	0,017
	ATOS IIe	0,022	0,021	0,026	0,016	0,019	0,038	0,023	0,019	0,020	0,019	0,026	0,023
	ATOS M5	0,030	0,048	0,045	0,032	0,033	0,039	0,029	0,039	0,030	0,030	0,027	0,034
$\parallel$	CMM	0,022	0,031	0,034	0,018	0,024	0,027	0,028	0,029	0,033	0,024	0,025	0,030
	ATOS II	0,019	0,028	0,033	0,023	0,024	0,041	0,019	0,020	0,019	0,020	0,020	0,020
	ATOS IIe	0,019	0,023	0,023	0,016	0,019	0,033	0,020	0,018	0,020	0,020	0,022	0,017
	ATOS M5	0,041	0,065	0,052	0,042	0,036	0,040	0,032	0,042	0,031	0,031	0,032	0,039



**Slika 8.** Poređenje dimenzionalnih i geometrijskih odstupanja za istosmerno (IS) i suprotnosmerreno (SS) glodanje

Polazna hipoteza je da su rezultati dobijeni na CMM tačniji, pa su isti izabrani za referentne, i na osnovu njih izvedeni komentari u vezi tačnosti korišćenih skenera.

Na osnovu dijagrama prikazanih na slici 8 može se zaključiti da razlike u odstupanju izmerenih vrednosti, dobijenih na različitim skenerima, odnosno dobijenih merenjem na CMM postoje.

Određivanjem srednje vrednosti odstupanja skenera u odnosu na odstupanja izmerena na mernoj mašini konstatovano je da je model skenera ATOS M5 pokazao najveće odstupanje, njega sledi skener tipa ATOS II, dok je najmanje ukupno odstupanje u odnosu na CMM postignuto skenerom tipa ATOS IIe.

#### 4. ZAKLJUČAK

Iako se koordinatna merna mašina smatra standardom u metrologiji, optički i laserski bezkontaktni uređaji za inspekciju (skeneri) su revolucija u inspekcijskim aplikacijama iz razloga bržeg merenja, većeg broja mernih tačaka, mogućnosti merenja fleksibilnih materijala kao i mogućnosti merenja direktno na mašini. Pa je za očekivati da će, uz dodatnim povećanjem preciznosti i razvojem softvera, postati glavno sredstvo za inspekciju u industriji.

Navedeni eksperimenti su pokazali da razlike između izmerenih odstupanja postoje (iako su neznatne) i da putem daljih istraživanja treba raditi na preciznijem definisanju i praćenju uslova u mernom okruženju, izboru metode aproksimacije i procesiranja površina, kako bi se povećala tačnost uređaja za inspekciju 3D skeniranjem.

#### ZAHVALNOST

This paper is part of project **TR35034** The research of modern non-conventional technologies application in manufacturing companies with the aim of increase efficiency of use, product quality, reduce of costs and save energy and materials, funded by the Ministry of Education, Science and

Technological Development of Republic of Serbia.

#### LITERATURA

- [1] D. Flack: CMM verification (National Physical Laboratory). Measurement Good Practice Guide. No. 42, 2011.
- [2] J. Xu, N. Xi, C. Zhang, J. Zhao, B. Gao, Q. Shi: Rapid 3D surface profile measurement of industrial parts using two-level structured light patterns, Optics and Lasers in Engineering, Vol. 49, pp. 907–914, 2011.
- [3] K. Harding: *Handbook of Optical Dimensional Metrology*, Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [4] S. Zhang: *Handbook of 3D Machine Vision: Optical Metrology and Imaging*, Boca Raton: CRC Press, 2013.
- [5] S. Martínez, E. Cuesta, J. Barreiro, B. Álvarez: Analysis of laser scanning and strategies for dimensional and geometrical control, Int J Adv Manuf Technol, Vol. 46, pp. 621–629, 2010.
- [6] R. Mendricky: Determination Of Measurement Accuracy Of Optical 3d Scanners, Mm Science Journal, pp. 1565-1572, 2016.
- [7] W. Boehler, A. Marbs: 3D scanning instruments, In: *Proceedings of the International workshop on Scanning for Cultural Heritage Recording*, 01-02.09.2002, Corfu, Greece, pp. 9–12.
- [8] T. Varady, R. Martin, J. Cox: Reverse engineering of geometric models - an introduction, Computer-Aided Design, Vol. 29, No. 4, pp. 255–68. 1997.
- [9] F. Isgro, F. Odone, A. Verri: An open system for 3D data acquisition from multiple sensors. In: *Proceedings of the seventh international workshop on Computer Architecture for Machine Perception (CAMP'05)*, 04-06.07.2005, Universita di Genova, Italy, pp. 52–57.
- [10] W.R. Scott, G. Roth, J.F. Rivest: View planning for automated three-dimensional object reconstruction and inspection, ACM Computing Surveys, Vol. 35, No. 1, pp. 64–96, 2003.
- [11] Z.M. Bi, L. Wang: Advances in 3D data acquisition and processing for industrial applications, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 26, pp. 403–413, 2010.
- [12] A. Kilpelä: Pulsed Time-Of-Flight Laser Range Finder Techniques For Fast, High Precision

Measurement Applications, Academic Dissertation to be presented with the assent of the Faculty of Technology, University of Oulu, for public discussion in Raahensali (Auditorium L10), Linnanmaa, 2004.

[13] G. Sansoni, M. Trebeschi, F. Docchio: State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation, Sensors, Vol. 9, pp. 568-601, 2009.

## APPLICATION OF NONCONCACT MEASURING SYSTEMS FOR INSPECTION OF PARTS AFTER CUTTING

**Abstract:** Even though coordinate measuring machines (CMMs) still achieve most accurate measuring results, more and more often in industry noncontact laser and optical measuring systems (scanners) are used. Reasons of using scanners are in its higher acquisition speed, higher density of data-points, better surface description, the possibility of scanning complex and soft surfaces etc. This paper gives a short description of contact and noncontact devices, principles and systems that are used in data acquisition, and basic advantages and disadvantages. Within the experiment, results of testing possibilities of using (verification) devices for 3D scanning for inspection of dimensional and geometrical accuracy of prismatic shaped parts obtained with processing on CNC mill. The procedure of generating surfaces from a point cloud obtained from a scanner and the procedure of measuring in Gom Inspect software is shown. The analyzed results of measuring obtained with different optical scanners relative to the results obtained using CMM are compared.

**Keywords:** scanner, cmm, measuring, inspection, deviation, device



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## UTICAJ VRSTE ZAVARENOG SPOJA NA BALISTIČKA SVOJSTVA PANCIRNOG ČELIKA ARMOX 500T

Vukić LAZIĆ<sup>1</sup>, Dušan ARSIĆ<sup>1\*</sup>, Milorad RAKIČEVIĆ<sup>1</sup>, Srbislav ALEKSANDROVIĆ<sup>1</sup>,  
Milan ĐORĐEVIĆ<sup>2</sup>, Petar MARINKOVIĆ<sup>4</sup>, Nada RATKOVIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, University of Kragujevac, Kragujevac, Serbia, vlazic@kg.ac.rs,  
dusan.arsic@fink.rs, rakicevicmikica@gmail.com, srba@kg.ac.rs, nratkovic@kg.ac.rs

<sup>3</sup> Faculty of Technical Sciences, University of Priština, Kosovska Mitrovica, Serbia, tpolab@fink.rs

<sup>4</sup> DLS Special systems, Kragujevac, Serbia, dlsoffice@dlssystem.com

\*Corresponding author: dusan.arsic@fink.rs

**Rezime:** Čelici klase ARMOX pripadaju grupi finozrnih čelika povišene jačine koji se proizvode kaljenjem i niskim otpuštanjem uz intenzivnu termo-mehaničku obradu na povišenim temperaturama. Kombinacija termičke i mehaničke obrade obezbeđuje sitno metalno zrno izuzetno povoljne mehaničke karakteristike čelika, dok nisko otpuštanje obezbeđuje relativno visoku tvrdoću i dobra balistička svojstva. Stoga je moguće da se usled zavarivanja te povoljne mehaničke i balističke osobine naruše. Modelske ploče za ispitivanje su zavarene po propisanoj tehnologiji i to: sučevni spoj, ivični spoj i ivični spoj sa zaštitom. U ovom radu su prikazani rezultati dobijeni balističkim ispitivanjem zavarenih ploča pucanjem sa tri vrste municije u sve vrste zavarenih spojeva. Cilj istraživanja je da se utvrdi najkritičnije mesto na zavarenim pločama iz aspekta balističke otpornosti na projektil.

**Ključne reči:** ARMOX 500T, zavarivanje, balistička svojstva, municija, zavareni spoj, zona uticaja toplote.

### 1. UVOD

Borbena vozila za pešadiju nastala su iz težnje ka povećanju efikasnosti tenkova i mogućnosti njihovog opstanka na bojnom polju. Tu se javio problem razvoja oklopa koji će sprečiti prođor projektila streljačke i protivoklopne municije u vozilo, a u isto vreme ostvariti što bolje taktičko-tehničke i borbeno-eksploatacione karakteristike. S obzirom na navedene zahteve, neminovno dolazi do razvoja posebne grupe čelika povišene jačine,

pod nazivom pancirni čelici, koji se od tada neprestano razvijaju [1].

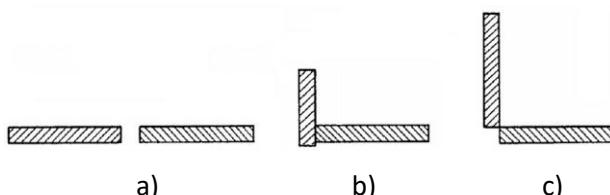
Švedska kompanija SSAB Oxelösund u svom proizvodnom programu ima čelike povišene jačine, a posebno se izdvaja grupa pancirnih čelika pod komercijalnom oznakom ARMOX koji se proizvode po strogo definisanim postupcima proizvodnje [2]. Njihove odlične osobine proizlaze iz načina njihove prozvodnje. Imaju veoma mali sadržaj ugljenika što povoljno utiče na zavarljivost, a jačina se postiže primenom termomehaničke obrade (TMO) [2, 3]. Međutim, uprkos njihovim

izvanrednim osobinama, pri zavarivanju oklopne konstrukcije, lokalno dolazi do pogoršanja osobina usled unete toploote. Takva mesta na konstrukciji predstavljaju kritična mesta i cilj ovog rada je da pokaže kako se ta mesta (različite vrste zavarenih spojeva) ponašaju u uslovima kada ih pogode projektili različitog tipa.

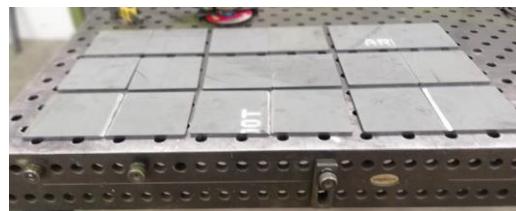
## 2. ZAVARIVANJE PLOČA ZA IZRADU UZORAKA

Zavareni spojevi na borbenim vozilima izrađenim od ovog ili nekog drugog pancirnog čelika, predstavljaju najranjivije mesto cele konstrukcije. Razlog je taj da se pri zavarivanju pancirnih čelika moraju primeniti dodatni materijali koji daju metal šava znatno manje jačine u odnosu na osnovni materijal, u suprotnom došlo bi do pojave hladnih prslina jer su pancirni čelici veoma zakaljivi. Pored toga, ovaj čelik spada u uslovno zavarljive čelike, što znači da se moraju primeniti i odgovarajuće mere pri zavarivanju. Jedna od najbitnijih je kontrolisani unos toplote što SSAB jasno izlaže u specifikacijama ovog čelika i ograničava unos toplote na 200°C, jer na većim temperaturama dolazi do prekomernog otpuštanja i gubitka svih povoljnih osobina dobijenih pomoću TMO. U radu su date preporuke koje je neophodno ispoštovati u cilju dobijanja što kvalitetnijih zavarenih spojeva, kao i preporučene tehnologije zavarivanja, sve na osnovu preporuka proizvođača, kao i stručnjaka koji su se bavili ovim problemima.

Ispitni uzorci koji su potrebni za balistička ispitivanja osnovnih zona zavarenog spoja izrađeni su u oblicima sučeonog, ugaonog i ugaono-rubno spoja (Sl. 1). Dimenzije ploča čelika ARMOX 500T dimenzija 200×200×8.6 mm su bile i ploče su isečene na laseru.



**Slika 1.** Shematski prikaz a) sučeonog, b) ugaonog i v) rubnog spoja



**Slika 2.** Pripremljene ploče za zavarivanje

Za zavarivanje je korišćen MAG postupak a parametri zavarivanja zavarivanja su prikazani u tabeli 1 dok je na slici 3 dat izgled ploča posle zavarivanja za sva tri slučaja.

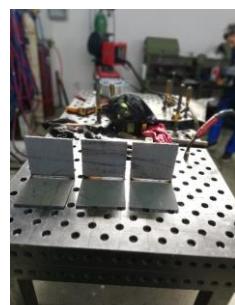
**Tabela 1.** Parametri zavarivanja ploča

1.	Vrsta žleba	V
	Način pripreme	brušenje
2.	Prečnik žice	1.0 mm
	Vrsta	
3.	Vrsta zaštitnog gasa	Ar + 2.5
	Temperatura predgrevanja	125-175°C
	Međuprolazna temperatura	150-175°C
	Postupak merenja	termokrede
4.	Pribor za zagrevanje	gasni plamen
	Postupak zavarivanja	135 (MAG)
	Položaj zavarivanja	PA
	Tehnologija zavarivanja	ulevo/75°
	Jačina struje	190-210 A
	Napon luka	24.5 V
	Vrsta struje	DC
	Polaritet	+
	Brzina dodavanja žice	6 m/min
	Brzina zavarivanja	21 cm/min
	Protok gasa	18 l/min
	Broj prolaza	2
	Pogonska energija	≈ 11000 J/cm

Prikazani parametri zavarivanja su uz neznatne izmene korišćeni za zavarivanje svih vrsta spojeva.



a)



b)

**Slika 3.** Zavarene ploče: a) Sučevi spoj, b) Ugaoni spoj, i c) Rubni spoj sa zaštitom



c)

**Slika 3 (nastavak).** Zavarene ploče: a) Sučevni spoj, b) Ugaoni spoj, i c) Rubni spoj sa zaštitom

### 3. ISPITIVANJE BALISTIČKE OTPORNOSTI OSNOVNIH ZONA ZAVARENIH SPOJEVA

Mnoge zemlje imaju propisane standarde koji se odnose za nivoe balističke zaštite, ali najčešće korišćeni od strane proizvođača ARMOX-a, pre svega zbog svojih kupaca, su STANAG 4569 (Tabl. 2) koji propisuje NATO i EN 1522 [3] koji je propisan od strane UN-a. Standard STANAG 4569 odnosi se na stepene zaštite za logistička i laka oklopna vozila i u najvećoj meri se koristi pri izradi konstrukcija ovog tipa.

**Tabela 2.** Standard STANAG 4569 NATO

Nivo	Vrsta oružja	Kalibar	Rastojanje, m	Brzina, m/s
I	Puška	7.62×51 NATO Ball	30	833
		5.56×45 NATO SS109		900
		5.56×45 M193		937
II	Pešadijska puška	7.62×39 API BZ	30	695
III	Snajperska puška	7.62×51 AP (WC core)	30	930
		7.62×54R B32 API		854
IV	Mitraljez	14.5×114AP /B32	200	911
V	Automatski top	25 mm APDS-TM-791	500	1258

Standard uključuje pretnje balističkih projektila, malih i srednjih kalibara, kao i fragmente koji simuliraju penetratore u cilju simuliranja artiljerijskih dejstava. Namjenjen je ponovljivim postupcima ispitivanja za ocenu balističke zaštite delova oklopnih vozila i za utvrđivanje kritičnih zona na vozilima. Pretnje su podeljene u pet različitih nivoa, gde je prvi nivo namenjen civilnim pretnjama, dok su ostali nivoi namenjeni za različite stepene vojnih pretnji.

#### 3.1 REZULTATI BALISTIČKOG TESTA

Iako su uzorci izrađeni tako da budu po tri u svakoj grupi (sučevni, ugaoni i ugaono-rubni), ispitivanje na balistička opterećenja izvedena su samo na po jednom uzorku iz svake grupe. To je urađeno, pre svega, zbog složenosti eksperimenta, a pored toga dobijeni podaci su bili dovoljni da se proceni otpornost. Cilj ovog eksperimenta je oceniti stepen oštećenja, odnosno tip proboga na osnovnim zonama zavarenog spoja (osnovnom materijalu-OM, zoni uticaja toplote-ZUT, zoni stapanja-ZS i na metalu šava-MŠ) municijom vrste 7.62×39.

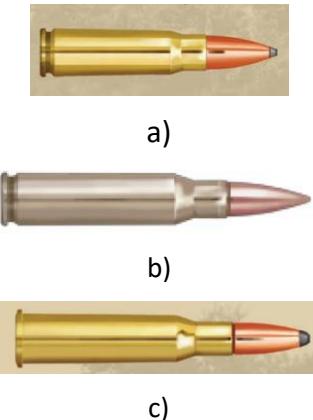
M67 Ball, 7.62 × 51 NATO Ball (Ball M80) i pancirnim metkom 7.62 × 54R B32 API (Dragunov). Metak 7.62 × 39 M67 Ball nije po zaštitnim nivoima koje NATO propisuje, već po ruskim standardima balističke zaštite za koji SSAB ne garantuje.

Eksperiment je izведен na opitnom poligonu firme Prvi Partizan d.o.o u Užicu koja poseduje višedecenijsko iskustvo u proizvodnji municije i ispitivanjima ove vrste. Na opitnom poligonu sprovode se završna, verifikaciona i homologaciona ispitivanja municije pre isporuke. Eksperiment su izvela stručna lica po odgovarajućim standardima.

Oprema za izvođenje opita se sastojala iz:

- Opitne cevi sa zatvaračem za merenje brzine, u kalibru 7.62 x 39mm,
- Opitne cevi sa zatvaračem za merenje brzine, u kalibru 7.62 x 51mm,
- Opitne cevi sa zatvaračem za merenje brzine, u kalibru 7.62 x 54mm,
- Postolja za opitnu cev,

- Municije 7.62 x 39 M67 Ball, brzina  $v_{25} = 725 m/s$  (Sl. 4a; Tabl. 2),
- Municije 7.62 x 51 NATO Ball (Ball M80), brzina  $v_{25} = 830 m/s$  (Sl. 4b; Tabl. 2), i
- Municije 7.62 x 54R B32 API, brzina  $v_{25} = 790 m/s$  (Sl. 4c; Tabl. 2).



**Slika 4.** Izgled korišćene municije: a) 7.62x39 M67 Ball, b) 7.62x51 NATO Ball (Ball M80), i c) 7.62x54R B32 API [3]

Uzorci pancirnog čelika su pre početka eksperimenta pozicionirani čvrsto u drvenim okvirima kako ne bi došlo do gubitka energije usled pomeranja ploča pri udaru metka. Rastojanje izlaznog otvora opitne cevi do uzorka je 10 m. Po planu eksperimenta zavareni spojevi su postavljeni tako da zavar bude upravan na pravac kretanja metka, što će kod ugaonog i ugaono-rubnog spoja pokazati ponašanje osnovnog materijala i zone uticaja toplote pri udaru metka pod ugлом.

Zaključci o ponašanju zavarenih ploča su doneti na osnovu vizuelnog pregleda sučeonog spoja posle završenog eksperimenta (Sl. 5). Ispaljeno je ukupno 10 projektila tri različita kalibra, a ukoliko je do probroja došlo, tip probroja usvojen je prema utvrđenim načinima perforacije oklopa [4].



**Slika 5.** Prikaz ispitanog uzorka sučeonog spoja sa ulazne strane [3]

Kada je ocenjeno stanje sučeonog spoja na balistička opterećenja pristupljeno je fiksiranju

ugaonog spoja, takođe u drveni okvir. Ispaljeno je ukupno 9 projektila tri različita kalibra. Na slici 6 prikazana je ulazna strana ugaonog spoja.



**Slika 6.** Prikaz ispitanog uzorka ugaonog spoja sa ulazne strane [3]

Probijena mesta-perforacije (Sl. 6) su takva da su karakteristična za udare projektila sa šiljatim vrhom u oklope male debljine, ali i u nekim slučajevima javlja se i pri udarima projektila sa ravnim vrhom pri brzinama koje su približne graničnim brzinama probijanja. Posledice probijanja za ovaj način perforacije karakteristične su po tome što oblik rupe sa izlazne strane oklopa liči na latice cveta.



**Slika 7.** Prikaz ispitanog uzorka ugaonog spoja sa zaštitom sa: a) Ulazne, i b) Izlazne strane

Na kraju je ispitana ugaono-rubni spoj koji, kako je već napomenuto, sa unutrašnje strane ima pločice od istog materijala koje bi idejno trebalo da predstavljaju dodatnu zaštitu u slučaju probroja metala šava i njegove okoline. Ispaljeno je ukupno 8 projektila tri različita kalibra u karakteristične zone zavarenog spoja. Rezultati su prikazani na slici 7. Na uzorku je

izvršen vizuelni ulazne (Sl. 7a) i izlazne strane (Sl. 7b) uzorka.

Prvi način prikazan na slici 7a pri kojem dolazi do izbijanja čepa iz oklopa (engl. plugging), gde čep (engl. plug) nastaje usled udara projektila sa ravnim ili hemisferičnim vrhom pri brzini koja je oko granične brzine probijanja (najmanja brzina pri kojoj projektil perforira oklop). Čep nastaje usled dejstva adijabatskog smicanja pri čemu dolazi do formiranja područja smicajnih napona.

#### 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu je razmatrana zavarljivost pancirnog čelika ARMOX 500T koji spada u grupu čelika povišene jačine, te je na početku ovog rada ukazano je na njihove povoljne osobine, data je podela, kao i problemi koji se javljaju u toku zavarivanja za različite grupe čelika povišene jačine. Budući da su skloni nastanku hladnih prslina date su preporuke i mere za njihovo sprečavanje.

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da su OM, ZUT i MŠ otporni na metkove kalibra 7.62x39. Ispitivanjem municijom kalibra 7.62x51 pokazalo se da je samo OM zona otporna na proboj. Za pancirnu municiju kalibra 7.62x54R nema prepreka, sve zone su ugrožene, pa čak i ojačanja postavljena kod ugaono-rubnog spoja.

Na osnovu dobijenih rezultata i njihovog razmatranja, kod konstrukcija koje su izložene dejstvu projektila, projektovati zavarene

spojeve tako da metal šava uvek bude sakriven koliko god je moguće, a sučevni spoj strogo izbegavati.

#### ZAHVALNOST

Ovo istraživanje je delimično podržano od strane projekta Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije kroz projekat TR 35024. Autori su na pomoći zahvalni i firmama DLS Specijalni Sistemi Beograd, razvojni centar Kragujevac, Srbija i Prvi Partizan Užice, Srbija.

#### LITERATURA

- [1] D. Arsić, R. Nikolić, V. Lazić, B. Hadzima, S. Aleksandrović, M. Đorđević: Weldability estimates of some high strength steels, u: *Proceedings of the 42. International Conference Zvaranie*, 12-14. 11. 2014, Tatranská Lomnica, Slovakia, pp. 11-21.
- [2] <https://www.ssab.com/products/brands/armox>
- [3] V. Lazić, D. Arsić, R. R. Nikolić, D. Djordjević, R. Prokić-Cvetković, O. Popović: Application of the high strength steel HARDOX 450 for manufacturing of assemblies in the military industry, *Key Engineering Materials*, Vol. 755, pp. 96-105, 2017.
- [4] M. Rakićević: *Estimation of weldability and selection of optimal welding technology of bulletproof steel ARMOX 500T*, MSc thesis, Faculty of Engineering, University of Kragujevac, Kragujevac, Serbia, 2018. (in Serbian).

## INFLUENCE OF THE WELDING JOINT TYPE ON BALLISTIC PROPERTIES OF THE ARMOUR STEEL ARMOX 500T

**Abstract:** Steels of the ARMOX class belong into a group of the fine-grained increased strength steels, which are manufactured by the quenching and low-tempering procedure, with intensive thermo-mechanical treatment at high temperatures. Combination of the heat and mechanical treatments provides for the fine grains and exceptionally good properties of these steels, while the low-tempering enables relatively high hardness and good ballistic properties. This is why the welding of these steels can negatively affect the material properties in individual zones of the welded joint what could lead to worsening of the material's ballistic properties, as well. The model plates were welded with the specially prescribed technology; the joints were the but-joint, corner joint and the joint with the shielding plate. In this paper are presented results obtained from the ballistic tests of the plates welded by the prescribed technology; tests consisted of shooting with three types of live ammunition at different types of the welded joints.

**Key words:** ARMOX 500T, welding, ballistic properties, ammunition, welded joint, heat affected zone



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## ISTORIJA RAZVOJA CNC MAŠINA ALATKI U SRBIJI

Ljubomir LUKIĆ<sup>1,\*</sup>, Mirko ĐAPIĆ<sup>1,\*</sup>, Aleksandra PETROVIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Univerzitet u Kragujevcu

Kragujevac, Srbija

\*Korespondentni autor: ljubomir.lukic@sbb.rs

**Abstrakt:** Puštanjem u rad Topolivnice u Kragujevcu 1854. godine, kao prvog industrijskog kompleksa u Srbiji, počeli su da dolaze srpski inženjeri školovani u inostranstvu u Kragujevac. Iz Nemačke je došao Todor Toša Selesković, prvi konstruktor mašina u Srbiji i profesor Mehaničke tehnologije na Tehničkom fakultetu u Beogradu. Pored Vojno-tehničkog zavoda u Kragujevcu, Mašinsko odelenje Direkcije srpskih državnih železnica pri Ministarstvu građevina, osnovano 1889. godine, postalo je drugi centar okupljanja inženjera u Srbiji. Među njima su Svetozar Zorić, prvi profesor Nauke o mašinama i Aćim Stevović, prvi profesor Mašina alatki na Tehničkom fakultetu u Beogradu. Na Mašinskom fakultetu u Beogradu diplomiralo je prvih pet inženjera kod profesora Pavla Stankovića na Mašinama alatkama istorijske 1948. godine. Oni su raspoređeni na rad u novoizgrađenu Fabriku teških mašina alatki Ivo Lola Ribar u Železniku, koja je puštena u rad 1. januara 1948. godine, od kada počinje istorija razvoja CNC mašina alatki u Srbiji. U radu su prikazana ostvarenja domaće industrije mašina alatki, koja su bila veoma zapažena na svetskom tržištu. Ova dostignuća treba da budu sačuvana od zaborava, kao inspiracija budućim generacijama inženjera proizvodnog mašinstva. Prestankom rada fabrike Ivo Lola Ribar, tranzicijom i razgradnjom čitavog metalskog kompleksa završava se pola veka intenzivnog razvoja CNC mašina alatki u Srbiji.

**Ključne reči:** Proizvodno mašinstvo, CNC mašine alatke, Ivo Lola Ribar, obradni centri, robotski sistemi

### 1. KRATAK ISTORIJAT RAZVOJA PROIZVODNOG MAŠINSTVA U SRBIJI

Dositej Obradović (1742-1811) je osnovao 1808. godine Veliku školu u Beogradu, koja je radila do 1813. godine, a Licej je osnovan 1838. godine u Kragujevcu u okviru koga nije postajao program obrazovanja inženjera. Transformacijom Liceja u Veliku školu u Beogradu 1863. godine osnovan je Tehnički fakultet. Zbog potreba izgradnje srpske železnice, na Tehničkom fakultetu je uveden predmet Mehanika i nauka o mašinama 1873. godine, koji je predavao profesor Ljubomir

Klerić (1844-1910). Ova godina se smatra početkom visokoškolskog obrazovanja mašinskih inženjera u Srbiji [1]. Predmet Mehanika postaje samostalan, a novi predmet Nauku o mašinama od 1887. godine predaje inženjer Svetozar Zorić (1853-1931), dotadašnji šef niške radionice Mašinskog odelenja Srpske državne železnice. On je osnivač Mašinskog odseka na Tehničkom fakultetu Velike škole u Beogradu i njegov dugogodišnji starešina [2].

Prvi Srbin koji je konstruisao maštne alatke i tehničku opremu je bio Todor Selesković (1856-1901), inženjer Vojno-tehničkog zavoda u Kragujevcu [3]. Radio je u nemačkoj fabrici

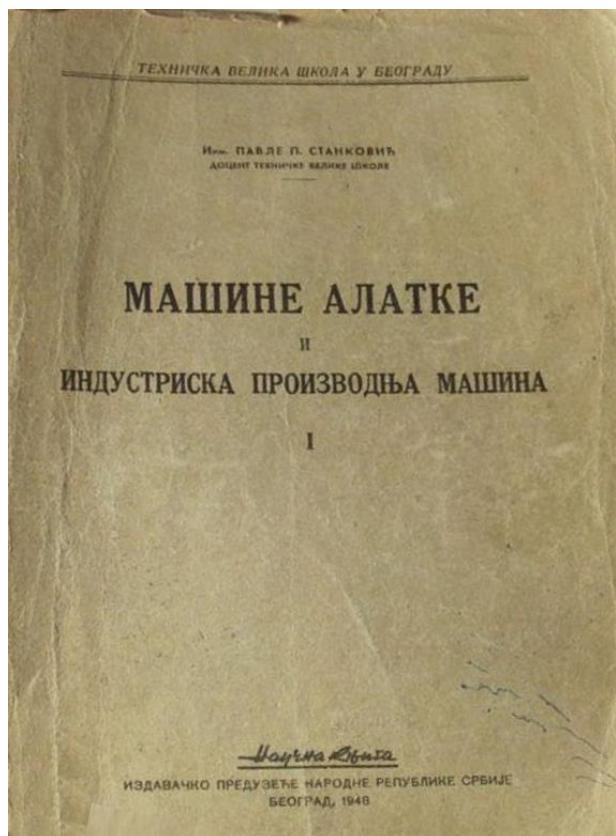
Lorenz u Karlsruhe i kao veliki srpski patriota došao je u Kragujevac 1881. godine. Kao njistaknutiji srpski inženjer tog vremena izabran je za profesora Mehaničke tehnologije 1895. godine na Tehničkom fakultetu Velike škole u Beogradu. On je presudno uticao da se formira 1897. godine poseban Mašinsko-tehnički odsek Tehničkog fakulteta.

Velika škola 1905. godine prerasta u Univerzitet u Beogradu i naredne 1906. godine se uvodi predmet Mašine alatlike, koji predaje inženjer Aćim Stevović (1866-1957), što se smatra početkom univerzitetskog obrazovanja u oblasti proizvodnog mašinstva u Srbiji [4]. Na Tehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu formiran je 1922. godine poseban Mašinsko-elektrotehnički odsek, a predmet Mašine alatke predaje profesor Aleksandar Ivanović Kosicki (1880-1954) sve do početka Drugog svetskog rata [5]. On je 1932. godine objavio prvi univerzitetski udžbenik za mašine alatke (Sl. 1), koji je narednih 15 godina bio jedini priručnik iz proizvodnog mašinstva.



**Slika 1.** Prvi univerzitetski priručnik iz oblasti proizvodnog mašinstva

Bombardovanjem Beograda 1941. godine prestao je rad Univerziteta u Beogradu, a normalizovan je tek po završetku Drugog svetskog rata. Inženjer Pavle Stanković (1909 - 1969), koji je radio kao konstruktor u fabrici aviona Zmaj u Zemunu je izabran za docenta Tehničkog fakulteta na predmetu Mašine alatke 1947. godine. Naredne 1948. godine formiran je Mašinski fakultet u Beogradu, a Pavle Stanković je objavio prvo izdanje univerzitetskog priručnika za mašine alatke i proizvodno mašinstvo (Sl. 2). Kasnije je Pavle Stanković formirao Zavod za mašine alatke i uveo moderan visokoškolski obrazovni program inženjera proizvodnog mašinstva na Mašinskom fakultetu u Beogradu.



**Slika 2.** Univerzitetski priručnik za mašine alatke autoru Pavla Stankovića objavljen 1948. godine

Tokom 1948. godine diplomiralo je prvih 27 inženjera posle Drugog svetskog rata na Mašinskom fakultetu u Beogradu. Najveći broj je diplomiralo na vazduhoplovnom smeru, dok je pet inženjera diplomiralo na temu projektovanja mašina alatki kod profesora Pavla Stankovića.

Industrijska proizvodnja mašina alatki u Srbiji pre drugog svetskog rata skoro nije ni

postojala. Udružene samostalne zanatlige su proizvodile mašine jedino u Vojvodini, koja je dugo bila pod vlašću Austro-Ugarske monarhije i gde je živeo veliki broj Nemaca i Čeha sa izraženom tehničkom kulturom, koja u centralnoj Srbiji nije postojala [6]. Prvi strug je proizveden u Adi 1921. godine, a oko 50 radnika je počelo sa radom u Livnici železa i tempera u Kikindi 1908. godine, koja je tek mnogo godina kasnije osvojila proizvodnju brusilica. Istorija razvoja proizvodnog mašinstva i CNC mašina alatki u Srbiji upravo se odvija posle Drugog svetskog rata industrijalizacijom ratom porušene zemlje u drugoj polovini prošlog veka.

## 2. FABRIKA IVO LOLA RIBAR NOSILAC RAZVOJA MAŠINA ALATKI U SRBIJI

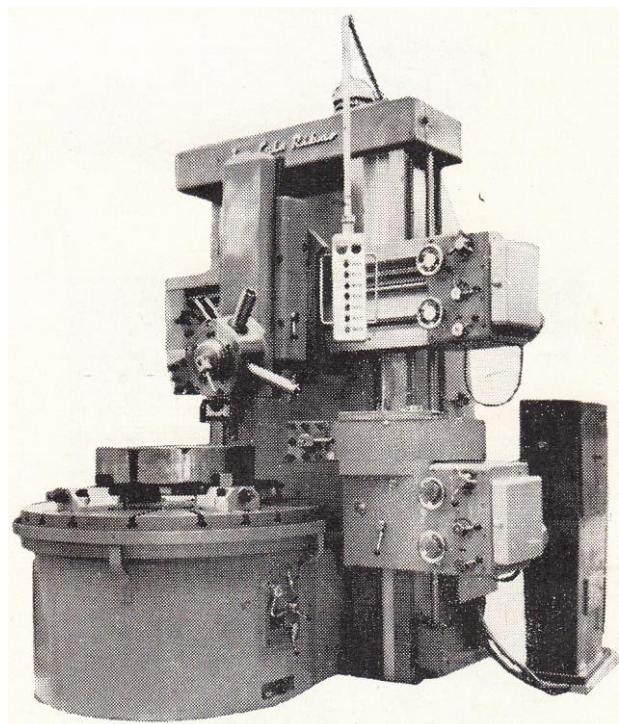
Odlukom najvišeg državnog rukovodstva na čelu sa Josipom Brozom Titom (1892-1980), počela je izgradnja 20. aprila 1947., a puštena u rad 1. januara 1948. godine nova fabrika teških mašina alatki Ivo Lola Ribar u Železniku. Fabriku su izgradile omladinske radne brigade, a prve mašine su dopremljene iz nemačke fabrike alatnih mašina Schiess Defries iz Dizeldorf-a, po odluci Međunarodnog suda o ratnoj odšteti posle Drugog svetskog rata. To je bilo vreme Informbiroa i velikih sankcija SSSR-a i zemalja istočnog bloka prema Jugoslaviji, koja je imala strategiju tehnološke nezavisnosti i sopstvenog razvoja industrije prerade metala [7].

Svi inženjeri koji su u to vreme diplomirali na mašinama alatkama kod profesora Pavla Stankovića su dolazili u Projektni biro Lole Ribara. Prvi su došli 1948. godine Aleksandar Đurković, Slobodan Korunović, Miodrag Rajković i Dušan Zogović, zatim Radovan Radovanović, Aleksandar Pavlović, Anđelija Milosavljević, Mile Benedetić, Mirko Ristić, Dušan Milosavljević, .... (Sl. 3), a bio je angažovan i profesor Pavle Stanković sa svojim diplomcima i asistentima Svetislavom Zarićem i Vladimirom Šolajom. U to vreme se cenilo svega znanje a ne politička podobnost, tako da je tehnički direktor Lole bio inženjer i predratni kraljev oficir Živorad Nešić [8].



**Slika 3.** Grupa prvih projektanata mašina alatki u projektnom birou Fabrike teških alatnih mašina Ivo Lola Ribar

U početku je program proizvodnje mašina alatki u Loli Ribaru bio veoma širok, jer su potrebe zemlje u periodu početne izgradnje metaloprerađivačke industrije bile veoma velike. Fabrika Ivo Lola Ribar je projektnu dokumentaciju za program konvencionalnih mašina alatki preneo na druge proizvođače u zemlji, a opredelio se samo za razvoj teških mašina alatki: dugohodih rendisaljki, karusel strugova (Sl. 4) i portalnih glodalica.



**Slika 4.** Jednostubni karusel strug sa revolver glavom Ivo Lola Ribar iz 1955. godine

Posebno težište razvoja Lola Ribar je usmerio na program horizontalnih bušilica-

glodalica, popularnih borveraka (Sl. 5). Plasirano je preko dve hiljade ovih kapitalnih mašina u 75 zemalja na svim kontinentima sveta. Na tržištu mašina alatki, lolini borverci su 1980-ih godina smatrani kao najbolji na svetu. Skoro svaka naša metaloprerađivačka fabrika je imala u svojim pogonima bar jedan lolin borverk.



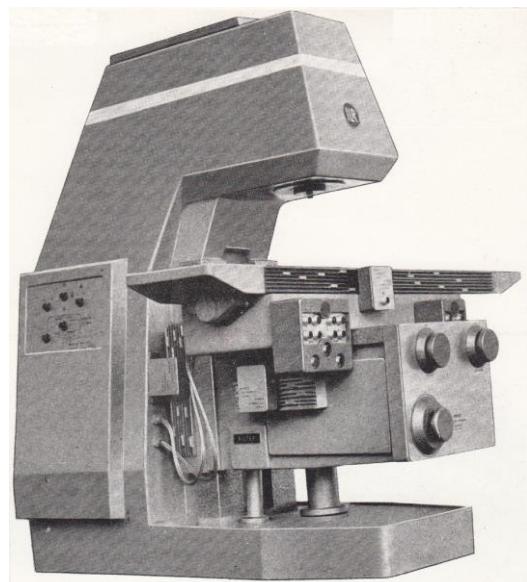
**Slika 5.** Horizontalna bužilica-glodalica HBM 4  
Ivo Lola Ribar iz 1970. godine

Lola Ribar nikada nije kupovao licence, a uvek se oslanjao na sopstveni razvoj i primenu najnovijih naučnih i tehnoloških dostignuća u svojim konstrukcijskim rešenjima.

### 3. RAZVOJ PROGRAMSKI UPRAVLJANIH MAŠINA ALATKI

U sastavu naše državne delegacije, tokom jedne zvanične posete SAD 1955. godine, je bio i profesor Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu Rajko Tomović (1919-2001), sa zadatkom da sagleda nove pravce naučnog i tehnološkog razvoja u Americi. On je tada prilikom posete Tehnološkom institutu u Masačusetsu (MIT) video projekte razvoja programskog upravljanja kretanjem alata na mašinama alatkama. Po povratku sa puta, održao je predavanje Lolinim inženjerima o novim pravcima razvoja i programskom

upravljanju mašina alatki. Ideja programskog upravljanja je odmah prihvaćena u Loli Ribaru i počeli su da se okupljaju inženjeri mašinstva i elektrotehnike na novim projektima razvoja upravljanja mašinama alatkama. Tako je Lola Ribar među prvima u Evropi počeo sa razvojem CNC mašina alatki (Sl. 6). Kada su u to vreme lolini inženjeri predstavili svoje projekte u ENIMS-u, najvećem institutu za maštne alatke u SSSR-u, tada je direktor ENIMS-a izjavio da je Lola Ribar naseo američkoj imperijalističkoj propagandi. Lola Ribar je nastavio sa razvojem CNC mašina alatki i nastupao na najpoznatijim sajmovima tehnike širom Evrope (Sl. 7).



**Slika 6.** Prva vertikalna glodalica sa kontaktnim programskim upravljanjem Ivo Lola Ribar proizvedena 1963. godine



**Slika 7.** Vertikalna glodalica sa programskim upravljanjem Ivo Lola Ribar, na Sajmu tehnike u Beogradu 1965. godine

Visok domet je ostavljen 1968. godine, kada je Lola Ribar razvio horizontalnu bušilicu-glodalicu Bematic 80 (Sl. 8). Ova programski upravljana mašina je izazvala izuzetnu pažnju na međunarodnim sajmovima u Moskvi i Štokholmu. Zahvaljujući tome, Lola Ribar je postao važan partner (a ne kupac licenci) najpoznatijim nemačkim fabrikama (Burr, Wotan, Waldrich Coburg, Weingarten, Schiess, Steinle, Gildemeister, ... ).



**Slika 8.** Prva savremena mašina alatka sa programskim upravljanjem Bematic 80 proizvedena u Loli Ribaru 1968. godine

Lola Ribar je bio među prvim kompanijama u Evropi, koje su počele razvoj i proizvodnju CNC mašina alatki, a primenom sistema modularnog projektovanja, sopstvenim razvojem digitalnih računarsko-upravljačkih sistema i kontrolera, Srbija se pozicionirala na svetskoj mapi najpoznatijih proizvođača CNC mašina alatki.

#### 4. CNC MAŠINE ALATKE SAVREMENE KONSTRUKCIJE

Početkom 1970-ih godina Lola Ribar je strategiju svog razvoja usmerio u program CNC mašina alatki, obradnih centara i fleksibilnih tehnoloških sistema [8]. Najpre su razvijeni borverci sa CNC upravljačkim sistemima Siemens i Bosch, a zatim je razvijen čitav

spektar modernih teških CNC mašina alatki (Sl. 9, Sl. 10), koje su prikazane na svim najznačajnijim sajmovima u svetu.

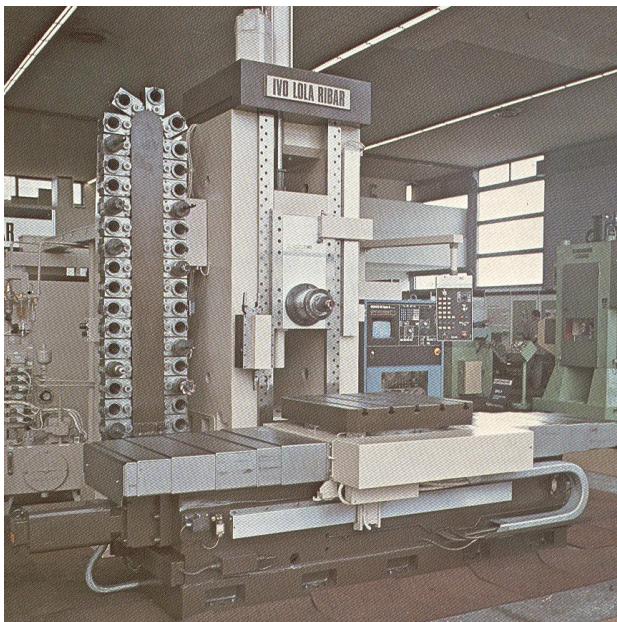


**Slika 9.** Lolina vertikalna bušilica-glodalica VRBG-40CNC sa evolverskom glavom



**Slika 10.** Portalna bušilica-glodalica KGB-80CNC Ivo Lola Ribar

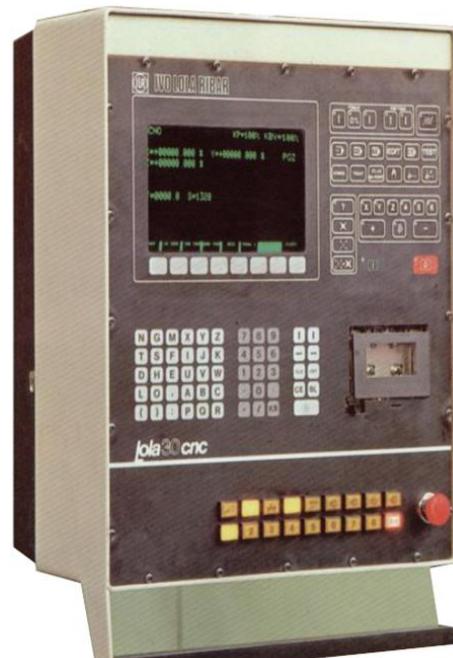
Intenzivni razvoj industrije prerade metala 1970-ih godina je pokazao da teorija Frederika Tajlora (1856-1915) i principi grupne tehnologije S.P. Mitrofanova (1915-2003) nisu adekvatni u uslovima sve složenijih proizvoda u manjim serijama, a sa kraćim životnim vekom trajanja. Lola Ribar je među prvima u Evropi počeo razvoj obradnih centara, jer najveći deo vremena u obradnom procesu pripada manipulaciji alatom i obratkom a ne samom procesu rezanja, kada je alat u zahvatu sa materijalom obratka. Prvi obradni centar proizveden je u Loli Ribaru 1980. godine i danas se nalazi u Zavodu za mašine alatke Mašinskog fakulteta u Beogradu (Sl. 11).



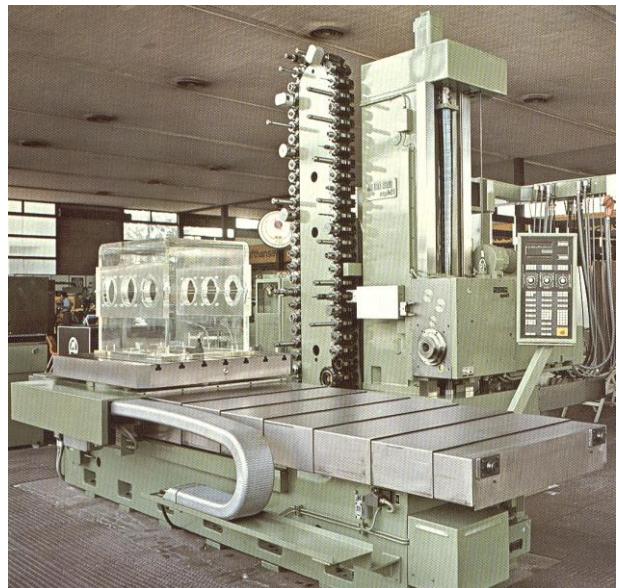
**Slika 11.** Prvi obradni centar HBG 800C proizveden u Loli Ribaru 1980. godine

Lola Ribar je u periodu 1980-ih godina razvio veliki broj familija i tipova horizontalnih obradnih centara, koji su bili zapaženi širom sveta. Istovremeno sa razvojem obradnih centara, Lola Ribar je formirao i sopstveni Lola institut kao i fabriku industrijskih računara, gde je počeo sopstveni razvoj i proizvodnju PLC kontrolera i CNC računarsko-upravljačkih sistema. Prvi CNC računari Lola 30CNC (Sl. 12) su razvijeni u Loli Ribaru i instalirani na mašinama alatkama 1985. godine. Veoma veliki broj ovih CNC sistema je instaliran na lolinim mašinama i obradnim centrima i nalazi se u velikom broju fabrika metalne industrije

bivšeg Sovjetskog Saveza i u mnogim fabrikama širom bivše Jugoslavije (Sl. 13).



**Slika 12.** Prvi CNC upravljački sistem Lola 30CNC razvijen u Srbiji 1985. godine



**Slika 13.** Obradni centar Ivo Lola Ribar HBG 110OC

Krajem 1980-ih godina razvijena je nova generacija CNC upravljačkih sistema Lola 300CNC (Sl. 14) i programabilnih kontrolera PA2000, što je omogućilo potpunu tehnološku nezavisnost Lole Ribara i srpske mašinogradnje od industrijski razvijenih zemalja Zapadne Evrope. Partnerskim ulaganjem američke kompanije IBM u zajednički CIM centar Lola instituta, stvoreni su uslovi za razvoj modernih

CNC mašina alatki primenom najnovijih CAD/CAM softverskih sistema. Na taj način je razvijen horizontalni obradni centar HMC500 (Sl. 15), koji je ispunio sve zahteve američkih standarda i plasiran na severnoameričko tržište ugovorom od 98 miliona dolara. To je najveći ugovor u oblasti mašina alatki, koji je Lola Ribar sklopio sa američkom kompanijom Tree Machine Tools Co. 1988. godine. Nažalost realizacija ovog, kao i ugovora sa IBM-om i niza drugih međunarodnih partnerskih ugovora Lole Ribara je prekinuta uvođenjem ekonomskih sankcija prema Srbiji.



**Slika 14.** CNC upravljački sistem  
Lola 300CNC



**Slika 15.** Horizontalni obradni centar  
HMC500 plasiran na tržište USA

Razvoj obradnog centra HMC500 je inicirao izgradnju nove računarske i komunikacione infrastrukture, uvođenje modernih CAD/CAM metoda projektovanja, sistema kvaliteta prema standardima ISO 9000, CE znaka i savremenog sistema upravljanja proizvodnjom.

## 5. SOPSTVENI RAZVOJ I PROIZVODNJA FLEKSIBILNIH TEHNOLOŠKIH SISTEMA

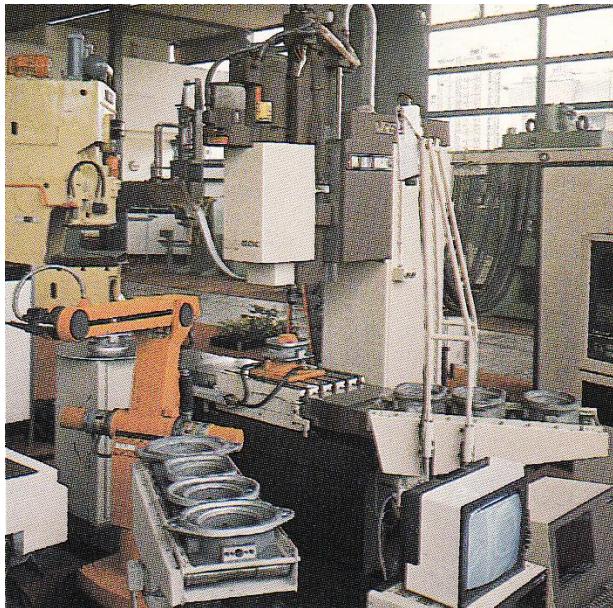
Ivo Lola Ribar je razvojem transfer linija, obradnih centara i robotizovanih proizvodnih sistema u potpunosti pratio intenzivni razvoj domaće automobilske industrije. Lola je isprojektovao i isporučio sve transfer linije fabriki motora 21. maj u Beogradu, koja je proizvodila motore za vozila Zastava automobila u Kragujevcu (Sl. 16). Oko dvadesetak lolinih transfer linija je instalisano u ruskim fabrikama automobila, traktora i kamiona. U to vreme je Lola Ribar bio među četiri najpoznatija proizvođača transfer linija u Evropi.



**Slika 16.** Lolina transfer linija 1725  
za obradu bloka motora automobila  
„Zastava 101“

Radi povećanja produktivnosti pri izvođenju složenih tehnoloških operacija početkom 1980-ih godina, Lola Ribar je razvio robotizovane tehnološke celije, u kojima su roboti opsluživali veći broj obradnih sistema (Sl. 17). Fleksibilni tehnološki sistemi sa automatizovanim paletnim izmenjivačima, industrijskim manipulatorima i robotima koje je proizvodio Ivo Lola Ribar, sa sopstvenim računarsko upravljačkim sistemima, bili su ponos domaće mašinogradnje. Ivo Lola Ribar je razvio 1986. godine univerzalni zglobni robot Lola 80S nosivosti 80 kg (Sl. 18). Prezentacija ovog robota je bila u Parizu 1986. godine u prisustvu svih francuskih proizvođača automobila. Praktična verifikacija radnih i funkcionalnih karakteristika je izvedena u

fabrici Peugeot u Ogzenu, koja je odmah bila zainteresovana za porudžbine. Zbog obima i kratkih rokova isporuke, kao i bankarskih garancija, Lola nije mogao da prihvati porudžbinu, ali je te iste 1986. godine sklopio ugovor (Sl. 19) za isporuku tri robotizovane tehnološke ćelije za kompletну obradu karoserije automobila Yugo Florida.



**Slika 17.** Robotizovana fleksibilna tehnološka ćelija Lole Ribara iz 1982. godine



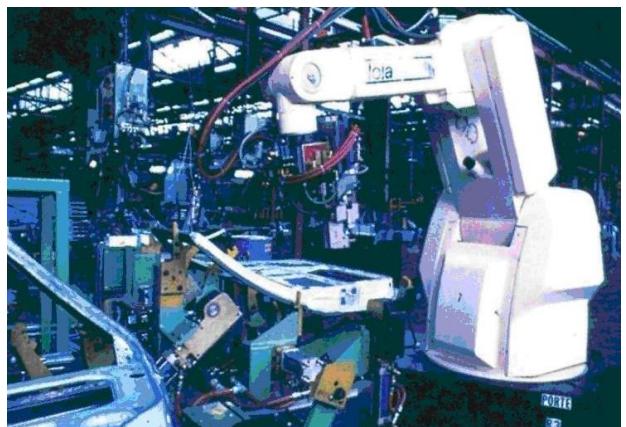
**Slika 18.** Robot Lola 80S razvijen i proizведен u Loli Ribaru 1986. godine

Ove robotizovane tehnološke ćelije su uspešno puštene u rad 1988. godine (Sl. 20), kada je Srbija među prvima u Evropi imala

robotizovane proizvodne linije sopstvene proizvodnje u automobilskoj industriji.



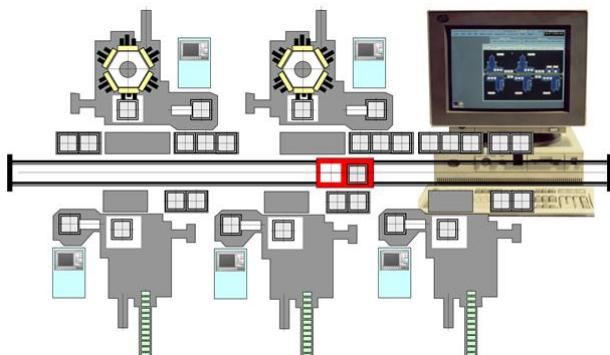
**Slika 19.** Dr Rodoljub Micić, predsednik Zastave i visoki državni funkcioneri prisutni na potpisivanju ugovora za robotizaciju Zastava automobila 1986. godine



**Slika 20.** Robot Lola 80S u robotizovanoj tehnološkoj ćeliji Zastava automobila u Kragujevcu 1988. godine

Zahvaljujući velikom razvojnog potencijalu Lola Ribar je isporučio u vreme sankcija 1995. godine, potpuno automatizovani fleksibilni tehnološki sistem Flexi 50-5 fabrici IMT u Knjaževcu za obradu kućišta malolitražnih motora. Flexi 50-5 se sastoji od tri horizontalna obradna centra, dva viševretna obradna centra kasetnog tipa, sa Lola 100CNC upravljačkim sistemima, šinskim transportnim sistemom sa upravljačkim sistemom PLC kontrolera Lola PA2000 i sopstvenim Cell kontrolerom na harverskoj platformi IBM Risc system 6000 (Sl. 21). Flexi 50-5 Lole Ribara je bez sumnje najveći tehničko tehnološki domet koji je ikada ostvaren kao rezultat domaće mašinogradnje u oblasti integracije mašina alatki, manipulacionih sistema, digitalnih

tehnologija i savremenih mikroprocesorskih upravljačkih sistema.



**Slika 21.** Konfiguracija Flexi 50-5 Ivo Lola Ribar instalisan u IMT Knjaževac 1995. godine

Nažalost, uvođenjem sankcija Saveta bezbednosti Ujedinjenih nacija 1992. godine i raspadom bivše Jugoslavije zaustavljen je tehničko-tehnološki razvoj u Srbiji, ne samo u oblasti CNC mašina alatki, već i u svim drugim oblastima industrijske proizvodnje.

## 6. NAJVEĆI TEHNIČKO-TEHNOLOŠKI DOMETI DOMAĆE INDUSTRRIJE MAŠINA ALATKI

Najveći domet domaće industrije mašina alatki je ostvaren 1988. godine, kada je na svetskoj biznis listi Jugoslavija bila na 11 mestu u svetu po proizvodnji mašina alatki, a više od 80% proizvodnje je realizovao Ivo Lola Ribar. Lola Ribar je tada bio veoma poznat i priznat proizvođač CNC mašina alatki u svetskim razmerama. Pojavljivao se na sajmovima širom sveta ravnopravno u društvu najpoznatijih evropskih, japanskih i američkih kompanija. Najveći evropski sajam mašina alatki EMO je 1988. godine otvorio nemački kancelar Helmut Kol (1930-2017), na štandu Lole Ribara, kao najvećeg partnera nemačkih fabrika mašina alatki. Te iste godine je i predsednik japanske kompanije Fanuc dr Seiemon Inaba došao u Beograd da lično poseti Lolu Ribaru (Sl. 22). Predsednik Fanuc-a je bio impresioniran onim što je video u Loli, a posebno je bio iznenađen projektom tri robotizovane tehnološke čelije za kompletну obradu karoserije automobila Yugo florida, koje su bile u fazi probnog puštanja u rad. Skoro svakodnevno su inostrane privredne i državne delegacije

dolazile u Lolu Ribara da se lično upoznaju sa tehničko tehnoškim dostignućima i razvojnim projektima Lole Ribara, koji u to vreme nisu zaostajali za najrazvijenijim evropskim zemljama.



**Slika 22.** Predsednik Fanuc-a dr Seiemon Inaba u poseti Loli Ribaru 1988. godine

Poslednji predsednik Sovjetskog Saveza Mihail Gorbačov (1931) je tokom svoje posete Jugoslaviji 1988. godine zahtevaо da poseti Lolu Ribara (Sl. 23), najvećeg industrijskog partnera SSSR-a u oblasti CNC mašina alatki.



**Slika 23.** Predsednik SSSR-a Mihail Gorbačov u poseti Loli Ribaru 1988. godine

Ivo Lola Ribar je 1988. godine imao savremenu korporativnu organizaciju sa sopstvenim inženjeringom i razvojnim institutom, sa dvadesetak specijalizovanih proizvodnih fabrika u Železniku i širom Srbije, sa oko 12500 zaposlenih, od kojih je bilo preko 2000 inženjera i visokoobrazovanih kadrova. Lola Ribar je imao jedan od najboljih mašinskih parkova u ovom delu Evrope i ostvarivao izvoz mašina alatki i industrijske opreme u

zapadnoevropske zemlje (konvertibilno tržište) blizu 500 miliona američkih dolara.

## 7. ZAKLJUČAK

Industrija CNC mašina alatki je bazna industrija i omogućuje tehnološku nezavisnost za sve druge oblasti metaloprerađivačke industrije jedne zemlje. Pristup projektovanju i proizvodnji CNC mašina alatki je u poslednje tri decenije značajno promenjen u odnosu na tradicionalni koncept. Primena modernih metoda projektovanja na bazi CAD/CAM sistema, razvoj savremenih pogonskih sistema, sistema za vođenje, mernih sistema, senzorske tehnike, inteligentnih ugradbenih komponenti i kontrolera, čine CNC maštine alatke visoko sofisticiranim proizvodima metaloprerađivačke industrije. U vreme Industrije 4.0 posle tri decenije potpunog zastoja u razvoju, veoma je teško da srpska mašinogradnja u bližoj budućnosti nađe mesto među svetskim proizvođačima CNC mašina alatki. Da bi se to ostvarilo neophodan je veoma veliki broj preduslova, od kojih su najznačajniji:

- Proizvodna infrastruktura sa kapitalnim mašinama i proizvodnim sistemima visokih geometrijskih, kinematičkih, energijskih i tehnoloških karakteristika,
- Veoma visok tehničko-tehnološki nivo u svim oblastima tehnologije prerade metala, od metalurških tehnologija do tehnologija mašinske obrade rezanjem, deformacijom i spajanjem.
- Visoko kompetentan i formiran kadrovski potencijal proizvodnih mašinskih i elektro inženjera projektanata mašina, računarsko upravljačkih sistema i projektanata proizvodnih tehnologija.

Ovi preduslovi danas ne postoje u Srbiji, tako da predstoji veoma dugotrajan, mukotrpan i neizvestan put, ukoliko bi se postavio strateški cilj ponovnog pozicioniranja Srbije na mapi svetskih proizvođača CNC mašina alatki. Sigurno bi taj put bio znatno lakši u partnerskoj saradnji sa nekim od

poznatih svetskih proizvođača CNC mašina alatki, koji bi našao interes investiranja u nove proizvodne pogone na ovim prostorima.

## LITERATURA

- [1] N. Obradović: *U spomen sto godina nauke o mašinama 1873-1941.*, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1975.
- [2] V.B. Šolaja: *Počeci tehničke kulture i inženjerstva u obnovljenoj Srbiji*, Zbornik radova naučnog skupa "Pola veka nauke i tehnike u obnovljenoj Srbiji 1804-1854", Univerzitet u Kragujevcu, Kragujevac, 1996., str. 596-616.
- [3] V.B. Šolaja, A.S. Magdić: *Inženjeri u Knjaževstvu/Kraljevini Srbiji od 1834. godine do završetka Prvog svetskog rata*, Zajednica tehničkih fakulteta Univerziteta u Beogradu, Muzej nauke i tehnike u Beogradu, Lola Institut u Beogradu, Beograd, 1994.
- [4] V. Šolaja: *Sedamdeset godina proizvodnog mašinstva u Beogradu*, uvodni referat, Zbornik radova naučno-stručnog skupa "Sedamdeset godina proizvodnog mašinstva u Beogradu", Mašinski fakultet u Beogradu, Institut za alatne mašine I alate u Beogradu, Beograd, 1976., str. 1-116.
- [5] V. Šolaja: *Sto godina proizvodnog mašinstva u visokom školstvu Srbije – sećanje na prva četiri profesora*, Posebno izdanje u okviru 25. Savetovanja proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Mašinski fakultet u Beogradu, Lola Institut, Beograd, 1994.
- [6] Lj. Lukić, M. Djapić: *Putevima inženjerstva u Srbiji*, Tematski zbornik "Dobrivoje S. Božić izumitelj savremenog sistema kočenja voza", Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Kraljevo, 2016., str. 225-254.
- [7] Lj. Lukić, M. Djapić: *Industrija Ivo Lola Ribar Beograd, majka jugoslovenske mašinogradnje*, rad po pozivu, Zbornik radova 20. Međunarodne DQM konferencije ISDQM-2017., Čačak, 2017., str.20-36.
- [8] Grupa autora: *Industrija Ivo Lola Ribar Beograd*, monografija povodom 70 godina od početka radova na izgradnji Fabrike teških alatnih mašina Ivo Lola Ribar u Železniku, Udruženje Lolinaca, Beograd, 2017.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

### 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## EKSPERIMENTALNO MERENJE I NUMERIČKA ANALIZA TEMPERATURNOG POLJA U ZONI REZANJA U USLOVIMA KONTINUALNE I DISKONTINUALNE OBRADE STRUGANJEM

Miroslav LUČIĆ<sup>1</sup>, Bogdan NEDIĆ<sup>2</sup>, Ivo VLASTELICA<sup>1</sup>, Suzana PETROVIĆ SAVIĆ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Visoka škola tehničkih strukovnih studija, Čačak, [miroslav.lucic@vstss.com](mailto:miroslav.lucic@vstss.com),  
[ivo.vlastelica@vstss.com](mailto:ivo.vlastelica@vstss.com)

<sup>2</sup> Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, [nedic@kg.ac.rs](mailto:nedic@kg.ac.rs),  
[petrovic.suzana@gmail.com](mailto:petrovic.suzana@gmail.com)

**Apstrakt:** Savremeni obradni sistemi podrazumevaju CNC obradu sa promenljivim parametrima obrade, pri čemu alat nije u konstantnom zahvatu, već usled promenljive dubine rezanja ili prekidnog rezanja prolazi kroz naizmenične periode zagrevanja i hlađenja. Cilj ovog rada je eksperimentalno i numeričko određivanje temperatura na alatu i njihovo poređenje u uslovima kontinualne i diskontinualne obrade rezanjem. Pored režima obrade u analizama su obuhvaćeni i ostali bitni uslovi obrade, kao što su geometrija alata i termomehaničke karakteristike materijala alata i materijala obratka. Za simulacije kontinualnog i diskontinualnog rezanja je korišćen softverski paket Third Wave AdvantEdge. Na osnovu eksperimentalno i numerički određivanih temperatura rezanja, stvaraju se uslovi za razvoj adekvatnog 2D modela za simulaciju deformacija u zoni rezanja i za numeričku analizu temperaturnih polja u alatu u uslovima diskontinualne obrade struganjem.

**Ključne reči:** kontinualno i diskontinualno struganje, temperatura rezanja, numerička analiza, FEM.

### 1. UVOD

Pri obradi metala rezanjem ukupan mehanički rad se troši na deformisanje i odnošenje materijala predmeta obrade i savlađivanje trenja u procesu rezanja. Pojava toplote u zoni rezanja posledica je pretvaranja mehaničke energije u toplotnu. Temperatura rezanja je veoma bitan pokazatelj procesa obrade rezanjem. Generisana toplota u zoni rezanja dovodi do zagrevanja obratka, strugotine i reznog alata. Analiza toplotnih pojava u zoni rezanja ima veliki značaj za sam proces obrade, povišenje proizvodnosti i postizanje kvaliteta obrade. Posebno negativan uticaj ima toplota koja prelazi u alat. Povećanje

temperature alata dovodi do njegovog habanja i gubitka rezne sposobnosti. Zbog toga je poznavanje vrednosti rasporeda temperature u alatu od izuzetnog praktičnog značaja.

Veliki broj istraživača pokazao je da temperatura u zoni rezanja ima najveći uticaj na proces habanja alata i njegovu postojanost, a kao posledica je neravnomernog zagrevanja grudne površine alata i kretanja strugotine po njoj. Naime, na grudnoj površini alata se formira krater (udubljenje) čiji oblik i dimenzije zavise od raspodele temperature na grudnoj površini.

Generisana toplota u zoni rezanja uzrokuje zagrevanje reznih elemenata alata do temperaturu koje često premašuju 800 °C. Pri rezanju

alatima od brzoreznog čelika temperature pri kojima dolazi do otpuštanja njihove strukture se nalaze u intervalu  $600 \div 700$  °C. Kod tvrdih metala iznad 800 °C dolazi do pada mehaničkih svojstava, usled čega se pojačava habanje i ubrzava zatupljenje.

Izučavanje toplotnih pojava u zoni rezanja bazira na eksperimentalnim, analitičkim i numeričkim metodama. Na osnovu određenih saznanja, korišćenjem neke od ovih metoda ili njihove kombinacije, moguće je tumačenje i predviđanje termofizičkih pojava u zoni rezanja, upravljanje toplotnim procesima i njihova optimizacija.

Eksperimentalna istraživanja u obradi rezanjem su osnova verifikacije teorijskih istraživanja i hipoteza, modeliranja, simulacije i optimizacije pojava i procesa u toku obrade. Eksperimentalna istraživanja su, od početne ideje do implementacije rezultata ispitivanja, sklop kompleksnih aktivnosti koje zahtevaju značajan utrošak raspoloživih resursa (materijali, oprema, energija, vreme, itd.). Otuda je neophodno kvalitetno planiranje i dizajniranje eksperimenta.

Numerička rešenja, koja se odnose na operacije rezanja, obezbeđuju ekonomski daleko povoljniju alternativu za razumevanje procesa obrade. Glavna prednost ovog pristupa je ta što su modeli bazirani na fizičkim osobinama materijala alata i dela koji se obra-

đuje, a efekat bilo koje promene u podacima vezanim za rezanje se može uspešno predvideti modifikacijom pojedinih parametara.

Veliki broj istraživača je radio na eksperimentalnim merenjima temperatura u zoni rezanja pri struganju i poređenju istih sa proračunatim temperaturama metodom konačnih elemenata u odgovarajućem softveru sa prilagođenim matematičkim modelom, a publikovani rezultati i odgovarajuće analize usmeravaju dalja istraživanja u ovom pravcu. Cilj ovog rada je da se učine pomaci u pravcu razvoja numeričkih metoda za proračun temperatura u uslovima diskontinualnog rezanja pri obradi struganjem.

## 2. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE

### 2.1 Uslovi izvođenja eksperimenta

Eksperimentalna ispitivanja obrade struganjem realizovana su u Laboratoriji za obradu metala rezanjem na Fakultetu inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu. Eksperimentalna ispitivanja su vršena sa ciljem da se izmeri temperatura na alatu pri obradi uzdužnim struganjem pri kontinualnoj i diskontinualnoj obradi iz primenu različitih parametara režima obrade. Obrada je vršena bez sredstva za hlađenje i podmazivanje.

Eksperimentalna ispitivanja su vršena na

**Tabela 1.** Hemijski sastav čelika AISI 4140

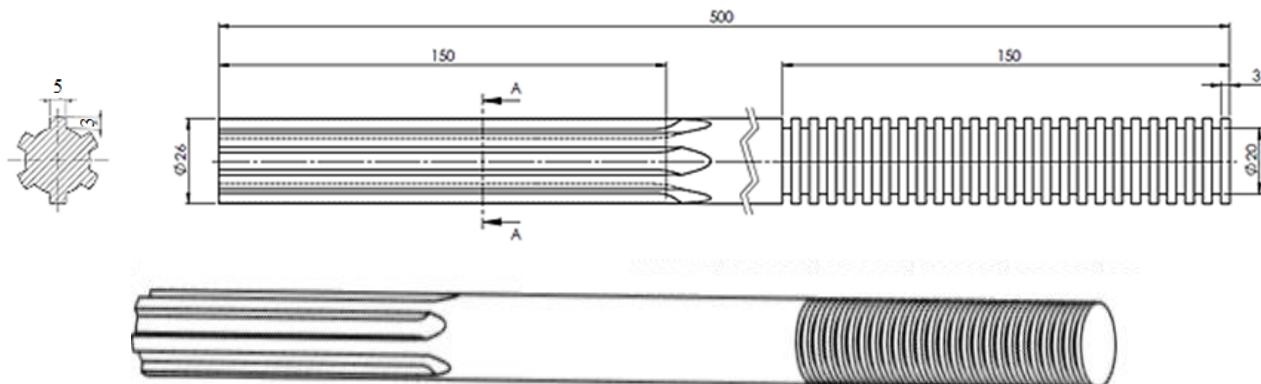
Čelik	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	As	Al	V	Ti
42CrMo4 (Č4732)	0,440	0,610	0,200	0,015	0,008	0,980	0,080	0,180	0,202	0,020	0,028	0,004	0,026

**Tabela 2.** Fizička svojstva čelika AISI 4140

Čelik	Specifična gustina kg/m <sup>3</sup>	Tačka topljenja °K	Specifična toplota J/kgK	Toplotna provodljivost W/mK	Toplotno širenje 300°K 10 <sup>-6</sup> /K
42CrMo4 (Č4732)	7850	1850	363	41,7	11,9

**Tabela 3.** Mehanička svojstva čelika AISI 4140

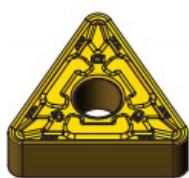
Čelik	Zatezna čvrstoća, MPa	Napon tečenja, MPa	Izduženje (L=5d), %	Modul elastičnosti GPa	Tvrdoća HB	Poasonov koeficijent	Stanje isporuke
42CrMo4 (Č4732)	1124	1059	11	210	217	0,3	meko žaren



Slika 1. Obradak za eksperimentalna

konstrukcionom čeliku za poboljšanje 42CrMo4 (Č4732). Obradak je dužine 500 mm prečnika 30 mm. Pre izvođenja eksperimenta izvršena je priprema obratka: izrada uzdužnih i poprečnih žlebova dužine 150 mm (Sl. 1), termička obrada na tvrdoću 35 HRC, zatim ispravljanje zbog postizanja prihvatljive granice kružnosti obrtanja (max 0,1 mm). Izvršena je i prethodna obrada sa prečnika  $\Phi 30$  mm na prečnik  $\Phi 26$  mm kako bi se izbeglo radijalno odstupanje i ovalnost i uklonio površinski sloj. Hemijski sastav čelika 42CrMo4 prikazan je u tabeli 1, fizička svojstva u tabeli 2 i mehanička svojstva u tabeli 3.

Pri eksperimentalnim istraživanjima korišćen je strugarski nož sa mehanički pričvršćenom pločicom od tvrdog metala proizvođača "CORUN" – Užice iz Srbije. Izmenljiva rezna pločica je sa oznakom TNMG 160404-CM kvaliteta P35 a držač je PTGNR/L 2525M16. Pločica je sa prevlakom od TiN (4C25). Rezna pločica je sa lomačem strugotine - oznaka CM, slika 2.



Slika 2. Rezna pločica od TM (TNMG 160404-CM)  
[4]

Za odabranu reznu pločicu i držač alata, geometrijsku reznog klina karakterišu:

- grudni ugao,  $\gamma = 10^\circ$ ,
- leđni ugao,  $\alpha = 6^\circ$ ,
- ugao nagiba rezne ivice,  $\lambda = -5^\circ$ ,

- radius vrha pločice,  $r = 0,4$  mm,
- radius zaobljenja glavne rezne ivice,  $r_1 = 0,020$  mm,
- napadni ugao,  $\kappa = 91^\circ$ .

Eksperimentalna ispitivanja vršena su na univerzalnom strugu BOEHRINGER UDF480 (Sl. 3) snage 10 kW.

Obrada struganjem je se vršila u sledećim uslovima obrade:

- prečnik predmeta  $d = 26$  mm,
- brzina rezanja  $V = 92$  (m/min),
- broj obrtaja  $n = 1120$  o/min,
- posmak  $s = 0,08$  mm/o i
- dubina rezanja  $a = 0,3$  mm.

## 2.2 Merenje temperature u zoni rezanja

Za merenje temperature u zoni rezanja korišćena je termovizijska kamera FLIR E60, koja je osetljiva na zračenje tela koje se nalazi na određenoj temperaturi. Ova metoda merenja temperature izabrana je zbog prednosti nad ostalim metodama jer ima mogućnost registrovanja svih promena temperature, nema fizičkog kontakta sa objektom čija se temperatura meri, nema negativnog uticaja na materijal obratka i alata, može se kontinualno meriti temperatura objekata kojima je teško prići, itd.

Na slici 3 je pokazana oprema za eksperimentalna ispitivanja merenja temperature u zoni rezanja. Termovizijska kamera je postavljena u neposrednu blizinu zone obrade, pri čemu je rastojanje između izmenljive pločice strugarskog noža i kamere iznosi približno 150 mm. Kamera je postavljena na specijalni nosač

koji je omogućio kretanje kamere zajedno sa alatom.



**Slika 3.** Merenje temperature rezanja pomoću termovizijske kamere „FLIR E60“

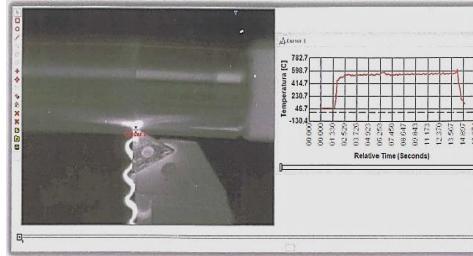
Merenje temperature je vršeno u vremenu od 15 sekundi. U ovom vremenu se postiže ustaljena temperatura, odnosno temperatura bliska maksimumu u alatu što je i bio cilj ovog eksperimenta. Dužina obrade je bila promenljiva i prilagođena je režimima obrade, tako da je vreme obrade uvek bilo 15 sekundi.

Merenje sa termovizijskom kamerom FLIR E60 je vršeno uz primenu softverska FLIR Research IR Max. Ovaj softver omogućuje zapis signala sa kamere na računar i kasniju obradu signala.

Na slici 4 je dat prikaz softverske obrade procesa rezanja koji sadrži fotografiju samog procesa u određenom trenutku kao i grafički zapis maksimalne temperature u posmatranoj zoni obrade za usvojen vremenski period rezanja od 15 sekundi.

Analizom zapisa signala sa kamere na računaru primenom softverskom paketu "FLIR Research IR Max" i analizom različitih oblasti na reznoj pločici, određeno je mesto sa maksimalnom temperaturom, to je u neposrednoj blizini glavne rezne ivice (približno na polovini dubine rezanja). Zona rezanja je analizirana koristeći video zapisa odgovarajuće rezolucije, odnosno dobijene slike i analizom svakom pikselu (njegova

veličina je u ovom slučaju 0,046 mm). Izabranu tačku (piksel) sa maksimalnom temperaturom na alatu prati i odgovarajući dijagram u funkciji vremena rezanja (Sl. 5).



**Slika 4.** Ilustracija procesa rezanja u softverskom paketu "FLIR Research IR Max"

### 3. SIMULACIJA U USLOVIMA KONTINUALNE I DISKONTINUALNE OBRADE STRUGANJEM

Simulacije u softveru AdvantEdge su bazirane na energiji koja se generiše na kontaktu alat/strugotina tj. temperaturama kontakta i temperaturama u alatu. Ulagani parametri procesa obrade (režim obrade, geometrijske i termo-mehaničke karakteristike materijala alata i obratka) koji se koriste u simulaciji su isti kao kod prethodno obavljenih eksperimentalnih ispitivanja. Za simulacije u AdvantEdge programu je korišćen Johnson – Cook matematički model koji se odnosi na termo-mehaničke karakteristike obratka. Kod ovog modela se promena napona u obratku definiše na osnovu plastičnih deformacija i viskoznih prigušenja u funkciji promene temperature. Johnson – Cook simulacioni model se dosta koristi u različitim softverskim alatima za procenu pojedinih izlaznih parametara procesa rezanja (sile, temperature, habanje, ...), a definisan je izrazom (1) [6].

$$\sigma = \left[ A + B \left( \dot{\varepsilon}_p \right)^n \right] \left[ 1 + C \cdot \ln \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{ref}}{T_{melt} - T_{ref}} \right)^m \right]. \quad (1)$$

Vrednosti parametara u izrazu (1) su prikazane u tabeli 4.

**Tabela 4.** Vrednosti parametara za Johnson - Cook model [7]

Parametar	$\dot{\varepsilon}_o, s^{-1}$	$T_{ref}, ^\circ K$	$T_{melt}, ^\circ K$	A, Pa	B, Pa	n	C	m
Vrednost	1	300	1850	$5,95 \cdot 10^8$	$5,8 \cdot 10^8$	0,133	0,023	1,03

U tabeli 4 su:

$\sigma$ , Pa – ekvivalentni napon,

$\dot{\epsilon}$ ,  $s^{-1}$  – brzina deformacije,

$\dot{\epsilon}_0$ ,  $s^{-1}$  – referentna brzina deformacije,

$T$ ,  $^{\circ}\text{K}$  – temperaturna obratka,

$T_{ref}$ ,  $^{\circ}\text{K}$  – referentna temperatura,

$T_{melt}$ ,  $^{\circ}\text{K}$  – temperatura topljenja,

$A$ , Pa – napon tečenja materijala u uslovima referentne deformacije,

$B$ , Pa – konstanta deformacionog ojačanja,

$C$  – koeficijent ojačanja brzine deformacije ,

$n$  – konstanta tvrdoće i

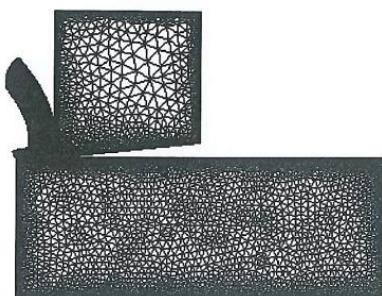
$m$  – koeficijent termičkog omekšavanja.

Fizičko-mehaničke karakteristike rezne pločice od tvrdog metala sa presvučenim TiN- im slojem čija je osnova P35 i odgovarajuće TiN prevlake, su date u tabeli 5.

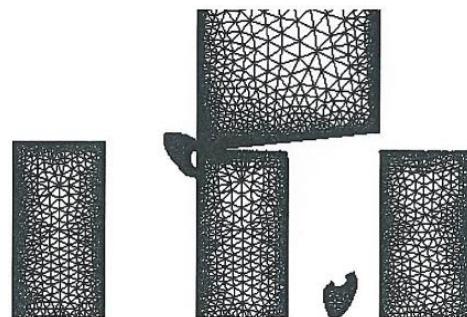
**Tabela 5.** Fizičko-mehaničke karakteristike rezne pločice [7]

Karakteristike	Tvrdi metal (P35)	TiN – prevlaka (5 $\mu\text{m}$ )
Modul elastičnosti E GPa	645	600
Poisonov koeficijent V	0,24	0,25
Specifična gustina $\rho$ kg/ $\text{m}^3$	14900	4650
Specifična toplota $c$ J/(kg $^{\circ}\text{C}$ )	206	645
Toplotna provodljivost k W/(m $^{\circ}\text{C}$ )	91	21
Toplotno širenje $\mu\text{m}/(\text{m } ^{\circ}\text{C})$	4,8	-

Za potrebe numeričke analize procesa rezanja za kontinualno i diskontinualno uzdužno struganje definisani su 2D simulacioni modeli deformacione zone, prikazani na slikama 5 i slika 6.



**Slika 5.** 2D simulacioni model za kontinualno rezanje



**Slika 6.** 2D simulacioni model za diskontinualno rezanje

## 4. REZULTATI I DISKUSIJA

### 4.1 Rezultati eksperimentalnih ispitivanja

Primenom termovizijske kamere „FLIR E60“ uz odgovarajuću softversku analizu, određene su maksimalne temperature (srednje vrednosti) na grudnoj površini alata. Na slikama 8 i 9 je dat grafički prikaz maksimalnih temperatura za režime obrade:  $V = 92 \text{ m/min}$ ,  $s = 0,08 \text{ mm/o}$ ,  $a = 0,3 \text{ mm}$  u uslovima kontinualne (struganje punog materijala) i diskontinualne (struganje uzdužnih žlebova, strana A, slika 1) obrade.

Maksimalne temperature na grudnoj površini rezne pločice kod obe vrste obrade su locirane približno na udaljenosti  $0,1 \times 0,1 \text{ mm}$  u odnosu na rezni vrh i glavnu reznu ivicu.

### 4.2 Rezultati numeričke simulacije

Rezultati proračuna temperatura numeričkim simulacijama su najčešće prikazani dijagramski, a mogu se prikazati i u obliku kartografije temperturnih polja. Termalne simulacije omogućavaju procenu temperatura alata, strugotine, obratka i alat/strugotina kontakta.

Numeričke vrednosti temperatura u funkciji dužine rezanja dobijene prema realizovanoj numeričkoj analizi primenom simulacionog modela Johnson – Cook, pri kontinualnom i diskontinualnom rezanju su grafički prikazane na slikama 9 i 10.

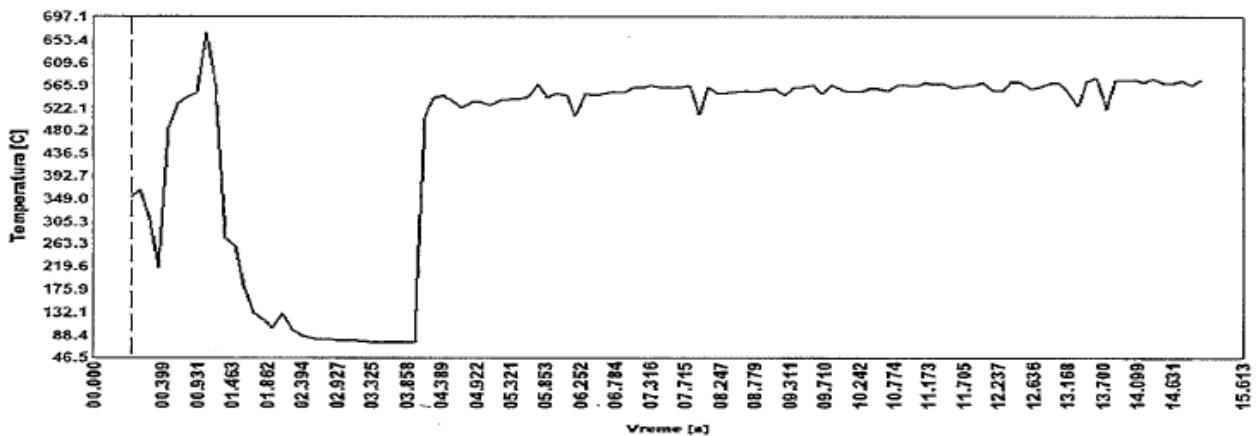
Kod numeričke analize je korišćen 2D simulacioni model koji je manje složen i ne zahteva moćne računare u odnosu na 3D model, a rezultati traženih izlaznih parametara

procesa obrade su približno isti, što pokazuju mnogi stručni radovi koji su se bavili ovom problematikom. Zbog toga je položaj tačke sa maksimalnom temperaturom kod 2D simulacionog modela određen na približno 0,1 mm u odnosu na glavnu reznu ivicu što odgovara eksperimentalnim ispitivanjima.

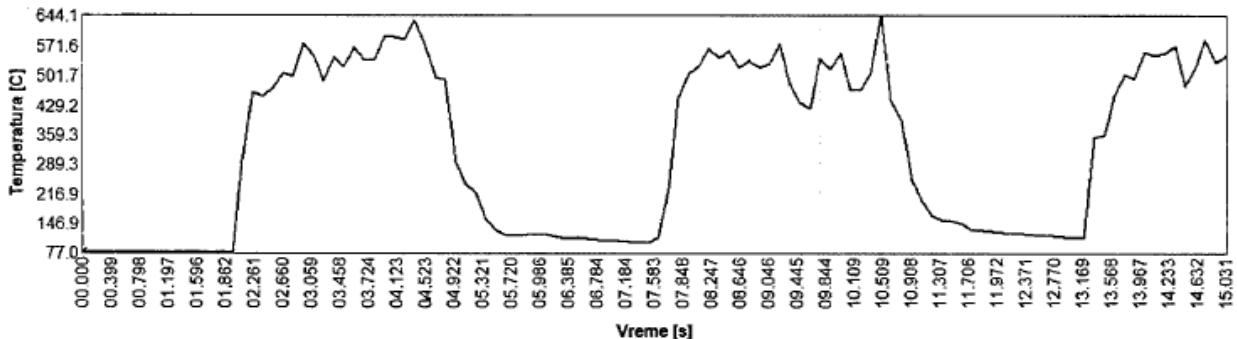
Sve ovo nameće zaključak da je lokacija zone maksimalne temperature za obe vrste obrade približno ista kod eksperimentalnih ispitivanja i numeričke analize.

tura na grudnoj površini alata kod kontinualnog rezanja iznosi  $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ . U slučaju diskontinualne obrade temperatura u žljebu (prazan prostor) naglo pada do određene vrednosti tako da su kod ove vrste obrade za termalnu analizu značajne maksimalna temperatura koja iznosi  $530\text{ }^{\circ}\text{C}$  i minimalna temperatura čija je vrednost  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Navedene vrednosti ukazuju na to da je maksimalna temperatura kod diskontinualnog rezanja nešto niža u odnosu na kontinualnu obradu, što je očekivano.

Na slikama 9. i 10. su prikazane zavisnosti



Slika 7. Maksimalna temperatura na grudnoj površini pločice kod kontinualnog struganja



Slika 8. Maksimalna temperatura na grudnoj površini pločice kod diskontinualnog struganja - poprečni žljebovi

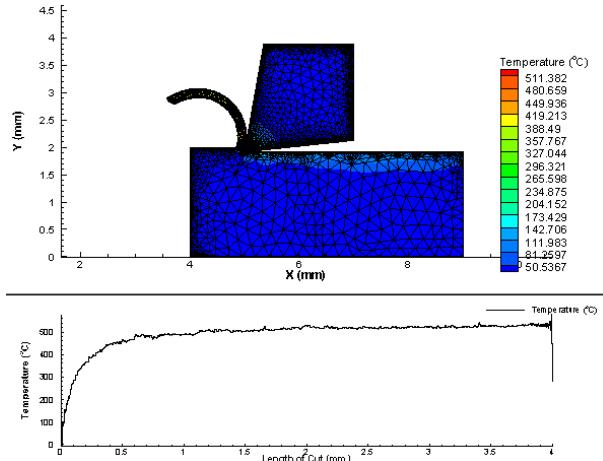
### 4.3 Analiza rezultata

Na slikama 7 i 8 je dat grafički prikaz izmerenih temperature u određenoj tački na grudnoj površini alata za vremenski period rezanja od 15 sekundi. Ova tačka predstavlja maksimalno izmerenu temperaturu na grudnoj površini rezne pločice i nalazi se u neposrednoj blizini glavne rezne ivice, približno na polovini dubine rezanja. Sa dijagrama se uočava da se maksimalne temperature u alatu postužu za približno 4 sekunde neprekidnog rezanja sa istim režimom obrade kod obe vrste struganja. Za date uslove obrade maksimalna tempera-

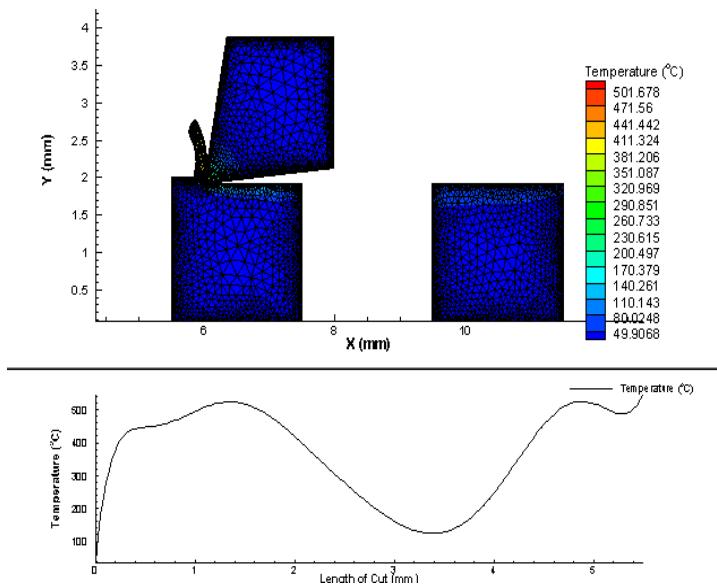
numeričkih vrednosti proračunatih temperature rezanja od dužine rezanja pri kontinualnoj i diskontinualnoj obradi u Johnson – Cook simulacionom modelu. Numeričke vrednosti temperatura dobijenih simulacijom iznose  $520\text{ }^{\circ}\text{C}$  kod kontinualne, odnosno  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$  kod diskontinualne obrade. Vrednosti maksimalnih temperatura za ove dve vrste obrade su približno iste kao kod eksperimentalnih merenje, što je dobro. Ono što je posebno važno jeste da se numeričke vrednosti proračunatih temperature u alatu neznatno razlikuju od temperature dobijenih eksperimentalnim merenjima. Kada su u

pitanju maksimalne temperature ta razlika u procentima je približno 7% kod kontinualne, odnosno 5,7% kod diskontinualne obrade. Ova razlika je nešto veća kod minimalnih temperatura i iznosi približno 14% u istim uslovima diskontinualne obrade.

slojem su vršena eksperimentalna merenja i terمالne simulacije u cilju utvrđivanja temperatura u alatu. Simulacija metodom konačnih elemenata u uslovima kontinualne i diskontinualne obrade struganjem je vršena u softverskom paketu AdvantEdge sa Johnson – Cook matematičkim modelom. Izvedene



Slika 9. Numeričke vrednosti temperature pri kontinualnom rezanju



Slika 10. Numeričke vrednosti temperature pri diskontinualnom rezanju

## 5. ZAKLJUČAK

Habanje alata u najvećoj meri zavisi od temperature rezanja, odnosno količine toplove nastale u alatu prilikom obrade. Ovaj rad obuhvata numeričku analizu metodom konačnih elemenata i eksperimentalno merenje, kako bi se procenila raspodela temperature kontakta alat/strugotina sa ciljem utvrđivanja iste na grudnoj strani alata. Za iste uslove strugarske obrade čelika kvaliteta 42CrMo4 sa reznom pločicom od tvrdog metala TNMG 160404-CM kvaliteta P35 sa TiN

simulacije pokazuju prisustvo i lokalizaciju temperturnih polja u sekundarnoj zoni struganja. Proračunate vrednosti temperatura na grudnoj površini alata dobijene numeričkim ispitivanjima pri kontinualnom i diskontinualnom rezanju su poređene sa odgovarajućim eksperimentalnim merenjima.

Kao što pokazuje analiza u prethodnom poglavljiju, temperature na grudnoj površini alata za obe vrste obrade dobijene numeričkim ispitivanjima su približne eksperimentalno dobijenim vrednostima, što potvrđuje adekvatnost matematičkog modela u odabranom

softverskom paketu. Ove temperature su nešto niže kod diskontinualne obrade u odnosu na kontinualnu obradu, što je posledica uticaja žljebova i prekidnog rezanja pri čemu se alat kada ne vrši rezanje, trenutno hlađi na nižu temperaturu.

Primenjeni oblikovni i matematički model pri numeričkim simulacijama za diskontinualno struganje koji daje vrednosti temperatura približno eksperimentalno izmerenim vrednostima je posebno značajan za dalja istraživanja u ovoj oblasti.

Rezultati analiza iz ovog rada treba da prošire baze postojećih znanja o istraživanjima u ovoj oblasti sa krajnjim ciljem da numeričke metode u što većoj meri zamene složena i skupa eksperimentalna ispitivanja.

## ZAHVALNOST

This paper is part of project TR35034 The research of modern non-conventional technologies application in manufacturing companies with the aim of increase efficiency of use, product quality, reduce of costs and save energy and materials, funded by the Ministry of Education and Science of Republic of Serbia.

## LITERATURA

- [1] M. Lazić, B. Nedić, S. Mitrović: Tehnologija obrade metala rezanjem – Izbor režima obrade, Univerzitet U Kragujevcu, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac, 2002.
- [2] M. Lazić, Obrada metala rezanjem – Monografija, Univerzitet U Kragujevcu, Mašinski fakultet u Kragujevcu, Kragujevac, 2002.
- [3] W. Grzesik, M. Bartoszuk, P. Nieslony: Finite element modeling of temperature distribution in the cutting zone in turning processes with differently coated tools, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 164-165, pp. 1204-1211, 2005.
- [4] CATALOGUE/2016 – The complete range of products, CORUN, Užice
- [5] Alati od tvrdog metala za obradu rezanjem; Alati PP – CORUN; Prvi Partizan, Užice
- [6] F. Abed, M. Saffarini, A. Abdul – Latif, G.Z. Voyiadjis: Flow Stress and Damage Behavior of C45 Steel Over a Range of Temperatures and Loading Rates, Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 139, No.2, 8 pages, 2017.
- [7] S. Beblein, B. Breidenstein, B. Denkena, C. Pusch, H. Hoche, M. Oechsner; 16th CIRP Conference on Modelling of Mechanizing Operations
- [8] P. Nieslony, W. Grzesik, P. Laskowski, W. Habrat: FEM – Based Modelling of the Influence of Thermophysical Properties of Work and Cutting Tool Materials on the Process Performance, Procedia CIRP, Vol. 8, pp.3-8, 2013.
- [9] Y. C. Yen, A. Jain, P. Chigurupati, W. T. Wu: Computer Simulation of Orthogonal Cutting using a Tool with Multiple Coatings, Machining science and technology, Vol. 8, No.2, pp. 305-326, 2007.
- [10] T. Kagnaya, M. Lazard, L. Lambert, C. Boher, T. Cutard: Temperature evolution in a WC-6%Co cutting tool during turning machining: experiment and finite element simulations, WSEAS transactions on heat and mass transfer, Vol. 6, No. 3, pp. 71-80. 2011.
- [11] H. Bil, S. Kilic Engin, A. E. Tekkaya: A comparison of orthogonal cutting data from experiments with three different finite elements models, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 44, pp. 933-944, 2014.
- [12] M. U. Ghani, N. A. Abukhshim, M. A. Sheikh, An investigation of heat partition and tool wear in hard turning of H13 tool steel with CBN cutting tools, International journal of advanced manufacturing technology, Vol. 39, pp. 874-888, 2008.
- [13] T. Kagnaya: Contribution a l'identification des mécanismes d'un WC-6%Co en usinage et par une approche tribologique et thermique, Thesis Spécialité "Sciences et génie des matériaux", 2009.
- [14] L. Xie: Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based On Finite Element Method, Dissertation, Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2004.
- [15] D. Tanikić, M. Manić, G. Devedžić: Modeliranje temperature strugotine korišćenjem metoda veštačke inteligencije; Tehnička dijagnostika, Vol. 4, 2008.
- [16] P. K. Jain, N. K. Mehta, V. Upadhyay: Effect of cutting tool geometry on tool wear and tool temperature during Ti-6Al-4V machining;

- International, Journal of Mechanical and Materials Engineering, Vol. 8, 2013.
- [17] A. Thakare, A. Nordgren: Experimental Study and Modeling of Steady State Temperature Distributions in Coated Cemented Carbide Tools in Turning, in: *15th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations*, Vol. 31, pp. 234-239, 2015.

## EXPERIMENTAL MEASURING AND NUMERICAL ANALYSIS OF THE TEMPERATURE FIELD IN THE CUTTING ZONES IN THE CONDITIONS OF THE CONTINOUES AND DISCONTINOUES TURNING

**Abstract:** Contemporary manufacturing systems imply CNC machining with variable machining parameters where the tool is not in the constant grip, but due to the variable cutting depth or discontinuous cutting it passes through alternate periods of heating and cooling. The goal of this paper is determination of the experimental and numerical tool temperatures and its comparison in conditions of continues and discontinues machining process. In addition to machining regimes, the analysis also includes other essential processing conditions, such as tool geometry and thermo-mechanical characteristics of the tool and workpiece materials. Continues and discontinues machining simulations have been performed in the software package Third Wave AdvantEdge. Based on experimental and numerical determinated machining temperatures, conditions for adequate 2D model development is created. Developed 2D model is suitable for deformation simulation in the machining zones and for numerical analysis of the temeprature fields in the tool in conditions of the continues and discontinues turning.

**Keywords:** Continues and discontinues turning, Machining temperatures, Numerical analysis, FEM.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## ANALYSIS OF KERF WIDTH IN CO<sub>2</sub> LASER CUTTING OF P265GH STEEL

Miloš MADIĆ\*, Srđan MLADENOVIĆ, Miroslav RADOVANOVIĆ, Predrag JANKOVIĆ, Dušan PETKOVIĆ

Faculty of Mechanical Engineering, Niš, Serbia, madic@masfak.ni.ac.rs, maki@masfak.ni.ac.rs,  
mirado@masfak.ni.ac.rs, jape@masfak.ni.ac.rs, dulep@masfak.ni.ac.rs

\*Corresponding author: madic@masfak.ni.ac.rs

**Abstract:** The kerf width in laser cutting is very important geometrical characteristic which provides a range of valuable information regarding process performance. In this paper, mathematical model for establishing relationship between laser cutting parameters such as assist gas pressure, cutting speed and nozzle diameter, and kerf width obtained in CO<sub>2</sub> laser cutting of P265GH steel was developed. To this aim, second order polynomial model was developed by using experimental data obtained after realization of experiment planned as central composite face-centered factorial design. Statistically assessed as valid the developed model was used to investigate effects of laser cutting parameters on the kerf width and for development of material removal rate mathematical model. In addition to modeling, by applying graphical optimization a set of laser cutting parameter values were determined given kerf width, material removal rate and assist gas consumption as optimization criteria.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> laser cutting, P265GH steel, kerf width, material removal rate, assist gas consumption, central composite face-centered factorial design.

### 1. INTRODUCTION

Among various non-conventional machining processes, laser cutting has become a well established technology in industry which is being, due to continuous development of this technology, increasingly used for contour cutting of a wide range of materials. Currently, in industry production CO<sub>2</sub> and Nd:YAG lasers have the largest share. However, in near future fiber lasers will take the primacy due to beam quality (size of spot, divergence, focusing, stability, etc.), higher energy efficiency, higher cutting speeds (particularly for thinner plates), ability to cut reflective materials (aluminum, copper, brass), lower operational costs etc. Regardless of the

technology in question, laser cutting is characterized by a number of controllable and uncontrollable process parameters and their interactions, which in turn determine the efficiency of the entire cutting process that can be quantified using different performances related to quality, productivity and cost [1]. The cutting process itself is complex, and moreover the main laser cutting parameters differently (in quantitative and qualitative sense) affect performances depending on the change intervals, workpiece thickness and also settings of other relevant cutting parameters. It has been observed that in CO<sub>2</sub> laser oxygen cutting of thinner carbon steel plates, an increase in the cutting speed causes an increase in surface roughness, but a

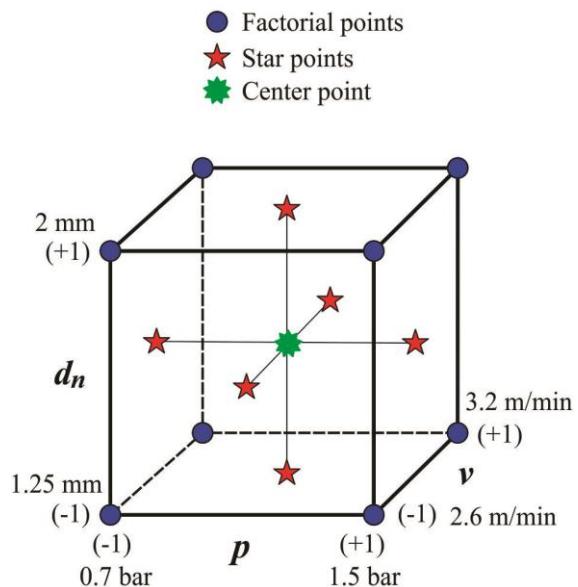
decrease in the size of kerf width and range of heat affect zone (HAZ). On the other hand, in the case of thicker sheets, an increase in the cutting speed causes an increase in the range of HAZ zone and a decrease in kerf width and surface roughness [2]. Although the cutting process itself is complex, depending on the parts being cut and their end-use, different laser cutting performances are set as priorities. As far as producers are concerned minimization of cost and maximization of productivity are in the forefront. On the other hand, customers want products of ultimate quality which complies with prescribed standards such as ISO 9013 which defines cut classes regarding perpendicularity of cut, surface roughness, etc. One of the ways to ensure achievement of the given goals or desired balance between contradicting goals is through empirical or analytical modeling and optimization of the laser cutting process.

Given that kerf width is very important geometrical characteristic necessary for calculation of other important performances such as perpendicularity of cut, material removal rate (indirectly specific cutting energy), power of the exothermal reaction from iron oxidation and power spent on metal melting in the cutting region, the scope of the present paper was to investigate CO<sub>2</sub> laser cutting of pressure vessel steel P265GH. More specifically, the study was focused on the analysis of the effects of assist gas pressure, cutting speed and nozzle diameter on the kerf width. To this aim, central composite face-centered factorial was adopted for the experimentation and the obtained data were used for the development of kerf width and material removal rate (MRR) mathematical models. In addition to modeling, the optimized laser cutting conditions for minimization of kerf width, assist gas consumption and maximization of MRR were determined using the graphical optimization.

## 2. EXPERIMENTAL SETUP AND DETAILS

A series of laser cutting experiment trials were conducted using a Prima Industry CO<sub>2</sub>

laser cutting machine. The cuts were performed with a Gaussian distribution beam mode (TEM<sub>00</sub>) in continuous wave mode. The machine was used to cut rectangular specimens with dimensions of 50mm×90mm. The laser cutting experiment was performed according to central composite face-centered factorial design in which three laser cutting parameters such as assist gas pressure ( $p$ ), cutting speed ( $v$ ) and nozzle diameter ( $d_n$ ) were varied (Fig. 1). The other relevant laser cutting parameters were kept constant during experimentation (Table 1).



**Figure 1.** Experimental plan and values for parameter levels

**Table 1.** Constant parameters in experimentation

Laser	CO <sub>2</sub>
Operating mode	CW
Maximal power, kW	4
Lens focal length, mm	127
Focal point position, mm	0
Stand-off distance, mm	1
Type of gas	O <sub>2</sub> (3.5)

As workpiece material, P265GH steel (EN 10028-2; DIN 17155) was used. P265GH steel is carbon non-alloy steel designed for high temperature applications. Because of good weldability it is widely used to for manufacturing pressure vessels, piping elements, boilers, heat exchangers and similar components. Sheets and sections made of P256GH are used to produce suspensions of

pipelines and other refining, petrochemical and power installation elements [2]. Nominal chemical composition of P265GH steel is: C max 0.2%; Mn 0.8-1.40%; Si max. 0.40%; P max 0.025 %; S max 0.01 %; Al max 0.02%; N max 0.012%; Cu max 0.3%; Cr max 0.3%; Mo max 0.08%; Ni max 0.3%; Nb max 0.02%; Ti max 0.03%; V max 0.02%.

As a result of the interaction of the laser beam and workpiece material, a certain amount of material is removed resulting in kerf formation. The geometry characteristics of the resulting kerf are of major interest in assessing the quality of the cutting process. Kerf width is an important feature of the laser cutting process that provides the advantage of this technology compared to other methods of contour cutting. It is well known that the kerf width increases with the increase of workpiece thickness and is variably affected by the size of spot, laser power, cutting speed, characteristics of the material, wavelength, the method of cutting and assist gas pressure in the case of oxygen cutting [3]. Kerf width is necessary information for determination of other laser cutting performances such as productivity measures (such as MRR) and energy performances such as power of the iron oxidation reaction (exothermic reaction).

A top and bottom kerf widths were measured using Mitutoyo QuickScope vision measuring machine with resolution of the length measuring system of  $0.5\mu\text{m}$ . The kerf width of each specimen was measured by analyzing pictures of the top (laser beam entry) and bottom surface (laser beam exit) of the specimens using Q-spark image processing software. The kerf width was measured at 3 equally distanced positions along the picture of the kerf and averaged values were recorded.

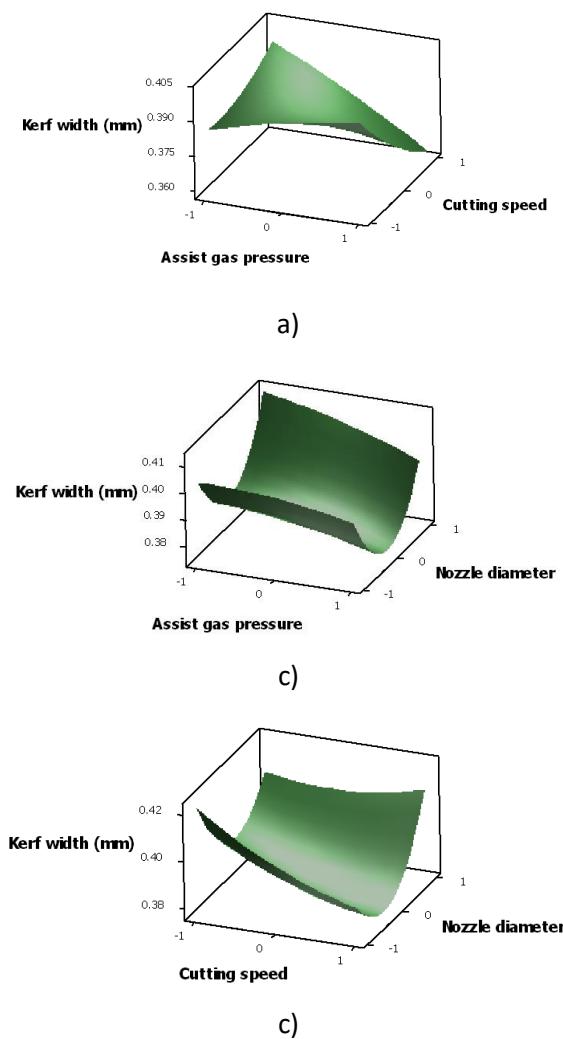
### 3. RESULTS AND DISCUSSION

According to the central composite face-centered factorial design, total of 17 experimental trials were conducted and experimentally measured values were used so as develop mathematical model relating laser cutting parameters and average kerf width.

The second order model developed by using least square method in coded form was obtained as:

$$w = 0.382 - 0.006p - 0.007v + \\ 0.002d_n - 0.002p^2 + 0.004v^2 + \\ 0.022d_n^2 - 0.013pv - 0.0026pd_n + 0.009vd_n \quad .(1)$$

The coefficient of determination ( $R^2$ ) value of 0.82 and mean average percentage error of about 2% indicated that the full second order model with interactions explains 82% of the variability in kerf width values and that the model is adequate for use. For the purpose of the analysis of combined effects (interaction effects) of laser cutting parameters on kerf width, three 3-D surface plots (Fig. 2) were generated. Herein, two parameters of interest were varied from its low to its high level, while the third was held constant at central level.



**Figure 2.** Interaction effects of the laser cutting parameters on the kerf width

For assist gas pressure below 1.1bar, kerf width increases with an increase in the cutting speed. However, afterwards, kerf width decreases with an increase in cutting speed. This observation has also been reported in the case of CO<sub>2</sub> laser oxygen cutting of 2 mm thick mild steel [2]. With a decrease in cutting speed the interaction time between laser beam and workpiece material is increased for which also additional energy induced by the exothermal reaction of iron oxidation is released in the cutting region. Moreover, an increase in assist gas pressure increases assist gas mass flow rate in the cut kerf which results in releasing higher energy levels from exothermal reaction. Consequently, kerf width is increased (Fig. 2a). For constant cutting speed of 2.9m/min (Fig. 2b) the effect of nozzle diameter on kerf width variation is much more pronounced with respect to assist gas pressure. It could be observed that there exists an optimum nozzle diameter region which ensures minimal kerf width. This may be a consequence of ensuring adequate oxygen flow in the cutting zone without allowing the workpiece being widespread burned resulting in wider kerf or insensitivity of such nozzles to minor misalignment and changes in supply pressure that result in wider kerf. The same conclusion one may derive in the interaction plot of cutting speed and nozzle diameter (Fig. 2c).

In laser cutting kerf width affects several process performances such as cutting accuracy, MRR, specific cutting energy as well as energy balance of oxygen laser cutting of steel. When cutting parts on a CNC laser machine in order to meet part final dimensions as close as possible to the programmed shapes it is of prime importance to know kerf width value as a result of using given set of main laser cutting parameters so as to adequately set programming path and offset of the laser beam path. In that sense maintaining a certain target kerf width value all the way around the part is of practical interest. In the context of MRR it is well known that maximization of kerf width is beneficial for increasing the productivity. Finally, from the energy balance of oxygen laser cutting of steel it is known that

the power of the exothermal reaction from iron oxidation, from one side, and the power spent on metal melting in the cutting region are among other workpiece material constants influenced to a certain degree by kerf width.

In the conducted experimental research in the analysis of the kerf width variation two continual parameters (assist gas pressure and cutting speed) and one discrete parameter, i.e. nozzle diameter were included. Nozzle diameter is very important parameter in laser cutting as it influences the assist gas mass flow rate in the cut kerf. Namely the cut quality is highly dependent on the rate of the exothermic oxidation reaction which is influenced by the assist gas pressure and nozzle diameter. Also, nozzle diameter and the assist gas pressure are the only two constitutive terms in models for the estimation of cutting costs and assist gas consumption. In CO<sub>2</sub> laser cutting of steel using oxygen, the assist gas consumption (m<sup>3</sup>/h) can be determined as [4]:

$$C_{O_2} = 0.411 \cdot d_n^2 \cdot (p+1). \quad (2)$$

where  $d_n$  (mm) is nozzle diameter and  $p$  is assist gas pressure (bar).

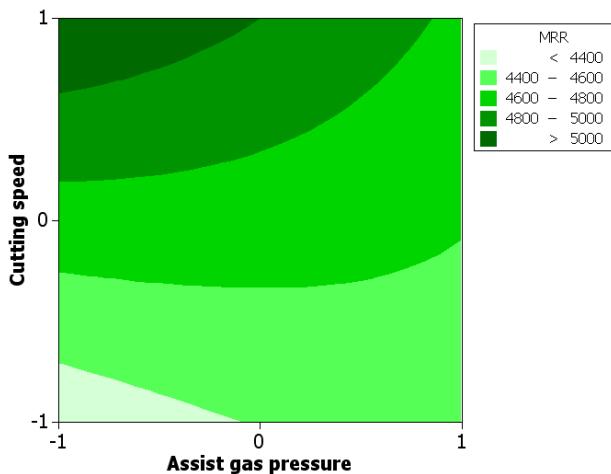
Finally, it has been observed that for a given workpiece thickness there is an optimum nozzle diameter which ensures maximum cutting speed as a direct consequence of improved pressure distribution for removal of molten material [5].

If one considers assist gas consumption as an important criterion it is obvious from equation 2 that minimal nozzle diameter as well as assist gas pressure ensure least the assist gas consumption. On the other hand, given that MRR is the product of kerf width, workpiece thickness and cutting speed, it is obvious to use the highest cutting speed so as to ensure maximal productivity. However, this particular combination of laser cutting parameters, i.e. assist gas pressure at level -1 (0.7bar), cutting speed at level +1 (3.2m/min) and nozzle diameter at level -1 (1mm) resulted in sporadic formation of dross at the bottom kerf. This could be a consequence of low flow rate in the cutting zone which results in lower

induced energy from exothermic reaction which, in addition to laser energy, is not sufficient to evacuate the molten metal cleanly and efficiently. Therefore, in order to determine a particular set of laser cutting parameter values in accordance to discussed criteria, an empirical mathematical model (in coded units) for the MRR was developed in the following form:

$$\begin{aligned} MRR = & 4493 - 79p + 397v + \\ & 33d_n - 34p^2 + 6v^2 + 238d_n^2 - . \quad (3) \\ & 153pv - 28pd_n + 102vd_n \end{aligned}$$

Now, a particular set of laser cutting parameter values (cutting speed and assist gas pressure) can be determined using the contour plot (Fig. 3) wherein the nozzle diameter of 1mm was fixed.



**Figure 3.** Contour plot of MRR

From Fig. 3 one can select a given combination of cutting speed and assist gas pressure so as to maximize MRR. Even though higher assist gas pressures result in higher cutting speeds and quality, flow rates rises linearly and consequently costs. Moreover, the use of higher assist gas pressures does not necessarily ensure repeatability of the laser process due to turbulence in the gas flow. Having regard to the above described in the present study the combination of assist gas pressure at level -1 (0.7bar) and cutting speed at level 0.5 (3.05m/min) was selected. Selection of cutting speed was performed given that stable cutting is achieved without dross formation. Using these above given mathematical models one can estimate kerf

width, MRR and assist gas consumption for handbook recommendations (1), currently adopted laser cutting conditions in production (2) and optimized cutting conditions (3) as summarized in Table 2.

**Table 2.** Comparison of kerf width, MRR and assist gas consumption under various cutting conditions

	$d_n$ (mm)	$v$ (m/min)	$p$ (bar)	$w$ (mm)	MRR (mm <sup>3</sup> /min)	$Co_2$ (m <sup>3</sup> /h)
1	0.8	2.9	3	-	-	1.05
2	2	2.6	1.5	0.41	4285	4.11
3	1.25	3.05	0.7	0.4	4941	1.09

As could be observed from Table 2 although there is no significant difference in kerf width values there exist considerable difference in MRR, and particularly in assist gas consumption values, between currently adopted laser cutting conditions in production and optimized laser cutting conditions. Also, one can notice a fairly good agreement between assist gas flow rates (assist gas consumption) between handbook recommendations [6] and optimized laser cutting conditions.

#### 4. CONCLUSION

In this paper an experimental investigation of the CO<sub>2</sub> laser cutting of P265GH steel with thickness of 4mm was performed in order to investigate the effect of assist gas pressure, cutting speed and nozzle diameter on the kerf width. Experimentation was based on the use of the central composite face-centered factorial design upon which mathematical models for kerf width and material removal rate were developed. Within the covered experimental hyperspace and from conducted optimization analysis the following conclusions can be drawn:

- a relatively small changes in kerf width values were observed in the covered experimental hyperspace, wherein the nozzle diameter has a major effect on the kerf width, followed by the cutting speed, while the assist gas pressure plays a minor role,

- if one separately considers kerf width, MRR and assist gas consumption as optimization criteria, optimized conditions (set of laser cutting parameter values) are different,
- based on the analysis of developed empirical models for kerf width and material removal rate and analytical equation for assist gas consumption, optimized laser cutting conditions were determined using the graphical optimization approach,
- in comparison to currently adopted laser cutting conditions in production, optimized conditions ensure significant decrease in assist gas consumption and an increase in material removal rate,
- the developed kerf width model can be used for the estimation of power from exothermal reaction of iron oxidation, power spent on metal melting in the cutting region, specific cutting energy and MRR,
- in line with other mathematical models such as for perpendicularity of cut, surface roughness and HAZ, the developed model can be used in the formulation of laser cutting optimization problems.

#### **ACKNOWLEDGEMENT**

This work was carried out within the project TR 35034 financially supported by the Ministry of Education and Science of the Republic of Serbia.

#### **REFERENCES**

- [1] M. Madić, M. Radovanović: Application of RCGA-ANN approach for modeling kerf width and surface roughness in CO<sub>2</sub> laser cutting of mild steel, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Vol. 35, No. 2, pp. 103-110, 2013.
- [2] R. Kowalczyk, W. Zebala: Analysis of laser cutting speed influence on the surface quality and shape deviation of steel parts, Proceedings of the SPIE, Volume 9290, id. 929011 9, 2014.
- [3] M. Madić, M. Radovanović, M. Kovačević: Modeling and optimization of kerf width obtained in CO<sub>2</sub> laser cutting of aluminum alloy using discrete Monte Carlo method, Journal of Production Engineering, Vol. 18, No. 1, pp. 39-42, 2015.
- [4] K. Kellens: Energy and resource efficient manufacturing – unit process analysis and optimisation, PhD thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2013.
- [5] W.M. Steen, J.N. Kamalu: Laser cutting, in: M. Bass (Ed.): *Laser Materials Processing*, North-Holland, Amsterdam, Netherlands, pp. 15-111, 1983.
- [6] W. Shulz, C. Hertzler: *Cutting: modeling and data*, in: R. Poprawe, H. Weber, G. Herziger (Eds) *Laser Applications*, Landolt-Börnstein - Group VIII Advanced Materials and Technologies (Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology), vol 1C, Springer, Berlin, Heidelberg, 2002.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## INTEGRACIJA TEHNOLOGIJA VIRTUELNOG INŽENJERINGA U SAVREMENOM PROJEKTOVANJU PROIZVODA I TEHNOLOŠKIH PROCESA

Vesna Mandić<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, Srbija, [mandic@kg.ac.rs](mailto:mandic@kg.ac.rs)

**Apstrakt:** U radu je prikazan integrativni pristup u primeni tehnologija virtuelnog inženjeringa u projektovanju proizvoda i tehnoloških procesa za njegovu proizvodnju. To se odnosi na integraciju CAD/CAM/CAE tehnologija u projektovanju proizvoda, FE/FV numeričkih simulacija i optimizacije proizvodnih procesa, za dobijanje digitalnih prototipova proizvoda i procesa, sa jedne strane, i brze izrade prototipova (RP) za dobijanje fizičkih prototipova, sa druge strane. Reverzni inženjering (RE) i koordinatna metrologija takođe su primjenjeni u reinženjeringu procesa oblikovanja lima realnog proizvoda, sa ciljem generisanja inicijalne geometrije proizvoda i sprovodjenja konačne kontrole kvaliteta proizvoda na multisenzorskoj koordinatnoj mernoj mašini.

**Ključne reči:** CAD/CAM/CAE, virtualna proizvodnja, brza izrada prototipova, reverzni inženjering

### 1. UVOD

Jedan od osnovnih problema u proizvodnji je kako integrisati inženjerske i proizvodne aktivnosti, s obzirom da se integracija mora bazirati na interakciji između dizajnera, projektanata, tehnologa, dobavljača i kupaca, u celom životnom ciklusu proizvoda, odnosno, u aktivnostima dizajna, projektovanja, proizvodnje, testiranja, održavanja i marketinga. Da bi se dostigao zadovoljavajući stepen integracije, neophodno je imati model koji pokriva sve inženjerske funkcije i protok informacija u fazi projektovanja i same proizvodnje.

Proizvodne kompanije su prinuđene da digitalizuju informacije o proizvodu i tehnologiji i ubrzaju proizvodnu inovativnost, kako bi povećale svoju konkurentnost na globalnom tržištu. Virtuelni modeli proizvoda i procesa su fleksibilni i omogućavaju željeni broj iteracija do dostizanja optimalnog rešenja.

Pored toga, njegovim korišćenjem se mogu pouzdano predvideti poslovni rizici, i time podržati menadžment u donošenju odluka i strateškom upravljanju u kompaniji.

### 2. KOMPONENTE SISTEMA VIRTUELNOG INŽENJERINGA

Tehnologije virtuelnog inženjeringa, integriraju inženjerske i proizvodne aktivnosti, koristeći virtuelne modele i numeričke simulacije umesto realnih objekata i operacija nad njima. To je svojevrsni «digitalni alat» za simulaciju i optimizaciju proizvodnje, kroz modele proizvoda i procesa razvijene u virtuelnom okruženju, sa naprednim mogućnostima brze izrade prototipova i brze izrade alata, prikaza u 3D okruženju, kolaborativnih funkcija za efikasnu saradnju timova, čak i onih udaljenih, uz pouzdano čuvanje svih elektronskih podataka koji opisuju proizvod i procese za njegovu izradu,



Slika 1. Integrirani razvoj proizvoda i tehnoloških procesa

servisiranje i prodaju [1]. Na slici 1 su prikazane komponente sistema virtuelnog inženjeringu u integrisanom razvoju proizvoda i tehnoloških procesa podržanom primenom različitih komponenti sistema virtuelnog inženjeringu:

1. Revezni inženjering (*RE – Reverse engineering*)
2. CAD (*Computer Aided Design*)
3. Virtuelna proizvodnja (*VM – Virtual Manufacturing* kao FE simulacije u CAE – *Computer Aided Engineering*)
4. Brza izrada prototipova (*RP – Rapid Prototyping*)
5. Kontrola kvaliteta (*CMM – Coordinate Measurement Machine*)
6. CAM (*Computer Aided Manufacturing*)

Veliki broj radova u literaturi prezentira najnovija istraživanja i dostignuća u oblasti virtuelnog razvoja proizvoda i procesa, realizovanog u integrisanom VE (*Virtual Engineering*) sistemu, koji koristi set gore opisanih tehnologija za modeliranje, simulaciju, optimizaciju, kontrolu i verifikaciju realnih proizvodnih sistema i projektovanih proizvoda. Stark i ostali autori [2] su analizirali ključne

elemente u modernom virtuelnom projektovanju proizvoda, koji uključuje parametarsko projektovanje u 3D-CAD modeliranju, CAE analize, CNC proizvodnju, validaciju simulacija i brzim prototipovima za kreiranje robustnog integrisanog sistema. Takodje se ističu prednosti korišćenja VR tehnika za interaktivnu procenu virtuelnih prototipova (*VR – Virtual Reality*).

Sa razvojem CAD tehnologija, reverzni inženjering postaje održivi metod za kreiranje 3D virtualnog modela postojećeg fizičkog objekta, koji se dalje koristi kao ulaz u različite CAD/CAM/CAE sisteme. Najčešće je korisno izraditi brzi prototip od skeniranog objekta, pa se digitalni model dobijen RE tehnikom, prevodi u STL format, koji predstavlja standardnu formu ulaznih podataka za bilo koji RP proces. Pošto se STL fajl učita u operativni sistem maštine za RP proces, izrađuje se replika skeniranog fizičkog objekta.

Pristup integriranog projektovanja i proizvodnje je primenjen u [3] za optimizaciju oblika strukturnih komponenti, počev od projektovanja jednostavnih struktura, bazirano na reverznom inženjeringu

primenom CMM ili optičkog skeniranja, zadavanja graničnih uslova vezano za složeni sklop i eksploracijske zahteve, preko primene VM tehnologija u proveri preporučene tehnologije za proizvodnju i proceni troškova za predložene strukturne komponente. Za validaciju su osim virtuelnih modela komponenti i tehnoloških procesa, korišćeni brzi prototipovi.

Dosta istraživanja je u poslednje vreme sprovedeno primenom integracije RP i RT (*Rapid Tooling*) tehnika, ili poznatih kao RPM (*Rapid Prototyping/Manufacturing*) tehnika [4,5,6].

Nesumljivo da su tehnike virtuelnog inženjeringu zastupljene i u virtuelnoj kontroli kvaliteta, pa je teško postaviti granicu između digitalnog i fizičkog sveta u modernoj metrologiji. Proces integracije digitalne i fizičke verifikacije i validacije je izložen u [7]. Autori analiziraju metode i tehnike za verifikaciju i validaciju dizajna odnosno projektnog rešenja proizvoda. Integracija metrologije u procese dizajna i projektovanja, kao rana verifikacija konceptualnih varijanti, i same proizvodnje su ključni budući trendovi.

### 3. STUDIJA SLUČAJA

Na proizvoljno izabranom proizvodu, odnosno komponenti proizvoda, kroz ovu studiju slučaja je prikazana primena integrisanih tehnologija virtuelnog inženjeringu u re-inženjeringu tehnoloških procesa u obradi lima i verifikaciji predloženog projektnog rešenja alata na virtuelnim i fizičkim prototipovima [1]. Ručica od lima, koja se koristi u izradi različitih vrsta posuđa, dobija se postupcima prosecanja, probijanja, dubokog izvlačenja i savijanja. Poslednja operacija savijanja, i zatvaranja ručice može biti nestabilna, u zavisnosti od oblika pripremka i prethodne operacije dubokog izvlačenja/savijanja, dodatno uslovljena i anizotropijom lima. Ako se takva komponenta kupuje od dobavljača onda proizvodjač ne poseduje tehnološka rešenja i tehničku dokumentaciju ukoliko želi da tu komponentu proizvoda samostalno izradjuje.

Kako je digitalni model komponente proizvoda osnova za integriranu primenu tehnologija virtuelnog inženjeringu, primjenjeni re-inženjerинг pristup je obuhvatio sledeće VE tehnologije:

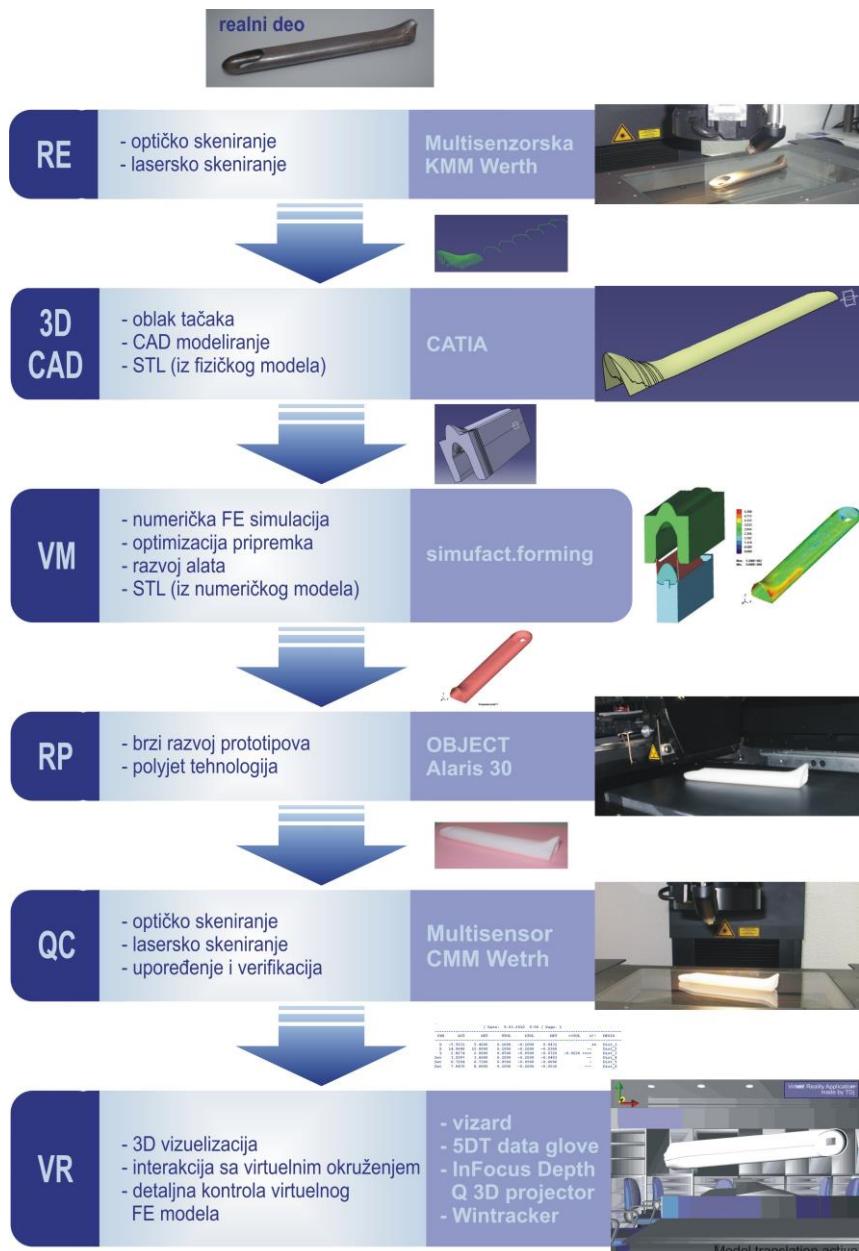
1. Revezni inženjering (multisenzorska CMM Werth – optički i laserski senzori) – za skeniranje pripremka i nepravilnih površina proizvoda
2. CAD modeliranje (CATIA) – za 2D model pripremka i 3D model proizvoda
3. Virtuelna proizvodnja (FE simulaciju Simufact.forming-u) – za virtuelnu verifikaciju i validaciju predložene tehnologije izrade ručice i projektovanje alata
4. Brza izrada prototipova (3D printer ALARIS uz primenu PolyJet tehnologije) – za fizičku verifikaciju FE modela proizvoda
5. Kontrola kvaliteta (multisenzorska CMM Werth) – za upoređenje između realnog dela ručice i RP modela virtuelnog FE rezultata
6. CAM modeliranje – za generisanje NC koda za CNC mašine za izradu alata

Na slici 2 prikazana je predložena re-inženjeringu procedura za razvoj komponente proizvoda koja je predmet studije slučaja u integrisanom okruženju virtuelnog inženjeringu.

Primjena tehnologija za proizvodnju ručice obuhvata sledeće operacije:

- Prosecanje sa probijanjem - ovom operacijom se iz table lima dobija razvijeno stanje radnog komada;
- Dvougaono savijanje sa dubokim izlačenjem - predstavlja prvu operaciju oblikovanja donje površine ručice;
- Savijanje - poslednja operacija kojom se oblikuje gornja površina ručice i finalno zatvaranje lima na zahtevani oblik.

Polažni materijal za obradu je prosečeni deo od lima Č.0146, debljine 0,7 mm, čiji oblik i dimenzije obezbeđuju dovoljno materijala da se nakon dve operacije obrade lima dobije ručica tačno definisanih dimenzija i oblika. Na slici 3 prikazana je gotova ručica od lima i prosečeni pripremak, koji su dobijeni od proizvodjača posuđa za kojeg je realizovan re-inženjeringu tehnologije.



Slika 2. Re-inženjerинг технологије изrade ручице од лима применом интегрисаног система виртуелног инженеринга



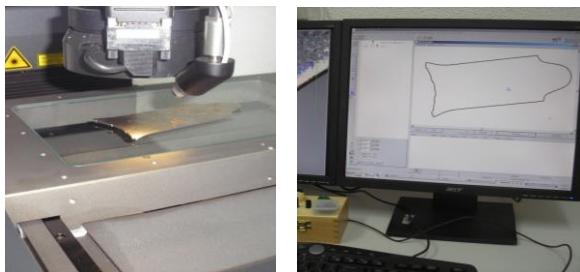
Slika 3. Gotov deo i pripremak

Gotov deo i pripremak su skenirani na multisenzorskoj koordinatoj mernoj mašini WERTH VideoCheck IP250, koja je opremljena sa tri senzora: optički, laser i fiber kontaktni

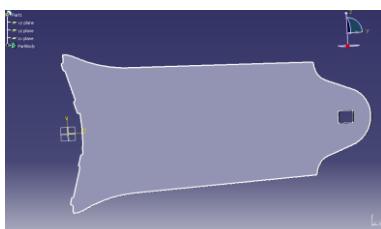
sensor. Pošto je pripremak ravanska figura sprovedeno je optičko skeniranje zatvorene 2D konture i kao izlaz je dobijen ASCII fajl sa koordinatama tačaka na ivicama opsečenog pripremka. Izabrana je opcija *backlighting* pri čemu svetlo pada na pripremak odozdo, tako da su konture vidljive na ekranu kao kontrast. Na slici 4 prikazan je pripremak na stolu CMM i odgovarajući prikaz rezultata skeniranja na monitoru.

Oblak tačaka u ASCII formatu je importovan u programski paket CATIA, u *Digitized shape editoru*, gde se povezivanjem tačaka dobija konturna linija pripremka. Konturna linija se koristi u *Part-design-u* za dobijanje 3D modela

pripremka sa definisanim debjinom lima od 0,7 mm. CAD model pripremka je prikazan na slici 5 i isti je korišćen u FE simulaciji tehnologije.



Slika 4. Optičko 2D skeniranje konture pripremka na CMM Werth



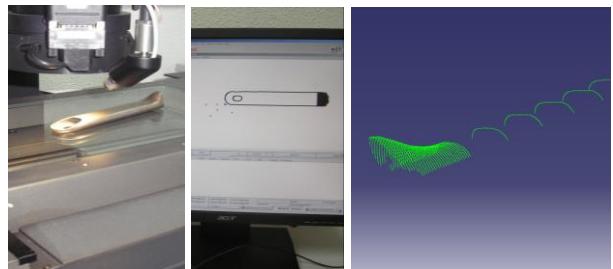
Slika 5. CAD model pripremka od lima

Skeniranje gotovog dela je izvedeno korišćenjem optičkog i laserskog senzora Werth CMM u opciji 3D skeniranja. Optičkim skeniranjem je registrovan konturni oblik sa opcijom *autofocus*, kao što je to prikazano na 6, a laser senzorom je skenirana gornja površina ručice. Na delu ručice sa promenljivim presekom i složenom površinom registrovane su *laser scan* linije na medusobnom rastojanju od 0,75 mm, dok je na ravnom delu ručice skeniranje izvedeno sa linijama udaljenim po 20 mm. Kao i u prethodnom slučaju, rezultat oba skeniranja je exportovan kao ASCII fajl, naknadno importovan u CATIA-u.

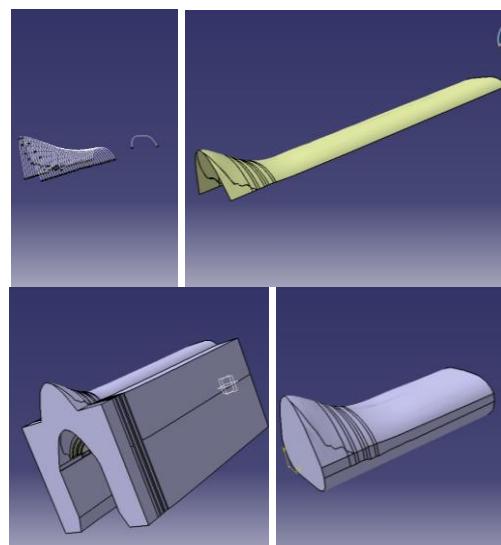
Rezultati 3D skeniranja su importovani u *Generativ shape design* i korišćeni za generisanje površina gornjeg dela alata za oblikovanje lima u drugoj operaciji. U slučaju CAD modeliranja površina unutrašnjeg trna korišćen je *offset* za debjinu lima 0,7 mm. CAD modeli karakterističnih površina i gornjeg dela alata i trna su prikazani na slici 7.

Za prvu operaciju oblikovanja, na osnovu skanirane konture pripremka i merenja je definisan oblik gornjeg pritiskivača. Matrica za prvu operaciju oblikovanja odgovara obliku pritiskivača, uzimajući u obzir proračunate zazore. Centralni deo alata se oslanja na

opruge, obezbeđujući potrebnu silu držanja u toku oblikovanja a nakon toga ima funkciju izbacivača. Alat za drugu operaciju oblikovanja se sastoji iz pritiskivača, trna i oslone ploče koja prima prethodno oblikovani deo.



Slika 6. Optičko 3D skeniranje ručice od lima na CMM Werth



Slika 7. CAD modeli karakteristične površine, gornjeg alata i trna za oblikovanje lima

Simulacija metodom konačnih elemenata izvedena je za obe operacije korišćenjem komercijalnog softvera Simufact.forming. Primjenjena je nelinearna FE (*Finite Element*) analiza sa 3D solid elementima (HEX), optimizovanim za obradu lima deformisanjem korišćenjem "2½ D sheet mesher - Sheetmesh".

Kriva tečenja napona određena je testom zatezanja i zadata jednačinom

$$\sigma = 180 + 350 \epsilon^{0.23}, \text{ MPa.}$$

Uslovi u medjukontaktu su opisani Coulomb-ovim zakonom trenja, sa koeficijentom trenja 0,1.

Na slici 8 prikazan je pripremak (a) na kome je inicijalno formirana FE mreža (veličina elementa 0,7 mm, dva sloja elemenata po debolini lima), virtuelni sklop za prvu operaciju

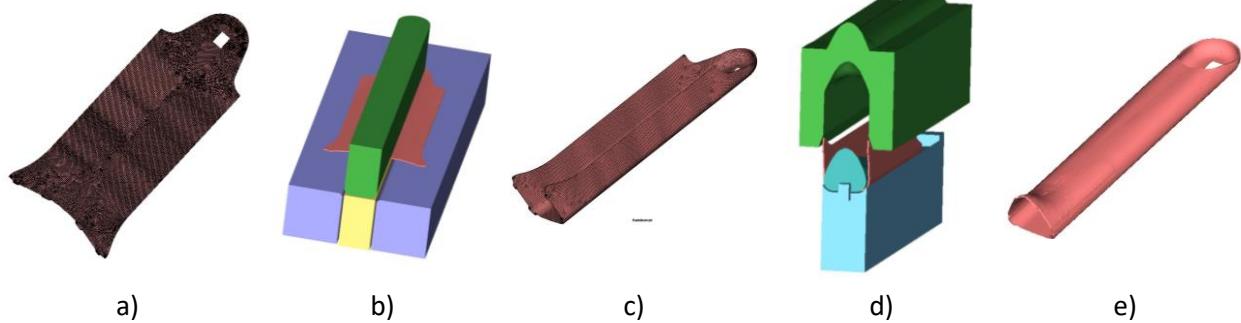
savijanja i dubokog izvlačenja lima (b), oblikovan obradak nakon prve operacije sa FE mrežom(c), virtualni sklop za drugu operaciju oblikovanja (d) i konačno virtualni model ručice (e) na kraju oblikovanja.

Na slici 9 prikazane su distribucije efektivnog napona u tri numerička koraka u prvoj operaciji oblikovanja, a na slici 10 u finalnoj operaciji oblikovanja. Kada se proces

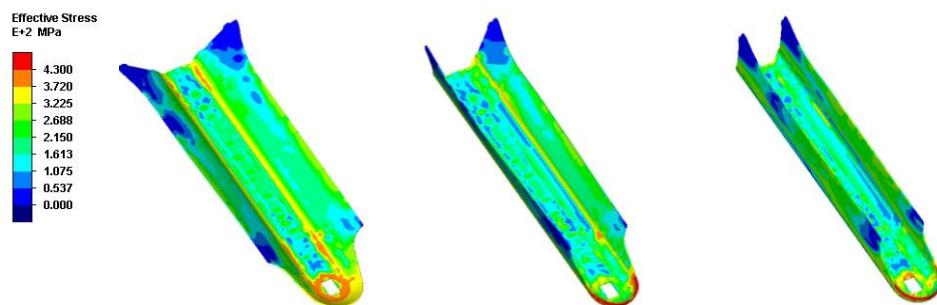
pripremka su važne sa aspekta pravilnog popunjavanja alata, tj. savijanja lima i dobijanja finalnog spoja krajeva lima bez preklopa na gornjoj površini ručice.

Precizna provera oblikovanja lima i "zatvaranja" ručice u finalnoj operaciji je analizirana u 8 karakterističnih preseka, prikazanih na slici 11.

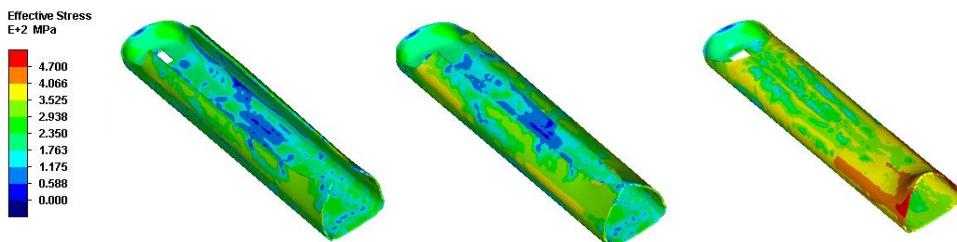
U ovom primeru su prikazani neki rezultati



**Slika 8.** Numerički modeli FE analize: a) inicijelna FE mreža pripremka b) virtualni sklop za I operaciju c) FE model nakon I operacije d) virtualni sklop za II operaciju e) finalni FE model ručice



**Slika 9.** Distribucija efektivnog napona u I operaciji



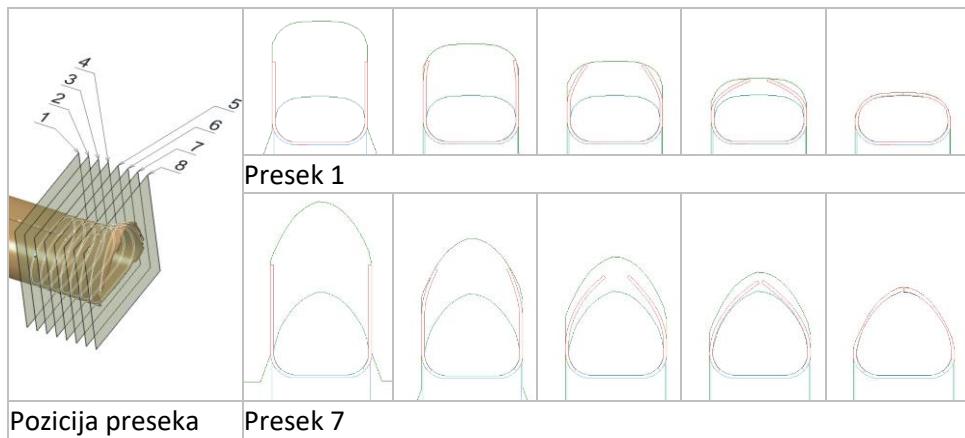
**Slika 10.** Distribucija efektivnog napona u II operaciji

modelira numerički metodom konačnih elemenata moguće je analizirati veliki broj izlaznih veličina u bilo kojem trenutku procesa. Na taj način se osim procene tečenja materijala, pojave defekata u obradi, mogu proceniti i kvalitet proizvoda, preciznost obrade i nivo zaostalih napona.

U ovom slučaju reinženjeringu procesa i tehnologija dobijanja ručice od lima, oblik površina pritiskivača i trna, dimenzije i oblik

FE procene, za preseke 1 i 7, gde je evidentno da je obezbedjeno pravilno popunjavanje alata, oblikovanje lima drške, bez pojave defekata preklopa ili šupljina u spoju.

Ma koliko su numerički modeli procesa i proizvoda dobijeni virtuelnom proizvodnjom sveobuhvatni i pouzdani, postoji potreba da se takvi modeli transformišu u fizičke modele posredstvom RP tehnika, u cilju finalne provere dimenzija i uklapanja.



Slika 11. Provera zatvaranja ručice kroz FE analizu rezultata u karakterističnim preseцима 1 i 7

Time je validirana preporučena tehnologija oblikovanja ručice i rešenja projektovanih alata.

Ma koliko su numerički modeli procesa i proizvoda dobijeni virtuelnom proizvodnjom sveobuhvatni i pouzdani, postoji potreba da se takvi modeli transformišu u fizičke modele posredstvom RP tehnika, u cilju finalne provere dimenzija i uklapanja.

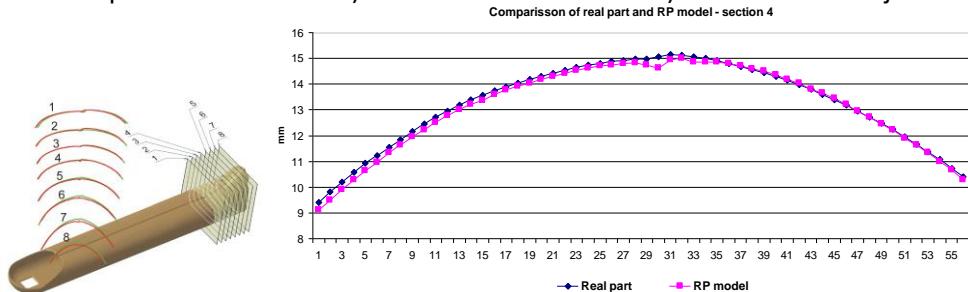
U tu svrhu, virtualni model ručice, dobijen FE simulacijom, je izvezen u STL fajl (slika 12.a) i korišćen za izradu prototipa od plastike primenom PolyJet tehnologije i 3D printera ALARIS 30. PolyJet tehnologija omogućava

slojeva od 28 µm, koji očvršćuju po dejstvu UV zraka.

Na slici 12 prikazan je RP model drške, koji je osim vizuelne kontrole površina korišćen za precizno merenje modela na CMM mašini WERTH. Strategija merenja je identična kao pri merenju realnog dela od lima na početku reverznog inženjeringu. Pozicije preseka za upoređenje oblika i dimenzija realnog dela od lima i RP modela, indirektno FE modela, prikazane su na slici 13. Dijagram na istoj slici prikazuje uporedjenje Z i Y koordinata za presek 4. Ovakav pristup je moguće primeniti



Slika 12. Brzi prototip na bazi FE simulacije i kontrola na CMM:: a) eksportovan STL iz FE simulacije b) RP model u 3D printeru ALARIS 30 c) metalni deo i RP model d) kontrolno merenje na CMM



Slika 13. Rezultati merenja na CMM – upoređenje RP/FE i metalnog dela, presek 4

dobijanje prototipova finih površina, sitnih detalja visoke rezolucije od fotopolimera VeroWhite FullCure 830, nanošenjem tankih

za reinženjering i ostalih vrsta procesa, gde se želi precizna verifikacija rezultata FE simulacija i upoređenje fizičkih modela i realnog proizvoda.

## ZAHVALNOST

### 4. ZAKLJUČAK

U studiji slučaja su prezentirane komponente sistema virtuelnog inženjeringu, koje kao rezultat primene daju virtuelne/brze prototipove proizvoda i procesa, čija je analiza i verifikacija moguća i u fizičkom i virtuelnom smislu. Svaka komponenta VE sistema ima svoje prednosti i nedostatke, tako da je integrисани pristup, koji podrazumeva njihovu komplementarnu primenu postao moćan alat za projektante i istraživače.

Ukoliko se razvoj tehnologija i projektovanje alata radi isključivo na bazi iskustva projektanata, potrebno je dosta fizičkih prototipova alata i pokušaja u osvajanju tehnologije. Virtuelni razvoj proizvoda i optimizacija tehnoloških procesa primenom virtuelne proizvodnje, odnosno numeričkih simulacija daje značajno skraćenje vremena razvoja i smanjenje troškova. Pored toga, projektni timovi mogu dati više rešenja za različite varijante takvih proizvoda, što daje mogućnost kompanijama da se konkurenčki pozicioniraju na tržištu sa redizajniranim i unapredjenim proizvodima.

Kroz prikazanu studiju slučaja na primeru re-inženjeringu procesa dobijanja ručice od lima demonstrirane su prednosti i mogućnosti integracije tehnologija virtuelnog inženjeringu, kroz primenu CAD/CAM/CAE, VM i RP/RE tehnika.

Ovaj rad sadrži rezultate istraživanja sprovedenih u okviru projekta TR34002, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] Mandic, V.: *Virtuelni inženjering*, Mašinski fakultet Kragujevac, 2007, Kragujevac.
- [2] Stark, R., Krause, F.-L., Kind, C., Rothenburg, U., Müller, P., Hayka, H., Stöckert, H.: Competing in engineering design — The role of Virtual Product Creation, *CIRP Journal* 3 (2010) 175–184.
- [3] Chang, K.-H., Tang, P.-S.: Integration of design and manufacturing for structural shape optimization, *Advances in Engineering Software* 32 (2001) 555-567.
- [4] Yan, Y. at all,: *Rapid Prototyping and Manufacturing Technology: Principle, Representative Technics, Applications, and Development Trends*, Tsinghua Science and Technology, June 2009, 14(S1): 1-12.
- [5] Yang, D.Y., Ahn. D.G., Lee, C.H, Park, C.H, Kim, T.J.: Integration of CAD/CAM/CAE/RP for the development of metal forming process, *Journal of Mat.Proc.Tech.* 125 (2002) 26-34.
- [6] Bernard, A., Fischer, A., New Trends in Rapid Product Development, *CIRP Annals - Volume 51, Issue 2, 2002, Pages 635-652.*
- [7] Maropoulos, P.G., Ceglarek, D., Design verification and validation in product lifecycle, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2010) 740–759.

## INTEGRATION OF VIRTUAL ENGINEERING TECHNOLOGIES IN MODERN DESIGN OF PRODUCT AND TECHNOLOGICAL PROCESSES

**Abstract:** The paper presents integrative approach in application of virtual engineering technologies in design of product and production processes for its manufacture. This has resulted in integration of CAD/CAM/CAE in product design and FE/FV numerical simulations and optimization of production processes, as digital prototyping of product and processes, from one side, and rapid prototyping techniques (RP) as physical prototyping, on the other side. Reverse engineering (RE) and coordinate metrology have been also applied in reengineering of sheet metal forming process of existing product, with the aim to generate initial digital information about product and to perform final quality control on multi-sensor coordinate measurement machine.

**Keywords:** CAD/CAM/CAE, virtual manufacturing, Rapid prototyping, Reverse engineering



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

### 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## PRILOG ANALIZI TEHNOLOGIČNOSTI OBLIKA U RAZVOJU PROIZVODA

Svetislav Lj. MARKOVIĆ<sup>1</sup>, Ljubica MILOVIĆ<sup>2</sup>, Dragoljub VELIČKOVIĆ<sup>3</sup>, Bratislav N. STOJILJKOVIĆ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Visoka škola tehničkih strukovnih studija Čačak, Srbija, svetom@mts.rs

<sup>2</sup>Tehnološko-metalurški fakultet Beograd, Srbija, acibulj@tmf.bg.ac.rs

<sup>3</sup>EPS, REIK Kolubara Lazarevac, Srbija, dragoljub.velickovic451@gmail.com

<sup>4</sup>Muzej Nikole Tesle Beograd, Srbija, bratislav.stojiljkovic@tesla-museum.org

**Apstrakt:** Pod tehnologičnošću se podrazumeva veći broj činilaca, koji se odnose na način izrade svih sastavnih delova nekog industrijskog proizvoda: odlivci, otpresci, otkivci, kao i delovi predviđeni za izradu struganjem, glodanjem, bušenjem, rendisanjem, elektroerozijom, brušenjem, probijanjem, prosecanjem, savijanjem, dubokim izvlačenjem, istiskivanjem, izvlačenjem, provlačenjem, valjanjem, sinterovanjem, brizganjem. Tehnologičnost zavisi i od principa i načina ostvarivanja spojeva, koji mogu biti: zavareni, lemljeni, lepljeni, presovani, stezni, zakovani i zavrtanjski spojevi, veze čivijama, elastičnim prstenovima i klinovima, ožljebljeni i poligonalni spojevi. Značajan uticaj na tehnologičnost oblika ima i obaveznost izvođenja naknadne termičke obrade, galvanizacije, bojenja i drugih vidova zaštite i ojačanja mašinskih delova. Izučavanjem svih ovih faktora, njihovog značaja i uticaja na oblik proizvoda, može se puno uticati na poboljšanje kvaliteta, smanjenje troškova proizvodnje i posebno na poboljšanje dizajna proizvoda. S obzirom da se tokom projektovanja i konstruisanja mašinskih delova, elemenata i sklopova vrši stvaranje konstrukcionog rešenja, pa pored ostalog i oblika, uopšte dizajna proizvoda, tim aktivnostima je potrebno posvetiti najveću pažnju. To od konstruktora i celog konstrukcionog biroa zahteva veliko angažovanje, odgovornost i znanje, jer nastale greške „nije moguće naknadno ispravljati“. Preciznije rečeno, njihova ispravka je veoma skupa i složena i po pravilu izvodi se na mestu ugradnje, to jest kod kupca, što posebno poskupljuje i komplikuje njeno sprovođenje, ali i veoma nepovoljno utiče i na renome konstruktora, posebno proizvođača. Samo organizovanim, sistematskim i timskim radom može se postići zadovoljenje svih navedenih zahteva. Neuvriđanjem značaja ovog problema ne može se obezbediti kvalitetan proizvod što neminovno vodi ka gubitku tržišta i propasti preduzeća.

**Ključne reči:** tehnologičnost, oblik, razvoj, proizvodi, dizajn.

### 1. UVOD

Jedan od najvažnijih zadataka razvoja proizvoda jeste postizanje željenog kvaliteta mašinskog sistema. I ostale faze životnog ciklusa svakog mašinskog sistema su izuzetno važne za ostvarivanje zahtevanog kvaliteta, ali nisu od presudnog značaja kao proces razvoja. Upravo zbog toga se posebna pažnja posvećuje projektovanju, razvoju oblika i

konstruisanju mašinskih sistema i njihovih elemenata i delova. Definisanje oblika se ostvaruje po predviđenom redosledu, u skladu sa važećim standardima i propisima, uz poštovanje ranije stečenih iskustava. Prema tome, planiranju kvaliteta mašinskog sistema mora se pristupiti pravovremeno, odnosno još u fazi razvoja oblika i konstruisanja. Da bi se obezbedio kvalitetan mašinski sistem mora se

definisati njegov oblik, koji će zadovoljiti zahtevane pokazatelje kvaliteta.

Razvoj oblika, kao bitna faza konstruisanja, predstavlja intelektualni poduhvat preduzet radi zadovoljavanja potreba korisnika tehničkih proizvoda. Konstruisanje i razvoj oblika zasnovani su na otkrićima i zakonima nauke. Istovremeno, usmereni su i na stvaranje uslova za primenu tih zakona na razvoj i izradu proizvoda. Razvoj oblika jeste kreativni proces čiji su nosioci kreativni timovi i kreativni pojedinci. Kreativne aktivnosti pri definisanju oblika prvenstveno su u službi otkrivanja i razvijanja novih proizvoda [1].

U suštini oblik mašinskog dela, elementa ili sistema je rezultat usklađenih činilaca u određenoj konstrukciji, koji definišu stepen društvenog razvoja i rezultat su nasleđenih genetskih karakteristika prethodnih generacija proizvoda. Oblik mašinskog dela je kompleksan skup informacija i izvor podataka o tehnologiji, potrebama i o stepenu društvenog razvoja u kojem je nastao. On nije rezultat jedne aktivnosti, kao što je, na primer, crtanje.

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.

Spoljašnji 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.

Oblik mašinskog dela mora biti prilagođen tehnologiji izrade. Drugim rečima, oblik proizvoda zavisi i od tehnološkog nivoa proizvođača. Mašinskim delovima se dodeljuju

oblici koji se najlakše mogu dobiti predviđenim postupkom izrade. Za takve delove se kaže da su tehnologični.

Pod tehnologičnošću izrade podrazumeva se veći broj činilaca, koji se odnose na:

- način izrade svih sastavnih delova: odlivci, otpresci, otkovci, kao i delovi predviđeni za izradu struganjem, glodanjem, bušenjem, rendisanjem, elektroerozijom, brušenjem, honovanjem, probijanjem, prosecanjem, savijanjem, dubokim izvlačenjem, istiskivanjem, izvlačenjem, provlačenjem, valjanjem, sinterovanjem, brizganjem;
- princip ostvarivanja spojeva: zavareni, lemljeni, lepljeni, presovani, stezni, zakovani i zavrtanjski spojevi, veze čivijama, elastičnim prstenovima i klinovima, ožlebljeni i poligonalni spojevi;
- obaveznost izvođenja naknadne termičke i hemijsko-termičke obrade i zaštite (galvanizacija, nanošenje prevlaka, bojenje);
- način stezanja, merenja i druge uticajne faktore.

Pri konstruisanju mašinskih proizvoda potrebno je definisati i način njihove izrade, kako bi se moglo pristupiti proračunu i definisanju konačnog oblika. Način izrade zavisi od više faktora, a pre svega od [2]:

- oblika proizvoda,
- veličine proizvoda,
- odgovornosti proizvoda,
- mehaničkih karakteristika materijala,
- broja komada,
- potrebne tačnosti dimenzija,
- potrebne površinske hrapavosti,
- estetskog izgleda,
- cene.

## 2. TEHNOLOGIČNOST IZRADE MAŠINSKIH DELOVA

Oblik mašinskog dela je tehnologičan ukoliko je pogodan za izradu predviđenom

tehnologijom. Svaka od postojećih tehnologija izrade, na više ili manje složen način, može dovesti do odgovarajućeg oblika mašinskog dela, koji zadovoljava funkciju i druge uslove. Prihvatljiviji je onaj oblik do kojeg se dolazi na tehnološki jednostavniji i jeftiniji način.

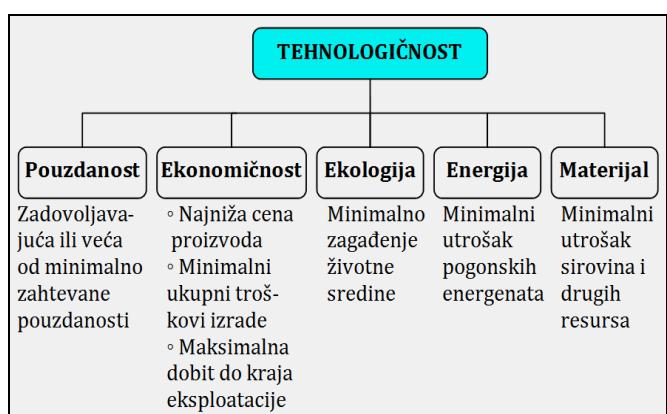
Tehnologičnost oblika se postiže prilagođavanjem konstrukcionih detalja potrebama pojednostavljenja postupka izrade, vodeći računa da se ne ugrozi funkcija, čvrstoća, izgled, ili neka druga karakteristika mašinskog dela. Usklađivanje konstrukcionih detalja radi postizanja optimalnog oblika mašinskog dela realizuje se tek kada su utvrđeni osnovni oblik, materijal i način izrade. Tako se umanjuje broj operacija izrade, olakšava postupak proizvodnje i smanjuje škart, utrošak materijala, vreme rada mašina i alata.

Postoji više kraćih ili širih definicija tehnologičnosti. Tehnologičan proizvod je onaj koji zadovoljava uslove funkcionalnosti, ekonomičnosti i estetike. Funkcionalnost ima isto značenje kao i pouzdanost – pouzdano funkcionisanje proizvoda. Ekonomičnost podrazumeva niske troškove izrade i korišćenja proizvoda. Kod nekih delova postrojenja nije važan izgled, dok kod drugih proizvoda estetika može biti jedan od primarnih zahteva.

Prema široj definiciji, tehnologično rešenje je ono koje osigurava funkcionisanje proizvoda, s traženim nivoom pouzdanosti, u unapred definisanim uslovima eksploracije i u predviđenom veku trajanja, uz najmanje troškove. Ovoj definiciji se može priključiti još dodatnih zahteva koji su već danas neophodni, a biće pogotovo potrebni u budućnosti, zbog krize energije, materijala (sirovinskih rezervi) kao i zagađivanja biološke okoline. Ta proširena definicija glasi: Tehnologično rešenje će biti ono koje osigurava ispravno funkcionisanje proizvoda s traženim nivoom pouzdanosti, u predviđenom veku eksploracije, a uz najmanje troškove, najmanji utrošak materijala, najmanji utrošak energije i uz najmanje zagađivanje biološke okoline (Sl. 1). Termin tehnologičnost je izведен iz ruskog jezika od istovetne reči. Drugi jezici nemaju jednu odgovarajuću reč. Tako na

primer, u engleskom jeziku je odgovarajući termin „cost effective design“ (ekonomično dizajniranje).

Veoma je važno uočiti razliku između tehnologije i tehnologičnosti. Ukoliko se posmatraju režimi i redosled operacija reč je o tehnologiji, ali ako se dodatno posmatraju i troškovi, onda je u pitanju tehnologičnost. Dok pojam tehnologije označava proces ili postupak, tehnologičnost je svojstvo proizvoda posmatrano kroz pouzdanost, funkcionalnost i ekonomičnost. S obzirom da zahtevana pouzdanost mora biti osigurana, onda ekonomičnost postaje glavni kriterijum ocene tehnologičnosti za različite postupke izrade proizvoda. Ona tehnička rešenja koja posle zadovoljenja zahteva funkcionalnosti ne teže minimalnim troškovima (minimalnom utrošku materijala, energije i minimalnom zagađivanju biološke okoline), nisu dobra rešenja. Zadatak inženjera je razvoj oblika i davanje tehnologičnih rešenja i to dovoljno pouzdanih i jeftinih. Prilikom traženja tehnologičnih oblika ne daje se apsolutno iskazivanje tehnologičnosti nego se obavlja poređenje različitih mogućih rešenja. U svim rešenjima mora biti zadovoljena zahtevana pouzdanost (nivo pouzdanosti, klasa kvaliteta, svojstva, karakteristike), a ono rešenje koje je najekonomičnije biće izabранo kao najtehnologičnije, odnosno tehnologično rešenje.



Slika 1. Faktori tehnologičnosti

Osnovne tehnologije za izradu mašinskih delova su livenje, kovanje, zavarivanje, plastično deformisanje i rezanje. U okviru svake od njih postoje klasična i nova rešenja. Klasične tehnologije se oplemenjuju novim

rešenjima (novim tehnologijama), koja omogućavaju pojednostavljenje postupaka, pojeftinjenje, smanjenje škarta i podizanje nivoa kvaliteta. Osim navedenih osnovnih (konvencionalnih) tehnologija koriste se i posebne (specijalne) tehnologije, koje se zajednički nazivaju nekonvencionalne tehnologije. Tehnologije nastale kao neposredni rezultat većih naučnih dostignuća i pronalazaka su visoke tehnologije.

Mašinski delovi su ograničeni ravnim, cilindričnim, konusnim, sfernim i drugim površinama. One mogu biti u dodiru sa drugim delovima – dodirne površine ili slobodne površine koje se neposredno ne dodiruju. Dodirne površine moraju biti kvalitetnije (tačnije i sa manjom hrapavošću) kako bi se obezbedila ispravna funkcija, sigurnost u radu i duži radni vek. Slobodne površine mogu biti manje tačnosti, veće hrapavosti... Razlika u kvalitetu i tačnosti površina uslovljava da se izrada mašinskih delova ostvaruje u dve faze. U prvoj, prethodnoj fazi ostvaruje se gruba obrada radi dobijanja osnovnog oblika mašinskog dela. Hrapavost površina je viša, a tačnost oblika i dimenzija niža. U završnoj fazi se dodirne površine dovode na potreban nivo tačnosti oblika, položaja, dimenzija i hrapavosti. Završna faza se uglavnom izvodi postupkom rezanja, to jest struganjem, glodanjem, brušenjem, provlačenjem i sličnim postupcima [3].

Izbor postupka prethodne obrade zavisi od složenosti i veličine (gabarita i mase) mašinskog dela, zahtevane čvrstoće, veličine serije (broja komada), neophodne tačnosti oblika i dimenzija, tehnoloških mogućnosti proizvođača, cene izrade... Zbog toga se tehnologija livenja primenjuje za izradu mašinskih delova složenog oblika, manje čvrstoće, većih gabarita, manje tačnosti, dok vrsta primenjenog postupka livenja zavisi od veličine serije. Kovanjem se izrađuju mašinski delovi visoke čvrstoće, manje složenosti oblika, manjih dimenzija i visokih serija. Zavarivanjem se izrađuju mašinski delovi složenog oblika, visoke čvrstoće, manje tačnosti i u malom broju komada. Rezanjem se u prethodnoj fazi izrađuju mašinski delovi jednostavnijeg oblika,

veće čvrstoće, manjih serija (sem izuzetaka). U završnoj fazi rezanjem se dorađuju dodirne površine bez obzira koja je tehnologija korišćena u prethodnoj fazi [4]

## 2.1. Analiza tehnoličnosti kroz faze nastajanja i korišćenja proizvoda

Ukoliko se posmatra životni vek proizvoda, uočavaju se faze koje prate vreme od trenutka njegovog nastajanja preko korišćenja do likvidacije:

1. Ugovaranje. Definišu se zahtevi za kvalitet i pouzdanost, propisi, kriterijumi prihvatljivosti,
2. Projektovanje i konstruisanje. Razvoj oblika, proračun, klasifikacija elemenata i sistema,
3. Izbor materijala,
4. Iznada i montaža,
5. Osiguranje i kontrola kvaliteta u procesima izrade i montaže,
6. Eksploracija i održavanje,
7. Osiguranje i kontrola kvaliteta tokom eksploracije,
8. Likvidacija.

U svakoj od navedenih faza moguće je dati različita rešenja. Tako se mogu menjati: materijali, oblik, dimenzije proizvoda, proizvodne operacije, načini izrade, načini i metode kontrole i drugo. Svako ponuđeno rešenje omogućava određenu pouzdanost funkcionisanja proizvoda u predviđenim uslovima eksploracije uz određene troškove. Rešenje koje daje traženu pouzdanost (funkcionalnost) uz najmanje troškove je tehnolično rešenje.

Kriterijumi za definisanje oblika obuhvataju sve zahteve proizvodnje i eksploracije mašinskog sistema. Kao osnovu za formiranje kriterijuma najbolje je koristiti relacije između odgovarajućih procesa proizvodnje i eksploracije.

Analiza tehnoličnosti oblika mašinskih delova i sistema je analiziranje posmatranog proizvoda sa stanovišta mogućnosti njegove izrade određenim tehnološkim metodom. Ona

objedinjuje analizu tri segmenta: geometrije konstrukcije proizvoda, materijala i moguće veličine proizvodne serije.

## 2.2. Uticaj proizvodnih mogućnosti i vremena (trenutka) proizvodnje na tehnologičnost

Pod proizvodnim mogućnostima podrazumevaju se raspoloživi kadrovi, postupci, oprema, kapaciteti... Unutar jednog preduzeća proizvodne mogućnosti se menjaju s vremenom (nabavka nove opreme, mehanizovanje jedne ili više operacija...). To utiče da se isti proizvod može proizvoditi jeftinije, a ponekad i kvalitetnije. Takvim uticajem poboljšava se tehnologičnost proizvoda.

Tehnologičnost nekih konstruktivnih, proizvodnih ili eksploatacijskih rešenja ne zavisi samo od proizvodnih mogućnosti već i od trenutka i od lokacije.

Ukoliko je oblik proizvoda složen, onda će se on, kod velikih serija, najverovatnije izrađivati livenjem, a kod manjih zavarivanjem. U slučaju da je mašinski proizvod izložen statičkom i relativno mirnom opterećenju onda će se za izradu koristiti sivi liv, a kod manjeg opterećenja silumin. Kod dinamičnog opterećenja koristiće se čelični liv, nodularni liv... Proizvodi jednostavnog oblika u manjim serijama izrađuju se rezanjem, a kod većeg broja komada – livenjem, presovanjem, kovanjem i sličnim postupcima. Kada je proizvod velikih dimenzija onda se on izrađuje zavarivanjem, a kod manjih gabarita nekim drugim postupkom. Odgovorni proizvodi se, po pravilu, izrađuju kovanjem. Broj komada (veličina serije) ima izuzetno veliki uticaj na izbor postupka izrade, jer se kod velikih serija moraju koristiti visokoproduktivni načini izrade: livenje, kovanje, presovanje, valjanje i drugi. U slučaju potrebe za visokom tačnošću dimenzija, proizvod će se izrađivati rezanjem iz šipke, ploče i pripremaka dobijenih livenjem, kovanjem... Kada postoji potreba za visokim kvalitetom površinske hrapavosti, onda će se proizvod izrađivati rezanjem, brušenjem i poliranjem. Ukoliko je cena odlučujući faktor, od kojeg zavisi izbor postupka izrade, onda će

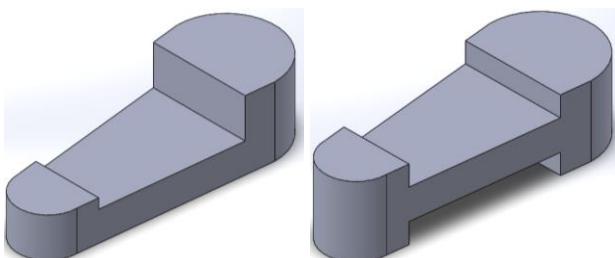
se kod manjih serija proizvoda složenijeg oblika koristiti zavarivanje, a kod većih livenje.

Proces proizvodnje može se podeliti na izradu pojedinih delova i montažu mašinskog sistema. Definisanje oblika delova, kao i sistema u celini, u velikoj meri zavisi od postupka izrade. Svaki pojedinačni postupak izrade zahteva od konstruktora određena specifična znanja, da bi mogao formirati oblik proizvoda s obzirom na njegovu tehnologičnost. Tehnologičnost konstrukcije je mera prilagođenosti oblika konstrukcije i njenih delova procesu tehnologije izrade.

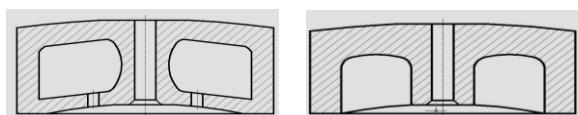
Tehnologijom livenja se postiže vrlo složena konfiguracija proizvoda, a spoljni izgled se poboljšava izražajnim materijalom, bojom i dimenzijama elemenata. Obradom deformisanjem izrađuju se proizvodi čije dimenzije su od dela milimetra do nekoliko metara. Osnovne metode u obradi lima su: odsecanje, prosecanje, probijanje, istiskivanje, savijanje, duboko izvlačenje, reljefna obrada, kombinovana obrada... Racionalna primena obrade deformisanjem zahteva pravilno konstruisanje proizvoda, odnosno definisanje oblika konstrukcija koje će biti pogodne za obradu ovom tehnologijom, jer savijanjem se, na primer, mogu oblikovati vrlo složene konfiguracije proizvoda. Hladno istiskivanje omogućuje izradu proizvoda u obliku posude i proizvoda tipa osovinice promenljivog preseka. Oblik metalnih proizvoda podvrgnutih termičkoj obradi treba tako izabrati da ne dođe do pojave preteranih zaostalih napona, deformacija i vitoperenja, kao i da se ne dozvoli nastajanje prslina u materijalu. To se postiže ublažavanjem koncentracije napona u kritičnim presecima proizvoda i smanjenjem nesimetričnosti proizvoda [5].

## 2.3. Primeri tehnologičnosti oblika mašinskih delova

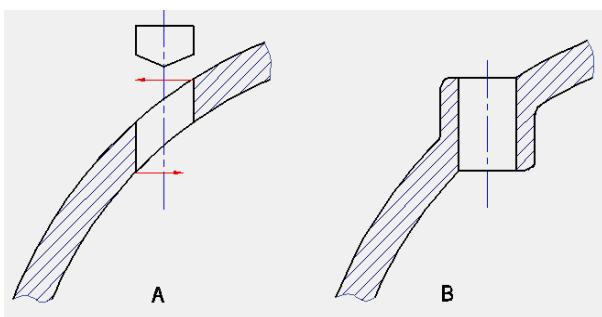
Na nekoliko sledećih primera ilustrativno je prikazan uticaj tehnologičnosti oblika proizvoda izrađenih različitim postupcima obrade.



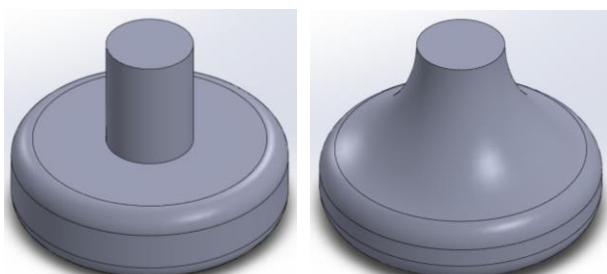
**Slika 2.** Definisanje oblika otkovka sa izbočinama: poželjno (levo) i nepoželjno (desno)



**Slika 3.** Oblici odlivaka sa aspekta složenosti jezgra: a) nepovoljan; b) povoljniji oblik

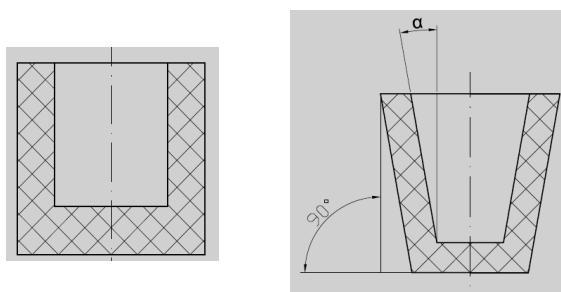


**Slika 4.** Tehnologičnost oblika sa aspekta mašinske obrade: oblik A nije pogodan s obzirom na operaciju bušenja, oblik B je ispravno definisan



**Slika 5.** Smanjenje otpornosti od nastajanja pukotina pri kaljenju:

levo – nepravilno, desno – pravilno



**Slika 6.** Nepravilan (levo) i pravilan (desno) oblik odlivka od plastike

### 3. ZAKLJUČAK

Oblik mašinskog dela je skup tehnoloških i matematičkih informacija koje se mogu transformisati, menjati, uobičavati i koristiti za analize i za dalji razvoj oblika. Na oblik mašinskog sistema, odnosno elemenata, utiče izuzetno veliki broj faktora, pre svih, njegova funkcija i namena, struktura mašinskog sistema, veličina (garabiti), masa celokupnog sistema, vrste materijala od kojih su izrađeni njegovi delovi, način izrade i tehnološnost, ergonomski zahtevi, zahtevi vezani za zaštitu na radu (bezbednost) izvođača poslova, estetski zahtevi – dizajn (kompozicija, kompozicioni ravnoteža, simetrija, proporcija, ritam, akcenat, boja, ornament, plastičnost, senke, grafička sredstva informisanja...), veličina serije (od čega zavisi da li je proizvodnja pojedinačna, serijska ili masovna), mogućnost standardizacije i unifikacije delova, rok isporuke, kvalitet, preko koga se mogu definisati sigurnost funkcionisanja, tačnost, preciznost, potpunost, pouzdanost mašinskog sistema i njegovih delova, radni vek (trajnost), stepen iskorišćenja, preko koga se definiše potrošnja energije, cena, sklapanje, montaža i podešavanje, označavanje, ispitivanje, konzervacija, pakovanje, ambalaža, skladištenje, transport, dekonzervacija, ugradnja, rukovanje, eksploatacija, održavanje, pogodnost održavanja i popravljivost, remont, higijenski zahtevi, uticaj atmosfere (atmosferilije), biološki faktori, reciklaža, ekološki faktori. Tu su i specijalni zahtevi, u koje možemo svrstati zakonske propise, ugovore, licence, mogućnost finansiranja, rad pri povišenim i niskim temperaturama, kao i sa povišenim vibracijama, hermetičnost, centričnost, elastičnost, krutost, jednostavnost rastavljanja, eksplozivna zaštita, zaštita od vandalizma i krađe, nesreće (požar, poplave, zemljotres), rad u havarijskim uslovima. Na kraju, ali ne manje bitni su i lični zahtevi naručioca, kao što su ukus, navike, običaji, prestiž, moda, komfor i slično.

Danas se razvoju i definisanju oblika mašinskog sistema pridaje veliki značaj, jer je on često personifikacija određenog kvaliteta i

uspostavljanje određenog reda i harmonije među izvršiocima funkcija. Novi proizvodi sa atributima dobrog oblika i dizajna povećavaju kvalitet konstruisanja, unapređuju produktivnost rada i podižu nivo opšte kulture proizvodnih radnika.

## ZAHVALNOST

Rad je realizovan u okviru projekta TR 35011, koji podržava Republika Srbija preko Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja. Zahvaljujemo mu se na finansijskoj pomoći.

## LITERATURA

- [1] S. Marković: *Kvalitetno oblikovanje mašinskog sistema – prvi korak do kvalitetnog proizvoda*, 35. Nacionalna konferencija o kvalitetu „Festival kvaliteta 2008“, Zbornik radova, Kragujevac, 13÷15. maj 2008, str. 5.1÷5.4.
- [2] S. Marković: *Technological suitability of machinery parts*, Proceedings 12<sup>th</sup> International Research/Expert Conference „Trends in the Development of Machinery and Associated Technology“ TMT 2008, Istanbul, Turkey, 26÷30. August 2008, p. 377÷380.
- [3] S. Marković, A. Marinković, N. Bojić: *Shaping machinery elements exposed to cyclic load*, Proceedings the 6<sup>th</sup> International symposium about forming and desing in mechanical engineering „KOD 2010“, Palić, Serbia, 29÷30. September 2010, p. 199÷206.
- [4] M. Ognjanović: *Razvoj i dizajn mašina*, Mašinski fakultet, Beograd, 2007.
- [5] S. Marković: *Razvoj oblika mašinskih proizvoda*, Visoka škola tehničkih strukovnih studija, Čačak, 2012.

## THE ANALYSIS' APENDIX ON THE TOPIC OF THE COST EFFECTIVE DESIGN OF THE SHAPES IN THE DEVELOPMENT OD PRODUCTS

**Abstract:** A lot of items are contained in the cost effective design and they refer to the way of production of all the consisting parts: the outflow, the shortage, the forged steel as well as the parts pre-determined for production by scraping, milling, drilling, rendering, using electro-erosion, grinding, piercing, cutting, folding, deep extraction, rolling, sintering or injection. Cost effective design depends also on the principle and the way of solving the joints that can be: welded, soldered, sticked, pressed, nailed, screwed, jointed with elastic rings or wedges, wrinkled or with polygonal joints. The big influence on the cost effective design stands in the obligatory post productive processing through thermal processing, galvanisation, colouring or other types of protection and firming the machine parts. By studying all these factors, their importance and the effect they have on the shape of the product, we can influence a lot on the quality, lowering the cost of production and develop the design. Since during the construction od the machine parts, elements and joint parts, the accent is also put on the constructional solution, and the shape as well, those activities inquire a lot of attention. It requires huge engagement from the constructor and its team, as well as the responsibility, knowledge, because the mistakes made cannot be undone afterwards. More precisely, their repairment is very expensive and complex and is processed in the final stage, at the delivery stage, which makes it more difficult and expensive. Not to mention that it influences the bad reputation of the constructor and especially the producer company. Only with the organized, systematival and responsible team work, the fulfillment of the abovementioned goals can be achieved. Not being aware of the significance of the problem leads to providing a low quality product, thus leading to the loss for the company.

**Key words:** cost effective design, shape, development, products, design



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## RECYCLING OF CUTTING OILS AND ADDITIVATION TO THE FILLING OF TRIBOLOGICAL AND ENVIRONMENTAL REQUIREMENTS

Krsto MIJANOVIC<sup>1\*</sup>, Goran LALOVIC<sup>2</sup>

<sup>1</sup> University „Džemal Bijedić“ of Mostar, Sarajevo, BiH, [krsto.mijanovic@unmo.ba](mailto:krsto.mijanovic@unmo.ba)

<sup>2</sup> High international School of Cazin, BiH, [agencija.infocentar@gmail.com](mailto:agencija.infocentar@gmail.com)

\*Corresponding author: krsto.mijanovic@unmo.ba

**Abstract:** Engineers face a growing trend of changes in the technology, organization, decision-making, and management of production systems. In order for production to be competitive, management of processing processes must establish closed material flows and constant growth of Eco-efficiency. Cutting technology and its mechanisms are a basic opportunity to increase the efficiency of the process. Changing some of the tribological characteristics of the tool blade: the introduction of new cooling and lubricating agents, the increase in the level of quality parameters of the machined tool blade surfaces can affect the reduction in the dynamics of the wearing mechanisms and at the same time improve the parameters of the workability. New and innovative technologies, with the widespread application of waste recycling processes and its further use, the introduction of technological, organizational and managerial co-personnel into the production system, the development of closed material flows require the need to grow knowledge of the relationships between the production system and the environment. Establishing closed material flows of worn-out cutting oil requires the shifting of waste care to the beginning of the process, including responsibility in all planned, constructive and technological and working documents. After establishing the feedback in the production process, the managing authority, which performs constant monitoring and correction in order to increase eco-efficiency, directly affects the fulfillment of environmental requirements. This paper shows how risky waste from cutting oil and oil emulsions can be controlled and reduced by using the "Cleaner Production" principle. Then refer the collected quantity to recycling for the production of "base" and harmonize the process of addition with the needs of the tribological characteristics of the processing process.

**Keywords:** Closed material flows, tribological characteristics, processing process, product quality, recycling, additivity, eco-efficiency.

### 1. INTRODUCTION

The basis for defining the management of waste oils is the recording of the current situation that gives the image of management in the production organization, and opens the possibility of finding directions for improving the management. Production systems need to

be controled, directed, envisioned environmental impacts in order to solve the problem at source. Therefore, monitoring the flows of materials within the production plant, controlling the production, controlling energy flows, forecasting and calculating risk for each site of danger is the inevitable task of all levels of management. It is an area of environmental

management, but in cooperation with a technologist, who must comply with environmental impact assessments and estimates of economy and efficiency of production. The production process, product, technology and environment are integrally observed, following an assessment of product life cycle impact.

This paper will show a model that defines new challenges of the technological process technologist in order to establish closed material flows of cutting oil and oil emulsions. This model constitutes the basic power of modern production, which determines not only the process of making a particular product, but also affects the economy, placement, product quality and the quality of a healthy living environment.

## 2. APPLICATION OF CUTTING OIL

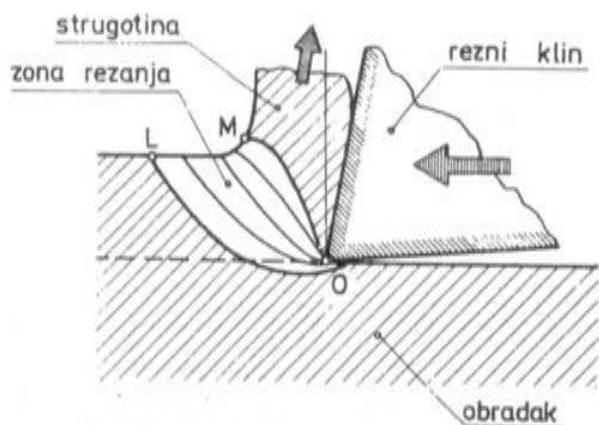
The process of cutting is realized in all types of metal processing by separation of particles, and it is realized in the tribomechanical system (TMS), whose structure consists of:

- Cutting tool wedge,
- Subject processing,
- Coolant and lubricant.

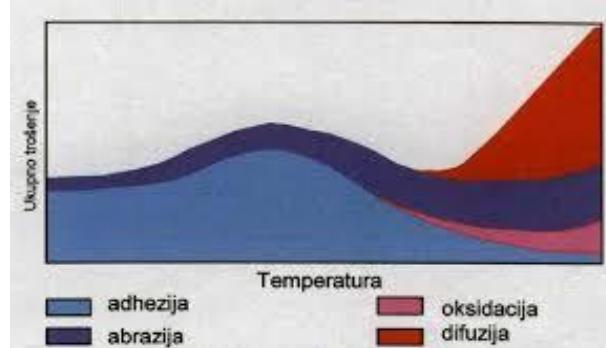
The thermomechanical system of Figure 1 represents a set of interconnected elements into one whole for the purpose of accomplishing the process by removing the chips, removing the excess material and shaping the parts. These events are expected with minimal costs, maximum productivity, accuracy, quality of treated area and permissible environmental pressure. In addition to the structure, TMS is characterized by input and output sizes: Input sizes are: Material, Energy, Information [5].

The material refers to the processing object and the auxiliary material (cooling and lubricating agent for cutting and lubricating oils). Energy is spent on the realization of the cutting process (mastering cutting resistance and achieving the necessary movement of

tools and processing objects). The information provides management of the cutting process and represents a set of data on processing machines, accessories, processing, measurement and control tools, processing modes and process management systems. Intensification of tribological processes increases the friction and wear of the tool blade surfaces, which is the main reason for the occurrence of masking, and the addition and control of the material flows of the cooling and lubricating agent during cutting is necessary for monitoring the environmental impact in the product life cycle, as well as the constant management tendency to establish growth of eco-efficiency. The introduction of synthetic means can be applied to the extent of checking his lubricating abilities. The cooling and lubricating agent (SHP) carries out several important functions that directly reduce the friction and the amount of heat produced, and its removal, and indirectly reduce the cutting forces, the ability to mount the wear mechanisms, Figure 2 and increase the stability of the blade.



**Figure 1.** Schematic presentation of the cutting process

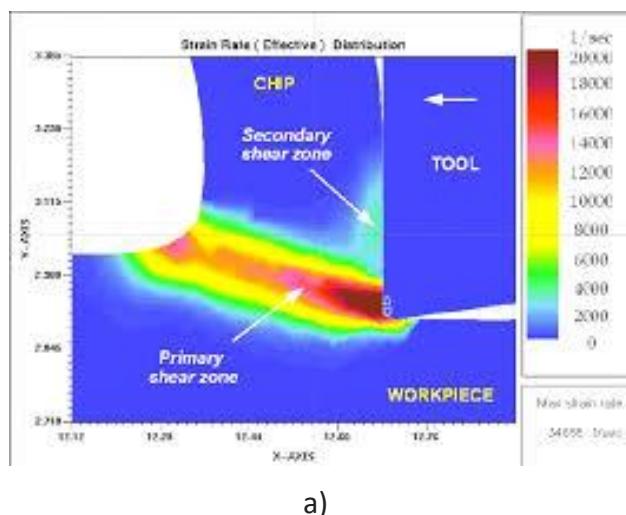


**Figure 2.** Schematic display of wear mechanisms

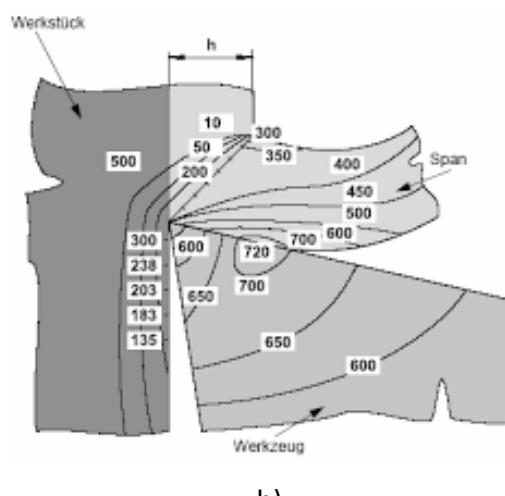
### 3. CLOSED MATERIAL FLOWS OF SHP

Two cut cutting disciplines are important for tracking material flows:

- Cutting thermodynamics that explains the generation and removal of heat from the cutting zone, as well as the determination of temperature in cutting zones, Fig. 2;
- Cutting tribology, which includes the study of the repercussions of the friction process in the contact zones of the tools and the objects of processing on the processes of formation of the abrasion mechanisms of the cutting surfaces of the altar blade [4].



a)



b)

**Figure 3.** a) Collor Schematic representation of thermodynamic cutting processes, b) Schematic representation of thermodynamic cutting processes, [4]

Flexible production systems involve a number of production units interconnected

with each other through the control and transport system, so that automatic production and processing processes can take place at the same time. Complex production systems require the management to monitor the parameters of the quality of the processing, technological finishing and harmonization of the quality of SHP as an auxiliary material. The monitoring of material flow and energy within the production process answers questions: What is the matter with the materials that come out of the drive? How are these materials collected, sorted, sent or recycled? Mathematical interpretation of the material balance of products and technologies, in their life cycle, by using the formula of material balance in phases of the product's life cycle in technology is shown in the form (1).

$$Mm = M + (mva + mvod + mze + mzo) . \quad (1)$$

where is:

$Mm$  = input material in different phases

$M$  = output material in different phases

$mva$  = the outlet of the material in the air in different stages

$mvod$  = output of materials into water in different stages

$mze$  = the output of the material into the ground

$mzo$  = output of the onset at different stages in the form of waste [2].

Based on the calculation of the material balance, a complete insight into the flow of material and their flow, as well as the environmental impact is obtained.

### 4. COOLING AND LUBRICATING AGENTS IN METAL PROCESSING BY CUTTING

Refrigerants and lubricants (SHPs) are fluids that provide lubrication or reduction of friction between tools and objects, cooling or heat removal generated during the treatment process and washing and transporting the chips, improving tribological characteristics on the contact surfaces. Refrigeration and lubricants fulfill certain secondary

requirements, such as: high temperature resistance, resistance to microorganisms, anti-corrosive properties, purification, mixing (water-oil), appropriate pH value, neutral effect on the skin of the operator and neutral effect on the environment.

SHP funds are classified into four types:

1. Cutting and deforming oils (mineral oils, oils, oil mixtures),
2. Synthetic (chemical) SHP agents (containing water, additives and little or no oil),
3. Oil emulsions (dispersions of two mutually insoluble liquids, eg oil-water),
4. Gas SHP means (pressurized air, emulsion or oil mist).

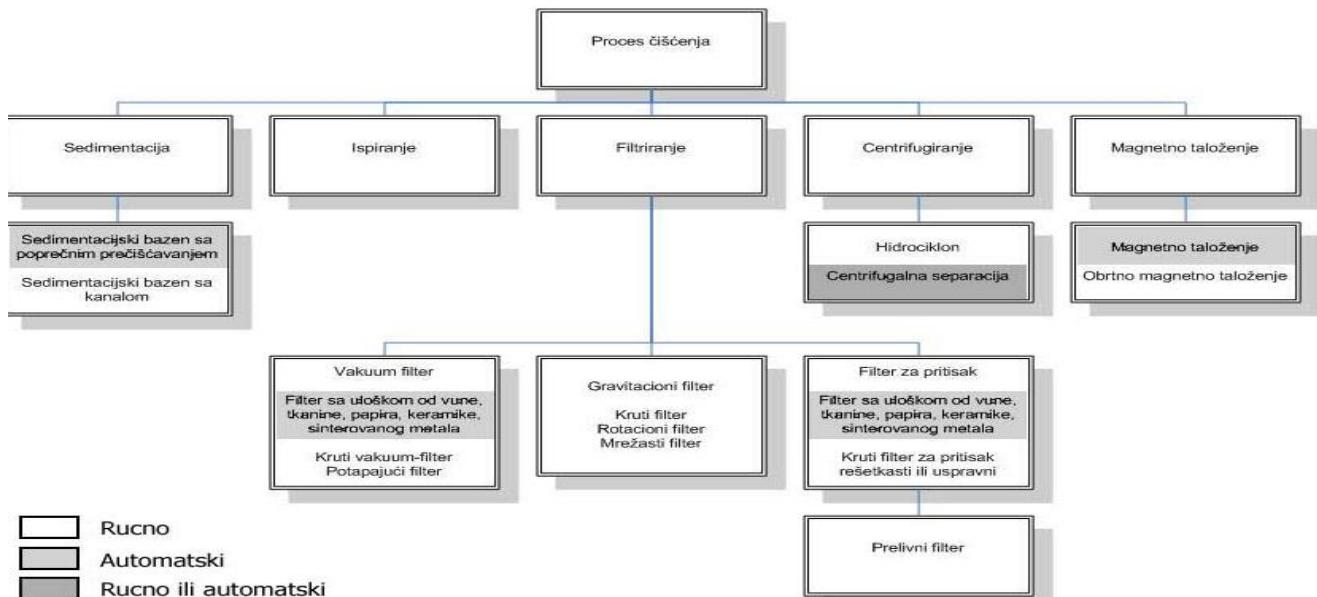
Fulfillment of primary and secondary tribological demands that are placed before SHP means is accomplished by additization. Additives include substances and compounds added by SHP agents in order to: provide the necessary characteristics, enhance certain characteristics that the agent already possesses or to suppress certain undesirable characteristics of SHP agents. Additives represent an important segment in the study of environmental aspects of SHPs and their impact on the health of people being manipulated, Table 1.

Methods of application of SHP agents in the processing of metals by cutting the sawdust vary depending on the processing, the dimensions of the workpiece, the material of the workpiece, and the like. The most common uses of SHP agents are: wide-jet application by immersion, application by spraying and application by directed jet.

Materials hazardous to human health and the environment in SHP agents are: Benzo (a) pyrene, Mineral oils, Emulsifiers, Biocides (formaldehyde and aldehyde, isothiazolinone, thiazole), Nitroamines, boric acid esters.

**Table 1.** Additives groups in SHP agents and their function [2]

Groups aditivs	Function	Examples
Basic additives	Lubrication Mineral oils	Oils and esters
Basic additives Lubrication Mineral oils	Basic additives Lubrication Mineral oils and esters	Lubrication of natural fats and oils, synth. esters of fatty acet.
EP-additives	Good lubrication in high pressure conditions	Phosphorus and chlorine compounds
Anticorrosive additives	Prevention of corrosion on the surface of metals	Compounds of nitrogen, boron, phosphoric acid esters, fatty acid amides
Anti-fog additives	Prevention of small oil drops in the air	High molecular weight substances
Additives for protection against composition change	Prevention of reactions within SHP	Organic sulphides, aromatic amines
Solid lubricants	Grease enhancement	Graphite, molybdenum sulphide
Emulsifiers Enabling better water dispersion in water	Enabling better water dispersion in water	Tensides, petroleum sulphonate, alkaline soaps
Antipyretics	Prevention of foam formation	Silicone polymers
Antibiotic (AW) additives	Surface protection from wear	-
Antioxidants	Prevention of aging and oxidation of oil	Sodium nitrate
Additives to improve surface wetting	Improve adhesion	Trihlor-ethylene, alcohol, phosphates
Smell of fragrances	Neutralizing the unpleasant smell of some of the basic components	Pure oil, various esters and ethers
Preservatives	Preventing the appearance of fungi and bacteria	Formaldehyde, phenol, triazole
System purification systems	Prevention of pollution of the new refilling system for cooling and lubrication	Combination of networking, emulsifying, biocide, and so on.



**Figure 4.** Process of cleaning of SHP assets [1]

#### Purification of SHP funds

During the processing of metals, SHP agents absorb tiny metal particles into their environment. During the cutting process in SHP, foreign materials such as: shavings, foreign oils, graphite come to light. In this way, the technical characteristics of the SHP assets decrease, so it is necessary to perform purification, the process of which is shown schematically in figure 4.

During exploitation, these agents are subjected to physical-chemical and thermal activity. Under the influence of these factors, their composition and, consequently, their physical and chemical characteristics, due to decomposition, oxidation, infiltration of various impurities and the activity of various types of microorganisms, change. SHP agents belong to the strongest additives. Environmental impact studies have shown a danger to people's health and the environment (a liter of mineral oils pollutes one million liters of water). These resources can be recycled after exhaustion when mixed with water, and this procedure is preceded by an analysis from the aspect of: investment costs, operating costs, water quality,

concentrate, total costs of disposal of spent SHP assets.

In developed countries, there are legal regulations that determine the obligations of manufacturers and users of SHP assets, as well as the processor of worn-out assets.

When the oil is transferred to the waste oil collection station, collectors are engaged in pre-processing and recycling, in the case of a trained operator, or by selling it to specialized oil recycling companies. Pre-treatment of the oil includes the process of removing water in the oil, or dehydrating the oil. One of the ways to remove water is to put oil in large reservoirs, where after some time, due to different physical properties of water and oil, there is spontaneous separation. Further processes in the recycling process are:

- Filtration and demineralization of the oil to remove solid particles, inorganic materials and some additives present in the oil, thus obtaining cleaner burning oil or oil for further processing,
- A distillation to obtain a refined oil suitable for use as a lubricant, hydraulic or transformer oil. This process is similar to the process of oil production.

## 5. CONCLUSION

Modern metal processing processes face cost constraints and quality requirements. In order for production to be competitive, management must seek for opportunities to increase profits and benefits and reduce production costs and environmental burdens. Cutting technology and its mechanisms are a basic opportunity to increase the efficiency of the process. Changing the tribological characteristics of the cutting process by introducing new synthetic refrigerants and lubricants can affect the reduction of the adhesion phenomenon and at the same time improve the parameters of the processability. Reducing the environmental impact of synthetic biodegradable agents make the cutting process more eco-efficient.

New and innovative cutting technologies, with extensive application of waste oil recycling processes and its further use, the introduction of technological, organizational and managerial co-personnel into the production system, the development of closed material flows require the need to grow knowledge of the relationships between the production system and the environment. This paper demonstrates that the risky residues of mineral oil for the production of SHPs can be controlled and reduced, using the "Cleaner Production" principle. It was emphasized that planning and production planning activities must be transferred to a lower level of

management, which should anticipate and monitor the market in synchronicity.

In case of prolonged contact of workers with refrigerants and lubricants, skin and respiratory problems, diseases and injuries may occur, which is why it is necessary to comply with certain occupational safety measures. Use of SHP agents containing mineral oils, due to high cutting rates and high temperatures, may result in the release of mineral oils and fumes, which irritate the skin and respiratory organs. In order to prevent these phenomena, it is necessary to observe the recommendations on concentrations from the authorized institutes or the quota shown by BAS ISO standards.

## REFERENCES

- [1] Group of authors. Mechanical Engineering in Environmental Engineering, FTN Publishing, Novi Sad 2005.
- [2] K. Mijanović: Environmental approach to production systems, PLANJAKS, Tešanj, 2008.
- [3] K. Mijanović: Education of Environmental Technologists, Scientific Symposium, Divčibare, Serbia 2012.
- [4] K. Mijanovic, J. Kopac: Improving tribological characteristics by reducing the risk of substances in production processes, EMFM 2017th Int. Symposium 3-5 Nov. Bor, Serbia
- [5] K. Mijanović: Improving the performance and environmental performance parameters of the process of development of change of triboloisic characteristics of tools, Proceedings of the Technical Faculty Bor 2017.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## DESIGN CONCEPT OF IMPACT ATTENUATOR BASED ON COMPARATIVE ANALYSIS

Aleksandar MILJKOVIĆ<sup>1\*</sup>, Milan BLAGOJEVIĆ<sup>1</sup>, Stefan ĐURIĆ<sup>1</sup>

Faculty of Engineering, University of Kragujevac, Kragujevac, Serbia,

[a.miljkovic@kg.ac.rs](mailto:a.miljkovic@kg.ac.rs); [blagoje@kg.ac.rs](mailto:blagoje@kg.ac.rs); [sdjuric@kg.ac.rs](mailto:sdjuric@kg.ac.rs)

**Abstract:** This paper deals with developing design concept of an impact attenuator for the purpose of student formula racing car based on design constraints, imposed by economical and technological capabilities, FSAE regulations and overview of recent studies through comparative analysis. The choice of geometry and material of the attenuator, followed by experimental and numerical examination is concisely presented through comparative analysis. Due to a great number of impact attenuators, for comparative analysis, selection was narrowed to studies not older than ten years. Based on them, main types and forms of attenuators are defined, the table was created, in which, to every type and form of an attenuator a suitable value was assigned. By summing up these values, as a result and a goal of this paper, the design concept of the attenuator was obtained, whose quality further needs to be confirmed by means of numerical and experimental analysis.

**Keywords:** Comparative Analysis, Design Concept, Energy Absorption, Impact Attenuator, Product Developmen

### 1. INTRODUCTION

Impact attenuator (IA) is a construction whose function is to absorb a part of kinetic energy of the vehicle during front impact, and by doing so, to protect the driver as much as possible [1]. According to the regulations of the competition [2], which are mostly based on the safety of the driver, each vehicle is obliged to have an impact attenuator built in, which is not allowed to be smaller than 200×200×100mm and which has to be able to bring a mass of 300 kg to a halt, at the speed of 7 m/s. Also, by the regulations [1], maximum deceleration and maximum average deceleration are defined.

Today in constructing impact attenuators, as well as student racing cars, a great number

of people is involved not only from science, but also from industry which inevitably leads to new solution proposals occurring frequently. Because of a large number of studies and considerable technological advance in the last couple of decades, the choice is reduced to studies not older than ten years.

The goal of the study is selecting appropriate impact attenuator based on the known constraints and performed comparative analyses, i.e. examination of the existing types and forms of impact attenuators. In other words, the goal is defining primary geometry, dimensions, material and technology of construction, based on the aforementioned, in order to proceed executing numerical and experimental analysis which would verify the quality of the discussed.

## 2. DESIGN LIMITATIONS

In order to be able to take part in a competition, student formula racing car has to meet a lot of requirements prescribed by the rules of the competition. Those requirements are mostly referring to the design of the components of the vehicle. For example, an attenuator has to be at least 200 mm long, 100 mm high and 200 mm wide. An anti-intrusion plate on which it is attached has to be at least 1.5 mm thick. The whole impact attenuator's assembly, mounted to the front bulkhead of the vehicle of mass 300 kg (661 lbs) during an impact on a rigid body at the speed of impact of 7 m/s (23 ft/sec), decelerates the vehicle so that the value of average deceleration doesn't exceed 20 g and maximum deceleration of 40 g. The minimum amount of energy that must be absorbed during the impact must be 7350 J. Connecting the attenuator's assembly and the anti-intrusion plate can be performed by using adhesives or bolts. Attaching the attenuator's assembly and the anti-intrusion plate to the frame can be performed by welding or using bolts that complie specified regulations[2].

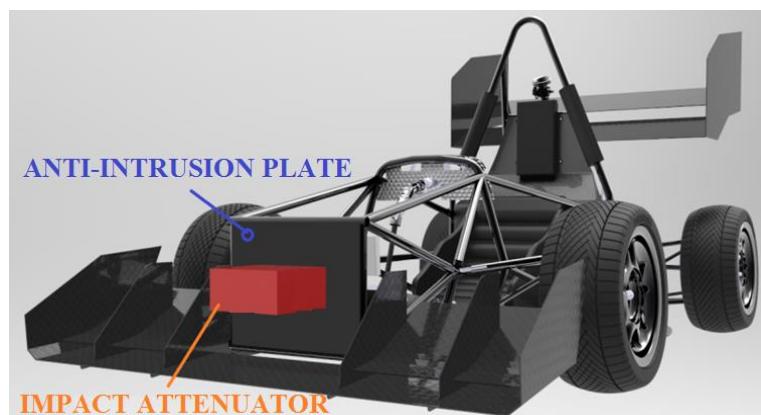
**Figure 1** shows a CAD model of the attenuator with minimal dimensions installed on the student formula racing car modeled in CATIA software with the parts labeled and dimensional constraints.

Coming up with the design concept, there are limitations that additionally affect the final product, i.e. the attenuator. Many of them are not related to the rules of the competition

alone, but are connected with the purpose of the same, namely with the design of the racing cars. Besides the direct front impact, due to vehicle steering, there is a likelihood of the oblique impact case, which is why the functionality of the attenuator is also observed by it's capabillity of absorbing. Also, it is necessary to consider that an attenuator is a single use type of construction, but its impact on the whole vehicle assembly cannot be disregarded. The goal is to design and build the attenuator so that it is as compact and light as possible, and then to install it on a vehicle so that it's center of mass lays as low to the ground as possible and in the vehicle's axial plane of symmetry, in order for the moments of inertia, due to vehicle steering, to be as low as possible. A shape of an attenuator as well as it's overall dimensions can have an affect on an aerodynamic shape of a nose cone of a vehicle - and by that on a lenght of a vehicle, which furthermore impacts stability when turning, specifically drifting, as well as estetics etc.

Technological limitations are an important factor when designing attenuators. However, since the faculty posesses many CNC machines that can be used, as well as a significant number of sheet metal bending machines, welding machines and other technologies (e.g. 3D printing), it can be said that for the purpose of making any of the impact attenuators, shown in the comparative analysis, there are no technological constraints.

Economical limitations are imposed by the



**Figure 1.** CAD model of minimal dimensions IA installed on student formula racing car

competition itself and additionally by the team's budget. One of the goals of the competition is to manufacture parts as cheap as possible which will be fully functionally operative and thus economically justified. Technological shaping of the elements also counts, so it is required to choose the cheapest possible technology, but then again to satisfy functionality conditions of the structure. Economical limitations, in most cases, in constructing student formulas are those that dictate their quality.

### 3. COMPARATIVE ANALYSIS

#### 3.1 Overview of existing types of impact attenuators

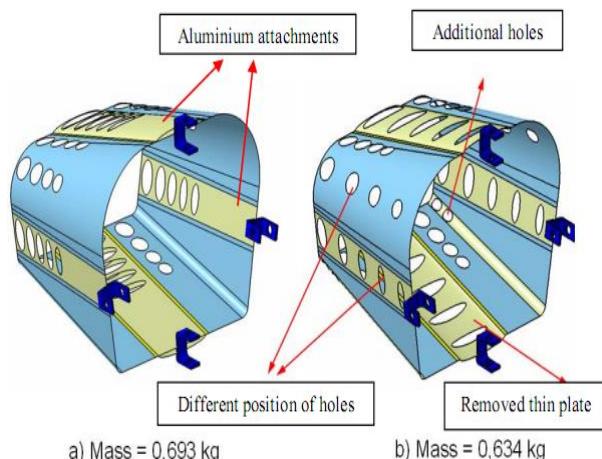
To create a clearer image of the impact attenuator's construction it is necessary to find as many construction solutions of the already existing impact attenuators of the student formulas as possible, as well as the reasons why did the teams choose exactly them for their bolides. Since there is an enormous number of the student formulas in the world, analysis is being conducted on the certain vehicles constructed during last twenty years.

#### Design solution by students of University of Turin

Researchers from The Polytechnic University of Turin [3] made an impact attenuator for their formula based on assumption that by impact, energy "dissipation's" intensity should be as high as possible in order for a vehicle to decelerate sooner [4-7]. Certainly, researchers from this field are pointing out that it would be ideal if, during the impact, constant impact force diagram was achieved, which would mean almost linear deceleration [8,9], which is of course in reality impossible to accomplish. All regulation books that cover these fields define examinations that should be done so that the vehicle could get a licence for use and which

are referring to dimensions and material of the attenuator, assembly of parts, construction etc. After detailed analysis University of Turin has decided to drop the model of construction from one-piece because of its big structure complexity and decided to go with the concept of constructing aluminum bonding elements that are characterized by the good power of energy absorption and gradual deceleration of the vehicle [10]. This concept projects links that are C-shaped. Actually it is a "U" profile that is independent and attached to the car body using bolts

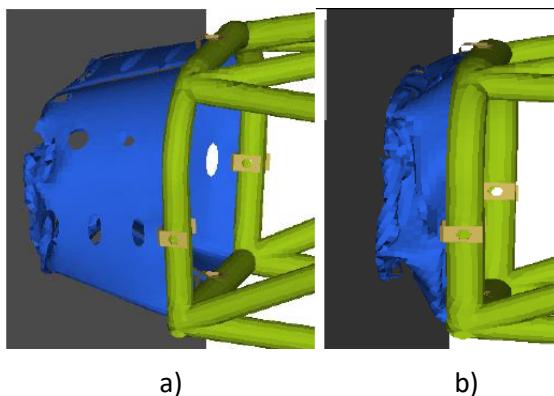
The look of the attenuator is displayed in **Figure 2** [3]. The attenuator is constructed in a box-shaped form, longitudinally reinforced by aluminum beams. The thickness of the impact attenuator shell is 1.5 mm and the thickness of the beams is 3 mm.



**Figure 2.** Final look of attenuator:  
a) Starting solution and b) Advanced solution

By analysing the model of the attenuator, a great number of holes can be noticed on the construction. The primary goal of those holes is to reduce the mass, but also to make the attenuator behave more effectively during impact, that is to soften the impact as much as possible [3].

The results of numerical analysis have shown that during impact large deformations of the attenuator are developing and that only small a part of energy is transferred to a car body frame (Fig. 3). Also, in **Figure 3b** it is seen that the attenuator is deformed by almost all of his length, which is very good since it is then fully utilized.



**Figure 3.** Deformation of the attenuator during simulation: 14 ms after the impact (a) at the end of the test (b)

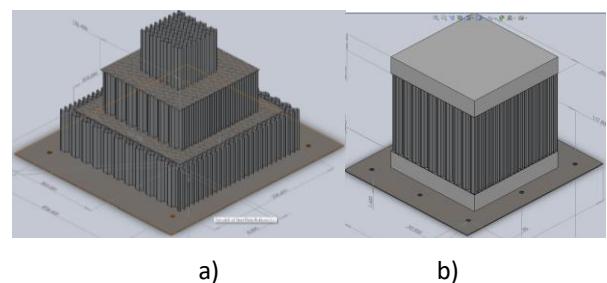
#### **Design solution by students of Worcester Polytechnic Institute, Massachusetts, USA**

Worcester Polytechnic Institute went with concept for the attenuator in shape of a honeycomb, but during the construction there was a dilemma regarding material of which the attenuator should be made. Previously the team conducted analysis of the weight, price, efficiency, way of bonding and similar influence factors and came to conclusion that the geometry of honeycomb is the best solution. When it comes to material, it was suggested: aluminum alloy 3003 i polyethylene foam (styrodur, styrofoam etc.) [11].

First suggestion by the attenuator construction team is for it to be made of aluminum alloy 3003 in the form of a foil. The foil itself can easily be bent and twisted but when it is arranged in the shape of a honeycomb its strength is very high. Besides that, aluminum with its density of  $2.7 \text{ g/cm}^3$  falls into light material category which is highly preferred in vehicles like these. So, aluminum comb has a great power of absorbing energy because in it, there is a huge number of thin foils which, when critical yield stress is reached, start to plastically deform and in that way “consume” energy of the impact and neutralize it. The institute’s team made the comb with cell size of 8 mm. Geometry of the attenuator is in pyramidal shape and it is composed out of three compartments with barrier between each compartment in the form of an aluminum slab, 2 mm thick. The

model of mentioned aluminum attenuator can be seen on **Figure 4a** [11].

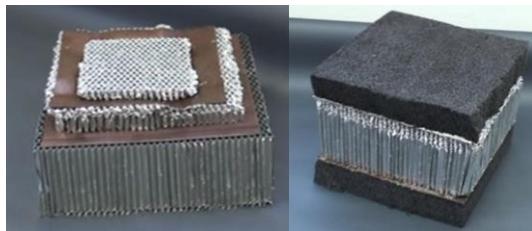
The next suggested material is polyethylene foam, material well known for its capability to dampen impacts and vibrations very good. It found a wide range of applications in manufacturing packaging for transport of fragile objects. The polyethylene foam is such that contains polymer in all of its cavities, which fills their interior and gives material needed strength, mostly to pressure. Besides the decent compressive strength, this foam is also characterized by extreme elongation which can sometimes reach 150%. Of course, it is implied that density is extremely low, only  $1.48 \text{ g/cm}^3$  to be precise. Suggestion was to cover the aluminum attenuator with the 30 mm thick polyethylene foam (**Figure 4b**) [11].



**Figure 4.** Pyramid honeycomb attenuator model (a) and square honeycomb attenuator model covered with foam (b)

After examination of two attenuators, damage analysis was carried out (Fig. 4. 12 - left) and the following can be concluded: the aluminum attenuator in the shape of a pyramid, deformed in a way that first compartment breached the barrier between it and the next compartment and penetrated into it. Deformation of the other attenuator compartments wasn’t detected but the impact certainly caused a significant damages of the attenuator. The possible solution is using steel plates for barriers instead of the aluminum ones (which is not good from the aspect of the vehicle mass etc.). On the other hand, an attenuator wrapped in polyethylene foam sustained certain damages but they are considerably smaller than in the first case (Fig. 5 - right). The attenuator was damaged on the bottom surface and in a such way that small deformation and curving of the comb cells

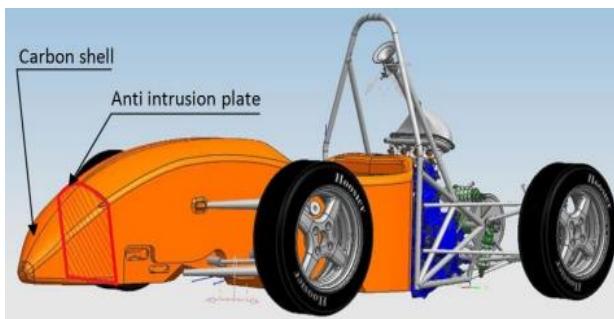
appeared, but the geometry was generally preserved and shortening of the attenuator was not significant which means that a greater part of energy was absorbed by the polyethylene foam [11].



**Figure 5.** The attenuators after testing at speed of 7 m/s

#### Design solution by students of University of Eindhoven, Holland

Students/researchers from the University of Eindhoven faced similar problems during construction of their formula (**Figure 6**) [12].



**Figure 6.** Attenuator design by University of Eindhoven in complete formula assembly

Their suggestion was constructing the attenuator out of polyurethane foam commercial label URE05 with angle near the tip of the attenuator so that front part is triangle shaped. Examination was preformed not only in reality but in the form of a simulation in *Abaqus* software suite (Fig. 7) [12].



**Figure 7.** Attenuator before „crush“ test (left) and Abaqus model (right)

The test was performed in accordance with current regulations that govern this field. Behind the attenuator, a steel plate is installed, which serves as its support and which is usually placed on the vehicle in order to not allow attenuator in any case to penetrate into the bolide during deformation and to hurt the driver. The plate is usually built from low-carbon steel and the thickness is normally not greater than 10 mm. In **Figure 8** the attenuator is displayed after the impact with the wall. It can be noticed that, as a result of deformation, in the middle of the attenuator there has been an appearance of the crack, whose further widening can cause the complete splitting of the attenuator. The maximum force was achieved after 0.045 s and the measurement of force and energy gave satisfying results [12].



**Figure 8.** Deformation of the attenuator during impact (viewed from above)

#### Other solutions

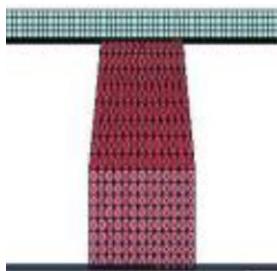
By means of the student competition "SAEINDIA" many teams, with very small budgets, developed different kinds of impact attenuators. **Figure 9** shows attenuator made of "ROHACELL 110IG" foam [13]. Foams are generally used as absorbing materials in combination with others for the purpose of auto industry [12]. Experimentally and numerically, i.e. by using softwares for numerical calculation, different types of foams are confirmed for use [14, 15, 16]. In **Figure 10** a setting of numerical simulation is shown, namely numerical confirmations of the attenuator's quality in LS-DYNA software [14].

Polyethylene foams are very cheap (e.g. styrodur, styrofoam etc.) which additionally contributes their use in impact absorption. The

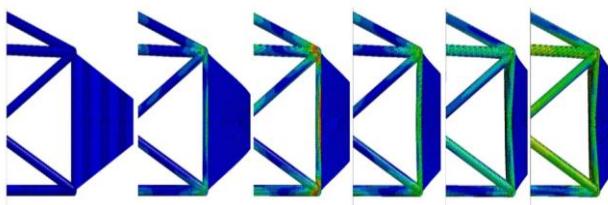
examples of deformation analysis of polyethylene foam and load transfer to a main construction during the impact are shown in **Figure 11** [17].



**Figure 9.** The impact attenuator made of ROHACELL foam



**Figure 10.** Numerical simulation of the impact

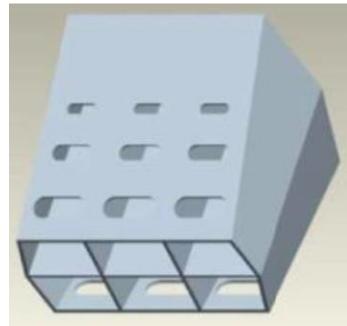


**Figure 11.** Stress and deformation distribution on load bearing construction during impact on polyethylene impact

Impact attenuators built from aluminum sheets are common solutions [18, 19, 20]. In **Figure 12** an example of such solution is shown [19]. Quality assurance of such solutions as well as the effect of the thickness of the wall on the same have been examined by a large number of researchers. [18- 21]. Besides Al sheets, previously mentioned Al comb construction [11] is the most common, and according to the experimental and numerical analyses conducted, they represent the best solutions [11, 22-25]. Sandwich structures are typical for a large number of materials when choosing the type of the attenuator [11, 12].

Starting with polyethylene foams, to carbon and all the way to Al comb, as sandwich constructions, attenuators have very good,

almost linear parameters of energy absorption and that is why they are often choice of constructors. [11, 26-30]. In **Figure 13** a sandwich construction of Al comb solution is shown.



**Figure 12.** The impact attenuator made of Al sheet



**Figure 13.** Al sandwich construction

Besides above mentioned types of impact attenuators, there has been emergence of various innovative solutions such as creating attenuators from tin cans and high-expansion foam (pu foam) [31] (Fig. 14 - left), ABS plastic (Fig. 14 - middle), honeycomb shaped Al slab (Fig. 14 - right) etc. [31, 32].



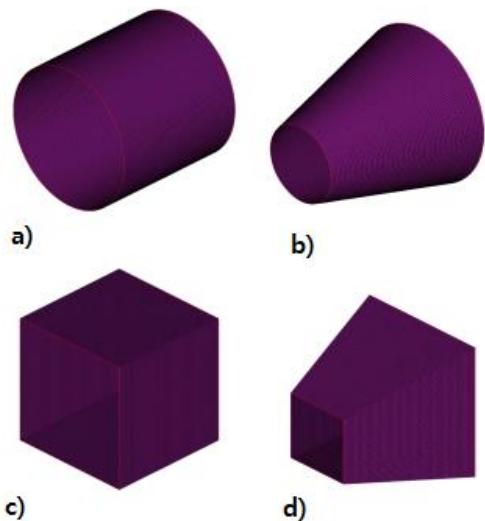
**Figure 14.** The impact attenuator made of tin cans and pu foam (left), ABS plastic (middle) and comb shaped Al slab

### 3.2 Overview of existing shapes based on types of absorbers

Based on comparative analysis, i.e. survey of list of references, it can be concluded that in student formulas attenuators one of four basic shapes are usually being used (Fig. 15):

cylindrical (a), conical - truncated cone (b), cubical (c) and truncated pyramid (d) [34]. In it (Fig. 15), attenuator versions that only have shells are shown, in other words hollow attenuators. Of course, the same shapes can be filled each with the same or different materials.

Different geometric shapes of the impact attenuators were subject of consideration /research of the University of Leeds [34], because geometry is one of the most important factors when dealing with the absorption of energy [8]. Namely, researchers involved in developing student formula were in dilemma which geometric shape of the attenuator to choose. The shapes shown in **Figure 15** were considered.



**Figure 15.** The four basic impact attenuator shapes

After preliminary analyses on models it was concluded that the most suitable shape is truncated cone (**Fig. 15**) thus it was being further developed. The attenuator material is aluminum and the dimensions are  $D=200$  mm,  $d=100$  mm and height  $h=200$  mm, while their load bearing structure, i.e. frame is made of low-carbon steel.

The investigation [34] has also established that besides the thickness of the attenuator's wall, the angle of the cone slope has an effect on safety, i.e. that the angle of the cone slope and the wall thickness must be optimized so that protection would be maximized. Before investigating the the attenuator, team of researchers tested vehicle behavior during impact without an impact attenuator.

### 3.3 Design concepts

Based on these findings, it is necessary to create a design concept solution such that meets all the functional, esthetic, technological and economical criteria. It should be considered that, for the purpose of testing, several attenuators have to be made, so that economical constraints are not referring only to purchase of material and producing one attenuator. Hence, the desired attenuator should be functional, cost effective, light, as compact as possible so that the nose cone of the formula is shortened, reliable and low cost. In **table 1** variations of four accepted basic shapes of the attenuators and basic materials used for their making are shown. Judging by values assigned for manufacturability, mass of attenuator, overall dimensions, price and reliability, the optimal solution is adopted.

Correction factor is introduced for evaluating to be as realistic as possible. The highest coefficient was assigned to the price because the team disposes of a very small budget. Price values are referring to price of materials (in which its shipping is included) that are being used for producing the attenuator as well as the price of technologies needed for its manufacturing. After that, second largest correction factor is assigned to reliability. Reliability is chosen because the safety of the driver is in the first place. When evaluating reliability, as well as capability of the impact absorption, depending on the material, geometry is also inspected. When geometry of the attenuator has full cross section and a larger overall dimensions, even by the oblique impact, a certain amount of energy will be absorbed. For that reason, reliability values of attenuators with full cross section are greater compared to the ones that are hollow. Likewise, material has additional effect on reliability. According to the inspected available crash test recordings, it is a common case for the attenuators made of Al and steel sheets to fail. After reliability comes the mass of the attenuator. Mass is directly proportional to density of chosen material and volume of

the attenuator. Overall dimensions dictate the volume and are considered to be similar to the overall dimensions of the attenuators from the comparative analysis. Manufacturability is in fourth place because there is a large number of machines and equipment on the faculty, thus almost all the attenuators imaginable could be made. Material and shape dictate the value of manufacturability. Overall dimensions are in the last place because they have the lowest importance out of all the examined characteristics.

#### 4. RESULTS

Based on the results from the table, the following solutions have the highest value:

1. Truncated pyramid made of styrodur
2. Truncated cone made of styrodur
3. Aluminum comb in the shape of a cuboid

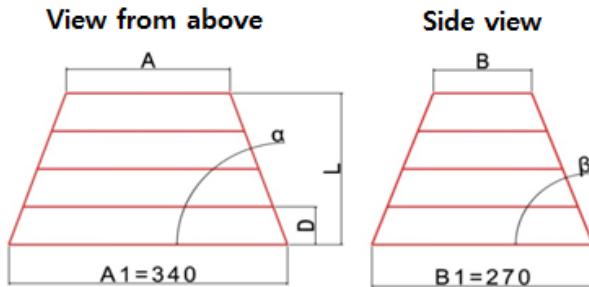
These kind of values are the result of correction factors. Based on them, first versions of the impact attenuators are arising.

The attenuator made of styrodur (extruded polyethylene XPS - polyethylene foam) in a

**Table 1.** Attenuator variations

Shape	Material	Type of semifinished product	Technology of attaching/ shaping	Manufacturability	Mass	Overall dimensions	Price	Reliability	Value
Correction factor				0,18	0,2	0,1	0,3	0,22	1
Truncated pyramid (hollow)	Steel	Tin	Welding/bending, cutting (W/B,C)	4	1	1	3	3	2,58
	Al	Tin	W/B,C	4	3	1	2	3	2,68
	Carbon	Fabric	Gluing/ by mold	3	4	2	1	3	2,5
	Polyester	Fabric	Gluing/ by mold	3	4	2	3	3	3,1
Truncated pyramid	Styrodur	Insulating plate	Gluing/cutting	5	4	2	5	4	4,28
Truncated pyramid (hollow)	Polyester-carbon composit	Fabric	Gluing/ by mold	2	5	3	1	4	2,84
Truncated pyramid	Foam	/	Gluing/ by mold	4	5	2	4	2	3,56
	Al	Plate - comb	W/B,C	2	4	3	3	3	3,02
Truncated cone (hollow)	Al	Tin	W/B,C	3	3	3	3	3	3
	Steel	Tin	W/B,C	3	1	2	3	3	2,5
	Carbon	Fabric	Gluing/ by mold	3	4	2	1	3	2,5
	Polyester	Fabric	Gluing/ by mold	3	3	2	3	3	2,9
Truncated cone	Styrodur	Insulating plate	Gluing/ cutting	4	4	3	5	4	4,2
Truncated cone (hollow)	Polyester-carbon composit	Fabric	Gluing/ by mold	2	4	2	1	5	2,76
Truncated cone	Al	Plate - comb	W/B,C	3	3	3	1	5	2,84
	Foam	/	Gluing/by mold	4	5	2	4	1	3,34
Cubiod (hollow)	Al	Tin	Welding/cutting	4	5	4	3	3	3,68
	Polyester	Fabric	Gluing/ by mold	3	4	3	2	2	2,68
	Steel	Tin	Welding/ cutting	5	1	3	4	3	3,26
	Carbon	Fabric	Gluing/ by mold	3	4	3	1	3	2,6

shape of truncated pyramid is defined by parameters shown in **Figure 16**. Construction is composed of styrodur layers (thickness D), which are mutually glued by beorol glue. Beorol glue is chosen for its compactness with polyethylene foam and by the recommendation of the other teams that are using styrodur. It is also possible to use the layers of different thicknesses and the layer of styrofoam instead of styrodur, if necessary.



**Figure 16.** Geometric parameters of the impact attenuator (shown dimensions are in milimeters)

Parameter (dimension) limitations shown in **Figure 16** are:

- Value of parameter L (length of the attenuator), has to be greater than 200 mm.
- Value of parameter A has to be greater than or equal to 200 mm.
- Value of parameter B has to be greater than or equal to 100 mm.
- Value of parameter D can be 10, 20, 30 or 50 mm (based on available styrodur thickness that is used for insulation of housing units).
- Values of parameters  $\alpha$  and  $\beta$  have to be less than  $90^\circ$  and are depending on A, B and L.
- Number of layers (thickness D) is depending on parameters L and D.

The dimensions A1 and B1 (340 mm and 270 mm) are referring to length and width of contact surface between the attenuator and anti-intrusion plate and they are constant. Those values are defined based on width and height of the front hoop (390x 320 mm) on which anti-intrusion plate is welded or attached by bolts. By the rules of the competition, in case there is no diagonal pipe

that follows anti-intrusion diagonal, difference between width and height of the front hoop and dimensions A1 and B1 cannot be bigger than 25 mm on each side.

## 5. CONCLUSIONS

Developing the construction concept of the impact attenuator for the purpose of student formula Zastava 2017 comes down to a choice between the existing types of attenuators. Using comparative analysis, i.e. overviewing the already existing types and shapes of the attenuators, a selection of the potential attenuators has been made. By evaluating each of the potential attenuators and introducing correction factors, construction concept solution has been chosen, such that it satisfies all of the functional, esthetic, technological and economical conditions. Hence, the chosen attenuator is cost effective, light, as compacted as possible so that the nose cone of the formula is maximally shortened and economically justified. According to the comparative analysis, it can be assumed that the attenuator is also functional, but it still needs to be approved by a relevant numerical and experimental testing. In this paper the dimensions of the chosen attenuator, whose functionality needs to be checked, are defined. Other than confirming the attenuator's functionality, a numerical analysis can be used to correct the dimensions of the attenuator, and thus to additionally reduce mass [35-40], material consumption, i.e. money, time and all the other mutually related resources.

## ACKNOWLEDMENT

The part of this research is supported by Ministry of Education, Science and Technological Development, Republic of Serbia, Grant TR32036.

## REFERENCES

- [1] G. Belingardi, J. Obradovic: design of the impact attenuator for a formula student racing car: numerical simulation of the impact

- crash test, Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics, Vol. 4, No. 1, pp. 52-65, 2010.
- [2] *Formula SAE Rules 2017-2018*, SAE International, 2017.
- [3] G. Belingardi, J. Obradovic: Numerical simulation of the frontal impact crash test of a formula student car body, *SEECCM 2009 - 2nd South-East European Conference on Computational Mechanics*, June 2009, Rhodes, Greece, pp. 22-24.
- [4] G. Belingardi, G. Chiandussi: *Vehicle crashworthiness design – General principles and potentialities of composite material structures*, Department of Mechanics, Politecnico di Torino, Torino, Italy, 2008.
- [5] P. Lorenzo, A. Massimiliano, G. Belingardi: Comparison of the energy absorption capability of crash boxes assembled by spot-weld and continuous joining techniques, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, No. 3, pp. 498-511, 2009.
- [6] L. Peroni, M. Avalle, V. Petrella, G. Monacelli: Strain-rate effects on the energy absorption capacity of crash boxes with different geometry, In: *Structures under shock and impact VII*, Jones N, Brebbia CA, Rajendran AM, editors, WIT Press, pp. 259–268, 2002.
- [7] S. J. Hosseiniour, G. H. Daneshi: Energy absorbtion and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression, *Thin-Walled Structures*, Vol. 41, No. 1, pp. 31–46, 2003.
- [8] J. Norman: Energy – absorbing effectiveness factor, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, No. 6, pp. 754-765, 2010.
- [9] D. Karagiozova: Dynamic buckling of elastic-plastic square tubes under axial impact - i: stress wave propagation phenomenon, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 30, No. 2, pp. 143–166, 2004.
- [10] A. Otubushin: Detailed validation of a non-linear finite element code using dynamic axial crushing of a square tube, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 21, No. 5, pp. 349–368, 1998.
- [11] J. Hart, C. Kennedy, T. LeClerc, J. Pollard: *FSAE Impact Attenuator*, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, 2010.
- [12] J.M.J. Schormans: *The design of a formula student front impact attenuator*, MSc thesis, Eindhoven University of Technology, 2011.
- [13] N. Potabatti: *Design And Physical Testing Of Impact Attenuator For Formula SAE Race Car*, International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR), Vol. 5, No. 1, 2016.
- [14] A. Chavan: Design and development of impact attenuator for racecar safety, *International Journal of Current Engineering and Technology*, Special Issue-6, 2016.
- [15] S. Heimbs, F. Strobl, P. Middendorf, S. Gardener, B. Eddington, J. Key: Crash simulation of an f1 racing car front impact structure, In: *Proceedings of the 7th European LS-DYNA Conference*, London, UK, 2009.
- [16] G. Belingardi, S. Boria, J. Obradovic: Lightweight design and crash analysis of composite frontal impact energy absorbing structures, In: *Proceedings of the 16th International Conference on Composite Structures*, 2011.
- [17] Crash FSAE, available at: [https://mir-s3-cdn-cf.behance.net/project\\_modules/max\\_3840/e971841229937.579e22b8d8280.jpg](https://mir-s3-cdn-cf.behance.net/project_modules/max_3840/e971841229937.579e22b8d8280.jpg), accessed 29.09.2018.
- [18] D. Kumar, S. Kumar, G. Singh, N. Khanna: Drop test analysis of impact attenuator for formula SAE car, *International Journal of Scientific and Research Publications*, Vol. 2, No. 10, 2012.
- [19] R. Supakit, B. Pornporm, P. Worawat: Design and analysis of impact attenuator for student formula, *SAE Technical Paper*, 2015.
- [20] A. Sengupta, A. Sharma, A. Chakraborty: Manufacturing an impact attenuator for formula prototype cars, *International Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 2, No. 11, 2014.
- [21] J. Hosseiniour, H. Daneshi: Energy absorbtion and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression, *Thin-Walled Structures*, Vol. 41, No. 1, pp. 31–46, 2003.
- [22] S. Dokhe, R. Patil: To design and analysis of attenuator structure for fsae car, *International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education*, Vol. 3, No. 3, 2017.
- [23] H. Zarei, M. Kroger: Optimum honeycomb filled crash absorber design, *Materials & Design*, pp. 193-204, December 2006.
- [24] S. Lalith, I. Joshuara, A.K. Varun, C. Sudir, S. Krishna: Design and experimental analysis of an impact attenuator, In: *Proceedings of 12th IRF International Conference*, Chennai, India, pp. 62-66, 2014.
- [25] V. Marian, S. Lache, Novel impact attenuator, In: *Proceedings of 5Th International Conference Computational Mechanics and*

- Virtual Engineering*, Brasov, Romania, pp. 47-51, 2013.
- [26] P.K.B Ajeet, M.R. Saraf, K.C. Vora: *Design, analysis and testing of the primary structure of a race car for supra saeindia competition*, SAE International, 2012.
- [27] S. Boria, G. Forasassi: *Crash analysis of an impact attenuator for racing car in sandwich material*, Department of Mechanical, University of Pisa, Italy, 2008.
- [28] J. Fahland, C. Hoff, J. Brelin-Fornari: *Evaluating impact attenuator performance for a formula SAE vehicle*, SAE International, 2011.
- [29] J. Schultz, D. Griese, J. Ju, P. Shankar, J. Summers, L. Thompson: Design of honeycomb meso-structures for crushing energy absorption, *Journal of Mechanical Design*, Vol. 134, 2012.
- [30] L. Cao, Y. Lin, L. Fangyun, R. Chen, Z. Zhang, Y. Li: Experimental study on the shock absorption performance of combined aluminium honeycombs under impact loading, Hindawi Publishing Corporation - Shock and Vibration, pp. 1-8, 2015.
- [31] A. Singhal, V. Subramanium: Cost effective & innovative impact attenuator for formula sae car with drop test analysis, *International Journal of Scientific and Research Publications*, Vol. 3, No. 3, March 2013.
- [32] Thermoformed ABS plastic Bodywork on RB13 University of New South Wales – Redback Racing Team, available at: <http://www.fstotal.com/thermoformed-abs-plastic-bodywork-on-rb13-university-of-new-south-wales-redback-racing-team-2/>, accesed: 25.8.2018.
- [33] Offical site of FSAE team OULU,available at: <https://fsoulu.wordpress.com/>,accesed: 26.8.2018.
- [34] A. Oshinibosi: *Chassis and impact attenuator design for formula student race car*, university of leeds, School of Mechanical Engineering, 2012.
- [35] L. Peroni, M. Avalle, V. Petrella, G. Monacelli: Strain-rate effects on the energy absorption capacity of crash boxes with different geometry, *Structures under shock and impact VII*, pp. 259–268, 2002.
- [36] D. Rising, J. Kane, N. Vernon, J. Adkins, C. Hoff, J. Brelin-Fornari: Analysis of a frontal impact of a formula SAE vehicle, *SAE Technical Paper*, Michigan, 2006.
- [37] J. Bi, H. Fang, Q. Wang, X. Ren: *Modelling and optimisation of foam-filled thin-walled columns for crashworthiness designs*, USA: University of North Carolina at Charlotte, 2010.
- [38] H. R. Zarei, M. Kroger: *Optimisation of foam-filled aluminium tubes for crush box application*, Germany: Institute of Dynamics and Vibration, University of Hannover, 2007.
- [39] H. Yin, G. Wen, S. Hou, K. Chen: *Crushing analysis and multiobjective crashworthiness optimisation of honeycomb-filled single and bitubular polygonal tubes*, China: Hunan University, 2011.
- [40] G. M. Nagel, D. P. Thambiratman: *Computer simulation and energy absorption of tapered thin -walled rectangular tubes*, Australia: Queensland University of Technology, 2005.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## SOFTVERSKA PODRŠKA UREĐAJU ZA ISPITIVANJE GUBITAKA USLED TRENJA U NAVOJNIM SPOJEVIMA

Jasmina MILJOJKOVIĆ<sup>1\*</sup>, Milan ERIĆ<sup>1</sup>, Aleksandar KOŠARAC<sup>2</sup>, Vladimir KOČOVIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Srbija, [jasmina.miljojkovic@fink.rs](mailto:jasmina.miljojkovic@fink.rs);  
[ericm@kg.ac.rs](mailto:ericm@kg.ac.rs); [vladimir.kocovic@kg.ac.rs](mailto:vladimir.kocovic@kg.ac.rs)

<sup>2</sup>Mašinski fakultet Univerziteta u Istočnom Sarajevu, Republika Srpska, BiH,  
[aleksandar.kosarac@ues.rs.ba](mailto:aleksandar.kosarac@ues.rs.ba)

**Apstrakt:** U radu je opisan razvoj softverske podrške uređaju za ispitivanje gubitaka usled trenja u navojnim spojevima. Razvoju softverske podrške prethodila su razmatranja mogućih načina unapređenja unosa podataka i proračuna baziranih na rezultatima merenja, poznatim teorijskim zavisnostima i postavkama uređaja. Softver, koji je razvijen u Visual Basic for Applications (VBA) razvojnog okruženju, obezbedio je efikasan unos i obradu podataka.

**Ključne reči:** Trenje, navoj, zavrtačka veza, softver, VBA

### 1. UVOD

Talas promena u svetskoj industriji doneo je nove modele poslovanja i nove tehnologije, ali mnogi proizvodi, ma kako bili „konzervativni“, još uvek nemaju adekvatnu zamenu. „Navojni spoj XXI veka još uvek ne postoji“ [1], jer i u eri digitalne transformacije, automatizacije i inovacija, koje prevazilaze očekivanja s kraja prethodnog veka, u toj oblasti još uvek nije rečena poslednja reč, ni u nauci, kao ni u domenu proizvodnih tehnologija i primene.

Obrtni moment, kojim se vrši pritezanje zavrtnja, u najvećoj meri, i to 85-90% [1, 2], se troši na savlađivanje trenja. Proučavanje granica u kojima bi trebalo da se kreću vrednosti koeficijenta trenja u navojnom spoju posebno je značajno ako se ima u vidu masovna primena zavrtačkih veza i činjenica da je u pitanju tržište koje beleži neprekidni rast, što potvrđuju i podaci globalnih istraživačkih i konsultantskih kuća [3, 4, 5].

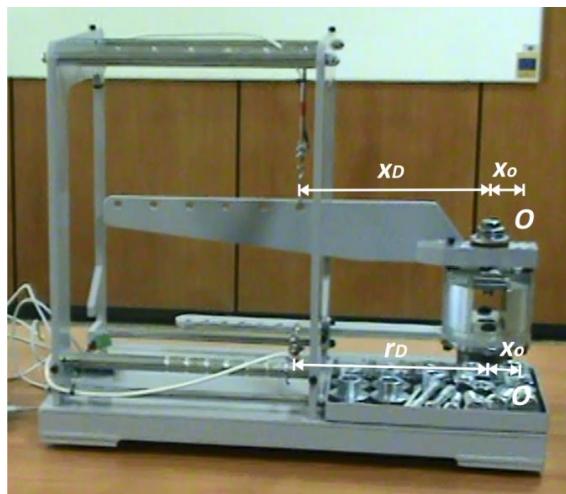
U literaturi se mogu naći primeri razvoja uređaja uz pomoć kojih se trenje u navoju najčešće ispituje nezavisno od trenja između glave zavrtnja i ploče, a primena aksijalnog kugličnog ležaja predstavlja jedan od načina da se određena komponenta trenja isključi iz proračuna [2]. Jedno od predloženih rešenja bazira se na kontrolisanju aksijalne sile uz pomoć računara i simuliranju procesa pritezanja zavrtačke veze, pri čemu su glava zavrtnja i navrtka pričvršćene kako bi se sprečilo okretanje [6]. Primjenjivana su i rešenja sa dvostrukom funkcijom: određivanje koeficijenta i radiusa trenja na glavi zavrtnja i, uz promenu postavke uređaja, za određivanje koeficijenta trenja u navoju [7]. Razvijeni su i uređaji za potrebe utvrđivanja razlika između mehaničkih i triboloških karakteristika metričkog navoja izrađenog hladnim valjanjem i mašinski obrađenog navoja [8], proučavanje promena vrednosti koeficijenta trenja tokom višestrukog pritezanja, kao i rešenja za

posredno proučavanje uticaja trenja, primenom Hukovog zakona i drugih teorijskih zavisnosti, a na osnovu sabijanja čelične čaure, postavljene između navrtke i ploče [9].

U navedenim, kao i brojnim drugim primerima laboratorijskih ispitivanja, odgovarajuća softverska podrška igra veoma važnu ulogu u procesu akvizicije i obrade podataka. U radu je opisan princip rada uređaja, razvijenog za potrebe ispitivanja gubitaka usled trenja u navojnom spoju, kao i razvoj odgovarajuće softverske podrške.

## 2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE UREĐAJA I MATEMATIČKI MODEL PRORAČUNA

Princip rada uređaja bazira se na merenju sile pritezanja i primjenjenoj obrtnog momenta postavljanjem senzora na dve poluge (slika 1).



Slika 1. Fotografija uređaja

Senzor, koji se nalazi na vertikali gornje poluge, registruje aksijalnu silu, dok drugi senzor, koji je položen horizontalno, registruje silu nastalu usled primene obrtnog momenta pri pritezanju. Osa zavrtnja i nosač poluge imaju fiksni položaj u odnosu na obrtnu tačku. Poluge mogu biti oslonjene u više različitih položaja, kao što se i položaj senzora može menjati, odabirom odgovarajućeg otvora na polugi. Ispitivanje se može sprovesti sa navojnim parom metričkog, trapeznog, kosog i drugih vrsta navoja.

Kako bi se trenje u navoju ispitivalo nezavisno od trenja koje nastaje na dodirnoj površini glave zavrtnja i ploče, ispod glave

zavrtnja postavljen je aksijalni kuglični ležaj, koji pri normalnim opterećenjima i brzinama obezbeđuje malu vrednost koeficijent trenja, koja se u proračunu može zanemariti [2, 10].

Na osnovu izvršenih merenja može se uspostaviti veza između momenta i sile u zavrtnju, a daljim proračunom se dolazi do vrednosti koeficijenta trenja u navojnom spoju. U nastavku je prikazan tok proračuna, baziranog na postavkama projektovanog uređaja (slika 1).

Ako usvojimo sledeće oznake:

$x_o$  – rastojanje oslonca poluge sile od ose zavrtnja,

$x_d$  – rastojanje vertikalnog dinamometra od ose zavrtnja,

$F_d$  – sila koju meri vertikalni dinamometar,

$F_z$  – aksijalna sila u zavrtnju,

iz uslova da je u tački oslonca:

$$\sum M_0 = 0, \quad (1)$$

sledi:

$$F_d(x_0 + x_d) - F_z \cdot x_0 = 0, \quad (2)$$

i dobija se izraz za proračun sile pritezanja u zavrtnju:

$$F_z = F_d \frac{x_0 + x_d}{x_0}. \quad (3)$$

Ako usvojimo sledeće oznake:

$x_o$  – rastojanje oslonca poluge momenta od ose zavrtnja,

$x_d$  – rastojanje horizontalnog dinamometra od ose zavrtnja,

$F_m$  – sila koju meri horizontalni dinamometar,

$M_z$  – obrtni moment zavrtnja,

dobija se izraz za proračun obrtnog momenta zavrtnja:

$$M_z = F_m(x_0 + r_d). \quad (4)$$

Kako bi se dobio izraz za proračun koeficijenta trenja, polazi se od poznatih izraza kojima se definiše zavisnost sile pritezanja i momenta otpora u navojnom paru, pri čemu se trenje na dodiru glave zavrtnja i podloge u ovom slučaju zanemaruje:

$$F_z = \frac{M_z}{\frac{d_m}{2} \operatorname{tg}(\alpha + \rho)}, \quad (5)$$

$$\rho = \operatorname{arctg} \left| \frac{2M_z}{d_m F_z} \right| - \alpha, \quad (6)$$

$$\mu = \operatorname{tg} \rho, \quad (7)$$

gde je:

$d_m$  – srednji prečnik zavojnice,

$\alpha$  – ugao nagiba zavojnice,

$\rho$  – ugao trenja,

$\mu$  – koeficijent trenja u navoju.

### 3. RAZVOJ SOFTVERSKE PODRŠKE

Sistem za akviziciju podataka sastoji se od dva senzora i *Arduino* fizičko-računarske platforme, dok softver *Telemetry Viewer* tokom ispitivanja daje prikaz sile i momenta na ekranu i pohranjuje rezultate merenja u CSV formatu. Za izradu pratećeg softvera, čija je funkcija preuzimanje i obrada dobijenih podataka, odnosno obavljanje proračuna i kreiranje odgovarajućih dijagrama, korišćen je programski jezik *Visual Basic for Applications* (*VBA*), koji je "makro" jezik. U računarstvu se pod pojmom makro (engl. *macro* ili *macroinstruction*) podrazumeva niz komandi povezanih u jednu komandu kako bi zadatak bio automatski izvršen. Praksa je pokazala da je *VBA* pogodan za primenu kada je važno pojednostaviti unos podataka, obaviti proračune ili statističke analize podataka, ili obraditi podatke, koji mogu biti izlaz drugog softvera [11, 12]. Pri razvoju softverske podrške uređaju za merenje gubitaka u navojnom spolu korišćena je još jedna pogodnost koju pruža *Visual Basic for Applications*, a to je mogućnost kreiranja elektronskog korisničkog formulara (*User Form*), koji je pogodan za unos podataka.

Izradi pratećeg softvera pristupljeno je po sledećoj metodologiji [13]:

- **Definisanje problema**

Kako bi se obavio proračun na osnovu ranije prikazanog matematičkog modela, neophodan je unos podataka u matricu (najčešće u *MS Excel*-u) o izmerenim silama, geometrijskim karakteristikama odabranog zavrtnja, odabranoj poziciji oslonaca obe poluge u odnosu na osu zavrtnja i odabranim pozicijama dinamometara, a zatim obaviti proračun i

izraditi odgovarajuće dijagrame. Takođe, problem je i brisanje vrednosti sila koje je sistem za akviziciju zabeležio pre i posle samog pritezanja zavrtnja, a koje su bliske nuli i nisu relevantne za proračun, kao ni za izradu dijagrama.

- **Izrada algoritma**

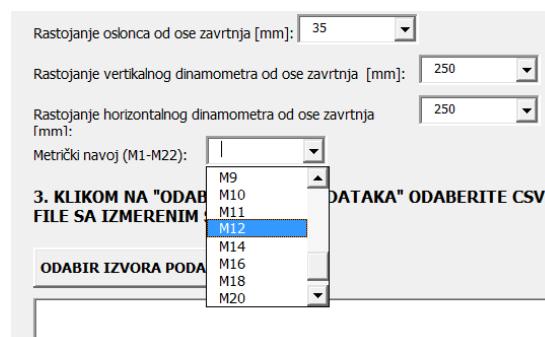
Svemu navedenom u algoritmu (slika 3) prethodile su pripremne radnje – kreiranje i dizajniranje korisničkog okruženja i pisanje kodova u *VBA Editor*-u, koji aktiviraju funkcije za svako dugme koje se nalazi u korisničkom formularu, pisanje kodova koji upućuju korisniku obaveštenje da omogući korišćenje makroa, kako bi mogao da pokrene program, kao i kodova za isključivanje makroa po izlasku iz programa, itd.

- **Pisanje i unošenje programa u računar**
- **Testiranje programa i ispravke grešaka**
- **Implementacija programa i obuka korisnika**
- **Održavanje i dogradnja programa.**

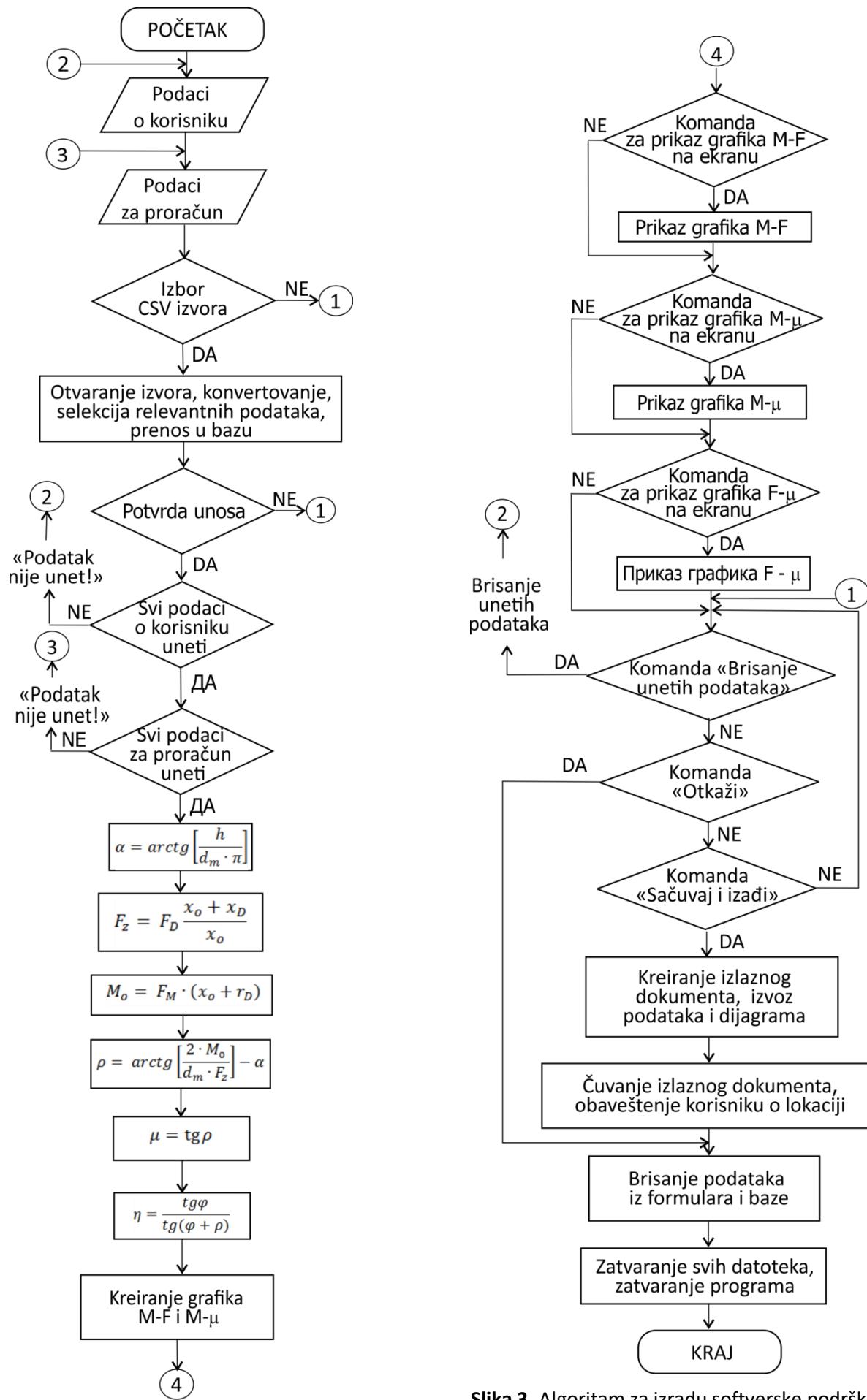
Izlazna datoteka, u kojoj će biti sačuvani uneti podaci o korisniku i datum ispitivanja, polazni podaci u vezi sa postavkama uređaja i geometrijom odabranog zavrtnja, vrednosti izmerenih sila, rezultati proračuna i dijagrami, može biti u različitim *MS Office* ili drugim formatima.

### 4. REZULTATI

Softver je testiran i primjenjen pri ispitivanju čeličnih zavrtanja sa standardnim metričkim navojem M10 i M12, M14 i M18, klase čvrstoće 8.8. Na slici 2 prikazan je detalj korisničkog okruženja, u kojem je unos podataka olakšan odabirom opcija iz padajućih menija.

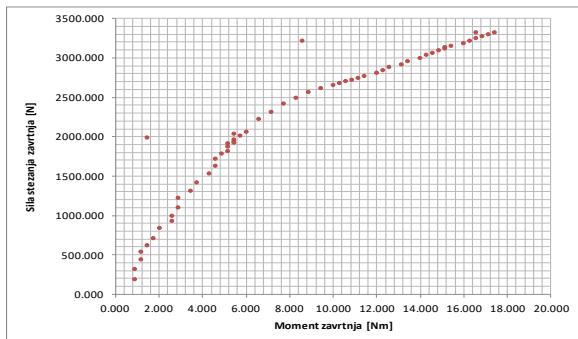


Slika 2. Detalj korisničkog okruženja

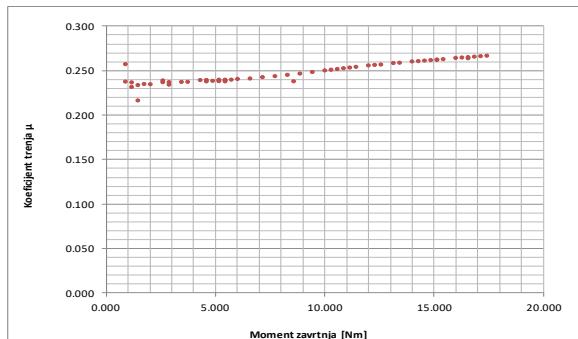


Slika 3. Algoritam za izradu softverske podrške

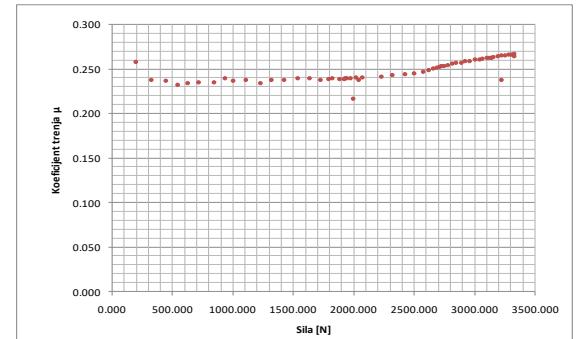
Pri pokretanju softvera, korisnik na ekranu vidi samo korisničko okruženje, dok ostali procesi nisu vidljivi. Po izboru, korisnik može videti prikaz dijagrama na ekranu odmah po unosu podataka. Na slici 4 prikazani su dijagrami dobijeni kao rezultat proračuna pri jednom od ispitivanja zavrtnja M12.



a) Dijagram moment-sila



b) Dijagram moment-koeficijent trenja



c) Dijagram sila-koeficijent trenja

Slika 4. Dijagrami dobijeni kao rezultat ispitivanja zavrtnja M12

## 5. ZAKLJUČAK

U radu je opisan proces razvoja i primene softverske podrške uređaju za ispitivanje gubitaka usled trenja u navojnim spojevima. Razvoju softverske podrške prethodila su razmatranja mogućih načina unapređenja

unosa rezultata merenja u matricu za proračun, kao i samog proračuna, baziranog na izmerenim veličinama.

Softver je efikasno obavio proračun na osnovu matematičkog modela, baziranog na postavkama uređaja i poznatim teorijskim zavisnostima u oblasti navojnih spojeva. Unos podataka je znatno pojednostavljen i ubrzan, a obrada rezultata merenja obavljena je efikasno, bez opterećivanja ekrana, odnosno korisnika, pratećim procesima, poput otvaranja datoteka, prenosa podataka i sl. Pri tome, obrada rezultata merenja je zaštićena od grešaka, koje bi se mogle dogoditi pri manuelnom unosu i daljoj obradi podataka.

Prednost prikazanog rešenja za izradu softverske podrške uređaju za ispitivanje gubitaka usled trenja u navoju je u dostupnosti VBA razvojnog okruženja u okviru široko primenjivanih programskih sistema, kao što je *MS Office*. Prateći mogućnosti daljih ispitivanja, koja bi se mogla sprovesti na prikazanom uređaju, ali i drugim uređajima srodnim namenama, softver bi se mogao dalje dograđivati. Takođe, postoji mogućnost kustomizacije radnog okruženja, u zavisnosti od potreba korisnika.

## LITERATURA

- [1] W. A. Grabon, M. Osetek, T.G. Mathia, Friction of threaded fasteners, *Tribology International*, Vol. 118, pp. 408–420, 2018.
- [2] M. Klöcker, S. Westphal, Investigations of friction-relevant parameters to ensure reliable bolted joints, in: *MATEC Web of Conferences*, EDP Sciences, Vol. 94, p. 04007, 2017.
- [3] Freedonia Group, Global Industrial Fastener Market - Demand and Sales Forecasts, available at: <https://www.freedoniagroup.com/Global-Industrial-Fastener-Market.html>, accessed: 11.06.2018.
- [4] Grand View Research, Industrial fasteners market analysis 2018 – 2025, available at: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/industrial-fasteners-market>, accessed: 11.06.2018.
- [5] S. S. Hamedani, European market and global fastener demand, *China Fastener World*, no. 47, pp. 118-119, 2016.

- [6] Y. Jiang, M. Zhang, T. W. Park, C. H. Lee, An Experimental Investigation on Frictional Properties of Bolted Joints, *Proceedings of the 2002 ASME Pressure Vessel and Piping Conference, 2002, Vancouver*, Vol. 433, pp. 59–66.
- [7] S. A. Nassar, H. El-Khamy, G. C. Barber, Q. Zou, T. S. Sun, An Experimental Study of Bearing and Thread Friction in Fasteners, *Journal of Tribology*, Vol. 127, pp. 263–272, 2005.
- [8] A. Ibrahmi, M. Hbaieb, A. Krichen, Experimental study of the effect of the threading process on the mechanical and tribological behaviors of the triangular thread, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 88, No. 1–4, pp. 269–276, 2017.
- [9] V. E. Hemmati, R. H. Oskouei, T. N. Chakherlou, An experimental method for measuring clamping force in bolted connections and effect of bolt threads lubrication on its value, in: *Proceedings of the World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 48, pp. 457–460, 2008.
- [10] B. Armstrong-Hélouvry, P. Dupont, C. C. de Wit, A survey of models analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction, *Automatica*, Vol. 30, No. 7, pp. 1083–1138, 1994.
- [11] M. S. Seppanen, Modeling for application: developing industrial strength simulation models using Visual Basic for Applications (VBA), *Proceedings of the 32nd Conference on Winter Simulation*, 10-13.12.2000, Orlando, USA, pp. 77–82.
- [12] A. Košarac, M. Zeljković, R. Gatalo, Primjena savremenih tehnologija vizuelizacije u projektovanju fleksibilnih tehnoloških struktura, *Procedings of the Infoteh-Jahorina, 16-18.03.2011, Jahorina, BiH*, Vol. 10, pp. 249–253.
- [13] T. Latinović, *Osnove programiranja (Visual Basic)*, Besjeda, Banja Luka, 2007.

## SOFTWARE SUPPORT FOR THE DEVICE FOR EXAMINATION OF FRICTION LOSSES IN BOLTED JOINTS

**Abstract:** This paper describes the development of software support for the device for examination of friction losses in bolted joints. The development of software support was preceded by consideration of possible ways to improve the data entry process and calculations based on measurement results, known theoretical dependencies and device settings. The software, developed in Visual Basic for Applications (VBA) development environment, ensured efficient data entry and processing.

**Keywords:** Friction, thread, screw connection, software, VBA



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

### 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26.October 2018

## ANALITIČKO-EKSPERIMENTALNO DEFINISANJE KARTE STABILNOSTI OBRADNIH SISTEMA

Cvijetin MLAĐENOVIĆ<sup>1</sup>, Aleksandar KOŠARAC<sup>2</sup>, Milan ZELJKOVIĆ<sup>1</sup>, Miloš KNEŽEV<sup>1</sup>, Aleksandar ŽIVKOVIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, Srbija,

[mladja@uns.ac.rs](mailto:mladja@uns.ac.rs), [milanz@uns.ac.rs](mailto:milanz@uns.ac.rs), [knezev@uns.ac.rs](mailto:knezev@uns.ac.rs), [acozi@uns.ac.rs](mailto:acozi@uns.ac.rs)

<sup>2</sup>Mašinski fakultet, Univerzitet u Istočnom Sarajevu, Istočno Sarajevo, BiH, [akosarac@gmail.com](mailto:akosarac@gmail.com)

**Apstrakt:** Samopobudne vibracije, koje često nastaju pri obradi rezanjem, mogu izazvati neželjene pojave u procesu obrade, kao npr. habanje ili lom alata, loš kvalitet obrađene površine, povećanje potrošnje energije, povećanje bučnosti mašine, itd. Da bi se izbegle posledice ovih vibracija, pri radu mašine alatke koriste se oni režimi rezanja pri kojima ne dolazi do nestabilnog procesa obrade. U tu svrhu, potrebno je definisati kartu stabilnosti obradnog sistema, koja prikazuje granicu između režima stabilnog i nestabilnog rada mašina u zavisnosti od broja obrtaja glavnog vretena i od dubine rezanja.

U radu je, na primeru obradnog centra za glodanje EMCO Concept Mill 450, prikazana primena analitičkog modela za definisanje karte stabilnosti, kao i eksperimentalna verifikacija definisane karte stabilnosti.

**Ključne reči:** samopobudne vibracije, funkcija frekventnog odziva, karta stabilnosti.

### 1. UVOD

Pri radu mašine alatke za obradu rezanjem, može doći do nastanka različitih tipova vibracija (slobodne, prinudne i samopobudne) koje u manjoj ili većoj meri imaju uticaj na sam proces obrade.

Najnepovoljnije vibracije, koje se javljaju u procesu obrade rezanjem, su samopobudne vibracije, koje energiju za svoj nastanak i rast amplitudne crpe iz samog procesa rezanja. Ove vibracije mogu nastati usled trenja u sistemu alat – obradak, usled topotno – mehaničkih efekata, ili kako posledica regenerativnog efekta tj. variranja poprečnog preseka strugotine tokom obrade. Navedene vibracije često dovode do nestabilnog rada mašine alatke, a za posledicu imaju smanjenje kvaliteta obrađene površine, pojavu buke, ubrzano habanje reznog alata i elemenata mašine alatke, itd. [1].

Da bi se izbegle posledice samopobudnih vibracija, pri radu mašine alatke često nije moguće

koristiti određene režime rezanja jer uzrokuju nestabilan rad mašine. Dijagrami koji prikazuju područje stabilnog i nestabilnog rada mašine alatke nazivaju se karte stabilnosti, i definišu se u zavisnosti od broja obrtaja glavnog vretena i dubine rezanja. Karte stabilnosti se najčešće definišu analitičkim putem i to na osnovu modalnih parametara obradnog sistema i parametara procesa rezanja.

Istraživanja o matematičkom modelovanju samopobudnih vibracija, među prvima, su sproveli Tobias [2, 3] i Tlusty [2, 4], koji su identifikovali regenerativni mehanizam nastanka samopobudnih vibracija, i koji su razvili njegov matematički model u obliku diferencijalnih jednačina sa kašnjenjem (*Delay Differential Equations*) (DDE). Metod predložen od strane Altintas-a i Budak-a, aproksimacija nultog reda (*Zeroth Order Approximation*) (ZOA) [5], zasniva se na predviđanju stabilnosti sistema primenom Furijeovog izraza nultog reda u cilju aproksimacije

promene sile rezanja i formiranja karte stabilnosti za procese kod kojih sila rezanja varira relativno malo, npr. pri obradi ravnih površina čeonim glodalima.

Pored pomenutih, veliki broj istraživača je takođe primenio složene matematičke izraze za modelovanje samopobudnih vibracija u cilju definisanja karte stabilnosti, pa su tako *Insperger* i *Stephan* [6, 7] primenili polu-diskretizovani metod (*semi-discretization*) (SD) kako bi DDE metod sveli na seriju običnih diferencijalnih jednačina (ODE) sa poznatim rešenjem. *Gradišek* [8-3] je u svojim istraživanjima uporedio granice stabilnosti procesa glodanja dobijene metodama ZOA i SD, pri čemu je zaključio da ove dve metode daju veoma slične karte stabilnosti za obrade sa relativno velikom vrednostima širine glodanja, dok se za male vrednosti širine glodanja u definisanim kartama stabilnosti primećuju značajne razlike. Pojavu samopobudnih vibracija analizirali su i *Milisavljević* i *Zeljković* [9, 10, 11], koji su razvili dvodimenzionalni model za predikciju samopobudnih vibracija, baziran na oscilatoru Sokolovskog.

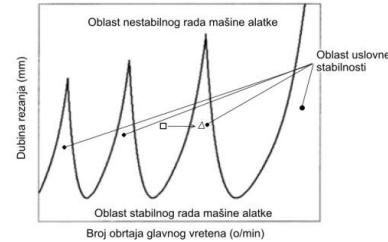
U radu je razmatran analitički model za definisanje karte stabilnosti obradnih sistema, tzv. metod Furijeovih redova, koji je zatim primenjen za analitičko definisanje karte stabilnosti obradnog centra za glodanje *EMCO Concept Mill 450*. U cilju određivanja modalnih parametara obradnog sistema, koji su potrebni kao ulazni podaci pri definisanju karte stabilnosti, sproveden je niz ispitivanja impulsnom pobudnom silom na konkretnom obradnom sistemu kako bi se generisala funkcija frekventnog odziva (funkcija prenosa) sistema, iz koje je moguće odrediti njegove modalne parametre. Na kraju, eksperimentalnim ispitivanjem samopobudnih vibracija na konkretnom obradnom sistemu, verifikovana je analitički definisana karta stabilnosti.

U cilju određivanja modalnih parametara obradnog sistema, kao i u cilju sprovođenja proračuna potrebnih za definisanje karte stabilnosti, korišćeno je programsko okruženje MATLAB, a u cilju prikupljanja podataka pri eksperimentalnim ispitivanjima, korišćen je softverski sistem LabVIEW.

## 2. DEFINISANJE KARTE STABILNOSTI PRIMENOM ANALITIČKOG MODELA

Kao što je već rečeno, karta stabilnosti prikazuje granicu između stabilne i nestabilne zone procesa

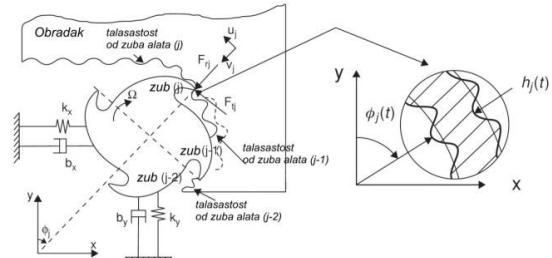
rezanja u funkciji od aksijalne dubine rezanja  $b_{lim}$ , i broja obrtaja glavnog vretena mašine alatke (Sl.1). Za definisanje karte stabilnosti primenom analitičkih modela u nastavku je prikazan *Altintas – Budak*-ov model furijeovih redova.



Slika 1. Principijelni izgled karte stabilnosti

### 2.1 Model Furijeovih redova

*Altintas* i *Budak* su alat za glodanje sa  $N$  zuba i uglom zavojnice  $0^\circ$  smatrali dinamičkim sistemom sa dva stepena slobode (Sl.2), a za rešavanje složenih jednačina kretanja su primenili metod Furijeovih redova.



Slika 2. Model glodanja sa dva stepena slobode [5]

Aksijalna dubina i broj obrtaja glavnog vretena ovim modelom se određuju iz izraza:

$$b_{lim} = \frac{2\pi\Lambda_R}{NK_t} (1 + \kappa^2) \quad (1)$$

$$n = \frac{60}{NT} \quad (2)$$

gde je:

$\Lambda_R$  i  $\Lambda_I$  - realni i imaginarni deo kompleksne kvadratne funkcije koja se definiše na bazi FRF posmatranog sistema, pri čemu

$$\text{je: } \kappa = \frac{\Lambda_I}{\Lambda_R},$$

$T = \frac{\varepsilon + 2k\pi}{\omega_c}$  - period između dva uzastopna prolaska alata,

$k=0,1,2,3,\dots$  - broj "talasa" na karti stabilnosti,

$\omega_c$  - ugaona brzina samopobudnih vibracija,

$\varepsilon = \pi - 2\psi$  - fazna razlika između talasa na obrađenoj površini, koje formiraju dva uzastopna zuba

alata, pri čemu je:  $\psi = \tan^{-1} \kappa$

- $K_s$  - specifični otpor rezanja,  
 $N$  - broj zuba alata.

Da bi se definisala karta stabilnosti prethodno pomenutim analitičkim modelom, potrebno je poznavati neke od dinamičkih karakteristika posmatranog sistema, odnosno njegove modalne parametre. U većini slučajeva potrebne informacije o dinamičkim karakteristikama sistema dobijaju se iz funkcije prenosa (TF) ili iz funkcije frekventnog odziva (FRF) sistema mašina alatka – držač alata – alat.

Pri određivanju TF sistema glavno vreteno – alat najčešće se primenjuje ispitivanja impulsnom pobudnom silom, odnosno struktura mašine alatke se pobuđuje impulsnim čekićem dok se odziv prati pomoću odgovarajućih senzora pomeranja, brzine ili ubrzanja.

### 3. KARTA STABILNOSTI OBRADNOG CENTRA EMCO CONCEPT MILL 450

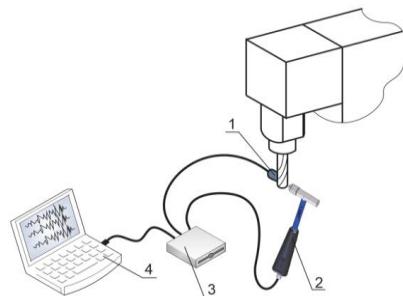
Da bi se definisala karta stabilnosti posmatranog obradnog centra, potrebno je odrediti njegove modalne parametre, tj. sopstvenu frekvenciju, modalnu krutost i koeficijent prigušenja, koji se najčešće određuju iz funkcije frekventnog odziva (FRF) sistema.

Kao što je već i napomenuto, funkcija frekventnog odziva, sistema alat – držač alata – glavno, vreteno može biti identifikovana eksperimentalno primenom impulsnih testova. Osnovna ideja je da se struktura mašine pobudi impulsnom silom na određenom mestu (vrh alata), a da se prati dinamički odziv sistema na istom ili nekom drugom mestu. Na slici 3. prikazan je eksperimentalni model za određivanje FRF obradnog centra *EMCO Concept Mill 450*, koji se sastoji od davača ubrzanja *PCB Model: 352C33* (1), kojim se meri oscilovanje vrha alata i pobudnog čekića *Brüel & Kjaer Type 8206* (2), kojim se pobuđuje struktura mašine. Pobudni čekić i akcelerometar su povezani sa A/D pretvaračem *National Instruments USB 4432* (3), koji direktno šalje prikupljene podatke na računar (4).

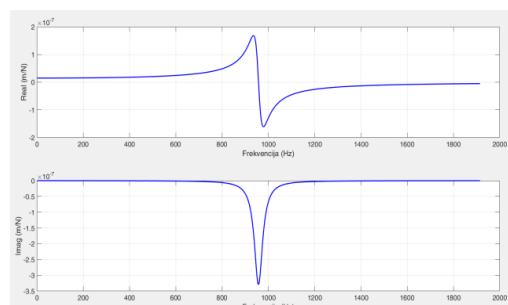
Kako se FRF posmatranog sistema menja sa promenom nekog od elemenata sistema, treba napomenuti da je u glavnom vretenu obradnog centra postavljeno vretenasto glodalno od brzoreznog čelika prečnika  $\varnothing 10$  sa četiri rezne ivice (zuba).

Signal prikupljen akcelerometrom i signal od čekića se preko A/D pretvarača šalju na PC računar

gde se memorišu u tabelarnom obliku. Primenom Matlab programskog sistema omogućena je brza Furijeova transformacija (FFT) dobijenih signala i određivanje FRF posmatranog sistema, tj. njenog realnog i imaginarnog dela, iz kojih se izračunavaju modalni parametri obradnog sistema. Na slici 4. prikazan je izgled filtriranog realnog i imaginarnog dela FRF alata  $\varnothing 10$  postavljenog u glavno vreteno obradnog centra *EMCO Concept Mill 450*.



Slika 3. Eksperimentalni model za određivanje FRF obradnog centra *EMCO Concept Mill 450*



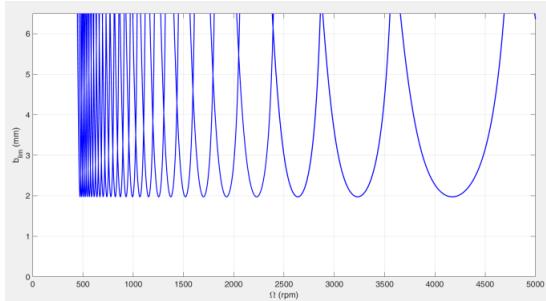
Slika 4. Realni i imaginari deo FRF posmatranog sistema

Pored modalnih parametara, koji su određeni iz prikazanog realnog i imaginarnog dela FRF, za definisanje karte stabilnosti potrebni su i podaci o materijalu obradka i o procesu obrade. Ovi podaci, zajedno sa određenim modalnim parametrima, prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1. Parametri potrebni za definisanje karte stabilnosti

$\Phi_{st}=0^\circ$	- ugao ulaza alata u zahvat
$\Phi_{st}=180^\circ$	- ugao izlaza alata iz zahvata
$f_n=960[\text{Hz}]$	- sopstvena frekvencija sistema
$\kappa=6.61\cdot 10^7[\text{N/m}]$	- krutost sistema
$\zeta=0.02297$	- koeficijent prigušenja
$d=10[\text{mm}]$	- prečnik i broj zuba alata
$N=4$	
$K_s=750[\text{N/mm}^2]$	- glavni otpor rezanja

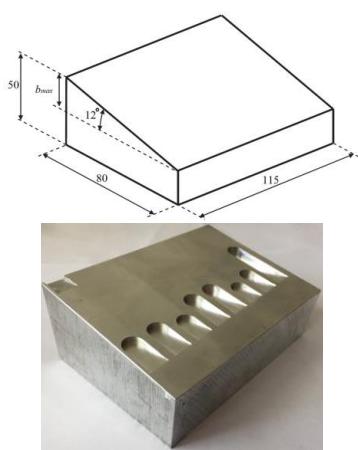
Primenom Matlab programskog sistema, a na osnovu parametara prikazanih u tabeli 1, koji se odnose na obradni centar *EMCO Concept Mill 450* sa alatom od brzoreznog čelika prečnika  $\phi 10$  i sa četiri rezne ivice, za slučaj obrade aluminijuma 7075, primenom prethodno opisanog modela definisana je karta stabilnosti prikazana na (Sl. 5).



**Slika 5.** Karta stabilnosti posmatranog sistema definisana modelom furijeovih redova

#### 4. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA ANALITIČKE KARTE STABILNOSTI

U cilju verifikacije analitički dobijene karte stabilnosti, sproveden je niz eksperimentata pri kojima je varirana brzina rezanja u rasponu od 80 m/min do 150m/min, dok je pomak po zubu konstantan i iznosi 0,02mm/z. Obradak od aluminijuma 7075, zahvaljujući svom zakošenom obliku, omogućava kontinualno povećanje dubine rezanja u pravcu brzine pomoćnog kretanja, dok se broj obrtaja glavnog vretena povećava svakim sledećim prolazom alata. Proces rezanja se zaustavlja u trenutku pojave samopobudnih vibracija, a dubina na kojoj se u tom trenutku nalazio alat, smatra se graničnom dubinom rezanja za odgovarajući broj obrtaja. Na slici 6 prikazana je skica pripremka za eksperimentalna ispitivanja, kao i izgled obratka nakon eksperimentata.

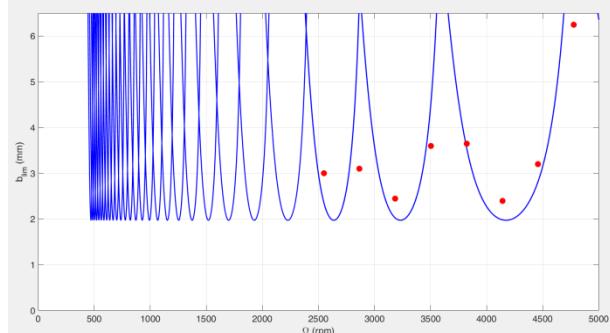


**Slika 6.**Pripremka i izradak od Al7075

Režimi rezanja korišćeni pri eksperimentalnoj verifikaciji, kao i izmerene granične dubine za odgovarajuće režime, prikazani su u tabeli 2, dok je na slici 7 prikazana karta stabilnosti sa eksperimentalno definisanim graničnim dubinama.

**Tabela 2.** Režimi rezanja i granične dubine pri eksperimentalnoj verifikaciji karte stabilnosti

R.br.	$v$ [m/min]	$n$ [o/min]	$v_p$ [mm/mi n]	Granična dubina
1.	80	2550	200	3
2.	90	2866	230	3.1
3.	100	3185	254	2.45
4.	110	3503	280	3.6
5.	120	3822	305	3.65
6.	130	4140	331	2.4
7.	140	4459	356	3.2
8.	150	4777	381	6.25



**Slika 7.** Karta stabilnosti posmatranog sistema sa eksperimentalno definisanim graničnim dubinama

#### 5. ZAKLJUČAK

Akcentat ovog rada stavljen je na analizu i razumevanje pojave samopobudnih vibracija u procesu obrade gledonjem, i to kroz analitički model za definisanje karti stabilnosti obradnih sistema predložen od strane Altintas-a i Budaka [1]. Takođe, sprovedena je i eksperimentalna verifikacija analitički definisane karte stabilnosti na konkretnom primeru.

U cilju određivanja modalnih parametara obradnog centra *EMCO Concept Mill 450*, a koji su potrebni za definisanje karte stabilnosti, sproveden je niz eksperimentata kojima je, pomoću savremene dijagnostičke opreme, određena funkcija frekventnog odziva posmatranog sistema.

Kako bi se analizirali ovako prikupljeni signali, i kako bi što jednostavnije bila definisana karta stabilnosti obradnog centra, primenjen je MATLAB programski sistem. Na ovaj način, a primenom prethodno definisanih modela za definisanje karti stabilnosti, definisane su dve karte stabilnosti koje

se odnose na obradu aluminijuma alatom od brzoreznog čelika, prečnika Ø10.

Analizirajući rezultate, tj. poređenjem analitički definisane karte stabilnosti obradnog centra *EMCO Concept Mill 450*, i eksperimentalno prikupljenih rezultata, zaključuje se da razmatrani analitički model za definisanje karte stabilnosti daje dobre rezultate i da se karta stabilnosti dobijena na ovaj način, sa sigurnošću može koristiti u proizvodnim procesima.

Takođe, može se zaključiti da je metod eksperimentalne verifikacije karte stabilnosti vrlo efikasan, jer se obradom zakošenog radnog predmeta mnogostruko smanjuje potreban broj eksperimenata za određivanje granične dubine rezanja. Mana ovog metoda je velika subjektivnost pri detektovanju trenutka nastanka samopobudnih vibracija, i upravo ovaj zadatak predstavlja pravac budućih istraživanja u okviru analize stabilnosti procesa obrade glodanjem.

## ZAHVALNOST

U radu je prikazan deo rezultata istraživanja u okviru projekta "Savremeni prilazi u razvoju specijalnih rešenja uležištenja u mašinstvu i medicinskoj protetici" TR 35025, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] G. Quintana, J. Ciurana, D. Teixidor: A new experimental methodology for identification of stability lobes diagram in milling operations, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 48, No. 15, pp. 1637–1645, 2008.
- [2] G. Quintana, J. Ciurana: Chatter in machining processes: A review, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 51, pp. 363–376, 2011.
- [3] S.A. Tobias: Fishwick, W: *Theory of regenerative machine tool chatter*, The engineer 1958, 258.
- [4] J. Tlusty, M. Polacek: The stability of machine tools against self-excited vibrations in machining, In: *Proceedings of the ASME Production Engineering Research Conference*, pp. 465–474, 1963.
- [5] Y. Altintas, E. Budak: Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling, Annals of the CIRP, Vol. 44/1, pp. 357–362, 1995.
- [6] T. Insperger, G. Stepan: Semi-discretization method for delayed systems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 55, Issues 5, pp. 503–518, 2002.
- [7] T. Insperger, G. Stepan: Updated semi-discretization method for periodic delay-differential equations with discrete delay, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 61, Issue 1, pp. 117–141, 2004.
- [8] J. Gradisek, M. Kalveram, T. Insperger, K. Weinert, G. Stepan, E. Govekar: On stability prediction for milling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 45, Issues 7-8, pp. 769–781, 2005/06.
- [9] B. Milisavljević, M. Zeljković: Bifurkacije i samopobudne vibracije pri obradi rezanjem - dvodimenzionalni model, In: *Zbornik radova, VI medjunarodna naučno-stručna konferencija MMA '97 - Fleksibilne tehnologije*, Novi Sad, 1997, str.103-108.
- [10] B. Milisavljević, M. Zeljković, R. Gatalo: The nonlinear model of a chatter and bifurcation, In: *Proceedings of the 5th engineering systems design and analysis conference - ESDA – ASME 2000*, PD. Vol. 82, New York, 2000, pp 391 – 398.
- [11] B. Milisavljević, M. Zeljković: Bifurkacija ravnotežnog stanja pri obradi rezanjem: oscilator Sokolovskog, In: *Zbornik radova, 27. JUPITER konferencija - 23. simpozijum NUROBOTI-FTS*, Beograd, 2001, str. 3.37 - 3.40.

## ANALYTICALLY-EXPERIMENTAL DEFINITION OF THE MACHINING SYSTEMS STABILITY LOBE DIAGRAM

**Abstract:** Self-excited vibrations in machining can cause a number of problems, such as. tool wear or breakage, poor surface quality, increase energy consumption, increase of noise, etc. In order to avoid the consequences of self-excited vibration it is necessary to define those cutting regimes which can not cause the occurrence of these vibrations. For this purpose, it is necessary to define a stability lobe diagram of the observed machining system, which shows the boundary between stable and unstable zone of machining

*operations, depending on the number of revolutions of the spindle and cutting depth.*

This paper, on the example of the EMCO Concept Mill 450 milling center, presents the application of the analytical model for defining the stability chart, as well as its experimental verification

**Keywords:** self-excited vibrations; frequency response function; stability lobe diagram



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

### 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## UTVRĐIVANJE VREDNOSTI OPTIMALNIH PARAMETARA POSTPROCESIRANJA U PROCESIMA VEZIVNE 3D ŠTAMPE

Dejan MOVRIN<sup>1\*</sup>, Ognjan LUŽANIN<sup>1</sup>, Mladomir MILUTINOVIĆ<sup>1</sup>, Saša RANĐELOVIĆ<sup>2</sup>, Dragiša VILOTIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Srbija, movrin@uns.ac.rs, luzanin@uns.ac.rs,  
mladomil@uns.ac.rs, vilotic@uns.ac.rs

<sup>2</sup> Univerzitet u Nišu, Mašinski fakultet u Nišu, Srbija, sassa@masfak.ni.ac.rs

**Apstrakt:** Vezivna 3D štampa predstavlja jedan od prvih i najrasprostranjenijih aditivnih postupaka. Problematika ovog postupka jeste postprocesiranje, a koje se vrši u cilju postizanja zahtevanih karakteristika izrađenih delova. Kako bi se postprocesiranje sprovedlo na najbolji mogući način potrebno je detektovati najvažnije parametre postprocesiranja kao i njihove optimalne vrednosti.

U radu je prikazano eksperimentalno određivanje vrednosti parametara postprocesiranja: vremena sušenja modela, vremena infiltracije i temperatura predgrevanja zelenog dela. Takođe, dat je i predlog optimalnih vrednosti navedenih parametara radi postizanja najboljih mehaničkih karakteristika izrađenih delova.

**Ključne reči:** Vezivna 3D štampa, postprocesiranje, parametri postprocesiranja.

### 1. UVOD

Vezivna 3D štampa (3DP) prestavlja jedan od prvih procesa brze izrade prototipa, a razvijen je na *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) 1989. Veoma je sličan sa klasičnom ink-jet štampom na papiru, pa se vrlo često u literaturi može pronaći i naziv ink-jet 3D štampa. Razlika u odnosu na klasičnu ink-jet štampu je ta što se umesto mastila kroz glavu štampača izbacuje vezivno sredstvo (*en. binder*) koje se deponuje na praškastu osnovu. Praškasta osnova se zajedno sa radnim stolom spušta za deblijinu sloja kreirajući 3D model [1].

U početku svog razvoja postupak se koristio samo za izradu prototipova, odnosno, tzv. „proof of concept“. Sa daljim razvojem materijala i uređaja, koji traje i danas, delovi dobijeni na ovaj način se koriste do nivoa finalnog proizvoda.

Glavna problematika pri izradi delova 3DP tehnologijom predstavlja postizanje visokih mehaničkih osobina izrađenih delova, njihove tačnosti kao i kvaliteta finalne površine. Kako bi se obezbedio najbolji kvalitet delova potrebno je pravilno postaviti čitav niz parametara, počevši od pripreme računarskog 3D modela, preko podešavanja parametara uređaja, pa do odabira najboljih parametara postprocesiranja. Kroz rad će biti prikazan izbor optimalnih vrednosti za tri parametra postprocesiranja koja mogu u velikoj meri uticati na navedene karakteristike izrađenih delova.

Sam pojam postprocesiranja predstavlja niz koraka za postizanje traženih karakteristika delova nakon procesa štampe. Delovi su nakon štampe vrlo porozni, imaju veoma niske mehaničke karakteristike i nazivaju se zeleni delovi (*en. Green parts*). Kako bi se postigle

upotrebne karakteristike najčešće se pristupa procesu uranjanja zelenih delova u tečna jedinjenja, tzv. infiltraciji.

Jedan od vrlo bitnih parametara jeste pravilan izbor infiltranta u zavisnosti od zahtevanih karakteristika delova. Najbolji izbor za postizanje visokih mehaničkih karakteristika delova predstavljaju Epoksidni infiltranti, što je kroz istraživanja raznih autora i prikazano [2, 3, 4, 5].

Sva ispitivanja prikazana u ovom radu se odnose na definisanje parametra postprocesiranja za primenu komercijalnog dvokomponentnog infiltranta S5000, proizvođača Samson Kamnik (Slovenija). Osnova navedenog epoksidnog infiltranta je bisfenol A.

Tri ključna parametra, bitna za pravilno izvođenje procesa postprocesiranja navedenim eposkidnim infiltrantom, su: vreme sušenja delova nakon štampe, vreme infiltracije i temepraturni parametri [4].

Uticajem temperature epruveta na dve vrste epoksidne smole (S5000 epoxy - Kamnik, Slovenia i epoxy - R&G, Germany) bavili su se Lužanin i ostali [6]. Kroz istraživanja autori su pokazali da se sa povećanjem temperature epruveta (predgrevanjem) mogu dobiti bolje mehaničke karakteristike delova u slučaju infiltracije korišćenjem dva epoksidna infiltrana različitih proizvođača. Povećanje je izraženije kod epoksidnog infiltranta S5000 koja ima višu preporučenu temperaturu predgrevanja ( $40-60^{\circ}\text{C}$ ) nego epoksidni infiltrant za rad na hladno R&G.

Kod epoksidnih infiltranata koji zahtevaju zagrevanje, što je slučaj sa infiltrantom S5000, duže vreme infiltracije smanjuje temperaturu infiltranta, povećavajući njegov koeficijent viskoznosti, čime se smanjuje njegova mogućnost prodiranja u osnovu (zeleni deo). Zbog toga je vreme infiltracije jedan od ključnih parametara za kvalitet infiltracije. Kao polazna osnova za određivanje vremena infiltracije korišćeni su literaturni izvori [7, 8] gde je prikazana dubina infiltracije za različite vrste infiltranata pri različitim vremenima (od 10 do 300 sekundi). Mogućnost ispitivanja dubine prodiranja infiltranta u model

korišćenjem CT uređaja, tj. bez fizičkog razaranja modela prikazano je u radu [9]. Različita vrednost Hounsfield-ovog broja za infiltriranu i neinfiltriranu zapreminu omogućila je jasno vidljivu granicu ove dve zapremine kao i mogućnost merenja dubine pomoću specijalizovanih softvera. Nedostatak ovog postupka ogleda se u ceni i dostupnosti korišćene opreme tj. CT uređaja.

Eksperimentalno određivanje optimuma za svaki od navedenih parametra biće prikazano u nastavku rada.

## 2. EKSPERIMENTALNA ISTRAŽIVANJA

### 2.1 Izrada epruveta

Epruvete korišćene u eksperimentalnim istraživanjima su izrađene od komercijalno dostupnog kompozitnog materijala na bazi gipsa proizvođača 3D Systems (Z Corporation), proizvođačke oznake ZP 131. Kao vezivno sredstvo korišćena je formulacija na bazi vode oznake zb60 istog proizvođača.

Za izradu epruveta korišćen je uređaj za vezivnu 3D štampu američkog proizvođača 3D Systems, oznake Z310 plus i prikazan je na slici 1. Sve epruvete su izrađene sa debljinom sloja 0.1mm i stepenom zasićenja vezivnim sredstvom od 100% po čitavoj zapremini.



Slika 1. Uređaj za vezivnu 3D štampu Z310 plus

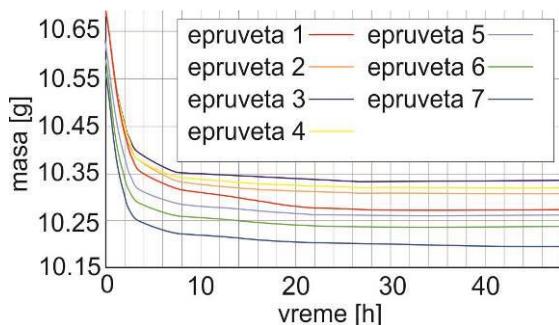
## 2.2 Vreme sušenja epruveta nakon izrade

Veživno sredstvo koje se koristi u procesu veživne 3D štampe predstavlja tečni rastvor na vodenoj bazi, pa stoga infiltraciji mora da prethodi sušenje izrađenih delova kako bi se eliminisala zaostala vлага. Sa jedne strane sušenje je potrebno kako bi deo imao dovoljno dobre mehaničke karakteristike za uspešno obavljanje procesa infiltracije bez oštećenja modela, dok se sa druge strane sprečava se pojava zarobljenih gasnih mehurova usled isparavanja zaostale vlage. Zaostali gasni mehurovi nakon infiltracije predstavljaju svojevrsni koncentrator napona, što dovodi do slabljenja izrađenih delova. Sušenje delova se može obaviti na sobnoj temperaturi ili zagrevanjem u peći.

Za sušenje na sobnoj temperaturi potrebno je duže vreme i nemoguće je potpuno eliminisati zaostalu vlagu, zbog vlažnosti okolnog vazduha. Prednost ovog načina sušenja jeste izbegavanje dodatne opreme kao što su peći, sušare, itd.

Za potpuno sušenje modela najčešće se koriste peći ili sušare, i u tom slučaju je prisustvo zaostale vlage je svedeno na minimum. Međutim, nedostatak ovog načina sušenja je potreba za velikim radnim prostorom peći u slučaju velikih delova, kao i mogućnosti deformisanja tankih zidova delova usled neravnomernog sušenja.

U cilju utvrđivanja vremena koje je potrebno za sušenje epruveta na sobnoj temperaturi, praćena je promena mase tokom vremenskog intervala od 48h na uzorku od 7 epruveta izrađenih po standardu ASTM D 638 - 02a [10]. Promena mase tokom posmatranog perioda prikazana je dijagramski na slici 2.



Slika 2. Dijagram smanjenja mase epruveta tokom vremena

Uvidom u dijagram promene mase (Sl. 2) može se zaključiti da nakon 24h dolazi do stabilizacije mase epruveta. U toku nastavka sušenja na sobnoj temperaturi ( $22\pm1^{\circ}\text{C}$ ), beleže se male promene mase, ispod 0.01%. Na osnovu ovako dobijenih rezultata, razumno je koristiti vremenski interval sušenja epruveta od 24h, a nakon toga se može pristupiti infiltraciji.

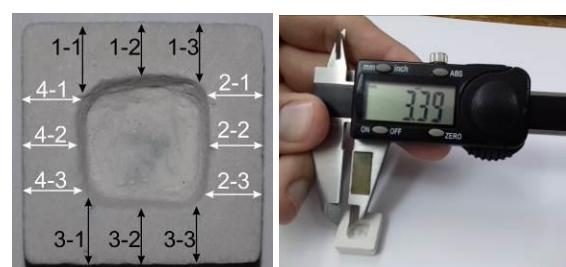
## 2.3 Vreme infiltracije

Uvidom u literaturne izvore [7, 8] izabran je vremenski parametar infiltracije na osnovu istraživanja drugih autora. Minimalno vreme zadržavanja test uzorka u infiltrantu iznosilo je 60 sekundi, dok je maksimalno iznosilo 300 sekundi. Posmatrani priraštaj vremena je iznosio 60 sekundi.

Eksperiment utvrđivanja potrebnog vremena infiltracije izvršen je na pet uzoraka oblika kocke, stranice 15mm.

Nakon sušenja od 24h, test kocke su pojedinačno infiltrirane, tako što su celom zapreminom uronjene u posudu sa epoksidnim infiltrantom.

Nakon infiltracije i sušenja test kocke su isečene brusnim kamenom, kako bi bila određena tačna dubina infiltracije za svaki vremenski parametar. Nakon sečenja odvojena je infiltrirana od neinfiltrirane zapremina i izmerene su dubine prodiranja infiltranta na 12 mernih mesta (Sl. 3, uzorak levo) i kao relevantna vrednost uzeta je aritmetička sredina vrednosti dubine svih dvanaest mernih mesta. Razdvajanje zapremina je izvršeno uranjanjem isečenih uzoraka u vodu radi rastvaranja neinfiltrirane zapremine i njenog lakog uklanjanja. Za merenje dubine infiltracije korišćeno je digitalno kljunasto pomicno merilo tačnosti 0.01mm (Sl. 3 desno).



Slika 3. Određivanje dubine infiltracije

Prosečna vrednost dubine prodiranja infiltranta za pripadajuće vreme infiltracije, prikazane su u tabeli 1.

**Tabela 1.** Prosečne vrednosti izmerenih dubina infiltracije na obeleženim presecima

R.Br.	Vreme infiltracije [s]	Avg. [mm]
1	60	3.79
2	120	4.25
3	180	4.98
4	240	5.00
5	300	5.02

Rezultati merenja pokazuju da nakon vremena od 180 sekundi dubina infiltracije dalje raste samo neznatno (oko 0.04mm), pa se ovo vreme može usvojiti kao maksimalna vremenska dužina infiltracije.

#### 2.4 Temperatura predgrevanja radnog predmeta

Za izabrani dvokomponentni epoksidni infiltrant S5000 preporuka proizvođača je da se obe komponente pre mešanja predgreju na temperaturu  $40\text{-}70^{\circ}\text{C}$  [11]. Međutim, DSC (Diferencijalna skenirajuća kalorimetrija) analizom, prikazanom u radu [4], utvrđeno je da je temperatura stakljenja za korišćeni epoksidni infiltrant  $83.1^{\circ}\text{C}$ , pa je na osnovu te vrednosti usvojena temperatura predgrevanja od  $80^{\circ}\text{C}$ .

Predgrevanje radnog predmeta (u ovom slučaju epruveta) na temperaturu infiltranta takođe može doprineti sprečavanju pothlađenja epoksidnog infiltranta i prevremenno povećanje njegove viskoznosti, što dovodi do porasta mehaničkih osobina dobijenih delova. Ova problematika je detaljno opisana u istraživanju koja su sproveli Lužanin i ostali [6].

U prikazanom eksperimentu uticaj temperature delova na zateznu čvrstoću je ispitana za dve različite temperature delova: (i) sobnu temperaturu  $\approx 20^{\circ}\text{C}$ , i (ii) temperaturu predgrevanja epoksidnog infiltranta ( $80^{\circ}\text{C}$ ).

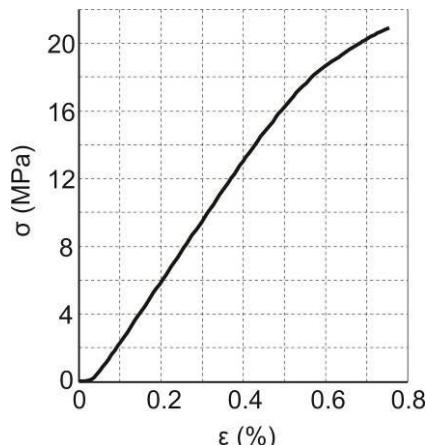
Ispitivanja su izvršena na epruvetama izrađenim po ASTM D 638 - 02a [10] prema preporučenim optimalnim parametrima iz prethodno prikazanih eksperimenata.

Infiltracija epruveta je izvršena u grupama od po tri istovremeno, koje su uronjene u posudu sa infiltrantom. Ukupno je infiltrirano po 6 epruveta za svaku temperaturu predgrevanja. Epruvete i infiltrant su predgrevani zajedno u peći, dok je temperatura praćena preko termoparova postavljenih u unutrašnjost peći i u svaku komponentu infiltranta. Nakon infiltracije i sušenja od 48h izvršeno je ispitivanje zatezne čvrstoće i rezultati su prikazani u tabeli 2.

**Tabela 2.** Prosečne vrednosti izmerenih dubina infiltracije na obeleženim presecima

20 $^{\circ}\text{C}$		80 $^{\circ}\text{C}$	
R.Br.	R <sub>m</sub> [MPa]	R.Br.	R <sub>m</sub> [MPa]
1	17.78	1	20.84
2	18.61	2	20.82
3	19.17	3	20.74
4	18.40	4	21.67
5	16.35	5	20.62
6	17.23	6	20.17
<b>Avg.</b>	<b>17.92</b>		<b>20.98</b>

S obzirom da su vrednosti zatezanja bliske, na slici 4 je prikazan primer dijagrama zatezanja za jednu od epruveta, gde je uočljiva kriva karakteristična za krti lom.



**Slika 4.** Dijagram napon-deformacija

Uvidom u prosečnu vrednost zatezne čvrstoće (Tabl. 2) može se uočiti povećanje njene vrednosti sa  $\approx 18 \text{ MPa}$  na  $\approx 21 \text{ MPa}$  što predstavlja uvećanje od oko 16.6%. U slučajevima kada se radi o funkcionalnim delovim, ovo uvećanje predstavlja značajnu korist, a pri tome ne postoji potreba za korišćenje specijalne opreme.

### 3. ZAKLJUČAK

Pri korišćenju vezivne 3D štampe potrebno je voditi računa o čitavom nizu parametara koji imaju za cilj dobijanje dela najboljih mehaničkih karakteristika. Kroz rad je prikazano određivanje vrednosti za tri parametra postprocesiranja: vreme sušenja zelenog dela, vreme infiltracije i temperatura predgrevanja zelenog dela. Kroz eksperimentalna istraživanja su utvrđene optimalne vrednosti za navedena tri parametra i to:

- i Pri sušenju tanjih zelenih delova (u prikazanom eksperimentu debljine 3.2mm), potrebno vreme sušenja iznosi 24 časa;
- ii Vreme infiltracije potrebno za maksimalno prodiranje infiltranta u zapreminu radnog dela iznosi 180s, nakon čega dolazi do neznatne promene dubine;
- iii Predgrevanjem zelenih delova na temperaturu predgrevanja komponenti infiltranta (pre infiltracije) povećava se zatezna čvrstoća delova za 16.6%.

Osim prethodno ispitanih, na vrednosti mehaničkih karakteristika utiče još čitav niz parametara koji moraju takođe biti definisani, a to su: stepen zasićenja vezivnim sredstvom, orijentacija predmeta u radnom prostoru štampača, odnos mešanja komponenti epoksdnog infiltranta itd. Dalja istraživanja je potrebno fokusirati na uvođenje novih parametara u proces postporcesiranja, kao što su degasifikacija infiltranta nakon mešanja komponenti, pritisak infiltracije, način nanošenja infiltranta, itd. Na taj način se može dodatno uticati na povećanje mehaničkih karakteristika delova i njihov kvalitet.

### LITERATURA

- [1] I. Gibson, D.W. Rosen, B. Stucker: *Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, Springer, 2010.
- [2] T. Galeta, G. Šimunović, M. Mazurek: Impact of strengthening fluids on roughness of 3d printed models, *Metalurgy*, Vol. 54, No. 1, pp. 231–234, 2015.
- [3] T. Galeta, I. Kladarić, M. Karakašić: Influence of Processing Factors on Tensile Strength of 3D Printed Models, *Materials and Technology*, Vol. 47, No. 6, pp. 149–156, 2011.
- [4] D. Movrin: *Optimizacija parametara postprocesiranja u tehnologiji vezivne 3D štampe*, doktorska disertacija, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2017.
- [5] J. Kotlinski: Mechanical properties of commercial rapid prototyping materials, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 20, No. 6, pp. 499–510, 2014.
- [6] O. Lužanin, D. Movrin, M. Plančak, M. Toth-Tascau: Using factorial design to assess the influence of epoxy brand and preheating on the tensile strength of 3D printed specimens, *Machine and industrial Design in Mechanical Engineering - KOD*, 24-26.05.2012, Balatonfured, Hungary, pp. 431-434.
- [7] D. Impens: *An Experimental Approach to Assess the Impact of Post Processing Variables on the Mechanical Characteristics of 3D Printed (Powder Binding Process) parts*, Master thesis, University of Windsor, Ontario, Canada, 2015.
- [8] M.M. Zardawi Faraedon: *Characterisation of Implant Supported Soft Tissue Prostheses Produced with 3D Colour Printing*, PhD thesis, The University of Sheffield, 2012.
- [9] D. Movrin, A. Spasić, A. Ivanišević, I. Kačmarčík, V. Vučaj-Ćirilović, P. Skakun, M. Milutinović: Determination of infiltration depth in 3D printing technology by using CT technique, *International Scientific Conference, Flexible Technologies - MMA*, 25-26.09.2015, Andrevlje, Serbia, pp. 231-234.
- [10] ASTM D638-10, *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. ASTM International, West Conshohocken, PA, doi: 10.1520/D0638-10, 2010.
- [11] [http://www.samsonkamnik.si/s5000\\_1230g](http://www.samsonkamnik.si/s5000_1230g) accessed : 04.09.2018.

# **DETERMINATION OF OPTIMAL POSTPROCESSING PARAMETERS VALUES IN BINDER JETTING PROCESSES**

**Abstract:** Binder jetting process is one of the first and the most widespread additive technology. The main problem of this process is postprocessing, which should be done in order to achieve of required mechanical properties of the final parts. For the implementation of postprocessing in the best possible way, it is necessary to detect the most important parameters of postprocessing as well as their optimal values.

In this paper are shown experimental determinations of values of postprocessing parameters: models (parts) drying time, infiltration time and preheating temperature of the green part. Also, the proposal of the optimal values of the mentioned parameters is given, in order to achieve the best mechanical characteristics of the produced parts.

**Keywords:** Binder jetting, postprocessing, postprocessing parameters.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## CUTTING SPEED AND LASER POWER INFLUENCE ON MACINED SURFACE ROUGHNESS AND DEPTH OF THE LASER MILLING

Bogdan NEDIĆ<sup>1</sup>, Jelena BARALIĆ<sup>2\*</sup>, Stefan ĐURIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, Srbija, [nedic@kg.ac.rs](mailto:nedic@kg.ac.rs), [stefandjuric992@gmail.com](mailto:stefandjuric992@gmail.com)

<sup>2</sup>Fakultet tehničkih nauka, Čačak, Srbija, [jelena.baralic@ftn.kg.ac.rs](mailto:jelena.baralic@ftn.kg.ac.rs)

\*Corresponding author: [jelena.baralic@ftn.kg.ac.rs](mailto:jelena.baralic@ftn.kg.ac.rs)

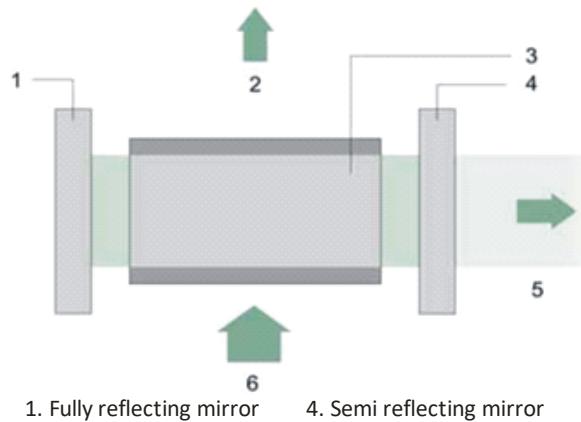
**Abstract:** Laser beam machining (LBM) is one of the most used nonconventional machining processes based on the use of thermal energy. It can be applied to almost a whole range of materials. The laser beam has a very high energy density. Therefore, laser treatment is based on melting and evaporation of processed material. It is very suitable for making plates of complex contour and for making small holes in sheet materials. More recently, it is increasingly used to engrave complex contours on different materials. This paper presents the results of research on the possibility of laser plexiglass milling. The influence of the cutting speed of and laser power on the roughness and depth of the engraving was analyzed.

**Key words:** laser beam machining, laser milling, engraving, surface roughness.

### 1. INTRODUCTION

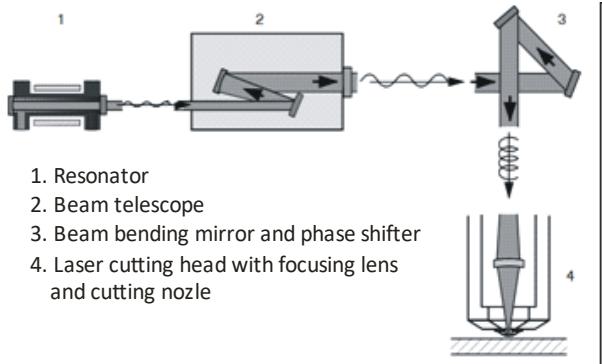
Laser is the abbreviation of light amplification by stimulated emission of radiation. A highly collimated, monochromatic and coherent light beam is generated and focused to a small spot [1]. In this way, a very high energy density is achieved ( $10^6 \text{ W/mm}^2$ ). Laser beam machining is based on the application of highly concentrated light energy, obtained by stimulated radiation, for machining the material by melting and evaporation. Laser (Light Amplifier by Stimulated Emission of Radiation), is a light stimulator with stimulated radiation [2].

All laser beams occur as per the same physical principle. Therefore, the same functional components are located in all the beam sources [3]. Figure 1 shows a laser with its basic components.



**Figure 1.** Laser with its basic components [3]

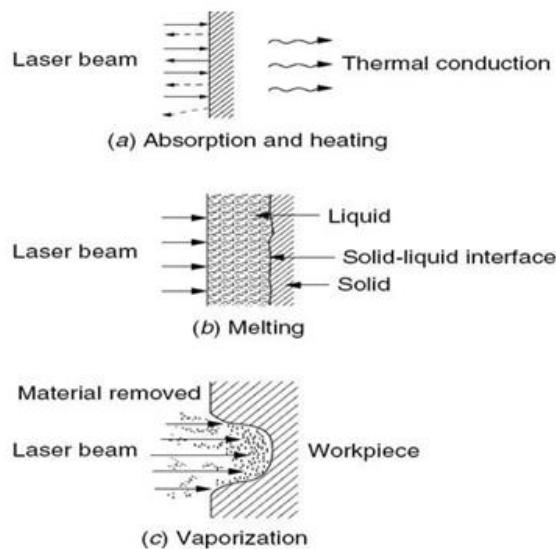
Laser beam, using a system of mirrors, is guided to the laser head. Then, using the lens, it is focused on the little spot on the surface of the workpiece, figure 2.



**Figure 2.** Laser beam guideway [3]

## 2. MATERIAL REMOVAL MECHANISM

During laser beam machining, a part of the laser beam is reflected from the surface of the workpiece. The remaining part of the laser beam energy is absorbed, and in this way the workpiece material is heated. When the material is sufficiently warm, it starts melting and evaporation occurs, Fig. 3.



**Figure 3.** Physical processes occurring during laser beam machining [1]

The type of machined material and its characteristics affect the material removal rate. Reflectivity depends on the wavelength of the laser beam, the type of machined material, the machined material surface finish, the degree of oxidation and temperature. The greater the reflectivity, the smaller the material removal rate and vice versa. Reflectivity can be greatly reduced by modifying the machined material surface finish, which leads to improved

workability. Absorbed energy leads to the heating of the machined material, its melting and evaporation. For melting plastic, less energy is needed than melting metal. Most non-metals have low thermal conductivity and absorb CO<sub>2</sub> laser, wavelengths of 10.6 μm. Because of that, low-power lasers are used for machining of plastic. As plastics have less reflectivity and thermal conductivity, machining is performed at higher speeds compared to metals.

## 3. LASER MILLING

Laser milling and laser micro cutting have a significant application in the creation of various 2D figures as well as channels, pockets and other shapes. By applying the appropriate laser machining methods, 3D shapes with exceptional dimensional control can be made. In the case of laser milling of small depths, it is possible to achieve extremely low roughness values of the machined surface. Laser milling can be applied to a wide range of materials. It is often used for making molds, lubrication channels, microfluidic and biomedical devices, injection, punching and machining tools. With a precise control of machining depth, laser milling can be applied in layers, multiple machining passages, to create deeper shapes. These layers can be of the same size, to create perpendicular walls, or reduced to create a stepped or even profiled wall.

In 1990, Hsu and Copley investigated CO<sub>2</sub> laser milling [4]. The material of the workpiece was graphite. They machined workpiece by removing multiple layers. The goal was to reach the perpendicular walls of the engraving. In 1997, Todd and Copley developed a prototype of five-axis laser engraving machine for machining ceramic materials [5].

## 4. EXPERIMENTAL RESEARCH

Today, laser milling is mainly performed in one passage of the laser cutting head, or it is used for engraving of the low depth contours. There is very little research which deals with the laser machining parameters influence on the depth of machined contour and roughness

of the surface machined with a laser milling. The aim of this study was to investigate the influence of cutting speed, laser power and radial step between two cutting laser head passes, on the depth of contour machined with laser milling and roughness of the surface machined with the laser milling.

Experiments were performed on Laser Cut-1208 Laser CNC Machine, Fig 4, a laser engraving machine. It is primarily intended for engraving and cutting of sheet materials. The maximum laser power for this machine is 80W.



**Figure 4.** CNC laser machine LaserCut-1208 [6]

The squares, 10x10 mm, were machined in 8mm thick PLEXIGLASS, with laser milling. In the first part of the experiment, for each machined square, cutting speed and laser beam power were varied. The squares were made with several passes of the laser head. The radial step  $s$  between two passages of the laser head was constant and it was 0.1 mm. The appearance of the machined samples is given in Table 1.

## 5. THE RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH

The roughness of the machined surface, ie the parameter Ra, was measured on the machined surface of the samples. The depth of the contour machined with laser milling - engraving, h, was also measured. Ra was measured in several places, transverse with respect to the movement of the laser head. The mean values of measured values are shown in Table 2. The depth of the laser milling was measured by a coordinate

measuring machine with a measuring tap, also in several places. The table shows the mean depth of gravity.

**Table 1.** Samples machined with laser milling

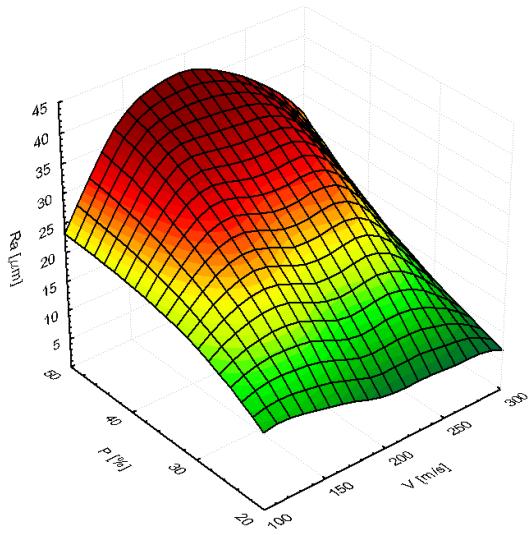
P[%]	20	30	40	50	
V[m/s]	100	150	200	250	300
100					
150					
200					
250					
300					

**Table 2.** Mean values of surface roughness-Ra and depth of engraving-h

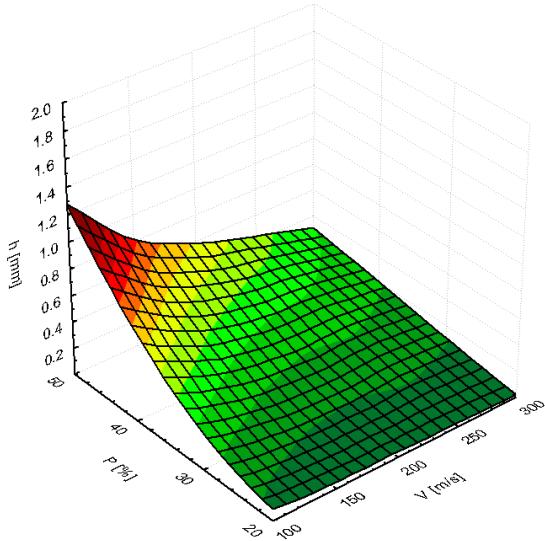
V, m/s	P, %	Ra, $\mu\text{m}$	h, mm
100	20	12.4	0.096
	30	23.8	0.247
	40	17.8	0.685
	50	24.3	1.289
150	20	11.3	0.071
	30	24.7	0.147
	40	36.2	0.433
	50	39.8	0.782
200	20	8.8	0.54
	30	18.3	0.137
	40	34.2	0.286
	50	42.8	0.585
250	20	8.6	0.035
	30	19.4	0.141
	40	37.6	0.3
	50	35.4	0.434
300	20	7.2	0.023
	30	13.3	0.074
	40	14.4	0.242
	50	28	0.291

Figures 5 and 6 show the influence of the cutting speed and the laser power on the machined surface roughness - Ra and the

depth of laser milling - h. The diagrams were based on the results given in Table 2.



**Figure 5.** The cutting speed and the laser power influence on the machined surface roughness



**Figure 6.** The cutting speed and the laser power influence on the depth of the engraving

Based on the measured values for machined surface roughness - Ra and the depth of the laser milling - h, the following expressions were obtained:

$$Ra = 0.417 \cdot V^{-0.014} \cdot p^{1.222}, \quad (1)$$

and

$$h = 0.0071 \cdot V^{-1.168} \cdot p^{2.866}. \quad (2)$$

The dependence of the machined surface roughness - Ra on the cutting speed and the laser power has a correlation coefficient of 0.809, while the dependence of the depth of the gravure - h on the cutting speed and the

laser power has a coefficient of correlation of 0.995.

In the second part of the experiment, the squares were made at constant cutting speed  $V=300$  m/s. The radial step  $s$ , between two passages of the laser head, and laser power were varied. The mean values of measured values of surface roughness - Ra and depth of laser milling - h, depending on the radial step are shown in Table 3.

**Table 3.** Mean values of surface roughness-Ra and depth of engraving-h, depending on the radial step

$s, \text{mm}$	$P, \%$	$Ra, \mu\text{m}$	$h, \text{mm}$
0.02	20	18.4	0.59
	30	8.9	1.453
	40	/	4.109
	50	/	5.977
0.05	20	16.6	0.257
	30	22.2	0.621
	40	4.6	1.8
	50	5.23	2.612
0.1	20	12.4	0.096
	30	23.8	0.247
	40	17.8	0.685
	50	24.3	1.289
0.2	20	9.5	0.022
	30	30.6	0.035
	40	28.13	0.244
	50	23.56	0.482

Figures 7 and 8 show the influence of the radial step and the laser power on the machined surface roughness - Ra and the depth of engraving - h. The diagrams were based on the results shown in the Table 3.

Based on the measured values for machined surface roughness - Ra and the depth of the engraving - h, the following expressions were obtained:

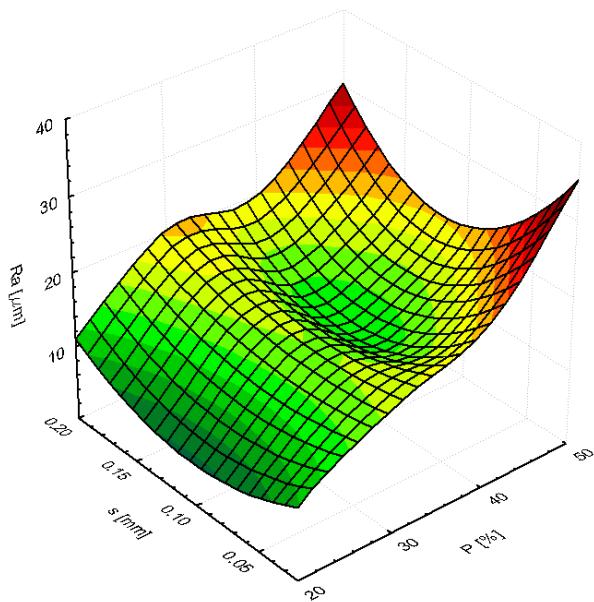
$$Ra = 0.168 \cdot p^{1.235} \cdot s^{-0.095}, \quad (3)$$

and

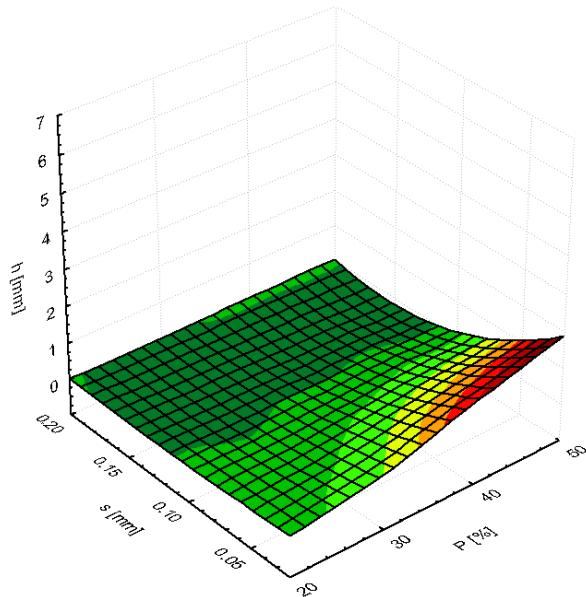
$$h = 0.296 \cdot 10^{-5} \cdot p^{2.453} \cdot s^{-1.12}. \quad (4)$$

The dependence of the machined surface roughness - Ra on the radial step and the laser power has a correlation coefficient of 0.745, while the dependence of the depth of the

gravure - h on the cutting speed and the laser power has a coefficient of correlation of 0.991.



**Figure 7.** The radial step and the laser power influence on the machined surface roughness



**Figure 8.** The radial step and the laser power influence on the depth of the engraving

## 6. CONCLUSION

The paper presents the results of the study of impact of cutting speed and laser power on the roughness of the surface machined with laser milling and the depth of the engraving. Based on the diagrams, shown in Figures 5 and 6, it can be concluded that the cutting speed and laser power influence the roughness of the machined surface, that is, the parameter

Ra and the depth of the engraving, h. As the laser power increases, the roughness of the machined surface increases. Increase of the cutting speed, leads to an increase in the roughness of the machined surface only up to a cutting speed of about 200 m/s. Further increase in the cutting speed results in a reduction of machined surface roughness. This phenomenon is more pronounced while machining with higher laser power.

Figure 6 shows the cutting speed and the laser power influence on the depth of the engraving. It can be concluded that while processing with higher laser power, a greater depth of engraving is achieved. When processing with higher cutting speeds, the depth of engraving is lower. This phenomenon is more pronounced in processing with higher laser power. This can be explained by the fact that in the case of machining with lower cutting speeds and higher power of the laser, the amount of energy delivered to the unit of volume of the machined material is much higher than in the case of machining with high cutting speeds and a low values of the laser power.

The roughness of the machined surface and depth of the engraving are described by the formulas (1) and (2). Dependence of the depth of the engraving, from the cutting speed and laser power, has a very high correlation coefficient, which means that it describes well the dependence. The dependence of the roughness of the machined surface, on the cutting speed and the laser power, has to be investigated in more details.

Figures 7 and 8 show influence of laser power and radial step on the roughness of the machined surface, that is, the parameter Ra and the depth of the engraving, h. From the Figure 7, it can be concluded that that the minimum values of machined surface roughness are for the values of the radial step that are around 0,1 mm. Increase in laser power, leads to increase in machined surface roughness.

From Fig. 8 it can be concluded that the radial step has no significant effect on the depth of the engraving. Also, it can be

concluded that while processing with higher laser power, a greater depth of engraving is achieved. The greatest influence on the depth of engraving, has the laser power. This fact is confirmed by the Formula 4, which has a very high correlation coefficient.

The influence of the radial step on the machined surface roughness, has to be investigated in more details.

## ACKNOWLEDGEMENT

This paper is part of project TR35034 The research of modern non-conventional technologies application in manufacturing companies with the aim of increase efficiency of use, product quality, reduce of costs and save energy and materials, funded by the Ministry of Education and Science of Republic of Serbia.

## LITERATURE

- [1] H. El-Hofy: *Advanced Machining Processes- Nontraditional and Hybrid Machining*, Hassan McGraw-Hill, New York, 2005.
- [2] D. Lazarević, M. Radovanović: Nekonvencionalne metode - Obrada metala odnošenjem, Mašinski fakultet Niš, Niš, 1994.
- [3] Library laser CO<sub>2</sub>, available at:  
[http://www.iconmachinetool.com/education/Library\\_Laser\\_CO2\\_Laser.pdf](http://www.iconmachinetool.com/education/Library_Laser_CO2_Laser.pdf), accessed 08.09.2018.
- [4] R.K. Hsu, S.M. Copley: Producing 3D shapes by laser milling, Journal of Egineering for Industry, Vol. 112, pp 375-379, 1990.
- [5] Todd J.A., Copley S.M., „ Development of a Prototype Laser Processing System for Shaping Advanced Ceramic Materials“, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 119, pp 55-67, 1997.
- [6] *LaserCut-1208* - Machine documentation
- [7] How CO<sub>2</sub> fiber laser cutting machine work, available at:  
<https://www.steeltailor.com/blog/how-co2-and-fiber-laser-cutting-machine-work/>, accessed 08.09.2018.
- [8] The burr free laser cutting, available at:  
<https://www.thefabricator.com/article/laser-cutting/back-to-basics-the-subtle-science-of-burr-free-laser-cutting>, accessed 03.09.2018.
- [9] Laser machinery, available at:  
[https://www.2laser.com/laser\\_machinery\\_owner\\_faq](https://www.2laser.com/laser_machinery_owner_faq), accessed 12.09.2018.
- [10] A.K.Dubey, V.Yadava, Laser beam machining – A review, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol. 48, pp 609-628, 2008.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

### 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## STATISTIČKA ANALIZA U UPRAVLJANJU KVALITETOM PROIZVODNOG PROCESA, SA ASPEKTA UTICAJA BROJA ZAPOSLENIH NA EFEKTIVNOST PROIZVODNOG PROCESA

Lazar OCOKOLJIĆ<sup>1</sup>, Fatima ŽIVIĆ<sup>1</sup>, Nenad GRUJOVIĆ<sup>1</sup>, Bogdan VASILJEVIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Srbija, [lazar\\_ocokoljic@live.se](mailto:lazar_ocokoljic@live.se),  
[zivic@kg.ac.rs](mailto:zivic@kg.ac.rs), [gruja@kg.ac.rs](mailto:gruja@kg.ac.rs), [boban.ab1@gmail.com](mailto:boban.ab1@gmail.com)

\*Corresponding author: Lazar OCOKOLJIĆ, [lazar\\_ocokoljic@live.se](mailto:lazar_ocokoljic@live.se)

**Apstrakt:** Cilj ovog rada je utvrđivanje i ispitivanje faktora koji utiču na produktivnost proizvodnih preduzeća u opštini Kragujevac i uticaj broja zaposlenih na performanse organizacije. Analizirani su podaci dobijeni od Agencije za privredne registre Republike Srbije za 80 proizvodnih preduzeća na teritoriji grada Kragujevca upotrebom jednofaktorske analize varijanse. Preduzeća su podeljena u 3 grupe prema odnosu broja zaposlenih u 2017. i 2016. godini, a kao zavisna varijabla izabrana je odnos prihoda preduzeća u 2017. i 2016. godini. Zaključak istraživanja je da postoji značajne statističke razlike među grupama, odnosno da promena broja zaposlenih direktno utiče na promenu poslovnog prihoda, a time i na efektivnost proizvodnog procesa.

**Ključne reči:** Proizvodni proces, analiza, kvalitet, produktivnost, ljudski resursi, proizvodna preduzeća.

### 1. UVOD

Osnova proizvodnje je proizvodni proces, koji podrazumeva sve aktivnosti i delovanja koje ulazne sirovine vrednosti (input) pretvaraju u finalne proizvode (output) [1]. Ukupna efektivnost proizvodnog procesa definiše se kao sposobnost poduzeća da proizvede što veću količinu proizvoda, odnosno predstavlja uspešnost samog proizvodnog procesa. Povećanje efektivnosti proizvodnog procesa uključuje analizu inputa proizvodnje (oprema, materijal, ljudi i metode) i na taj način se identificuju negativni i pozitivni faktori koji se dalje elemenšu odnosno unapređuju [2]. Studije su pokazale da ljudski faktor značajno utiče na kvalitet porizvodnog procesa i samu produktivnost [3]. Sektor ljudskih resursa je opisan kao najsloženiji i

najosetljiviji sistem unutar organizacije, koji ima direkstan uticaj na efikasnost proizvodnje [4]. Analiza varijanse (ANOVA) je jedna od najčešće korišćenih parametriskih statističkih metoda i se koristi za utvrđivanje statistički značajnih razlika između dve ili više prethodno definisane grupe (nezavisna varijabla) na određenoj zavisnoj varijabli, koristeći F-distribuciju. Anova ispituje veličinu varijabilnosti u zavisnoj varijabli i nalazi šta može biti uzrok tom varijabilitetu [5].

### 2. UTICAJ BROJA ZAPOSLENIH NA EFEKTIVNOST PROIZVODNOG PROCESA U PREDUZEĆIMA PRERAĐIVAČKOG SEKTORA U OPŠTINI KRAGUJEVAC

Za potrebe istraživanja prikupljeni su podaci o preduzećima, dobijeni od Agencije za

privredne registre (APR). Prilikom upita prosleđenom APR-u 23.02.2018. godine kriterijumi za pretragu registra su bili sledeći:

- Teritorijalni nivo: Opština Kragujevac
- Status društva: Aktivno
- Pravna forma: DOO, AD, OD, KD, JP, ogrank stranog privrednog društva i predstavništvo stranog privrednog društva
- Delatnost: Sektor C – Prerađivačka industrija
- Veličina privrednog drušva: mikro, mala, srednja i velika preduzeća
- Osnivač: pravno i fizičko lice
- Datum osnivanja: pre 01.01.2013.
- Broj zaposlenih: više od 10 zaposlenih

Iz pretrage su izdvojena preduzeća koja imaju manje od 11 zaposlenih iz razloga što je fokus ovog istraživanja na malim i srednjim preduzećima (MSP) i velikim preduzećima kao najznačajnije sektore privrede Srbije. Pritom su u pretragu uvrštena preduzeća koja spadaju u mikro, ali imaju jedan od dva neophodna uslova da pripadnu grupi malih preduzeća, a to je broj zaposlenih koji je veći od 10. Takođe, iz pretrage su izdvojena preduzeća koja su osnovana od početka 2013. godine do danas, kako bi u istraživanju učesvovala isključivo stabilna preduzeća koja su prošla početnu fazu razvoja preduzeća.

Podela preduzeća po veličini je utvrđena na osnovu tri kriterijuma koja se mogu pronaći u izveštaju o završnom računu, bilansu stanja i bilansu uspeha i to su: prosečan broj zaposlenih, poslovni prihod i prosečna vrednost poslovne imovine. Granične vrednosti su prilazane na Slici 1.

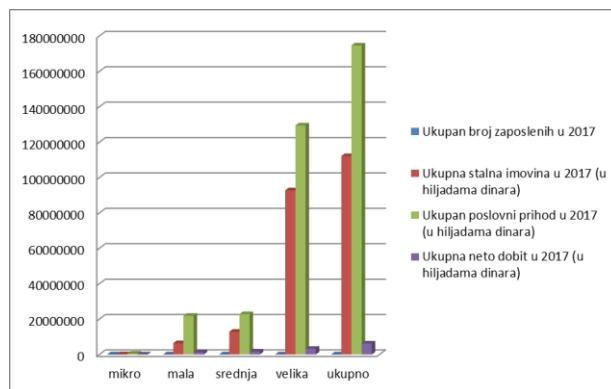
Nakon dobijene liste sa nazivom preduzeća i matičnim brojem, na sajtu APR-a uvidom u osnovne podatke, bilanse stanja i bilansa uspeha svakog pojedinačnog preduzeća preuzeti su sledeći podaci: Godina osnivanja, veličina, broj zaposlenih u 2016. i 2017. godini, visina stalne imovine u 2016. i 2017. godini, visina poslovnih prihoda u 2016. i 2017. godini, troškovi energije u 2016. i 2017. godini,

troškovi zarada u 2016. i 2017. godini i visina neto dobiti u 2016. i 2017. godini.

Analizom prikupljenih podataka, pronađeno je 80 preduzeća, od kojih su 10 mikro, 50 mala, 16 srednja i 4 velika. U 2017. godini ovih 80 preduzeća prosečno su imali 11467 zaposlenih, stalnu imovinu od ukupno 112.128.734.000 RSD (približno 945.436.200 EUR), poslovni prihod od ukupno 174.651.299.000 RSD (približno 1.472.608 EUR), i neto dobit od ukupno 6.231.688.000 RSD (približno 52.543.744 EUR). Gledano po veličini preduzeća, raspodela zaposlenih, imovine, prihoda i dobiti je identična u svakoj sferi, i najmanja je u mikro, dok je najveća u velikim preduzećima što je prikazano na Slici 2.

МИКРО ПРАВНО ЛИЦЕ		
просечан број запослених ≤	10	
пословни приход ≤	82.931	
просечна вредност пословне имовине ≤	41.465	
МАЛО ПРАВНО ЛИЦЕ		
10 < просечан број запослених ≤	50	
82.931 < пословни приход ≤	1.042.560	
41.465 < просечна вредност пословне имовине ≤	521.280	
СРЕДЊЕ ПРАВНО ЛИЦЕ		
50 < просечан број запослених ≤	250	
1.042.560 < пословни приход ≤	4.146.545	
521.280 < просечна вредност пословне имовине ≤	2.073.272	
ВЕЛИКО ПРАВНО ЛИЦЕ		
просечан број запослених >	250	
пословни приход >	4.146.545	
просечна вредност пословне имовине >	2.073.272	

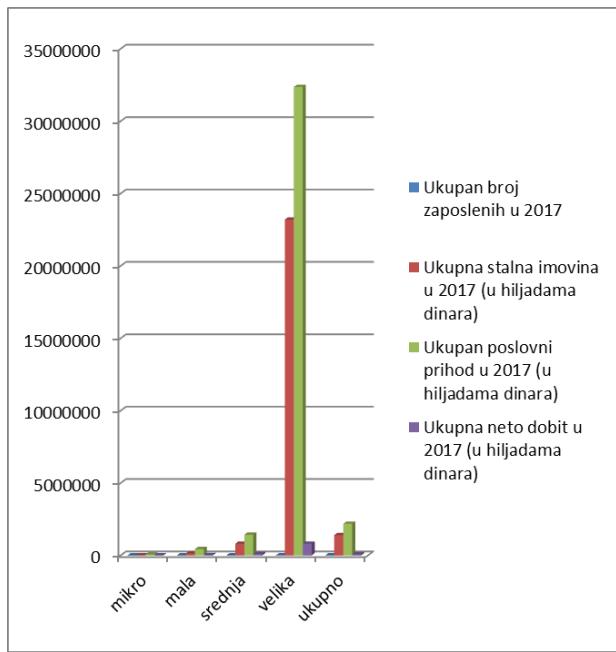
Slika 1. Kriterijumi i granične vrednosti za razvrstavanje privrednih subjekata po veličini



Slika 2. Raspodela броја зaposlenih, укупне сталне имовине, укупног пословног прихода и укупне нето добити према величини предузећа

Pored ukupnih vrednosti, za sagledavanje u kom obimu učestvuju preduzeća podeljena po veličini u Kragujevcu potrebno je prikazati i prosečne vrednosti parametara koji su navedeni. Prosečno preduzeće u 2017. godini

zapošljavalo je 143,3 osobe, imalo stalnu imovinu u iznosu od 1.401.609.175 RSD (približno 11.817.952 EUR), ostvarila poslovni prihod u iznosu od 2.183.141.238 RSD (približno 18.407.598 EUR) i dobit u iznosu od 77.896.100 RSD (približno 656.797 EUR). Gledano po veličini preduzeća, raspodela zaposlenih, imovine, prihoda i dobiti je identična u svakoj sferi, i najmanja je u mikro, dok je najveća u velikim preduzećima što je prikazano na Slici 3.

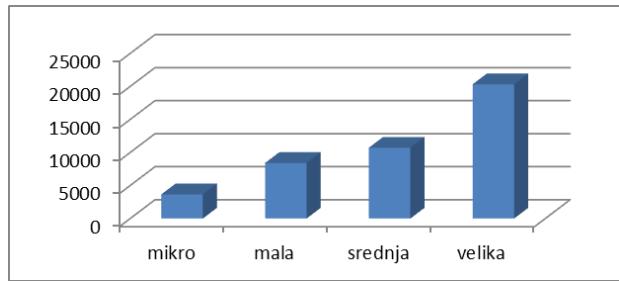


**Slika 3.** Raspodela prosečnog broja zaposlenih, stalne imovine, poslovnog prihoda i neto dobiti prema veličini preduzeća

Proektivnost zaposlenih može se izračunati na nekoliko načina, između ostalog kroz odnos ukupnog prihoda i broja zaposlenih, ili izračunavanjem udela troškova zarada od ukupnog prihoda. Prvi pokazatelj daje bližu sliku o tome koliko prosečan zaposleni generiše prihoda svom preduzeću i dobar je način za upoređivanje različitih preduzeća ili grupa preduzeća. Cilj svakog preduzeća je da ima što veći odnos prihoda i broja zaposlenih (eng. Revenue per employee), ali čak i kada se taj cilj ostvari ostaje pitanje kolika su koštanja zaposlenih, odnosno u kom procentu zarade zaposlenih učestvuju u ukupnom prihodu, što bolje prikazuje drugi pokazatelj.

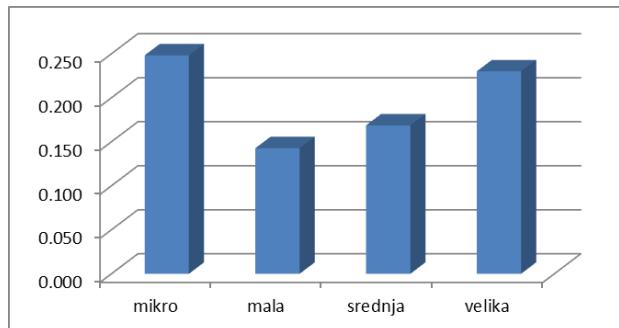
Najveći godišnji prihod po zaposlenom u 2017. godini ostvarile su velika preduzeća u iznosu od 20.322.000 RSD (približno 171.346

EUR), zatim srednja preduzeća su imala 47,2% niži prihod, a mala i mikro su imala 58,6%, odnosno 82% niži prihod po zaposlenom od srednjih preduzeća, što je prikazano na Slici 4. Iz datog se zaključuje da je najveća produktivnost zaposlenih ostvarena u velikim preduzećima, dok je u mikro preduzećima iznenađujuće nizak nivo produktivnosti po zaposlenom.



**Slika 4.** Prihod po zaposlenom

Prosečni udeo troškova zarada u odnosu na prihod za svih 80 preduzeća u 2017. godini iznosi 19,7%. U mikro preduzećima je taj udeo najveći i iznosi 24,8%, a najmanji je u malim preduzećima i iznosi 14,3%, prikazano na Slici 5. Pored toga što mikro preduzeća imaju najmanju produktivnost po zaposlenom, srazmerno ostvarenom prometu imaju velike troškove zarada što dodatno otežava njihovu ekonomiju i poslovanje. Sa druge strane mala i srednja preduzeća imaju relativno niske troškove zarada u odnosu na ostvareni prihod i time stvaraju povoljnije uslove za ulaganja u inovacije i razvoj.



**Slika 5.** Udeo troškova zarada u prihodu

Stavka „Ulaganja u razvoj“ koja je sastavni deo bilansa stanja i koja je direktni parametar inovativnosti, pronađena je u samo dva preduzeća srednje veličine i iznosila je u proseku 78.810.000 RSD u 2017. godini. Udeo ulaganja u razvoj u ukupnom prihodu ta dva preduzeća u proseku je iznosio 3,3%.

U poređenju sa prethodnom godinom, u 2017. godini zabeležen je rast u pogledu zaposlenosti za 1,12%, stalne imovine za 6,6%, troškova zarada za 5,5% i prosečne bruto zarade za 4,8%, dok je zabeležen pad u poslovnom prihodu za 9,7%, u udelu prihoda po zaposlenom za 0,6%, u troškovima energije za 0,1% i u dobiti 6,3% što je prikazano u Tabeli 1.

**Tabela 1.** Indeksi 2017/2016 po kriterijumu

Indeksi po kriterijumu 2017/2016	2016=100%
Zaposlenosti	1.012
Stalna imovina	1.066
Poslovni prihod	0.903
Prihod po zaposlenom	0.994
Troškovi energije	0.999
Troskovi zarada	1.055
Prosečna bruto zarada	1.048
Neto dobit	0.937

## 2.1 Statističko poređenje grupa korišćenjem jednofaktorske analize varijanse

Primećuje se da je uprkos povećanju zaposlenosti, zabeležen značajan pad u ukupnom prihodu, pa se postavlja pitanje da li postoji i koji je profil preduzeća koji se razlikuje od ostalih, odnosno koji je zabeležio rast u ukupnom prihodu gledano prema promeni broja zaposlenih u 2016. i 2017. godini. U tom cilju korišćena je jednofaktorska analiza varijanse (ANOVA) kojom je analizirano 66 preduzeća koja pripadaju MSP sektoru. ANOVA je jedna od najčešće korišćenih parametarskih statističkih metoda i se koristi za utvrđivanje statistički značajnih razlika između prethodno definisanih grupa ispitanika na određenoj varijabli. Anova ispituje veličinu varijabilnosti u zavisnoj varijabli i nalazi šta može biti uzrok tom varijabilitetu. Rezultat ANOVA se prikazuje F vrednošću i što je vrednost veća od granične vrednosti, to je veća verovatnoća da postoje značajne srednje razlike u vrednostima varijabli [6].

Uzorak ispitivanja čine 3 grupe koje predstavljaju nezavisne varijable. Prva su preduzeća koja su imala smanjenje broja zaposlenih, druga grupa su preduzeća koja su zadržala isti broj zaposlenih ili imala povećanje zaposlenih za najviše 10% i treća grupa su preduzeća koja su imala povećanje broja zaposlenih za više od 10%. Zavisna varijabla je promenu poslovnog prihoda u 2017. godini u odnosu na 2016.

Nulta hipoteza je da se ove tri grupe preduzeća ne razlikuju značajno po srednjim vrednostima indeksa poslovnog prihoda. Prihvatanjem nulte hipoteze se odbacuje pretpostavka da promena broja zaposlenih ima direktni uticaj na promenu prihoda. Odbacivanjem nulte hipoteze se prihvata pretpostavka da promena broja zaposlenih ima direktni uticaj na promenu prihoda, nakon čega je potrebno utvrditi između kojih grupa postoje značajne razlike. Rezultati ANOVA su prikazani u Tabeli 2.

**Tabela 2.** Rezultati ANOVA

SUMMARY						
Groups	Count	Sum	Average	Variance		
Group 1	23	22.72624	0.988097	0.099055		
Group 2	25	25.91393	1.036557	0.06818		
Group 3	18	23.27024	1.292791	0.116987		
ANOVA						
Source of Variation	SS	df	MS	F	P-value	F crit
Between Groups	1.0504	2	0.5252	5.701	0.0053	3.143
Within Groups	5.8043	63	0.0921			
Total	6.8547	65				

Dobijeni rezultati pokazuju da P vrednost iznosi 0,0053 što znači da je manja od 0,05, odnosno F vrednost iznosi 5,0701 što je veće od granične vrednosti za prihvatanje nulte hipoteze ( $F_{crit} = 3,143$ ). Na osnovu rezultata ANOVA, nulta hipoteza se odbacuje što znači da postoje statistički značajne razlike među grupama. Takođe, može se zaključiti da su u proseku preduzeća koja su smanjila broj zaposlenih imale 1,2% manji prihod, odnosno preduzeća koja su ostala na istom broju radnika ili su povećali za najviše 10% su imali u proseku rast prihoda od 3,6% i preduzeća koja

su povećala broj radnika za više od 10% su imala u proseku 29,3% veći prihod što se može videti u rezultatima Anove u koloni *Average*.

Dalje je potrebno utvrditi da li razlika postoji između svih grupa ili samo pojedinih i u tu svrhu su sve grupe međusobno upoređene t-testom. T-testovima je utvrđeno da značajne statističke razlike postoje između 2 i 3 grupe i između 1 i 3, dok između 1 i 2 grupe statističke razlike nisu značajne što je prikazano u Tabelama 3, 4 i 5.

**Tabela 3.** Rezultati uporednih t-testova 1. i 2. grupe

t-Test (Group 1 & Group 2)		
	Variable 1	Variable 2
Mean	0.9880973	1.036557
Variance	0.0990548	0.06818
Observations	23	25
Pooled Variance	0.0829463	
Hypothesized M	0	
df	46	
t Stat	-0.582366	
P(T<=t) one-tail	0.2815821	
t Critical one-tai	1.6786604	
P(T<=t) two-tail	0.5631643	
t Critical two-tai	2.0128956	
P(T<=t) two-tail <0.016667=	FALSE	

**Tabela 4.** Rezultati uporednih t-testova 1. i 3. grupe

t-Test (Group 1 & Group 3)		
	Variable 1	Variable 2
Mean	0.9880973	1.292791
Variance	0.0990548	0.116987
Observations	23	18
Pooled Variance	0.1068715	
Hypothesized M	0	
df	39	
t Stat	-2.961698	
P(T<=t) one-tail	0.0025937	
t Critical one-tai	1.6848751	
P(T<=t) two-tail	0.0051875	
t Critical two-tai	2.0226909	
P(T<=t) two-tail <0.016667=	TRUE	

**Tabela 5.** Rezultati uporednih t-testova 2. i 3. grupe

t-Test (Group 2 & Group 3)		
	Variable 1	Variable 2
Mean	1.036557	1.292791
Variance	0.0681802	0.116987
Observations	25	18
Pooled Variance	0.0884173	
Hypothesized M	0	
df	41	
t Stat	-2.787662	
P(T<=t) one-tail	0.0040051	
t Critical one-ta	1.682878	
P(T<=t) two-tail	0.0080103	
t Critical two-ta	2.019541	
P(T<=t) two-tail <0.016667=	TRUE	

### 3. ZAKLJUČAK

Rezultati ANOVE i t-testova dovode do zaključka da povećanje broja zaposlenih za više od 10% kao rezultat daje značajno veći poslovni prihod u odnosu na smanjenje zaposlenih ili povećanje broja zaposlenih do najviše 10%. Ovaj zaključak ukazuje na to da se povećanjem broja zaposlenih za više od 10% značajno povećava produktivnost samih zaposlenih što za rezultat ima značajno povećanje ukupnih prihoda preduzeća. Kako je povećanje produktivnosti rada jedan od najznačajnijih faktora unapređenja performansi preduzeća, ovo istraživanje može imati značaj za preduzeća koja imaju težnju rasta i razvoja.

### ZAHVALNOST

Istraživanje je podržano projektima III41017 i TR35021, Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

### LITERATURA

- [1] T. Mikac, D. Blažević: Planiranje i upravljanje proizvodnjom. Tehnički fakultet zavod za industrijsko inženjerstvo i management katedra za organizaciju i operacijski management. Rijeka, 2007.

- [2] R. M.; Nachiappan, N. Anantharaman: Evaluation of overall line effectiveness (OLE) in a contentious product line manufacturing system, Journal of Manufacturing Technology Management, Chidambaram, pp. 989, 2006.
- [3] W. PatrickNeumann, A. Kulus, R. W. Wells: Human Factors in Production System Design and Quality Performance – A Systematic Review, IFAC-PapersOnLine, Volume 49, Issue 12, pp. 1721-1724, 2016.
- [4] F. Mikhaylova , K. Julia, S. Eldar: Current tendencies of the development of service of human resources management, 10th International Strategic Management Conference, Procedia - Social and Behavioral Sciences 150, pp. 330–335, 2014.
- [5] T.C. Urdan: Statistics in Plain English, 3th edition, Routledge , ISBN 978-0-415-87291-1, 2011.
- [6] S. Landau, B. Everitt: A handbook of statistical analyses using SPSS (Vol. 1). Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC, 2004.

## **STATISTICAL ANALYSIS IN PRODUCTION PROCESS QUALITY MANAGEMENT, FROM ASPECT OF THE INFLUENCE OF NUMBER OF EMPLOYEES ON PRODUCTION PROCESS EFFICIENCY**

**Abstract:** *The aim of this paper is to identify and investigate factors that have impact on the productivity of certain manufacturing companies in the municipality of Kragujevac and the impact of the number of employees on the organization's performance. The data obtained from the Serbian Business Registers Agency for 80 manufacturing enterprises in the territory of the city of Kragujevac was analyzed using a one-way analysis of the variance. Enterprises were divided into 3 groups according to the ratio of the number of employees in 2017 and 2016, and the ratio of income of enterprises in 2017 and 2016 was chosen as a dependent variable. The conclusion of the research is that there are significant statistical differences among groups, i.e. the change in the number of employees directly influences the change of business income, thus directly influencing efficiency of the production process.*

**Keywords:** *Manufacturing process, analysis, quality, productivity, human resources, manufacturing enterprises.*



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## AN EXAMPLE OF MCDM SOLVER APPLICATION FOR SELECTION PROBLEMS IN MACHINING

Dušan PETKOVIĆ<sup>1,\*</sup>, Miloš MADIĆ<sup>1</sup>, Miroslav RADOVANOVIĆ<sup>1</sup>, Predrag JANKOVIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Mechanical Engineering, University of Niš, Niš, Serbia

\*Corresponding author: dusan.petkovic@masfak.ni.ac.rs

**Abstract:** Engineers in manufacturing environment are often faced with a various selection problems. Different workpiece and tool materials, complex machining requirements and producer recommendations can make machining processes as a multi criteria decision problem. Since time is a precious resource in the production process, it takes a quick and efficient solution to the multi criteria decision problems. In order to help decision makers in solving this type of problems a decision support system named MCDM Solver is proposed. MCDM Solver is used in decision-making process to rank the cutting fluids evaluated with respect to several criteria.

**Keywords:** machining, selection, cutting fluid, MCDM Solver, decision support system.

### 1. INTRODUCTION

Machining is a process of material removal using cutting tools and machine tools to accurately obtain the required product dimensions with good surface finish [1]. This process is performed in the specific tribomechanical environment which consists of five basic groups of input parameters such as workpiece, machine tool, cutting tool, interface and cutting conditions. Any parameter within these groups can be varied in a wide range and these results in the change of machining performances including cutting forces, surface roughness, temperature in the cutting zone, chip formation, noise, tool wear, etc [1].

Appropriate selection of workpiece and tool materials, machine tools, cutting fluids, cutting conditions and sequences is a key

factor in achieving minimum cost of production or a maximum production rate, or an optimum combination of both, along with better product quality in machining [2].

In order to achieve an optimum machining performances it is needed an advanced approach. Integration of empirical models and optimization methods allows for continuous multi-criteria optimization of machining processes. In this case, values of independent variables (machining parameters) are defined in continual or integer domain and the goal is to determine the best solution which satisfies all previously set constraints and ranges of independent variables. On the other hand, there are single and multi-criteria optimization problems where there exist a finite number of pre-known solutions (alternatives). For solving these types of optimization problems, a number of methods

have been developed and these are in literature known as multi criteria decision making (MCDM) methods.

Most of machining MCDM problems deals with machinability problems of materials and selection of cutting fluids [3-5]. Certain number of MCDM methods has been used such as AHP, PROMETHEE, TOPSIS, WASPAS, PSI and so on. Each of them requires specific preparation of initial matrix, determination of criteria weights and application of mathematic calculation that sometimes could be difficult and time consuming process.

Decision support system (DSS) is a special class of information system oriented to the decision-making process and aims to support, mainly business decision-doing processes. DSS is a symbiosis of information systems, application of functional knowledge and ongoing decision-making process [6]. Their main goal, as the goal of other information systems, is to improve the efficiency and effectiveness of an organization.

This paper is focused on the application of developed DSS named MCDM Solver for solving machining MCDM problems. A real time case study was solved using MCDM Solver and the obtained complete rankings were compared with the previously obtained results.

## 2. MCDM SOLVER

MCDM Solver is an “on-line” DSS which was developed within the doctoral dissertation of Dušan Petković. The developed DSS is located on the “Virtuode” company

web site and it is available to everyone who registers by creating an account, figure 1. This DSS offers the possibility of working with maximisation, minimization and target criteria [7].

The input data for MCDM Solver:

- Initial matrix of decision-making with target value of criteria;
- $\eta$  - Confidence level of decision maker in significance of the selected criteria (where  $\eta=1$  corresponds to 100% confidence level, while  $\eta=0$  corresponds to a confidence level of 0);
- Pairwise significance evaluation of the selected criteria.

Based on the input data, MCDM Solver can determine the values of the criteria weights and ranking alternatives with the corresponding values by means of Extended TOPSIS [8], Comprehensive VIKOR [9] and Comprehensive WASPAS [7, 10] methods.

Developed DSS architecture is flexible and easy to upgrade, so it enables the inclusion of new models that will come in the future. MCDM Solver has a user-friendly interface, which enables a simple and efficient way of entering the necessary data. Its use simplifies the solution of the MCDM problems because it does not require expert knowledge from the decision making theory from the user.

## 3. CASE STUDY

During machining cutting fluids (lubricants) have different effects including cooling, lubricating, mechanics, diffusing and washing.

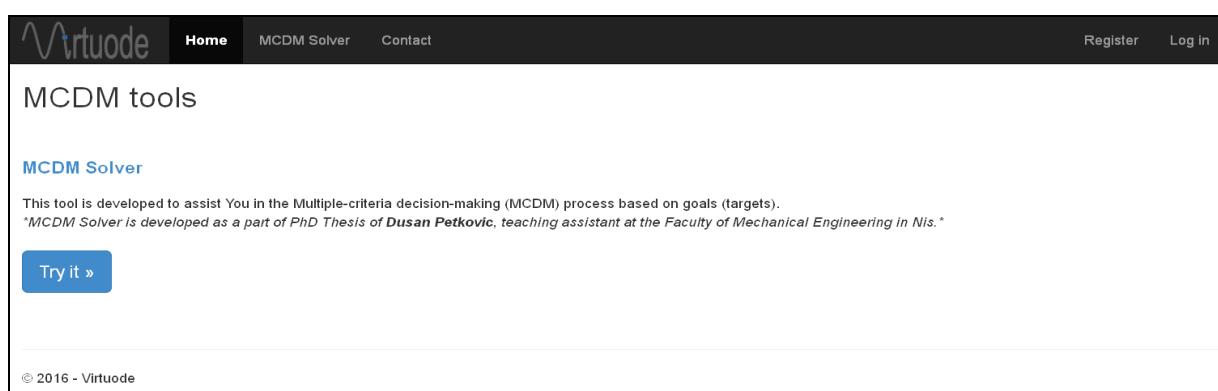


Figure 1. MCDM Solver – initial layout

**Table 1.** Initial decision matrix for the case study [12]

Cutting fluid	WW (mm)	TF (N)	GT (°C)	SR (µm)	R	TH	EP	S
1	0.035	34.5	847	1.76	L (0.335)	A (0.5)	AA (0.59)	AA (0.59)
2	0.027	36.8	834	1.68	L (0.335)	H (0.665)	H (0.665)	H (0.665)
3	0.037	38.6	808	2.4	AA (0.59)	AA (0.59)	BA (0.41)	A (0.5)
4	0.028	32.6	821	1.59	A (0.5)	AA (0.59)	AA (0.59)	BA (0.41)
Ideal value	0.027	32.6	808	1.59	0.59	0.5	0.41	0.665

L – low; BA – below average; A – average; AA - above average; H – high

Since cutting fluids serve many useful functions during machining, and, on the other hand, incur one portion of the total manufacturing cost, the appropriate selection of cutting fluids is very important [11]. Rao and Patel [12] applied PROMETHEE method for solving cutting fluid selection problem for a cylindrical grinding operation. Four cutting fluids, i.e. alternatives, were evaluated based on eight criteria such as wheel wear (WW), tangential force (TF), grinding temperature (GT), surface roughness (SR), recyclability (R), toxic harm rate (TH), environment pollution tendency (EP) and stability (S). Alternative attributes with respect to R, TH, EP and S were expressed linguistically and subsequently were transformed into real crisp values using fuzzy scales [2]. Initial decision matrix for this case study is given in Table 1. Among the eight criteria, only R and S are the maximization criteria where higher attribute values of alternatives are preferred while the others are minimization criteria. Ideal values for attributes are also given in Table 1.

#### 4. RESULT AND DISCUSSION

Based on the initial decision matrix and pairwise significance evaluation of the criteria (shown in figure 2) ranking of the four cutting fluids was carried out by means of MCDM Solver. Ranking results are shown in Table 2.

Criteria weights are also determined by means of MCDM Solver as  $W = [0.188, 0.107, 0.170, 0.089, 0.089, 0.143, 0.143, 0.071]$ .

As could be seen from Table 2 by applying all methods fluid 4 is observed to be the most appropriate for this machining application,

while cutting fluid 1 is the least desirable. Also it can be seen that Ext. TOPSIS and Comp. WASPAS ranking results are totally matched.

**Table 2.** Ranking results of cutting fluid obtained by means of MCDM Solver

Cutting fluid	Rank		
	Extended TOPSIS	Comprehensive WASPAS	Comprehensive VIKOR
1	4	4	4
2	3	3	2
3	2	2	3
4	1	1	1

#### Step 2: Set parameters and calculate

η = <input type="text" value="1"/>	WW (mm) > ✓	TF (N) GT (°C) > ✓	GT (°C) > ✓	R
η ∈ [0.0 - 1.0]	WW (mm) > ✓	GT (°C) > ✓	GT (°C) > ✓	TH
	WW (mm) > ✓	SR (µm) > ✓	GT (°C) > ✓	EP
	WW (mm) > ✓	R > ✓	GT (°C) > ✓	S
	WW (mm) > ✓	TH > ✓	SR (µm) < ✓	R
	WW (mm) > ✓	EP > ✓	SR (µm) < ✓	TH
	WW (mm) > ✓	S > ✓	SR (µm) < ✓	EP
	TF (N) < ✓	GT (°C) SR (µm) > ✓	SR (µm) > ✓	S
	TF (N) = ✓	SR (µm) R < ✓	R < ✓	TH
	TF (N) > ✓	R < ✓	R < ✓	EP
	TF (N) < ✓	TH R = ✓	R = ✓	S
	TF (N) < ✓	EP TH = ✓	TH = ✓	EP
	TF (N) > ✓	S TH > ✓	TH > ✓	S
	GT (°C) > ✓	SR (µm) EP > ✓	EP > ✓	S

CALCULATE

**Figure 2.** Pairwise significance evaluation of the criteria

The comparison of the complete rankings obtained by different MCDM methods and the PSI method is given in Table 3.

**Table 3.** Comparative rankings of different MCDM methods for the case

Cut. Fluid	Ex. TOPSIS	Comp. WASPAS	Comp. VIKOR	PSI	PROMETHEE
1	4	4	4	4	4
2	3	3	2	3	2
3	2	2	3	2	3
4	1	1	1	1	1

Petković et al. [11] and Rao and Patel [12] solved the case study by applying PSI and PROMETHEE methods, respectively. From Table 3 it can be observed that alternatives rankings obtained by the PSI method perfectly match with those obtained by the Extended TOPSIS and Comprehensive WASPAS method. On the other hand, PROMETHEE and Comprehensive VIKOR method obtained the same rankings of alternatives. However, it is evident that cutting fluid 4 has been identified as the best choice for the given machining application by all MCDM methods. Also, cutting fluid 1 received the worst ranking by all used MCDM methods.

## 5. CONCLUSION

In this paper, MCDM Solver was applied to solve cutting fluid selection problem for a cylindrical grinding operation. Four cutting fluids, i.e. alternatives, were evaluated based on eight criteria. On that way it is proposed application of the developed DSS for solving discrete machining optimization problems.

## ACKNOWLEDGEMENT

This paper is a part of the projects TR35034 and ON174004 and was financially supported by Ministry of Education, Science and Technological Development of the Republic of Serbia.

## REFERENCES

- [1] M. Radovanović, M. Madić: Methodology of neural network based modeling of machining processes, International Journal of Modern Manufacturing Technologies, Vol. 2, No. 2, pp. 77-82, 2010.
- [2] R. V. Rao: *Decision Making in the Manufacturing Environment: using graph theory and fuzzy multiple attribute decision*

*making methods*, Springer-Verlag, London, 2007.

- [3] R. V. Rao: Machinability evaluation of work materials using a combined multiple attribute decision making method, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 28, No. (3-4), pp. 221–227, 2006.
- [4] D. Petković, M. Madić, G. Radenković: Selection of the Most Suitable Non-Conventional Machining Processes for Ceramics Machining by Using MCDMs, Science of Sintering, Vol. 47, pp. 229-235, 2015.
- [5] S. Chakraborty, E.K. Zavadskas: Applications of WASPAS Method in Manufacturing Decision Making, Informatica, Vol. 25, No. 1, pp. 1–20, 2014.
- [6] M. Čupić M., R. Tummala, M. Suknović: *Odlučivanje - formalni pristup*, Fakultet organizacionih nauka, Beograd, 2001.
- [7] D. Petković: *Selection of biomaterials - Multi-criteria decision analysis and development of decision support system*, PhD dissertation, University of Niš, Faculty of Mechanical Engineering, Niš, 2017.
- [8] A. Jahan, M. Bahraminasab, K.L. Edwards: A target-based normalization technique for materials selection, Materials and Design, Vol. 35, pp. 647-654, 2012.
- [9] A. Jahan, F. Mustapha, M.Y. Ismail, S.M. Sapuan, M. Bahraminasab: A comprehensive VIKOR method for material selection, Materials and Design, Vol. 32, pp. 1215-1221, 2011.
- [10] D. Petković, M. Madić, G. Radenković: Ranking of Biomedical Materials by Using Comprehensive WASPAS Method, Proceedings *Mechanical Engineering in XXI century*, Niš, pp. 339-344, 2015.
- [11] D. Petković, M. Madić, M. Radovanović, V. Gečevska: Application of the performance selection index method for solving machining MCDM problems, Facta universitatis, Series: Mechanical Engineering, Vol. 15, No 1, pp. 97 – 106, 2017.
- [12] R.V. Rao, B.K. Patel: Decision making in the manufacturing environment using an improved PROMETHEE method, International Journal of Production Research, Vol. 48, No. 16, pp. 4665–4682, 2010.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## 3D MODELING PROCESS AUTOMATIZATION THROUGH MACROS IMPLEMENTATION

Suzana PETROVIC SAVIC<sup>1</sup>, Marko PANTIC<sup>1,2,\*</sup>, Dragan DZUNIC<sup>1</sup>, Vladimir KOLOVIC<sup>1</sup>

<sup>1</sup>University of Kragujevac, Faculty of Engineering, Kragujevac, Serbia, petrovic.suzana@gmail.com, dzuna@kg.ac.rs, kocovic49@gmail.com

<sup>2</sup> Higher technical school of processional studies Zvečan, Serbia, pantic@kg.ac.rs

\*Corresponding author: pantic@kg.ac.rs

**Abstract:** Contemporary manufacturing companies secure their existence and conquering new markets through the full implementation of the product lifecycle management (PLM) systems. The so-called CAD/CAM/CAE systems (Computer Aided Design – CAD, Computer Aided Manufacturing – CAM, Computer Aided Engineering – CAE) play a fundamental part of these systems. During the product development process, the attention is mainly focused on the product-related geometrical information (CAD models). In most cases, product development and enhancement are carried out through the modification of the existing product. For this reason, designers should make changes in a simple manner with a minimum effort. This can be achieved by altering parameters which control topological characteristics of the model. However, if systematic method for the creation of products is not implemented, it may lead to the wrong or inconsistent shape of the product that cannot follow functional changes of the original product. In this paper we will show the functional and procedural modelling using macro methodology which demonstrates the application of parametrically defined product models with a reference to currently applied methodologies.

**Keywords:** CAx technologies, Functional consistency, Product design, 3D modelling

### 1. INTRODUCTION

Contemporary market imposes a series of requirements that are, in the first order, related to the product development and its competitiveness. Competitive product development is characterized by complex processes of design activities (for example, conceptual design, 3D modeling, modifications, improvement, production, etc.) which should be done in a short period of time. To make this possible, companies work on integration of the modern CAD CAM CAE systems (Computer Aided Design – CAD, Computer Aided Manufacturing – CAM, Computer Aided

Engineering – CAE) in the business process and knowledge implementation trough the complete product lifecycle management.

Design activities may be applied on new or on existing product. If design activities applied on existing product is taken in consideration, the most appropriate application strategy of the CAD CAM CAE systems should be scrutinized. In the other words, it is necessary to know essential philosophy of the application of these systems which provide simple managing and manipulation of the model and physical product. Model geometry is controlled by complex geometric, dimensional and algebraic relations. By

modifying variables which are related to the mentioned relations, it is possible to get different shapes of the model [1-4].

Product geometrical data (CAD) is a central point in the development process and as such, it is the most modified data [5]. Reuse of the CAD models with adaptation on new conditions in the engineering design provides benefits for production company. This way, the design lead time is shortened and, consequently, the products are launched faster on the market [6]. Designers should make modifications in as simple way as possible with minimum effort [7].

In order to show one of the simple modification ways, in this work we will show application of the macro for automatization process for technical drawing gauges creation in the software Catia V5 R21. Macro was created in the VBScript which is integral part of the Catia V5.

## 2. AUTOMATISATION OF THE 3D MODELING PROCESS BY USING MACROS

During 3D modeling process, there is a need for repetition of certain procedures. To

simplify the modeling process itself, macros are used. Macro represents textual code where procedures, commands and functions are organized in one compact unit. By macro activation, complete procedure is executed no matter how complicated it is.

Macro could be created by recording the procedure or by manual developing (writing) code. In Catia V5 R21 macros could be recorded or written in scripts such as CATScript or VBScript. In these script languages, it is possible to define procedural programming. Macro, which is developed manually, implies knowing the structure of the application. In other words, it is necessary to know when and which methods should be used based on the properties of a particular object.

### 2.1 Architecture of the software Catia V5

CATIA V5 is a software for 3D solid modeling of products and processes. By using this software all activities related to concurrent engineering through development, simulations and analysis of the products and processes are included. Also, this software supports all business and other activities.

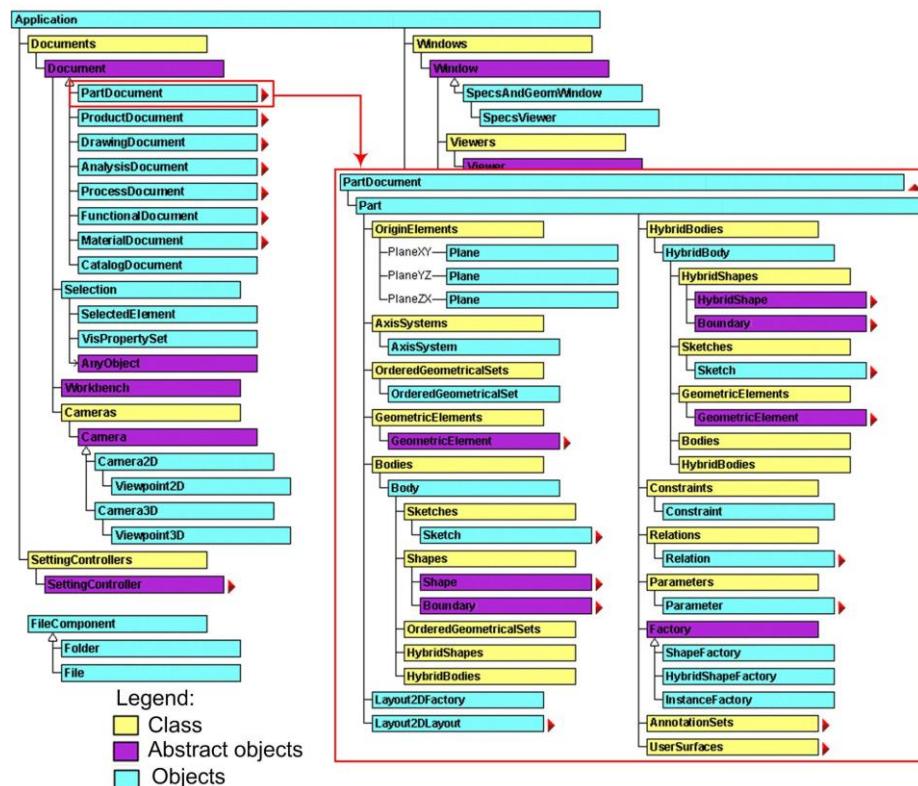


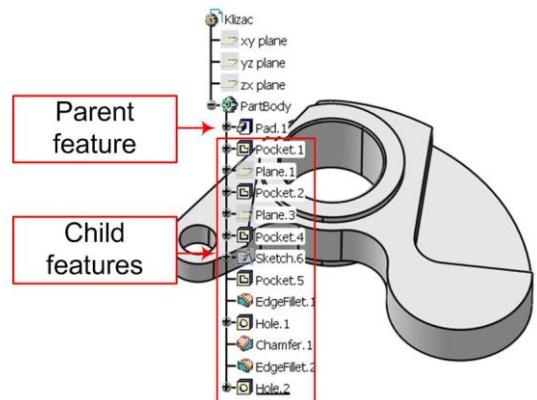
Figure 1. Architecture of the Catia V5 R21

The essence of the software Catia V5 is object oriented architecture where objects are presented as graphical objects or models and its features (Fig.1) [8]. These objects consist of all concepts of programming objects, i.e. abstraction (it is realized by the concept of the class and by the concept of the object), encapsulation, inheritance and polymorphism.

By mutual communication between objects execution of the set of tasks is provided. Every object represents entity (for example, system coordinate planes), or an event from application domain (for example, machining process simulation). Object groups represent classes and describe set of entities which have a common base concept. Every class must have attributes which will store state of the objects belonging to it. Let's say, class Sketches contain object Factory2D which is defining shape of the sketch. Method realizes required class behaviour. In one class every object have the same methods, but the way of the realisation could be different. For example, in the class Sketches way of the realisation for circle and line creation are not the same, but method is the same. In other words, the data needed for circle creation are sketch plane, circle center and radii value; and data needed for line creation are sketch plane, start and end point.

Encapsulation property is used to hide state inside the class and thus prevent unauthorised access of the user. User can manipulate and communicate with an object just by using user interfaces. That way, object's consistency and inability to disturb core of the system by accidental or deliberate mistake of users is provided.

Hierarchy expanding can be executed in a simple way. Parent, i.e. superior class consists of attributes and behaviour which are common for all classes which are inherited. New subclass expands its behaviour and properties by specialization of the parent class behaviour and properties. During creation of the 3D model, mentioned concept is manifested by the parent - child concept between features (Fig. 2).



**Figure 2.** Inheritance/"Parent-child" relationship

Polymorphism represents the ability to take up multiple shape forms. For example, when accessing the class Sketches and the object Factory2D, it is implied that sketching process will take place, but what will be sketched depends on the type of the desired 2D shape and used commands.

Polymorphism can be expressed as inclusive or operative. Inclusive polymorphism is implemented through inheritance mechanism. This type of the polymorphism allows object to be treated as a member of multiple classes at the same time. Operative polymorphism implies that operations/procedures can be applied on a different objects which are not inclusion connected.

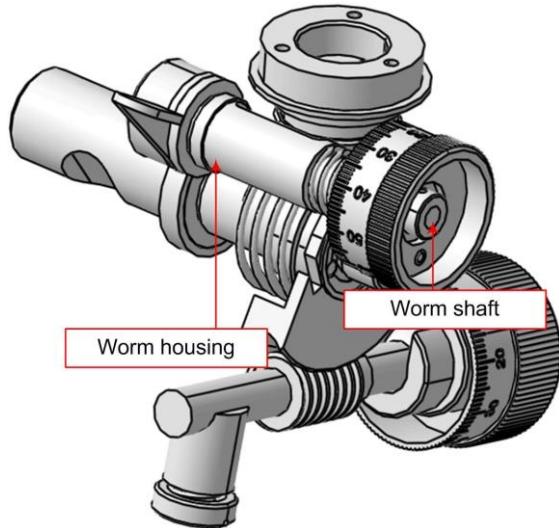
## 2.2 Macro for automatization of the technical drawing creation

In practice, it is known that it is necessary to provide appropriate dependencies (in the terms of defining tolerances) between particular components of the assemblies in order to completely perform its function and satisfy market's demands. So, it is necessary to check key dimensions after component production.

Checking can be done by using measurement machines. However, in the case of the large products, it is very difficult to place and position those products on the measuring machines. Because of that, gauges are still in use today.

Example of the assembly where it is necessary to control dimensions after production is shown in the Fig. 3. All

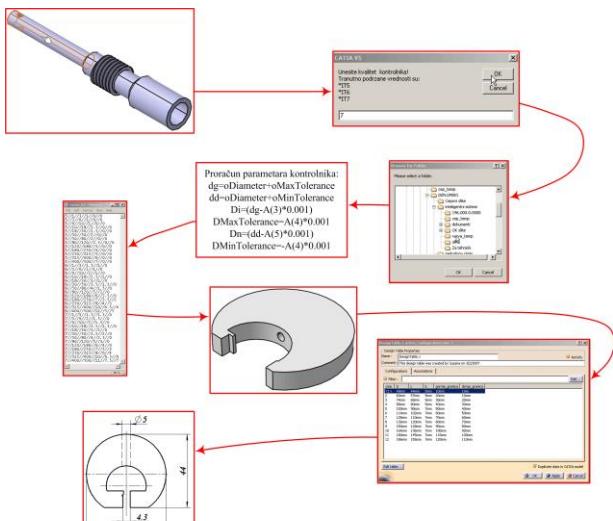
movements of shown mechanism are provided by using worm gears. When these gears are in use, very precise movement is accomplished and clearance between supporting items on the casing and worm shaft should be provided.



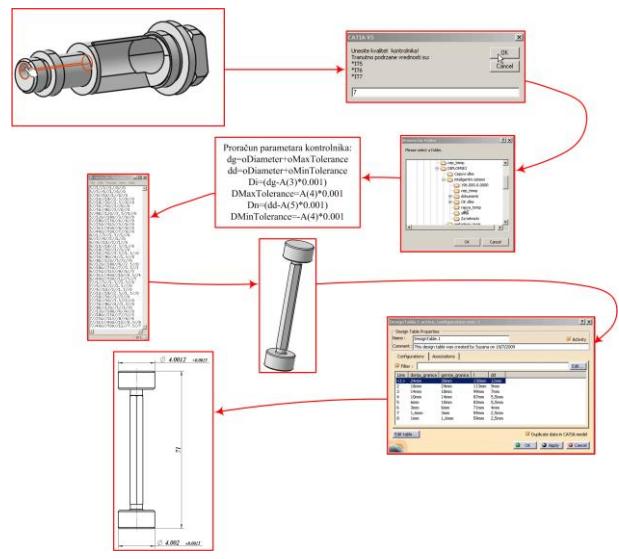
**Figure 3.** Worm gears mechanism

For macro execution, end user should perform next actions (Fig. 4):

1. Open desired part form assembly in the new window,
2. Select appropriate feature of the model (hole or shaft),
3. In the dialog box put desired gauge quality,
4. Define working directory,
5. Choose appropriate gauge configuration from gauge family table.



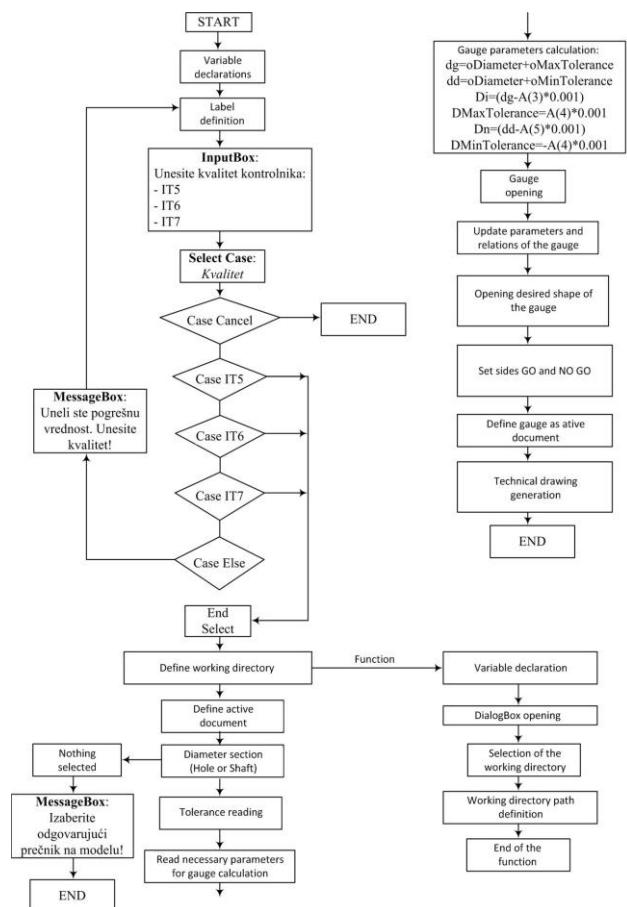
a)



b)

**Figure 4.** Macro execution: a) For shaft, and b) For hole

Although end user has only a few tasks to perform, complicate calculation is performed inside macro. Successful macro creation implies using architecture elements of the Catia V5. Macro structure can be presented with the algorithm shown in the Fig. 5.



**Figure 5.** Macro algorithm

Before any calculation, it is desirable to declare all variables and procedures that will be used in the program/macro. Due to the fact that the user should choose quality of the gauge, we used conditional statement select case where chosen value is compared with defined values in the macro. Also, it was necessary to define control mechanism in order to prevent macro from input errors (accidental or intentional). When mistake occurs, macro ends execution and user has to start macro again. If everything is in the correct way input/selected, from user is requested to select appropriate feature on the model. Macro reads diameter of the selected feature and, by using chosen quality, gauge calculation is started. User should choose appropriate gauge configuration and calculated values GO or NO GO is assigned to the appropriate side of the gauge model. This is possible because all dimensions of the gauge models are defined as parameters which are used in the macro as programming variables. After these essential steps, automatic technical drawing creation is done.

### 3. CONCLUSION

Concurrent engineering concept imposes to the modern industry the need for application of the new types of technologies, such as knowledgeware, information, etc. The base of these technologies is team work [1].

The development of the Information technologies leads to the development of the production technologies. Application skeleton is represented with appropriate software architecture. Process automation in contemporary PLM systems is based on the application of the information technologies. Their application and implementation is conditioned by knowing and understanding mutual modules relation, i.e. relation between classes and objects in PLM systems [2,6].

Using different types of macros, standard and non-standard element's production time significantly reduces. Benefits of using macros

are reflected through shorter, simpler and more compact work.

Acceleration of the process realisation and testing constructions does not end with macros. Every big software, such as Catia V5, leaves the possibility for adding modules and/or commands in accordance with user needs.

### ACKNOWLEDGMENT

This paper is referred to a research work under the projects III-41007 and TR35021 supported by Ministry of Education and Science of Serbia

### REFERENCES

- [1] C. Stan, M. Zapciu, M. Paraschiv, M. Ungureanu: 3D parametric modeling for complex part generation, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. pp. 504 – 508, 2013.
- [2] V. Salehi, C. McMahon: Development and application of an integrated approach for parametric associative CAD design in an industrial context, *Computer – Aided Design and Applications*, Vol. 8, No. 2, pp. 225 – 236, 2011.
- [3] C.-G. Zin, Y.-S. Ma: Parametric feature constraint modeling and mapping in product development, *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 26, pp. 539 – 552, 2012.
- [4] H. Lipson, M. Shpitalni: Conceptual design and analysis by sketching, *Artificial intelligence for engineering design, Analysis and Manufacturing*, Vol. 14, No. 5, pp. 391 – 401, 2000.
- [5] L. Zhu, M. Li, R.R. Martin: Direct simulation for CAD models undergoing parametric modifications, *Computer – Aided Design*, Vol. 78, pp. 3 – 13, 2016.
- [6] Y. Cheng, Z. Ma Z: A functional feature modelling method, *Advanced Engineering Informatics*, Vol.33, pp. 1-15, 2017.
- [7] J.D. Camba, M. Contero, P. Company: Parametric CAD modeling: An analysis of strategies for design reusability, *Computer – Aided Design*, Vol. 74, pp. 18-31, 2016.
- [8] M. Ibrahim, R. Krawczyk, G. Schipporeit: CAD smart objects: Potentials and Limitations, In: *Proceedings of Digital Design: 21<sup>st</sup> eCAADe conference*, 2003, Graz, Austria, pp. 547-552.



Society of Production  
Engineering

**SPMS 2018**  
37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije  
**ICPE-S 2018**  
37<sup>th</sup> International Conference on Production  
Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## **LEARNING FACTORY AS MODERN EDUCATION MODEL FOR EFFECTIVE COLLABORATIVE EDUCATION BETWEEN ACADEMIA AND INDUSTRY, AND ITS “PROTO-MODEL” AT THE FME UB IN 80'S**

**Goran D. PUTNIK**

Department of Production and Systems Engineering, School of Engineering, University of Minho  
Campus of Azurem  
4804-533 Guimaraes  
PORTUGAL  
E-mail: [putnikgd@dps.uminho.pt](mailto:putnikgd@dps.uminho.pt)

**Abstrakt:** In the first part, the concept of “Learning Factory” (LF) is presented. It is an advanced education concept for effective collaborative education between academia and industry, based on real-time exchange of tasks and results between the students and enterprises, nowadays gaining again full attention by the university educators, although model has appeared about 25 years ago. There are presented a LF logical model, as well as some instances of the logical model. The model in use at the University of Minho for the Curricula Units CAD/CAPP and CAM within the Industrial Engineering and Management course is presented shortly.

In the second part, it is presented a LF “proto-model”, meaning the first, or at least one of the first, LF models applied in practice, developed and implemented at the Faculty of Mechanical Engineering of the University of Belgrade, in 80' of the last century, under the direction by Prof. V. Milacic, which was in use for years, and which represented an “avant-garde” in education models of the time, valid today as well.

**Kezwords:** Learning Factory; education; proto-model; academia and industry; Milacic V.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

### 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## MATERIJALI ZA IZRADU TETRA BRIK AMBALAŽE

Vojislav RADONJIĆ<sup>1</sup>, Svetislav Lj. MARKOVIĆ<sup>1</sup>, Dalibor MARKOVIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Visoka škola tehničkih strukovnih studija Čačak, Srbija, vojislav.radonjic@vstss.com,  
svetom@mts.rs, dalmarko@hotmail.com

**Apstrakt:** Materijali za izradu Tetra Brik ambalaže su laminati projektovani i proizvedeni da zadovolje precizno definisane tehničke i estetske zahteve. Tetra Brik ambalaža se odlikuje izuzetno originalnim oblikovanjem i funkcionalnošću. Ona štiti nutritivne vrednosti proizvoda od štetnih uticaja vazduha i svetla, čuva sve njegove prvobitne osobine, omogućava dugotrajno čuvanje proizvoda i lakše rukovanje u celom procesu skadištenja, transporta i distribucije.

**Ključne reči:** Tetra Brik Aseptic, višeslojni materijal, barijerna svojstva.

### 1. UVOD

Tetra Pak već godinama proizvodi inovativnu kartonsku ambalažu koja maksimalno štiti proizvod i održava njegove sastojke nepromenjenima.

Najpopularnija aseptična kartonska ambalaža za napitke je Tetra Brik Aseptic. Ona produžuje rok trajanja i čuva hranjive vrednosti proizvoda od štetnih uticaja vazduha i svetlosti. Taj ambalažni materijal sadrži tanku aluminijumsku foliju, tanju od ljudske vlasi, koja je laminirana između uobičajenih slojeva kartona i polietilena, ali dovoljno delotvorna da spreči prodror bakterija u mleko. Ta folija također štiti proizvode od učinka svetlosti, te tako sprečava degradaciju vitamina.

Optimalne osobine Tetra Brik ambalaže su:

- veći stepen održavanja bezbednosti, higijene i hranljivih materija,
- očuvanje ukusa i svežine, može se čuvati mesecima bez potrebe za hlađenjem ili konzervansanjem,
- efikasno korišćenje minimale količine materijala potrebnih da se postignu

zadate funkcije (paket ima težinu od 97% proizvoda, a samo 3% ambalaže) predstavlja dobar primer efikasnog korišćenja resursa.

### 2. KARAKTERISTIKE MATERIJALA ZA IZRADU TETRA BRIK (ASEPTIC) AMBALAŽU

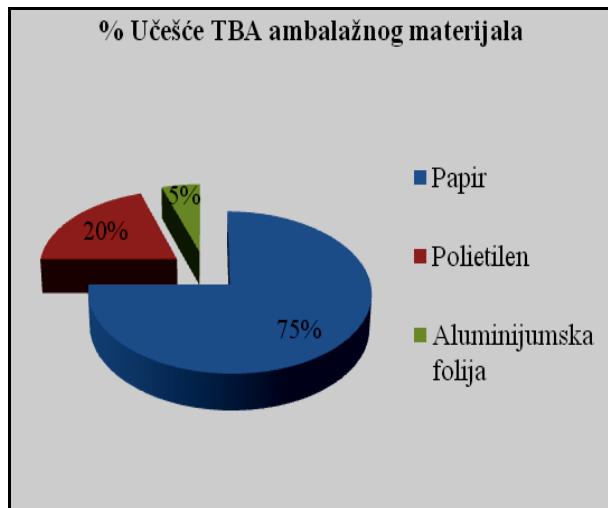
Izbor pojedinih materijala za izradu višeslojnog materijala zavisi od namene i vrste proizvoda koji se u njega pakuje. Višeslojni materijali se proizvode, od materijala različitih fizičko-hemijskih karakteristika. Ovi materijali se odlikuju naročitom funkcionalnošću, specifičnom konstrukcijom pakovanja i izuzetnom zaštitom upakovanog proizvoda.

Materijali za izradu Tetra Brik ambalaže predstavljaju najvažniji element u projektovanju višeslojnog ambalažnog materijala jer od njihovih barijernih svojstava zavisi kvalitet ambalaže.

Svaki sloj koji koristimo za izradu Tetra Brik ambalažu ispunjava svoju funkciju, a svi zajedno sastavljeni u jedan višeslojni materijal obezbeđuju dugoročno i sigurno skladištenje

upakovanog proizvoda, stvarajući efikasnu barijeru protiv bakterija i spoljašnjih negativnih uticaja.

Standardna Tetra Pak ambalaža se sastoji od 75% papira, 25% polietilena, dok se aseptična sastoji od 75% papira, 20% polietilena i 5% aluminijumske folije (Sl. 1).



**Slika 1.** Procenat učešća materijala u Tetra Brik (Aseptic) ambalaži

Papir je materijal koji daje čvrstoću i krutost pakovanju, tako da mora posedovati dobra mehanička svojsva. Pored toga, papir ima ulogu štamparske podloge. Koriste se uglavnom sledeći materijali: papiri gramature do  $150 \text{ g/m}^2$ , polukartoni gramature  $150\text{-}250 \text{ g/m}^2$  i kartoni  $250\text{-}600 \text{ g/m}^2$ . Za fleksu lajn tehniku štampanja se koriste nebeljeni, polubeljeni i beljeni dupleks papiri i kartoni, dok se za fleksu proces tehniku štampanja koriste nebeljeni, dupleks, CLC dupleks, CLC nebeljeni, CLC potpuno beljeni i CLC višeslojni polukartoni i kartoni.

Polietilen je materijal koji uvek dolazi u dodir sa proizvodom, jer je inertan prema hrani sa kojom je u kontaktu. Polietilen obezbeđuje da pakovanje bude otporno na tečnosti, nepromočivo i stvara barijeru protiv bakterija. Koristi se polietilen niske gustine (LDPE). Polietilen niske gustine se isporučuje u obliku granula.

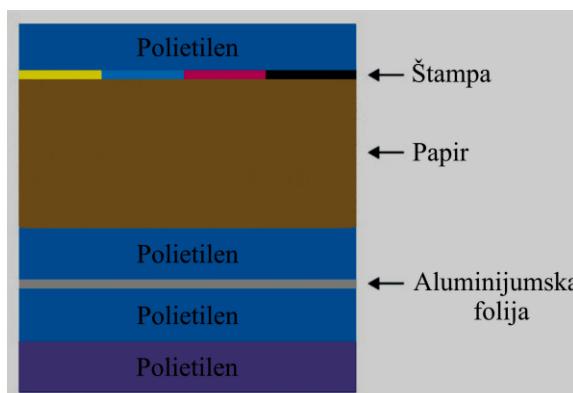
Aluminijumska folija je najbolja barijera za zaštitu od štetnih efekata svetlosti, kiseonika, i gubljenja ukusa. Al-folija obezbeđuje da proizvodi mogu trajati nekoliko meseci. Debljina Al-folije iznosi  $0,006\text{-}0,009 \text{ mm}$ .

Aluminijumska folija treba da ima sledeće osobine: potpunu odmašćenost, dvostruko žarena, jedna strana mat a druga sjajna, sadrži čistog aluminijuma min 99,5% dobijene elektrolitičkim putem, u izradi ambalaže se koristi meka i tvrda folija.

### 3. KOMBINACIJA VIŠESLOJNOG MATERIJALA ZA TETRA BRIK (ASEPTIC) AMBALAŽU

Izbor pojedinih materijala za izradu višeslojnog savitljivog materijala zavisi od namene i vrste proizvoda koji se u njega pakuje.

Proizvodnja ambalažnih materijala slojevite strukture uslovljena je potrebom poboljšavanja svojstava homogenih materijala namenjenih za izradu Tetra Brik (Aseptic) ambalažnog pakovanja (Sl. 2). Kombinacijom slojeva različitih materijala dobija se novi materijal sa poboljšanim fizičko-mehaničkim svojstvima, a samim tim dobija se i materijal sa unapređenim barijernim svojstavima što je veoma zanačajno za proizvod koji se pakuje u tu ambalažu sastavljenu od višeslojnog ambalažnog materijala. Na ovaj način se otklanjaju nedostaci koje je svaki od tih materijala pojedinačno imao ako se posmatra u odnosu na optimalne zahteve za pakovanje određenog proizvoda.



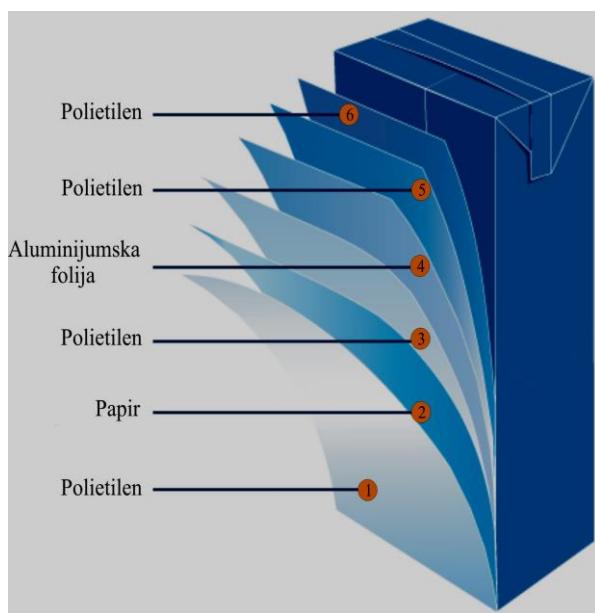
**Slika 2.** Kombinacija materijala za Tetra Brik (Aseptic) ambalažno pakovanje

Na primer, kombinovani materijal može da se sastoji od sloja koji ima odlične štamparske karakteristike, od sloja koji ima odlična izolaciona svojstva i sloja koji obezbeđuje mogućnost formiranja i zatvaranja pakovanja postupkom zavarivanja. Međutim, ukoliko bi

bilo koji od materijala iz ovog primera uzeli samostalno, ne bi bilo moguće formirati pakovanje koje bi obezbedilo sve pomenute karakteristike.

Višeslojni materijali mogu biti sastavljeni od srodnih materijala ili od raznorodnih materijala. Od srodnih materijala sačinjeni su karton, lepenka, talas karton, papirni laminati i kaširani karton. Spajanjem dva ili više raznorodnih savitljivih materijala dobijaju se višeslojni savitljivi materijali.

Tetra Brik ambalažni materijal je laminat koji se sastoje od 6 slojeva. Glavni materijal je papir koji daje stabilnost i čvrstoću ambalaže, na kome se u postupku štampanja nanosi boja a kasnije polimerne i aluminijumske folije. Kombinacija ovih materijala zavisi od proizvoda koji se pakuje, a njihov raspored slojeva je prikazan na slici 3.



**Slika 3.** Raspored slojeva materijala na Tetra Brik (Aseptic) ambalažnom pakovanju

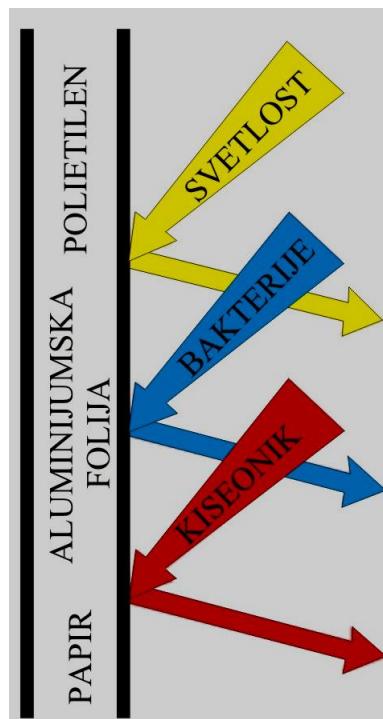
1. Spoljašnji polimerni sloj (Polietilen)
  - štiti boju od spoljašnje vlage,
2. Papirna osnova
  - glatka strana, omogućava formiranje otiska,
  - neoslojena strana, daje čvrstinu paketu,
3. Laminat, polimerni sloj (Polietilen)
  - omogućava adheziju aluminijumske folije na papirnu osnovu,
4. Aluminijumska folija

- štiti proizvod od svetlosti, kiseonika i gubitka arome.
5. Unutrašnji polimerni sloj 1 (Polietilen)
    - omogućava adheziju na aluminijumsku foliju,
  6. Unutrašnji polimerni sloj 2 (Polietilen)
    - obezbeđuje nepropustljivost za proizvod nakon punjenja i zatvaranja paketa.

#### 4. BARIJERNE OSOBINE VIŠESLOJNIH MATERIJALA

Jedan od osnovnih zahteva koji ambalažni materijali u procesu pakovanja proizvoda moraju da ispunе jeste zaštita upakovanog proizvoda od delovanja spoljašnjih faktora (Sl. 4).

Fizičke i mehaničke osobine ambalažnih materijala moraju biti takve da omoguće zaštitu proizvoda od rasipanja, oštećenja, da su otporni na delovanje niskih i/ili visokih temperatura (u zavisnosti od tretmana proizvoda topлотом), da obezbede željenu održivost upakovanog proizvoda, da je željenih karakteristika za gasove, vodenu paru, aromatične materije, mikroorganizme i svetlost.



**Slika 4.** Otpornost višeslojne ambalaže na spoljne uticaje

Višeslojni ambalažni materijali su slojeviti, ali pored plastomera sadrže i druge materijale, kao što su papir, karton ili aluminijum. Kombinovanjem dva ili više sloja različitih materijala poboljšavaju se i barijerna svojstva ambalaže. Zbog raznolikog sastava, proizvode se kaširanjem i/ili ekstruzionim oslojavanjem.

Barijerne osobine materijala potrebnih za izradu Tetra Brik ambalažnog pakovanja su:

- Zaštita od kiseonika i vodenu paru – PE,
- Sposobnost termozavarivanja – PE,
- Zaštita od svetlosti – Al-folija,
- Zaštita od gubitka arome i mirisa – Al-folija ,
- Čvrstoća, krutost, neprozirnost – Papir.

Upotrebom aluminijumske folije značajno se poboljšavalju barijerna svojstva na uticaj svetlosti, gubitak arome i mirisa.

Propustivost na svetlost se može smanjiti, ili u potpunosti sprečiti bojenjem plastomera u masi, ili štampanjem cele površine ambalažnog materijala. Metalizacijom plastomera može se smanjiti propustljivost na svetlost za preko 90%. Ukoliko ambalažni materijal sadrži aluminijumsku foliju, ili sloj papira i kartona može se smatrati nepropusnim za svetlost.

Propustljivost aromatske (mirise) sastojke se smanjuje korišćenje aluminijumske folije. Upakovani proizvod, ambalažni materijal sa aluminijumskom folijom, štiti od gubitka arome ili primanja stranih mirisa iz okoline.

Barijerna svojstva na vodenu paru postižu se korišćenjem termozavarivih plastomera izuzev polistirena. Plastomer koji obezbeđuje dobru termozavarivost, obezbeđuje potrebne barijerne karakteristike za vodenu paru.

Zatvaranje ambalaže termozavarivanjem se ostvaruje izradom višeslojnih materijala kod kojih unutrašnji sloj čine polimerni materijali relativno niske temperature omekšavanja i prelaska u stopljeno stanje. Unutrašnji slojevi su najčešće izrađeni od PE, PVC, PP i polistirena. Mogu se koristiti i kopolimeri etilena i propilena kao i jonomeri. Time se obezbeđuje termičko zavarivanje na temperaturama od 80–150°C. Za termičko zatvaranje se mogu koristiti i lakovi, tzv. termolakovi koji se nanose kao unutrašnji sloj na polimernom materijalu.

Kopolimeri EVOH ili EVAL ima najveću primenu kao barijerni sloj za kiseonik u višeslojnim polimernim filmovima ili višeslojnim kombinacijama kao što je Tetra Brik ambalažni materijal. Kod EVOH-a acetalna grupa od vinil acetata je suptituisana sa vinilalkalnom grupom. Osnovna karakteristika EVOH-a je vrlo visoka barijera za kiseonik, ugljen dioksid i mnoga druga polarna jedinjenja. Takođe poseduje visoku mehaničku čvrstoću i elastičnost. Upotreba EVOH smola u veoma malim debljinama između dva filma polimera postižu se tražene osobine koeksrudiranih filmova kao što su dimenzionala stabilnost, mehanička čvrstoća, orijentisanost, otpornost na probijanje i dr. EVOH smole sprečavaju migraciju kiseonika, vlage i ugljen dioksida iz atmosfere u unutrašnjost ambalažnog materijala. Za proizvodnju Tetra Brik ambalaže EVOH se koristi kao unutrašnji sloj na Al-foliji, on ima ulogu da spreči migraciju agenasa iz spoljne sredine, koji mogu uticati na oksidaciju mirisa, infekciju mleka i gubitak vitamina C i da obezbedi kvalitetan uzdužni i poprečni šav tj. termozavar.

EVAL kopolimeri poseduju visok sjaj i transparentnost. Ovaj kopolimer se primenjuje u proizvodnji Tetra Brik ambalažnog materijala za pakovanje voćnih sokova. U sloju polimera koji se nanosi sa unutrašnje strane, sa strane Al-folije jedan od slojeva je EVAL kopolimer. Taj sloj se lije iz ravne dizne koja ima dva otvora i to sa spoljne strane. Zahvajući postojanju sloja EVAL kopolimera formira se kvalitetan uzdužni i poprečni termozavar koji ima barijerna svojstva i zaštitu upakovanih proizvoda od kiseonika iz atmosfere. Na taj način se štiti upakovani voćni sok od degradacije i gubitka sadržaja vitamina C. EVAL kopolimeri se mogu koristiti u direktnom i indirektnom kontaktu sa prehrabbenim proizvodima.

Danas se proizvode koekstrudirani ambalažni materijali sa ugrađenim barijernim i visoko barijernim slojevima. Debljina metalnog sloja se smanjuje zamenom aluminijumske folije sa metaliziranim plastimerima (metalizirani OPP, metalizirani PET i dr.). Metalizacija iznosi 2-3 µm, što je znatno manje

od aluminijumske folije (7-9 µm). Absorpcija, difuzija i deseorpcaja zavise od fizičke i hemijske kompatibilnosti molekula gasova i vodene pare i polimernog materijala. Propustljivost je direktna proporcionalna razlici koncentracije na površinama ambalažnog materijala i temperaturi, a obrnuto proporcionalna debljini ambalažnog materijala. Pogodnim izborom kombinacije materijala može se uticati na propustljivost gasova i vodene pare, tako da uticaj propustljivosti gasova i vodene pare na upakovani proizvod se može svesti na minimum, tj obezbediti dugi rok trajanja.

## 5. TRIPLEKS PAPIR

Kartoni su višeslojni papiri koji se proizvode u gramaturama od 200 do 600 g/m<sup>2</sup>. Karton je materijal složenog sastava. Po pravilu, sastoji se od celuloznih vlakana uz dodatak lepkova, punila i eventualno boja. Priozvodi se na karton mašini čija je konstrukcija slična kao kod papir mašine. Najveća razlika je u sitovoj partiji, koja zbog postojanja više slojeva, ima više posebnih natoka i sita. Na svakom od sita se formira papirna traka, a zatim se trake spajaju u jednu. Prvo se formira traka na najdužem situ (donji sloj), a zatim se na nju spajaju trake sa ostalih sita (slika 5). Ovako formirana traka dalje odlazi u partiju presa, zatim se suši u sušnoj partiji, premazuje i ponovo suši i na kraju namotava u rolne na namotaču.

Sirovine za proizvodnju papirnih traka su biljna vlakna četinarskog i liščarskog drveta, jednogodišnjih biljaka, kao i stari papir. U zavisnosti od vrste kartona koji se proizvodi, ove sirovine se prerađuju u drvenjaču, polucelulozu ili tehničku celulozu mehaničkim, hemijsko-mehaničkim ili hemijskim postupcima. Osnovne karakteristike kartona najviše zavise od vrste upotrebljenih vlakana. Tako četinarska celuloza, sa dugim i jakim vlaknima, koja se međusobno dobro vezuju, daje papiru dovoljnu jačinu i omogućava eksploataciju trake u štampi. Četinarska vlakna mogu negativno da utiču na štamparske karakteristike papira, na primer na glatkost

površine. Najčešće korišćena četinarska celuloza je od bora, jele i smreke. Sa druge strane, vlakna liščarske celuloze su kraća i deblja, pa omogućavaju bolje popunjavanje šupljina između dugih četinarskih vlakana, čime stvaraju pogodniju strukturu papira. Najčešće korišćena liščarska celuloza je od bukve, topole i breze.



**Slika 5. Struktura tripleks papira**

Struktura tripleks papira:

- Gornji sloj je obično višestruko premazan, ima visoku belinu i pogodan je za štampu. Pojedini slojevi se mogu formirati od slojeva istog sastava formiranih na više sita i spojenih u jedan sloj.
- Zaštitni sloj predstavlja barijeru za prelaz neželjenih materija između srednjeg i gornjeg sloja.

Donji sloj se izrađuje od starog papira kvalitetnijeg od sirovine za srednji sloj, koji ima visok procenat kratkih vlakana, kao i visok sadržaj pigmenata i drugih nevlaknastih materija.

## 6. ZAKLJUČAK

Materijal koji je potreban da zaštiti upakovani proizvod ima najbitniju ulogu pri izradi ambalaže, jer treba sačuvati upoterbnu vrednost proizvoda i obezbediti uslove da roba stigne nepromenjena do potrošača. Da bi ambalaža uspešno štitila proizvod od promene kvaliteta mora da ispunjava brojne uslove: da štiti od kvarenja, od mehaničkih i fizičkih uticaja, vlage, svetlosti i drugih mogućih negativnih dejstava. Materijal za izradu ambalaže treba da bude inaktiviran, da ne deluje na miris ili ukus upakovanog proizvoda.

Kombinovanjem sva tri materijala (papira, polietilena, aluminijumske folije) postiže se

odlična barijera kojom se sprečava prodor mikroorganizama, svetlosti, vazduha, mirisa u upakovani proizvod.

## LITERATURA

- [1] Tehničko-tehnološka dokumentacija, Tetra Pak, Gornji Milanovac.
- [2] Plavšić M.: *Polimerni materijali*, Naučna knjiga, Beograd, 1996.
- [3] Krgović M., Pervez O.: *Grafički materijali*, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd, 2005.
- [4] [www.tetrapak.com](http://www.tetrapak.com)
- [5] [www.umka.rs](http://www.umka.rs)
- [6] [www.flintgrp.com](http://www.flintgrp.com)

## MATERIALS FOR MAKING TETRA BRIK PACKAGING

**Abstract:** Materials for making Tetra Brik packaging are laminates projected and manufactured to meet precisely defined technical and esthetic requirements. Tetra Brik packaging is characterized by extremely original shaping and functionality. It protects the nutritional value of the product from the harmful effects of air and light, preserves all his original properties, allows long-term product keeping and easier handling in whole process of storage, transport and distribution.

**Key words:** Tetra Brik Aseptic, multilayered material, barrier properties.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

### 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## LEAN PROIZVODNJA - POLAZ ZA USPEŠNU PRIMENU

Saša RANDJELOVIĆ<sup>1\*</sup>, Aleksandar ĐORĐEVIĆ<sup>2</sup>, Milan ERIĆ<sup>3</sup>, Slobodan MITROVIĆ<sup>3</sup>, Miladin STEFANOVIĆ<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Hexagon Manufacturing Intelligence Office Srbija, sasa.randjelovic@hexagon.com;

<sup>2</sup>Visoka tehnička škola strukovnih studija, Srbija, adjordjevic@kg.ac.rs

<sup>3</sup>Fakultet inženjerskih nauka, Srbija, ericmkg.ac.rs, boban@kg.ac.rs, miladin@kg.ac.rs,

**Apstrakt:** U periodu posle 1990. godine širom sveta je primetna tranzicija sa sistema serijske ili masovne proizvodnje na integrisane proizvodne sisteme. Shvatajući potencijal integrisanih proizvodnih sistema kod kojih se ostvaruju smanjeni troškovi izbegavanjem otpada mnoga preduzeća slede primer Toyota-e i pokušavaju da poboljšaju performanse svojih proizvodnih sistema primenjivanjem koncepata i metoda Lean proizvodnje. Koncept Lean proizvodnje nudi strategiju kojom se eliminiše otpad, postiže visoki kvalitet procesa i proizvoda i smanjuje vreme koje je potrebno da se novi proizvod nađe na tržištu. Ovakav koncept je uspešno primenjen kod velikih preduzeća dok se mala i srednja preduzeća susreću sa problemima kada pokušavaju da implementiraju koncepte i metode Lean proizvodnje. To je prouzrokovano različitim efektima Lean metoda na proizvodnju u zavisnosti od uslova u proizvodnji koji se odnose na različitost proizvoda i njihove količine, varijacije procesa, vremena trajanja procesa itd. S obzirom da u Srbiji gotovo da ne postoji preduzeće koje koristi prednosti koncepta Lean proizvodnje ovaj rad predstavlja kratki pregled istorijata nastanka Lean proizvodnje, njenih osnovnih ciljeva i principa i tehnika i alata koji se pri tome koriste kao i pregled najznačajnije literature koja se bavi ovom tematikom.

**Ključne reči:** Lean proizvodnja, otpad, VSM, JIT, kanban, 5S, Poka-Yoke, TQM, TPM

### 1. UVOD

Lean proizvodnja je proizvodni sistem, odnosno filozofija, koji je originalno razvila Toyota pod nazivom Toyota Production System (TPS), danas takav sistem prilagođen svojim potrebama i promenjenog imena (n.pr. Delphi Manufacturing System) koriste mnogi proizvođači širom sveta. Lean je proizvodna praksa kojom se smatra da je trošenje resursa za postizanje bilo kojeg cilja, osim dodavanja vrednosti proizvodu namenjenom kupcu, rasipničko i samim tim takvi procesi postaju meta eliminacije. Posmatrano iz perspektive potrošača, koji koristi proizvod ili uslugu, vrednost se definiše kao bilo koja akcija ili

proces koji potrošač želi da plati. Lean proizvodnja je varijacija na temu efikasnosti baziranoj na optimizaciji toka procesa, ona predstavlja današnji primer teme kojoj je u ljudskoj istoriji posvećeno veoma mnogo vremena a odnosi se na povećanje efikasnosti, smanjenje otpada i korišćenje empirijskih metoda za donošenje odluka o tome šta treba činiti sa stvarima. Kao takva ona je samo poglavje u širem kontekstu koji uključuje ideje kao što su narodne mudrosti o štedljivosti, studije vremena, studije pokreta i njihove efikasnosti, Taylor-izam i Ford-izam. Lean proizvodnja se često smatra preciznijom verzijom predhodnih radova poznatih lidera,

kao što su Taylor i Ford, s tim što su u obzir uzete i greške koje su oni napravili.

Principi Lean proizvodnje dolaze iz Japanske proizvodne industrije, termin Lean je prvi upotrebio John Krafcik 1988. godine u radu „Triumph of the Lean Production System“ (1). Pre nego što je došao na MIT Krafcik je bio inženjer kontrole u Toyota California a svoja istraživanja je nastavio u International Motor Vehicle Program (IMVP) na MIT-u. James Womack, Daniel Jones i Daniel Roos su na osnovu rada u IMVP objavili knjigu koja je postala svetski bestseler „The Machine That Changed the World“ (2). Potpuni pregled rada IMVP kao i način na koji je skovan termin Lean je dao Holweg 2007. godine (3). Po ovim autorima Lean proizvodnja je set alata (mapiranje toka vrednosti, 5S, Kanban, poka-yoke) koji pomažu u identifikaciji i eliminaciji otpada (muda), čijom se eliminacijom smanjuju troškovi proizvodnje i vreme izrade a pri tome se povećava kvalitet.

Postoji i drugi pristup, koji je promovisala Toyota, u kome se fokusira na poboljšanje toka rada (glatki protok), eliminisanju neujednačenost (mura) u sistemu a ne samo na težnju ka eliminisanju otpada.

Razlika između ova dva pristupa je samo u načinu eliminacije otpada. Primenom kontinualnog protoka se eliminiše otpad sam po sebi ali se zadržavaju problemi kvaliteta koji su već postojali. Prednost ovakvog pristupa je u tome što se dobija šira perspektiva sistema dok kod fokusiranja na otklanjanje otpada ponekad dolazi do pogrešnih prepostavki perspektive sistema. Oba pristupa se mogu posmatrati kao niz labavo povezanih konkurentnih principa koji imaju isti cilj a to je redukcija troškova eliminacijom otpada. U ove principe spadaju pull procesing, perfect first-time quality, minimiziranje otpada, kontinualna poboljšanja, fleksibilnost, stvaranje i održavanje veza sa dobavljačima, autonomation, uravnotežavanje opterećenja i toka proizvodnje i vizuelna kontrola. Drugi pristup je pragmatičan, s obzirom da je nastao 1948. godine, i rezultat je

kontinualnih poboljšanja u okviru Toyota proizvodnih pogona.

Lean proizvodnja je revolucija proizvodnog procesa. Bitno je naglasiti da ona ne predstavlja fino podešene postojeće proizvodne procese već je potpuno novi koncept. Konceptualno se razlikuje od tradicionalnih proizvodnih procesa, n.pr. tradicionalni proizvodni proces je zasnovan na inventaru dok se u novom konceptu postavlja pitanje uloge inventara i definiše ga kao otpad sam po sebi i u isto vreme reflektuje nesavršenosti koje sistem ima. Princip na kome funkcioniše ovakav koncept je veoma jednostavan. Na primer, ovakav koncept identificuje činjenicu da potrošač neće plaćati greške već samo vrednost proizvoda ili usluge koju dobija. Menja se način kojim ljudi gledaju na proizvodne procese, naterao je ljudi da na vrednost robe ili usluge gledaju sa tačke gledišta kupca a ne sa interne tačke gledišta proizvođača.

## 2. DEFINICIJA OTPADA

Kao što je već pomenuto u konceptu Lean proizvodnje otpadom se smatra sve što ne dodaje vrednost konačnom proizvodu (4). Originalno u Toyota Taiichi Ohno i Dr Sheigo Shingo su identificovali tri vrste otpada: muda (japanska reč koja označava rasipničku aktivnost), muri (nerazumnost) i mura (neujednačenost). Primena Lean koncepta u mnogim preduzećima se uglavnom svodi na eliminaciju prve vrste otpada koja obuhvata 7 različitih otpada, eliminacijom bar jednog od njih se utiče i na druge otpade a samim tim i na ceo sistem:

Transport. Nepotrebno kretanje radnog komada za vreme proizvodnog procesa. Transport ne dodaje nikakvu vrednost konačnom proizvodu, nepotrebnim transportom se može oštetići radni komad, povećati trajanje celokupnog procesa. Samim postojanjem potrebe za transportom pojavljuju se i troškovi koji se tiču samog transporta a odnose se na održavanje inventara koji se koristi za transport, gorivo itd. Ovaj otpad se može eliminisati redizajnom celokupnog radnog prostora i odgovarajućim rasporedom mašina u njemu.

Inventar. Posedovanje prekomernog inventara je rasipničko zato što mašine koje nisu

iskorišćene ne daju nikakvu vrednost konačnom proizvodu a pored toga to su uglavnom investicije koje zahtevaju veće količine novca. Ovo se ne odnosi samo na mašine već i na gomilanje zaliha između operacija ili zaliha neprodatog konačnog proizvoda. Sa ovim u vezi postoji engleski termin Work in Progress (WIP) , koji takođe spada u ovu kategoriju otpada, i on je direktno povezan sa prekomernom proizvodnjom i čekanjem. WIP je „ogledalo“ otpada koji postoje u sistemu. Svrstan je u otpad iz više razloga, on blokira novac u formi nedovršenih proizvoda, smanjuje fleksibilnost celog sistema i skriva moguća odstupanja od propisanog kvaliteta.

**Kretanje.** Prekomerno kretanje koje ljudi ili oprema izvode kako bi se obavila neka operacija. Ovaj otpad se često previdi. Prilikom obavljanja određenog posla ljudi ponavljaju svoje pokrete, premeštaju radni komad sa jednog mesta na drugo, savijaju se kako bi ga dohvatali ili se mašine premešta iz jednog u drugi radni položaj. Ukoliko se uradi studija vremena potrebnog za svaku operaciju na svakom radnom mestu primetiće se da je procenat nepotrebnih pokreta veoma visok. Razlog za prekomerno kretanje nekada su banalne stvari kao što su osvetljenje, neergonomski stolice, nepravilan raspored alata, odnosno neprimereno organizovano radno mesto. Ovakvo radno mesto dovodi do brzog zamora ljudi i mogućnosti povreda na radnom mestu. Kako bi se smanjila ova vrsta otpada preporučuje se detaljna studija svakog radnog mesta i nakon toga njihova reorganizacija kako bi efikasnost svakog radnog mesta ponaosob postala veća. Ponekad se uvođenjem jednostavnih promena, kao što je na primer uvođenje ergonomskih stolica sa točkovima, mogu postići velike uštede u vremenu potrebnom za obavljanje pojedinih operacija.

**Čekanje.** Čekanje na sledeći korak u proizvodnji. Studije su pokazale da kod serijske proizvodnje 90% vremena dobra čekaju da budu procesirana, što znači da kada ne bi bilo čekanja proizvod bi mogao da se završi za samo jednu desetinu vremena koje se troši za proizvodnju. Pomenuto je već da se kao posledica čekanja pojavljuje WIP.

Prekomerna proizvodnja. Ova vrsta otpada se u konvencionalnom razmišljanju ne smatra otpadom ali ukoliko postoji proizvod koji se ne može prodati onda on definitivno predstavlja otpad. Proizvodnjom proizvoda ukoliko za njih na tržištu ne postoji tražnja se gomilaju troškovi. Posmatrano sa šire tačke gledišta prekomerna proizvodnja je isto kao i proizvodnja proizvoda ili usluge pre nego što se za njima pojavi potreba. Lean konceptom, kao što je već rečeno, se prednost daje pull proizvodnji, što znači da čim se proizvod završi on će odmah biti isporučen i prodat na tržištu. Prekomernom proizvodnjom se remeti ta relacija pa je onda potrebno da se na tržištu stvori veštačka tražnja za tim proizvodom korišćenjem različitih marketinških metoda, što stvara nove troškove. Posmatrano u užem smislu, prekomerna proizvodnja može značiti i proizvodnju dela proizvoda koji trenutno nije tražen na montažnoj traci ili u procesu posle njega. U oba slučaja je potrebno negde skladištiti prekomerno proizvedene delove ili ceo proizvod što opet uvećava troškove.

Prekomerno procesiranje. To je posledica korišćenja neadekvatnih alata ili grešaka prilikom koncipiranja proizvoda zbog nejasnih potreba potrošača. Ovakav otpad se može smanjiti korišćenjem adekvatnog alata za odgovarajuću operaciju, to ne znači da se trebaju koristiti skupi i komplikovani alati. Toyota je ovakav otpad smanjila uvođenjem automatizacije pojedinih radnih mesta a ne celih proizvodnih linija. Iskustva iz Toyota pokazuju da se prilikom automatizovanja pojedinih operacija najbolji rezultati postižu ako se prilikom uvođenja novih automatizovanih mašina vrše konsultacije sa radnicima koji su predhodno obavljali poslove koji se sada automatizuju.

**Defekti.** Ovaj otpad obuhvata sve aktivnosti koje su povezane sa otkrivanjem i otklanjanjem defekata koji nastaju u proizvodnji. Ukoliko se pojave defektni proizvodi onda je repromaterijal, vreme i trud koji su uloženi u njegovu izradu otpad. Najgora varijanta je da defektni proizvod dođe na tržište, na taj način se ne baca samo repromaterijal, vreme i trud već i imidž preduzeća može biti narušen. Rešenje za otklanjanje ovakvog otpada može biti nabavka kvalitetnog repromaterijala, edukacija ljudskih

resursa, i najbitnije dizajniranje celog procesa proizvodnje tako da je proizvodnja moguća samo na jedan ispravan način.

Kasnije su ovoj listi otpada dodati i drugi otpadi kao proizvodnja proizvoda koji ne zadovoljava potrebe potrošača (5) ili neiskorišćenost ljudskih resursa itd., kompletan lista starih (originalnih 7 otpada) i novih otpada se može naći na drugom mestu (6).

### 3. OSNOVNI CILJEVI I PRINCIPI LEAN PROIZVODNJE

Osnovni ciljevi Lean proizvodnje se razlikuju u zavisnosti od autora. Po nekim autorima cilj je uvećanja profita organizacije (4, 7, 8) dok je po drugim cilj postići poboljšanja koja će se ticati kupaca (5, 9, 10). Najčešće pominjani ciljevi su: poboljšanje kvaliteta, kako bi preduzeće bilo kompetentno na tržištu mora razumeti želje potrošača i da na osnovu toga isplanira proizvodni proces koji će ispuniti njihova očekivanja; eliminacija otpada, otpadom se smatra svaka aktivnost koja troši vreme, resurse ili prostor preduzeća a ne dodaje vrednost proizvodu ili usluzi; skraćenje vremena, skraćenje vremena svih aktivnosti u proizvodnom procesu je najefektivniji način za smanjenje troškova i eliminaciju otpada; smanjenje ukupnih troškova, kako bi se smanjili ukupni troškovi preduzeće mora proizvoditi tačno onoliko kolika je potreba kupaca, na taj način se izbegava skladištenje.

Strateški elementi Lean proizvodnje mogu biti veoma kompleksni i oni obuhvataju više elemenata, identifikovana su četri različita pojma (11):

1. Lean kao stanje ili cilj (*Being Lean*)
2. Lean kao kontinualni proces promena (*Become Lean*)
3. Lean kao set alata i metoda (*Doing Lean/Toolbox Lean*)
4. Lean kao filozofija (*Lean Thinking*).

Lean proizvodnja funkcioniše na jednostavnom principu i bazirana je na sagledavanju ukupne slike o celom preduzeću. Po ovom principu preduzeće se posmatra kao jedna celina a ne kao skup zasebnih entiteta (konstrukcija, proizvodnja, nabavka...). Čak se i

optimizacija u pojedinim odeljenjima u Lean konceptu posmatra kao pretnja za celu organizaciju. Osnovni princip Lean proizvodnje je kontinualna proizvodnja na osnovu potražnje tržišta. Suština koncepta je kontinualno poboljšanje proizvoda i proizvodnje kao i eliminisanje aktivnosti koje ne dodaju vrednost proizvodu. Benefiti ovakvog koncepta su skraćenje vremena celog ciklusa proizvodnje, smanjenje inventara, povećanje produktivnosti i povećanje korišćenja kapitalne opreme preduzeća (11).

Kada se sagleda ukupna slika celog preduzeća potrebno je proučiti sve probleme, njihovi uzroke i pronaći rešenja za njih. Kada se otkrije uzrok i pronađe rešenje potrebno je primeniti ga i pratiti kako se to reflektuje na konačni ishod. Na ovaj način se problemi stalno otkrivaju i rešavaju što dovodi do cikličnih kontinualnih poboljšanja. Ovo je ciklični koncept Lean proizvodnje (*Kaizen*). Ovim konceptom se smatra da su sve aktivnosti međusobno povezane i da se poboljšanjem na jednom mestu u sistemu utiče na poboljšanje celog sistema.

### 4. TEHNIKE I ALATI LEAN PROIZVODNJE

U osnovi tehnika Lean proizvodnje se sastoji od 4 koraka: identifikovanje činjenice da postoje otpadi koji se trebaju otkloniti, analiza otpada i pronalaženje uzroka njihovog postojanja, pronalaženje rešenja za eliminisanje uzroka postojanja otpada i primena rešenja.

Kada se završe ova 4 koraka kreće se ponovo iz početka. U svakom od pomenutih koraka se koriste mnogi alati koji mogu pomoći postizanju ciljeva postavljenih u bilo kom koraku. U daljem tekstu će biti opisani pojedini najčešće korišćeni alati u Lean proizvodnji.

Mapiranje toga vrednosti (*Value Stream Mapping - VSM*) je vizuelni alat koji se koristi za vizuelizaciju i eliminaciju otpada u Lean proizvodnji. Međutim on se može koristiti i u drugim funkcijama organizacije, ne samo u proizvodnji, kao što su snabdevanje, lanac snabdevanja itd. Ovim alatom se mapiraju svi procesi i aktivnosti koje se izvode kako bi se određeni proizvod ili usluga materializovali. Mapiraju se svi procesi i aktivnosti od

narudžbine određenog proizvoda ili usluge do njihove prodaje na tržištu. Kada se izvrši mapiranje svih aktivnosti onda se one mogu podeliti u dve celine (12) na aktivnosti koje dodaju vrednost proizvodu i aktivnosti koje ne dodaju vrednost proizvodu. Nakon toga se aktivnosti koje ne dodaju vrednost konačnom proizvodu mogu podeliti na aktivnosti koje se mogu izbeći i na aktivnosti koje se ne mogu izbeći. Ovako mapirane aktivnosti predstavljaju trenutno stanje. Sledeći korak je postavljanje ciljeva odnosno određivanje vizije budućeg stanja. U finalnom koraku je potrebno napraviti novu mapu toka vrednosti u kojoj će se naći samo aktivnosti koje dodaju vrednost proizvodu i aktivnosti koje ne dodaju vrednost proizvodu a ne mogu se izbeći.

JIT (*Just in Time*) je kičma Lean proizvodnje. Inicijalno, JIT razvijen u Toyota, je bio namenjen unapređenju same proizvodnje zbog čega se i danas često koristi termin JIT proizvodnja. Međutim, JIT se sastoji od tri glavna dela (13): JIT nabavka, JIT proizvodnja i JIT distribucija. Cilj JIT nabavke je da se sav neophodan repromaterijal naručuje onda kada je to potrebno proizvodnji. Nabavka se vrši u manjim kontinualnim serijama što omogućuje kontinualni tok proizvodnje i istovremeno se smanjuju troškovi skladištenja i mogućnost degradacije repromaterijala u njima. Cilj JIT proizvodnje je proizvodnja samo kada je ona potrebna t.j. samo kada je naručena od kupaca. Ovo se odnosi i na procese u samoj fabrici, radni komadi se obrađuju samo kada su povučeni sa operacijom koja sledi posle. Posledica ovakve proizvodnje je smanjenje zaliha, smanjenje WIP-a i skraćenje vremena izrade, samim tim se povećava fleksibilnost cele organizacije. Cilj JIT distribucije je da se finalni proizvod ili usluga distribuira potrošačima kontinualno u malim količinama. Da bi se ovo postiglo potrebno je uspostaviti dobar sistem upravljanja transportnim sredstvima. Na ovaj način se izbegava skladištenje gotovih proizvoda a samim tim se smanjuju i troškovi koji su u vezi sa tim.

Jedna od fundamentalnih razlika ovakvog koncepta proizvodnje u odnosu na druge je rad u radnim celijama a ne na pokretnoj traci. Radna celija se najčešće organizuje u obliku latiničnog

slova U. U jednoj radnoj celiji je 3-12 radnika u zavisnosti od složenosti posla koji se obavlja u njoj i postoji onoliko radnih celija koliko je potrebno da bi se ceo proizvod doveo do svog konačnog oblika. Radnici u ovakvim celijama su najčešće sposobni da obavljaju više različitih poslova u skladu sa potrebama. Najveća prednost ovakve organizacije je manja potreba za transportom između radnih stanica kao i manje pokreta potrebnih da se realizuje određena operacija. Na ovaj način se značajno smanjuje prekomerana proizvodnja i povećava se fleksibilnost prilikom prelaska sa proizvodnje jedne vrste proizvoda na drugu.

Kanban je jedan od najpopularnijih alata Lean proizvodnje. Kanban se fokusira na smanjenje prekomerne proizvodnje i predstavlja veoma jednostavan i efektivni koncept. Postoje dva tipa kanbana: povratni Kanban i proizvodni Kanban. Povratni Kanban predstavlja potrebe procesa u odnosu na proces koji je pre njega. Sa druge strane proizvodni Kanban specifikuje količinu proizvoda koji se trebaju proizvesti u sledećem proizvodnom koraku od dobara koje se proizvode u predhodnom koraku. Kanban je najčešće u obliku kartica koje sadrže detalje o proizvodu, kvantitet i lokaciju skladištenja određenog proizvoda. Mnoge kompanije su razvile elektronske sisteme za Kanban (14, 15), odnosno E-Kanban sisteme, kojima se eliminisu moguće greške prilikom unosa podataka na kartice kao i mogućnost gubljenja kartica.

Najčešće korišćeni alat za standardizaciju u Lean proizvodnji je koncept 5S. Ovu metodologiju organizacije radnog okruženja je razvio Hiroyuki Hirano (16), i predstavlja strukturu programa poboljšanja. Identifikovao je 5 jasno uočljivih koraka koji se nadovezuju jedan na drugog: *Seiri* (sortiranje), *Seiton* (ispravljanje, dovođenje u red), *Seiso* (sistemsko čišćenje), *Seiketsu* (standardizacija) i *Shitsuke* (održivost). U praksi se pokazalo da je za uspeh sprovođenja 5S u organizaciji potrebno da svi shvate zbog čega se on koristi i šta su očekivani ciljevi (17).

Poka-yoke je alat koji pomaže operaterima na mašinama da izbegnu greške u proizvodnji. Cilj ovog alata je eliminisanje defekata prevencijom, nihovo eliminisanje i motrenje na moguće ljudske greške. *Shigeo Shingo* je prepoznao tri

tipova poka-yoka za detektovanje i sprečavanje pojave grešaka u proizvodnji (18): metoda kontakta (identifikuju se defekti testiranjem oblika, veličine, boje ili drugih fizičkih atributa), metoda konstantnog broja (Fixed Value Method) (upozorava operatera ukoliko nije napravljen određeni broj pokreta), sekventna metoda (Motion step/Sequent Method) (određuje da li se prate propisani koraci u procesu). Greške u proizvodnom sistemu su neizbežne ali pravilnom upotreboom poka-yoka greške se mogu brzo otkriti i otkloniti što će rezultovati smanjenjem troškova koji su nastajali kao posledica grešaka (19).

Proizvodni sistem u konceptu Lean proizvodnje funkcioniše u ritmu koji postavljaju potrošači. Ovaj ritam je poznat kao vreme trajanja ciklusa (Takt Time odnosno Cycle Time). Vreme trajanja ciklusa se računa za bilo koju aktivnost u poslovnom okruženju a najčešće za proizvodne aktivnosti kod kojih se proizvod kreće duž proizvodne linije.

TQM je integrativna filozofija kojom se teži kontinualnom unapređivanju kvaliteta proizvodnih procesa i proizvoda (20). Funkcioniše na principu da kvalitet proizvodnih procesa i proizvoda zavisi od svakog ko je uključen u proizvodnju i potrošnju ponuđenog proizvoda. U šest empirijskih studija (21) je identifikovano 9 TQM praksi: razvoj proizvoda u timovima koji će obuhvatati predstavnike svih funkcija u jednoj organizaciji, upravljanje procesom, upravljanje lancem snabdevanja, uzimanje u obzir potrošačkih potreba, informacije i povratne informacije, liderstvo, strateško planiranje, obuka odnosno edukacija u svim funkcijama organizacije i uključivanje zaposlenih u procese donošenja odluka. Lean proizvodnja zavisi od kontinualnog toka vrednosti pa se svaki prekid u radu smatra otpadom. Najčešće do prekida rada dolazi zbog kvarova na mašinama i zbog toga je funkcija održavanja u preduzeću koji koristi ovakav koncept proizvodnje veoma značajna. Ukoliko dođe do prekida rada na jednoj mašini to može da prouzrokuje prestanak rada cele proizvodne linije a s obzirom da u ovakovom konceptu proizvodnje ne postoji WIP to znači da vreme koje je izgubljeno zbog prekida rada predstavlja

otpad. Alat kojim se obezbeđuje kontinualan tok rada proizvodne linije je TPM.

SMED (Single Minute Exchange of Die) alatom se obezbeđuje brza i efikasna konverzija proizvodnih procesa. Fraza „single minute“ na znači da se zamena alata vrši za jedan minut već da to treba trajati manje od 10 minuta. Alat je razvio Shigeo Shingo (22), tokom 50-ih i 60-ih godina 20-og veka, konsultujući se sa organizacijama koje su proizvodile automobile, uključujući i Toyota, kod kojih je dolazilo do prekida toka rada zbog potrebe da se na pojedinim mestima u proizvodnom sistemu vrše zamene komplikovanih alata. Prepoznato je 8 tehniku koje se trebaju razmotriti prilikom implementacije SMED-a: odvajanje internih i eksternih operacija podešavanja, konverzija internih operacija podešavanja u eksterne, standardizacija funkcije, korišćenje funkcionalnih stega, korišćenje funkcionalnih otvora za pričvršćivanje alata, usvajanje paralelnih operacija, eliminisanje podešavanja i mehanizacija.

## 5. ZAKLJUČAK

Lean proizvodnja je koncept i njegova implementacija u industriji se treba pažljivo analizirati i segmentisati u niz konkretnih faza i akcija. Sa tim u vezi su identifikovani koraci koji se trebaju slediti kako bi se došlo do idealnog Lean proizvodnog sistema (23). Lean proizvodnja, kao potpuno novi koncept razmišljanja, se pokazala u praksi kao veoma uspešna pa su principi kontinualnog usavršavanja proizvodnog sistema i neprekidnog traženja načina za potpunu eliminaciju otpada iz jedne organizacije pronašli svoju primenu u mnogim drugim oblastima. U najmanju ruku koncept redukcije, odnosno potpune eliminacije otpada, bi trebao biti prihvaćen u svakoj organizacionoj celini.

Ovaj rad je podržan projektom TR-35021 i III-44010, koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

## LITERATURA

- [1] Krafcik, John F. (1988); „Triumph of the Lean Production System“, Sloan Management Review  
30

- [2] Womack, J. P, Jones, D. T. & Daniel Roos (1990); „The Machine That Changed the World“
- [3] Holweg, Mathias (2007); „The Genealogy of Lean Production“, Journal of Operations Management 25
- [4] Ohno, T. (1988); „Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production“, Portland: Productivity Press
- [5] Womack, J. P. & Jones, D. T. (2003): „Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation“, New York Free Press
- [6] Bicheno, J. & Holweg, M. (2009): „The Lean Toolbox“, PICSIE Books
- [7] Feld, W.M. (2001); „Lean Manufacturing: Tools, Techniques and How to Use Them“, Boca Raton: St, Lucie Press
- [8] Liker J.K. (2004); „The Toyota Way: 14 Management Principles From the World's Greatest Manufacturer“, New York: McGraw Hill
- [9] Dennis, P. (2002); „Lean Production Simplified: A Plain Language Guide to the World's Most Powerfull Production System“, New York: Productivity Press
- [10] Bicheno, J. (2004): „The New Lean Toolbox: Towards Fast, Flexible Flow“, Buckingham: PICSIE Books
- [11] Petersen, J. (2009): „Defining Lean Production: Some Conceptual and Practical Issues“, The TQM Jounal 21
- [12] Rother, Mike (2009): „Toyota kata“, McGraw Hill
- [13] Hirano, Hiroyuki & Makota, Furuya (2006): „JIT is Flow: Practice and Principles of Lean Manufacturing“, PCS Press Inc.
- [14] Vernyi, Bruce & Vinus, Tonya (2005): „Easing into E-Kanban“, IndustryWeek, Retrieved April 12 2008
- [15] Drickhamer, David (2005): „The Kanban Evolution“, Material Handling Management
- [16] Hirano, Hiroyuki (1996): „5 Pillars of the Visual Workspace“, Productivity Press
- [17] Eaton, Mark & Carpenter, Keith: „5S for Everyone“, UK Institute of Operations Management
- [18] Shingo, Shigeo (2009): „Poka Yoke or Mistake Proofing“, The Quality Portal
- [19] Shingo, Shigeo (2009): „Pokayoke“, The Manufacturing Advisory Service in the South West (MAS-SW)
- [20] Ahire, S. L. (1997): „Management Science - Total Quality Management Interfaces: An Integrative Framework“, Interfaces 27
- [21] Cua, K. O., McKone, K. E. & Shroeder, R. G. (2001): „Relationships Between Implementation of TQM, JIT and TPM and Manufacturing Performance“, Jounal of Operations Management 28
- [22] Shingo, Shigeo (1985): „A Revolution in Manufacturing: The SMED System“, Productivity Press
- [23] Akin O. Akinlawon, Managing Director, Manufacturing Solutions/Industrial Automation Group, Comdisco Inc.: „Thinking of Lean Manufacturing Systems“

## LEAN PRODUCTION – AN ENTRANCE FOR SUCCESSFUL APPLICATION

**Abstract:** In the period after 1990, the transition from the serial or mass production system to an integrated production systems is noticeable throughout the world. Recognizing the potential of integrated production systems where with the waste avoidance reduced costs occur, many companies follow the example of Toyota and try to improve the performance of their production systems by applying the concepts and methods of Lean production. The Lean Manufacturing concept offers a strategy that eliminates waste, achieves high quality processes and products, and reduces the time it takes for the new product to make to the market. Such a concept has been successfully applied within large enterprises, while small and medium enterprises are faced with problems when trying to implement concepts and methods of Lean production. This is due to the different effects of the Lean production method, depending on the production conditions that relate to the product's diversity and their quantity, process variations, process time, etc. Considering that there is almost no company in Serbia that uses the advantages of the Lean production concept, this paper presents a brief overview of the history of the Lean production, its basic goals and principles and the techniques and tools used, as well as the overview of the most important literature dealing with this topic.

**Keywords:** Lean production, waste, VSM, JIT, kanban, 5S, Poka-Yoke, TQM, TPM



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## THE FORWARD EXTRUSION PROCESS ANALYSIS BASED ON PLASTIC DEFORMATION OF METAL GRAIN STRUCTURE

**Saša RANĐELOVIĆ<sup>1</sup>, Miloš MADIĆ<sup>1</sup>, Mladomir MILUTINOVIĆ<sup>2</sup>, Dejan TANIKIĆ<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>University of Nis, Faculty of Mechanical Engineering, Serbia, sassa@masfak.ni.ac.rs;

<sup>2</sup>University of Novi Sad, Faculty of Technical Science, Serbia, mladomil@uns.ac.rs

<sup>3</sup>University of Belgrade, Technical Faculty in Bor, Serbia, dtanikic@tfbor.bg.ac.rs

**Abstract:** The determination of optimal values of parameters for achieving the desired metal forming process performances is of prime importance in real industrial conditions. In the defined production conditions, tool design and its geometry (die angle, lengths of certain zones in the die, deformation force transfer mode, die rigidity etc.), which are developed by tool designers using CAD software and FEM analysis, have considerable effects on process performance. On the other hand, complex extrusion temperature, die temperature, deformation rate, deformation degree, lubrication conditions and contact friction are the main controllable parameters of the extrusion process..

**Keywords:** forward extrusion, grain structure, texture, deformation degree.

### 1. INTRODUCTION

The basis for a detailed analysis of strain and stress in the deformation zone and process modeling and optimization can be derived from the microstructure of the metal continuum. The predictions of the evolution of microstructure and establishment of correlations with the process parameters, in the variety of materials, are an active field of research and subject matter of many technological and scientific investigations based on different approaches to the mechanical continuum. Choi et al. [1] investigated the influence of the hard martensite particles on the orientation gradients of the soft ferrite phase within dual phase steel under plane-strain flange deformation during a cup deep-drawing process. The presented study analyzed the effects of ferrite orientation on the orientation

gradients in the vicinity of a martensite particle, and relatively stable, metastable and unstable orientations were considered in crystal plasticity finite element method as the initial orientations of the ferrite matrix. In the approach proposed by Berbenni et al. [2], grain size effects on the macroscopic plastic flow stress of heterogeneous materials were studied using a systematic statistical method, assuming a given grain size distribution with higher moments than the mean grain size.

The viscoplastic strain rate was described by an isotropic power law including the grain diameter through the reference stress. Numerical results firstly displayed that the plastic flow stress of the material depends on both the mean grain size and the grain size dispersion of distribution. Sarma and Dawson [3] proposed the polycrystalline model constructed using a different spatial arrangement of the same set of crystals, so as

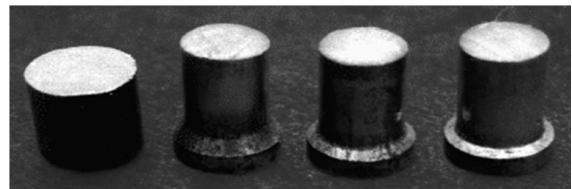
to alter the neighbourhood of each crystal. Deformation rates data for all crystals obtained from these simulations were analyzed using the method of empirical eigenfunctions and using statistical methods. Each finite element was treated as a single crystal, whose deformation is influenced by its interaction with neighbouring crystals. Brahme et al. [4] used texture data, in the form of fibre texture intensities, as well as carbon content, carbide size and amount of rolling reduction as input parameters to the ANN model. The subject of this study is the methodological approach for the analysis of grain structure and texture deformations in the forward extrusion process of low carbon steel, AISI C15 (C 0.13-0.18; Mn 0.3-0.6; P 0.04; S 0.04), at the ambient temperature. The method assumes that on the level of grain structure there are always deformed grains whose deformation degree can be approximated by the ideal grain. On the basis of these deformations, one can develop an appropriate mathematical model in the form of a trained neural network. In such a way, one can predict the deformation degree for any die angle, i.e. one can determine possible deformation states within the extrusion technology as well as within other metal forming processes.

## 2. THE BASE OF EXPERIMENTAL INVESTIGATION

The basic idea of this research is based upon a well-known method, called viso plasticity, but with a new approach. It is known that this method, in its experimental part, requires physical separation of the billet and placing the coordinate networks by chemical etching, for the purpose of monitoring the degrees of deformation [5,6].

The starting assumption is that the microstructure of the metals being deformed can itself be used for analysis (low carbon steel, AISI C15,  $R_m = 325 \text{ N/mm}^2$ ;  $\varphi_m = 0.22$ ). The mere forward extrusion process, with the degree of deformation  $\varphi = 0.22$ , and with the coefficient of contact friction  $\mu=0.15$ , was performed in experimental tools with variable

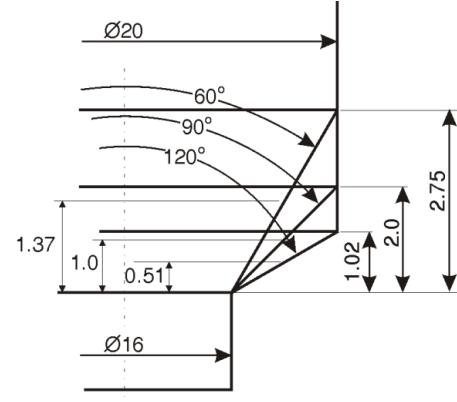
central die angles  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  and  $120^\circ$  on a mechanical cam press with the extrusion force from 500 to 700 kN. Namely, as the metal grain microstructure, though of a very irregular shape, gets deformed under the impact of the extrusion force and of the tool walls, it obtains an oriented structure - deformation texture [6]. This points to the fact that the grains of the given metal sample being deformed also undergo a deformation in the proportion to the external load conditions. Moreover, on the basis of the parameters of the grain material structure at the cross-section before and after deformation, the data about magnitude and degree of the deformation can be obtained at the cross-section points of the deformed volume.

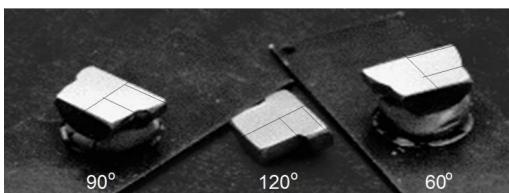


**Figure 1.** The billet and finished parts with different extrusion angles

The determination of these displacements, at the level of the grain microstructure and due to the plasticity deforming, is done on the basis of the microstructure picture at the already defined measurement places at the meridian section of the extruded billet with a diverse angle of the cone die (Fig.1).

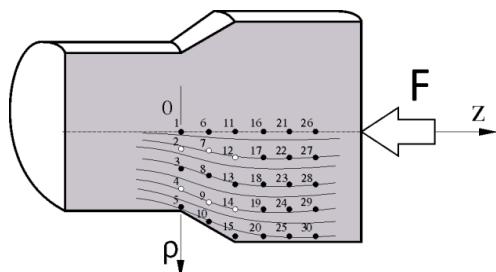
The die angle is located within the range of  $60^\circ$  (Fig. 2). The choice and definition of the measurement places at the cross-section of the extruded and deformed billet must satisfy several criteria.





**Figure 2.** Geometry of the deformation zone in the meridian cross section and workpieces after polishing

Since it is an axisymmetrical stress and strain state, it is sufficient, for observing and following deformations, to remain in the midst of the meridian section in the characteristic points on the flow lines (Fig. 3).



**Figure 3.** Recording places at the meridian cross section

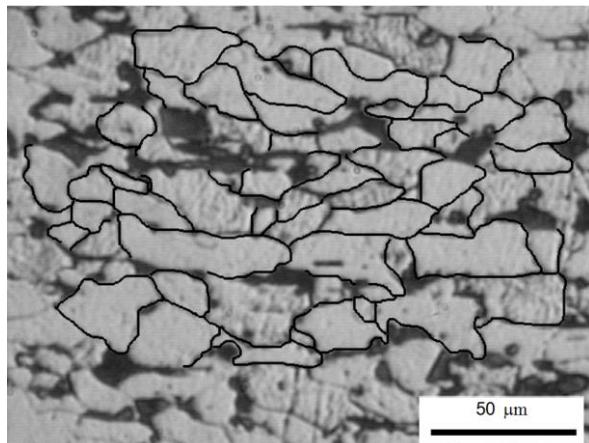
### 3. MICRODEFORMATIONS AT THE GRAIN LEVEL

The complexity of the problem itself springs from the fact that the objects dealt with are of irregular and diverse shapes both in the space and in the section plane [7]. The method requires a great number of objects, that is, measurement of a great amount of grains at the cross-section of the deformed sample [8]. Likewise, since the grain microstructure represents tiny objects to be measured the order of their size being a hundredth part of a millimeter - such measurement places at the cross-section of the deformed sample have to be much more numerous, in this case 30, in order to have an insight into the degree of deformation throughout the material volume.

In order to solve the presented problem in the best possible way, that is, to obtain as accurate results as possible, a software solution was used. Consequently, the data about the picture that can be completely statistically processed are obtained and they

can serve as the basis for deriving the required conclusions [9].

For an analysis of the metal grain microstructure, the input information is a picture of that structure at the selected place, taken by recording the sample (Fig. 3) with a high resolution CCD camera. In the picture thus obtained, it is easy to distinguish lighter fields of soft ferrite structure (88%) as well as darker fields of cementite (12%) (Figs. 4). The transition between these fields in the picture represents a borderline of the grain microstructure.



**Figure 4-** Micrograin structure at the die angle of 120°, recording place 11

The software recognition of the borderline between the grains represents an important step in the definition of the picture that will later be analyzed. In the obtained pictures of the grain structure there are great irregularities in shape, size and grain area so that the process of the grain separation is primarily conducted with respect to parts of the grain borderlines that are already clearly distinguished in the picture and in the previously made structure pictures. Thus, the picture of the sample structure at the chosen recording place is obtained and can be analyzed according to the given pre-determined criteria.

Since the pictures of the grain structure can be considerably complex with great irregularities, the criteria must be defined against which the object recognition will be carried out. The monitoring of the metal grain structure as well as analysis and comparison belong to the geometric analysis. This means

**Table 1.** Geometric characteristics of an ideal grain at place No. 4, 60°

Stats	Area	Aspect	Ar/Bo	Box	Angle	Maj. Ax	Min. Ax	Av. Dia.	Perim.	Roun.	Per Ar
	µm <sup>2</sup>			µm <sup>2</sup>	°	µm	µm	µm	µm <sup>2</sup>		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Min	515	1.417	0.283	1.167	71.70	54.54	11.56	28.605	121.184	1.34	0.001
(Obj.#)	38	29	8	29	29	18	38	40	40	24	38
Max	7252	5.783	0.768	4.307	38.71	176.4	75.45	92.05	427.19	5.50	0.023
(Obj.#)	35	12	47	38	41	13	29	35	27	8	35
Range	6737	4.366	0.484	3.14	57.1	121.8	63.88	63.44	306.01	4.15	0.021
Mean	3087	2.923	0.553	2.062	104.67	102.97	37.64	57.99	266.09	2.05	0.009
Std.Dev	1742	0.916	0.107	0.649	13.25	32.04	13.17	15.37	80.215	0.63	0.005
Sum	15435	146.15	27.64	103.1	5233.7	5148.8	1882.4	2899.9	13304.9	102.8	0.498
Samples	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50

that, at the grain level as the basic and initial form of observation, it is necessary to analyze changes in of the geometric parameters through which the sizes of the grain deformations can be given later. The number of parameters that can be chosen in the software is great and it can serve for very detailed analyses (Table 1).

#### 4. CONCLUSIONS

The methodological approach proposed in this study enables a stress strain analysis within the material, regardless of the forming process. Any deforming procedure will cause changes in the material microstructure. This fact itself points to the conclusion that the material with its microstructure will always "contain" the information about the load magnitude and size at the grain microstructure level. Furthermore, the advantage of the proposed approach is that it enables an analysis of the microdeformations of metal parts, measurement and analysis of the deformation texture parameters on the basis of which one can train a neural network.

#### REFERENCES

- [1] S. H. Choi, S. H. Han, K. G. Chin: Simulation of orientation gradients in a ferrite matrix containing hard martensite under plane-strain flange deformation, *Acta Materialia*, Vol. 57, No. 6, pp. 1947–1958, 2009.
- [2] S. Berbenni, V. Favier, M. Berveiller, Micro-macro modelling of the effects of the grain size distribution on the plastic flow stress of heterogeneous materials. *Computer Materials Science*, Vol. 39, No.1, pp. 96–105, 2007.
- [3] G. B. Sarma, P. R. Dawson: Effects of interactions among crystals on the inhomogeneous deformations of polycrystals. *Acta Materialia*, Vol. 44, No. 5, pp. 1937–1953, 1996.
- [4] A. Brahme, M. Winning, D. Raabe: Prediction of cold rolling texture of steels using an artificial neural network. *Computer Materials Science*, vVol. 46, No. 4, pp. 800–804, 2009.
- [5] S. Randelović, V. Stoiljković: Analysis of plastic deformation on the basis the grain microdeformation in *Proceedings of 6<sup>th</sup> ICTP*, 1999, Nuremberg, Germany.
- [6] S. Randelović, M. Madić, M. Milutinović, D. Tanikić: Methodological approach for the texture deformation analysis in the cold extrusion process, *The International Journal Advanced manufacturing engineering*, Vol. 92, pp. 3593-3603, 2017.
- [7] K. Lange: *Handbook of metal forming*. McGraw Hill, New York, 1998.
- [8] B.O. Oyekanmi, T.A. Hughes, A.N. Bramley: A microstructural evaluation technique for deformation studies in metal forming processes, *Journal of Materials Processing Technologz*, Vol. 21, No. 1, pp. 79–89, 1990.
- [9] H. Schumann: *Metallographie*, Deutcher Verlag fur Grundstoffindustrie, Stuttgart, 1990.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## BARRIERS FOR IMPROVEMENT OF TRADITIONAL INDUSTRIAL SYSTEMS BASED ON AUTONOMOUS MAINTENANCE

Marija SAVKOVIĆ<sup>1\*</sup>, Marko ĐAPAN<sup>1</sup>, Ivan MAČUŽIĆ<sup>1</sup>, Petar TODOROVIĆ<sup>1</sup>, Milan RADENKOVIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, [marijasavkovic@gmail.com](mailto:marijasavkovic@gmail.com), [djapan@kg.ac.rs](mailto:djapan@kg.ac.rs),  
[ivanm@kg.ac.rs](mailto:ivanm@kg.ac.rs), [petar@kg.ac.rs](mailto:petar@kg.ac.rs), [radenkovic@kg.ac.rs](mailto:radenkovic@kg.ac.rs)

\*Corresponding author: [marijasavkovic@gmail.com](mailto:marijasavkovic@gmail.com)

**Abstract:** This paper presents the role and importance of the implementation of autonomous maintenance (AM) in contemporary industrial systems and points to the barriers in implementation of AM in Metalac, Gornji Milanovac. Operators conducting autonomous maintenance by performing daily routine activities such as cleaning and inspection, lubrication, tightening and other routine maintenance tasks during working hours. In this way they gain experience and knowledge related to the work and diagnostics of machines—how machines work, what problems can occur and why, and how these problems can be prevented through early detection and removal of abnormalities. The role of autonomous maintenance in contemporary industrial systems is significant because autonomous maintenance can significantly improve the productivity, efficiency and profitability of industrial systems through the reduction of maintenance costs and losses in production. In this paper, we present the basic steps of implementation of autonomous maintenance. Then, the paper points out the challenges and analyzes barriers in improvement of traditional industrial systems based on the autonomous maintenance. The most important barriers in Metalac are: lack of leadership and management support, lack of understanding AM, lack of motivation and poor coordination between production and maintenance department and inadequate trainings. The paper points out that implementation of autonomous maintenance in Metalac includes dramatic changes of organizational culture, system management, ways of thinking of employees.

**Keywords:** Autonomous maintenance, barriers in the implementation of autonomous maintenance, challenges in implementation AM, the benefits of autonomous maintenance, improvement of traditional industrial systems

### 1. INTRODUCTION

Focusing on increase of volume of production, demanding high quality products, respecting timeliness of delivery and lowering product prices may cause a major change in the understanding the importance of maintenance in contemporary industrial systems.

Total Productive Maintenance (TPM) represents an innovative approach to maintenance, which optimizes machines efficiency, reduces maintenance costs, eliminating downtime and increasing machines reliability and productivity. Total Productive Maintenance is presented as a temple, which consists of eight columns (pillars): autonomous maintenance, kaizen, planned maintenance, quality, early management, training,

administrative area, safety, health and environmental protection [1].

Autonomous maintenance, as the first pillar of TPO, plays an important role in the strategy of maintaining in contemporary industrial system because autonomous maintenance can significantly improve the productivity, efficiency and profitability through the reduction of maintenance costs and losses, unplanned and planned downtimes in production.

Operators conducting autonomous maintenance by performing daily routine activities cleaning and inspection, lubrication, tightening and other routine maintenance tasks during working hours. Operators gain autonomy in management and control of the machines.

Autonomous maintenance promotes interaction between the operator and the equipment, and gives greater responsibility and authority to operators in carrying out these routine maintenance activities. According to the traditional maintenance, the maintenance is responsible for solving failures in the work of machines. Autonomous maintenance aims to establish the greatest possible involvement of the operator in the maintenance of these machines to achieve more efficiency and overall improvement of the work and prevent machine failures and unplanned downtime.

The main objectives of autonomous maintenance are: prevention of deterioration of machinery and equipment, maintenance of machines in an ideal situation and establishing the basic conditions necessary for the operation of the equipment.

This paper is organized as follows: after the introduction the authors give an overview of the literature in this area. In the third part, the concept of autonomous maintenance was presented. The focus of the fourth part is on the basic steps of implementation of autonomous maintenance. The fifth part points to the benefits of autonomous maintenance. The sixth part is focused on the challenges and barriers associated with the implementation of autonomous maintenance

in Metalac. In the last part, we present concluding observations.

## 2. LITERATURE REVIEW

The concept of autonomous maintenance is unjustly neglected in scientific research papers and with regard to it a small number of papers in this area was written. Also, it is necessary to point out that so far no papers have been written about barriers in implementing AM.

Literature relating to the autonomous maintenance can be classified into the literature as:

- Theoretical aspects of autonomous maintenance in the form of various guidebooks for operators and training materials for training of the operators, and
- Scientific research papers that focus on the scientific aspects presentation of role and importance of the implementation of the autonomous maintenance in a contemporary industrial systems and points out the benefits of the implementation of autonomous maintenance.

Authors *Rosmaini et al.* in the paper [2] show the framework for the implementation of autonomous maintenance in semiconductor industry. Focus of this paper is on pointing out the significance of operators training and representation of interpersonal relationships between employees at all levels (from top management to production workers) in carrying out the activities of autonomous maintenance.

In the paper [3], *Mugwindiri et al.* suggest a positive correlation between the successful implementation of autonomous maintenance and increase of profitability, productivity and efficiency [3]. Also they state that the implementation of autonomous maintenance involves dramatic changes in the organizational structure, organizational culture and system management.

In the paper [4], Molenda indicates the benefits of autonomous maintenance and shows the results of monitoring the number of

machine failures and failure duration before and after implementation of the autonomous maintenance. Wakjira Iyengaret et all. in the paper [5] presents basic steps in autonomous maintenance and indicates the results of the implementation of the autonomous maintenance.

### 3. AUTONOMOUS MAINTENANCE

Autonomous maintenance (Japanese name is Jishu Hozan.) refers to the transfer of regular activities and tasks in the maintenance of machinery and equipment on operators (Table 1.) [1,4].

**Table 1.** Daily AM checklist [2]

DAILY AUTONOMOUS MAINTENANCE CHECK LIST				
Equipment Number : _____	Product : _____	Performed by : _____	Verified by : _____	Date and time : _____
Performed				
Tick (✓) where applicable		Service Shift		
		A	B	C
<b>CLEANING</b>				
Housekeeping – all compartments				
Clean / wipe away dust dirt				
Check and sort tools on tools and locating pins surface				
Clean the ball retainer / gage				
Clean the vacuum ejector filter and the compartment				
Clean the sensor lenses				
Clean the part and recognise light diffuser				
Clean the load track and off-load track				
Clean base plate and transport mechanism				
Clean transport sliders				
Clean air cylinder shaft and slight shaft				
Clean the vacuum filter				
Drain off the mist / water separator				
Clean the guide post column, bush and die shoe				
<b>LUBRICATING</b>				
Wipe off excessive lubrication oil / grease				
Inspect for dirt, dust or leakage in and around the oil case				
Check contamination at lubricating point and surface				
Check the condition of lubrication (colour, thickness)				
Check lubrication level on tail stock and head stock				
Check oil case filter in good condition				
Tighten any loose screws				
Air blow off areas of filter and track				
Lubricate at the location as listed below:				
1) lead screw and fix screw part				
2) Pneumatic system				
3) Slider, Ball screw and shaft				
4) Apply at where applicable				
<b>INSPECTING</b>				
Check for sources of contaminant				
Check for loose screws and parts wear and tear				
Check for any abnormal sound				
Check the smoothness of parts on the moving mechanism				
Check for any vacuum / air leakage				
Check ventilations fans operation				
Check vacuum pad / gripper finger condition				
Check the transport arm pin and pattern recognize block pin				
Check the smoothness of arms, sliders and levers				
Check the smoothness of strips, plates and blocks				
Check the ball retainer / gage for deform or damaged				
Check for any tool with deep scratch or dent mark				
Check the vacuum switch; Off when leaks or blower off				
Check the smoothness of the stripper plates, clamping blocks.				
Check located pin condition for any chip ( Off, broken or bent)				

Autonomous maintenance increases the level of knowledge and skills operators, related to machine maintenance, in order to understand, manage and improve machines, equipment and processes.

Operators have the knowledge and skills for estimating the actual state of the machine and its segments at any time and to determine whether everything functions in the prescribed way. Based on their experience in working on machines in the previous period operators notice abnormalities in the work and understand the principles and procedures for improvement of machines and equipment [4,6]. Table 2 shows the levels of operators'

skills in autonomous maintenance according JIPM.

**Table 2.** Levels of operators skills in autonomous maintenance [7]

Level 1	<p>Recognize deterioration and improve equipment to prevent it</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Watch for and discover abnormalities in equipment operation and components</li> <li>• Understand the importance of proper lubrication and lubrication methods</li> <li>• Understanding the importance of cleaning (inspection) and proper cleaning methods</li> <li>• Understand the importance of contamination and the ability to make localized improvements</li> </ul>
Level 2	<p>Understand equipment structure and functions</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Understand what to look for when checking mechanism for normal operation</li> <li>• Clean and inspect to maintain equipment performance</li> <li>• Understand criteria for judging abnormalities</li> <li>• Understand for relationship between specific causes and specific abnormalities</li> <li>• Some ability to perform breakdown diagnosis</li> </ul>
Level 3	<p>Understand causes of equipment-induced quality defects</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Physically analyze problem-related phenomena</li> <li>• Understand the relationship between characteristics of quality and the equipment</li> <li>• Understand tolerance ranges for static and dynamic precision and how to measure such precision</li> <li>• Understand causal factors behind defects</li> </ul>
Level 4	<p>Perform routine repair on equipment</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Be able to replace parts</li> <li>• Understand life expectancy of parts</li> <li>• Be able to deduce causes of breakdown</li> </ul>

According Molenda, in the concept of autonomous maintenance the operator role changes from reactive to proactive maintenance of machines [4]. Autonomous maintenance eliminates the classical role of production and maintenance. According to the traditional approach, work of manufacturing is "to produce" and a work of maintaining is to "fix machines".

Operators usually do not care much about the equipment and machines, that are used because they view failure of machine as an opportunity for additional break while the technicians of maintenance do not reveal causes of problems and eliminate abnormalities.

A proactive approach involves the engagement technicians of maintenance to help operators in better maintaining of machines they serve, the empowerment of operators and increasing motivation and confidence. Autonomous maintenance

includes all employees from the workers to top management. Active participation of all employees enables the reduction of the accelerated degradation of machines and equipment and the reduction of the number of failures.

Top management is responsible for: formulating policies and objectives of autonomous maintenance, definition of maintenance policies, the formulation of a master plan, conducting training and employee involvement, coordination within the organization, removal of resistance to change and improve the morale of operators and technicians of maintenance [3].

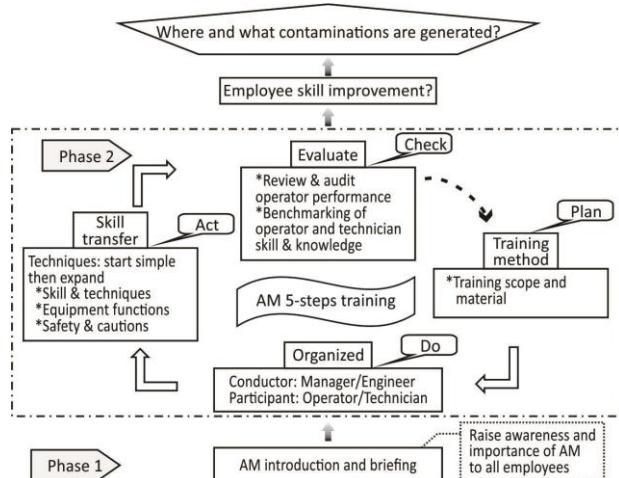
Tasks engineer production and maintenance include: solving critical problems in maintenance, development of autonomous maintenance standards, defining the tasks which should perform technicians and operators, transfer of the knowledge about maintenance [3].

Maintenance technicians are responsible for - teaching operators to be able to perform simple operations and offering technical support to operators in maintenance.

Activities operators in the autonomous maintenance include: visual inspection, the analysis of problem areas, detection of deterioration and early identification of problems, evaluation of equipment and materials and preventive maintenance [3]. It is essential for organizations to continually invest in training and education of its employees about AM. Organizations should identify specific knowledge, skills and abilities that are necessary for employees to own and then design the appropriate training to achieve and develop these skills.

Employee training is conducted in four phases. The first phase involves generating ideas, exploring the concept and benefits of autonomous maintenance. The planning phase involves the planning of training in the workplace and specialized classrooms, selection of trainers among engineers and managers, and determining the schedule, time and place of training. It is essential that training is effective and practical.

After that, the training is conducted in order to increase operators' skills and knowledge. The coach ensures that the training participants (operators and technicians) understand their job and responsibilities. Technicians gain knowledge about techniques for analyzing and solving problems (fishbone diagram, why-why analysis and brainstorming). Operators learn how to maintain and manage the machines. At the end of the training, knowledge and skills are checked by testing [2] (Fig. 1.).



**Figure 1.** Training for developing skills of operators [2]

Benefits of training are: the increase of the level of operator skills, the increase of productivity, the increase of employee morale and job satisfaction.

#### 4. IMPLEMENTATION AUTONOMOUS MAINTENANCE

Autonomous maintenance should be organized in structured and systematical order where everyone knows its job and everything could be done very easy.

Autonomous maintenance is carried through seven steps [5.8]:

1. initial cleaning
2. introduction of corrective measures for the elimination of contamination,
3. introduction of the tentative standards for the workplace organization and autonomous maintenance,
4. introduction of general inspection,
5. introduction of autonomous inspection,

6. workplace organization and cleanliness in the workplace,
7. fully autonomous maintenance management.

The first three steps are focused on renewal and improvement state of machines. These steps contribute to the economic benefits of autonomous maintenance the most. In step 4 and 5 operators gain knowledge of inspection procedures. The last two steps are designed to improve and optimize autonomous maintenance by standardization system and method [5].

#### 4.1 Initial cleaning

Initial cleaning involves the formation of teams for cleaning; the determination of the plan of cleaning and application of the plan [8]. In this step the initial cleaning is performed. It is established where the dirt is accumulated (dust and dirt which have been collected during the previous period) and the machine is brought into a state in which it was when purchased and abnormalities on machine are registered [9]. Initial cleaning enables prevention of rapid deterioration of equipment, improving the quality of checks and repairs, and establishing the basic functions of the equipment.

**Table 3.** Tagging and detagging [10,11]

Check items	Tagging	Detagging
1. How is the oil pressure?	Higher pressure	Restore to the right pressure
2. How is the movement of the cylinder?	Slow Does not move	
3. What is the reason for the poor operation?	The strainer is clogged	Clean the strainer
4. Why was the strainer clogged?	Oil was dirty	Remove the oil and clean the tank
5. Why did the oil get dirty?	Dust comes into tank	Prevent chips and cutting oil from dispersion
6. Why did dust come in?	There are holes and spaces in the upper cover of the tank	Cover the holes and spaces
7. How is movement?	Good, but there is oil	Dismantle the O ring
8. What is the reason for oil O ring was cut. Replace O ring. Leakage?	O ring was cut	Replace O ring
9. What is the reason for it?	There are scratches on the rod	Remove the scratch
10. Why were the scratches?	Dispersed chips are attached to the rod	Take countermeasures against dispersion of produced chips
11. How are the movement? Leaks? Oil temperature?	Good None Appropriate	Make one point lessons

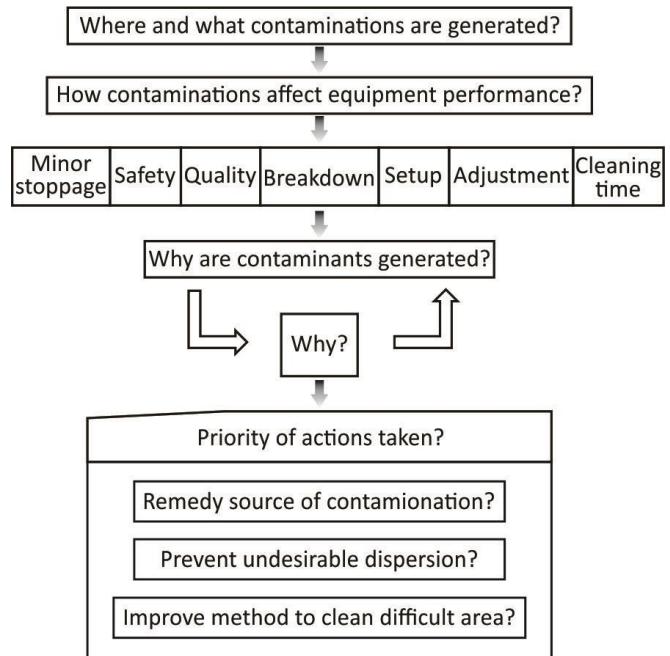
Initial cleaning is the most difficult job for operators in relation to other steps within autonomous maintenance. Initial cleaning achieve great influence on increasing the performance of machines.

Tagging means finding and recording abnormalities by operators, placing white marks- for problems that operators can resolve themselves and placing red marks- for problems which require help of maintenance technicians [8]. Operators resolve irregularities by removing tags (Table 3).

After that, One point lessons (OPL) are made. OPL are the lessons on the one sheet of paper which show the condition before and after the proposed state and a brief text description of the problem.

#### 4.2 Introduction of corrective measures

Introduction of corrective measures for the elimination of contamination involves the identification, analysis and elimination of the source of contamination and implementation of countermeasures [2].

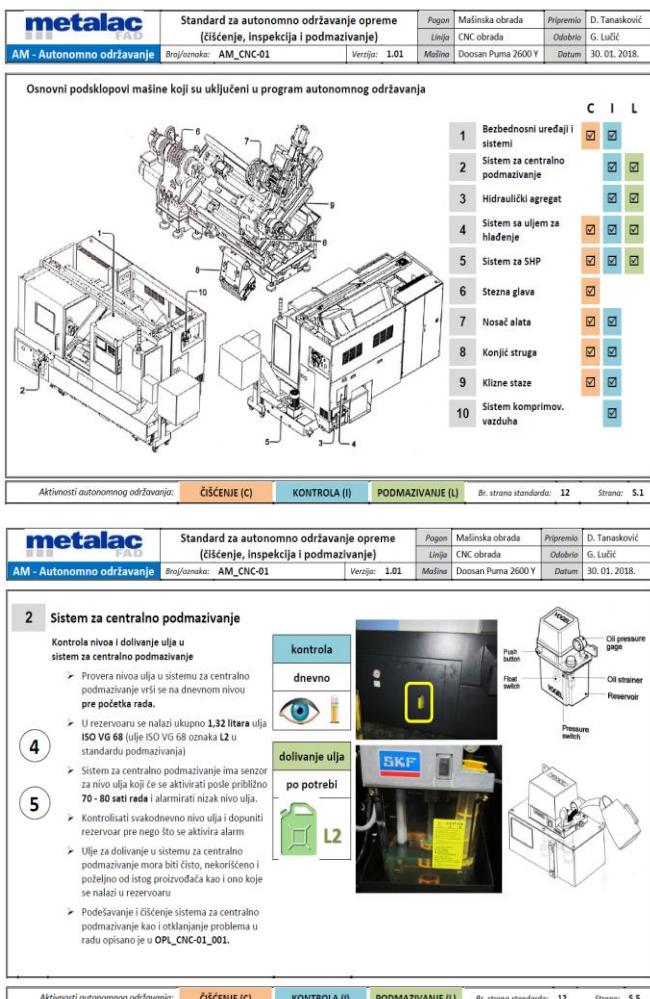


**Figure 2.** Why-why analysis [2]

Operators determine the basic causes of contamination directly at the source and take note of some abnormalities that are repeated. To determine the cause why-why analysis and fishbone diagram are used.

### 4.3 Introduction of tentative standards

The introduction of tentative standards of autonomous maintenance includes the establishment, review and, if necessary, changes to the standards of cleaning, inspection and lubrication [8].



**Figure 3.** Standards for cleaning, lubrication and inspection (a) and (b)

Formulation of labor standards enables effectiveness of carrying out cleaning, lubrication and inspection with minimal investment of time and effort [2].

Introducing standards of cleaning should take into account that parts of the machine that must be cleaned, which cleaning methods are used, what are the sources of contamination and how they will be removed.

Introducing standard of lubrication is necessary to pay attention to the key points of lubrication, which lubricant can be used and which method of lubrication will be applied.

### 4.4 The general inspection

The general inspection is routine maintenance activity, which is carried out by the operator in parallel with cleaning in order to monitor and verify the current state of certain parts of the machine/ equipment, such as the level of temperature, humidity or pressure. In this step a detailed planview of parts of machines is done and practical application of guidelines for everyday work operator. If an abnormality is noticed operators quickly return irregularities at the appropriate level or if they need additional technical help, operators require help of technicians.

Operators can successfully perform the following simple tasks: checking the level of lubrication, locating leaks, tightening screws, identifying mechanical problems such as cracks, performance tuning, regulation sensor. Cleaning, tightening and lubrication are carried out in accordance with the standards introduced by engineers and technicians.

General inspection involves teamwork of production and maintenance in order to achieve "zero" failures and "zero" defects. Maintenance department provides training in the field of inspection operators in order to improve their professional skills and knowledge and raise awareness about the importance of the work that they perform. Managers prepare and produce inspection schedules and define guidelines for improving visual control.

### 4.5 Introduction of autonomous inspection

Introduction autonomous inspection involves combining standard cleaning and lubricating positioned in the third step with the tentative standard from the fourth step, in a one "standard autonomous maintenance".

The introduction of autonomous inspections include: implementation of continuous and periodic inspections, establishing clear procedures and standards for autonomous maintenance, preparation of standard checklist for autonomous inspection,

defining schedules and responsibilities which should be assigned to each operator. In this step, the operator plays an important role in identifying and removing the causes of failures.

In non-critical machines, first the operators are trained to apply common standards, and its rules comply with these standards. In the case of critical machine a special working group is created to decide on a strategy for maintenance.

#### 4.6 Workplace organization

Workplace organization and cleanliness in the workplace means improving the efficiency, safety and organization of the workplace. Highly reliable process enables to produce quality products, achieving "zero" defects. Operators prevent defective products to go further in the production process and prevent the formation of failures in production. During this step, the layout of machinery and equipment is improved in the company.

This step is characterized by concepts and methodologies such as 5S and visual management [1]. 5S includes a set of rules for organizing each position of workers in such a way as to be maximally effective, to facilitate and to accelerate. This method is the basis for achievement of the organization, cleanliness and standardization of the workplace. It should represent the activity within all activities in the system.

Visual Management refers to the transfer of information in the working environment by using a visually attractive resources (colors, shapes, characters, pictures, drawings, labels, forms, etc.) [1]. By the information presented in visual form, visual management ensures that all workers in the company can understand the state of the process. Transparency ensures that all employees can be informed about the current progress and unresolved problems.

The objectives of the sixth step are []: improving the layout of machines and equipment in the factory, standardization of

maintenance and review and enabling visualization of standards.

#### 4.7 Fully autonomous maintenance management

Fully autonomous maintenance management consolidates the activities of autonomous maintenance through creating an annual schedule for all the previous steps. This step focuses on presentation proposals for streamlining the activities of autonomous maintenance and continuously improving policies, standards and equipment [5].

Results of fully autonomous maintenance management are standardization of operators skills, reducing costs and prevention failures and downtime.

### 5. BENEFITS OF AUTONOMOUS MAINTENANCE

In contemporary industrial systems, autonomous maintenance can significantly improve the productivity, efficiency and profitability through the reduction of maintenance costs and losses, unplanned and planned downtime in production. Benefits are various and should not be overseen by top management. It covers all fields simultaneously, which are important for continuous improvement and reaching desired state.

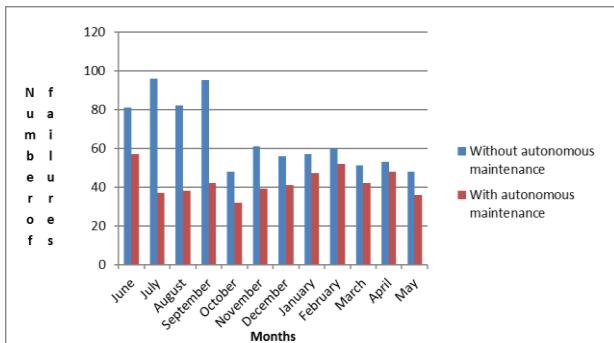
Benefits of autonomous maintenance include [3,5]:

- increasing the level of operators knowledge and skills about machinery and equipment,
- equipment is well cleaned and lubricated,
- identifying problems before they become serious omissions
- freeing technicians from maintaining in order to be able to devote themselves to more challenging tasks such as machine design, reengineering, research and development.

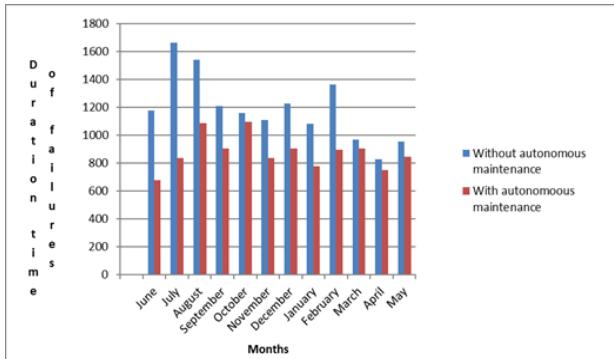
The results of autonomous maintenance are maintenance machines in ideal state, the

establishment of basic conditions for maintenance and prevention of deterioration, continuous improvement of workforce skills and knowledge, fostering employee motivation through adequate empowerment, clarification of roles and responsibilities for employees, a system for continuously maintaining and controlling equipment, reduced absenteeism and enhanced communication in the workplace.

Also, autonomous maintenance contributes to the elimination of failures, extending the life of equipment, reducing waiting time, mean time between failures and repair times, respecting the demands of customers in price, quality and delivery time [3,5].



**Figure 4.** Comparison number of failure before and after implementation of AM [4]



**Figure 5.** Comparison duration of the failure before and after implementation of AM [4]

Figures 4 and 5 show the results of monitoring the number of machine failures in one firm from Poland in the period from June 2013 to May 2014 before and after implementation of autonomous maintenance [4].

It was observed that there was a reduction of cancellation after implementation of autonomous maintenance. In addition, it was found that there was a reduction of the

duration of failures after the implementation of autonomous maintenance.

## 6. BARRIERS AND CHALLENGES IN IMPLEMENTATION AUTONOMOUS MAINTENANCE

Implementation of AM involves dramatic changes in the organizational structure, organizational culture, system management, ways of thinking, etc [3]. Autonomous maintenance results in the increase of operators' satisfaction and motivation, developing teamwork between operators, technicians and engineers to take responsibility for the assigned tasks.

Systematic and consistent implementation of autonomous maintenance may change the behavior of people and further change the organization culture [3]. To achieve a successful AM, the company should ensure that all departments, teams, and employees are involved in decision making processes and share their experiences, skills, and knowledge.

The most important barriers in the implementation of autonomous maintenance in enterprise Metalac are: resistance of employees, lack of involvement of top managers, inadequate knowledge of AM and inadequate trainings, technical barriers, operational barriers, financial and cultural barriers.

Resistance staff to adopt changes and lack of understanding of the benefits are common obstacles during the implementation of autonomous maintenance. The resistance employed may comprise individual reluctance to change roles, inability to harmonize them and their role with organizational culture and the impossibility of generation of dissatisfaction with the current state [3]. Some employees treated autonomous maintenance as a program without any focus and doubt in its effectiveness and this is sometimes the result of lack of understanding of the methodology. Furthermore, many people find autonomous maintenance activities as additional work [3].

Inadequate knowledge of AM is a major impediment to its successful implementation as all the manufacturing companies that are today reaping the benefits of the production strategy really took a lot of time to fully learn and institutionalize efficient implementation of AM, thereby improving the knowledge, competencies and skills of staff.

The lack of management support is attributed to management, not completely understanding the true goal of the AM program. Without the total support and commitment of the management of a firm, the implementation of AM will not be successful, as they are the ones to adopt, drive, and ensure that all the workers accept it too.

Financial barriers in Metalac arise from insufficient investment financial resources in autonomous maintenance.

The barriers from the culture are associated with the values, behavior, perception and employees working environment. The basic culture barriers in Metalac include: inability to change the organizational culture, people's unwillingness to adopt autonomous maintenance and, lack of coordination among the employees. Lack of willingness of employees to adopt the autonomous maintenance can be overcome through the empowerment and motivation.

Operational barriers in Metalac result from the lack of implementation of standard operating procedures, lack of preventive maintenance, improper use of tools, techniques and methodologies such as TQM and 5S.

Technical barriers are related to the insufficient level of technical knowledge. Lack of training and education results in misconceptions in understanding of autonomous maintenance and its principles, unreliable and unclear expectations.

## 7. CONCLUSIONS

The role of autonomous maintenance is significant because it can significantly improve the productivity, efficiency and profitability through the reduction of maintenance costs

and losses, unplanned and planned downtime in production.

Although there are many benefits of AM, there are a lot of challenges that if not properly addressed will frustrate its successful implementation.

The implementation of autonomous maintenance is not easy and it involves a financial investment and investment of effort through all steps (planning, execution and improvement). Two key characteristics of successful completion of autonomous maintenance are thoroughness and perseverance.

The main challenges in the implementation of autonomous maintenance in Metalac represent a change in thinking, behavior, habits, perceptions and attitudes of operators, technicians and engineers to take responsibility for the performance of certain tasks. It was observed that AM can't be successfully implemented without the total approval and involvement of top management and employees.

Top management needs to focus on improving coordination between departments and ensure synergies between the different business functions, introducing a proactive approach to maintenance; development of teamwork, conduct training and education of employees, empowering and encouraging employees and continuous monitoring of benefits (including financial aspects).

## REFERENCES

- [1] Mačužić, M. Đapan: Lean koncept u upravljanju proizvodnjom, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, 2016.
- [2] A. Rosmaini, I. Kamaruddin, I. Azid: Development of autonomous maintenance implementation framework for semiconductor industries, International Journal of Industrial and Systems Engineering, pp. 268-297, 2011.
- [3] K. Mugwindiri, C. Mbohwa: Availability Performance Improvement by Using Autonomous Maintenance— The Case of a Developing Country, Zimbabwe, World Congress on Engineering, Vol. 1, 2013.

- [4] M.Molenda: The autonomous maintenance implementation directory as a step toward the intelligent quality management system, Management Systems in Production Engineering, Vol. 4, No. 24, pp. 274-279, 2016.
- [5] M.W.Wakjira, A. S. Iyengar: Autonomous Maintenance: A Case Study on Assela Malt Factory, Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science, Vol.4, No. 4, 2014
- [6] C. W. T. Ferreira, J.C. Leite: Applied autonomous maintenance in the improvement of production quality: A case study, Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications, 2016.
- [7] Japan Institute of Plant Maintenance (JIPM): Autonomous maintenance for operators, Portland, Productivity Press, 1997.
- [8] P. Todorović: Osnovi održavanja, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, 2016.
- [9] M. Farnsworth, C. Bell, S. Khan, T. Tomiyama: Autonomous Maintenance for Through-Life Engineering, Springer International Publishing, Switzerland, 2015.
- [10] H. Yamashina, Autonomous Activities presentation
- [11] H. Yamashina, Autonomous maintenance presentation
- [12] K. E. Mc Kone, E. N. Weiss: TPM: planned and autonomous maintenance: bridging the gap between practice and research, Production and Operations Management, Vol. 7, No. 4, pp. 335-351, 1998.
- [13] P. Guariente, I. Antoniolli, L. P. Ferreira, T. Pereira, F. J. G. Silva: Implementing autonomous maintenance in automotive components manufacturer", Manufacturing Engineering Society International Conference, Vigo Spain, 2017.
- [14] S. Nakajima: TPM: Introduction to TPM: Total Productive Maintenance, Cambridge, MA: Productivity Press Inc, 1998.
- [15] I. P. S. Ahuja, J. S. Khamba: Strategies and success factors for overcoming challenges in TPM implementation in Indian manufacturing industry, Journal of Quality in Maintenance Engineering, Vol. 14, pp. 123-147, 2008.
- [16] C. C. Okpala, E. Onyekachi: Benefits and challenges of total productive maintenance implementation, International Journal of Advanced Engineering Technology, 2016.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## PRODUCTION OF METALLIC FOAM AND ITS MECHANICAL PROPERTIES

Varun SHARMA<sup>1</sup>, Nikola PALIC<sup>1\*</sup>, Fatima ZIVIC<sup>1</sup>, Nenad GRUJOVIC<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Engineering, University of Kragujevac, varun.eu@gmail.com, nikpa2112@gmail.com, zivic@kg.ac.rs, gruja@kg.ac.rs

\*Corresponding author: nikpa2112@gmail.com

**Abstract:** This paper deals with production technologies of porous metallic foams based on aluminium alloys. Different processing techniques for the development of metallic foams are presented. Mechanical properties of the metallic foams are presented, and comparison between aluminium foam and solid aluminium and steel is given. The main production technologies are described, such as casting using a polymer or wax precursors; entrapped gas expansion; ALCAN process; and melt gas injection (air bubbling). Melt gas injection has been recommended as the most efficient production technology for homogenous pores sizes, due to possibility to easily vary process parameters.

**Keywords:** Foam, Production, Cell, Casting, Alcan process, Air bubbling, Gas

### 1. INTRODUCTION

The concept of porous structure for a number of years has been widely known. Porous structures play a pivotal role in different applications in the field of energy management, heat insulation, fluid filtration, vibration suppression etc. Highly porous materials have relatively low mass density, high structural rigidity, large exchange surface, good resistance to thermal shocks, high pressures, high temperatures and thermal cycling, excellent absorption of mechanical shock and electromagnetic dumping, hence in nature, these structures serve as structural bodies [1, 2].

Porous structures contain number of voids or pores which can be interconnected to each other through a bone shaped rods called ligaments whereas its skeletal structure is called the matrix. The characteristics of porous

materials varies depending on the composition of materials, shape, and arrangement of the pores and also varies with the size of the pores. Porous materials can be broadly classified into natural porous and artificial porous bodies. Natural porous bodies are found universally in nature, for example wood, pumice, coral, sponge, rock, stone, soil, plant leaves, and bones which supports the limbs and bodies of animals and humans. Artificial or non-natural porous materials are man-made. These are used for bricks, clothes, cement, sponge, paper etc. For years, non-metallic foams have been mainly used (polymer foams, aqueous foams, porous ceramics etc).

Metallic foams are considered as a new class of engineering materials and many aspects related to their characterization are still widely unknown. They enable number of desirable properties such as novel mechanical, physical, electrical, thermal and acoustic

properties. They exhibit potential for energy absorption, lightweight structures and for thermal management. Metal foams are considered to open rather new directions of utilization of otherwise standard materials. However, further research is needed from many aspects among which production technologies for completely controlable porosity impose major challenge nowadays.

During the last 10 years lot of research has been devoted to development of metallic foams, but researchers are still not being able to fully improve the quality of metallic foams in terms of uniformity, stability, reproducibility, and profitability. Metallic foams are considered as one of the most challenging materials among porous materials today. Metallic foams are categorized as open cell and closed cell metallic foam.

Open-cell metal foams or metal sponges have open pores fully connected to each other by solid and gaseous phase continuously distributed [3], thus enabling fluid flow through it. Metal foams with open-cell structure have been developed aiming at light load-bearing structures and other functional requirements.

In closed-cell metal foams pores are separated from each other, whereas the gaseous phase is contained within the isolated pores [4]. Metal foams with closed-cell structure are usually aimed only for load-bearing structures. Sometimes in closed-cell foams, the cell walls are ruptured resulting in the formation of open-cell metal foam structure [5].

## 2. PRODUCTION OF METALLIC FOAM

Metallic foams can be produced by a range of technologies. The processes involved for their production are not perfectly controlled, resulting in some variations of foam properties. But the current generations of metallic foams exhibit property profiles which reflect alluring potential, moreover control of processing is improving at a rapid pace. Metallic foams have been produced by different process routes. They are broadly categorized into four classes,

those in which the foam is produced from the vapor phase, those in which foam is electrodeposited from an aqueous solution, those which depends on liquid state processing, and those in which foam is obtained in the solid state. Some methods produce open-cell metallic foams and others produce closed-cell metallic foams where the majority of the cells are closed.

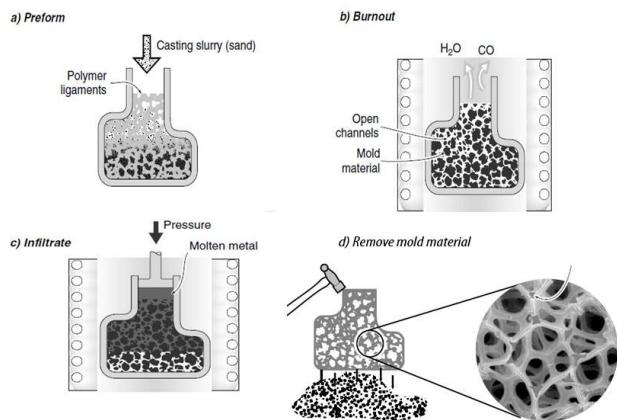
### 2.1. CASTING USING A POLYMER OR WAX PRECURSOR AS TEMPLATE

Casting using a polymer, or wax precursor as template, is employed to produce open-cell metallic foams. Polymer or wax precursor can be used as template for creating investment casting molds where a variety of metals and their alloys can be cast. The very first step involved in this method is a selection of open-cell polymer foam mold template having desired relative density and cell size followed by its coating with a mold casting slurry or ceramic powder [6]. After coating, it is dried and embedded into a casting sand. Further step involves decomposition or evaporation of the polymer template and hardening of the casting material which is usually done by baking of the mold. This mold is subsequently filled with a metal alloy and finally allowed to cool.

After undergoing solidification followed by cooling, the mold material is removed leaving behind the metal equivalent of the original polymer foam. The precursor structure is assembled from injection molded wax or polymeric lattices. The lattice structure is then coated with sand or casting slurry followed by burning which leads to the formation of negative image mold. Conventional investment casting technique is employed for casting metal into the mold. This method can be used to produce foam from almost every metal which can be investment casted. The open-cell metallic foams produced in this process generally have relative densities below 0.05 and pore sizes of 1–5 mm. The method is schematically described in Figure 1.

## 2.2. ENTRAPPED GAS EXPANSION

Entrapped gas expansion method is used for the production of open-cell metallic foams. In this approach, the powder metallurgy technique is employed to produce dispersed minute pores containing inert gas under high pressure. When such materials are heated, the pore pressure is increased which leads to expansion in the pores via creep of surrounding metal.

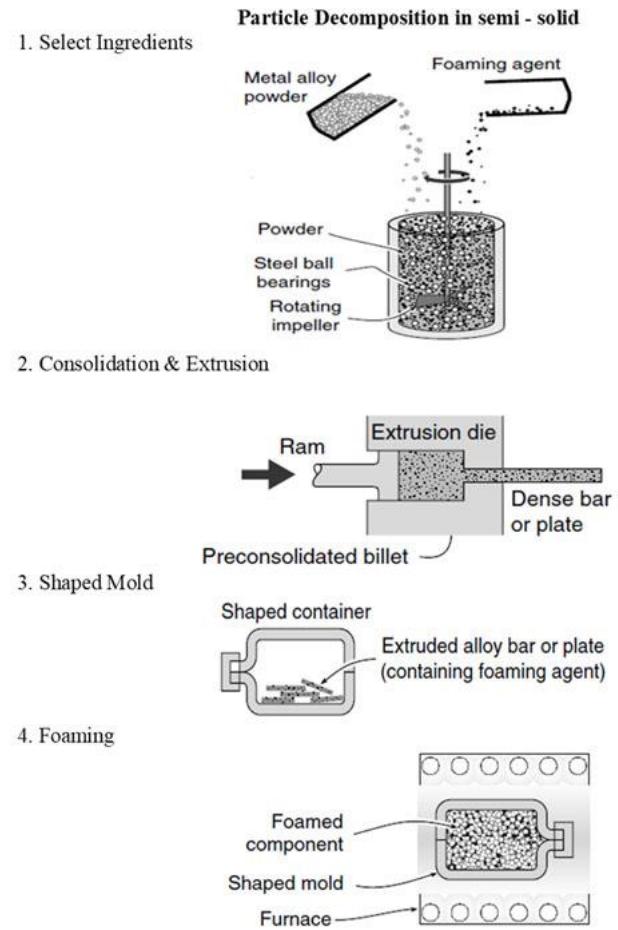


**Figure 1.** Investment casting method used to manufacture open-cell metallic foams (DUOCEL process) [14]

For example, Ti–6Al–4V powder is used and then sealed in a canister of the same alloy. The canister is evacuated in order to remove any oxygen and filled with argon at a pressure range of 0.3–0.5 MPa to create an inert environment. The canister is finally sealed and consolidated to a relative density of 0.9–0.98 thereby causing an increase in void pressure to approximately eight folds [6]. But the major drawback lies in the fact that the increased void pressure is too low to cause expansion of Ti–6Al–4V at a room temperature. Also, the number of pores is relatively low. In order to overcome this, a novel step, known as rolling step, is introduced to create more uniform distribution of minute pores and to refine the structure as well. The process is shown in Figure 2.

In case of Titanium alloys, rolling is done at 900–940°C resulting in elongation and void flattening in the rolling direction. Since the voids flatten, the faces of the voids come into contact, thus creating strings of minute gas-

filled pores. The last step in this process is expansion via heating at 900°C for at least 20–30 hours. Due to the high temperature, the internal pore pressure is raised by the ratio of absolute temperature of the furnace to that of ambient temperature from 10–16 MPa, thereby causing a reduction in the overall density of the sample and creep dilation. This method helps in producing closed-cell metallic foam with a void fraction of up to 0.5 and void size of 10–300 µm.

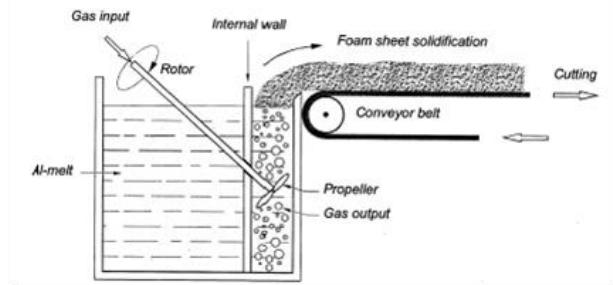


**Figure 2.** Various steps of powder metallurgy to manufacture metal foams by gas-releasing [14]

## 2.3. ALCAN PROCESS

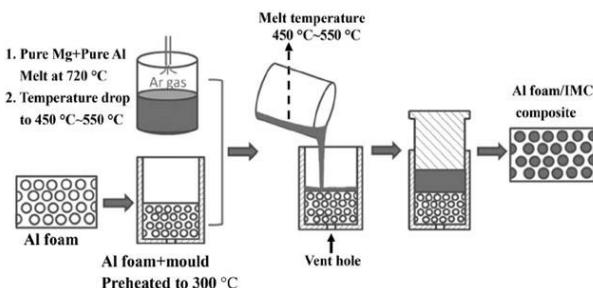
This process is employed for the production of closed-cell metallic foams. Canadian Alcan first patented the first blowing gas technique [7] after Norwegian Norsk Hydro company [8]. The initial ingredient in both of these processes was either ceramic aluminium oxide or silicon carbide particles. Flotation process occurred and the melt was produced. The

flotation process was then suspended because of particles of ceramics and finally, the melt got transferred into the foam. Vortex steering technique is used if a gas is injected into the melt. Design schematic of gas blowing method is shown in Figure 3. In this process, air was used as a blowing gas and in Hydro process air or carbon dioxide was used as a blowing agent. 'Stabilized metal foam body' in 1992 was patented by Alcan [9] in which argon was used as a foaming gas. Alcan licensed aluminium foam production to Cymat [10] in 1997.



**Figure 3.** Gas blowing method [15]

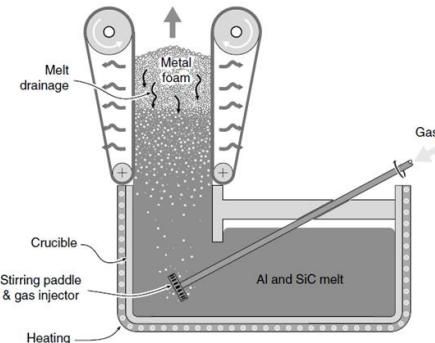
Under the trade name 'Alulight and fominal' is in the market which was prepared by compact powder mixed with a blowing agent [11]. In 1993, Shapovalov [12] successfully produced metal foams with long pores by solidifying liquid alloys and hydrogen. This is known as Gasar process. In 1997, aluminium melt was mixed with magnesium oxide particles which resulted in foam production via Alcan process [13]. Design schematic of Gasar method is shown in Figure 4. Magnesium oxide helps in enhancing the foam machinability as compared to silicon carbide or aluminum oxide.



**Figure 4.** The structure of gaser foam and alulight and fominal [15]

## 2.4. MELT GAS INJECTION (AIR BUBBLING)

Melt gas injection technique is employed to obtain closed cell metallic foams. This process is easiest to implement with aluminium alloys as they have relatively low density and do not oxidize excessively when the melt is exposed to air or any other gas containing oxygen. In this method, pure aluminium or its alloy is melted and ceramic materials of 5-15% weight are added. A number of gases can be used for creating bubbles within liquid aluminium. Most commonly air is used, but gases like oxygen, carbon dioxide, inert gases can also be injected into a liquid aluminium for creating bubbles. Bubbles formed in this process tend to float above the melt surface, drain and finally begin to solidify [6]. Design schematic of the melt gas method is shown in Figure 5. Closed-cell metallic foams are formed by carefully controlling the cooling rate of the foam as well as the gas injection process. This method is economical. The foams produced using melt gas injection technique have relative densities in the range of 0.03- 0.1.



**Figure 5.** A schematic illustration of the production of aluminium foam by melt gas injection method (CYMAT and HYDRO processes) [14]

## 3. MECHANICAL PROPERTIES

Properties of aluminium foam have some attractive properties in comparison to bulk aluminium and steel. For instance, foam density is relatively low with high elasticity due to the higher surface area and natural void region within it. Also, flexural stiffness is significantly improved in comparison to steel. Accordingly, metallic foams have begun to

replace already existing materials for heat exchangers. They can contribute to improvement of heat transfer rate and natural turbulence. However, due to its complex production process and design complexity, small number of companies are dealing with its production, thus resulting in high cost of these materials, ranging 10 – 30 EUR/kg. Comparison of aluminium foam with the solid aluminium and steel properties is given in Table 1.

**Table 1.** Properties of Aluminum foam in comparison with aluminum and steel

Properties	Aluminum foam	Al	Steel
Density, g/cm <sup>3</sup>	0.07 - 0.95	2.7	7.8
Tensile strength, MPa	0.04 - 30	100 - 300	600 - 800
Young modulus (E), GPa	0.02 - 14	70	210
Specific bending stiffness of a bar, $\frac{3\sqrt{E}}{\rho}$	2 - 3.9	3.1	1.9
Specific flexural stiffness of a plate, $\frac{3\sqrt{E}}{\rho}$	3.9 - 2.5	1.5	0.8
Loss coefficient, $\eta$	0.3 - 0.002	$10^{-4}$	$10^{-5}$
Thermal conductivity, Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	0.3 - 11	236	84
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	20 - 3000	2.65	10
Market price, EUR/kg	10 - 30	2	0.4

#### 4. CONCLUSION

Due to the complexity and heterogeneity of the porous structure, there is no straightforward method which enables fully controlled production in terms of uniformity. Different new processing techniques have been presented in this paper. Methods like polymer or wax precursor, entrapped gas expansion can be applied for the production of open cells. On the other hand, ALCAN and melt gas injection can be used for the closed cells development. Further improvement of all of these processes are needed, especially from

aspects such as defined porosity shape and size, in micro range as well.

#### ACKNOWLEDGEMENT

This work has been supported by the research grant SELECTA H2020-MSCA-ITN-2014 No. 642642 and Ministry of Science and Technological Development, Serbia, projects no. III41017 and no. TR35021.

#### REFERENCES

- [1] L.J. Gibson, M. F. Ashby: *Cellular Solids: Structure and properties*, Cambridge, UK, Cambridge University Press, 1997.
- [2] J. Banhart, J. Baumeister, M. Weber: Metal foams near commercialization, Met Powder Rep, Vol. 4, pp. 38-41, 1997.
- [3] P.S. Liu: Mechanical relation for porous metal foams under complex loads of triaxial tension and compression, Mater Des, Vol. 31, No. 4, pp. 2264-9, 2010.
- [4] H. Liu, C. Y. Han: Dong L.S. Research progress in structure properties relationships of closed-cell polymer foams, Chin Poly Bull, Vol. 3, pp. 29-42, 2008.
- [5] H. Herrington, B. Hock: *Flexible polyurethane foams*, Dow Plastics, Midland, 1991.
- [6] M. F. Ashby, A. G. Evans, N. A. Fleck, L. J. Gibson, J. W. Hutchinson, H. N. G. Wadley: *Metal Foams: A Design Guide*, 2000.
- [7] I. Jin, L.D. Kenny, H. Sang, *US Patent 4 973 358*, 1990.
- [8] W. W. Ruch, B. Kirkevag: *WO Patent 9 101 387*, 1991.
- [9] I. Jin, L. D. Kenny, H. Sang: *US Patent 5 112 69*, 1992.
- [10] J. T. Wood: *Production and Application of Continuously Cast, Foamed Aluminum, Metal Foams*, MIT-Verlag, Bremen, pp. 31-35, 1998.
- [11] J. Baumeister, H. Schrader, *US Patent 5 151 246*, 1992.
- [12] V. I. Shapovalov, *US Patent 5 181 549*, 1993.
- [13] M. Thomas, D. Kenny, H. Sang: *US Patent 622 542*, 1997.
- [14] M. F. Ashby, A. G. Evans, J. W. Hutchinson, N. A. Fleck: *Metal Foams: a Design Guide*, Butterworth-Heinemann, 2000.
- [15] N. Babcsán: *Ceramic Particles Stabilized Aluminum Foams*, PhD Dissertation, University of Miskolc, 2003.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## O ELEMENTIMA NANOROBOTA SA POSEBNIM OSVRTOM NA NANOCEVNE NANOELEKTROMEHANIČKE SISTEME

Svetomir SIMONOVIĆ\*

<sup>1</sup>Visoka tehnička škola strukovnih studija, Bulevar Zorana Đinđića 152a, 11070 Beograd, Srbija

\*Autor za korespondenciju: svsimonovic@gmail.com

**Apstrakt:** U radu su nabrojani mogući nanoelektromehanički elementi nanorobota. Navedeni su metodi proizvodnje nanoelektromehaničkih komponenti sa posebnim osvrtom na proizvodnju nanoelektromehaničkih komponenti zasnovanih na ugljeničnim nanocevima u čijoj osnovi je upotreba mikroskopa za skeniranje detekcijom atomskih sila. Razmatrani su mogući nanoelektromehanički elementi nanorobota zasnovani na različitim konfiguracijama konstrukcija nastalih spajanjem ugljeničnih nanocevi i navedeni primeri njihove primene za konstruktivne elemente nanorobota u svojstvu nanoalata, nanosenzora i nanoaktuatora. Istaknuta je perspektivnost samosklapanja u masovnoj proizvodnji nanoelektromehaničkih elemenata nanorobota.

**Ključne reči:** nano, elektromehanički, robot, nanocevi, elementi, samosklapanje

### 1. UVOD

Nanoroboti se mogu definisati kao roboti nanodimensija ili veći roboti, koji su u stanju da manipuluju objektima nanodimensija sa nanometarskom preciznošću [1].

Nanoroboti bi morali biti u stanju da izvrše bar jednu od sledećih aktivnosti na nano nivou: aktuaciju, senzorsku aktivnost, upućivanje signala, obradu podataka, inteligentno ponašanje i međusobnu koordinaciju [2].

Elementi nanorobota obuhvataju alate, senzore i aktuatore čije su dimenzije u nano razmerama. Generalno, smanjivanje dimenzija uređaja na nano nivo, između ostalih izvanrednih mogućnosti, omogućava manipulisanje objektima nano dimenzija pomoću alata nano dimenzija, merenje masa reda veličina femtograma, detektovanje sila

reda veličina pikonutna i stvaranje oscilatornih kretanja frekvencija reda veličina gigaherca.

Elementi nanorobota mogu biti nanoelektromehanički sistemi.

Pojam nanoelektromehanički sistemi (NEMS) se odnosi na uređaje čija je karakteristična dužina manja od 100 nm i koji se sastoje od električnih i mehaničkih komponenata [3].

Nanoelektromehanički sistemi koji se mogu koristiti za potrebe nanorobotike obuhvataju mikrokonsole sa integrisanim oštrim nanošiljcima, koje su elementi mikroskopa na principu skeniranja detekcijom tunelskih struja (MTS) i mikroskopa za skeniranje detekcijom atomskih sila (MAS), kvantne korale formirane upotrebom MTS-a za pozicioniranje jednog po jednog atoma, nizove mikrokonzola MAS-a za skladištenje podataka, nanošilje MAS-a za

nanolitografiju, penkalnu litografiju za štampanje molekula, nanožice, ugljenične nanocevi, kvantne žice, kvantne kutije, tranzistore zasnovane na kvantnim tačkama, senzore zasnovane na nanocevima, biološke motore, molekularne zupčanike nastale pričvršćivanjem molekula benzena na spoljni zid ugljenične nanocevi, uređaje koji imaju nanometar deboj sloj filma, na primer, u velikim magnetootpornim glavama za čitanje i upisivanje podataka i magnetnim medijima za pogonske sklopove krutih diskova i pogonske sklopove magnetnih traka, nanošematzovane magnetne čvrste diskove i nanočestice (na primer nanočestice u podlogama magnetnih traka, i nanočestice u oblogama magnetnih traka [3].

Inteligencija nanorobota može se zasnivati na memoriji sastavljenoj od individualnih molekula ili nanocevi, na molekularnim prekidačima, na molekularnim ili nanocevnim tranzistorima ili na integralnim kolima na bazi nanocevi [3].

Pogonski elementi nanorobota mogu biti laseri nanodimensija i nanocevi kao elektrode u gorivnim ćelijama [3].

## 2. PROIZVODNJA ELEMENATA NANOROBOTA

Elementi nanorobota se mogu proizvoditi metodama "odozgo naniže" ili "odozdo naniže", što je bilo predmet istraživanja mnogih istraživača.

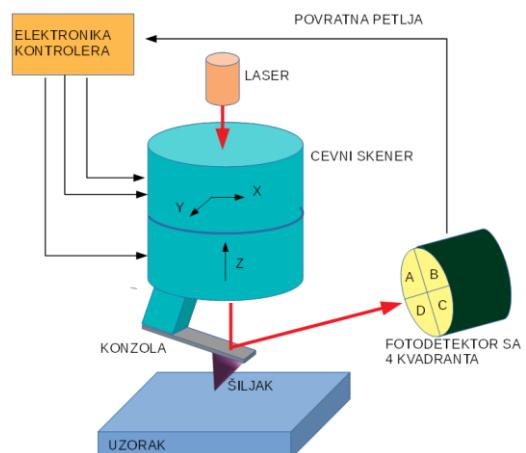
Proizvodne metode "odozgo naniže" se zasnivaju na nano obradi materijala i obuhvataju tehnologije kao što su nanolitografija, nanoutiskivanje i hemijsko rezbarenje. Trenutno, ovim metodama se vrši dvodimenzionala obrada materijala u relativno niskoj rezoluciji.

Metode "odozdo naviše" su zasnovane na sklapanju nanoelemenata u nanostrukturu. Trenutno ove metode obuhvataju samosklapanje, litografiju penkala, i dirigovano samosklapanje. Ovim metodama se mogu stvarati pravilne nanostrukture u makro razmerama. Zahvaljući sposobnosti nanorobota da pozicioniraju i orijentisu objekte reda nano veličina, manipulacija

putem nanorobota je metoda kojom se lako obavlja strukturiranje, karakterizacija i sklapanje mnogih vrsta nanosistema [4]. Kombinovanjem postupaka "odozdo naviše" i "odozgo naniže" ostvaruje se hibridni metod proizvodnje nanostruktura zasnovan na nanorobotskoj manipulaciji, koji omogućava treći način proizvodnje NEMS-a putem strukturiranja već formiranih nanomaterijala ili nanostruktura u složenje nanostrukturu. Ova proizvodna tehnika može se koristiti za stvaranje kompleksnih trodimenzionalnih nanouređaja od prethodno formiranih konstruktivnih blokova.

Za montažu ugljeničnih nanocevi unutar nanoelektromehaničkih uređaja koriste se metode kao što su nasumično rasipanje ugljeničnih nanocevi [5], direktno narastanje ugljeničnih cevi na mestu montaže [6], samosklapanje ugljeničnih nanocevi u složenu strukturu [7], dielektrforezičko sklapanje ugljeničnih nanocevi [8] i nanomanipulacija ugljeničnim nanocevima [9].

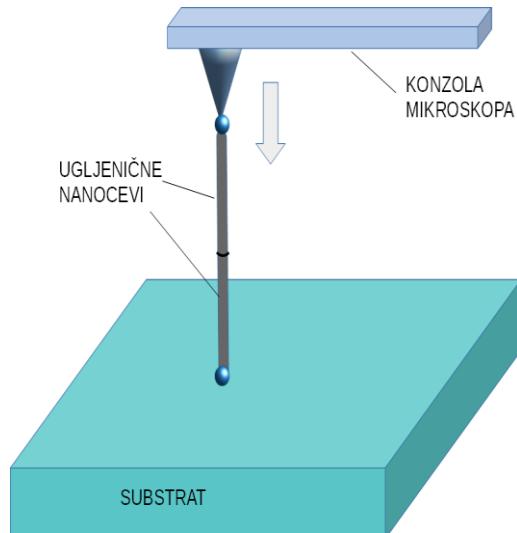
Nanomanipulacija ugljeničnim nanocevima može biti izvršena ručno ili nanorobotima, i u oba slučaja je zasnovana na upotrebi mikroskopima za skeniranje detekcijom atomskih sila (Sl. 1), koji mogu biti posebno efikasni u procesu stvaranja složenih nanostruktura spajanjem individualnih ugljeničnih nanocevi.



**Slika 1.** Mikroskop za skeniranje detekcijom atomskih sila

Na sledećoj slici (Sl. 2) je prikazana nanomanipulacija ugljeničnih nanocevi zasnovana na mikroskopu za skeniranje

detekcijom atomskih sila. Kod prikazane nanomanipulacije se koristi pričvršćivanje nanocevi za podlogu, odnosno za vrh sonde korišćenjem deponovanja izazvanog elektronskim mlazom [9].



Slika 2. Spajanje dve ugljenične nanocevi

Spajanje nanocevi se može ostvariti Van der Valsovim silama, deponovanjem izazvanim elektronskim mlazom ili mehanohemski [1].

### 3. ELEMENTI NANOROBOTA ZASNOVANI NA UGLJENIČNIM NANOCEVIMA

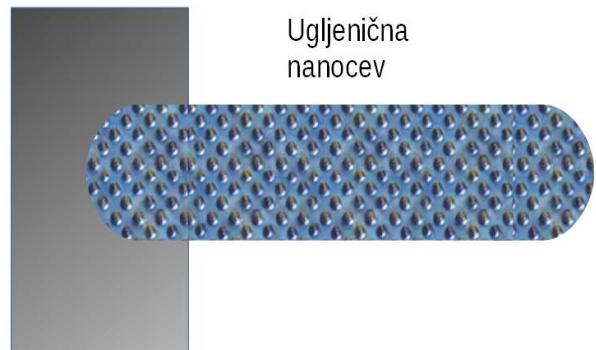
Konstrukcije nanoalata, nanosenzora i nanoaktuatora mogu biti zasnovane na sklapanju pojedinačnih nanocevi u složenje nanokonstrukcije, o čemu svedoče mnogi eksperimentalno verifikovani rezultati.

Prednost nanokonstrukcija zasnovanih na nanocevima je izbegavanje montaže atom po atom, koja bi praktično bila neizvodljiva zbog teške manipulacije atomima. Osim toga nanocevi poseduju izuzetno raznovrsna i povoljna električna, magneta i mehanička svojstva koja ih čine upotrebljivim za sve vrste nanorobotskih uređaja. Takođe, nanocevi su tehnološke, odnosno mogu se međusobno spajati, na primer, dielektoforezom.

Za detektovanje uskih i dubokih brazdi na površinama, pokazano je da su efikasni šiljci sondi mikroskopa za skeniranje detekcijom atomskih sila (MAS) [10], mikroskopa na principu skeniranja detekcijom tunelskih struja (MTS) i ostalih mikroskopa zasnovanih na skeniranju mehaničkim sondama (MSMS), koje

su konstruisane u vidu konzolne konfiguracije ugljeničnih nanocevi (Sl. 3) [11].

oslonac-katoda

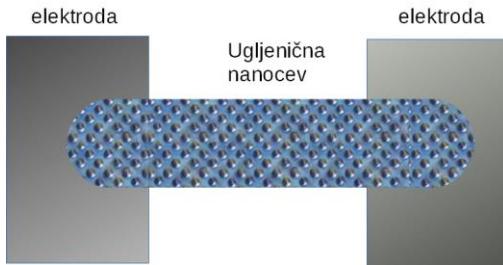


Slika 3. Konzolna konfiguracija nanocevi

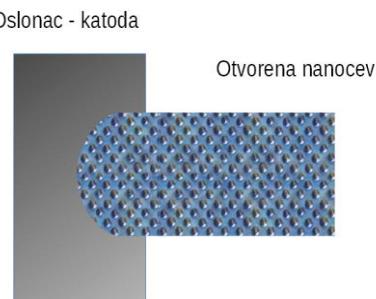
Konzolne nanocevi omogućavaju konstrukciju vrhova sondi sa ekstremno malim prečnikom, ekstremno velikim nagibima, i sa odličnim mehaničkim osobinama. Kao metodi proizvodnje ovih sondi, pokazali su se efikasnim ručno montiranje, direktno narastanje [12] i nanosklapanje [13]. Konzolne nanocevi su, takođe, korišćene kao sonde za merenje ekstremno malih fizikalih veličina kao što su mase reda veličina femtograma [14], kao senzori protoka mase [15] i senzori sila reda pikonjutna [16], koji rade na principu statičkog otklona konzole ili promene rezonantnih frekvencija konzole detektovanih unutar elektronskog mikroskopa. Ovi otkloni ne mogu biti mereni mikrografski u realnom vremenu, što ograničava primenu ovakvih senzora. Promena razmaka između elektroda uzrokuje varijacije emisione struje nanocevnog emitera što ga čini kandidatom za generisanje slika kao zamene za slike generisane mikroskopom.

Mosne nanocevi (Sl. 4) služe kao osnova nanosenzora za karakterizaciju električnih osobina [17]. Ovakva konfiguracija nanocevi se koristi i kod nanosenzora za detekciju gasova [18].

Otvorene nanocevi (Sl. 5) mogu da služe kao kontejneri za atome ili molekule [19]. U literaturi je prikazana konstrukcija termometra zasnovana na ovakvoj konfiguraciji nanocevi, gde se pomoću mikroskopa elektronskom transmisijom (TEM) nadgleda visina galijuma unutar nanocevi [20].

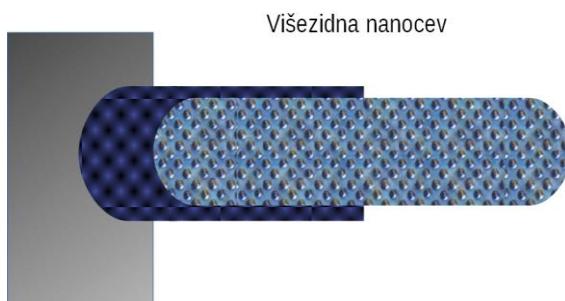


**Slika 4.** Mosna konfiguracija nanocevi



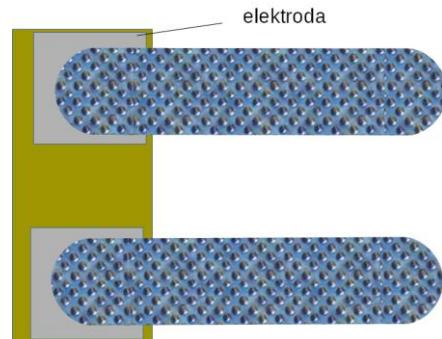
**Slika 5.** Otvorena konfiguracija nanocevi

Konstrukcije od nanocevi (bulk nanotubes) mogu se koristiti za proizvodnju aktuatora zasnovanih na promeni dužine hemijskih veza nanocevi usled injekcije nanelektrisanja [21]. Teoretski, pojedinačne nanocevi takođe mogu raditi po istom principu. Pojava deformacija nanocevi pod dejstvom elektrostatičkih sila može se upotrebiti za konstrukciju nanoreleja [22]. Moguća je konstrukcija nove familije nanocevnih aktuatora iskorišćavanjem ekstremno niskog međuzidnog trenja višezidnih nanocevi. U literaturu su prikazane izvedene konstrukcije linearnih ležajeva zasnovane na teleskopskim nanocevima [23]. Prikazan je i izvedena konstrukcija rotacionog nanoaktuatora zasnovan na nanocevi u funkciji rotacionog ležaja [24]. U vezi nanomanipulacija koje vrše nanoroboti, izведен je eksperiment sa linearnim nanomotorom zasnovanim na nanocevi kod kojega struja emisionog polja služi kao povratna informacija o položaju (Sl. 6) [19].



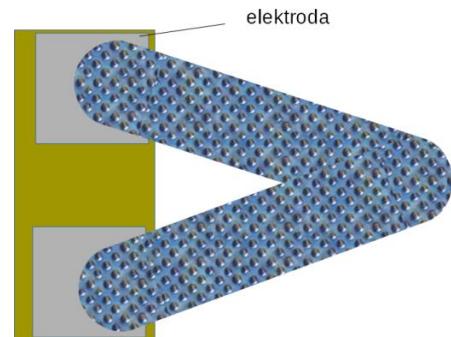
**Slika 6.** Teleskopska konfiguracija nanocevi

Demonstrirane su izvedene konstrukcije sastavljene od konzolnih nanocevi u parovima, koje služe kao nanopincete [25] i nanomakaze (Sl. 7) [9], proizvedene putem, respektivno, ručnog, odnosno nanorobotskog sklapanja.



**Slika 7.** Paralelna konfiguracija nanocevi

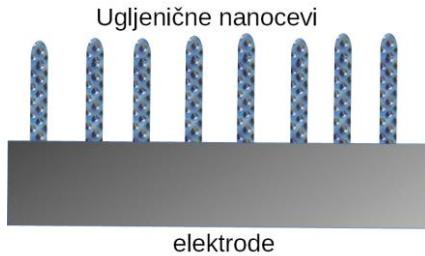
Takođe su konstruisane termalne nanosonde za merenje temperature na precizno određenim mestima, zasnovane na promeni električnog otpora nanocevi usled promene temperature (Sl. 8). Ovakve termalne nanosonde su pogodnije nego termometri zasnovani na nanocevima koji zahtevaju stvaranje slike putem mikroskopa baziranih na transferu elektrona. Ove sonde, takođe, imaju bolju proizvodnu ponovljivost nego nanosonde konstruisane putem dielektroforeznog spajanja nanocevi [26].



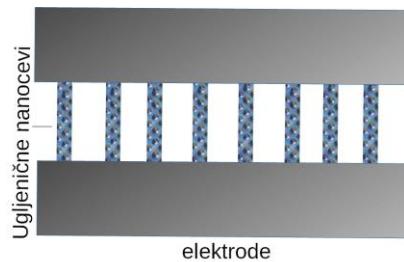
**Slika 8.** Ukrštena konfiguracija nanocevi

Takođe, ovakva konfiguracija nanocevi je povoljnija od mosne konfiguracije, za konstrukciju gasnih nanosenzora ili nanosenzora za detekciju masenog protoka zasnovanih na vrelim žicama.

Integracija ovih uređaja može se ostvariti u konfiguracijama prikazanih na slici 9 i na slici 10 [27, 8]. Konfiguracije u vidu niza pojedinačnih nanocevi mogu da se koriste za proizvodnju nanosenzora kao što su enkoderi položaja [28].



Slika 9. Varijanta I redne konfiguracije nanocevi



Slika 10. Varijanta II redne konfiguracije nanocevi

#### 4. ZAKLJUČAK

Nanoelektromehanički sistemi zasnovani na nanocevima predstavljaju bogato polje istraživanja. Pojave koje se javljaju kao posledica nanodimensija konstrukcija od nanocevi omogućavaju nove generacije nanosenzora za detekciju ultramalih veličina ili objekata, te konstrukciju nanoaktuatora i nanoalata za aktuaciju i manipulaciju ultramalih objekata, sa ultravelikom preciznošću i pri ultravelikim frekvencijama. Za ovo su već u naučnoj javnosti demonstrirani prototipovi konstruisani putem nasumičnog rasipanja ugljeničnih nanocevi, direktnog narastanja ugljeničnih nanocevi na mesto montaže, i ručnom ili nanorobotskom manipulacijom ugljeničnim nanocevima. Iako je nanomanipulacija najprecizniji metod sklapanja nanocevi, ona je istovremeno i najsporija. Zbog toga se može pretpostaviti da će, kada je u pitanju masovna proizvodnja elemenata nanorobota zasnovanih na ugljeničnim nanocevima, procesi samosklapanja dobijati na sve većoj važnosti.

#### REFERENCE

- [1] B. J. Nelson, L. Dong: Nanorobotics, in: B. Bhushan (Ed.): *Springer Handbook of nanotechnology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 1633-1659, 2010.
- [2] C. Mavroidis, A. Ferreira (Eds.): *Nanorobotics - Current Approaches and Techniques*, Springer Science+Business Media, New York, 2013.
- [3] B. Bhushan: Introduction to nanotechnology, in: B. Bhushan (Ed.): *Springer Handbook of nanotechnology*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 1-14, 2010.
- [4] L. X. Dong: *Nanorobotic manipulations of carbon nanotubes*, Ph.D. Thesis, Nagoya University, Nagoya, 2003.
- [5] R. Martel, T. Schmidt, H.R. Shea, T. Hertel, Ph. Avouris: Single- and multi-wall carbon nanotube field-effect transistors, *Applied Physics Letter*, Vol. 73, pp. 2447-2449, 1998.
- [6] N.R. Franklin, Y.M. Li, R.J. Chen, A. Javey, H. Dai: Patterned growth of single-walled carbon nano-tubes on full 4-inch wafers, *Applied Physics Letters*, Vol 79, pp. 4571-4573, 2002.
- [7] T. Rueckes, K. Kim, E. Joselevich, G.Y. Tseng, C.-L. Cheung, C.M. Lieber: Carbon nanotube-based non-volatile random access memory for molecular computing, *Science*, Vol. 289, pp. 94-97, 2000.
- [8] A. Subramanian, B. Vikramaditya, L.X. Dong, D. Bell, B.J. Nelson: Micro and nanorobotic assembly using dielectrophoresis, in: S. Thrun, G.S. Sukhatme, S. Schaal (Eds.): *Robotics: Science and Systems I*, MIT Press, Cambridge, pp. 327-334, 2005.
- [9] T. Fukuda, F. Arai, L.X. Dong: Assembly of nanodevices with carbon nanotubes through nanorobotic manipulations, in *Proceedings of IEEE*, Vol. 91, pp. 1803-1818, 2003.
- [10] H. J. Dai, J. H. Hafner, A. G. Rinzler, D. T. Colbert, R.E. Smalley: Nanotubes as nanoprobe in scanning probe microscopy, *Nature*, Vol. 384, pp. 147-150, 1996.
- [11] L.X. Dong, F. Arai, T. Fukuda: Electron-beam-induced deposition with carbon nanotube emitters, *Applied Physics Letters*, Vol. 81, pp. 1919-1921, 2002.
- [12] J.H. Hafner, C.L. Cheung, C.M. Lieber: Growth of nanotubes for probe microscopy tips, *Nature*, Vol. 398, pp. 761-762, 1999.
- [13] H. Nishijima, S. Kamo, S. Akita, Y. Nakayama: Carbon nanotube tips for scanning probe microscopy: preparation by a controlled process and observation of deoxyribonucleic acid, *Applied Physics Letters*, Vol. 74, pp. 4061-4063, 1999.
- [14] P. Poncharal, Z.L. Wang, D. Ugarte, W.A. de Heer: Electrostatic deflections and electromechanical resonances of carbon

- nanotubes, *Science*, Vol. 283, pp. 1513–1516 1999.
- [15] L.X. Dong, F. Arai, M. Nakajima, P. Liu, T. Fukuda: Nanotube devices fabricated in a nano laboratory, in *Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 14-19.09.2003. Taipei, Taiwan, pp. 3624–3629.
- [16] M. Nakajima, F. Arai, L.X. Dong, T. Fukuda: Calibration of carbon nanotubes probes for Pico-Newton order force measurement inside a scanning electron microscope, *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol. 16, No. 2, pp. 155–162, 2004.
- [17] A. Subramanian, B.J. Nelson, L.X. Dong, D. Bell: Dielectrophoretic nanoassembly of individual carbon nanotubes onto nanoelectrodes, in *Proceedings of the 6th IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning: From Nano to Macro Assembly and Manufacturing*, 19-21.07.2005, Montréal Que., Canada, pp. 200–205.
- [18] J. Kong, N.R. Franklin, C. Zhou, M.G. Chapline, S. Peng, K. Cho, H. Dai: Nanotube molecular wires as chemical sensors, *Science*, Vol. 287, pp. 622–625, 2000.
- [19] L.X. Dong, B.J. Nelson, T. Fukuda, F. Arai: *Towards linear nano servomotors with integrated position sensing*, in *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 18-22.04.2005, Barcelona, Spain, pp. 855–860.
- [20] Y.H. Gao, Y. Bando: Carbon nanothermometer containing gallium, *Nature*, Vol. 415, 599, 2002.
- [21] R.H. Baughman, C.X. Cui, A.A. Zakhidov, Z. Iqbal, J.N. Barisci, G.M. Spinks, G.G. Wallace, A. Mazzoldi, D. De Rossi, A.G. Rinzler, O. Jaschinski, S. Roth, M. Kertesz: Carbon nanotube actuators, *Science*, Vol. 284, pp. 1340–1344, 1999.
- [22] S.W. Lee, D.S. Lee, R.E. Morjan, S.H. Jhang, M. Sveningsson, O.A. Nerush, Y.W. Park, E.E.B. Campbell: A three-terminal carbon nanorelay, *Nano Letters*, Vol. 4, pp. 2027–2030, 2004.
- [23] J. Cumings, A. Zettl: Low-friction nanoscale linear bearing realized from multiwall carbon nanotubes, *Science*, Vol. 289, 602–604, 2000.
- [24] A.M. Fennimore, T.D. Yuzvinsky, W.-Q. Han, M.S. Fuhrer, J. Cumings, A. Zettl: Rotational actuators based on carbon nanotubes, *Nature*, Vol. 424, pp. 408–410, 2003.
- [25] P. Kim, C.M. Lieber: Nanotube nanotweezers, *Science*, Vol. 286, pp. 2148–2150, 1999.
- [26] C.K.M. Fung, V.T.S. Wong, R.H.M. Chan, W.J. Li: Dielectrophoretic batch fabrication of bundled carbon nanotube thermal sensors, *IEEE Transactions on Nanotechnology*, Vol. 3, pp. 395–403, 2004.
- [27] A. Subramanian, L.X. Dong, B.J. Nelson: Selective eradication of individual nanotubes from vertically aligned arrays, in *Proceedings of the 2005 IEEE/ASME International Conference on Advances Intelligent Mechatronics*, 24-28.07.2005, Monterey, California, U.S.A., pp. 105–110.
- [28] L.X. Dong, A. Subramanian, B.J. Nelson: Nano encoders based on arrays of single nanotube emitter, in *Proceedings of the 2005 5th IEEE International Conference on Nanotechnology*, 11-15.07.2005, Nagoya, Japan, pp. 211–214.

## ON NANOROBOT ELEMENTS WITH SPECIAL RESPECT TO NANOTUBE NANOELECTROMECHANICAL SYSTEMS

**Abstract:** In the work, possible nanoelectromechanical nanorobot elements have been enumerated. Production methods of nanoelectromechanical components have been exposed with special respect to production of carbon nanotube based nanoelectromechanical components that are essentially obtained by using Atomic Force Microscopy. Possible nanoelectromechanical nanorobot elements, based on various structural configurations obtained through nanotube junctions, have been considered, and examples of their applications as nanorobot structural elements in the roles of nanotools, nanosensors and nanoactuators have been depicted. The prospect of self-assembly in mass production of nanorobot nanoelectromechanical elements has been stressed.

**Keywords:** nano, electromechanical, robot, nanotubes, elements, self-assembly



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

### 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## GLAVNI IZAZOVI ZA KVALITET 4.0 U OKVIRU KONCEPTA INDUSTRIJA 4.0

Miladin STEFANOVIĆ<sup>1\*</sup>, Aleksandar ĐORĐEVIĆ<sup>2</sup>, Hrvoje PUŠKARIĆ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, miladin@kg.ac.rs,  
coadjordjevic@yahoo.com, hrvoje@kg.ac.rs

**Apstrakt:** Konstantan napredak proizvodne industrije i kompleksnih proizvodnih sistema, zajedno sa intenzivnom digitalizacijom dovelo je do pojave novog koncepta, zvanog Industrija 4.0. Industrija 4.0 se posmatra kao i najnovija, digitalna industrijska revolucija, mada je ove pre reč o evoluciji. Ovaj pristup zasigurno zahteva potplnu, ili što kompletnejšu, digitalizaciju svih proizvodnih procesa i primenu različitih savremenih digitalnih i ICT tehnologija na kompletном životnom ciklusu proizvoda. Ovakav pristup, naravno utiče na promenu mnogih postajećih paradigmi. Ovaj rad će pokušati da sugerise na pravce razvoja menadžmenta kvalitetom u novonastalom konceptu, a pre svega sa aspekta mogućih arhitektura i unapređenja ljudskih resursa da bi se promene izvele na najbolji mogući način.

**Ključne reči:** Industrija 4.0, kvalitet, QMS, arhitektura, digitalizacija, digitalne kompetencije

### 1. UVOD

Evropska digitalna agenda, kreirana od strane Evropske unije, ima za cilj da omogući poslovnoj zajednici ali i građanima da maksimizuju benefite od modernih digitalnih tehnologija [1]. Čitav niz aktivnosti i dokumenata Evropske komisije ide u pravcu kreiranja, unapređivanja, a zatim i sprovođenja Strategije jedinstvenog digitalnog tržišta koja pak utiče na brojne koncepte i menjanje čitavog okruženja u kome živimo. Sama Evropska komisija je svoje ideje i napore formulisala kroz definisanje tri osnovna stuba [2]:

- pristupa (bolji pristup kupaca i poslovnih činilaca dobrima i uslugama širom Evrope),
- okruženja (kreiranje pravih uslova i okruženja za napredak i širenje digitalnih mreža i inovativnih servisa),

- ekonomija i društvo (maksimiziranje rasta i potencijala digitalne ekonomije).

Jedan od osnovnih pravaca razvoja u okviru maksimiziranja digitalne ekonomije su planovi i mere za digitalizaciju evropske industrije, odnosno formiranju nečega što je već poznato kao Industrija 4.0. Industrija 4.0 se može posmatrati kao sveobuhvatna transformacija celokupne industrijske proizvodnje koja stapa digitalnu tehnologiju i konvencionalnu industriju [1, 2]. U principu termin Industrija 4.0 se koristi paralelno sa terminima koji pokrivaju slično značenje: Pametne fabrike, Industrijske Internet stvari, Pametna industrija ili sl.

U svakom slučaju, bez obzira koji pojma koristili, ono što karakteriše navedenu promenu, odnosno formiranje Industrije 4.0 predstavlja uključivanje novih, inovativnih tehnologije:

- Primena informaciono komunikacionih tehnologija (ICT) za digitalizaciju informacija i integraciju sistem u svim fazama životnog ciklusa proizvoda, i interno ali i eksterno prema okruženju [3].
- Sajber - fizički sistemi (*Cyber - physical system*) koji koristi ICT za nadgledanje i kontrolu fizičkih procesa i sistema [4].
- Mrežne komunikacije koje uključuju bežične i internet tehnologije koje imaju zadatak da povežu mašine, proizvod, sisteme i ljude, i u samom preduzeću ali i sa dobavljačima i distributerima.
- Simulacija, modeliranje i virtualizacija u projektovanju proizvoda i organizaciji i sprovođenju proizvodnih procesa.
- Prikupljanje i analiza ogromne količine podataka, kao i njihova trenutna upotreba u fabrikama ili kroz analizu velike količine podataka ili cloud računarstva [5].

Naravno, ovakve promene i uvođenje, digitalizacija, masivna primena ICT tehnologija dovodi do promena svih aspekata funkcionalisanja i organizovanja unutar svakog preduzeća. Otvaraju se broja pitanja na koji način će koncept Industrije 4.0 uticati na recimo upravljanje kvalitetom i da li možemo govoriti o konceptu Kvaliteta 4.0 i šta bi on predstavljao i na koji način bi bio povezan, zasnovan i usmeren na direktivama ISO 9001:2015? Ovaj rad će pokušati da da osnovne obrise koncepta Kvalitet 4.0 i da ukaže na ključne elemente od kojih će zavisiti nivo uspeha ovog koncepta.

## 2. KONCEPT KVALITETA U INDUSTRIJI 4.0

Ako bi pošli od prepostavki i ideja koji formulišu Industriju 4.0 mogli bi da napravimo paralelu i da probamo da definišemo Kvalitet 4.0 kao digitalnu transformaciju procesa i ljudi sa ciljem unapređenja kvaliteta. Različita istraživanja ukazuju da koncept uvođenja i unapređenja kvaliteta zahteva obučenu, informisanu i motivisanu radnu snagu, a pre

svega menadžment koji ima jasnu predstavu o konceptu, i dobrobitima koji on donosi.

Sa druge strane kao što Industrija 4.0 ne može biti samostalna strategija tako ni Kvalitet 4.0 ne može biti samostalna strategija već mora imati svoju ulogu o opštoj digitalnoj transformaciji koja se zahteva. Bilo bi nerealno očekivati da će Kvalitet 4.0 kompletno zameniti tradicionalne modele kvaliteta, ali za očekivanje je da oni budu nadgrađeni i unapređeni [6].

Za početak je potrebno pogledati na kojim se osnovnim zahtevima i principima zasniva menadžment kvalitetom (u slučaju ovog rada prati se ISO 9001:2015) i to su [7]:

- usredsređenost na korisnika,
- liderstvo,
- angažovanje ljudi,
- procesni pristup,
- poboljšavanje,
- donošenje odluka na osnovu činjenica, i
- menadžment međusobnim odnosima.

Na osnovu navedenih zahteva jasno je da Kvalitet 4.0 ne bi smeо da podrazumeva samo implementaciju tehnologije same zbog sebe, već implementaciju tehnologije koja unapređuje organizacionu kulturu, saradnju, kompetencije i liderstvo....

Polazeći od osnovnih zahteva menadžment kvalitetom mogu se definisati pravci koji bi bili izloženi digitalizaciji odnosno na koji najefikasniji način može se uticati na kvalitet procesa i kvalitet ljudskih resursa korišćenjem novih tehnologija.

Osnovna područja unapređenja mogu se definisati kao:

- **Povezanost.** Viši nivo povezanosti što podrazumeva povezanost kako ljudi, tako i podataka iz životnog ciklusa proizvoda, ali i podataka nastalih kao rezultat realizacije proizvoda. Različita rešenja kao što su ERP (*Enterprise Resource Planning*), PLM (*Product Life-cycle Management*) i slično su postajali ali uvođenje novih, jeftinih senzora i ICT baziranih na cloud sistemima i web servisima omogućava kreiranje odziva gotovo u realnom vremenu i mnogo više performanse i kapacitete realnih sistema.

- **Saradnja.** Primena savremenih ICT rešenja za unapređenje saradnje, što pak utiče na osnovne zahteve QMS, a to je uključivanje ljudi, i menadžment međusobnim odnosima.
- **Unapređenje kulture kvaliteta.** Korišćenjem savremenih tehnologija kvalitet procesa i ishoda su vidljiviji i relevantniji. Sa druge strane na osnovu prikupljenih podaka i analitika nove aplikacije mogu unaprediti kulturu kvaliteta kroz deljenje informacija i saradnju.
- **Liderstvo.** Pošto je kvalitet vrednost celog preduzeća očigledno je da u Industrija 4.0 koja sama po sebi zahteva promenu baziranu u osnovu na tehnologiji, će zahtevati i kreiranje liderskih inicijativa za unapređenje kvaliteta korišćenjem tehnologija kao iz oblasti kvaliteta tako i iz drugih oblasti koje će prepoznati značaj novog unapređenja kvaliteta.
- **Kompetencije.** Jasno je da će fokus biti i na profesionalnim kompetencijama koje je potrebno stalno unapređivati, ali i na kreiranju i unapređivanju digitalnih kompetencija koje će biti zahtevane od strane svih zaposlenih. Da bi ljudi prema zahtevima QMS-a bili angažovani, neophodno je ne samo da prepoznačaju potrebu i da budu uključeni od strane rukovodstva, već da u ovom slučaju poseduju potrebne digitalne kompetencije koje će im biti neophodne da bi uopšte mogli da se uključe u koncept Industrije 4.0.

Ostvarivanje promena na definisanim područjima zahtevaće pre svega:

- Prikupljanje i analiza velikih količina podataka. Pošto je jedan od osnovnih zahteva QMS donošenje odluka baziranih na činjenicama, a što je naglašeno i u svim novijim standardima, neophodno je razviti i upotrebiti sisteme za prikupljanje i analizu velikih količina podataka. Kada govorimo o podacima, naravno potrebno je prikupljati i analizirati podatke koje nastaju kako u internim procesima (senzori i sl...) tako i na osnovu komunikacije sa poslovnim

okruženjem (dobavljačima, kupcima i sl.). Analitika sa druge strane, otključava odnosno daje smisao prikupljenim podacima koji nam pak omogućavaju donošenje kvalifikovanih odluka.

- Razvoj novih aplikacija koja će biti bazirane na Internet tehnologijama i koje će se razvijati tako da budu sastavljene od komponenti koje smo mogu ponovo koristiti, koji će biti jednostavne i dostupne, koje će biti prilagodljive različitim uređajima (mobilnim uređajima, računarima i sl.) ali i pouzdane i robusne sa mogućnostima praćenja procesa, prikupljanja i prezentovanja podataka, vizuelnog predstavljanja, analitike ali i visokog novo povezanosti zbog podrške saradnji, kako horizontalnoj, tako i vertikalnoj. Pri čemu se javlja potreba za postojanjem aplikacijskih rešenja za QMS kao haba svih aktivnosti menadžmenta kvalitetom, sa omogućavanjem praćenja toka procesa, centralnom analitikom, i poljima za saradnju.

Postavlja se pitanje ša su prvi koraci koji bi trebalo da omoguće nadgradnju postojećih modela kvaliteta u pravcu realizacije koncepta Kvaliteta 4.0. Predlog je da se napor usmere na dve tačke i to: (1) analiza i unapređenje digitalne pismenosti zaposlenih ali i organizacija u celini kao neophodnog preduslova za uvođenje, unapređivanje i održavanje bilo kog koncepta baziranog na digitalizaciji i ICT tehnologijama, (2) razvoj arhitekture softverskih rešenja za podršku Kvalitetu 4.0.

### **3. DIGITALNA PISMENOST KAO PREDUSLOV UVOĐENJA KVALITETA 4.0**

#### **3.1 Okvir digitalne pismenosti i nivo digitalne pismenosti**

Jasno je da je digitalna pismenost predstavlja okvir za uvođenje svake vrste digitalizacije u industriji, i bilo kojih sistema baziranih na ICT tehnologijama. Sa druge strane da bi se izmerio nivo digitalne sposobnosti bilo pojedinca, bilo institucije

neophodno je primeniti neki okvir i utvrditi nivo digitalne pismenosti, odnosno nivo digitalnih kompetencija pojedinaca ili institucija. U Srbiji ne postoji javno definisani pristup u merenju i procenjivanju digitalne pismenosti, za razliku od EU koja je definisala svoj okvir u dokumentu "The Digital Competence Framework for Citizens". Pomenuti okvir se bazira na sledećim dimenzijama [8]:

1. Dimenzija 1: Područja kompetencija koje su identifikovane kao deo digitalnih kompetencija

2. Dimenzija 2: Deskriptori kompetencija i naslovi koje se odnose za svaku oblast
3. Dimenzija 3: Nivo kriterijuma za svaku kompetenciju
4. Dimenzija 4: Znanja, veštine i stavovi primenjivi za svaku kompetenciju
5. Dimenzija 5: Primeri upotrebe, za primenljivost kompetencije za različite svrhe.

Same kompetencije su svrstane u 5 kategorija [8].

**Tabela 1.** Digitale kompetencija i ocene nivoa u okviru preliminarne studije

Dimenzija D1	Dimenzija D2	D3	D5	G1	G2	G3
1. informaciona i digitalna pismenost	1.1 Pretraživanje i filtriranje podataka, informacija i digitalnog sadržaja			8	8	6
	1.2 Ocena podataka, informacija i digitalnog sadržaja			8	8	6
	1.3 Upravljanje podacima, informacijama i digitalnim sadržajem			8	8	5
2. komunikacija i saradnja	2.12.1 Interakcija pomoću digitalnih tehnologija		8 nivoa za 21 kompetenciju Osnovni, Srednji, Napredni, Visoko specijalizovan (svaki sa 2 podnivoa)	8	8	4
	2.2 Deljenje kroz digitalne tehnologije			8	8	3
	2.3 Ostvarivanje ličnih prava kroz digitalne tehnologije			7	6	2
	2.4 Saradnja kroz digitalne tehnologije			8	7	4
	2.4 Pravila ponašanja			7	6	3
	2.6 Upravljanje digitalnim identitetom			7	6	3
3. kreiranje digitalnog sadržaja	3.1 Razvoj digitalnog sadržaja		Primeri 8 nivoa primenjenih na učenje i zapošljavanje za 21 kompetenciju Grupe su izabrali sa sledećim razlozima, studenti tehničkog fakulteta pošto su to budući stručnjaci koji će nositi promenu, studenti ne tehničkih fakulteta pošto su to budući stručnjaci koje će promena zahvatiti u procesu uvođenja koncepta Industrije 4.0 i Kvaliteta 4.0 i zaposleni u preduzećima proizvodnog tipa, kao oni koje se trenutno	5	3	2
	3.2 Integracija i kombinovanje digitalnih sadržaja			5	2	1
	3.3 Copyright i licence			2	1	1
	3.4 Programiranje			5	2	1
4. bezbednost	4.1 Zaštita uređaja			4	3	2
	4.2 Zaštita ličnih podataka i privatnosti			5	4	2
	4.3 Zaštita zdravlja			1	1	1
	4.4 Zaštita okruženja			1	1	1
5. rešavanje problema	5.1 Rešavanje tehničkih problema			5	1	2
	5.2 Identifikacija potreba i tehnoloških rešenja			4	2	1
	5.3 Kreativno korišćenje digitalnih tehnologija			5	3	2
	5.4 Identifikacija gap-a u digitalnim kompetencijama			4	4	2

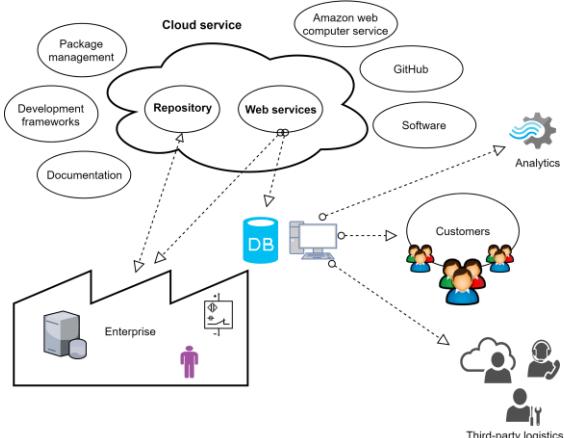
Autori su sprovedli preliminarno istraživanje na tri različite populacije: studentima tehničkog fakulteta (Fakultet inženjerskih nauka), studentima ne tehničkih fakulteta i zaposlenih u privredni - Tabela 1. Ukupno je po 20 studenata, odnosno zaposlenih u jednom preduzeću srednje veličine gde su pokrivene sve strukture radnika, bilo uzeto za analizu.

Grupe su izabrali sa sledećim razlozima, studenti tehničkog fakulteta pošto su to budući stručnjaci koji će nositi promenu, studenti ne tehničkih fakulteta pošto su to budući stručnjaci koje će promena zahvatiti u procesu uvođenja koncepta Industrije 4.0 i Kvaliteta 4.0 i zaposleni u preduzećima proizvodnog tipa, kao oni koje se trenutno

nalaze u sistemu koji može biti zahvaćen promenama. Rezultati su takvi da je jasno da nivo digitalnih kompetencija ciljnih grupa nije na visokom nivou, i da je potrebno unapređenje digitalnih kompetencija. Ovo je u, domaćim uslovima, možda i polazni korak u uvođenju bilo kojih elemenata koji čine Industriju 4,0, a to je obuka i podizanje nivoa kompetencija zaposlenih.

### 3.2 Predlog softverske arhitekture sa sistem za podršku upravljanju kvalitetom u konceptu Kvalitet 4.0

Uvideći pomenute nedostatke, javlja se potreba za postojanjem aplikacijskih rešenja za QMS kao haba svih aktivnosti menadžmenta kvalitetom, sa omogućavanjem praćenja toka procesa, centralnom analitikom, i poljima za saradnju. Imajući u vidu činjenicu da je Internet stvari jedan od pravaca razvoja neophodnih za realizaciju koncepta Industrije 4.0 jasno je da će pored uključivanja podataka sa velikog broja senzora iz različitih izvora biti jedan od osnovnih preduslova za razvoj arhitekture za sve buduće softverske sisteme.



**Slika 1.** Arhitektura sistema za razvoj aplikacija u konceptu Kvaliteta 4.0

*Cloud Computing* je prirodni naslednik virtualizacije, arhitekture zasnovane na servisima i računarstvu baziranom na uslugama. Korišćenjem cloud-a moguće je se sa jedne strane razvijene web servise učiniti ih ili besplatno javno dostupnim, ili dostupnim po izvesnoj ceni ili pak privatnim, sa druge strane na cloud-u se mogu nalaziti paketi koji se

mogu koristiti za razvoj novih aplikacija. Složene aplikacije se prema ovome mogu kreirati uz korišćenje raspoloživih komponenti koje mogu biti dostupne i za kreiranje unutar preduzeća ali i rešenja koja prevazilete organizacione granice preduzeća. Aplikacije moraju biti imati responzivni dizajn i prilagođavati se različitim uređajima mobilnim, prenosnim ili "klasičnim računarima" pri čemu bi se podaci prikupljali sa različitih uređaja, inputa ili senzora. U okviru centra za kvalitet, Fakulteta u Kragujevcu u toku je realizacija softvera za QMS, koja se razvija korišćenjem okvira za razvoj web aplikacija i koja ima za cilj podršku ključnih procesa i ciljeva QMS.

## 4. ZAKLJUČAK

Industrija 4.0 je koncept koji se širi i koji prema podršci koju ima dobija karakter korenite promene koja će zahvatiti poslovne sisteme u svetu. Samo koncept Industrije 4.0 se u najjednostavnijim crtama bazira na snažnoj digitalizaciji i informatizaciji svih sfera delovanja, komuniciranja i aktivnosti koje se odvijaju u preduzeću. Sa druge strane intenzivna digitalizacija ima nesumnjiv uticaj i na druge domene, pri čemu je u ovom radu identifikovan kvalitet i mogućnost pojave onoga što bi se mogao nazvati Kvalitet 4.0. Na osnovu prezentovanog na prvom mestu se jasno vidi da temeljni zahtevi ISO 9001:2015 nisu u suprotnosti sa navedenim akcijama, već da ISO 9001:2015 sa implementacijom tehnologije koja unapređuje organizacionu kulturu, saradnju i povezanost, kompetencije, liderstvo predstavlja ono što možemo nazvati Kvalitet 4.0. Ono što je sa druge strane neophodno od informacionih tehnologijama u prvoj iteraciji je sublimirano u dva dela: prikupljanje i analiza velikih količina podataka i kreiranje novih aplikacija u savremenom okruženju.

Na pitanje odakle početi u procesu transformacije autoru sugeriju da je neophodno obezbediti preduslove da se promena, odnosno planirana digitalizacija dogodi, a to je unapređivanje digitalne pismenosti zaposlenih ali i kompletног

stanovništva. Korišćenjem EU okvira i inicijalnom analizom utvrđeno je da je nivo digitalne pismenosti, po svemu sudeći nedovoljan da bi se uspešno započela i obavila digitalna transformacija. Zaključak je da je potrebno iznaći načine za unapređenje digitalne pismenosti kao preduslova digitalizacije i uvođenja koncepta Industrije 4.0 i Kvaliteta 4.0 imajući pre svega u vidu i temeljne zahteve ISO 9001: 2015 koji govore o angažovanju ljudi, menadžmentu međusobnim odnosima, liderstvu ali i usredsređenosti na korisnika u novom digitalnom društvu koje ubrzan nastaje. Da bi se pokrili i ostali temeljni zahtevi ISO 9001:2015 poboljšavanje donošenje odluka na osnovu činjenica, ali i prethodno navedenih potrebna su nova, unapređena softverska rešenja za QMS (*Quality Management System*). Autori su predložili moguću arhitekturu jednog takvog sistema imajući u vidi najnovije tehnička i softverska rešenja u oblasti ICT i Interneta.

Dodatno, Kvalitet 4.0, po viđenju autora ne treba posmatrati kao revolucionarnu promenu već kao na unapređenje svih dosadašnjih modela, principa i zahteva uz dodatno korišćenje ICT tehnologija i digitalizacije.

## LITERATURA

- [1] European Commision (2017), Implementation of the Digital Single Market Strategy, Pristupljeno: 10.10.2018.
- [https://ec.europa.eu/commission/priorities/digital-single-market\\_en](https://ec.europa.eu/commission/priorities/digital-single-market_en)
- [2] European Parlament, Industry 4.0 Digitalisation for productivity and growth, Pristupljeno: 10.10.2018. [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS\\_BRI\(2015\)568337\\_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS_BRI(2015)568337_EN.pdf)
- [3] Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1-10.
- [4] Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (2015). A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18-23.
- [5] Lee, J., Kao, H. A., & Yang, S. (2014). Service innovation and smart analytics for industry 4.0 and big data environment. *Procedia Cirp*, 16, 3-8.
- [6] Foidl, H., & Felderer, M. (2015, November). Research challenges of industry 4.0 for quality management. In *International Conference on Enterprise Resource Planning Systems* (pp. 121-137). Springer, Cham.
- [7] SRPS ISO 9001 - Системи менаџмента квалитетом — Захтеви
- [8] The Digital Competence Framework for Citizens, Pristupljeno 11.10.2018. [http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC106281/web-digcomp2.1pdf\\_\(online\).pdf](http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC106281/web-digcomp2.1pdf_(online).pdf)

## MAIN CHALANGES FO QUALITY 4.0 AS A PART OF CONCPET INDUSTRY 4.0

**Abstract:** Constant improvement of industry and complex industrial systems, accompanied with digitalization, lead to the concept we know today as Industry 4.0. Industry 4.0 could be understood as new digital industrial revolution, even we can consider process of digitalization as evolution rather than revolution. It is clear that this approach demands complete or as complete as it possible, digitalization of all processes in companies, implementation of different, digital and ICT technologies through complete life cycle of the product. This approach has influence on all other concepts and existing paradigms. This paper will try to point on position of quality management system in new, emerging concept, analysing improvement of human resources in field of development of digital competences as well as platforms for new software solution.

**Key word:** Industry 4.0, Quality, QMS, architecture, digitalization, digital competences



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

### 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## AUTOMATIZACIJA VAKUUM PEĆI ZA TERMIČKU OBRADU METALA

Pavle STEPANIĆ<sup>1,\*</sup>, Aleksa KROŠNJAR<sup>1</sup>, Radomir RADIŠA<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LOLA Institut, Beograd, Srbija, aleksa.krosnjar@li.rs, radomir.radisa@li.rs

\*Odgovorni autor: pavle.stepanic@li.rs

**Abstrakt:** U radu je predstavljena revitalizacija vakuum peći za termičku obradu metala koja je obuhvatala projektovanje i implementaciju sistema upravljanja na bazi programabilnog logičkog kontrolera i zamenu dotrajalog vakuumskog sistema peći. Cilj revitalizacije vakuum peći je postizanje zahtevanih režima termičke obrade i pouzdanog funkcionsanja peći. Primenom savremenog nadzorno-upravljačkog sistema obezbeđeno je optimalno upravljanje tehnološkim procesom. Nadzorno-upravljački sistem eliminiše neželjene promene ili ih ograničava u dozvoljenim granicama saglasno tehnologiji. Omogućena je vizuelizacija svih tehničko-tehnoloških objekata putem intuitivnih ekrana na operator panelu. Određeni objekti vakuum peći predstavljeni su odgovarajućim simbolima, koji menjaju boju u zavisnosti od statusa. Simbolima su pridruženi karakteristični parametri i veličine čije se tekuće vrednosti prate grafički i/ili u numeričkim poljima. Regulacija temperature u grejnoj komori vrši se korišćenjem programskog PI regulatora integrisanog u PLC kontroler. Primenom opisanog upravljanja postiže se optimizacija potrošnje energije, odgovarajući kvalitet termičke obrade, uz zadovoljenje zahteva koji se odnose na sigurnost i pouzdanost procesa u radu i usklađenost sa IEC standardima.

**Ključne reči:** vakuum peć, PLC kontroler, senzori procesnih veličina, PI regulator temperature.

### 1. UVOD

Vakumska peć je tip peći koja može zagrevati materijale, najčešće metale, na vrlo visoke temperature i sprovoditi različite termičke režime sa visokom stabilnošću i malim brojem nečistoća. Kod ovih peći obratci su unutar peći zaštićeni vakuumom. Zbog odsustva vazduha prenos topote se vrši samo zračenjem, a ne i konvekcijom. Obradak termički obrađen u vakuumskoj peći nije podložan procesu oksidacije zbog toga što se u grejnoj komori za zagrevanje nalazi vakuum i nema čestica koje bi stvarale štetne spojeve. U toku procesu zagrevanja na temperaturu obrade dolazi do razgradnje postojećih oksida.

Posledica toga je velika čistoća obrađivanog materijala i metalni sjaj.

Postupci termičke obrade koji se sprovode u rekonstruisanoj vakuum peći je kaljenje i žarenje. U postupku kaljenja prvo se vrši grejanje obratka podizanjem po zadatoj rampi na zadatu vednost temperature zagrevanja (maksimalno do 1350°C) i zatim određeno vreme držanja dostignute temperature. Po završetku procesa grejanja, počinje proces hlađenja pri čemu se šarža iz grejne komore pomoću odgovarajućih kolica prenosi u komoru za hlađenje. Postupak hlađenja metala se može vršiti gasom, pomoću ulja u uljnom kupatilu, ili kombinovano. Postupak žarenja, koji podrazumeva samo proces grejanja,

primenjuje se u obradi raznih metala i njihovih legura u cilju postizanja specifičnih tehnoloških svojstava.

Revitalizacijom vakuum peći za termičku obradu potrebno je bilo postići sledeće:

- osavremenjavanje sistema upravljanja sa izradom protokola svih režima termičke obrade,
- mogućnost predefinisanja receptura termičke obrade za svaki čelik i njihovo čuvanje,
- mogućnost nastavka procesa obrade u slučaju prekida iz bilo kog razloga,
- zapis i čuvanje podataka o svakoj šarži,
- osavremenjavanje sistema vakuma novim aktuelnim komponentama,
- olakšan rad operatora i jednostavnije održavanje,
- sigurnost i pouzdanost u radu,
- usklađenost sa IEC standardima.

Instrumentacija za upravljanje procesom u vakuumskim pećima za termičku obradu metala u industriji je veoma raznolika zbog činjenice da njen korisni radni vek varira od 20 do 50 godina. Konkurenčija i zahtevi tržišta sa kojima se susreću proizvođači vakuumskih peći imaju za posledice stalni razvoj i inovativno proširivanje mogućnosti primene termičke obrade u vakuumu. S obzirom na veoma visoku cenu vakuum peći, revitalizacija i modernizacija starih vakuum peći i zamena starih upravljačkih elektro ormana sa relejnom tehnikom novim upravljačkim elektro ormanom sa PLC-om (eng. Programmable Logic Controller) uz dodavanje novih funkcija pokazala se kao razuman izbor [1]. U ovom radu biće predstavljena jedna takva modernizacija vakuum peći i prednosti koje revitalizacija donosi.

Rad je podeljen u četiri odeljka. U odeljku 2 su dati detalji modernizacije i koncepcija upravljanja vakuum peći. Implementacija proporcionalno-integralnog upravljanja za regulaciju temperature u grejnoj komori je prikazana u odeljku 3. Na kraju u odeljku 4 su izneti odgovarajući zaključci o revitalizovanom sistemu i unapređenja koja su dobijena uvođenjem jednog ovakvog sistema u tehnološki proces.

## 2. DETALJI MODERNIZACIJE VAKUUM PEĆI

U današnjim vakuum pećima koriste se raznovrsne procesne veličine i promenljive koje se moraju pratiti i njima upravljati u cilju postizanja kvalitetnih rezultata termičke obrade. Informacije o stanju procesa kontroler dobija sa različitih vrsta senzora koji mere procesne promenljive od interesa i pretvaraju ih u pogodan električni oblik. Kontroler dobijene informacije zatim upoređuje sa zadatim vrednostima i kroz algoritme i proračune šalje odgovarajuće signale ka aktuatorima u cilju dobijanja željenih odziva upravljanih promenljivih. Upravljački sistemi na vakuum pećima koriste se za regulaciju temperature i pritiska u cilju postizanja željenih uslova procesa i ponovljivosti rezultata obrade. Programabilni logički kontroleri, senzori i ostala procesna instrumentacija, omogućavaju praćenje u realnom vremenu parametara procesa i optimalno upravljanje sistemom [2]. Kroz prikupljanje podataka o procesu, analizom i praćenjem njihovih trendova moguće je izvršiti predikciju eventualnih otkaza sistema.

Postojeći upravljački sistem sa relejnom tehnikom je zamenjen novim upravljanjem primenom PLC-a. Osnovu sistema za nadzor i upravljanje vakuum peći čine:

- programabilni logički kontroler (PLC), ABB platforma AC500, CPU PM583 sa integrisanim "ethernet" komunikacionim portom i odgovarajućim modularnim ulazima i izlazima,
- operatorski programabilni panel (OP) sa ekranom osetljiv na dodir, WEINTEK 15" TFT COLOR LCD TOUCH, sa "ethernet" komunikacionim portom,
- aplikativni softver (upravljački program) implementiran na PLC-u i operatorskom panelu.

Razmena podataka između PLC-a i OP-a je ostvarena preko "ethernet" komunikacionog porta i MODBUS TCP/IP protokola. Kao moguća nadogradnja sistema predviđeno je nadgledanje preko SCADA (eng. Supervisory Control And Data Acquisition) aplikacije. Sa udaljenog računara sa SCADA aplikacijom

omogućije će se prikaz svih stanja sistema i procesnih merenja sa mogućnošću njihovog istorijskog pregleda i štampanja.

Funkcije koje upravljački sistem obezbeđuje su:

- akvizicija (prihvatanje) podataka o stanju u procesu koji se dobijaju preko digitalnih ulaznih signala i analognih merenja,
- odgovarajuća obrada prihvaćenih podataka,
- izdavanje upravljačkih nalogu izvršnim uređajima preko digitalnih i analognih izlaznih signala,
- zaštita tehnološke opreme vakuum peći kroz detekciju kvarova na opremi,
- ostvarivanje uslova i blokada,
- zadavanje receptura termičke obrade i prikazivanje na operatorskom terminalu procesnih signala, vrednosti analognih merenja, operativnih parametara, alarma i poruka.

Mesto upravljanja i nadzora je elektro orman (Sl. 1). Upravljanje se vrši preko odgovarajućih tastera i drugih komandnih elemenata smeštenih na vratima elektro ormana, a nadzor je ostvaren svetlosnom i zvučnom signalizacijom. Operatorski terminal sa ekransom osjetljivim na dodir i implementiranom aplikacijom ekranskih prikaza predstavlja glavni deo kompletног sistema za nadzor rada vakuum peći i upravljanja sa vrata elektroormana. Ekranski prikazi aplikacije obuhvataju sve relevantne elemente nadzornog i upravljačkog sistema, koji su prikazani upotrebom aktivnih grafičkih simbola i/ili tekstualnih informacija. Posredstvom operatorskog panela, dobijaju se sve relevantne informacije o stanju u procesu i stanju procesnih veličina, u grafičkom i/ili tekstualnom obliku.

Grejanje vakuum peći je izvedeno preko jednostupnog regulacionog transformatora pravidne snage 37kVA, nazivnog napona primara 400V, 50Hz i napona na sekundaru koji se kreće u opsegu 0–40V. Sekundar transformatora je pomoću bakarnog užeta (pletenice) spojen sa grafitnim grejačima u grejnoj komori, čija je otpornost veoma mala

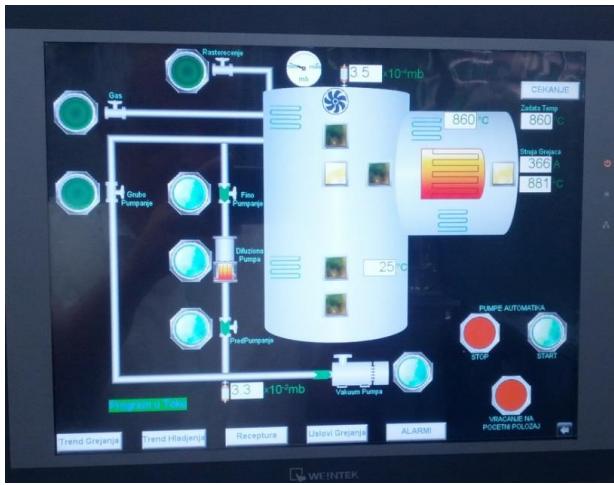
$\approx 0.04\Omega$ , tako da vrednost struje koja se uspostavlja može ići i do 1000A. Regulacija napona na sekundaru je ostvarena preko tiristorskog regulatora napona koji se nalazi u kolu primara transformatora. Preko analognog izlaza PLC-a konfigurisanog kao strujni signal 0–20mA, dovodi se zadata vrednost na analogni ulaz tiristorskog regulatora koji svojom upravljačkom logikom reguliše efektivnu vrednost naizmeničnog napon na primaru transformatora u opsegu 0–400V. Nazivna temperatura grejne komore je 1350°C i merenje temperature u njoj se vrši pomoću termoparova tipa S (90%Pt/10%Rh-Pt).



Slika 1. Izgled upravljačkog elektro ormana

Postojeći vakuumski sistem koji se sastoji od mehaničke vakuum pumpe i difuzione pumpe kao i vakuumskih ventila u upotrebi je poslednjih trideset godina i zamjenjen je novim savremenim komponentama koje su napravljene i usklađene sa elektro-mašinskim projektom i aktuelnim ekološkim standardima. Mehanička vakuum pumpa direktno ispumpava sistem do maksimalnog podprtisaka (grubi vakuum) koji omogućava rad difuzione

pumpe. Difuziona pumpa, koja i odvojeno povezuje mehaničku pumpu sa sistemom, uključuje se kada mehanička pumpa dostigne radni pritisak od  $10^{-1}$ mbar-a i kada se difuziona pumpa posredstvom odgovarajućeg grejača zagreje na temperaturu veću od  $200^{\circ}\text{C}$ . Odvajanje pojedinih ciklusa ispumpavanja omogućeno je vakuumskim ventilima, a kontrola i merenje pritiska u komori vrši se vakuumskim meračima pritiska. Na ovaj način, kombinacijom mehaničke i difuzione pumpe postiže se visoki vakuum koji se kreće do  $10^{-5}$  mbar-a. Odgovarajućim algoritmom upravljanja kroz aplikativni program PLC-a ostvareno je efikasno upravljanje mehaničkom vakuum pumpom, difuzionom pumpom i ugaonim elektropneumatskim i elektromagnetnim vakuumskim ventilima u cilju postizanja odgovarajućeg nivoa vakuma u zavisnosti od primjenjenog tehnološkog postupka. Uobičajene vrednosti vakuma koje su dobijene u toku procesa termičke obrade kretale su se u opsegu od  $10^{-4}$ – $10^{-1}$ mbar-a. Pumpna automatika uključuje se sa OP-a, a pored toga omogućeno je i pojedinačno uključenje pumpi i ventila. Stanje pumpi i ventila prikazani su odgovarajućim simbolima na simboličkoj šemi na OP-u (Sl. 2).



Slika 2. Izgled glavnog ekrana nadzora vakuum peći

### 3. IMPLEMENTACIJA PI REGULATORA TEMPERATURE

Upravljanje primenom PID algoritma je najčešći tip upravljanja prihvaćen i korišćen u industriji peći. Ovi regulatori se koriste zbog

njihove robusne performanse u širokom opsegu radnih uslova i jednostavnosti. Današnji PLC kontroleri sadrže PID u diskretnom obliku kao standardni programski modul [3]. PLC sa svojim A/D pretvaračima može primati analogne veličine iz upravljanog procesa (temperatura, pritisak, itd.), obraditi dobijenu informaciju i na kraju pomoću D/A pretvarača poslati analognu upravljačku veličinu procesu. Ova obrada dobijenih informacija se odvija upotrebom PID algoritama integrisanih u izvršni program PLC-a. Ispravnim izborom periode odabiranja upravljane veličine digitalni regulator će se ponašati slično analognom i dobiće se dobre performanse regulatora.

Aplikativni program za PLC je kreiran u CODESYS programskom okruženju [4]. Za programsку realizaciju PID regulatora u okviru CODESYS razvojnog okruženja za programiranje, koristi se standardna biblioteka, unutar koje se nalaze funkcionalni blokovi u kojima je realizovan PID algoritam. PID blok se izvršava prema sledećem algoritmu:

$$CV(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (1)$$

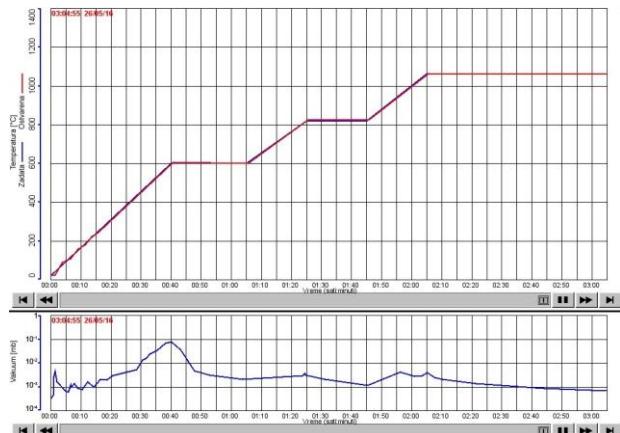
gde je  $CV(t)$  vrednost upravljačke promenljive,  $e(t)$  razlika između zadate vrednosti i procesne promenljive,  $K_p$  pojačanje regulatora,  $T_i$  integraciona vremenska konstanta,  $T_d$  vremenska konstanta diferenciranja. Jasno je da gornji izraz ne može direktno biti implementiran u PLC-u, ali se korišćenjem odgovarajućih matematičkih aproksimacija za diferenciranje i integraljenje može predstaviti u diskretnom obliku, kako je prikazano u jednačini (2):

$$CV(k) = CV(k-1) + K_p \begin{bmatrix} \left( 1 + \frac{T}{2T_i} + \frac{T_d}{T} \right) e(k) \\ -\left( 1 - \frac{T}{2T_i} + \frac{2T_d}{T} \right) e(k-1) \\ + \frac{T_d}{T} e(k-2) \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Nova veličina koja je uvedena u jednačini (2) predstavlja periodu odabiranja. U praksi, ovo u stvari predstavlja vreme osvežavanja upravljačke promenljive, tj. koliko se često algoritam izvršava. U PLC programu, PID blok se nalazi u posebnom programu koji se ciklično izvršava, a vreme  $T$  predstavlja interval između dva izvršavanja. Indeks  $k$  označava broj ciklusa, tako da  $CV(k-1)$  i  $e(k-1)$  predstavljaju vrednosti upravljačke promenljive i greške upravljanja iz prethodnog ciklusa izvršavanja.

Precizna regulacija temperature je od velikog značaja u funkcionisanju vakuum peći za termičku obradu metala. Ako se temperatura povećava ili smanjuje prebrzo, kvalitet termički obrađivanog materijala može biti ozbiljno ugrožena i finalni proizvod će imati značajna degradirajuća svojstva. Problemi zbog nedovoljne preciznosti u identifikaciji sporih procesa dovele su do ograničene primene analitičkih metoda u upravljanju temperaturom i primeni praktičnih metoda za podešavanje parametara PID regulatora na osnovu iskustva stečenog u eksploataciji [5].

Kako je za upravljanje procesom grejanja implementiran PI regulator diferencijalno dejstvo je isključeno postavljanjem  $T_d=0$ . Proporcionalno pojačanje je postavljeno na vrednost  $K_p=1$ , dok je vremenska konstanta integraljenja  $T_i=100s$ . Ciklično vreme izvršavanja PI algoritma je  $T=1s$ . Za date parametre regulatora dobijeni su zadovoljavajući rezultati regulacije temperature za zadate krive grejanja (Sl. 3).



Slika 3. Krive zadate i ostvarene temperature i trend vakuma u toku procesa termičke obrade

#### 4. ZAKLJUČAK

Regulacija temperature vakuum peći je implementirana korišćenjem programskog PI regulatora integrisanog u PLC kontroleru. Ovaj način upravljanja temperaturom dao je efikasne, pouzdane i robusne rezultate. Kako bi se izbegle oscilacije regulisane temperature vremenska konstanta integraljenja mora biti veća od vremenske konstante procesa.

Projekat automatizacije vakuum peći za termičku obradu metala omogućio je smanjenje vreme ciklusa termičke obrade i samim tim povećavanje nivoa proizvodnje. Poboljšanja koja su dobijena nakon automatizacije vakuum peći su: manje ožičenje mašine i lakše održavanje, lakšu dijagnostiku kvarova na mašini, optimizacija potrošnje energije, povećanje kvaliteta proizvoda.

PLC-ovi su postali integralni deo upravljačkih sistema u industrijskim procesima sa velikom pouzdanošću i lakom rekonfiguracijom upravljačkog algoritma, što je sa relejnom tehnikom i diskretnim kolima bilo izvodljivo ali je zahtevalo znatno više vremena za samu implementaciju.

#### REFERENCE

- [1] D. Kothari, M. Thakker, V. Revar: Automation of Heat Treatment Process using PLC and LabVIEW, IJLTEMAS, Vol. III, Issue V, pp. 102-107, 2014.
- [2] S. Stankov: Savremen način upravljanja procesom proizvodnje mineralne vune, Hemispska Industrija, Vol. 67, No. 2, pp. 375-384, 2013.
- [3] M. Fruk, D. Maršić, M. Puzak, G. Malčić: Upotreba PID regulatora integriranih u programirljivi logički kontroleri, in: *Proceedings of the 31st International Convention MIPRO 2008*, Rijeka, HR, pp. 108-112, 2008.
- [4] D.H. Hansen: *Programmable Logic Controllers: A Practical Approach to IEC 61131-3 using CoDeSys*, First Edition, John Wiley & Sons, Ltd., 2015.
- [5] C.M. Diniş, G.N. Popa, A. Iagăr: Research on temperature control with numerical regulators in electric resistance furnaces with indirect heating, in: *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 106, pp. 1-10, 2016.

## AUTOMATION OF VACUUM FURNACE FOR HEAT TREATMENT OF METAL

**Abstract:** In this paper are presented the revitalization of vacuum furnace for heat treatment of metals, which included the design and implementation of a control system based on the programmable logic controller, and the replacement of the obsolete equipment of vacuum furnace system. The aim of the revitalization of the vacuum furnace is the achievement of the required heat treatment arrangements and the reliable functioning of the furnace. The application of the modern monitor and control system ensures optimal controlling of the technological process. The monitor and control system eliminates unwanted changes or limits them within the permitted limits according to the technology. It is possible to visualize all technical-technological objects through intuitive screens on the operator panel. Certain vacuum furnace objects are represented by appropriate symbols, which change the color depending on the status. Symbols are associated with characteristic parameters and sizes whose current values are followed graphically and/or in numerical fields. The temperature control in the heating chamber is done using a programmable PI controller integrated in the PLC controller. By applying the described controlling are achieved optimization of energy consumption, appropriate quality of heat treatment, with the satisfaction of the requirements related to the safety and reliability of the process in operation and compliance with IEC standards.

**Keywords:** vacuum furnace, PLC controller, sensors of process parameters, PI controller temperature.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26.October 2018

## VIBRATION ISOLATION BEHAVIOR OF POROUS ALUMINIUM AND NBR/MULTI-WALLED CARBON NANOTUBE COMPOSITE MACHINE MOUNTS

Konstantinos TSONGAS<sup>1,\*</sup>, Gabriel MANSOUR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratory for Machine Tools and Manufacturing Engineering, Department of Mechanical Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, University Campus, 54124, Thessaloniki, Greece

\*Corresponding author: [ktsongas@auth.gr](mailto:ktsongas@auth.gr)

**Abstract:** There is an ever-increasing demand for lightweight, multifunctional material having both higher stiffness and higher damping. In many applications, higher damping in isolators can allow for beneficial changes in the natural frequencies of the vibration isolation system without deterioration in performance. The objective of this paper is to demonstrate an efficient modal testing method for the investigation of the vibration isolation performance between porous aluminium foams and elastomeric nanocomposite materials. This method utilizes vibration tests in order to measure experimental transfer functions (TFs) as a correlation parameter to analytical-experimental determined TFs. The procedure for the identification of analytical-experimental transfer functions is carried out using a genetic algorithm (GA) by minimizing the difference between the measured data from tests and the calculated response, which is a function of the modal parameters. The vibration isolation properties were determined through the analysis of the transmissibility of a suitably designed test system. Elastomers' vibration isolation properties were improved with the addition MWCNTs, suggesting that the enhancement of the elastomers with MWCNTs was rather effective compared to porous aluminum foam. The stiffness of an elastomer and its capacity to isolate vibration can be adjusted by controlling the proportion of MWCNTs. Potentially, the vibration isolation performance of the porous aluminium can be improved with the addition of nanocomposite NBR, filling the open pores, forming a hybrid nanocomposite mount.

**Keywords:** Nano composites, Vibration isolation, Genetic algorithm, Non-destructive testing, NBR; Carbon nanotubes, Aluminum foam.

### 1. INTRODUCTION

Resilient mounting is widely used in vibration and noise control to isolate a vibratory source from a receiving structure or from a structural component with a significant radiating area. In order to design an effective isolator or to predict the level of isolation, an

accurate measurement of the dynamic behaviour, i.e. dynamic complex stiffness and damping, is necessary. The concept of complex stiffness with viscous and hysteresis damping has been exquisitely explained for a single degree of freedom (SDOF) system [1]. Several test methods have been developed in order to characterize the complex modulus properties

of elastomeric engine mounts [2-5]. In the past, the damping capacity of conventional engineering materials has not generally provided sufficient energy dissipation to limit resonant or near-resonant amplitudes of vibration [6]. High damping capacity is an important factor for various industrial applications; therefore, it is necessary to develop structural components with a high level of structural damping. It would therefore be of interest to investigate new materials that simultaneously exhibit high damping capacity with high stiffness and low density which includes rubber matrix nanocomposites and porous metals.

High loss factor polymers have been used in the past for modern damping applications [7-9]. Nowadays there is a plethora of various other advanced materials that could be utilised in damping applications. Researchers have concentrated their efforts towards the development of polymers in which nanomaterials are embedded in polymer substrates and much promising results have been established primarily for improvement of the mechanical properties [10-12]. The interest in porous metals arises from the interesting combination of characteristics and the easy adjustment of their properties to meet the desired needs by tailoring porosity characteristics.

In order to assess the vibration isolation performance of such high stiffness and high damping materials, a modal testing method proposed by Mansour et al. [13-17] derives modal parameters from experimental transfer functions by a curve-fitting technique, in order to determine preliminary modal parameters, from which analytical expressions for the TFs are obtained. These analytical expressions are then employed as the TF input to the standard Asher method [18]. The important characteristic of Asher's method is its capability of identifying individual modes in regions of high modal density. There are several advantages in obtaining analytically-synthesized transfer functions by curve-fitting experimental data [19-23]. Significant data reduction is achieved and initial estimates of

natural frequencies are provided. Moreover, such a method permits interpolation between experimental data points to establish resonance frequencies more accurately, while noisy experimental data can be smoothed out.

## 2. EXPERIMENTAL DETAILS

### 2.1 Manufacturing of NBR/MWCNTs nano-composite and porousaluminium mounts

The arcylonitrile-butadiene rubber used was supplied by Nitriflex (Brazil). It was mixed with the commercial masterbatch (Graphistrength C E2-40) which is based on nitrile rubber resin that contains perfectly dispersed MWCNTs at a concentration of 40% by weight. Graphistrength C E2-40 is suited for the production of conductive or antistatic materials based on carboxylated, hydrogenatedplastisized or nonplastisized rubbers. The mixing was carried out using a two-roll mill (open mill) at temperature 70°C and 40 rev min<sup>-1</sup> (RPM) roller's speed for 25 min. The rubber was sufficiently masticated and thus became softer at a reduced viscosity. The appropriate amounts of the masterbatch pellets were then added thereby maintaining a desired MWCNTs weight ratio. The most efficient way to get the homogeneous rubber formulation was to mix firstly Graphistrength C E2-40 with approximately half of basic rubber and all vulcanization additives. The vulcanization additives consisted of crosslinkersulfur (3.2%), activators stearic acid, SA, (1%) and zinc oxide, ZnO, (6%), accelerants dibenzothiaoledisulfide, DM, (1.5%) and tetramethylthiuram disulphide, TMTD, (0.5%) and plasticizer dioctylphthalate, DOP, (12.5%). When the mixture started to look homogeneous, the final part of the rubber was introduced and the nanocomposite rubber was ready for molding. This last step was important for efficient vulcanization of the rubber. Then the nanocomposite rubbers were fabricated using a hot press at 150°C for 10 min and the specimens were cut into standard shapes. NBR nanocomposites with various MWCNTs loadings were produced. At least five

nanocomposite specimens were prepared with MWCNTs of 0 to 20wt%. Subsequently, MWCNTs/rubber elements were bonded between a steel pedestal and steel cap. The final dimensions of the NBR/MWCNTs mounts were 60mm diameter and 27mm height.

The porous aluminium work material employed in the cutting investigations was fabricated through liquid metallurgy using AlSi10 as matrix, by adding 1.3 wt% Ca (to enhance the viscosity) and 2 wt% TiH<sub>2</sub> particles (as foaming agent) and stirring the melt at 620–650°C [24]. From the obtained Al-foam with an average porosity of about 70%, plates were manufactured to a thickness of 30 mm.

## 2.2 Transmissibility

A machine mount with a preload mass can be represented as a single degree of freedom (SDOF) mass-spring-dashpot system. The transfer function characterizes the relation between input excitation at point and output response at point of the system. For analytical mode characterization, a genetic algorithm (GA) optimization technique has been used to fit experimental transfer function data with a set of superimposed, single-mode response functions [13-17]. The performance of an isolation system is assessed by the transmissibility of the system, which represents the ratio of the energy coming out of the system to the energy going into the system. Transmissibility is the non-dimensional ratio of the response amplitude (output) of a system in steady-state forced vibration to the excitation amplitude (input) [25]. The ratio may be one of forces, displacements, velocities, or accelerations.

The transmissibility,  $T(\omega)$  of the test system illustrated in Fig. 1 is expressed for this study as the ratio of the transmitted force to the excitation force. The force transmitted through the spring and damper to the supporting structure is:

$$F_T(t) = kx + cx \quad (1)$$

The magnitude of this force as a function of frequency can be written as:

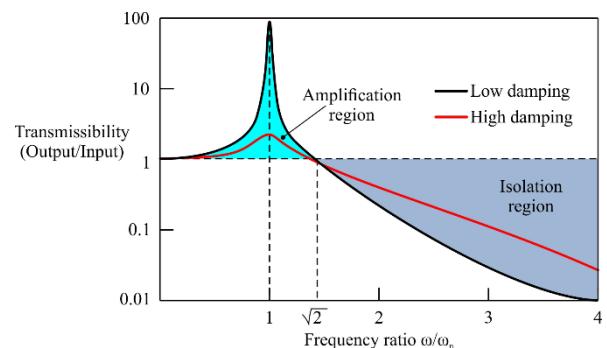
$$\tilde{F}_T(\omega) = \sqrt{[k\tilde{x}(\omega)]^2 + [\omega c\tilde{x}(\omega)]^2} \quad (2)$$

So the transmissibility can be expressed by the following relation

$$T(\omega) = \frac{\tilde{F}_T(\omega)}{\tilde{F}_1(\omega)} \quad (3)$$

where  $\tilde{F}_1$  is the magnitude of excitation force function of the impact hammer and

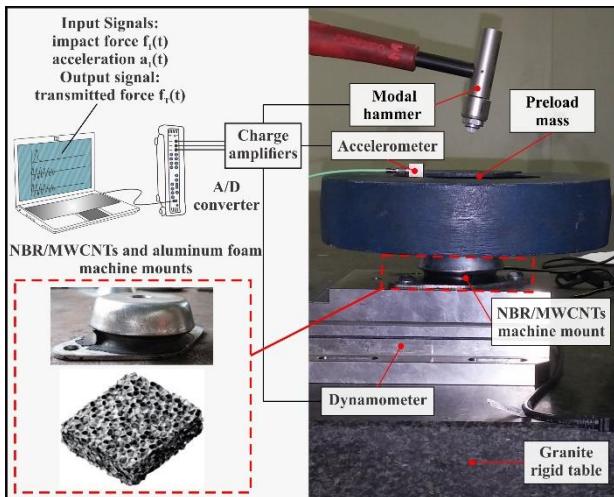
$\tilde{F}_T$  is the magnitude of the transmitted force through the engine mount to the supporting structure or base.



**Figure 1.** Comparison between typical transmissibility curves considering the damping of vibration isolators

A typical experimental apparatus in order to evaluate the vibration isolation performance of the nanocomposite mounts is illustrated in Fig. 2, where an NBR/MWCNTs isolator is mounted on a dynamometer with a cylindrical steel mass (10kg) used as a static preload. The NBR/MWCNTs mount provides the stiffness and damping for the SDOF system. An impact hammer with a high-quality piezoelectric force transducer (Endevco Model 2302-10) was used to apply force (input signal) along the center of the mass. The transmitted force was measured with a Kistler 9257A three component piezoelectric dynamometer and an associated charge amplifier. The dynamometer was secured to a heavy granite block by screws to resemble clamped boundary conditions. Simultaneously, the vibratory response (output signal) was recorded through an acceleration transducer with a sensitivity of 100mV/g (Brüel&Kjaer 4507B), mounted at the

top of the steel mass, while the sensing cables were kept in a free state, thereby having a little influence on the vibration tests. The analog signals of the impact hammer, the dynamometer and the accelerometer were amplified and then acquired by an analog-to-digital converter connected to a computer employing MATLAB software for immediate signal processing. The frequency span of acceleration signals was up to 1600Hz, the sampling time was 1s and the sampling frequency was 4096 samples per second (Hz). So the FFT resolution for a block size of 4096 samples is 1Hz. The modal hammer was calibrated by adjusting the level of the signal trigger force. Each specimen was tested 10 times and linear averaging was performed to cancel the effect of random noise.



**Figure 2.** Experimental setup of modal tests for measuring the loss factor and transmissibility of the NBR/MWCNTs and aluminum foam machine mounts

### 3. CHARACTERIZATION OF THE VIBRATION ISOLATION PERFORMANCE OF THE NBR/MWCNTS AND ALUMINUM FOAM MACHINE MOUNTS PROPOSED FOR VIBRATION ISOLATION

The transfer functions ( $G_{11}, G$ ) of the system were calculated in magnitude, real and imaginary part. These data were then used to calculate the loss factor ( $\eta$ ) and the transmissibility ( $T$ ) of each isolator-mass system. The data were obtained with curve fitting complex experimental transfer

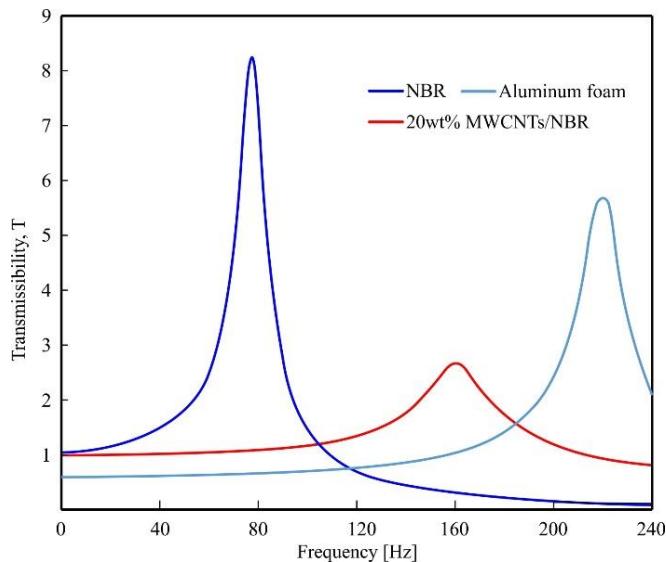
functions through the GA optimization method [13-17]. The analytical transfer functions identified the resonance of the important longitudinal mode for each of the isolators. The transmissibility was used to evaluate the effectiveness of the NBR/MWCNTs and the porous aluminum vibration isolators. The transmissibility curves were plotted to study the performance characteristics of the different MWCNTs/NBR isolation systems. Considering Eq. 3 the force transmissibility of each specimen is computed as function of frequency and the data were plotted as shown in Fig. 3. The plotted frequency range was selected from 0 Hz to 240Hz in order to identify the first axial mode for all the specimens. The resulted transmissibility function of frequency of each specimen is independent on experimental noise and modal coupling, since each mode of the transfer function was identified separately. The resonant frequencies of the system are indicated by the peak value of the transmissibility curves as shown in Fig. 3. Moreover, the resonant frequency of the 0wt% MWCNTs/NBR system is shifted from 76Hz to 160Hz, while the resonance of porous aluminum mount test system appeared at 220Hz.

It is obvious that the frequencies of the fundamental mode increase with respect to the MWCNTs content. This was expected since the MWCNTs addition increases the stiffness of the NBR network due to the higher stiffness of the MWCNTs. The addition of MWCNTs in the NBR matrix has improved the damping behavior. The results in this current work verify the fact that when the NBR is loaded with 20wt% MWCNTs the highest loss factor value among the other concentrations can be attained, with an improvement of 141% compared with the 0wt% MWCNTs/NBR mount. These results are in a good agreement with the cyclic compression tests of previous work [17].

The results of porous aluminum mount showed a high stiffness and high damping behavior. However compared to both NBR and NBR/MWCNTs mounts it is clear that porous

aluminum mount presents a stiffer behavior. This was expected.

As far damping is concerned, the results have shown that loss factor of porous aluminum mount is 14%, which is in-between 0wt% MWCNTs/NBR (with 9% loss factor) and 20wt% MWCNTs/NBR (with 22% loss factor). The percentage difference of the resonant transmissibility values between the 20wt% MWCNTs/NBR and the aluminium foam is 53%.



**Figure 3.** Comparison among the transmissibility curves of NBR reinforced with different content of MWCNTs and aluminum foam mounts

Changing the MWCNTs concentration in the NBR matrix, shifts the transmissibility curve and also changes its shape, along the frequency axis. The results show that the addition of MWCNTs can reduce the whole transmissibility level of the NBR system and greatly suppress vibration in the resonance region. This can be mainly attributed to the higher loss factor of the NBR/MWCNTs compared to the 0wt% MWCNTs/NBR and porous aluminum mounts. The higher percentage reduction of the resonant transmissibility of the under test specimens occurs for 20wt% MWCNTs/NBR with an improvement of 69%, compared to 0 wt% MWCNTs/NBR. Therefore, the most effective isolation mount was achieved with the concentration of 20wt% MWCNTs in the NBR base system.

#### 4. CONCLUSION

The vibration isolation properties of the MWCNTs/NBR and aluminium foam machine mounts were assessed by the transmissibility curves. The proposed modal testing results indicated that the addition of MWCNTs significantly improved the vibration isolation performance of the rubber-based composites. Overall, the damping and the capacity to isolate vibrations can be adjusted by modifying the content of MWCNTs in NBR mounts. The results of porous aluminum mount showed a high stiffness and high damping behavior.

The higher percentage reduction of the resonant transmissibility values of the specimens occurs for the 20wt% MWCNTs/NBR with an improvement of 69%, compared to 0 wt% MWCNTs/NBR. This can be mainly attributed to the higher loss factor of the NBR/MWCNTs compared to the 0wt% MWCNTs/NBR and porous aluminum mounts. Therefore, the most effective isolation mount was achieved with the concentration of 20wt% MWCNTs in the NBR base system.

#### REFERENCES

- [1] S. Neumark: Concept of complex stiffness applied to problems of oscillations with viscous and hysteresis damping, Aeronautical Research Council reports and memoranda, No. 3269, 1962.
- [2] Oyadji, S.O. and Tomlinson G.R. Characterization of the Dynamic Properties of Viscoelastic Elements by the Direct Stiffness and Master Curve Methodologies, Part 1: Design of Load Frame and Fixtures. Journal of Sound and Vibration 1995;186(4):623-647.
- [3] S.O. Oyadji, G.R. Tomlinson: Determination of the Complex Moduli of Viscoelastic Structural Elements by Resonance and Non-resonance Methods, Journal of Sound and Vibration, Vol. 101, No. 3, pp.277-298, 1985.
- [4] U.J. Kurze: Laboratory Measurements of Vibro-acoustical Properties of Resilient Elements, Part I: Theoretical Basis, Acta Acustica, Vol. 2, pp. 483-490, 1994.
- [5] BS ISO 10846 1-5, *Acoustic and vibration – laboratory measurement of vibro-acoustic transfer properties of resilient elements*, 2009.

- [6] R. Adams: Mechanisms of damping in composite materials, *Journal de Physique Colloques*, Vol. 44, No. C9, pp. C9-29-C9-37, 1983.
- [7] J.B. Kosmatka, S.L. Liguore: Review of methods for analyzing constrained layer damping structures. *Journal of aerospace engineering*, Vol. 6, pp. 268–283, 1993.
- [8] A. Baz, J. Ro: The concept and performance of active constrained layer damping treatments, *Sound Vib*, Vol. 28, pp. 18–21, 1994.
- [9] W.H. Liao, K.W. Wang: On the analysis of viscoelastic materials for active constrained layer damping treatments, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 207, pp. 319–334, 1997.
- [10] G. Mansour, G. Tzetzis, K.D. Bouzakis: A nanomechanical approach on the measurement of the elastic properties of epoxy reinforced carbon nanotube nanocomposites, *Tribology in Industry*, Vol. 35 No. 3, pp. 190-199, 2013.
- [11] D. Tzetzis, G. Mansour, I. Tsiafis, E. Pavlidou: Nanoindentation measurements of fumed silica epoxy reinforced nanocomposites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 32, No. 3, pp. 160–173, 2013.
- [12] G. Mansour, D. Tzetzis: Nanomechanical characterization of hybrid multiwall carbon nanotube and fumed silica epoxy nanocomposites, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 52, pp. 1054–1062, 2013.
- [13] G. Mansour, K. Tsongas, D. Tzetzis: Modal testing of nanocomposite materials through an optimization algorithm, *Measurement*, Vol. 91, pp. 31-38, 2016.
- [14] G. Mansour, K. Tsongas, D. Tzetzis: Investigation of the dynamic mechanical properties of epoxy resins modified with elastomers, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 94, pp. 152-159, 2016.
- [15] G. Mansour, K. Tsongas, D. Tzetzis: Modal testing of epoxy carbon–aramid fiber hybrid composites reinforced with silica nanoparticles, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 35, No. 19, pp. 1401–1410, 2016.
- [16] G. Mansour, K. Tsongas, D. Tzetzis, K. Tzikas: Dynamic mechanical characterization of polyurethane/multi-walled carbon nanotube composite thermoplastic elastomers, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Vol. 56, No. 14, pp.1505-1515, 2017
- [17] K. Tsongas, D. Tzetzis, G. Mansour: Mechanical and vibration isolation behaviour of acrylonitrile-butadiene rubber/multi-walled carbon nanotube composite machine mounts, *Plastics, Rubber and Composites*, Vol. 46, pp. 458-468, 2017.
- [18] G.W. Asher: A method of normal mode excitation utilizing admittance measurements, in *Proceedings of the National Specialists' Meeting on Dynamics and Aeroelasticity*, Ft. Worth, Inst. of Aeronautical Sciences, pp. 69-76, 1958.
- [19] R.R. Gold, W.L. Jr. Hallauer: Modal testing with ashers's method using fourieranalyzer and curve fitting, in *Proceedings of the 25th International Instrumentation Symposium*, The Instrument Society of America, pp 185-192, May 7-10, 1979.
- [20] R.R. Jr. Craig, Y.T. Chung: Modal analysis using a fourieranalyzer, curve-fitting and modal tuning, Report No. CAR 81-1, Center for Aeronautical Research, Bureau of Engineering Research, University of Texas at Austin, Oct. 1981.
- [21] V. Arora: Direct structural damping identification method using complex FRFs, *Sound and Vibration*, Vol. 334, pp. 304-323, 2015.
- [22] S.Y. Kim, D.H. Lee: Identification of fractional-derivative-model parameters of viscoelastic materials from measured FRFs, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 324, pp. 570–586, 2009.
- [23] Y. Shi, H. Sol, H. Hua: Material parameter identification of sandwich beams by an inverse method, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 290, pp. 1234–1255, 2006.
- [24] N. Michailidis, E. Smyrnaios, G. Maliaris, F. Stergioudi, A. Tsouknidas: Mechanical Response and FEM Modeling of Porous Al Under Static and Dynamic Loads. *Advanced Engineering Materials*, Vol. 16, pp. 289–294, 2014.
- [25] A.G. Piersol, T.L. Paez: *Harris' shock and vibration Handbook*, 6th Edition, McGraw-Hill, New York, 2009.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## ISPITIVANJE TEMPERATURNOG UTICAJA NA MERNU NESIGURNOST I GREŠKU KMM MERENJA

Branko ŠTRBAC\*, Zorana LANC, Ivan MATIN, Miodrag HADŽISTEVIC

Fakultet tehničkih nauka, Departman za proizvodno mašinstvo, Novi Sad, Srbija

[strbacb@uns.ac.rs](mailto:strbacb@uns.ac.rs)

**Apstrakt:** Uticajni faktori i njihove interakcije na grešku merenja i mernu nesigurnost kod KMM je ispitivano dugi niz godina. Geometrijske greške KMM, greške mernog senzora, greška oblika radnog predmeta, strategija merenja su najistaknuniji parametri koji su istraživani ina kojima su se bazirali modeli za procenu merne nesigurnosti. Međutim, iako se zna da odstupanje od referente temperature, kako same KMM tako i radnog predmeta, je možda i najuticajni faktor za mernu nesigurnost i grešku merenja, ovaj parameter se veoma retko razmatrao u dosadašnjim radovima. Možda je razlog tome to što se podrazumeva da se merenje sprovodi u temperaturno – kontrolisanim laboratorijama i da je veoma malo odstupanje temperature radnog predmeta i temperature merne mašine od referentne. Međutim, treba uzeti u obzir da je nekad u proizvodnim uslovima potrebno izmeriti radni komad odmah nakon obrade i da je u tom slučaju temperatura značajno odstupa od referente. U ovom istraživanju sproveden je eksperiment prema DoE koji će pokazati kako promena temperature i interakciji sa ostalim uticajnim parametrima utiče na grešku merenja i mernu nesigurnost greške oblika i prečnik etalon prstena.

**Ključne reči:** temperatura, merna nesigurnost, greška merenja, DoE, CMM.

### 1. UVOD

Mnogi istraživački radovi u oblasti merenja na koordinatnoj mernoj mašini (KMM) u poslednje tri decenije su se bavili razvojem odgovarajuće metodologije za proračun merne nesigurnosti specifičnog mernog zadatka [1-4]. Uprkos činjenici da se karakteristike mere na istoj KMM merna nesigurnost varira u zavisnosti od mernog zadatka. U raznim modelima, analitičkim, virtuelnim i/ili eksperimentalnim, bilo je nemoguće uključiti sve faktore uticaja na mernu nesigurnost. Najčešće su u modele uključivani parametri kao što su: geometrijske greške KMM, greške mernog senzora, strategija merenja, evaluacioni algoritam i greška oblika radnog

predmeta. Prepostavka kod KMM merenja je da se ono odvija u temperaturno – kontrolisanoj sobi i da je odstupanje od referentne temperature veoma malo kako same mašine tako i radnog predmeta. Međutim, kada to nije slučaj, interesantno bi bilo ispitati kako značajno odstupanja od referentne temperature utiče na grešku merenja i mernu nesigurnost. Treba imati na umu, kako ne bi bilo nejasnoća, da je temperaturni uticaj skoro uvek razmatran u proračunima nesigurnosti ali do sada su to uglavnom bila mala odstupanja od referentne do  $\pm 1^\circ\text{C}$ . U radu [5] date su smernice za proračun merne nesigurnosti kod dimenzionalnih referentnih predmeta (etalona) i naglašeno je da postoje dve

komponente nesigurnosti koje proističu od temperature različite od  $20^{\circ}\text{C}$ , tj. standardna nesigurnost temperature i standardna nesigurnost toplotnog širenja radnog predmeta. Treba naglasiti da ovde postoji problem kada je merena vrednost odstupanje od oblika npr. kružnost ili ravnost kao što je u svojim istraživanjima objasnio Jakubiec [6]. U ovom radu se želi pokazati kako značajno odstupanje od referentne temperature utiče na grešku KMM merenja i mernu nesigurnost dve različite karakteristike referentnog prstena (prečnik i kružnost). Takođe, da bi se utvrdila interakcija temperature sa ostalim uticajnim parametrima na korišćen je dizajn eksperimenta (DoE).

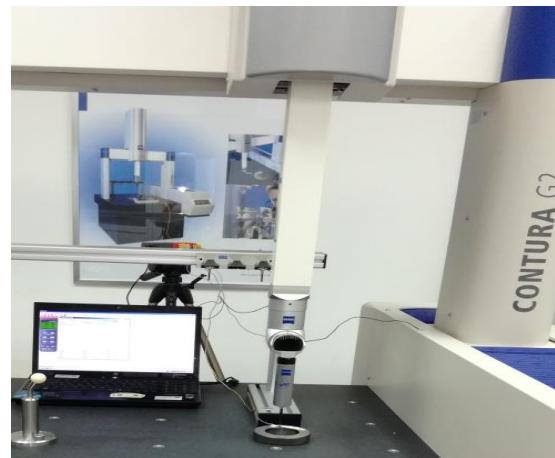
## 2. METODOLOGIJA

Etalon prsten ( $D=60\text{mm}$ ) meren je na KMM Carl Zeiss Contura g2 RDS ( $\text{MPE}_E=1.9+L/330\text{ }\mu\text{m}$ ) prema planu eksperimenta u prikazanog u tabeli 1. Prema tabeli 1 ukupan broj različitih eksperimentalnih postavki je bio 64 i sa 5 ponavljanja ukupan broj opservacija je bio 320. Treba napomenuti da eksperiment nije bio u potpunosti randumiziran jer faktor temperatura to nije dozvoljavao i može se reći da je eksperiment bio blokiran ovim faktorom. Eksperimentalna postavka je prikazana na slici 1. Uticajni parametar temperatura je na dva nivoa tj. na referentnoj vrednosti od  $20^{\circ}\text{C}$  i temperaturi od  $26^{\circ}\text{C}$ . Ostali faktori iz tabele 1 su neki od najistaknutijih činicala na mernu nesigurnost KMM merenja. Faktor A uključuje uticaj grešaka hadvera na mernu nesigurnost: slučajne i sistematske greške mernog senzora i geometrijske greške KMM. Ovaj faktor je na četiri nivoa tj. radni predmet je bio smešten u uglovima mernog stola. Faktor B razmatra uticaj izbora koordinatnog mernog sistema (referentni koordinatni sistem i koordinatni sistem radnog predmeta), faktor C uvodi mehaničku filtraciju preko vrha mernog pipka jer pipak manjeg prečnika može približnije da preslikava realnu površinu. Faktor D se odnosi na broj tačaka sa kojima se opisuje realna geometrija. U interakciji sa greškom oblika radnog predmeta i primenjenim evaluacionim

algoritmom za dobijanje asocijativne geometrije značajno utiče na rezultat merenja i mernu nesigurnost.

**Tabela 1.** Dizajn eksperimenta, faktori i nivoi

Faktor	Nivo				Kod
Položaj etalona na stolu KMM	1	2	3	4	A
Poravnavanje	KMM		Radni predmet		B
Prečnih vrha mernog pipka	5 mm	15 mm			C
Broj tačaka u strategiji	15	150			D
Temperatura	20°C	26°C			E



**Slika 1.** Eksperimentalna postavka

KMM i radni predmet su bili smešteni u temperaturno kontrolisanoj sobi gde je temperatura mogla biti postavljena na unapred određenoj vrednosti u okviru nesigurnosti  $+/- 1^{\circ}\text{C}$  na 95% nivou poverenja. Takođe nije aktivirana temperaturna kompenzacija KMM tokom eksperimenta a održavanje temperature vazduha u prostoriji, na radnom predmetu i mašini je praćeno sa termoparam tipa K (Sl. 1).

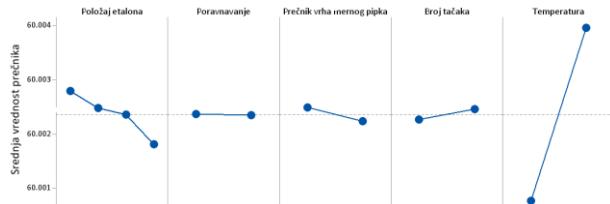
Radni komad je kalibrisan i referentne vrednosti za prečnik i grešku oblika (kružnost) sa standardnim nesigurnostima su date u tabeli 2.

**Tabela 2.** Kalibracione vrednosti etalon prstena

Karakteristika	Referentna vrednost [mm]	Standardna nesigurnost [mm]
Prečnik	60.001307	0.0002
Kružnost	0.000585	0.0001

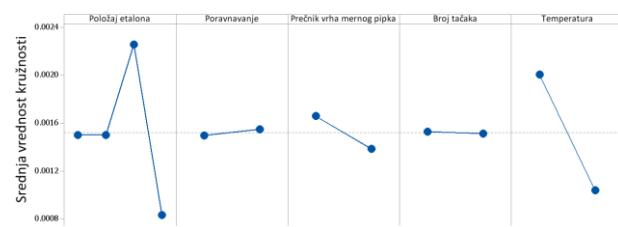
### 3. REZULTATI I DISKUSIJA

Statistička analiza izmerenih rezultata sprovedena je u softverskom paketu Minitab 17. Na osnovu analize varijanse (ANOVA) sa pragom značajnosti  $\alpha=0,05$  utvrđeno je koji faktori i interakcije faktora su signifikantni na prečnik referentnog prstena i kružnost. Kao što se i moglo očekivati faktor temperatura je najsignifikantniji na prečnik (Sl. 2) i pored njega su još statistički značajni faktori: položaj etalona, prečnik vrha mernog pipka, broj tačaka u strategiji, dvostrukе interakcije: položaj etalona \*temperatura i položaj etalona \*broj tačaka kao i trostuka interakcija položaj etalona\*broj tačaka \*temperatura. Adekvatnost postavljenog modela je gotovo idealna sa  $R-sq =99.5\%$ .

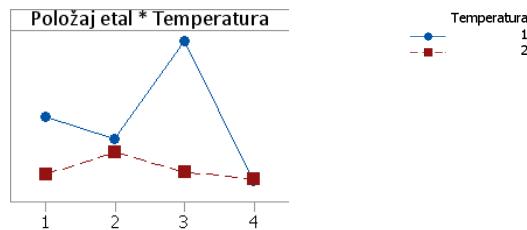


Slika 2. Dijagram glavnih efekata za prečnik

U slučaju odstupanja od kružnosti temperaturuta je takođe najuticajniji faktor mada je u ovom slučaju uticaj ovog faktora nešto slabiji (Sl. 3). Sa slike se može uočiti da jači uticaj na ovu karakteristiku ima položaj etalona naročito kada je temperatura na višem nivou (Sl. 4). Takođe sledeće dvostrukе interakcije su uticajne: položaj etalona \*prečnik vrha mernog pipka, položaj etalona \*broj tačaka, položaj etalona\*temperatura, prečnik vrha mernog pipka\*broj tačaka, broj tačaka\*temperatura; trostuke interakcije: položaj etalona \*prečnik vrha mernog pipka\*broj tačaka, položaj etalona \*prečnik vrha mernog pipka\*temperatura, položaj etalona \*broj tačaka\*temperatura, prečnik vrha mernog pipka\*broj tačaka\*temperatura i četvorostruka interakcija: položaj etalona \*prečnik vrha mernog pipka\*broj tačaka\*temperatura. Adekvatnost postavljenog modela je nešto manja u odnosu na prečnik i iznosi  $R-sq =99.5\%$ .

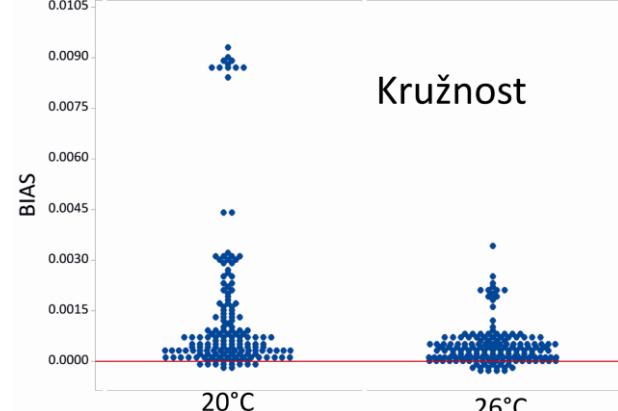
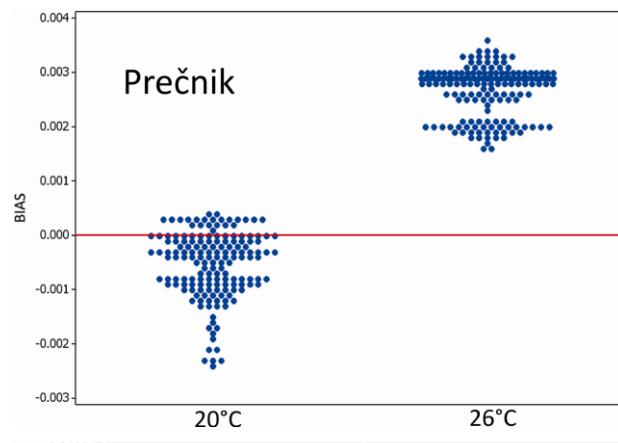


Slika 2. Dijagram glavnih efekata za kružnost



Slika 3. Interakcija temperaturute i položaja etalona pri merenju kružnosti

Uzimajući u obzir referentne vrednosti posmatranih karakteristika može se uočiti da je greška merenja mnogo veća pri merenju na višoj temperatuti za prečnik dok je gotovo nepromenjena pri merenju kružnosti (Sl. 4).



Slika 4. Bias za prečnik i kružnost na različitim temperaturama

Sa slike 4 se može uočiti da su odstupanja od referentne mere za kružnost čak i manja i pri višoj temperaturi. Prirodu ove pojave je

teško objasniti pogotovo ako se uzme u obzir jak temperaturni uticaj na elemente same KMM.

### 3.1 Proračun nesigurnosti

Proračun merne nesigurnosti je izvršen prema standardnom upustvu za proračun merne nesigurnosti GUM [7]. Merna nesigurnost je izražena za dve različite karakteristike na dve različite temperature. Prema GUM-u proširena merna nesigurnost je sadržana iz Tipa A nesigurnosti tj. ponovljivost merenja izražena preko standardne devijacije i tipa B. Tip A nesigurnosti se računa prema obrascu (1):

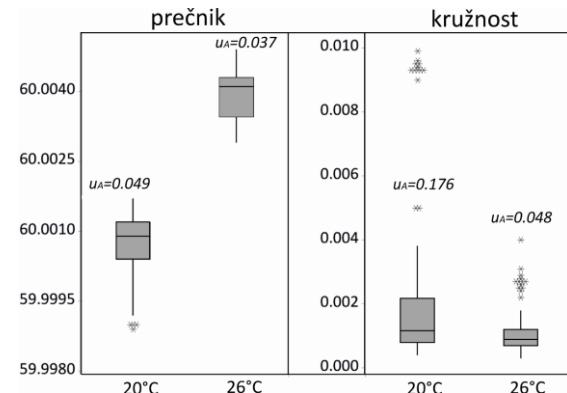
$$u_A = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i (x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i)} \quad (1)$$

Tip B nesigurnosti razmatra nekoliko komponenti. Prvo se razmatra maksimalno dozvoljena greška mašine  $MPE_E$  i preko uniformne raspodele predstavlja standardnu nesigurnost (2):

$$u_{B1} = \frac{1.9 + L/330}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

Dalje, razmatra se uticaj temperature prvo kroz razliku između koeficijenta topotnog širenja (CTE) između KMM (11.5 ppm/°C) i etalona (0.6 ppm/°C)  $U_{B2}$ . Temperaturna nesigurnost merne laboratorije je  $\pm 0.2$  °C. Sledeće dve standarde nesigurnosti proističu iz nesigurnosti koeficijenata topotnog širenja

KMM i etalona pod pretpostavkom da je 10% nesigurnosti vrednosti koeficijenta topotnog širenja ( $U_{B3}$  i  $U_{B4}$ ). Poslednja standarda nesigurnost je nesigurnost kalibracije etalon prstena  $U_{B5}$ . Budžet nesigurnosti za primer merenja prečnika na referentnoj temperaturi prikazan je u tabeli 3. Kombinovana nesigurnost  $U_{AB}$  se proračunava iz svih navedenih standardnih nesigurnosti i na osnovu efektivnog stepena slobode iz t – raspodele usvaja se faktor pokrivanja  $k=2$  verovatnoću od 95%. Iz tabele 3 se može zaključiti da je kombinovana nesigurnost neznatno veća od nesigurnosti koja proizlazi iz specifikacije mašine. Isto se može zaključiti i za ostala tri razmatrana slučaja. Međutim, ono što je interesantno jeste da su nesigurnosti Tipa A koje opisuju ponovljivost rezultata merenja za prikazani dizaj eksperimenta manje na većim temperaturama nego na referentnim (Sl. 5).



Slika 5. Standarne nesigurnosti Tipa A na različitim temperaturama za prečnik i kružnost

Tabela 3. Budžet nesigurnosti pri merenju prečnika etalona na referentnoj temperaturi

Komponenta nesigurnosti	Izvor nesigurnosti	Tip raspodele	Tip standardne nesigurnosti	Veličina [μm]	Stepeni slobode
$U_A$	Ponovljeno merenje prema DoE	nema	A	0.049	
$U_{B1}$	Specifikacija mašine	uniformna	B	1.2	
$U_{B2}$	Razlika između CTE mašine i CTE etalona	uniformna	B	0.075	
$U_{B3}$	Nesigurnosti CTE mašine	uniformna	B	0.004	
$U_{B4}$	Nesigurnost CTE etalona	uniformna	B	0.00006	
$U_{B5}$	Nesigurnost kalibracije etalona	normalna	B	0.1	
$U_{AB}$	Kombinovana nesigurnost			1.21	>30
$U_{95}$	Proširena nesigurnost			2.42	

#### 4. ZAKLJUČAK

U ovom radu izvršena je analiza greške merenja i merne nesigurnosti pri merenju dve različite karakteristike etalon prstena na KMM prema planu eksperimenta. Ekperimentalni rezultati su istakli temperaturni uticaj kao najsigifikantniji kada se razmatra greška merenja. Međutim, kada se analizira merna nesigurnost povećanje temperature je dovelo do manje nesigurnosti za obe merene karakteristike.

#### LITERATURA

- [1] B. Štrbac, V. Radlovački, V. Spasić – Jokić, M. Delić, Hadžistević, M.: The difference between GUM and ISO/TC 15530-3 method to evaluate the measurement uncertainty of flatness by a CMM, Journal of Metrology Society of India, Vol. 32, No.4, pp. 251-257, 2017.
- [2] J. Sladek, A. Gaska, A: Evaluation of Coordinate Measurement Uncertainty with Use of Virtual Machine model based on Monte Carlo Method”, Measurement, Vol.45, pp. 1565-1575, 2012.
- [3] Y. Hu, Q. Yang, X. Sun: Design, implementation, and testing of advanced virtual coordinate-measuring machines, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 61, No. 5, pp. 1368-1376, 2012.
- [4] J.P. Kruth, N. Van Gestel, P. Bleys, F. Welkenhuizen,: Uncertainty determination for CMMs by Monte Carlo simulation integrating feature form deviations”, CIRP – Manufacturing Technology, Vol. 58, pp. 463-466, 2009.
- [5] T. Doiron, J. Stoup: „Uncertainty and dimensional calibrations”, Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, Vol. 102. No.6, pp. 647-676, 1997
- [6] W. Plowucha, W. Jakubiec,: Proposal for changes in the ISO series of standards, 2th International conference on Quality and Innovation in Engineering and Management”, Cluj – Napoca, Romania, 2012
- [7] ISO/IEC Guide 98-3:2008: „Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)”. ISO/IEC, 2008.

## EXAMINATION OF TEMPERATURE EFFECT ON MEASUREMENT UNCERTAINTY AND CMM MEASUREMENT ERROR

**Abstract:** The effect of influential factors and their interactions on measurement error and measurement uncertainty of CMMs has been investigated for a long period. The most commonly investigated parameters on which models for the assessment of measurement uncertainty have been based include: CMM geometric errors, probe errors, workpiece shape error and measurement strategy. However, although it is well known that the deviation from the reference temperature, both of the CMM itself and the workpiece, is perhaps the most influential factor affecting measurement uncertainty and measurement error, this parameter has only rarely been considered in scientific papers so far. The reason for this may be in the fact that measurements are taken in temperature-controlled laboratories and that the deviation of workpiece temperature and CMM temperature from the reference temperature is very small. It should be taken into account, however, that in production conditions, it is sometimes necessary to measure a workpiece immediately after machining and that in such cases, the temperature considerably deviates from the reference temperature. In this research, an experiment according to the DoE was carried out, showing how change in temperature, interacting with other influential factors, affects measurement error and measurement uncertainty of form error and ring gauge diameter.

**Keywords:** temperature, measurement uncertainty, measurement error, DoE, CMM.



Society of Production  
Engineering

# SPMS 2018

## 37. Savetovanje Proizvodnog mašinstva Srbije

# ICPE-S 2018

## 37<sup>th</sup> International Conference on Production Engineering of Serbia



Faculty of Engineering  
University of Kragujevac

Kragujevac, Serbia, 25 – 26. October 2018

## FORMS OF THE REPORTS FROM THE TESTING OF WELDED JOINTS (STRUCTURES)

Miomir VUKIĆEVIĆ<sup>1\*</sup>, Mišo BJELIĆ<sup>1</sup>, Goran Miodragović<sup>2</sup>, Marina IVANOVIĆ<sup>1</sup>, Mladen Rasinac<sup>1\*</sup>,

<sup>1</sup>University of Kragujevac, Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo, Serbia,  
vukicevic.ms@gmail.com, bjelic.m@mfkv.rs, pljakic.m@mfkv.rs, rasinac.m@mfkv.rs

<sup>2</sup>Ustanova ili firma, država, e-pošta (Calibri 12 pt, Center)

**Abstract:** Principle forms of test reports from testing welded structures/joints are listed in international and national standards. They mostly do not contain all the parameters identified by the process. In professional literature there are shapes of forms in which is covered in more detail, the structure of the determined properties of the tested material. In this paper are listed the shapes of 12 forms developed for the needs of Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo, with a short description of the 10 test methods for which they are intended.

**Key words:** testing of welded joints, destructive and non-destructive testing, contact and contactless testing, surface and depth anomalies in the material, test report, report forms.

### 1. PENETRANT TESTING

Penetrant testing is used to identify faults that are open on the surface of the material. It is most commonly used for metal testing, but also for testing non-metallic materials or ceramics[6].

The penetrant application procedure consists of five operations: cleaning the examined surface, penetrant application, removing excess penetrant, application developers, reading and interpretation.

The final part of the examination[7], respectively "reading and interpretation", is the most important operation to form a test report, form 1 [4,7]. Determined indicators do not allow the recognition of the dimensions and shape of the error in the direction of the depth (interior of the tested material).

### 2. VORTEX CURRENT TESTING (FOOK CURRENTS)

Tests based on the application of electromagnetic waves belong to a group of non-destructive and non-contact methods. They are based on the application of electrical and magnetic phenomena, and enable recognition of surface and sub-surface errors in electroconductive materials<sup>[2]</sup>; Vortex current testing (Fook currents), magnetic particle testing and magnetic-flux testing (without the use of magnetic particles).

In the windings of the coil through which the alternating current flows, its formed own variable magnetic field, which has the same frequency as well as the current that produced it. By introducing an electro conductive material into the formed variable magnetic

field there is an induction of a variable current in the opposite direction from the base - wind turbine or Fook current.

In addition to data contained in form 2[4,7] of the report, they should be added:

- probe type and applied frequency,
- covered area;  $180^0$  or  $360^0$ ,
- calibration report.

### 3. TESTS USING MAGNETIC PARTICLES

Materials that are easily magnetized are examined (ferromagnetic) [6,4]. Errors that come to the surface are recognized (open) or are in its immediate vicinity, but the sensitivity of the method decreases with increasing depth at which they are located.

The method is based on the application of magnetic material in the form of dry splinters, contained in suspensions or in spray bottles. It does not allow high accuracy and reliability of the results, but it's fast, inexpensive and easy to implement. The specificity of the procedure is reflected in the elements which are entered in form 3[4,7] of the report.

### 4. MAGNETIC FLUX TESTING

Magnetic field testing is a non-destructive procedure which is used to identify errors caused by corrosion or pitting, mainly on pipelines or stable tanks [6]. The tested ferromagnetic material is magnetized, and the density of the induced magnetic flux is recognized by the change in the voltage induced in the winding coils or using Hal's sensors. With increasing intensity of magnetization, the depth of sensitivity of the method increases i.e. the depth at which errors in the material are recognized. The test report shows the results achieved, form 4 [4,7].

### 5. IONIZING RADIATION TESTS

Tests on ionizing radiation of materials include methods based on the irradiation method, without destroying the tested material, using H, or  $\gamma$ -radiation and a suitable identification material[6].

Quality indicator material (IKS) is equal or less absorption of power from the test material. The radiographs produced are permanently stored, and modern computer capabilities are such that radiograms can be entered in a specially arranged document or to be a supplement to the test report (form 5[4,7]).

### 6. ULTRASOUND TESTING

Ultrasound has a frequency above the upper limit of sensitivity for normal human ear (20 kHz). In industrial conditions it is used in test procedures (controls) as a contact technique without destruction of the tested material.

When devices are not used during testing for recording the test results, it is appropriate to apply the form 6 [4,7].

### 7. STATIC TESTS FOR AXIAL FORCES

Here are applied forces whose direction coincides with the axis of test tube; on straining and pressure.

By testing the welded joint on straining are determined tensile strength of welded joints as a whole and tensile strength of metal seam (properties of resistance). Percentage elongation after break (disruption percentage elongation) and percentage constriction of cross section (disruption of cross section) they represent the properties of resistance[6,5].

Since pressure testing is mainly used for testing of brittle materials and rarely plastic ones, it is rarely used for testing welded joints.

Test report, form 7[4,7,3], should include information that fully displays the results achieved and allow repeatability of the test.

### 8. EXAMINATION OF CONSUMED ENERGY OF IMPACT OR IMPACT TOUGHNESS

The energy used to break the test tube during a single impact is determined. If consumed energy is reduced to the surface of the cross-section, the value of impact

toughness is obtained. Otherwise the energy consumed for the fracture is expressed[6].

The device for impact test or Sharp's device provides the necessary initial potential energy which, by releasing the pendulum, turns into kinetic and at the moment of the impact in the tube in the fracture energy.

In the test report, form 8 [4,7], the appearance of the breaking surface should be entered/described.

## 9. BENDING TEST

The testing determines the technological ability of steel to deform with bending. Also applies to welded constructions/joints by checking whether it can be reached the required/set value of the bending angle and by determining the bending angle until the first crack occurs [6].

The report, form 9[4,7], contains most of the elements that can be expressed on the basis of the bending test.

## 10. STATIC METHODS OF HARDNESS TESTING

Examination of welded joints is carried out with the aim of determining the hardness of metal seams, HAZ and basic material.

The hardness determined by Brinell's method represents the coefficient of the pressing force F and the surface S, which is generated by the impeller on the surface of the test material. The dimensions of diameters prints are measured, or otherwise determined. The report, form 10 [4,7], includes all the necessary data for the complete presentation of the results of the examinations.

Hardness by Vickers represents the coefficient of the pressing force F and the surface S, which is based on the surface of the test material. The size and shape of the print are different in relation to the imprint of the ball at Brinell's method. Measures are the length of the diagonal square shape of the print. The report, form 11 [4,7,1], contains the necessary data for a complete presentation of the results of the examination.

The hardness of the Rockwell method represents the irreversible depth of the impression made by the imprinting surface of the test material. The specified definition applies for both types of impellers, ball B and cone C, but they differ in applied scale [1]. The report, form 12 [4,7], contains the necessary data for a complete presentation of the results of the examination.

At Vickers and Rockwell methods, the obtained test results obtained on curved surfaces are corrected.

Classical dynamic methods of hardness testing are rarely used. However, when it does, the forms of static methods (form number 10, for example), are used, and portable devices have separate forms of reports that are received in electronic or printed form immediately after the end of the examination.

## 11. INTERPRETATION OF RESULTS – CONCLUSION

The authors don't consider that these patterns are comprehensive. Such goal isn't unrealistic, but the question is how real and necessary it is to industrial practice. It is expected that the existence of the presented forms is used to create a solution that needs to meet current needs and in that sense can serve as a useful basis.

In aesthetic sense, they also represent a slightly more free approach, and this is a possible contribution to the creation of even more prominent documents. Their appearance can be understood as a kind of critique of existing and of the standards presented of non-formal and formal solutions.

## LITERATURE

- [1] ASM Handbook, Volume 8, Mechanical Testing and Evaluation, ISBN 0-87170-389-0, 2003
- [2] Buckley, J.: An introduction to Eddy Current Testing theory and technology, Internet izdanje
- [3] Vukićević, M.: Projektovanje tehnologije zavarivanja. Knjiga 2. Metodologija, ISBN 978-86-82631-71-2, COBISS.SR-ID 207487244,

Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u  
Kraljevu, Kraljevo, 2014

- [4] Vukićević, M.: Tehnologija spajanja materijala. Praktikum., ISBN 978-86-82631-97-2, Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Kraljevo 2018
- [5] Vukićević, M.: Mašinski materijali. Priručnik., ISBN 978-86-86283-03-0, COBISS.SR-ID 140265228, Kraljevski glasnik, Kraljevo, 2007
- [6] Djordjević, V., Vukićević, M: Mašinski materijali. Praktikum za vežbe. I deo, ISBN 86-7083-047-7, Mašinski fakultet u Beogradu, Beograd 1998

The name of the company: Sektor:	Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo CESiM		Non-destructive testing NDT	Literary source: EN 571-1/1997 Second lit. source
<b>Penetrant testing</b>				
Number of report:	Page number:	Total pages:		
Ordered:	Address:	Date:		
Project:		Part:		
Author:		Technological sheet:		
Sertificate number:		Drawing number:		
Examined part:		Characteristic:		
Dimensions:	Type of joint:	Number of seam:	Document:	
Base material:		Part number:	Group:	
Additional material:		Price:	Model no.:	
Previous treatment:		Process of welding:		
Condition of surface:	Clean: yes/no	Oxides: yes/no	Coatings: yes/no	Technological sheet of welding:
Thermal treatment:	yes/no	Type:		
Previous treatment:				
Test warning:				
Scope of testing:		Test plan:		
<b>Penetrants</b>				
Producer:	Penetrant	Number:		
	Penetrant remover tool:	Number:		
	Developer:	Number:		
<b>Test conditions</b>				
Environment temperature:				
Sample temperature:				
Cleaning:	The method of removal excess penetrants			
Drying:	The method of drying			
Penetration time:	Operating time of developer			
Operating time of the cleaning agent:	(Subsequent Cleaning (medium))			
<b>Indication</b>				
Recognized error:				
Type of error according to EN 571-1:				
Error dimension:				
Error location:				
Summarized rating (envelope):	Acceptable	Unacceptable		
Explanatory description:	Drawing			
<b>Verification of the report</b>				
Place of testing:	Date of test:	Name of lab/technician:	Signature	
Member of the commission (name):				
Responsible person (name):	Certificate no.:	Date of derivation:	Valid until:	

**Form 1. Penetrant testing report.**

The name of the company: Sektor:	Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo CESiM		Non-destructive testing NDT	Literary source: EN 571-1/1997 Second lit. source
<b>Vortex current testing (Fooks)</b>				
Number of report:	Page number:	Total pages:		
Ordered:	Address:	Date:		
Project:		Part:		
Author:		Technological sheet:		
Sertificate number:		Drawing number:		
Examined part:		Characteristic:		
Dimensions:	Type of joint:	Seam number:	Document:	
Base material:		Part number:	Group:	
Additional material:		Price:	Model no.:	
Previous treatment:		Process of welding:		
Condition of surface:	Clean: yes/no	Oxides: yes/no	Coatings: yes/no	Technological sheet of welding:
Thermal treatment:	yes/no	Type:		
Previous treatment:				
Test warning:				
Volume of testing:		Plan of testing:		
<b>Sound (sensor)</b>				
Manufacturer:	Type of sound (sensor):			
	(Value):			
Calibration performed (round):	yes	no		
Included area (round):	180°	360°		
<b>Test conditions</b>				
Temperature of environment:				
Temperature of sample:				
Surface:				
Way of drying:				
Afterward cleaning (medium):				
<b>Indication</b>				
Recognized error:				
Type of error:				
Dimensions of error:				
Location of error:				
Summarized evaluation (round):	Acceptable	Unacceptable		
<b>Description and location of indications</b>				
<b>Verification of report</b>				
Place of testing:	Date of testing:	Name of the laborant:	Signature	
Member of the commission (name):				
Responsible person (name):	Certificate number:	Date of receipt:	Valid until:	

**Form 2. Test report from testing by the method of vortex current (Fooks).**

The name of the company: Sektor:	Faculty of Mechanical and Civil Engineering CESiM	Non-destructive testing NDT	Literary source: Second lit. source	
<b>Testing by the method of magnetic particles</b>				
Number of report:	Page number:	Total pages:		
Ordered:	Adress:	Date:		
Project:		Part:		
Author:		Technological sheet:		
Sertificate number:		Drawing number:		
Examined part:		Characteristic:		
Dimensions:	Type of joint:	Seam number:	Document:	
Base material:		Part number:	Group:	
Additional material:		Price:	Model no.:	
Previous treatment:		Process of welding:		
Condition of surface:	Clean: yes/no	Oxides: yes/no	Coatings: yes/no	Technological sheet of welding:
Thermal treatment:	yes/no	Type:		
Warning about the test:				
Volume of testing:		Plan of testing:		
<b>Magnetic material</b>				
Manufacturer:	Magnetic particles material:			
	Size:			
	Way of applying magnetic material:			
	Magnetic material operating time:			
	Suspension in (round):	Spray	Water	Petroleum
<b>Test conditonis</b>				
Temperature of environment:	Applied current:	AC/DC		
Temperature of sample:	Current intensity:			
Surface cleaner:	Duration of magnetization:			
Way of dryin:	Material for preservation:			
	Afterwards cleaning (medium):			
<b>Indication</b>				
Recognized error:				
Type of error:				
Dimension of error:				
Location of error:				
Summarized evaluation (round):	Acceptable	Unacceptable		
<b>Description and location of indications</b>				
<b>Level of acceptability of the test (round):</b>				
	1	2	3	

Place of testing:	Date of testing:	Name:	Signature	
Member of the commission (name):				
Responsible person (name):	Certificate number:	Date of receipt:	Valid until:	
<b>Verification of report</b>				

**Form 3. Test report from testing by the method of magnetic particles.**

The name of the company: Sektor:	Faculty of Mechanical and Civil Engineering CESiM	Non-destructive testing NDT	Literary source: Second lit. source	
<b>Testing by the method of magnetic flux</b>				
Number of report:	Page number:	Total pages:		
Ordered:	Adress:	Date:		
Project:		Part:		
Author:		Technological sheet:		
Sertificate number:		Drawing number:		
Examined part:		Characteristic:		
Material mark:	Pipe/plate	Dimensions:	Thickness, :	
Type:				
Previous treatment:				
Surface coating:				
Thermal treatment:	yes/no	Type:		
Availability of part:	in air: yes/no	in water: yes/no	Buried: yes/no	
Volume of testing:	Partially/Compleat	Plan of testing:		
<b>Scanner parameters</b>				
Scanner manufacturer:	Magnet type (round):	Permanent/electromagnet		
	Scanner type and location:	h:	(u):	(r):
	Scanner transmission speed (average):			
	Absorber of mechanical vibrations:			
	Signal processing method:			
<b>Test conditions</b>				
Temperature of environment:	Applied battery:			
Type of fluid:	Temperature of fluid:			
<b>General indication</b>				
Recognized types of errors (round):	A-Corrosion	B-Pitting	V-Deformation	G-Cracked
Location of error (from-to):	D-Other			
Summarized evaluation (round):	Acceptable	Unacceptable		
<b>Indication</b>				
S. no.	Location	Type	Width, mm	Length, mm
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
6.				
7.				
8.				
9.				
10.				
11.				
12.				
13.				
14.				
15.				
Note: Attach a listing of errors, if there is not enough space in the form.				
<b>Verification of report</b>				
Place of testing:	Date of testing:	Name of the laborant:	Signature	
Member of the commission (name):				
Responsible person (name):	Certificate no.:	Date of receipt:	Valid until:	

**Form 4. Test report from testing by the method of magnetic flux.**

The name of the company: Sektor:	Faculty of Mechanical and Civil Engineering CESM	Non-destructive testing NDT	Literary source: Second lit. source:
Testing by radiography method (radiography/gamagraphy)			
Report number:	Page number:	Total pages:	
Orderer:	Adress:	Date:	
Project:		Part:	
Author:		Technological sheet:	
Sertificate number:		Drawing number:	
Examined part:		Characteristic:	
Dimensions:	Type of joint:	Seam number:	Document:
Base material:		Part number:	Group:
Additional material:		Price:	Model no.
Previous treatment:		Process of welding:	
Condition of surface:	Clean: yes/no	Oxides: yes/no	Coatings: yes/no
Thermal treatment:	yes/no	Type:	Technological sheet of welding
Warning about the test:			
Volume of testing:	Plan of testing:		
Radiography method			
Type and manufacturer of defectoroscope:	a) Radiography b) Gamagraphy	Voltage of pipe, V: Anode current, A: Exposition:	
Parameters of process:		Type of isotopic Half-life period:	Isotope mark:
		Exposition:	$t_{iso}$ , film-source, mm:
		Type IKS:	R, level of recognition:
		Way of deployment the film:	Manual/Automatic
		N, quality index:	
Deviations from standard procedures (report attachment): yes/no			
Test conditions			
Temperature of environment:		Way of drying:	
Temperature of sample:		Afterwards cleaning (medium):	
Surface cleaner:			
An integral part of the report are radiograms of the following specification			
1	2	3	4
Image quality (IKS, ISO 1027)			
Number of visible edges or openings	Smallest visible edge or opening d, mm	Quality index N	Level of recognition R, %
1			
2			
3		4	
4			
5			
Description and location of indications			
1	2	3	4
5			
Verification of report			
Place of testing:	Date of testing:	Name of laborant:	Signature
Member of the commission (name):			
Responsible person (name):	Certificate number:	Date of receipt:	Valid until:

Form 5. Test report from testing by radiography method.

The name of the company: Sektor:	Faculty of Mechanical and Civil Engineering CESM	Non-destructive testing NDT	Literary source: Second lit. source:
Testing by ultrasound method			
Report number:	Page number:	Total pages:	
Orderer:	Adress:	Date:	
Project:		Part:	
Author:		Technological sheet:	
Sertificate number:		Drawing number:	
Examined part:		Characteristic:	
Dimensions:	Type of joint:	Seam number:	Document:
Base material:		Part number:	Group:
Additional material:		Price:	Model no.
Previous treatment:		Process of welding:	
Condition of surface:	Clean: yes/no	Oxides: yes/no	Coatings: yes/no
Thermal treatment:	yes/no	Type:	Technological sheet of welding
Warning about the test:			
Volume of testing:	Plan of testing:		
Equipment data			
Type and manufacturer of the device:	Type and manufacturer of the sound:	Frequency, MHz: Real angle of the beam: Calibration block: Contact medium:	Sketch of samples: Deviations from standard procedures (attachment of report): yes/no
Test conditions			
Temperature of environment:		Way of drying:	
Temperature of sample:		Afterwards cleaning (medium):	
Surface cleaner:			
Coordinate system:	<p>l - length of error (reflector) h - thickness of error t<sub>x</sub>, t<sub>y</sub>, t<sub>z</sub> - coordinate position of the error t<sub>x</sub>, t<sub>y</sub>, t<sub>z</sub> - dimensions of error in coordinate directions 0 - coordinate start</p>		
Geometric data about indications			
1. x 2. y 3. z	4. $\Delta_x(h)$ 5. $\Delta_y(h)$ 6. $\Delta_z(h)$	7. x 8. y 9. z	10. $\Delta_x(h)$ 11. $\Delta_y(h)$ 12. $\Delta_z(h)$
Description of indications			
1.	4.	7.	10.
2.	5.	8.	11.
3.	6.	9.	12.
Verification of report			
Place of testing:	Date of testing:	Name of laborant:	Signature
Member of the commission (name):			
Responsible person (name):	Certificate nu.:	Date of derivation:	Valid until:

Form 6. Test report from testing by ultrasound method.

The name of the company: Sektor:	Faculty of Mechanical and Civil Engineering CESM	Non-destructive testing	Literary source: Second lit. source:	
Consumptive testing				
Number of report:	Page number:	Total pages:		
Orderer:	Adress:	Date:		
Project:		Part:		
Author:		Technological sheet:		
Sertificate number:		Drawing number:		
Examined part:		Characteristic:		
Dimensions:	Type of joint:	Seam number:	Document:	
Base material:		Part number:	Group:	
Additional material:		Price:	Model no.	
Previous treatment:		Process of welding:		
Condition of surface:	Clean: yes/no	Oxides: yes/no	Coatings: da/ne	
Thermal treatment:	yes/no	Type:	Technological sheet of welding	
Warning about test:				
Volume of testing:	Plan of testing:			
Data about sample/test tube				
Dimensions:	Type of joint:	Seam number:	Document:	
Base material:		Part number:	Group:	
Additional material:		Price:	Model br.	
Previous treatment:		Process of welding:		
Condition of surface:	Clean: yes/no	Oxides: yes/no	Coatings: da/ne	
Thermal treatment:	yes/no	Type:	Technological sheet of welding	
Warning about test:				
Volume of testing:	Plan of testing:			
Breaking and deformation diagrams				
Equipment data				
Type and manufacturer of the device:	Type and manufacturer of the device:	Sertificate of the device:	Donor of certificate:	Date of issue of the certificate:
Deviations from standard procedures (attachment of report):				yes/no
Test conditions				
Temperature of environment:		Way of drying:		
Temperature of sample:		Afterwards cleaning (medium):		
Surface cleaner:		Slipping:	yes/no	
Sketch of test tube (description and data on observed indications)				
Tensile test results				
Tested sample number:	Dimensions or diameter mm	Maximum force Fm kN	Temperature strength of material, °C	
			Position of rupture on N/mm <sup>2</sup>	
			Note	
Verification of report				
Place of testing:	Date of testing:	Name of laborant:	Signature	
Member of commission (name):				
Responsible person (name):	Certificate nu.:	Date of receipt:	Valid until:	

Form 7. Test report from testing by straining/pressure.

The name of the company: Sektor:	Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo CESM	Descriptive testing	Literary source: Second lit. source:
Consumed energy of impact and/or impact toughness			
Number of report:	Page number:	Total pages:	
Orderer:	Address:	Date:	
Project:		Part:	
Author:		Technological sheet:	
Sertificate number:		Drawing number:	
Examined part:		Characteristic:	
Dimensions:	Type of joint:	Number of seam:	Document:
Base material:		Part number:	Group:
Additional material:		Price:	Model no.
Previous treatment:		Process of welding:	
Condition of surface:	Clean: yes/no	Oxides: yes/no	Coatings: yes/no
Thermal treatment:	yes/no	Type:	Technological sheet of welding
Test warning:			
Terms of examination			
Nominal pendulum energy, J:	150, 300	Environment temperature, °C:	
Maximum pendulum speed, m/s:		Sample temperature, °C:	
Equipment data			
Type and device producer:	Device Certificate :	Certificate holder:	Date of issue of the certificate:
Deviation from standard procedures (attachment report): yes/no			
Sketch of sample with the position and sketch of the test tube			
Hardness test results			
Serial no.	Label of consumed energy of impact E, J	Impact toughness, p, J/mm <sup>2</sup>	Note
1.			
2.			
3.			
4.			
5.			
Verification of the report			
Place of testing:	Date of testing:	Name of laborant:	Signature
Member of the commission (name):			
Responsible person (name):	Certificate nu.:	Date of derivation:	Valid until:

Form 8. Report from the study of consumed energy of impact or impact toughness.

The name of the company: Sector	Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo CESM	<b>Descriptive testing</b>	Literary source: Second lit. source:	SRPS C...
------------------------------------	---	----------------------------	---	-----------

### Bending test

Number or report:	Page number:	Total pages:
Ordered:	Address:	Date:
Project:	Part:	
Author:	Technological sheet:	
Sertificate number:	Drawing number:	
Examined part:	Characteristic:	

**Tube data**

Dimension:	Type of joint:	Number of seam:	Document:
		Part number:	Group:
Base material:		Price:	Model no.
Additional material:			
Previous treatment:		Process of welding:	
Condition of surface:	Clean: yes/no	Oxides: yes/no	Coatings: yes/no
Thermal treatment:	yes/no	Type:	Technological sheet of welding
Test warning:			

### Test conditions and equipment data

Sample temperature, °C:	Environment temperature, °C:		
Type and device producer:	Device Certificate:	Certificate holder:	Date of issue of the certificate:

Deviation from standard procedures (attachment report): yes/no

### Sketch of sample with the position and drawing of test tube

### Test results

Serial nu.	Type of test	Dimension of tube L-a-b, mm	Impeller diameter d, mm	Distance between the rollers l, mm	Realized bending angle $\alpha_s$ , °	Flexibility K, %	Note
1							
2							
3							

### Verification of the report

Place of testing:	Date of testing:	Name of laboratory:	Signature:
Member of the commission (name):			
Responsible person (name):	Certificate nu.:	Date of derivation:	Valid until:

## Form 9. Bending test report.

The name of the company: Sector	Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo CESM	<b>Hardness testing Static methods</b>	Literary source: Second lit. source:	SRPS C A4.030
------------------------------------	---	--	---	---------------

### Vickers method

Number or report:	Page number:	Total pages:
Ordered:	Address:	Date:
Project:	Part:	
Author:	Technological sheet:	
Sertificate number:	Drawing number:	
Examined part:	Characteristic:	

**Sample data**

Dimension:	Type of joint:	Number of seam:	Document:
		Part number:	Group:
Base material:		Price:	Model no.
Additional material:			
Previous treatment:		Process of welding:	
Condition of surface:	Clean: yes/no	Oxides: yes/no	Coatings: yes/no
Thermal treatment:	yes/no	Type:	Technological sheet of welding
Test warning:			

### Test conditions

The intensity of the impact force, kN:	30, 20, 10, 5	Environment temperature, °C:	
Imprinting time, s:		Sample temperature, °C:	

### Equipment data

Type and device producer:	Optical devices:	Device Certificate:	Certificate holder:	Date of issue of the certificate:
---------------------------	------------------	---------------------	---------------------	-----------------------------------

Deviation from standard procedures (attachment report): yes/no

### Sketch of sample with imprint locations

### Results of hardness testing

Serial nu.	HV	Serial nu.	HV	Serial nu.	HV	Note

### Verification of the report

Place of testing:	Date of testing:	Name of lab technician:	Signature:
Member of the commission (name):			
Responsible person (name):	Certificate nu.:	Date of derivation:	Valid until:

## Form 11. Report from hardness testing by Vickers method.

The name of the company: Sector	Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo CESM	<b>Hardness testing Static methods</b>	Literary source: Second lit. source:	SRPS C A4.030
------------------------------------	---	--	---	---------------

### Rockwell method B or C (engrid)

Number or report:	Page number:	Total pages:
Ordered:	Address:	Date:
Project:	Part:	
Author:	Technological sheet:	
Sertificate number:	Drawing number:	
Examined part:	Characteristic:	

### Sample data

Dimension:	Type of joint:	Number of seam:	Document:
		Part number:	Group:
Base material:		Price:	Model no.
Additional material:			
Previous treatment:		Process of welding:	
Condition of surface:	Clean: yes/no	Oxides: yes/no	Coatings: yes/no
Thermal treatment:	yes/no	Type:	Technological sheet of welding
Test warning:			

### Test conditions

Method:	Initial F <sub>0</sub>	Max F <sub>1</sub>	Total F	Time of the full load operation, s:
B	98.07	1373	1471	Environment temperature, °C:
C	98.07	882.6	980.7	Sample temperature, °C:

### Equipment data

Type and device producer:	Optical devices:	Device Certificate:	Certificate holder:	Date of issue of the certificate:
---------------------------	------------------	---------------------	---------------------	-----------------------------------

Deviation from standard procedures (attachment report): yes/no

### Sketch of sample with imprint locations

### Results of hardness testing

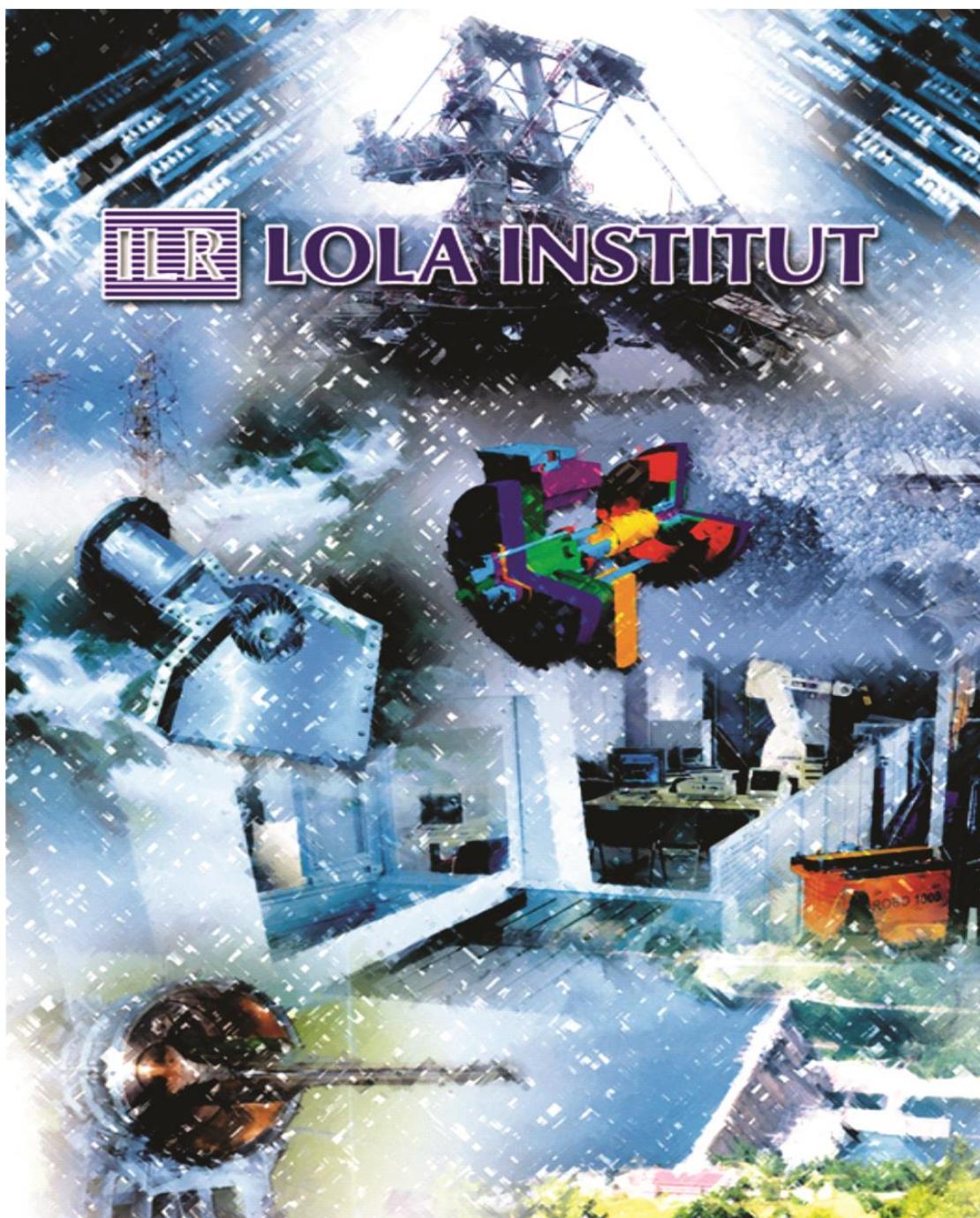
Serial nu.	HR	Serial nu.	HR	Serial nu.	HR	Note (on the dash should be entered method label)

### Verification of the report

Place of testing:	Date of testing:	Name of lab technician:	Signature:
Member of the commission (name):			
Responsible person (name):	Certificate nu.:	Date of derivation:	Valid until:

## Form 12. Report from hardness testing by Rockwell method

### Form 10. Report from hardness testing by Brinell method.



**Istraživačko razvojni institut Lola d.o.o.  
(Lola institut d.o.o.)**

Kneza Višeslava 70a  
11 030 Beograd  
Tel: +381 (0) 11 25 41 303  
Fax: +381 (0) 11 25 44 906  
[info@li.rs](mailto:info@li.rs)  
[www.li.rs](http://www.li.rs)

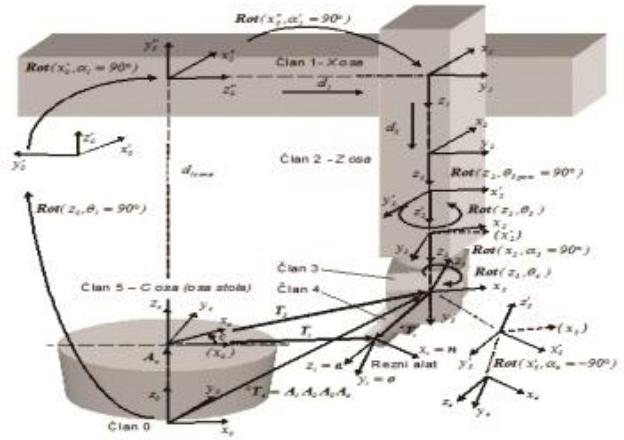
## MAŠINE ALATKE

Programska celina obuhvata rad u sledećim oblastima:

- Istraživanje i razvoj mašina alatki
- Retrofit i modernizacija mašina alatki
- Upravljački sistemi mašina alatki



Vetikalni strug JVS 18 OC



Koncepcija 5-osnog vertikalnog strugarsko obradnog centra



Horizontalne bušilice glodalice sa T krevetom



Troosna mašina sa paralelnom kinematikom

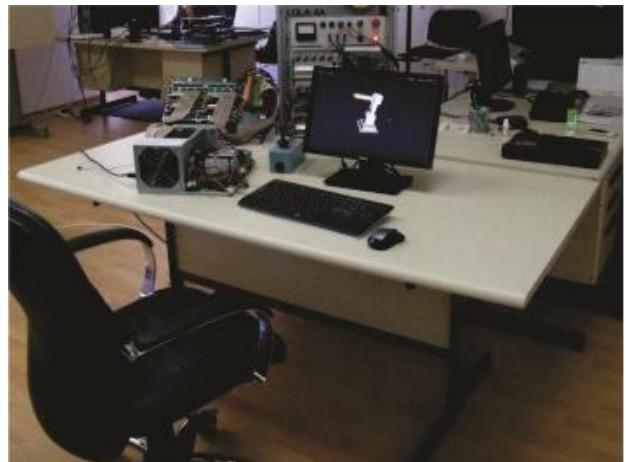
## ROBOTIKA

Programska celina obuhvata rad u sledećim oblastima:

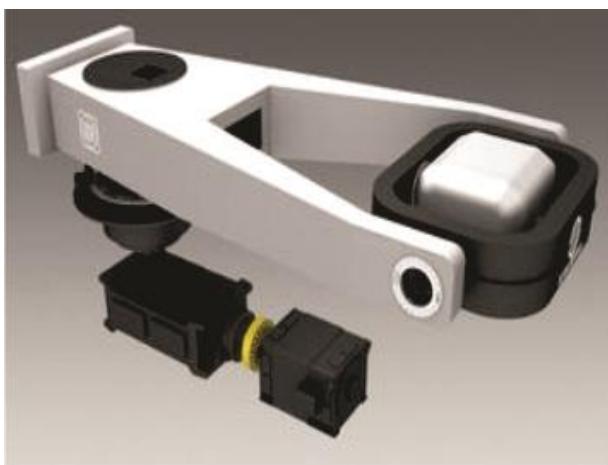
- Industrijski roboti
- Robot kontroleri i jezik za upravljanje robotima
- Uređaji za trening pilota borbenih aviona



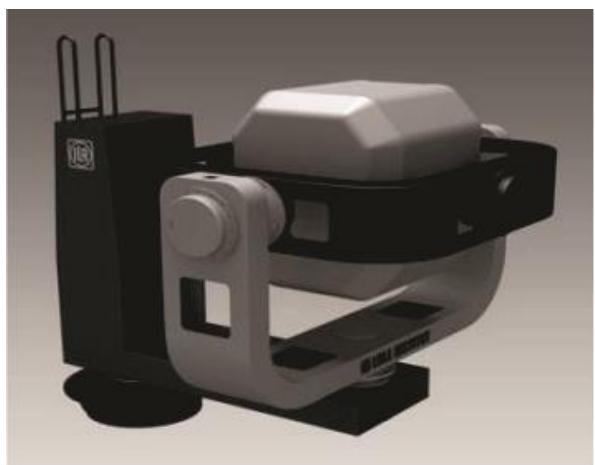
*Robot LOLA 15*



*Robot LOLA 50*



*Uređaj za fiziološku trenažu (selekciju) pilota*



*Uređaj za prostornu dezorientaciju pilota*

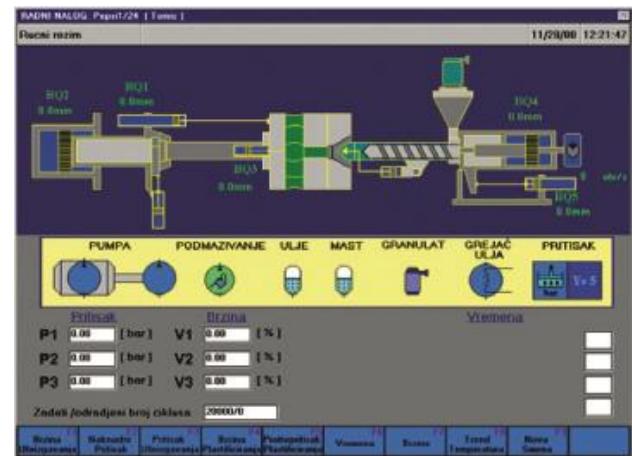
## RAČUNARSKO UPRAVLJAČKI SISTEMI

Programska celina obuhvata rad u sledećim oblastima:

- CNC
- PLC
- Procesni regulatori
- Industrijski softver
- Specijalizovani računarsko upravljački sistemi
- Robotika



Modernizacija CNC upravljanja



Jedinica za brizganje LOLA MATIC



Vakum peć za termičku obradu metala DEGUSA

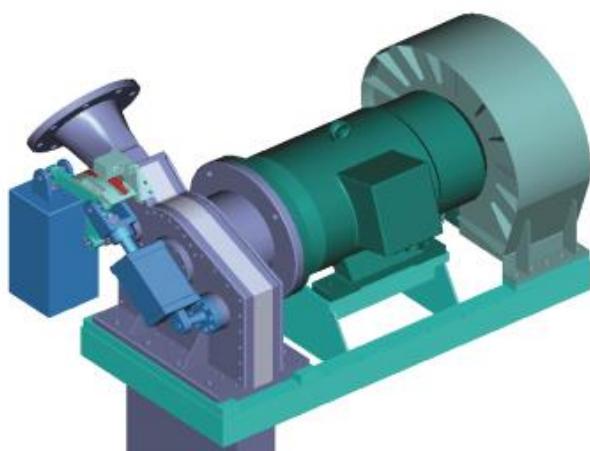


Termoregulaciona jedinica ST-160, DALMAR

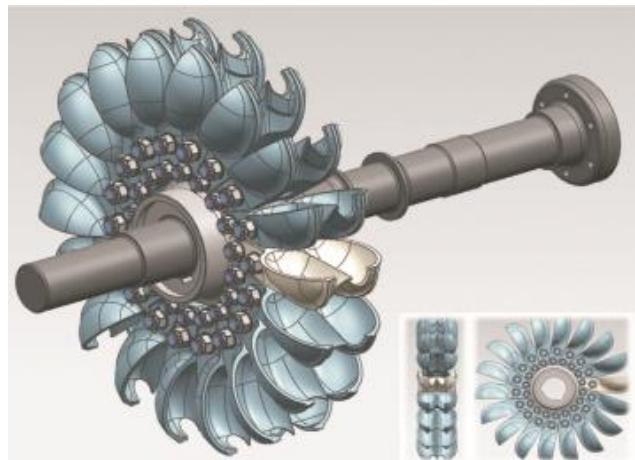
## ***OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE***

Programska celina pruža stručnu pomoć u sledećim aktivnostima:

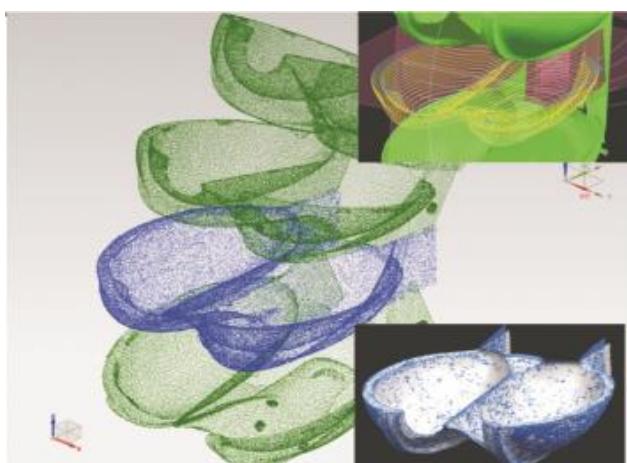
- Projektovanje i izgradnja malih hidroelektrana
- Projektovanje, proizvodnja i montaža elektro i mašinske opreme za male hidroelektrane
- Puštanje u rad malih hidroelektrana
- Održavanje i servis malih hidroelektrana



*Banki turbina*



*CAD model radnog kola Pelton turbine*



*Digitalizacija lopatice Pelton turbine*



*Obrada lopatice Pelton turbine*

## **PROCESNO MAŠINSTVO I EKOLOGIJA**

Programska celina se bavi projektovanjem i izvođenjem:

- Integrисаног постројења за процесирање отпада
- Постројења за генерирање био гаса
- Постројења за прераду воде
- Главних пројеката (elaborата), ремонта бродских преводница и ремонтовањем истих



*Postrojenje za sortiranje REP u Parizu*



*Postrojenje za kompostiranje Baucaire - Francuska*

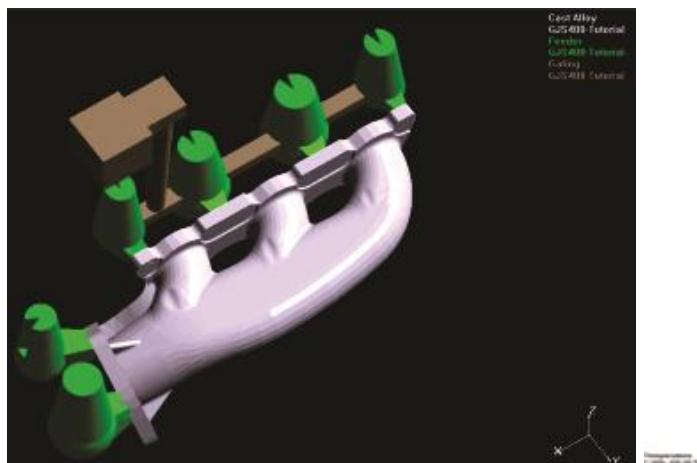


*Brodske prevodnice*

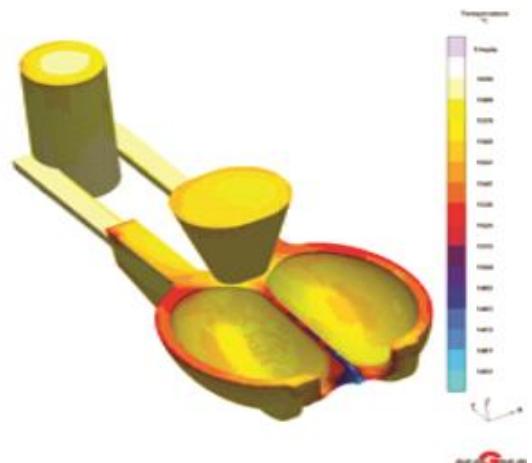


## TEHNOLOGIJA LIVENJA METALA

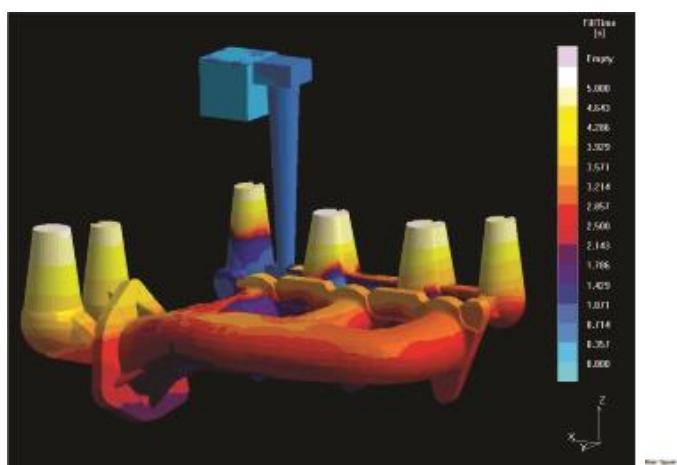
Lola institut je ekskluzivni zastupnik nemačke firme MAGMA GmbH za programske pakete MAGMA<sup>5</sup> na teritoriji Srbije. Institut nudi usluge računarske simulacije sa programskom opremom MAGMA, kao i osposobljavanje za korisnike paketa i naručioce simulacija.



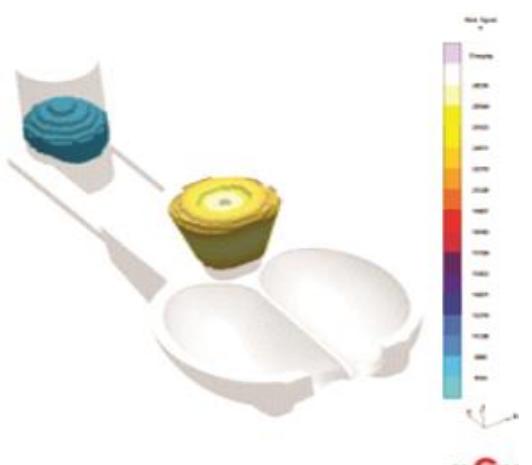
Odlivak, ulivni sistem i hranitelji



Fill\_Temp criteria 25%



Filling time-vreme punjenja



Rezultati očvršćavanja-Hotspot

CIP - Каталогизација у публикацији -  
Народна библиотека Србије, Београд

621.7/.9(082)  
621.7/.9:669(082)  
681.5(082)

САВЕТОВАЊЕ производног машинства Србије  
(37 ; 2018 ; Крагујевац)

Zbornik radova / 37. Savetovanje proizvodnog  
mašinstva Srbije, SPMS 2018 =  
Proceedings / 37th International Conference of  
Production Engineering, ICPE-S 2018,  
25 - 26 October 2018, Kragujevac, Serbia ;  
[organizator, organizers] Fakultet inženjerskih nauka  
Univerziteta u Kragujevcu, Katedra za proizvodno mašinstvo ;  
editors Bogdan Nedić, Slobodan Mitrović. - Kragujevac :  
University, Faculty of Engineering, 2018  
(Kragujevac : Inter Print). - XXII, 342 str. : ilustr. ; 25 cm

Tekst štampan dvostubačno. - Radovi na srp. i engl. jeziku. -  
Tiraž 100. - Str. XV: Predgovor / Bogdan Nedić. -  
Napomene uz tekst. - Bibliografija uz svaki rad.

ISBN 978-86-6335-057-1  
1. Fakultet inženjerskih nauka (Kragujevac).  
Katedra za proizvodno mašinstvo

- a) Производно машинство - Зборници
- b) Метали - Обрада - Зборници
- c) Системи аутоматског управљања -  
Зборници

COBISS.SR-ID 269212684