

30 ГОДИНИ  
НАСТАВА ПО МАШИНСТВО  
ВО СР МАКЕДОНИЈА

22 СОВЕТУВАЊЕ ЗА  
ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО  
НА ЈУГОСЛАВИЈА

# ЗБОРНИК НА ТРУДОВИ

I

ОБРАБОТКА СО СИМНУВАЊЕ НА МАТЕРИЈАЛ

Охрид, мај 1989

30 ГОДИНИ  
НАСТАВА ПО МАШИНСТВО  
ВО СР МАКЕДОНИЈА

22 СОВЕТУВАЊЕ ЗА  
ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО  
НА ЈУГОСЛАВИЈА

ЗБОРНИК НА ТРУДОВИ  
I  
ОБРАБОТКА СО СИМНУВАЊЕ НА МАТЕРИЈАЛ

Покровители : Комитет за индустрија и енергетика на СР Македонија  
Републичка заедница за научноистражувачка дејност на  
СР Македонија

Спонзор : СОЗТ Металски завод - Тито Скопје

ОХРИД, МАЈ 1989



ЗАЕДНИЦА НА ЈУГОСЛОВЕНСКИТЕ НАУЧНО ИСТРАЖУВАЧКИ ИНСТИТУЦИИ  
ЗА ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

Машински Факултет, Скопје - Факултет за стројништво, Љубљана -  
Факултет стројарства и бродоградње, Загреб - ЈОЛА-ИАМА, Београд -  
Машински Факултет, Београд - Првонајска истраживање и развој,  
Загреб - Институт за производно машинство - ФТН, Нови Сад -  
Институт за индустриске системи ФТН, Нови Сад - Машински факултет,  
Крагујевац - Машински факултет, Ниш - Машински факултет, Сарајево -  
Машински факултет, Зеница - Технички Факултет, Титоград - Машински  
факултет, Мостар - Машински факултет, Бања Лука - Технички  
факултет, Приштина - Педагошко технички факултет, Чачак - Технички  
факултет, Ријека - Висока техничка школа, Марибор - Факултет за  
стројарство, Сплит

ОРГАНИЗАТОР НА СОВЕТУВАЊЕТО  
МАШИНСКИ ФАКУЛТЕТ СКОПЈЕ

Карпош II бб  
91000 СКОПЈЕ

МЕСТО НА ОДРЖУВАЊЕТО

Хотел Метропол

Охрид 24 - 26 мај 1989.

НАУЧЕН ОДБОР НА 22 СОВЕТУВАЊЕ ЗА ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

Д-р С.Трајковски, претседател, - Д-р В. Шолаја - Д-р В. Милачич -  
Д-р Р. Зденковиќ - Д-р Ј. Пеклениќ - Д-р Б. Ивковиќ - Д-р Д.  
Зеленовиќ - Д-р Б. Мусафија - Д-р П. Поповиќ - Д-р В. Вујовиќ -  
Д-р С. Секулиќ - Д-р С. Урошевиќ - Д-р В. Мечанин - Д-р Д. Милиќиќ  
Д-р С. Гекиќ - Д-р З. Мирковиќ - Д-р Ј. Рекецки - Д-р П. Шмарчан -  
Д-р Ш. Шавар - Д-р В. Савиќ - Д-р В. Домазетовиќ - Д-р С. Живановиќ

ОРГАНИЗАЦИОНЕН ОДБОР

В. Павловски, претседател, В. Дуковски, Љ. Дудески, К. Кољозов, Т.  
Кралев, Д. Јовановски, Ј. Лазарев, В. Донеv, М. Стефанова, В.  
Шубеска, Ј. Чалоска, М. Кузиноски

УРЕДНИЦИ НА ЗБОРНИКОТ

В. Дуковски  
В. Павловски  
Ј. Лазарев  
Љ. Дудески

ПОЧЕСЕН ОДБОР

Д-р Вулнет Старова, претседател на Собранието на СР Македонија

М-р Глигорие Гоговски, претседател на Извршниот совет на Собранието на СР Македонија

Д-р Јаким Петровски, ректор на Универзитетот "Кирил и Методиј" Скопје

Иван Аврамовски, Председател на Собор на здружен труд на Собранието на СР Македонија

Д-р Радмила Кипријанова, претседател на Комитет за наука, технолошки развој и информатика на СРМ

Димитар Анчев, претседател на Комитет за индустрија, енергетика и мало стопанство на СРМ

Д-р Никола Бошале, секретар на Републичка заедница за научни дејности на СРМ

Д-р Александар Ношпал, заменик претседател на Комитет за наука, технолошки развој и информатика на СРМ

Иван Богданов, претседател на работоводниот орган на Металски завод "Тито" - Скопје

Илија Андонов, генерален директор на ФОП, МЗ "Тито" - Скопје

Гоце Тодоровски, генерален директор на ФАМ, МЗ "Тито" - Скопје

ПРЕДХОДНИ СОВЕТУВАЊА НА ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО НА ЈУГОСЛАВИЈА

I	БЕОГРАД	1965.
II	ЗАГРЕБ	1966.
III	ЉУБЉАНА	1967.
IV	САРАЈЕВО	1968.
V	КРАГУЈЕВАЦ	1969.
VI	ОПАТИЈА	1970.
VII	НОВИ САД	1971.
VIII	ЉУБЉАНА	1973.
IX	НИШ	1974.
X	БЕОГРАД	1975.
XI	ОХРИД	1977.
XII	МАРИБОР	1978.
XIII	БАЊА ЛУКА	1979.
XIV	ЧАЧАК	1980.
XV	НОВИ САД	1981.
XVI	МОСТАР	1982.
XVII	БУДВА	1983.
XVIII	НИШ	1984.
XIX	КРАГУЈЕВАЦ	1985.
XX	БЕОГРАД	1986.
XXI	ОПАТИЈА	1987.

Со одлука на заедницата на југословенските истражувачки институции за производно машинство XXII Советивање за производно машинство на Југославија е дадено на Машинскиот факултет во Скопје, на универзитетот "Кирил и Методиј", Скопје.

Користиме прилика да се заблагодариме на авторите на соопштенијата на и на сите поединци и институции што допринесоа да се одржи 22 Советување за производно машинство на Југославија.

ОРГАНИЗАЦИОНЕН ОДБОР

СО ОДЛУКА НА ЗАЕДНИЦАТА НА ЈУГОСЛОВЕНСКИТЕ НАУЧНО  
ИСТРАЖУВАЧКИ ИНСТИТУЦИИ ЗА ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО ВО 1983 ГОДИНА  
ВОСТАНОВЕНА Е

ПЛАКЕТА "ПРОФ. Д-Р ПАВЛЕ СТАНКОВИК"

ШТО СЕ ДОДЕЛУВА СЕКОЈА, ОДНОСНО ОД 1989 ГОДИНА СЕКОЈА ВТОРА ГОДИНА  
НА ИСТАКНАТИ НАУЧНИ РАБОТНИЦИ ОД ОБЛАСТА НА ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО  
ДОСЕГАШНИ ДОБИТНИЦИ НА ОВА ЗНАЧАЈНО ПРИЗНАНИЕ СЕ :

За 1983 год.

Проф. Д-р Рудолф Зденковик дипл. инж.  
Проф. Д-р Владимир Шолаја дипл. инж.  
Проф. Јулије Кимер дипл. инж.

За 1984 год.

Проф. Д-р Јанез Пекленик дипл. инж.  
Проф. Д-р Бинко Мусафија дипл. инж.

За 1985 год.

Проф. Д-р Предраг Поповик дипл. инж.  
Проф. Д-р Владимир Милачич дипл. инж.

за 1986 год.

Проф. Д-р Бранко Ивковик дипл. инж.  
Проф. Д-р Стрезо Трајковски дипл. инж.

за 1987 год.

Проф. Д-р Светислав Зарик дипл. инж.  
Проф. Д-р Јосип Хрибар дипл. инж.

PROF. D-R JOSIP HRIBAR DIBL. INŽ. STROJARSTVA



Rođen je 11-tog rujna 1907 godine u Zagrebu. Polazi klasičnu gimnaziju u Slav. Požezi, gde i maturira 1926 g. Iste godine započinje i studij strojarstva na Visokoj tehničkoj školi u Berlinu, a nastavlja ga na Tehničkom fakultetu u Zagrebu, gdje diplomira 1933 god. i doktorira u Zagrebu 1943 g. iz Tehnologije drveta, a kao drugi doktor od osnutka strojarsko-brodograd. odsjeka Tehničkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Po završetku studija do 1946. je asistent na Zavodu za mehaničku tehnologiju tadašnjeg Tehničkog fakulteta u Zagrebu. Godine 1947 izabran je za docenta iz predmeta mehanička tehnologija, te drvo i nemetali. 1951 godine izabran je za izvanrednog, a 1963. za redovnog profesora i to za predmete Obrada metala, Plastična obrada i Tehnologija drveta. Bio je dugogodišnji predstojnik Zavoda za obradu metala kao i Zavoda za drvo i nemetale, te predstojnik Katedre za plastičnu obradu i Katedre za drvo i nemetale. Isto tako dugogodišnji je član i izvestitelj komisije za znanstveno-istraživački rad u Zajednici istraživačkih ustanova za područje strojogradnje, brodogradnje i elektrotehnike pri Savjetu za koordinaciju naučnih djelatnosti u Beogradu, te član Savjeta za naučni rad SR Hrvatske. Također je i dugogodišnji vanjski saradnik Jugoslavenske akademije znanosti i umjetnosti, te republički koordinator u SEV-u po problematici kompleksnog korišćenja drvne industrije.

Prof. Josip Hribar sudjelovao je u nizu kongresa u SR Njemačkoj, Austriji, Mađarskoj, D.R. Njemačkoj, ČSSR, a redovno je prisustvovao na sastancima opunomoćenih predstavnika SEV-a u Bratislavi i Varni.

Prof. Hribar je jedan od osnivača nastave na strojarsko-tehnoloških predmeta na Fakultetu elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje u Splitu.



Sav dosadašnji, veoma uspješni znanstveno istraivački i stručni rad prof. Hribara može se svrstati u dvije velike skupine, prvo tehnologija drva i drugo tehnologija metala. U prvoj se tretira problematika iz područja mehaničke i toplinske obrade drvnog materijala, konzerviranje drvene građe te istraživanje strukturnih i fizikalnih svojstava drvene tvari kao tehničkog materijala, i druga u koju spadaju radovi iz područja obrade metalnih materijala, pretežno plastične odnosno toplinske obrade, te zavarivanje lakih metala.

Iz prvog područja bavi se posebno silama i režimima rezanja kod obrade drveta, te problemom umjetnog sušenja s ciljem da reši taj složeni teoretski i praktični zadatak. Uvodi tzv. tlačno parenje čime se znatno skraćuje taj proces i pronalazi optimalni režim i trajanje procesa. Ovaj rad obavljen je u JAZU, gdje su kao značajni doprinos prof. Hribara pod naslovom "Sila rezanja kod obrade drveta" sabrani rezulteti opsežnih pokusa i analiza sila rezanja kod pojedinih vrsta mehaničke obrade drveta.

Kao prvi publicirani rad iz druge skupine radova treba navesti opsežnu studiju s pokusima "Ispitivanje i termička obrada legura tipa dural" iz 1951 god., koja je nastala povodom osvajanja i uvođenja domaće proizvodnje lakih metala. Provedena mjerenja sila ekstruzije, te praćenje kretanja ekstrudiranog metala ukazuje na primetljivo neslaganje s tada poznatim teorijama. U tom radu dati su uz ostalo i originalni podaci o utjecaju termičke obrade, o trajanju dozrijevanja, o pojavama tzv. efekta prešanja i dr.

Od 1949-1963 ( s prekidima ) preko 10 godina je naučni suradnik i više godina v. d. direktora " Instituta za lake metale" u Zagrebu, preko kojega radi za potrebe Vojno-tehničkog Instituta u Beogradu i Mornaričkog instituta u Zagrebu. Od 1966 česti je suradnik Instituta "Đuro Đaković" i povremeni suradnik tvornice "Slavonski Partizan" u Slav. Brodu za specijalnu problematiku plastične izrade bešavnih tlačnih boca, a djelom i plastičnu obradu reaktorskih posuda, te oblikovanje debelostjenih odprešaka u tvornici "Đuro Đaković". Isto tako bio je savjetodavni suradnik razvojnog odjela Tvornice parnih kotlova u Zagrebu. Konačno, bio je među ostalim i niz godina znanstveni saradnik razvojnog odjela

alatnice "Rade Končar" u Zagrebu.

Za svoj rad odlikovan je Ordenom rada sa zlatnim vijencem god. 1969. Republičku nagradu za znanstveni rad "Nikola Tesla" primio je 1970 godine.

Prof. Hribar je na Zagrebačkom Sveučilištu prvi razvijao, za ono doba potpuno novu disciplinu tj., primjenu plastičnih masa u strojarstvu, iz čega se je danas razvila snažna djelatnost.



PROF. D-R SVETISLAV ZARIĆ, DIPL. INŽ. MAŠ.



Prof. D-r Svetislav Zarić je rođen 1921 godine u Nišu. Diplomirao je 1948. godine, izabran za asistenta 1949 godine, za docenta 1965. a za redovnog profesora 1974 godine, sve na Mašinskom fakultetu u Beogradu, gde je i odbranio habilitacioni rad i doktorsku disertaciju.

Kao nastavnik, prof. Zarić je sa uspehom izvodio nastavu iz predmeta Mašinska obrada na matičnom fakultetu, dok je sa velikom energijom i entuzijazmom pristupio postavljanju i organizovanju nastave iz predmeta Automatizacija proizvodnje. Pored nastave iz ova dva predmeta, koji pripadaju studijama za diplomirane inženjere, prof. Zarić izvodi i nastavu iz predmeta Teorija konačnih automata na Poslediplomskim studijama na Mašinskom fakultetu u Beogradu, a školske 1967/68 godine i nastavu iz oblasti automatskog upravljanja u okviru poslediplomskih studija u odelenju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu. Pored toga on je 1968. godine održavao nastavu iz Automatizacije proizvodnje u Centru za vanredne studije u Trsteniku, a 1969/70 godine iz Mašinske obrade na Tehničkom fakultetu u Pristini. Prof. Zarić radi na uvođenju i organizovanju novih, savremenih eksperimentalnih vežbi i pokazuje vrlo veliku inicijativu i ulaže značajne napore u daljem razvoju Laboratorije za automatsko upravljanje.

U periodu 1950/53 radio je u pogonima na pitanjima neposredno vezanim za proizvodnju i u konstrukcionim biroima na projektovanju i to u fabrikama IKL u Beogradu i Ivo Lola Ribar u Železniku, sledstveno. Tokom svoje inženjerske i nastavne djelatnosti samostajno ili preko Instituta Mašinskog fakulteta izveo je niz projekata, ekspertiza, elaborata i istraživačkih radova. Objavio je brojne naučne i stručne radove i učestvovao na raznim seminarima, stručnim skupovima i savetovanjima.

Uveo je i postavio predmet Automatizacija proizvodnje. Posebnu pažnju i trud posvetio je opremanju laboratorije i njenom osposobljavanju za eksperimentalni i naučno-istraživački rad. Kod njega, kao mentora, diplomirao je veliki broj studenata a magistrirao i doktorirao znatan broj kandidata. Učestvovao je kao član komisije u odbranama magistarskih i doktorskih radova na Mašinskom fakultetu u Beogradu i na drugim fakultetima. Bio je šef Katedre i šef JUR-a za automatsko upravljanje, predsednik Zajednice mašinskih fakulteta i viših tehničkih škola SR Srbije, predsednik Veća godine, član Skupštine Mašinskog fakulteta i član još niza drugih Komisija. Aktivan je u savezu mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara SR Srbije. Kao nastavnik i čovek uvek se trudio da u kontaktima sa saradnicima i studentima bude otvoren, iskren i human.

Na osnovu izloženog vidi se da je prof. dr Svetislav Zarić plodan naučnik, visokostručni nastavni radnik koji se bavi i aktuelnim problemima privrede u oblasti u kojoj radi prilazeći im na inženjerski način.

## 22 ЈУГОСЛОВЕНСКО СОВЕТУВАЊЕ ЗА ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

ОХРИД 24 - 26 мај 1989 г.

V. B. Šolaja x)

DVADESET GODINA OD SMRTI PROF. DR PAVLA  
P. STANKOVIĆA

## 1. UVOD

U 150-godišnjoj istoriji Beogradskog Univerziteta 1) svoje mesto ima i oblast mašinstva 2), a u okviru nje i proizvodno mašinstvo 3). Prvi u nizu prethodnika današnjih nosilaca proizvodnog mašinstva na Mašinskom fakultetu u Beogradu je inž. Todor - Toša F. Selesković (1856 - 1901), veliko inženjersko ime prošlog veka i prvi profesor mehaničke tehnologije na Tehničkom fakultetu Velike Škole od 1895 god. Nastavlja se taj niz sa prof. inž. Ćimom Stevovićem (1866 - 1957), prvim nastavnikom za tada uvedeni predmet "Mašine alatke" na Mašinskom odelu Tehničkog fakulteta novoosnovanog Univerziteta u Beogra-

x) Prof. dr Vladimir B. Šolaja, dipl.maš.inž., šef Katedre za proizvodno mašinstvo Mašinskog fakulteta u Beogradu, direktor Instituta za alatne mašine i alate IAMA (sada LOLA Institut) u Beogradu, u penziji.

1) Naučnim skupovima decembra 1988 god. obeležio je Beogradski Univerzitet početak rada Liceja 1838 god. i potom Velike Škole 1856 god. kao svojih prethodnika.

2) 1975 god. Mašinski fakultet u Beogradu je obeležio 100-godišnjicu uvođenja nastave iz mašinstva na Velikoj Školi u Beogradu (videti: Obradović, N.: U spomen sto godina nauke o mašinama - osvrt na razdoblje 1873 - 1941, Mašinski fakultet, Beograd, 1973).

3) 1976 god. Mašinski fakultet i Institut IAMA su obeležili 70 godina prisutnosti proizvodnog mašinstva u Beogradu (videti: Šolaja, V.: Sedamdeset godina proizvodnog mašinstva u Beogradu, Naučno-stručni skup "Sedamdeset godina proizvodnog mašinstva u Beogradu", uvodni referat, Mašinski fakultet - Institut IAMA, Beograd, 1976, str. 1 - 116).



du 1906 god., a posle prvog svetskog rata sa prof. inž. Aleksandrom Kosickim (1880 - 1954). Ovaj istorijski niz zaključuje Prof. dr Pavle P. Stanković, dipl.inž.maš. (1909 - 1969), osnivač posleratnog koncepta proizvodnog mašinstva u visokoškolskoj nastavi i relevantnom odeljku nauke, nadahnuti učitelj mnogih generacija studenata, i to ne samo na Univerzitetu u Beogradu i njegovom Mašinskom fakultetu, izvanredan stručnjak i nadasve radni, visokokreativni stvaralac, prvoklasni naučni pregalac i nedostižno trudoljubiv i čovekoljubiv, pošten i skroman član Zajednice.

Ima se u vidu činjenica da se ove godine stiže 80 godina od njegovog rođenja i 20 godina od smrti, a koristi se 22. jugoslovensko savetovanje proizvodnog mašinstva kao prava prilika da se, uz prisustvo mnogih njegovih djaka i poštovalaca iznese jedno sećanje na životni put i delo Prof. dr Pavla P. Stankovića.

## 2. ŽIVOTNI PUT PROF. DR PAVLA STANKOVIĆA

Prof. P. Stanković rođen je 1909 god. u Beču. Osnovnu školu je završio u Hamburgu, gimnaziju u Kikindi i Beogradu, a diplomirao je 1932 god. na Mašinsko-elektrotehničkom odseku Tehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Po odsluženju vojnog roka zaposlio se je 1933 god. u Fabrici aeroplana "Zmaj" u Zemunu, gde je radio na konstruisanju i proizvodnji aviona do početka rata 1941 god. U tom periodu je 1938 god. postavljen za asistenta Tehničkog fakulteta za predmet "Statika aviona". Za vreme rata i okupacije prekida javnu profesionalnu inženjersku delatnost, a po oslobodjenju Beograda nastavio je sa radom kao šef konstrukcijskog odeljenja i instruktor za opravku aviona u istoj fabrici. Na Tehničkom fakultetu mu je kao asistentu 1945 god. poverena nastava iz predmeta "Mašine alatke" i "Oprema aviona", a postavljanjem za docenta za predmet "Mašine alatke" prelazi 1946 god. definitivno na Fakultet. 1951 god. izabran je za vanrednog profesora za predmet "Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina", a 1957 god. za redovnog profesora za predmete "Mašinska obrada" i "Mašine alatke".

Ispit za ovlašćenog mašinskog inženjera Prof. Stanković

je položio 1936 god., asistentski ispit 1941 god., naučni saradnik Mašinskog instituta Srpske akademije nauke i umetnosti postao je 1951 god., i tu rukovodi Odeljenjem za mehaničku tehnologiju. Doktorirao je oktobra 1953 god. u Akademiji.

Osnivač je Zavoda za mašine alatke i Katedre za tehnologiju (sada Katedra za proizvodno mašinstvo) na Mašinskom fakultetu, inicijator naučne i univerzitetske pedagoške delatnosti u nas u oblasti proizvodnog mašinstva, nosilac proširenja delatnosti i na druge centre u zemlji (Sarajevo, Skopje, Novi Sad, Niš) i inspirator za formiranje Instituta za alatne mašine i alate IAMA u Beogradu (sada LOLA Institut). Pored plodnog rada na uspostavljanju, organizovanju i unapredjivanju naučne i nastavne delatnosti na Univerzitetu, Prof. Stanković je razvijao i negovao veoma uspešnu i značajnu saradnju sa privredom, učestvovao je u saveznim i republičkim organima za nauku na trasiranju naučne politike i programa u oblasti mašinstva, posebno proizvodnog mašinstva, a ostavio je vidan trag svoje ličnosti predanim radom kao Dekan Fakulteta i konstruktivnim učesćem u nizu foruma na Fakultetu i Univerzitetu i u okviru drugih organizacija.

Kroz dugogodišnji rad na odgovornim industrijskim zadacima u vazduhoplovnoj industriji postao je solidan poznavalac sredstava, tehnike i organizacije proizvodnje, dok se je isključivom zaslugom Prof. Stankovića od jednosemestralnog predmeta "Mašine alatke" iz 1945 god. razvio na Mašinskom fakultetu u Beogradu važan odsek za proizvodnju sa, u to vreme, šest specifičnih, osnovnih, konstrukcijskih i eksploatacijskih kurseva. Preko 700 inženjera koji su do smrti Prof. Stankovića diplomirali na Mašinskom fakultetu u okviru specijalnosti industrijske proizvodnje i proizvodnog mašinstva zahvaljuje za svoje stručno znanje nastavi koju je on postavio i vodio. Više od 200 direktno vodjenih diplomskih radova, desetak doktorskih disertacija, nekoliko magistarskih radova, kao i nesebična i znalačka pomoć velikom broju mlađih saradnika na Fakultetu i u drugim sredinama i saradnja sa širim krugom stručnjaka i naučnih radnika u celoj zemlji predstavljaju značajan beleg u životnom putu Prof. Stankovića.

Prof. dr Pavle Stanković je neočekivano umro 25. avgus-

ta 1969 god., radeći na drugoj knjizi novog univerzitetskog udžbenika iz oblasti alatnih mašina, posvećen njihovim konstrukcijskim elementima i sistemima.

### 3. NAUČNI OPUS PROF. DR PAVLA P. STANKOVIĆA

Pored niza delatnosti naznačenih u prethodnom odeljku, veoma važno po obimu, posebno za stvaranje potrebnih okvira i klime je delo Prof. Stankovića u oblasti naučne publicistike. Tu su u punoj meri došli do izražaja njegova originalna kreativnost, širina interesovanja, predanost otkrivanju istine, visoka naučna etika, izvanredna sistematičnost i istrajnost u prevazilaženju prepreka. Pored objavljenih studijskih radova u predratnom periodu, inspirisanih izazovima visokovredne inženjerske delatnosti, značajni opus Prof. Stankovića se kreće u širokom spektru problematike proizvodnog mašinstva, u čemu je u pravoj meri došla do izražaja tesna sprega njegove profesionalno-inženjerske, naučne i pedagoške delatnosti.

Najraniji radovi Prof. Stankovića su se odvijali u okviru industrijske prakse metaloprerađivačke i doonije na konstrukcijskim intervencijama, pre ostalog u oblasti sredstava za obradu deformisanjem. Pored razradjenih teorijskih analiza za dve originalne ideje - obrada plastičnim deformisanjem uz istovremeno statičko i dinamičko dejstvo i izrada zupčanika plastičnim deformisanjem uz relativno kotrljanje u toplom stanju - izvedene obimne eksperimentalne verifikacije na nadahnuće anticipiranim i uspešno izradjenim modelskim prototipovima prese-čekića /3/, /11/ i mašine za izradu zupčanika valjanjem /7/, /17/, /22/ - /25/, /50/, /51/, /54/ su dovele do mogućnosti dalje industrijske primene i eksploatacije. U prvom kompleksu je reč o pokušaju da se istovremenim statičkim (presovanje) i dinamičkim (krovanje) dejstvom na radni predmet pri plastičnoj obradi u kalupu istovremenu ostvare preimućstva oba dejstva koja su dotada korišćena zasebno, pri čemu su izvedena laboratorijska ispitivanja na prototipu verifikovala ispravnost polazne pretpostavke. Za razliku od dotada u svetu postojećih rešenja izrade zupčanika plastičnim deformisanjem koja se uglavnom koriste za izradu u hladnom stanju zupčanika malog modula ili za završnu obradu zupčanika, u drugom je kompleksu u pi-

tanju veoma značajna rešenja, bazirana na sopstvenoj teorijskoj analizi procesa tečenja metala pri relativnom kotrljanju i spregnuto sa originalnim otklanjanjem niza nedostataka koji su onemogućavali razvoj ove inače primamljive ideje splicirane u proizvodnji masovno potrebnih artikala kao što su zupčanici. Nažalost, tekući uslovi i mogućnosti prihvatanja domaćih ideja koje zahteva znatnije ulaganje i određeni rizik nisu omogućili industrijski realizaciju za vreme života Prof. Stankovića <sup>4)</sup>.

Naučna razrada problema sa kojima se Prof. Stanković sretao pri prethodnom sopstvenom koncipiranju i konstrukcijskom razvoju alatnih mašina za obradu rezanjem ostvarena je kroz značajne direktive u oblasti prenosnika za kratkohodne rendisaljke /6/ i radijalnih klipnih pumpi sa promenljivim ekscentricitetom /10/. Pored toga je niz teorijskih problema našao svoje teorijsko razrešenje u nekim studijama Prof. Stankovića, na primer, korelacija opterećenja i oblika ureznika /4/ ili definisanje sile pri odsecanju šipkastog materijala noževima /8/.

Veoma značajnu i široku oblast naučnog interesovanja Prof. Stankovića predstavljaju izučavanje različitih aspekata eksploatacijskih karakteristika alatnih mašina. Polazeći u svojim prvim radovima u ovoj oblasti od kinematske analize prenosnika za glavno kretanje alatnih mašina /5/, unoseći u ta razmatranja elemente iskorišćenja snage /9/, proizvodnosti /12/ i ekonomičnosti rada /13/, Prof. Stanković razvija važne osnove za evaluaciju kompleksnog iskorišćavanja radnih karakteristika alatnih mašina, koja pitanja obradjuje u nizu studijskih radova, a takodje i radova izvedenih na osnovu brojnih prikupljenih podataka /14/ - /16/, /18/ - /21/, /26/, /52/, /53/. Pristup koji je pritom razradio i ostvareni rezultati mogu se smatrati klasičnim doprinosom nauci i predstavljaju izvanredno vredne, originalne i praktično korisne osnove za sva dalja izučavanja u ovoj značajnoj oblasti.

Valja, nadalje, istaći da je Prof. Stanković započeo u okviru Zavoda za mašine alatke Mašinskog fakulteta prva praktična ispitivanja karakteristika alatnih mašina u nas /48/, /49/.

Integralni opus Prof. Stankovića zaokružava monumentalni

<sup>4)</sup> Docent dr Dragiša Mandić je kroz svoju doktorsku disertaciju nastavio rad na ovoj problematici.

doprinos domaćem obogaćenju i sistematizovanju specifičnih znanja kroz brojne, znanstveno-koncipirane, stalno unapređjivane, sveobuhvatne, moderne i u to vreme aktuelne udžbenike, koji znatnim svojim delom predstavljaju priloge monografskog karaktera /28/ - /47/. Od prve sveske koja se odnosi na obradu rezanjem još u 1948 god. /28/, do njegovog poslednjeg rukopisa koji se odnosi na konstrukcijske elemente alatnih mašina /47/, knjige Prof. Stankovića predstavljaju visokovredan i pouzdan izvor znanja za generacije mladih inženjera u toku njihovih studija na nizu jugoslovenskih univerziteta i visokih škola, ali isto tako i inspiraciju za rešavanje praktičnih problema i za studijski pristup nepoznatom i novom u slučaju velikog broja proizvodnih stručnjaka jugoslovenske mašinogradnje šezdesetih, pa i sedamdesetih godina.

Rezultati napornog i veoma uspešnog angažovanja Prof. Stankovića ne iscrpljuju se prikazanom delatnošću koja se ogleda i u pedesetičetiri naslova priložene Bibliografije, kao i organizovanjem, unapređjivanjem i sprovođenjem naučne i pedagoške aktivnosti. Pored niza nabrojanih stručnih i naučnopopularnih napisa, Prof. Stanković je u toku svoje plodne dugogodišnje delatnosti izradio niz studijskih, istraživačkih i stručnih radova, izveo dvadesetak značajnih konstrukcija alatnih mašina i opreme i izradio velik broj stručnih ekspertiza za potrebe privrede i za različite ustanove.

#### 4. ZAKLJUČNA NAPOMENA

Letimično prikazan životni put i naučnoistraživački opus u punoj meri ukazuju na izuzetnu kreativnost Prof. dr Pavla P. Stankovića kao odličnog inženjera i originalnog istraživača, na njegov nadahnuti pristup i izvanredno značajan doprinos identifikaciji proizvodne problematike i niza raznovrsnih aktuelnih pitanja u ovoj posebno stručno-naučnoj oblasti.

Stotine mašinskih inženjera proizvodnog usmerenja koji su studirali u Beogradu, ali i u drugim jugoslovenskim sredinama gde je delovao Prof. Stanković, mnogi od njih još uvek u naponu stvaralačke snage, iako neki i na kraju svog profesionalnog veka, svakako da se sa blagodarnošću i pijetetom sećaju svog učitelja, starijeg kolege i prijatelja, Prof. dr Pav-

la P. Stankovića, dipl.inž.maš.

5. BIBLIOGRAFIJA OBJAVLJENIH RADOVA, UDŽBENIKA I ELABORATA  
PROF. DR PAVLA STANKOVIĆA OD 1938 DO 1969 GODINE

- /1/ Stanković, P.: Odredjivanje dužine rulanja aeroplana pri uzletu s obzirom na zavisnost vučne sile elise od brzine, Tehnički list, Beograd, br. 3 i 4 (1938)
- /2/ Stanković, P.: Nosivost zavrtnja u elastičnom materijalu, Saopštenja maš. i vazduhopl. grupe Tehničkog fakulteta, Beograd (1941)
- /3/ Stanković, P.: Problem plastičnog deformisanja, istovremenim statičkim i dinamičkim dejstvom, Zbornik Maš. instituta SAN, 5 (1950) br. 2, str. 105
- /4/ Stanković, P.: Uticaj geometrijskog oblika urezača na njegovo opterećenje, Zbornik Maš. fakulteta (1953) 89
- /5/ Stanković, P.: Broj obrtaja mašine alatke s obzirom na promenljivu brzinu rezanja i presek strugotine, Zbornik Maš. fakulteta (1954) 129
- /6/ Stanković, P.: Konstrukcijske izmene kod kratkohodih rendisaljki radi poboljšanja ekonomičnosti rada, Zbornik Maš. fakulteta (1954) 129
- /7/ Stanković, P.: Deformacioni otpor pri izradi zupčanika plastičnom deformacijom uz relativno kotrljanje (doktorska disertacija), Zbornik Maš. instituta SAN, 30 (1954), br 5, str. 73
- /8/ Stanković, P.: Otpor pri odsecanju materijala kružnog preseka u zavisnosti od oblika noža i uslova rada, Zbornik Maš. fakulteta (1956) 119
- /9/ Stanković, P.: Pogonska snaga mašina alatki s obzirom na ekstremne režime pri rezanju, Zbornik Maš. fakulteta (1956) 129
- /10/ Stanković, P.: Prilog teoriji i konstrukciji radijalnih klipnih pumpi s promenljivim ekscentricitetom, Zbornik Maš. instituta SAN, 54 (1957) br. 7, str. 229
- /11/ Stanković, P.: Principles of Static-Dynamic Forging and Some of Its Characteristics, Proc. of the Conf. of Technology of Engg. Manufacture, London (1958)
- /12/ Stanković, P.: Specifična proizvodnost tehnoloških procesa i broj prolaza kao funkcije osnovnog vremena pri mašinskoj obradi, Zbornik Maš. instituta SAN, 60 (1959) br. 8, str. 109
- /13/ Stanković, P.: Die Wirtschaftlichkeit der Werkzeugmaschine in Abhängigkeit vom Stufensprung des Getriebes, Publikacije Maš. fakulteta (1962) str. 10.1 (u izvodu u: Industrie-Anzeiger, oktobar 1962, str. 46)
- /14/ Stanković, P.: Total Utilisation of the Machine Tool Characteristics, Advances in Mach. T. Des. and Res., Proc. of the 4th MTRD Conf., Manchester (1963) 49
- /15/ Stanković, P.: Modernizacija mašina alatki pod uslovom potpunog iskorišćenja konstruktivnih karakteristika mašina, Mašine alatke, N. Sad, 1 (1964) 25
- /16/ Stanković, P.: Eksploatacijski stepen iskorišćenja mašina alatki za obradu rezanjem, Zbornik saopštenja I savetovanja proizvodnog mašinstva, Beograd (1965) 1.1
- /17/ Stanković, P.: Osnovni teorijski i tehnološki problemi iz-



- rade zupčanika plastičnom deformacijom uz relativno kotrljanje, Zbornik saopštenja I savetovanja proizvodnog mašinstva, Beograd (1965) 22.1
- /18/ Stanković, P.: Kostensenkung bei der spanabhebenden Bearbeitung durch betriebstechnische und konstruktive Massnahmen, *Industrie-Anzeiger*, 87 (1965) 22.1
- /19/ Stanković, P.: Konceptijsko rešenje familija mašina alatki, Saopštenja IAMA, 1 (1966) 17
- /20/ Stanković, P.: Stepen složenosti obrade, Zbornik saopštenja II savjetovanja proizvodnog strojarstva, Zagreb (1966) 2.1
- /21/ Stanković, P., Jovanović, T.: Dalja primena eksploatacijskog stepena iskorišćenja, Saopštenja IAMA, 3 (1966) 245
- /22/ Stanković, P.: Neki eksperimentalni rezultati o izradi zupčanika plastičnom deformacijom uz relativno kotrljanje, Zbornik saopštenja IV savjetovanja proizvodnog mašinstva Sarajevo (1968) 12.1
- /23/ Stanković, P., Mandić, D.: Eksperimentalna mašina za izradu zupčanika plastičnom deformacijom uz relativno kotrljanje, Saopštenja IAMA, 7 (1968) 879
- /24/ Stanković, P.: Tačnost izrade zupčanika postupkom valjanja, Saopštenja IAMA, 8 (1968) 1011
- /25/ Stanković, P.: Weiterentwicklung der Technologie des Warmzahnradwalzens mit Rücksicht auf eine neue Versuchsmaschine, Saopštenja IAMA, 9 (1969) 1335
- /26/ Stanković, P.: Principi tipizacije mašina alatki s obzirom na njihovo eksploatacijsko iskorišćenje, Zbornik saopštenja V savetovanja proizvodnog mašinstva, I knjiga, Kragujevac (1969) AM.2.1
- /27/ Stanković, P.: Mašine alatke - Uvodni referat, Zbornik saopštenja V savetovanja proizvodnog mašinstva, III knjiga, Kragujevac (1969) 27
- /28/ Stanković, P.: Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina I, Obrada metala rezanjem (I izdanje), Naučna knjiga, Beograd (1948)
- /29/ Stanković, P.: Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina II, Obrada metala bez rezanja (I izdanje), Naučna knjiga, Beograd (1950)
- /30/ Stanković, P.: Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina III, Merenje i kontrola, 1 sveska (I izdanje), Naučna knjiga, Beograd (1952)
- /31/ Stanković, P.: Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina I, Obrada metala rezanjem (II dopunjeno izdanje), Naučna knjiga, Beograd (1955)
- /32/ Stanković, P.: Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina III, Merenje i kontrola, 1 sveska (II izdanje) Naučna knjiga, Beograd (1956)
- /33/ Stanković, P.: Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina I, Obrada metala rezanjem (III izdanje), Naučna knjiga, Beograd, 1958
- /34/ Stanković, P.: Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina III, Analiza vremena i režima obrade, 2 sveska (I izdanje), Naučna knjiga, Beograd (1959)
- /35/ Stanković, P.: Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina III, Merenje i kontrola, 1 sveska (III izdanje), Zavod za izdavanje udžbenika SRS, Beograd (1961)
- /36/ Stanković, P.: Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina I, Obrada metala rezanjem (IV izdanje), Naučna knjiga, Beograd (1961)

- /37/ Stanković, P.: Mašinska obrada, I knjiga, Obrada metala rezanjem, Gradjevinska knjiga (I izdanje), Beograd (1962)
- /38/ Stanković, P.: Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina II, Obrada metala bez rezanja (II dopunjeno izdanje), Naučna knjiga, Beograd (1962)
- /39/ Stanković, P.: Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina I, Obrada metala rezanjem (V izdanje), Gradjevinska knjiga, Beograd (1963)
- /40/ Stanković, P.: Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina II, Obrada metala bez rezanja (III izdanje), Naučna knjiga, Beograd (1964)
- /41/ Stanković, P.: Mašinska obrada, I knjiga, Obrada metala rezanjem (II dopunjeno izdanje), Gradjevinska knjiga, Beograd (1965)
- /42/ Stanković, P.: Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina I, Obrada metala rezanjem (VI izdanje), Gradjevinska knjiga, Beograd (1965)
- /43/ Stanković, P.: Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina II, Obrada metala bez rezanja (IV izdanje), Naučna knjiga, Beograd (1966)
- /44/ Stanković, P.: Mašinska obrada, I knjiga, Obrada metala rezanjem (III dopunjeno izdanje), Gradjevinska knjiga, Beograd (1967)
- /45/ Stanković, P.: Mašine alatke i industrijska proizvodnja mašina I, Obrada metala rezanjem (VII izdanje), Gradjevinska knjiga, Beograd (1967)
- /46/ Stanković, P.: Mašine alatke, I knjiga, Konceptijska i eksploatacijska analiza mašina za obradu rezanjem (I izdanje), Gradjevinska knjiga, Beograd (1968)
- /47/ Stanković, P., Mašine alatke, II knjiga, Konstrukcijski elementi mašina za obradu rezanjem, Gradjevinska knjiga, Beograd (1969)
- /48/ Stanković, P., Zarić, S., Šolaja, V.: Izveštaj o ispitivanju frikcione prese FP-75, Zavod za mašine alatke Mašinskog fakulteta (1955)
- /49/ Stanković, P., Zarić, S., Mlačić, V.: Usporedno ispitivanje strugova, Zavod za mašine alatke Mašinskog fakulteta, Elaborat 01/61 (1961)
- /50/ Stanković, P., Mandić, D.: Izrada zupčanika plastičnom deformacijom uz relativno kotrljanje I, Elaborat 17/64, Institut za alatne mašine i alate, Beograd (1964)
- /51/ Stanković, P., Mandić, D.: Izrada zupčanika plastičnom deformacijom uz relativno kotrljanje II, Elaborat 29/65, Institut za alatne mašine i alate, Beograd (1965)
- /52/ Stanković, P., Nedeljković, M., Mlačić, V., Urošević, S., Kalajdžić, M., Šolaja, V.: Ispitivanje bilansa snage i proizvodnosti mašina alatki, Elaborat 57/66, Institut za alatne mašine i alate, Beograd (1966)
- /53/ Stanković, P., Gornik, B., Jesenšek, R., Jovanović, T., Pisarski, Č., Reich, W.: Principi tipizacije i standardizacije mašina alatki, Elaborat 49/66, IAMA, Beograd, IAS, Zagreb, Inš. za strojništvo, Ljubljana (1966)
- /54/ Stanković, P., Mandić, D., Kalić, Dj.: Izrada zupčanika plastičnom deformacijom uz relativno kotrljanje, Završni izveštaj, Elaborat 90/68, Institut za alatne mašine i alate, Beograd (1968)

V. Šolaja

TWENTY YEARS SINCE THE DEATH OF PROF. DR PAVLE STANKO-  
VIĆ

S u m m a r y

Dr Pavle P. Stanković, Dipl.Ing. (1909 - 1969), Professor in Machine Tools and Metalworking Production at the Mechanical Engineering Faculty, University of Beograd, founder and head of the Chair in Production Engineering at the same Faculty, passed away suddenly and without being previously ill on August 25th, 1969, at the age of 60. It was a blow to the specific sector of Yugoslav Science and Teaching, because he was an active leader and worker in the post-war economic, social and educational development of Yugoslavia. At the occasion of 22nd Yugoslav Conference on Production Engineering Research, and as the successor to the Chair, in his paper the author gives an account on his life and achievements, with the hope that many of his old students attending the Conference will share unianimously the gratitude and respect for their teacher and friend, Prof. Dr Pavle P. Stanković, who was born eighty, and passed away twenty years ago.

## СОДРЖИНА

<b>В.Павловски</b> СОСТОЈБА И ТЕНДЕНЦИИ ВО ТЕХНОЛОГИЈАТА НА ИЗРАБОТКА НА ЗАПЧАНИЦИ СО РЕЖЕЊЕ	1
<b>A.Pavić, J.Brnadić, J.Galić</b> NEKI REZULTATI PRIMJENE REZNIH ALATA OD KUBIČNOG BORNITRIDA	27
<b>B.Nedić, S.Gajić, D.Saleta</b> MOGUĆNOST PRIMENE NOVIH ALATNIH KERAMIČKIH MATERIJALA NA BAZI SILICIJUM NITRIDA U OBRADI REZANJEM	35
<b>D.Babić</b> REZULTATI ISTRAŽIVANJA I ISKUSTVA U OBRADI ODLIVAKA OD SIVOG LIVA ALATOM SA TVRDOM PREVLAKOM TIN	45
<b>B.Tadić, Z.Yi-gang</b> MATEMATIČKO STATISTIČKI PRISTUP UPOREDBENJU ENERGETSKIH BILANSA REZNIH ALATA SA I BEZ PREVLAKE OD TIN	53
<b>Z.Nikić, S.Radonjić</b> KOMPARATIVNE KARAKTERISTIKE OKSIDNE, MEŠANE I NITRIDNE REZNE KERAMIKE	61
<b>D.Banjac</b> BRZINA OBRATANJA KRUŽNE PLOČICE PRI STRUGANJU SAMOOBRTNIM NOŽEVIMA	67
<b>P.Dašić, Lj.Papić</b> ODREĐIVANJE POUZDANOSTI REZNIH ALATA NA OSNOVU IZBORA NAJBOLJE RASPODELE U FAZI REALNE EKSPLOATACIJE	77
<b>S.Sekulić</b> VEROVATNOSNA ANALIZA SREDNJEG I EKSTREMNIH VREMENA OTKAZA I POTREBNOG BROJA REZNOG ALATA U ZAVISNOSTI OD NJEGOVE POUZDANOSTI	87
<b>Z.Haračić, A.Mišković</b> PRILOG STUDIJI RAZVOJA METODA ZA DEFINISANJE EKSPLOATACIONIH KARAKTERISTIKA ALATA	97

S.Radonjić, V.Šolaja NOVI MODEL KORELACIJE HABANJA ALATA I KVALITETA POVRŠINE PRI OBRADI NA STRUGU	107
V.Gordić, D.Šolaja, D.Vukelja FUNKCIONALNA ZAVISNOST IZMEĐU KVANTNO TEMPERATURNIH STANJA I VEKA TRAJANJA REZNE IVICE	115
M.Božić VREME OBRADJE - MOGUĆI KRITERIJUM ZA ODREĐIVANJE STANJA ZATUPLJENOSTI REZNIH ALATA	131
D.Kakaš, L.Šidjanin, V.Bajić, B.Škorić UTICAJ KVALITETA ČELIKA ZA RAD NA TOPLO NA REZULTATE TERMIČKE OBRADJE ALATA	141
L.Kravanja SISTEMI SA KONSTANTNOM SILOM I BRZINOM REZANJA KOD HORIZONTALNOG TRAIČNOG PILJENJA	149
J.Kopač, M.Soković PRISPEVEK K IDENTIFIKACIJI REZALNEGA PROCESA PRI ODREZAVANJU AVSTENITNEGA MANGANOVEGA JEKLA 12 Mn	157
S.Dolinšek, J.Kopač ANALIZA REZALNEGA PROCESA PRI VRTANJU S KARBIDNIMI TRDINAMI	165
B.Sovilj, D.Milikić, M.Gostimirović METODA MERENJA TEMPERATURE REZANJA PRI ODVALNOM GLOĐANJU	173
P.Kovač ZAVISNOST OTPORA REZANJA OD ELEMENATA REŽIMA REZANJA I HABANJA ALATA	181
D.Trifunović, P.Dašić KORELACIONA ZAVISNOST KOMPONENTI OTPORA REZANJA I ELEMENATA REŽIMA REZANJA PRI OBRADI SIVOG LIVA NA STRUGU	189
J.Grumb, P.Žerovnik VPLIV OBRADJE OROĐJA NA PORAZDELITEV ZAOSTALIH NAPETOSTI V POVRŠINSKEM SLOJU PRI OBDELAVI AVSTENITNIH JEKEL	197

B.Vasiljević UTICAJ SADRŽAJA MEHANIČKIH NEČISTOĆA I VRSTE SREDSTVA NA HLADENJE PODMAZIVANJE NA KVALITET OBRADENE POVRŠINE U OPERACIJAMA FINOG BRUŠENJA	205
M.Lazić, D.Ranković SMANJENJE NIVOVA ZAGADENJA MIKROKLIME U OBRADI ODVALNIM GLODANJEM	215
R.Kovač, S.Jojin PRILOG ANALIZI MEHANIZMA NASTAJANJA PUKOTINA PRI BRUŠENJU	223
B.Kršljak BRUŠENJE ALATNOG ČELIKA SA POVEĆANIM SADRŽAJEM UGLJENIKA	233
N.Bajić IDENTIFIKACIJA OTPORA BRUŠENJA POMOĆU STATISTIČKIH REPREZENATA	241
V.Šolaja, S.Ekinović, S.Brdarević ISTRAŽIVANJE UTICAJA REŽIMA MEDUFAZNE TERMIČKE OBRADNE SLOBODNO KOVANOG OTKOVKA OD ČELIKA Č.5432 NA REZNE SPOSODBNOSTI ALATA	251
A.Bunjaku ODREĐIVANJE OBRADLJIVOSTI MATERJALA Č.3160 POMOĆU OTPORA REZANJA SA RAZLIČITOM TVRDOĆOM	261
M.Gostimirović, D.Milkić ISTRAŽIVANJE OBRADLJIVOSTI MATERJALA KORIŠĆENJEM SREDNJE TEMPERATURE PRI OBRADI REZANJEM	269
J.Kopač, S.Dolinšek OBDELOVALNOST VZMETNIH JEKEL	277
M.Maslač, A.Mišković MOGUĆNOSTI OBRADNE KOMPOZITNOG MATERJALA NA BAZI UGLJENIČNIH I ARAMIDNIH VLAKANA	285
J.Kevelj PRILOG STUDIJI ZAVRŠNE OBRADNE OTVORA U SENDVIČ KONSTRUKCIJAMA-DIJELOVIMA VAZDUHOPLOVA OD Ti LEGURA I DURALUMINIJUMA	293



A.Perić	SUMARNA ISKUSTVA O NOVIJIM ISTRAŽIVANJIMA EKONOMSKE POSTOJANOSTI ALATA	303
A.Hriešik	PRILOG OPTIMALIZACIJI TEHNOLOŠKIH PARAMETARA ZAVRŠNOG TOKARENJA	315
D.M.Erić, M.D.Mladenović	NEKI ASPEKTI I REZULTATI PRIMENE OPTIMIZACIONIH METODA U TEHNOLOŠKOM PROCESU	325
Ž.Knežević, B.Nedeljković, B.Jordović	OPTIMIZACIJA VREDNOSTI INDEKSA OBRADLJIVOSTI, MEHANIČKIH OSOBINA KOČIONIH DOBOŠA IZ SIVOG LIVA U FUNKCIJI POSTUPKA TOPLJENJA I MODIFICIRANJA	333
M.N.Dumanović	OPTIMIZACIJA REŽIMA REZANJA PRI ZAVRŠNOM STRUGANJU SLOŽENE KONTURE PRIMENOM SIMPLEKS METODA	347
F.Roethel, J.Grüm, H.Muren, M.Valič, M.Junkar	NAČRTOVANJE LASERSKEGA REZANJA	355
F.Roethel, G.Laković, M.Dobovšek, M.Junkar, M.Žnidaršič	OBRABA ROBOV POD VPLIVOM EDM PARAMETROV	367
B.Jeremić, S.Karalazić	IZRADA UNUTRAŠNJE TRASE CEVI ELEKTROHEMIJSKIM POSTUPKOM SA POKRETNOM KATODOM	375
D.Rašković, Lj.Lukić	BUŠENJE DUBOKIH OTVORA MALIH PREČNIKA U ELEKTROLOTNOM BAKRU	385
R.Zdenković, T.Lechpammer	POSEBNI KLIZNI HD-LEŽAJI, IZVEDBE, TE NJIHOVE KARAKTERISTIKE U RADU I PRIMJENI KOD PRECIZNIH ALATNIH STROJEVA	391
Љ.Дудески, В.Дуковски	ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА АНАЛИЗА НА ФРЕКВЕНТНИОТ СПЕКТАР НА САМОПУБУДНИТЕ ОСЦИЛАЦИИ ПРИ ОБРАБОТКА НА СТРУГ	401

M.Šarenac				
EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE	STATIČKE	KRUTOSTI	GLAVNOG	
VRATILA ČEONOG STRUGA				409
L.Begenišić, A.Perić				
PRILOG PROIZVODNIM ISPITIVANJIMA	KRUTOSTI VRETENA NA	DOMAĆIM	STRUGOVIMA	421
P.Nikić				
PODLOGE ZA PRORAČUN ZAVOJNIH VRETENA	SA KUGLIČNIM VODENJEM -	KAO POGONSKIH SISTEMA	POMOČNOG KRETANJA MAŠINA ALATKI	VIŠEG
TEHNOLOŠKOG NIVOVA				429
М.Калајцик				
НЕЛИНЕАРНА АНАЛИЗА АКСИЈАЛНИХ	СТРУКТУРА			439
R.Ječmenica, D.Petković				
ANALIZA UTICAJA ZAVOJNIH VRETENA	SA KUGLIČNIM VODENJEM NA	EFEKTIVNOST	OBRADNOG SISTEMA	447
E.Detiček, E.Kiker, D.Lovrec, M.Kastrevc				
NAČRTOVANJE REGULATORJA STANJ	ELEKTRO-HIDRAVLIČNEGA	SERVO	SISTEMA Z UPORABO OPAZOVALNIKA	REDUCIRANEGA REDA
				455
M.Trabonića, M.Klieštan, M.Lekić, S.Matić				
MODERNIZACIJA MAŠINE ZA OBRADU	DIJELOVA ARMATURA			465
Lj. Borojev				
PRILOG ISTRAŽIVANJU PROBLEMATIKE	HIDROSTATIČKOG ULEŽIŠTENJA			473



В. ПАВЛОВСКИ

СОСТОЈБА И ТЕНДЕНЦИИ ВО ТЕХНОЛОГИЈАТА  
НА ИЗРАБОТКА НА ЗАПЧЕНИЦИ СО РЕЖЕЊЕ

1. УВОД

Проблемот на конструкција и технологија на изработка на запченици не е нов. Примитивни облици, што во принцип функционираше како запчести преносници познати се уште од древни времиња. Меѓутоа, ниското ниво на техничките сознанија не овозможиле создавање, производство и примена на овие механизми сè до средниот век, кога е достигнат одреден прогрес, пред сè како заслуга на генијалниот Леонардо да Винчи кој успеал да конструира повеќе видови механизми што базираат на пренос на движење со точен кинематски однос. Меѓутоа во оваа епоха, практичната примена на запчестите преносници најчесто се среќува во часовничарските и сличните механизми. Со појавата на машини што произведуваат енергија (парна машина и други) потребата за механизми што пренесуваат снага силно се зголемила, особено во втората половина на 19 и почетокот на 20 век. Во овој период се развиваат и применуваат точни методи за изработка на запченици, а во исто време се развиваат и методи за контрола на точноста на изработените запченици.

Во денешно време потребата за запчести преносници е огромна. Големiot број на автомобили и други производи за широка потрошувачка, како и потребите на енергетските објекти, специјални машини, алатни машини и други инсталации захтеваат изработка на запченици со голема точност, ниска цена и долг век на експлоатација. Во овој материјал презентирани се резултатите во истражувањата и нивната индустриска примена во областа на технологијата на изработка на запченици во последната деценија.

---

\* Д-р Владимир Павловски, дипл. маш. инж., редовен професор на Машинскиот факултет во Скопје, Карпош 66

## 2. НОВИ МАТЕРИЈАЛИ ЗА АЛАТИ ЗА НАЗАБУВАЊЕ

### 2.1. Алати превлечени со TiN

Алатите што се применуваат за изработка на запчаници се најсложени и најскапи алати што се применуваат во металопреработувачката индустрија. Ова се објаснува со фактот дека тоа се алати со голема димензиона точност, што при изработката захтева помеѓу другото и профилно брусење. Поради високата цена на алатите, како и на самата операција назабување, од секогаш се настојувало да се зголеми трајноста на алатите, со истовремено зголемување на производителноста на процесот. Во минатото биле користени повеќе методи за да се постигнат споменатите цели, како на пример: усовршување на конструкцијата на алатите, зголемување на учеството на легирачките компоненти, нанесување на слоеви на работните површини на алатите, и сè со цел да се зголеми трајноста на резните алати. Овие методи вклучувале различни металуршки процеси како на пример, нитрирање, хромирање, никлување и сл. што во одредени специфични случаи се покажало како успешни, при што се постигнати и одредени економски ефекти.

Примената на резни алати од тврд метал (карбидни алати) превлечени со слој од TiN (титан натрид) се покажаа како многу успешни од 1969 година. Нанесување на слоеви по хемиски пат (CVD постапка), што се спроведува на високи температури се применува за резни плочки што се применуваат за стругање, дупчење и глодање и тоа успешно. Високата температура при CVD-постапката не влијае негативно на карбидните соединенија во смисол на промена на структурата, димензиите и механичките особини. Меѓутоа овој процес не беше применлив за алати изработени од брзорезен челик поради дисторзијата на нивната сложена геометрија и промена на структурата, односно механичките особини. И покрај тоа одредени експерименти со нанесување на титан карбид (TiC) и титан натрид (TiN) на брзорезен челик со CVD-постапка беа спроведени во 1979 година и 1980 година во САД.

Постапката за нанесување на слоеви по физички пат (PVD-постапка) што се спроведува на релативно пониски температури и не предизвикува термички дисторзии и структурни промени, беше прв пат применета во Јапонија 1980 година /1/.

Брзо прифаќање и воведување на PVD-постапката се илустрира со следниот податок; на изложбата на машини алатки и алати во 1980 г. во Чикаго каде само еден производител изложил одвално глодало превлечено со TiN, следната година на изложбата во Хановер 1981 година многу производители на алат, презентирале алати превлечени со TiN, а меѓу нив голем број на алати наменети за изработка на запчаници.

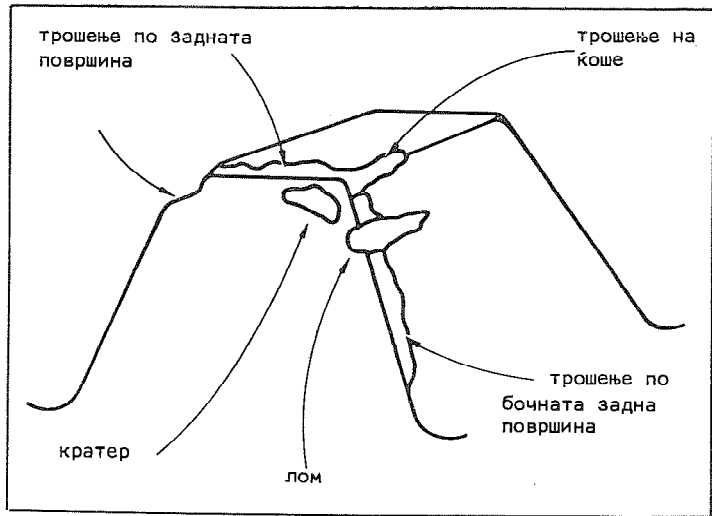
Нанесувањето на превлака на површините на алатите од TiC и TiN создава тенки, многу тврди и отпорни на абеење слоеви. Оваа комбинација од карактеристики ги прави овие слоеви идеални за третирање на сложената и прецизна геометрија на алатите за изработка на запчаници. Со оглед на тоа дека TiC е потврд од TiN тој се препорачува во процеси на режење каде абразивното трошење на површините на алатите е поизразено. Од друга страна TiN што се карактеризира со понизок коефициент на триење и антизаварувачки карактеристики се применува во случаи каде имаме лепење на материјал и поткршување на алатот.

За да се сфати благотворното делување на слојот од TiN на површините на резните алати, најнапред ќе биде опишан карактерот на трошење на резните алати на примерот на одвално глодало. На сл.1. илустрирани се разните облици на трошење, што често се сретнуваат кај алатите за назабување. Подкршувањето и одвалувањето на поголеми парчиња од алатот е резултат на нерегуларно поставен процес што треба да се корегира. Овие облици на оштетување длабоко навлегуваат во материјалот и состојбата не може да се подобри со тенкиот слој од TiN.

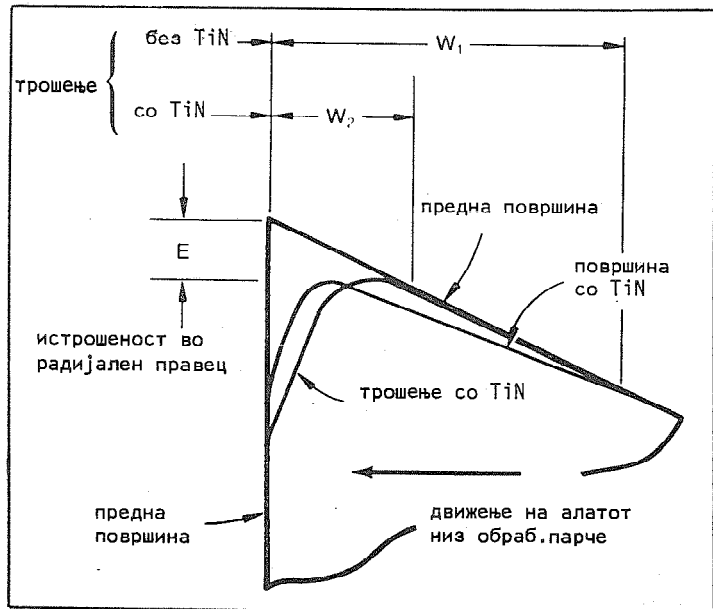
Абеењето на задната површина на алатот (flank wear) може да се систематизира на следен начин:

- абеење на задната челна површина
- абеење на задната бочна површина
- абеење на преминот од една во друга површина.

Абеењето по задната површина на алатот во регуларни услови на обработка е доминантен облик на абеење кај резните алати за изработка на запчаници. Со оглед на тоа дека преострувањето на алатите се врши по предната страна, слојот од TiN нанесен по задната површина е многу ефикасен во заштита на алатот од трошење, со што значително се зголемува трајноста на алатите. Ако на ова се додаде смалениот коефициент на триење по предната површина на алатот и антизаварувачката карактеристика на слојот, сам по себе се наметнува фактот за можноста на интензивирање на режимот на обработка, преку зголемување на брзината на режење и поместот, што од своја страна ја зголемува производителноста.



Сл.1. Локации на трошење на заб од одвално глодало



Сл.2. Ефектот на TiN на обликот на трошење на заб од одвално глодало

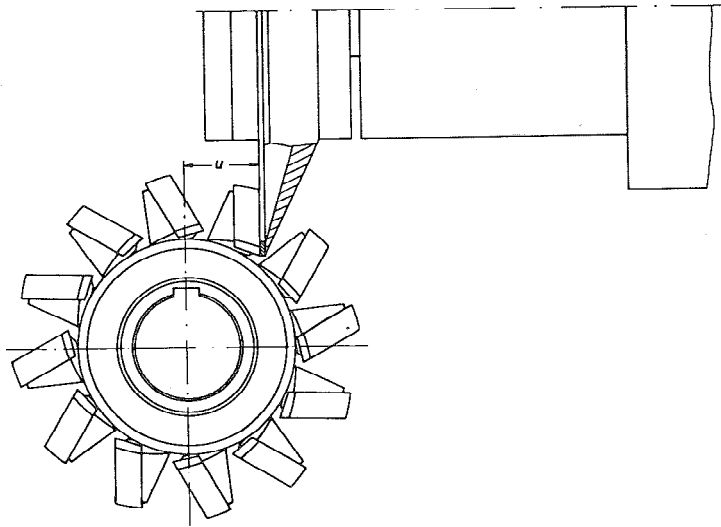
Формирањето на кратер се должи на еродирачкиот ефект по предната површина на алатите како на пример, одвалните глодала или запчестите резни алати. Ерозијата пред сè се должи на абразивното дејство на струшката што се лизга по предната површина на алатот како и на разрушените микроставарени споеви. Со самата појава на кратер ефикасноста на слојот од TiN се губи а алатот се однесува како во вообичаени услови на работа односно без нанесен слој.

Во поново време се забележува пракса, да после преострувањето на алатот по предната површина, алатите повторно се третираат со TiN, особено одвалните глодала и кружните запчести ножеви. При тоа треба да се земат два основни елементи што ја дефинираат истрошеноста на алатот: истрошеноста по задната површина и второ што е поврзано со првото отстапување на димензиите на запчаникот поради радијалното трошење. На сл.2. е илустрирано споредбено обликот на трошењето на задната површина на алатот и влијанието на радијалното повлекување на алатот. Во овој експеримент /1/ забележано е дека, до повлекувањето на алатот во радијален правец за  $E$  во случај кога е применет алат превлечен со TiN изработени се два пати повеќе запчаници, одколку при примена на алат без превлака. Ако на тоа се додаде и фактот дека во истовреме е забележано три пати помало трошење по задната површина, тогаш вкупниот ефект е 6 пати подолг век на траење на резниот алат. Некои корисници известуваат и за 10 до 15 пати поголема трајност што не е исклучено во некои посебни случаи. Во МЗ Тито во фабриката за преносници позитивните искуства укажуваат на просечно продолжување на векот на траење за 3 до 4 пати.

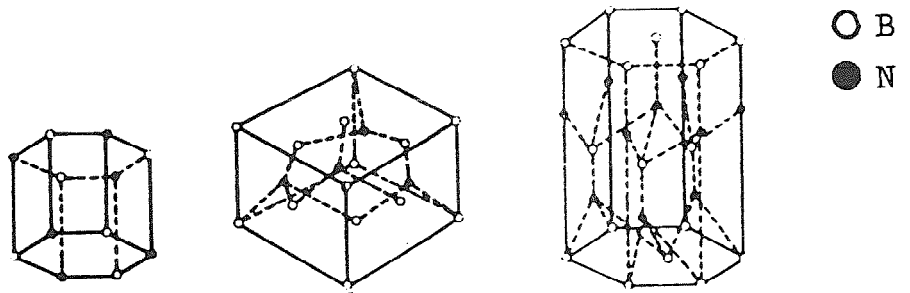
## 2.2. Карбидни алати (ТМ) за назабување

Традиционален редослед на технолошките операции при изработка на запчаници е: грубо назабување, термичка обработка, брусење како завршна обработка што има за задача да ги одстрани дисторзиите од термичка обработка и да постигне одредена точност на димензиите и квалитетот на обработените површини. Меѓутоа при брусењето на запчаници со поголем пречник и модул операцијата брусење захтева време што значитно го поскапува производот. Во последните 4 до 5 години се почесто се применува алтернативен метод за завршна обработка на запчаници со примена на глодала од тврд метал. Авторот на овој труд располага со конкретни податоци на фирмата Klingelberg, која е една од водечките производители на овој вид алати во светот. Во едукативните материјали што оваа фирма ги дистрибуира, се наведува дека во последните неколку години во Т.Н. во Ахен вршени се испитувања на карбидните алати заради утврдување на перформансите, како и за оптимирање на условите на обработка:





Сл.3. Глодало од ТМ со голем негативен преден агол  $\gamma$



Сл.4. Кристални облици на борнитрид

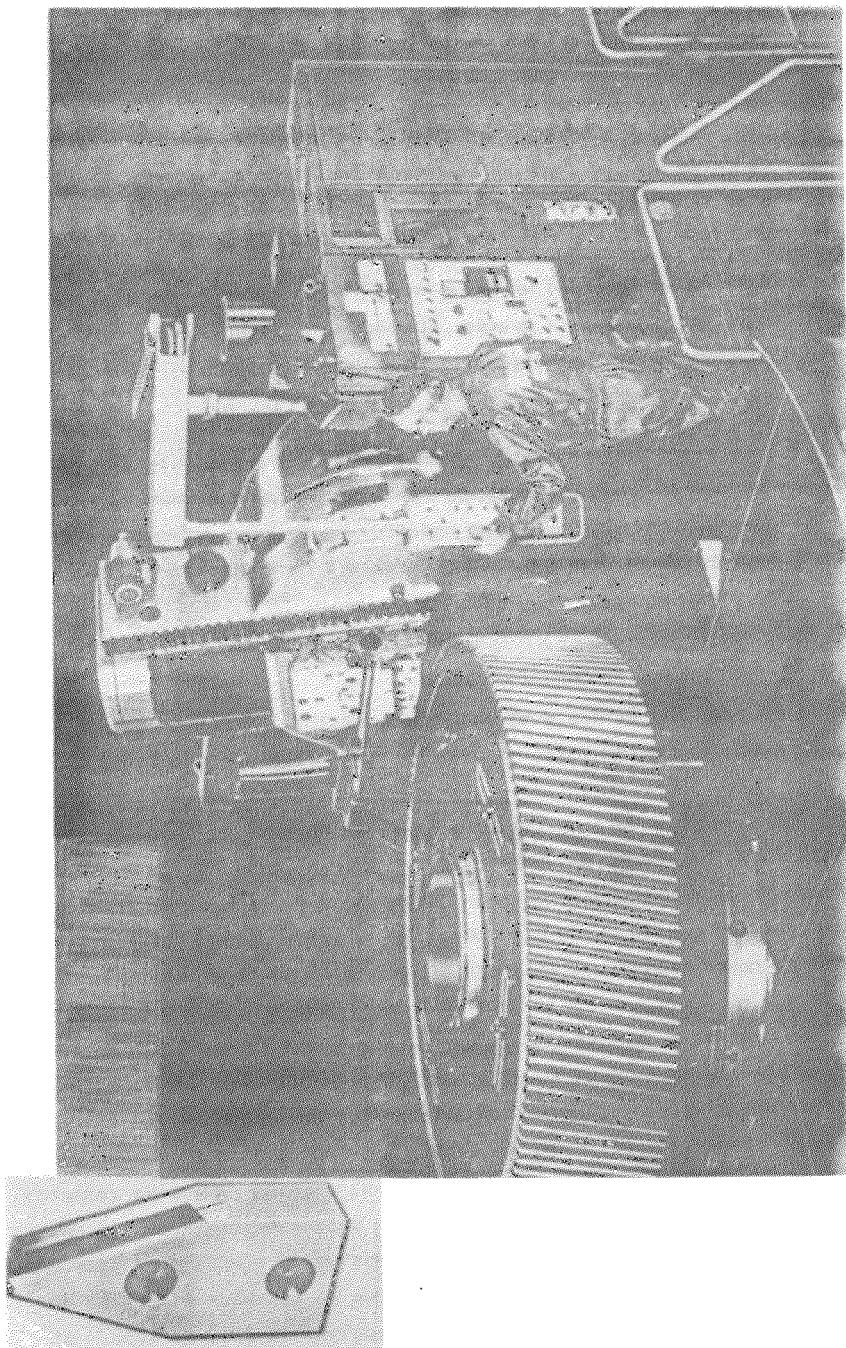
- Основна карактеристика на овие алати е што се со ситнозрнеста структура при што материјалот истовремено има голема тврдина и жилавост.
- Алатот е способен да реже термички обработени челици со тврдина од околу HRC 60. Ова особина се должи на фактот дека карбидниот алат се подвргнува на дополнителна "HIP" постапка (Hot Isostatic pressing) - што ги подобрува механичките параметри.
- Најповолно подрачје на применета брзина на режење се 50 до 90 м/мин. а во некои случаи и повеќе. Брзината на вертикалниот помест при одвално глодање изнесува 1,5 до 4 мм/вр.
- Алатот има голем негативен агол  $\gamma = -30^\circ$ . (Сл.3).
- Економичноста на процесот е проверена и во погонот на ФОП МЗ-Тито при одвално завршно глодање, при што за еден производ од наменско производство, со замена на процесот на брусеење добиено е 4 кратно намалување на времето на обработка и 2 пати пониска цена на чинење на операцијата.

### 2.3. CBN алати за назабување

Еден друг вид на алати во последните неколку години се повеќе наоѓа примена за обработка со симнување на струшка после термичка обработка, а тоа е CBN.

Поаѓајќи од истата констатација дека за брусеење на запчаници со голем дијаметар и модул е потребно многу време и скапа технологија на брусеење, во барањето на алтернативни технологии изведени се успешни обиди за индустриска примена на CBN (Cubic boron nitride), кубичен боров натрид, како материјал за изработка помеѓу другото и на алати за изработка на запчаници /4/. (Hard Cutting).

Бор натрид е хемиско соединение на бор (B) и азот (N) со однос на атомите 1:1 и хемиска формула BN. Во природата не се наоѓа како слободен, но лесно се произведува како соединение. Борнитридот е полиморфен материјал и постои во разни облици кои меѓусебно се разликуваат по својата кристално решеткаста структура. Споменатиот BN има хексагонална решетка слична на графитот. Меѓутоа BN по влијание на високи температури и екстремни притисоци ја менува својата решетка. Постапката за менување на структурата е идентична како при производство на синтетички дијаманти. Со примена на притисок помеѓу 60 и 100 kbar, при истовремено изложување на температура од 1500 до 2000°C се



Сл.5. Користење на алат од СВН за завршна обработка

менува хексагоналната форма во кристално-решеткаста форма од кубен облик. Таков борнитрид се нарекува CBN /5/. Доколку пак BN се изложи на притисоци поголеми од 100 kbar и висока температура, се создава трет облик на борнитрид што има хексагонална решетка и се нарекува вурцитна форма (WBN). Овој облик на BN има исто така како и CBN извонредни механички особини. На сл.4 даден е приказ на структурата на BN, CBN и WBN. На сл.5 прикажан е еден пример на примена на CBN за изработка и примена на алат за завршна обработка на запчаник по метода на MAAG после термички третман на запченикот. Алатот базира на контакт при обработка во точка, така да неговата примена не е ограничена со бројот на забите на запчаникот. Резните плочки се состојат од 3 до 4 мм основен материјал на карбидна основа а на него е нанесен слој од CBN во висина од 1 мм, а спојот е изведен со дифузија. Според искуствата применети во овој вид материјал за изработка на резни алати може да се резимира во следните три точки:

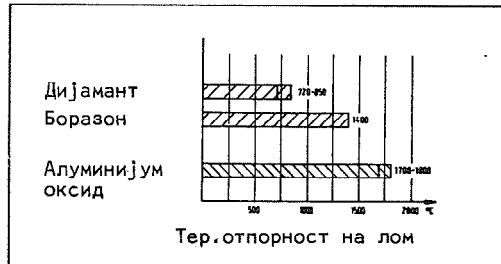
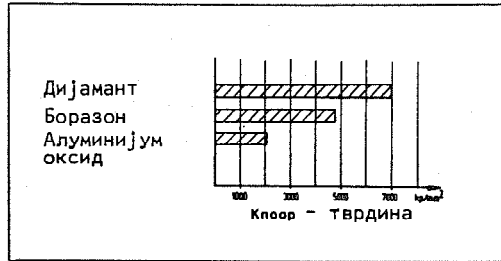
1. Термички обработени и други видови тврди метали со тврдина до HRC 65 може точно и економски оправдано да бидат обработени.
2. Примената на резни плочки со CBN овозможува обновување на резниот алат со пребрисување со дијамантско тоцило при што се добива идеално остра и коректна резна ивица.
3. Преострувањето се изведува по предната површина на алатот што овозможува задржување на профилот на алатот односно неговата точност после пребрисувањето.

Почетни позитивни резултати се постигнати во примената на алати од CBN за стругање во погонот на фабриката за запчаници и преносници при МЗ Тито во Скопје

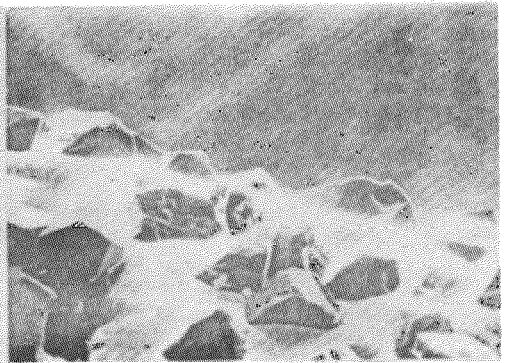
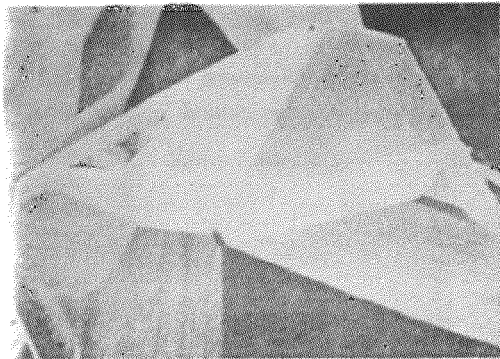
### 3. ПРИМЕНА НА НОВИ МАТЕРИЈАЛИ ЗА БРУСЕЊЕ НА ЗАПЧАНИЦИ

#### 3.1. Основни карактеристики на микрокристален CBN

Вообичаена технологија за брусеење на запчаници во најголеми производни капацитети денес е брусеење со тоцила на база на алуминијум оксид. Со појавата на микрокристалниот CBN во 1981 год. произведен во лабораториите на General Motors, добиен е материјал што сè почесто се применува за изработка на тоцила. Основна предност на овој материјал се големата тврдина и термичка стабилност. Искуството покажува дека тоцилата изработени од CBN имаат 3 до



Сл.6. Споредбена тврдина и термичка отпорност на материјали за брусење



4 илјади пати поголема трајност од соодветните тоцила изработени на база на алуминијум оксид. Тоа значи, со воведување на тоцила од CBN, се штеди време за чистење и поравнување на тоцилото како и време потребно за замена на тоцилото. Друга предност на микрокристалниот CBN е способноста за самоострење бидејќи при затапување отпаѓаат само микрокристали, а не цели зрна, при што тоцилото останува способно да брусил постојано /6,7,8/. На сл.6 дадени се некои споредбени карактеристики на материјалите за брусене, а на сл.7 микрофотографии на површината на тоцило од CBN.

### 3.2. Брусене со микрокристален CBN

За да се разбере како CBN "бруси" односно обработува, подобро е да се направи споредба со процесот на глодање наместо брусене. Секој откриен CBN кристал има остра резна ивица слична на заб на глодало. Соодветно избран помест, без стикслип ефект, овозможува секое зрно да реже соодветен дел од материјалот а собраната струшка потсеќа во облик на онаа од глодање. На овој начин спроведен процес на обработка ја намалува количината на ослободената топлина што не е случај при примена на други материјали каде имаме тенденција на гмечење а не на режење.

Примената на средство за ладење е исто така од големо значење. Средството за ладење има двојно дејство: да подмачкува при процесот на симнување на струшка и да ја одведува создадената количина на топлина. Најголем дел од создадената топлина се одведува преку струшката и разладното средство, така да предметот постанува ладен, а површината не претрпува термички оштетувања. Подмачкувачкото дејство е особено важно бидејќи спречува адхезионо лепење на материјалот. Денес на светскиот пазар веќе се нудат разладни средства за брусене со CBN-тоцила како на пр. Texaco Transultex Type, базирано на сулфурхлориум и со препорачлива количина од 150 l/min. при остри режими на обработка. Примената на тоцила од CBN е исто така условена со користење на доволно крути машини со современ дизајн и конструктивни елементи како на пр. со водечки вретена ослонети на лежишта со куглици, клизни површини од материјали со низок коефициент на триење и уреди што овозможуваат обилно доведување на разладно средство. Работното вретено треба да има истовремено голема крутост прецизна изработка и мирна работа. За уште поефикасна работа со тоцила од CBN треба да се користи машина со инсталирани мотори со поголема силина, отколку при примена на вообичаени тоцила од друг материјал. General Electric Comrapu препорачува 2 до 3 Ks за секој инч ширина на тоцилото, за тоцила со дијаметар од 6 до 10 инча.

### 3.3. CBN тоцил со нанесен слој

Во случај кога тоцилото има многу сложена форма или пак се бараат многу точни димензии на брусеното парче, тогаш се препорачува тоцило (сл.8) со нанесен слој по галвански пат. Ова електролитско нанесување и сврзување за основната форма се изведува со никел кој завзема околу 50% од волуменот. Со оглед на тоа дека формата на тоцилото, однапред со изработката е строго контролирана, потребата за накнадно дотерување сосема отпаѓа.

Понатамошниот развој на тоцилата со електролитски нанесен слој од CBN е ветувачка во рамките на денешните конструктивни решенија на машините брусилни, односно работа со 100 м/с или 20.000 вртежи на минут е возможна. Со повисоките брзини на брусеење се зголемува количината на материјал што се симнува со брусеењето при истовремено продолжување на векот на примена на тоцилото. Меѓутоа при релативно високите брзини на брусеење се јавува проблем на коректна примена на разладното средство. Со зголемување на брзината појавата на ваздушна бариера е присутна.

Во моментот се експериментира со тоцила низ кои се спроведени соодветни канали за довод на разладно средство. Треба уште да се додаде дека примена на CBN тоцила на CNC машини, со апсолутна повторливост на процесот, ја прави оваа технологија најзначаен настан во технологијата на брусеење во последните 50 години. Ако се сумираат сите позитивни и негативни карактеристики на оваа технологија може да се даде следен преглед:

#### Предности:

1. точност на изработката
2. можност за брусеење посложени форми
3. нестандартни облици може да бидат брусени
4. да се брусат целиот профил - вклучувајќи го и подножјето
5. не е потребно чистеење и дотерување
6. на основниот облик повторно електролитски може да биде нанесен слој за брусеење
7. економичност
8. нема термални оштетувања
9. долговечност
10. пократко време на брусеење

#### Недостатоци:

1. се бара посебна форма на тоцило за секоја операција
2. потребно е време за изработка на тоцилото

#### 4. ПОВРШИНСКО ТРЕТИРАЊЕ СО ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦИЈА НА ЗАПЧЕНИЦИ

Површинското дополнително третирање на боковите на запчениците се изведува од две причини:

- Со воведувањето на напонска состојба во подповршинскиот слој на притисок, преку еластично пластична деформација се зголемува векот на траење на запчениците, при што се зголемува и носивоста на забите на свиткување.
- Со гмечењето на површинскиот слој на мала длабочина се корегираат одредени несовершености како последица на рапавоста и во мала мерка и грешките при обработката со режење или термичка обработка.

Во основа постојат два вида на дополнително третирање на боковите на запченикот со пластична деформација.

- Сачмарење или бомбардирање на површините на боковите на запчениците со челични куглици и второ,
- Завршна обработка со роловање што се изведува на специјални машини за таа намена и соодветен алат-запченик со исти модул како и обработуваниот.

Низ два примера во овој труд ќе бидат објаснети двете постапки /9,10/ што се испитувани и применети во соодветни центри во САД.

##### 4.1. Ефектот на сачмарењето на замор кај запченици.

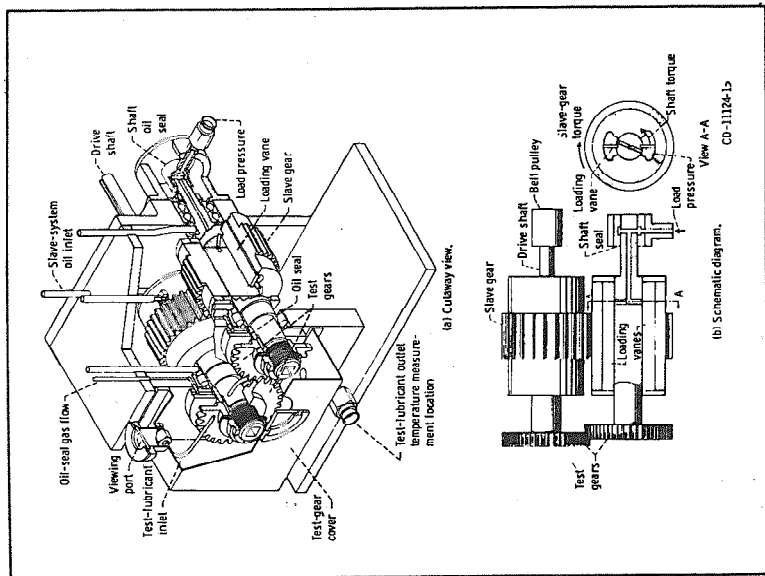
Податоците што овде се презентираат се добиени во NASA Lewis Research Center, Cleveland, Ohio /9/.

Целта на ова истражување е испитување на замор на боковите на забите кај запченици што се сачмарени со куглици од лиен челик со димензии од 0,70 мм. За да се добијат што е можно пообјектни резултати, изработени се 20 запченици од иста шаржа од материјал AISI 9310. После назабувањето, термичкото третирање и брусење, 10 од нив се сачмарени. По термичката обработка површинската тврдина изнесувала Rockwell C58, а во јадрото на материјалот Rockwell C40.

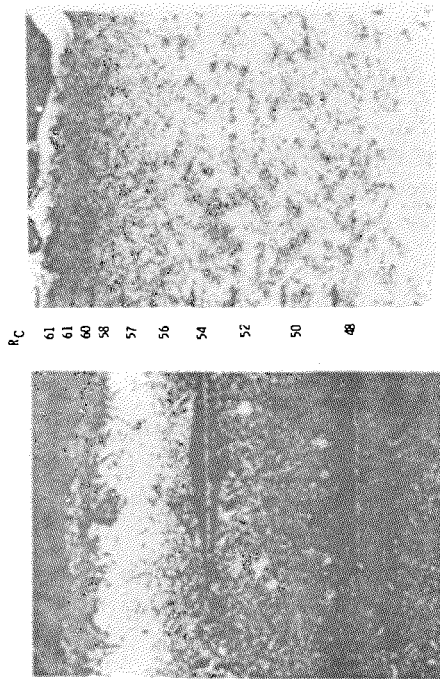
После тоа, извршени се соодветни испитувања на замор за запчениците. На сл.9 прикажана е машината за испитување.

Запчениците се испитувани во парови, а резултатите покажуваат дека третираните запченици имаат 50% подолг век на боковите како последица на пинтинг ефект.



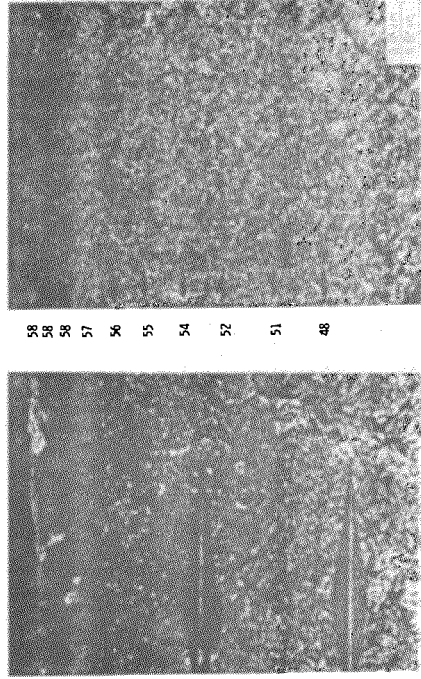


Сл.9. Машина за тестворање на запленици



R<sub>C</sub>  
61  
61  
60  
58  
57  
56  
54  
52  
50  
48

а) нетретирано



58  
58  
58  
57  
56  
55  
54  
52  
51  
48

б) третирано

Сл. 10. Металографски изглед на нетретирана и третирана површина со сачмарење

Деталните податоци на тестирање се дадени многу опширно во цитираниот труд со соодветни илустрации а овде на сл.10 се презентира металографскиот изглед во два различни размера на подповршинските слоеви на третирани и нетретирани запченици.

#### 4.2. Завршна обработка со роловање на запченици

Другиот вид на обработка со кој се постигнува сличен ефект е роловање со алат што има исти модул како и обработениот запченик (Сл.11).

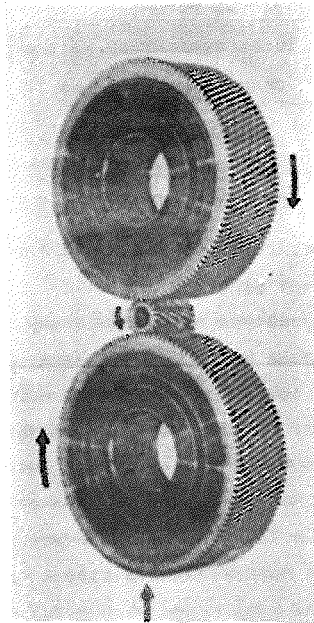
Ефектот на роловањето може да се интерпретира на следен начин. Запченикот-алат при зафатот со приближувачката страна на забот предизвикува повлекување на материјал од главата на забот кон точката на поделителниот круг, а понатаму со навлегувањето во зафат материјалот од точката на поделителниот круг до коренот на забот се повлекува во спротивна насока. Меѓутоа, интересно е, веднаш да се констатира дека материјалот на површината на страната на забот што одминува ползи во обратен правец (Сл.12). Ова предизвикува поголема количина на материјал да биде изместена на повлекувачката страна одколку на приближувачката страна и тоа во однос 3:1. На овој начин на приближувачката страна се јавува набран материјал околу точката на поделбениот круг, а спротивно на повлекувачката страна на забот. За да се обезбеди несметано одведување на вишокот на материјал кон главата на забот како и кон коренот на забот потребно е закосување на главата односно одземање на материјал на коренот на забот со претходното глодање со алат со соодветна геометрија.

На сл.14 прикажани се микрофотографии од обработени запченици во коректни и недоволно соодветни услови.

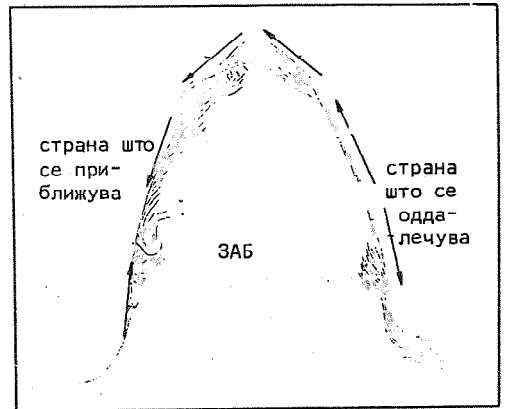
За да се избегне асиметричноста на ползењето на материјалот при обработка обично се користи машина со двоен алат или доколку се користи машина со еден алат тогаш запченикот се обработува двојно, односно од двете страни симетрично со вртење во обратен правец.

#### 5. НЕКОИ СПЕЦИФИЧНОСТИ НА ТЕХНОЛОГИЈАТА НА ИЗРАБОТКА НА ЗАПЧЕНИЦИ

Значајна улога во вкупната економичност на процесот на изработка на запченици има резниот алат. Ова се објаснува со фактот што цената на алатот е висока поради изработка како последица на геометријата и точноста што треба да се постигне. Според тоа бројни научни истражувања се посветени и објавени од областа на економичноста на процесот особено во следните области:

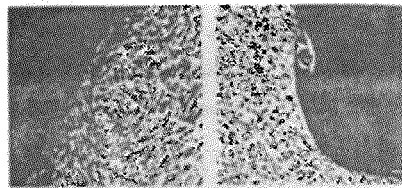


Сл. 11. Роловање на запченик

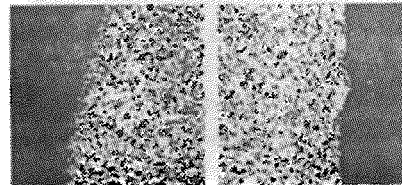


Сл. 12. Лизгање на материјалот при роловање

Неправилно



Правилно



Сл. 13. Металографски изглед на роловани површини

- трошење на резните алати
- економска оправданост на примена на CNC машини за изработка на запченици
- избор на параметри на обработка
- избор на соодветни разладни средства.

#### 5.1. Трошење на одвални глодала

Во истражувањето на различните фактори на интензитетот на трошењето во последните неколку години значајни напори се изведени во колеџот за технологија во Куруме и во Институтот за технологија во Кумамото во Јапонија /11/, /12/.

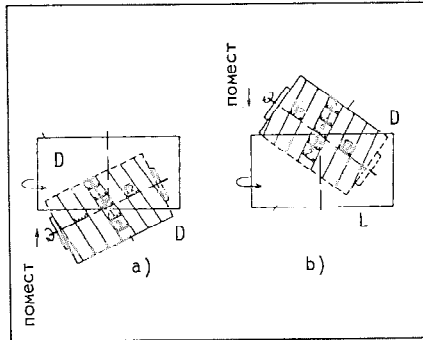
Во првиот труд презентирани се резултати што се добиени при експериментирање во четири различни шеми на обработка со одвално глодало.

- Обработка на запченици со глодало што има иста завојница со запченикот при вертикален помест нагоре.
- Обработка на запченици со глодало што има спротивна завојница од запченикот при вертикален помест надолу.
- Обработка на запченици со глодало што има спротивна завојница од запченикот при вертикален помест нагоре и
- Обработка на запченици со глодало што има иста завојница со запченикот при вертикален помест надолу.

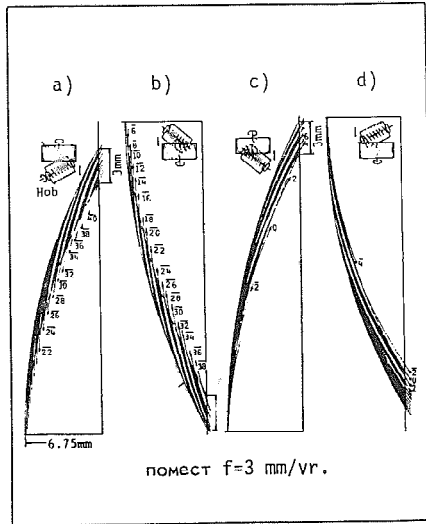
Добиени се интересни резултати бидејќи при непроменети услови на обработка се забележува различен интензитет на трошење по задната површина како и различна брзина на формирање на кратер.

Од илустрациите на сл.14-18 се гледа дека најдобра комбинација од аспект на трошење на резните алати е ако запчениците се обработуваат со глодало што имаат спротивна завојница од завојницата на запченикот и тоа при вертикален помест надолу. Во трудот детално се образложени причините на оваа појава, при што се додава дека корисниот ефект на оваа шема на обработка е значително поголем при користење на глодала превлечени со слој од TiN. Исто така се нагласува дека ефектот се зголемува со примена на повеќевојни глодала.

Во другиот труд /12/ презентирано е истражувањето на влијанието на обликот на забот (со скратена или продолжена глава) во комбинација со шемата на глодањето на интензитетот на трошењето на елатот. На сл. 19- 21 прикажани се резултатите на истражувањето што покажуваат дека најинтензивно трошење на алатите се добива при изработка на запченици со висока глава, а најмало трошење на запченици со ниска глава, што при конструкцијата на запченици што се произведуваат во големи серии би имало особено значење.



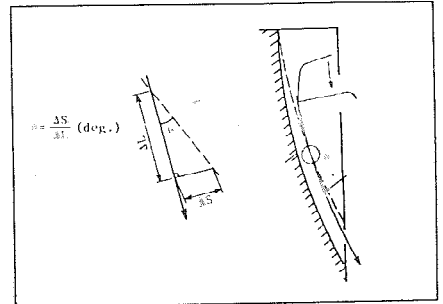
Сл.14. Методи на глодање на запченици



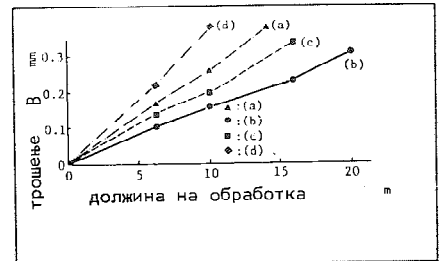
Сл.15. Траекторија на забот на глодалото

Објаснување:

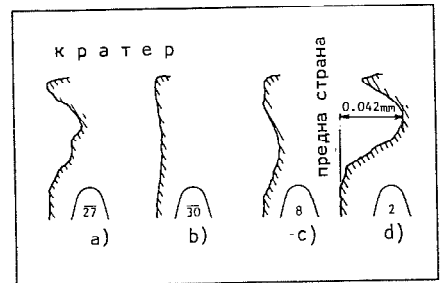
- a) Истовојни запченик и глодало пом.нагоре
- b) Различна завојница на глодало пом.надоле
- c) Различна завојница на глодало по.нагоре
- d) Истовојни запченик и глодало по.надоле



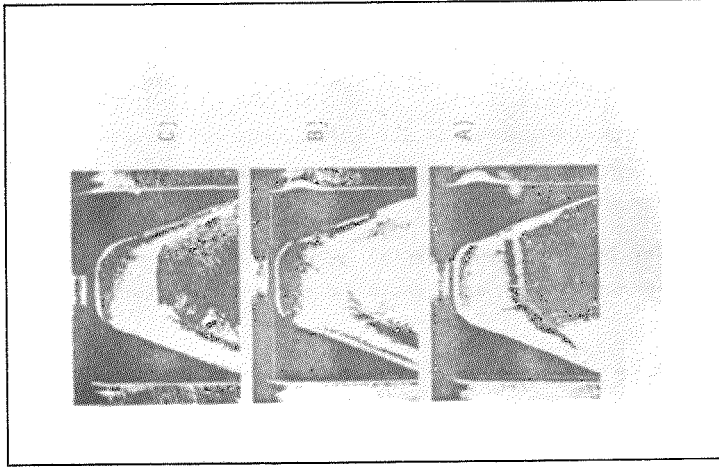
Сл.16. Влезен агол на сечивото



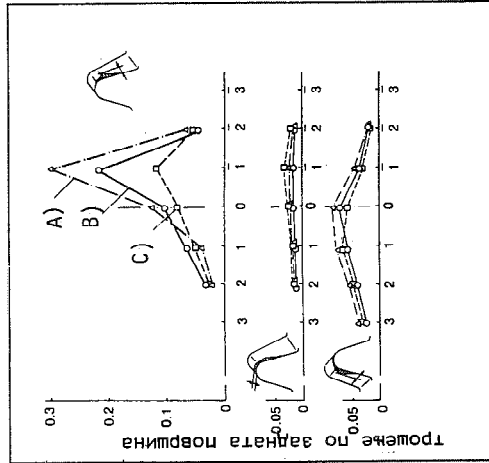
Сл.17. Трошење по задната површина



Сл.18. Интензитет на формирање на кратер

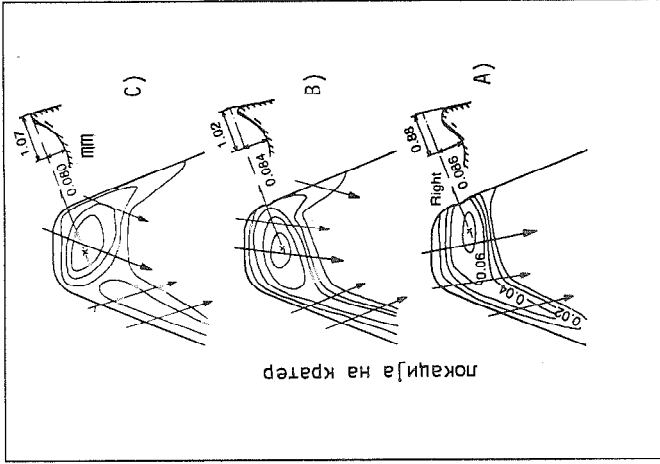


Сл.20. фотографија на кратер



Сл.19. Трошење по задната површина

- A) Обработка на запченик со висока глава
- B) Обработка на стандарден запченик
- C) Обработка на запченик со ниска глава



Сл.21. Кратерно трошење

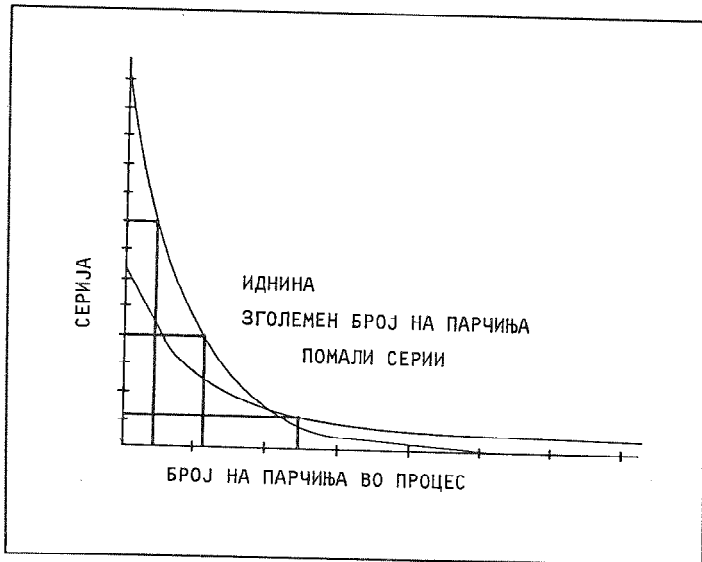
$V = 70 \text{ m/min}$ ,  
 $f = 3 \text{ mm/yr}$  - нагоре  
 алат M34 + TiN

## 5.2. Примена на CNC машини за одвално глодање

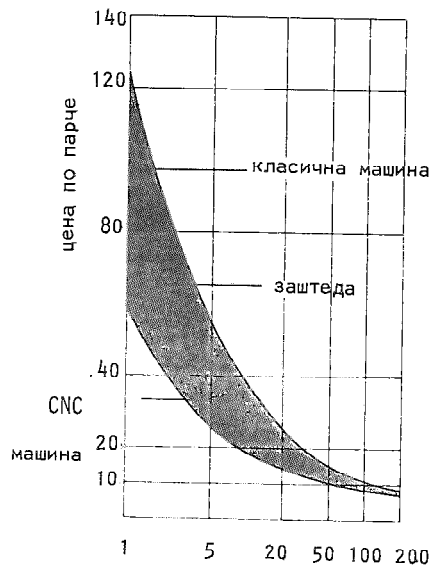
Факт е денес дека во технологијата на обработката се повеќе се воведуваат CNC машини и флексибилни обработувачки системи. Овој тренд се проширува и на машините што служат за изработка на запченици што се објаснува со тенденцијата на намалување на големината на серијата што се лансира во производството, односно со порастот на различните производи што се почесто се менуваат на една иста машина. Но при примена на CNC машина како замена на класична се прави значајна инвестиција што треба да биде економски оправдана. Со коректно балансирање на овие два фактори /13/ се доаѓа до заклучок дека на пример CNC машина за одвално глодање е поекономична од класичната во многу случаи. На сл.22 даден е графички приказ во зависност од големината на серијата за можната примена на CNC машина а на дијаграмот на сл.23 споредбена цена на чинење на запченик изработен на класична и CNC машина, со соодветна заштеда.

Основни предности на CNC технологијата при изработка на запченици и одвално глодање се следните:

- Сократување на циклусното време за (10 ÷ 20%), што се постигнува со посебна контрола на поместот при аксијално или радијално налагавање на алатот во запченикот.
- При користење на двоен циклус поместот и брзината можат да бидат зголемени при навлегување и излегување на алатот од вертикален правец.
- CNC глодалките за одвално глодање се попрактични за користење на алати со повеќе почетоци.
- Режимите на обработка може да се интензивираат бидејќи не постои еластична деформација во запчестите преносници.
- Времето на празните одови се намалува бидејќи траекториите се пократки затоа што додатни сигурносни растојанија не се потребни, па се програмираат на минимална вредност.
- Исто така брзината на празните одвои е поголема за 3 до 4 пати од класичната машина, а некои движења може да се изведуваат истовремено.
- Автоматско брзо позиционирање на претходно грубо обработени делови, во случај кога тие пред завршна обработка се термички третирани.



Сл.22. Тренд во производството на запченици



Сл.23. Економичност на примена на CNC машина за одвално глодало



- Класичната глодалка захтева 90 мин. припремно време, а триосна CNC машина 20 минути.
- Дрaстично намалување на времето се постигнува со уреди за брза замена на алатот и парчето.
- CNC технологијата ги намалува трошоците за серии помали од 200 парчиња.

### 5.3. Параметри на обработка

Според бројот на користените машини и изработени запченици што денес се цени на милиони, сосема е разбирливо што посебно внимание се посветува на економичноста на процесот на обработка од аспект на избор на машина, алат, брзина на режење и помест /14/.

При изборот на алат според наведениот извор, особено треба да се води сметка за бројот на почетоците на завојницата што зависи од чекорот, бројот на забите, квалитетот на запченикот. Воопшто со користење на алати со повеќе почетоци се зголемува продуктивноста. Ограничувачки фактор е квалитетот на обработка при фино назабување.

- При изборот на дијаметар на алатот се смета дека со алат со помал дијаметар се постигнуваат помали времиња, меѓутоа лимитирачки фактор е бројот на редови на заби и алатот на качување на завојницата.
- Изборот на параметрите на обработка како што се брзината на режењето и поместот се изведува врз база на оптимирање на процесот по критеријуми на минимална цена на чинење на производот или максимална продукција /15/ што базира на податоци за обработливоста. Наведената литература /14 и 15/ како и /16/ може добро да послужи за избор на параметрите на обработка.

Што се однесува до изборот на разладни средства што се користат при изработка на запченици едно систематско истражување е спроведено /17/ а презентирани се соодветни резултати и препораки за практична примена.

### 6. НАМЕСТО ЗАКЛУЧОК

Во ова соопштение, со оглед на ограниченоста на просторот презентирани се релативно мал број резултати што се објавени од истражувањата и индустриската примена во технологијата на изработка на запченици. Меѓутоа може да

се забележи дека се прават големи напори и трошат многу средства за истражувања во областа на теоријата на режењето и резните алати што имаат директна практична примена во погонски услови.

Основните правци во кои се вршат интензивни истражувања се:

- Примена на алати превлечени со превлака од TiN, а истражувањата се однесуваат на успешноста на примената и економската оправданост
- Примена на алати со нови карбидни материјали, способни да обработуваат после термичка обработка.
- Примена на резни алати од CBN, како алати што имаат рационална примена после термичка обработка особено кај големи запченици.
- Примена на тоцила од CBN од аспект на економичност на примената и точноста на обработка.
- Примена на методи за пластична доработка на боковите на запчениците, заради зголемување на векот на траење.
- Истражувања што се однесуваат за изборот на метод на глодање од аспект на најмало трошење на резниот алат.
- Истражувања што се однесуваат на економичноста на примената на CNC машина за обработка.
- Истражувања сврзани за економичноста на режимот на обработка.
- Користење и примена на CAD во конструкцијата на алати за назабување.

Со ова секако не е исцрпена листата на подрачјата што се истражуваат. Треба да се додаде дека одредени напори се вложуваат на пример во:

- Методологијата за мерење и контрола на запчениците.
- Истражувањето на запченици на бучава како квалитетен параметар за оценка
- Испитувања сврзани за избор на оптимални средства за ладење
- Истражувања сврзани за определување на оптимален состав на адативи во маслото за подмачкување на запчестите преносници.
- Изработка на модифицирани облици.

Сè што е наведено укажува на интензивен истражувачки процес спроведен во последната деценија, што продолжува, така да и во наредната деценија треба да се оечкуваат вредни резултати и нивна брза индустриска примена.

Р е ф е р е н ц и

1. Peter W. Kelly, Barber-Colman Co., "Advantages of titanium nitride coated gear tools". Gear technology, May/June 1984
2. Jostin-87, TRDE ZAŠTITNE PREVLAKE, Seminar, Institut Jožef Stefan, 1987
3. Hartmetall - Schälwälfäser - Klingelberg, prospekten i edukativen materijal, 1988
4. Alfred Klein, Horsburgh and Scott Cleveland Ohio; "Hard cutting - a competitive process in high quality gear production", Gear technology, May/June 1987
5. Sandvik - Coromant, Bornitrid CB50, Edukativno prospekten materijal, 1988
6. Dennis R. Gimpert, American Pfauter Limited: "CNC controlled CBN form grinding", Gear technology, May/June 1984
7. W. König, K. Yegenoglu, B. Stuckenholz, WZL Laboratories, Achen, W. Germany "Lower grinding costs and better workpiece quality by high performance grinding with CBN wheels", Gear technology, January/February 1986
8. A. Donald Moncrieff, Consultant Zigmund Grutza, Di-Coat Corporation "Hard gear finishing", Gear technology, March/April 1988
9. Dennis P. Townsend and Erwin V. Taretsky, NASA, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio, "Effect of shot peening on surface fatigue life of carburized and hardened AiSi 9310 spur gears", Gear technology, January/February 1986
10. John P. Dugas, National Broach and Machine Mt. Clemens, Mi. "Gear Rall - Finishing", Gear technology, May/June 1987
11. Dr. Masato Ainoura, Dr. Kisaburo Nagano, Kurume National Technical College, Kurume, Japan: "The effect of reverse hobbing at a high speed", Gear technology, March/April 1987
12. Kisaburo Nagano, Kurume College of Technology, Kurume, Japan, Masato Ainoura, Kumamoto, Institute of Technology, Kumamoto, Japan; "High speed hobbing of gears with shifted profiles", Gear technology, July/August 1988
13. Dr. G. Sulzer, Liebherr Machine Tools Kempton, West Germany: "Economics of CNC Gear Hobbing", Gear technology, March/April 1987
14. Yefim Kotlyar, American Pfauter, Ltd, Elk Grove Village, IL, "Selection of Hobbing Data", Gear technology, November/December 1987

15. В. Павловски, Машински факултет Скопје, "Определување на обработливоста на челици при обработка со аллати со сложена геометрија и анализа на економичноста на процесот со примена на дсм. Машински факултет, декември 1988.година.
16. Machining Data Handbook, 1972. Metcut Research Associated Inc. Cincinnati, Ohio.
17. Ike Tripp, Jr, Etna Products, Inc. Chagrin Falls, Ohio; "Cutting fluid selection and process controls for the gear manufacturing industry", Gear technology, July/August 1987

V. Pavlovski

NEW TECHNOLOGIES IN GEAR PRODUCTION  
STATE OF ART

S u m m a r y

In this paper are presented the research and the results in new technologies in gear production, world wide, as: the advantages of TiN Coated HSS tools, new carbide cutting tools able to machine very hard materials, CBN cutting tools, CBN grinding wheels, plastic deformation finishing of the gears, tool wear, use of CNC gear production machines, and selection of machining data.



A. Pavić, J. Brnardić, J. Galić \*

NEKI REZULTATI PRIMJENE REZNIH  
ALATA OD KUBIČNOG BORNITRIDA

1. UVOD

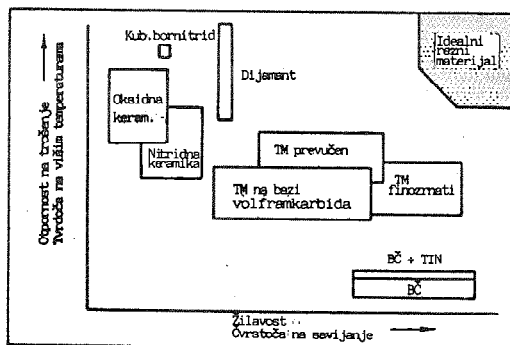
Sve veći zahtjevi u pogledu povećanja produktivnosti, ekonomičnosti i kvalitete obrade dijelova suvremenih strojeva nameću osmišljavanje novih koncepcija tehnoloških postupaka i obradnih strojeva. Intenzivan razvoj u ovom području primorava proizvođače reznog alata da pri projektiranju alata uzmu u obzir sve postavljene zahtjeve. I obrnuto, svako poboljšanje u tehnici alata, naprimjer kroz nove rezne materijale, stvara mogućnosti poboljšanja i optimiranja strukture obradnog sistema.

U prvom planu nalazi se razvoj svih reznih materijala i prilagodavanje profila njihovih svojstava zahtjevima problema obrade. Tendencije razvoja reznih materijala idu u pravcu poboljšanja njihovih proizvodnih tehnologija, tehnike legiranja i tehnike nanošenja tvrdih prevlaka. To se jednako odnosi na brzorezni čelik (BČ), tvrdi metal (TM), metalokeramiku ili kermet (MK), reznu keramiku (RK), super tvrde rezne materijale i to kubični bornitrid (KBN) i polikristalni dijamant (PKD). Neki od ovih reznih materijala (RK, KBN, TM) koriste se za tzv. "tvrdu obradu" visoko poboljšanih i kaljenih čelika, tvrdih legura, tvrdog lijeva itd. To se prije svega odnosi na miješanu, nitridnu i whisker keramiku, kubični bornitrid specifične strukture (sa karbidima i sa vrcitnom tj. heksagonalnom strukturom, te na TM sa prevlakama i finostrukturom [1]).

---

\*) mr. Ante Pavić, dipl.ing.; Josip Brnardić, dipl.ing.; Jozo Galić, dipl.ing.: Jugoturbina - Institut, Mala Švarča 155, 47000 Karlovac

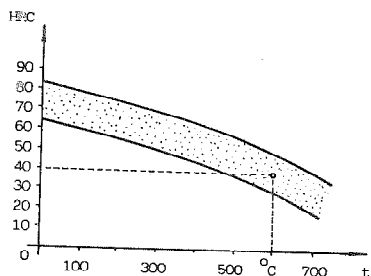
Kubični bornitrid pripada grupi supertvrdih reznih materijala. Tvrdoća mu je na drugom mjestu odmah iza dijamanta, a po žilavosti nalazi se između tvrdog metala i rezne keramike, slika 1., [2].



Sl.1. Odnos otpornosti na trošenje i žilavost kod reznih materijala

Rezni dio alata od KBN (monolitna rezna pločica ili sinterovani sloj KBN na podlozi od TM) razlikuje se od proizvođača do proizvođača i to prema tehnologiji dobivanja, strukturi i osnovnim fiziko-mehaničkim svojstvima. Može se reći da je kubični bornitrid jedna kemijska veza bora (B) i dušika (N) koja se ostvaruje u jednom fiziko-kemijskom procesu na visokim temperaturama i visokim pritiscima. Ima atomsku građu analognu dijamantu što mu daje slična fiziko-kristalografska svojstva. Doduše ne postiže tvrdoću dijamanta, ali zato poprima čvrstoću koja je veća nego kod tvrdih materijala kao silicij karbid ili korund [2]. Ima relativno dobru toplinsku provodljivost. Svi proizvođači sa alatima od KBN uglavnom preporučuju isključivo obradu tvrdih, kaljenih, visokolegiranih i žilavo-tvrdih čelika. Isključuje se obrada tvrdih metala, vještačkih materijala, stakla, keramike, austenitnih čelika i sivog lijeva (čija reaktivna  $\gamma$ , odnosno  $\delta$ -željezna faza utječe na kemijsko trošenje alata što još nije do kraja razjašnjeno), [3,4]. Pri obradi sa alatima na bazi KBN brzina rezanja leži u relativno uskom području i obrada brzinom van toga područja uzrokuje intenzivno trošenje alata. To područje je tim uže što je tvrdi materijal obratka. Alati od KBN termički su stabilni do cca 1100 do 1300 °C. [2], tako da izuzetno visoka

temperatura u zoni rezanja pri obradi dovodi strugotinu do crvenog usijanja. Dakle, stvara se proces tzv. "samoinduciranog toplog rezanja" gdje se pri tom strugotina lako odvaja i može se nakon obrade smrviti u šaci. To ujedno znači da je obrada vršena sa optimalnom brzinom rezanja. Rezne pločice od KBN su otporne na temperaturne promjene (termošok). Obrada pri tokarenju može biti sa i bez SHP, a pri glodanju bez SHP [5]. Na dijagramu, slika 2, prikazan je princip omekšavanja materijala pri obradi sa alatom od KBN [5].



Sl.2. Omekšavanje materijala pri samoinduciranom toplom rezanju

Sa slike 2 vidi se da materijal obratka koji na sobnoj temperaturi ima tvrdoću oko 70 HRC, pri obradi sa alatom od KBN na temperaturi od 600 °C omekša na 40 HRC što omogućava lako odvajanje strugotine. Pri obradi sa KBN postoje tri pravila koja moraju biti ispunjena: (1) potrebna je negativna rezna geometrija alata ( $\gamma < 0$ ), (2) stabilno učvršćenje rezne pločice i dovoljna krutost obradnog sistema i (3) obrađivati samo kaljene i tvrde materijale. Pri tom je ispitano da su svojstva obrađene površine (mikrostruktura, deformacioni sloj, površinska naprezanja, mikropukotine) nakon obrade sa alatom od KBN zadovoljavajuća, odnosno neznatno nepovoljnija nego kod obrade iste površine brušenjem [5].



## 2. PLAN I IZVOĐENJE POKUSA

Pokusi su izvedeni u proizvodnim uvjetima u operaciji tokarenja sjedišta ventila brodskog diesel motora navarenih tvrdim slojem stelita 20 na osnovni materijal ventila Č.4270. Dodatak za obradu rezanjem bio je 2,5 do 3 mm po stranici, a neravnine navara od 0,2 do 0,8 mm što je otežavalo obradu.

**Stroj:** Tokarilica Prvomajska-Raša tip D 530, noviji stroj u odličnom stanju, masivan i relativno dobre krutosti, posjeduje poprečni automatski posmak što je za ove pokuse neophodno.

**Alat:** Preliminarno kroz probne pokuse ispitano je nekoliko alata na bazi KBN poznatih proizvođača kao i alat od TM K20. Odabran je alat od KBN firme De Beers tipa amborit (Amborite) i to monolitna okrugla rezna pločica Ø9 mm RNMNO903000 sa negativnom geometrijom  $\gamma^* = -6^\circ$  i  $\alpha = 6^\circ$ , pričvršćenje mehaničko odozgo u držač CRG NR2525M09 Tizit. Pločica ima blagu fasetu  $0,5/20^\circ$  i raspolaže sa 5 mogućih reznih oštrica (mjesta) s jedne strane, odnosno ukupno 10. Kod  $1200^\circ\text{C}$  KBN amborit ima tvrdoću kao TM na  $20^\circ\text{C}$  [5].

**Obradak:** Navareni sloj stelit 20 na sjedište ventila, sastava Cr = 32%, W = 17%, C = 2,5%, ostalo Co, tvrdoća na  $20^\circ\text{C}$  je 60 HRC, a na  $649^\circ\text{C}$  ... 37 HRC. Stelit 20 se do sada obrađivao samo brušenjem. Ne postaje podaci o drugim postupcima obrade stelita 20. Struktura je više dendritskog oblika i ima visok volumni udio karbida uključenih u Co-Cr mrežicu pojačanu volframom (W).

**Pomoćni pribor:** Alatni mikroskop Carl Zeiss BK 70x50, kao i pribor za NDT probe penetrant bojama radi otkrivanja eventualnih mikropukotina na obrađenoj površini koje bi mogle nastati pri obradi.

Praćena je širina pojasa trošenja VB na stražnjoj površini reznog klina. Kriterij istrošenja  $VB_k = 0,6$  mm, odnosno pošto se radi o prethodnoj ogradi obrada je vršena do momenta nastanka vibracija i pogoršanja kvalitete obrade (hrapavosti). Iz ponovljena 2 do 3 pokusa uzimala se srednja vrijednost za VB i unosila u tabelu. Pokusi su vršeni sa tri različite brzine rezanja (u intervalu gdje bi se mogla očekivati optimalna brzina rezanja) i to u dva prolaza: jedan sa dubinom rezanja  $a_1 = 1,5$  mm i drugi sa  $a_2 = 0,5$  mm. Uz posmak  $s = 0,2$  mm/okr. to je bio dovoljno velik presjek strugotine  $A = a \cdot s$

za stvaranje tzv. samoinduciranog toplog rezanja. U tabeli 1 dat je plan i rezultati pokusa.

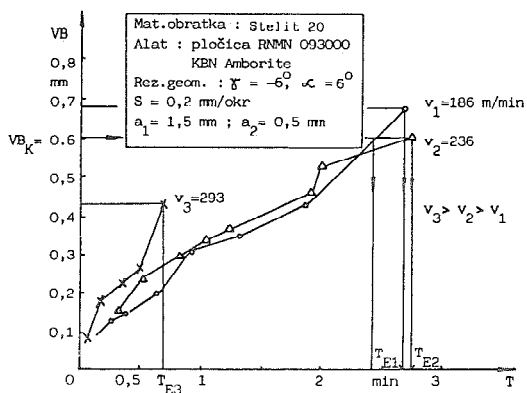
Tabela 1

Pok. No.	v m/min	s mm/okr	a mm	Rezultati praćenja trošenja rezne pločice od amborita									
				VB, mm	0,12	0,15	0,20	0,31	0,34	0,42	0,67		
1.	186	0,2	1,5 0,5	T, min	0,27	0,40	0,68	0,95	1,35	1,89	2,70		
				Z	2	3	5	7	10	14	20		
				VB, mm	0,18	0,23	0,30	0,33	0,36	0,45	0,51	0,60	
2.	236	0,2	1,5 0,5	T, min	0,32	0,53	0,85	1,06	1,27	1,91	2,12	2,76	
				Z	3	5	8	10	12	18	20	26	
				VB, mm	0,08	0,17	0,22	0,26	0,42				
3.	293	0,2	1,5 0,5	T, min	0,09	0,17	0,34	0,52	0,69				
				Z	1	2	4	6	8				
				VB, mm									

Oznake: VB - šir. pojasa trošenja, T - vrijeme obrade

Z - broj obrađenih ventila

Nakon izvršenih pokusa nacrtane su krivulje trošenja  $VB = f(T)$  iz kojih je vidljiv tok i intenzitet trošenja pri svakoj od tri brzine rezanja, slika 3.



Sl.3. Krivulje trošenja  $VB = f(T)$  pri  $v_1$ ,  $v_2$  i  $v_3$

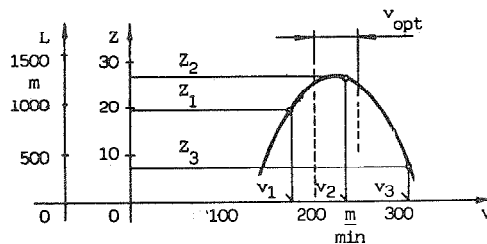
Kao što se vidi, najbolji rezultat postignut je pri brzini rezanja  $v_2 = 236$  m/min pri čemu je bilo najmanje trošenje alata VB i ostvaren najveći put  $L$  (m) alata, odnosno obrađen najveći broj  $Z$  obradaka (ventila) po jednoj oštrici, što je vidljivo u tabeli 2.

Tabela 2

Veličine	$v_1 = 186$ m/min	$v_2 = 236$ m/min	$v_3 = 293$ m/min
Krajnja postojanost $T_E$ , min	2,70	2,76	0,69
Krajnje trošenje $V_{BE}$ , mm	0,67	0,60	0,42
Predeni put alata $L$ , m	956,6	1255,3	386,2
Broj obrađenih ventila $Z$	20	26	8

S obzirom da jedna rezna pločica ima 10 reznih mjesta (oštrica) na obe strane, ukupan broj obrađenih ventila iznosi po pločici  $26 \cdot 10 = 260$ .

Na slici 4. prikazan je dijagram  $L$  odnosno  $Z = f(v)$  gdje se vidi da optimalna brzina rezanja leži u intervalu od 200 do 250 m/min što znači  $v_{opt} \cong 225$  m/min.

Sl.4. Dijagram  $Z$  odnosno  $L = f(v)$ 

Trošenje pločice na stražnjoj površini bilo je paraboloidnog oblika što je karakteristično kod okruglih pločica i nije bilo nekih posebnosti kod različitih brzina rezanja. Kod pojave većih neravnina na obratku, dolazilo je do manjih krzanja pločice i to više u predjelu prednje površine reznog klina što nije bitno utjecalo na reznu sposobnost pločice (jer se radi o prethod-

noj obradi). NDT kontrolom penetrant bojama utvrđeno je da nema mikropukotina na obrađenoj površini stelita 20.

Kod usporedbe troškova obrade u odnosu na do sada primjenjivan postupak obrade brušenjem za istu operaciju, dobili su se manji troškovi kod tokarenja sa alatom od KBN amborit za 27,8%, što za količinu od 10000 kom. ventila godišnje daje uštedu od 32 900 000 Din.

### 3. ZAKLJUČAK

Uvođenje reznih pločica od KBN amborit u operaciju tokarenja stelita 20 na sjedištima ventila broskog diesel motora opravdano je sa tehničkog i ekonomskog stanovišta. Optimalna brzina rezanja od oko 225 m/min, posmak od 0,2 mm/okr i dubina rezanja  $a=0,5$  do 1,5 mm mogu se smatrati povoljnom kombinacijom za ovaj slučaj obrade sa aspekta samoinduciranog toplog rezanja.

#### Reference

- [1] W. König: Schneidstoffe im Spannungsfeld neuer Fertigungsaufgaben und sich wandelnder Fertigungsstrukturen. Symposium Schneidstoffe, Hagen 1988, S.15-46.
- [2] V.P. Žed (i dr.): Rež. instrumenti osnašćeni STM i KM i ih primenerie, Spravočnik. Mašinstroenie, Moskva 1987.
- [3] K.Steinmentz: Polykristalline Höchstleistungsschneidstoffe. VDI-Z Nr. 2/1987, S.64-69
- [4] J.Hoffmann: Polykristalline Hochleistungsschneidstoffe lösen Zerspanprobleme, Industrie-Anzeiger Nr. 88/1987., S. 8-10.
- [5] J.Hoffmann: Uvodni referat na Stručnom seminaru za primjenu alata od PKB i PKD, Tvornica "27. Mart", N.Sad X. 1988.

A. Pavić, J. Brnardić, J. Galić

#### EINIGE ERGEBNISSE BEI ANWENDUNG VON ZERSPANUNGSWERKZEUGE AUS PKB

##### Zusammenfassung

In der Arbeit wurde die Möglichkeit der Anwendung von Zerspanungswerkzeugen aus PKB beim Drehen der auf dem Ventilsitze aufgeschweisste harte Schicht aus Stellite 20 untersucht. Aufgrund der durchgeführten Versuche wurden die optimalen Zerspanungsparametren ermittelt und für die Praxis die wichtigen Empfehlungen aufgewiesen.



B. Nedić, S. Gajić, D. Saleta /\*

МОГУЦНОСТ PRIMENE NOVIH ALATNIH KERAMICKIH MATERIJALA  
NA BAZI SILICIJUM NITRIDA U OBRADI REZANJEM

UVOD

Radi iznalaženja alatnih materijala visoke otpornosti na habanje, visoke tvrdoće i visoke temperaturne postojanosti tridesetih godina počeli su eksperimenti sa  $Al_2O_3$  (korundom), a danas je već razvijen veliki broj različitih vrsta keramičkih reznih materijala. Ispitivanje ovih keramičkih materijala ima osnovni zadatak utvrđivanja mogućnosti i oblasti primene u obradi rezanjem.

Sprovedena ispitivanja keramičkih pločica na bazi silicijum nitrida (Silinit - R (S3)) imala su za cilj utvrđivanje mogućnosti primene ovih pločica za obradi sivog liva SL-26 i konstruktivnog čelika Č.5422. Ispitivanja sa obavljena u okviru saradnje Mašinskog fakulteta iz Kragujevca i Elektrobosne iz Jajca u okviru projekata: Ispitivanje keramičkih pločica na bazi silicijum nitrida pri obradi rezanjem SL-26 i Č.5422. Ispitivanje je izvršeno u dve faze. Prva faza je ispitivanje u laboratorijskim usloviima gde je vršeno praćenje habanja pločice uz istovremeno praćenje otpora rezanja i kvaliteta obradjene površine.

Druga faza ispitivanja je vršena u eksploatacijskim usloviima. Ovo ispitivanje je izvršeno u Zavodima "Crvena zastava" RO FAZ - OOUR Mehanička obrada. Cilj ovog ispitivanja je bio utvrđivanje mogućnosti zamene već korišćenih pločica od tvrdog metala i keramičkih pločica sa novim keramičkim pločicama uz zadržavanje postojeće tehnologije (uz zadržavanje brzine rezanja, pomaka i td.).

ALATNI KERAMICKI MATERIJALI ZA OBRADU REZANJEM SA  
OSVRTOM NA SILICIJUM NITRIDNU REZNU KERAMIKU

Keramički materijali obuhvataju hemijske veze kiseonika ( $O_2$ ), ugljenika (C), azota ( $N_2$ ), bora (B) i silicijuma (Si) sa metalima, ali i veze ovih supstanci međusobno, dakle okside,

\*/ Nedić Bogdan, dipl. inž. asistent Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, ul. S. Janjić 6.

Slobodan Gajić, dipl. inž. naučni saradnik Metalservis, RZ za koordinaciju, Beograd, Karadjordjeva 65

Saleta Drago, dipl. inž. Elektrobosna - Elektrohemijska i elektrotermijska industrija Jajce.

karbide, nitride, boride i silicide. Reč je dakle o širokoj lepezi materijala koji su i dalje u fazi istraživanja i iznalaženjima mogućnosti primene.

Od keramičkih materijala primenu za rezne alate našli su pre svega:

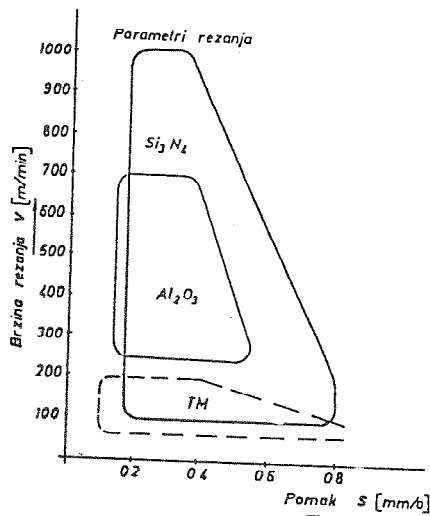
- oksidna (bela) keramika na bazi  $Al_2O_3$ ,
- silicijum nitridna (siva) keramika na bazi  $Si_3N_4$  i
- bornitridna keramika.

Poslednjih godina poseban značaj se daje razvoju alatne keramike a naročito napredak je postignut u oblasti primene keramičkih materijala visoke tvrdoće na bazi silicijuma ( $Si_3N_4$  i  $SiC$ ).

U odnosu na ostale keramičke materijale silicijum nitrid karakterise:

- tvrdoća > 95 HRC,
- otpornost na habanje (mehaničko, adheziono i difuziono),
- otpornost na udar, odnosno promenljiva mehanička i termička opterećenja
- povoljna žilavost i stabilnost sečiva,
- temperaturna postojanost (>1000°C),
- hemijska stabilnost u odnosu na legirane čelike, aluminijumske i legure bakra,
- relativno velika čvrstoća (na pritisak 2500 MPa, na savijanje 500-700 MPa),
- masa 3,8 - 4,0 gr/cm<sup>3</sup> i
- modul elastičnosti 350 GPa.

Može se reći da su u alatnoj keramici na bazi silicijum nitrida ( $Si_3N_4$ ) spojeni dobra žilavost pojedinih metala i visoka otpornost na habanje oksidne keramike. Na slici 1 je prikazana oblast primene ovih keramičkih materijala.



Slika 1.

Oblast primene alatnih materijala na bazi silicijum nitrida

## PROGRAM I USLOVI ISPITIVANJA

Ekperimentalna ispitivanja su imala za cilj utvrđivanje intenziteta i oblika habanja reznih pločica i utvrđivanje uticaja habanja pločice na kvalitet obradjene površine. Takođe eksperimentom su mereni otpori rezanja radi utvrđivanja da li postoji korelacija između otpora i habanja rezne pločice.

Predmet obrade za materijal sivi liv SL-26 je bila šipka prečnika 90 mm, a za čelik Č.5422 šipka prečnika 56 mm, koje su dalje obradjivane struganjem.

Režimi obrade za sivi liv SL-26 su bili:

- korak  $s = 0,25$  mm/o,
- dubina rezanja  $\delta = 1,5$  mm i  $\delta = 1$  mm
- brzina rezanja: a)  $v = 200$  m/min ( $n = 710$  o/min)  
b)  $v = 250$  m/min ( $n = 900$  o/min)  
c)  $v = 320$  m/min ( $n = 1120$  o/min).

Režimi obrade za čelik Č.5422 su bili:

- korak  $s = 0,25$  mm/o,
- dubina rezanja  $\delta = 1,5$  mm,  $\delta = 1$  mm i  $\delta = 0,3$  mm
- brzina rezanja: a)  $v = 145$  m/min ( $n = 710$  o/min)  
b)  $v = 200$  m/min ( $n = 900$  o/min)  
c)  $v = 250$  m/min ( $n = 1120$  o/min).

Stupnjevitom promenom broja obrtaja zadržavana je približno konstantna brzina rezanja. Obrada rezanjem je vršena na strugu bez korišćenja sredstva za hlađenje i podmazivanje uz povećanu brzinu rezanja da bi se intenzivirao proces habanja.

Rezni alat je strugarski nož sa mehanički pričvršćenom pločicom (oznaka nosača PSDNR 2525 M16). Rezna pločica je kvadratnog oblika (oznaka pločice SNMN 160412) od keramike - silicijum nitrida (Silinit - R (S3)).

Merenje otpora rezanja je vršeno pomoću trakomponentnog pizeo dinamometra KISTLER sa pojačivačem i ploterom x-y-t HEWLET PACKARD. Kvalitet obradjene površine je praćen pomoću savremenog uređaja za merenje velikog broja parametara kvaliteta površine TALISYRF 6.

Ispitivanja pločica u proizvodnim uslovima su vršena u Zavodima "Crvena zastava" RO FAZ OOUR "Mehanička obrada" i to pri obradi kočionih diskova i doboša od sivog liva SL-26 i jednog od zupčanika za menjač zastavnih automobila od Č.5422.

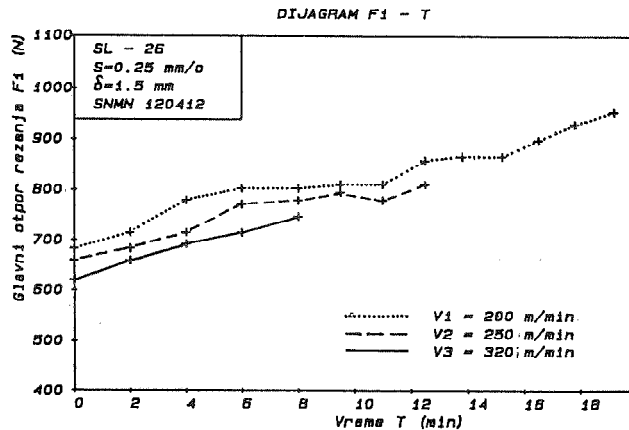
## REZULTATI ISPITIVANJA

### Otpori rezanja

Pre početka obrade u laboratorijskim uslovima izvršeno je uklanjanje kore sa materijala.

Analizom otpora rezanja pri obradi SL-26 može se zaključiti da dolazi do postepenog rasta otpora rezanja sa vremenom. To se objašnjava povećanjem širine pohabanog pojasa po ledjnoj površini i većeg kontakta rezne pločice sa obradjivanim materijalom. Na slici 2 su prikazane izmerene vrednosti otpora rezanja  $F_1$ .





Slika 2. Glavni otpor rezanja pri obradi SL-26

Pri obradi čelika Č.5422 već na samom početku obrade sa najmanjom brzinom rezanja i dubinom rezanja ( $\delta = 1$  mm) nije se mogao uspostaviti stabilan signal otpora rezanja usled pojave velikih vibracija i zbog toga dalje nije vršeno merenje otpora rezanja jer dobijeni zapis ne može da se analizira. Ovo ukazuje da korišćena pločica od keramike (Silinit - R) pri obradi sa većim dubinama rezanja nema odgovarajuću geometriju, ne vrši se pravilno odvodjenje strugotine i da se ne može preporučiti za obradu čelika Č.5422. Ove vibracije se nisu pojavile pri obradi ovog čelika sa manjim dubinama ( $\delta = 0,3$  mm).

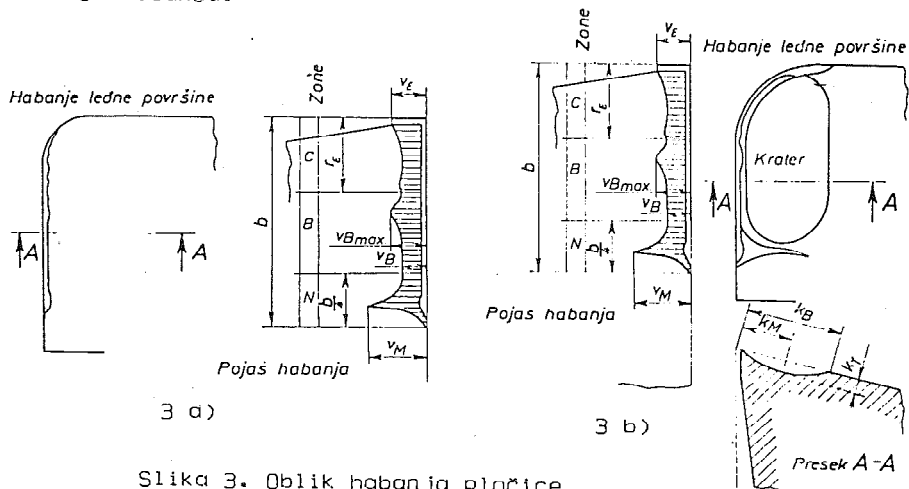
#### Temperatura rezanja

Praćenjem temperature pločice od SILINITA - R u slučaju kada je bila ne zatupljena a tokodje, i posle velike pohabanosti, neposredno po zaustavljanju procesa rezanja, pri obradi sivog liva SL-26 uočava se da ne dolazi do njenog velikog zagrevanja. Veoma brzo po prekidu rezanja pločica je imala temperaturu okoline. Pri obradi Č.5422 je došlo do velikog zagrevanja pločice. Takodje i u ovom slučaju se zapaža da se ovako zagrejana pločica relativno brzo hladi (za razliku od pločice od tvrdog metala koja se veoma sporo hladi). Zagrevanje predmeta obrade od SL-26 nije uočeno dok je predmet obrade od Č.5422 bio veoma zagrejan i to sa povećanjem habanja rastao je intenzitet zagrevanja. Ovo ukazuje da je odvodjenje strugotine pri obradi SL-26 veoma dobro i da ona najveći deo oslobodjenje toplote odnosi sa sobom, što se ne može reći za obradu Č.5422.

#### Habanje reznih elemenata

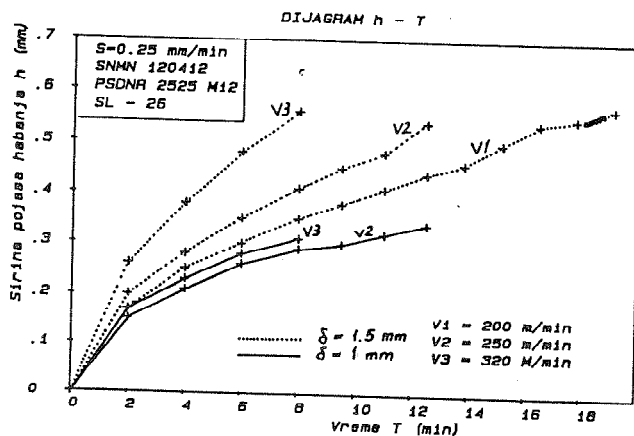
Nakon jednog prolaza, ili više prolaza noža, vršeno je merenje širine pohabanog pojasa po jednoj površini pločice a takodje i širina kratera na grudnoj površini.

Habanje pločice pri obradi SL-26 je bilo prvenstveno po lednoj površini, dok je po grudnoj površini bilo veoma malo i može se zanemariti, nije se primetilo habanje u obliku kratera. Oblik habanja je dat na slici 3a. Na slici 4 su dati rezultati merenja habanja.



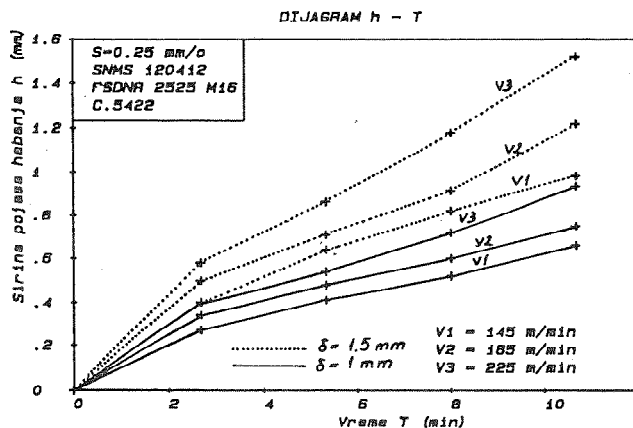
Slika 3. Oblik habanja pločice

Habanje pločice pri obradi Č.5422 je bilo podjednako intenzivno i po lednoj i po grudnoj površini. Na slici 3b je prikazan oblik habanja pločice. Vrednosti merenja habanja su dati na slici 5.

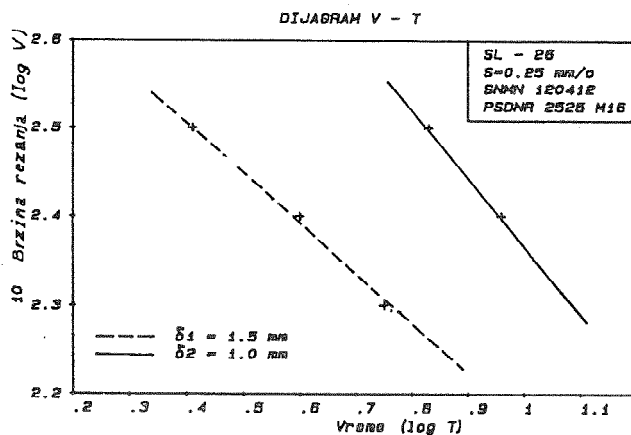


Slika 4. Habanje pločice pri obradi SL-26

Na osnovu ovako dobijenih krivih habanja može se doći do zavisnosti  $T - V$ , slika 6.



Slika 5. Habanje pločice pri obradi Č.5422

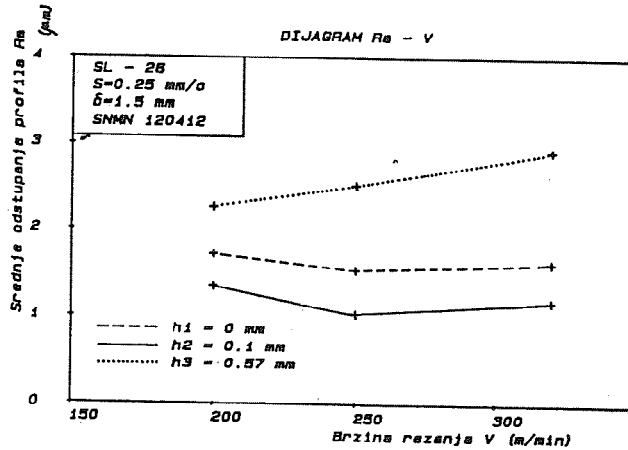


Slika 6. Zavisnost  $T - V$

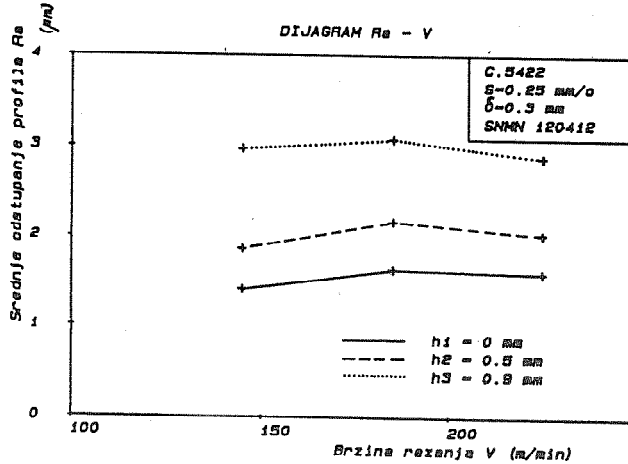
#### Kvalitet obradjene površine

U toku ispitivanja keramičke pločice (SILINIT - R) vršeno je merenje kvaliteta obradjene površine, praćenjem veoma velikog broja parametara hrapavosti. Merenje parametara hrapavosti obradjene površine je vršeno za obradu SL-26 pri širini pohabnog pojasa po lednoj površini:  $h=0 \text{ mm}$ ,  $h=0.1 \text{ mm}$  i  $h=0.57 \text{ mm}$ , a za obradu Č.5422 pri:  $h=0 \text{ mm}$ ,  $h=0.5 \text{ mm}$  i  $h=0.9 \text{ mm}$ .

Na slikama 7 i 8 su dati rezultati merenja Ra (srednje odstupanje profila) u funkciji pohabanosti, brzine rezanja i dubine rezanja. Sa ovih slika se može sagledati kako pojedini elementi obrade utiču na hrapavost obradjene površine. Može se primetiti da se sa povećanjem brzine rezanja a takodje i sa smanjenjem dubine rezanja smanjuje hrapavost obradjene površine. Sa povećanjem habanja pločice u prvom trenutku dolazi do smanjenja hrapavosti da bi kasnije sa povećanjem habanja rasta hrapavost obradjene površine.



Slika 7.



Slika 8.

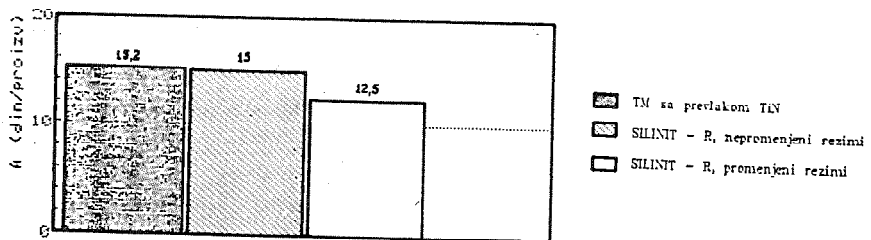
#### Rezultati ispitivanja u proizvodnim uslovima

Ispitivanje reznih pločica u proizvodnim uslovima je vršeno u Zavodima "Crvena zastava" OOUR Mehanička obrada, RO FAZ. Na transfer linijama je vršena obrada kočionih daboša i diskova od sivog liva a na viševretenom automatu obrada jednog od zupčnika Zastavinih vozila..

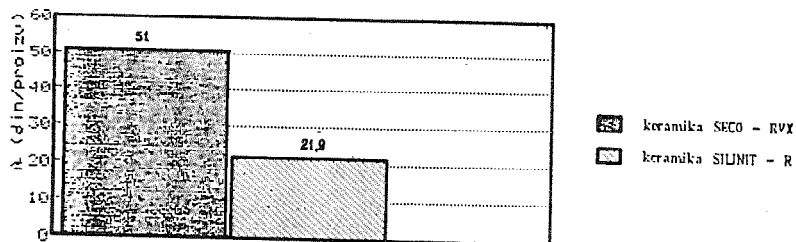
Pri obradi kočionih diskova vek ispitivanih pločica je bio 2 do 3 puta veći od do tada korišćenih pločica od tvrdog metala sa prevlakom od TiN. Takođe vek pločica pri obradi kočionih doboša je bio daleko veći (3 do 4 puta) u odnosu na keramičke pločice koje su do tada korišćene. Kvalitet obradjene površine je bio u granicama zahteva čak i posle pohabanosti pločice iznad 0,5 mm po ledjnoj površini. Pri obradi Č.5422 vek ispitivanih pločica je bio približno 2 puta veći (tačnije 1,7 puta) u odnosu na do tada korišćene pločice od tvrdog metala. U ovom slučaju pločice su korišćene za završnu obradu struganjem.

U svim ovim slučajevima nisu vršene nikakve posebne pripreme za rad sa ispitivanim keramičkim pločicama već je se vršila samo zamena korišćenih pločica sa ispitivanim. Svi ostali parametri režima obrade su ostajali nepromenjeni. Ovi rezultati ukazuju da se pločice od keramike na bazi silicijum nitrida  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , SILINIT - R mogu uspešno primeniti u proizvodnim uslovima.

Analiza troškova obrade vezanih za troškove alata koja je vršena za slučajeve obrade kočionih doboša i diskova je data na slikama 9 i 10. Sa ovih slika se vidi opravdanost primene ovih pločica u proizvodnim uslovima za navedene slučajeve. Na slici 11 je prikazana zavisnost troškova obrade u odnosu na postojanost alata  $V=V(T)$ , i odnosi se na proizvodne uslove koje su defi-

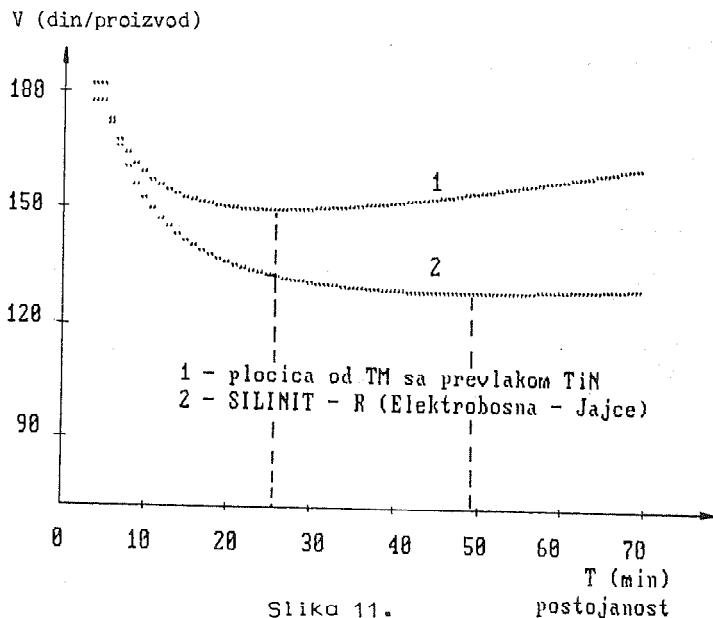


Slika 9.



Slika 10.

nisoni pri obradi kočionih diskova. Minimalna vrednost obrade posmatrana kroz troškove alata ostvaruje se obezbedjenjem ekonomske postojanosti alata. Sa slike se vidi da su troškovi pri korišćenju pločica od ispitivane keramike mnogo manji u odnosu na troškove koji nastaju pri korišćenju pločica od tvrdog metala prevučenih sa TiN u nepromenjenim radnim uslovima. Cene u analiziranim primerima su iz maja 1988. godine.



### ZAKLJUČAK

Na osnovu izvedenih ispitivanja može se konstatovati da rezne pločice na bazi silicijum nitrida (Silinit - R (S3)) u potpunosti odgovaraju zahtevima koji se postavljaju pred rezne pločice u obradi struganjem pri obradi sivog liva SL-26, dok se za obradu konstruktivnog čelika ne mogu iste preporučiti izuzev za oblast malih dubina rezanja.

Pri obradi nije dolazilo do krzanja pločica što govori o dobroj postojanosti i žilavosti.

Analizirajući otpore rezanja pri obradi SL-26 može se zaključiti da postoji uska korelativna veza između pohabanosti pločice i otpora rezanja što pruža mogućnost za adaptivno upravljanje procesom obrade struganjem.

Lomljena strugotina koja nastaje u procesu rezanja pri obradi oba materijala daje pogodnost za primenu ovih pločica pri obradi na automatima.

Sprovedena ispitivanja u proizvodnim uslovima su potvrdila rezultate dobijene u laboratorijskim uslovima. Kako je postojanost ispitivanih pločica u proizvodnim uslovima nekoliko puta veća od do tada korišćenih pločica od tvrdog metala pruža se mogućnost zamene pločica od tvrdog metala sa keramičkim pločicama uz zadržavanje postojeće tehnologije. Ovo posebno i iz razloga što se navedene pločice proizvode u dimenzijama kao i pločice od tvrdog metala. Koristi se isti nosač.

Opravdanost primene ovih pločica u postojećoj tehnologiji se sagledata i kroz analizu troškova alata koja je u radu izvršena.

#### LITERATURA

1. D. Vukelja, B. Nedić, M. Dimitrić, S. Gajić, PROJEKTI 3 I 4, Ispitivanje keramičkih pločica na bazi silicijum nitrida pri obradi sivog liva SL-26 i Č.5422, za Elektrobosnu Jajce, Mašinski fakulteta, Kragujevac, 1988.
2. D. Vukelja, Konstrukcija alata za obradu rezanjem, Gradjevinska knjiga, Beograd, 1982.
3. B. Ivković, Obrada metala rezanjem, Izbor ekonomičnih režima obrade, Gradjevinska knjiga, Beograd, 1986.
4. B. Nedić, R. Šukilović, S. Kenić, D. Čekerevac, Definisanje kvaliteta reznog alata, Alatničar 11/86, Čačak, 1986.

B. Nedić, S. Gajić, D. Saleta

#### APPLICATION POSSIBILITIES FOR NEW CERAMIC TOOL MATERIALS ON THE BASIS OF SILICON NITRIDE IN TURNING OPERATIONS

##### Summary

Presented in the paper are the results of tests carried out with silicon nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) ceramic tool inserts in turning operations in the laboratory and in the production conditions. The inserts were used to machine cast iron and construction steels. The results obtained indicate that possibilities exist for the application of the new SILINI $\bar{T}$  - R ceramic inserts in the conditions appropriate for tungsten carbide, and also in the conditions of machining costs arising in the use of these inserts with the costs of use of the existing inserts.

D. Babić \*

РЕЗУЛТАТИ ИСТРАŽИВАЊА И ИСКУСТВА  
У ОБРАДИ ОДЛИВАКА ОД СИВОГ ЛИВА  
АЛАТОМ СА ТВРДОМ ПРЕВЛАКОМ ТИН

1. UVOD

Radna organizacija "Hermetički kompresori" u Mostaru proizvodi hermetičke kompresore tipa "klip-cilindar" za rashladne uređaje za domaćinstvo.

U proizvodnji hermetičkih kompresora (čiji je karakter serijski-većeg obima) godišnje se obradi približno 6000000 komada odlivaka sivog liva (SI25), svrstanih u 7 kategorija geometrija, sa različitim postupcima (struganje, bušenje, glodanje, razvrtnje, brušenje, honovanje, lepovanje, rolovanje). Najzastupljeniji postupci su bušenje i razvrtnje.

Karakteristično kod najzastupljenijih operacija (bušenje i razvrtnje) je to da se odlivak "napada" i bez prethodno skinutog površinskog sloja, kao i sa prethodno skinutim površinskim slojem, te i to da svi rezni alati imaju svoje vodeće čaure (uslovljeno zahtjevima pred tačnošću mjere otvora).

Potrebno je napomenuti da je karakter proizvoda, sa aspekta tehnoloških zahtjeva, veoma složen (npr. zazor između klipa i cilindra treba biti 3,5 m; hrapavost konačno obrađene površine cilindra i klipa treba biti 0,3 m), te tako proizilazi i potreba za strogim zahtjevima pred tehnologijom proizvodnje (pa tako i pred operacijama bušenja i razvrtnja).

U kontekstu cjelokupne problematike obrade odlivaka od sivog liva ne smije se zanemariti niti uticaj varijacija u osobinama odlivaka (hemijski sastav, mehaničke i strukturne osobine) uzrokovano nestalnošću tehnologije livenja sivog liva (topljenje, modifikovanje, kvalitet sirovina i dr.), a koje najdirektnije utiču na krajnje rezultate kod obrade odlivaka.

\*/ Mr Dušan Babić, dipl. ing., RO "Hermetički kompresori" u Mostaru, Sutina b.b.



Uz konstataciju da je za obradu ovako velikog broja odlivaka, koji se obrade u radnoj organizaciji, potreban i velik broj reznog alata koji će davati zahtjevani kvalitet obrade, proističe i zahtjev da se analizira mogućnost primjene reznih alata sa prevlakama kojima se eventualno unapređuje proizvodnja sa aspekta :

- kvaliteta rezultata rada
- smanjenja troškova obrade kroz usporenije habanje alata
- smanjenja troškova usled zastoja uzrokovanih manjim brojem izmjena alata
- smanjenja škarta

Analiza ove mogućnosti je rađena na bazi istraživanja uticaja prevlaka titan-nitrida (TiN) na nekim od burgija koje se koriste u tehnologiji proizvodnje u radnoj organizaciji (metodom upoređivanja rezultata).

## 2. PROGRAM ISTRAŽIVANJA

Ocjenom o najzastupljenijoj operaciji i najzastupljenijem alatu izvršen je izbor alata sa kojim se prišlo istraživanju i to :

- a) istraživanju tehničkog nivoa alata (uporedo "standardnog" sa alatom koji je presvučen TiN) u laboratorijskim uslovima
- b) istraživanju tehničkog nivoa alata (uporedo "standardnog" sa alatom koji je presvučen TiN) u proizvodnim uslovima

### a) Laboratorijska ispitivanja

- Ova ispitivanja su rađena na epruvetama od sivog li-va (SL 25) dimenzija  $\varnothing$  120 x 20 mm, pripremljenih tako da se ispitivanja mogu pratiti kao i kod radnih uslova (sa prethodno obrađenom površinom-akinutom "korom" i bez ove operacije).

Dimenzije epruvete su definisane shodno zahtjevima na radnom komadu u radnim uslovima i tako i livene kod dobavljača radnih komada.

- Bušenje je vršeno na bušilici Tip SB-30, DALMASTROJ, SPLIT, brzina rezanja 14 m/min, posmak 0,2 mm/o - automatski, hlađenje je zrakom.

Režimi rada su približni radnim-eksploatacionim na visokoproduktivnim-namjenskim mašinama koje i obrađuju radne komade.

- Bušenje je vršeno burgijom 13211-0087, dimenzije 3/16" od HSS.F i burgijom 13211-0087 presvučenom slojem TiN.

Burgije presvučene slojem TiN dobijene su tako da je standardne burgije proizvodnog programa Industrije alata Trebinje (za potrebe radne organizacije) presvukao institut "Jožef Stefan"-Ljubljana.

- Vršeno je uporedno praćenje habanja vrhova burgija (vizualno).

- Vršeno je uporedno mjerenje tačnosti bušenja (uređaj "Mahr"-Digimar).

- Vršeno je uporedno mjerenje temperatura burgija neposredno poslije bušenja, te mjerenje temperatura epruveta neposredno po bušenju.

Ovo mjerenje je vršeno digitalnim termometrom DTI-"Dalmacija", i to po zaustavljanju vretena bušilice u "donjoj mrtvoj tački", kao i na epruveti neposredno uz izbušeni otvor. Vođeno je računa da se burgija prije slijedećeg bušenja ohlade na temperaturu okoline.

#### b) Ispitivanja u proizvodnim uslovima

- Ova ispitivanja su vršena u eksploatacionim uslovima (na radnom komadu kod serijske proizvodnje) uporednim praćenjem ponašanja "standardne" i burgije presvučene TiN (na namjenskoj mašini, na istoj stanici je omogućeno istovremeno praćenje obje vrste burgije u eksploataciji). Ovo praćenje je bilo prvenstveno usmjereno na praćenje vijeka trajanja burgija sa slojem TiN u odnosu na "standardnu".

- Paralelno su vršena praćenja kvaliteta obrađene površine prvenstveno preko dobijene hrapavosti na obrađenoj površini (Perthometer C5D-"Mahr").

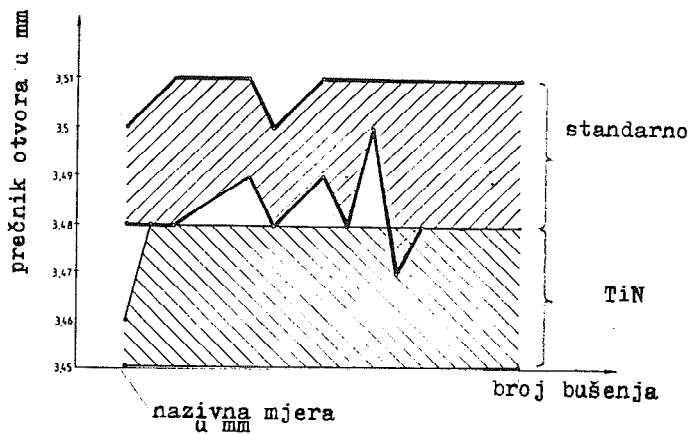
### 3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

a) Napomenuto je da su laboratorijska istraživanja obuhvatala simuliranje radnih uslova. Iz ovog razloga je vršeno uporedno praćenje ponašanja presvučene burgije TiN i nepresvučene kod bušenja epruveta sa prethodno skinutom korom i praćenje ponašanja istih kod bušenja epruveta bez prethodno skinute kora.

Slikom br.1 prezentirani su uporedni rezultati ponašanja "standardne" i burgije presvučene slojem TiN, kod bušenja epruvete kod koje nije skinuta kora prije bušenja, preko odstupanja mjere izbušenog otvora (variranja prečnika otvora u odnosu na nazivni za obje vrste burgije).

Ovim ispitivanjem željeo se steći uvid u ponašanje bur-

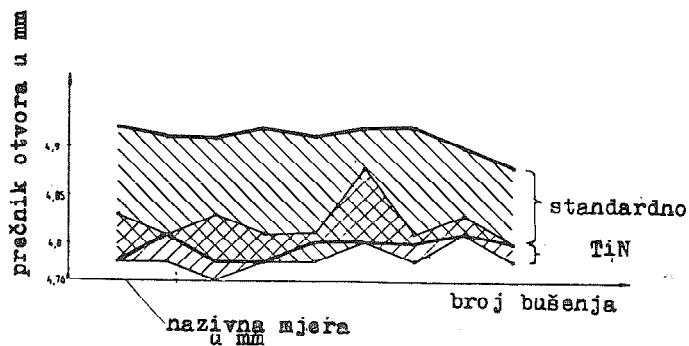
gije presvučene slojem TiN u odnosu na "standardnu" kod bušenja odlivaka od SI-25 bez prethodno skinute kore, sa aspekta dobijanja zahtjevane mjere ;



sl. 1

Uočljivo je da se burgijom presvučenom slojem TiN, u ovim uslovima, dobijaju kvalitetniji rezultati sa ovog aspekta.

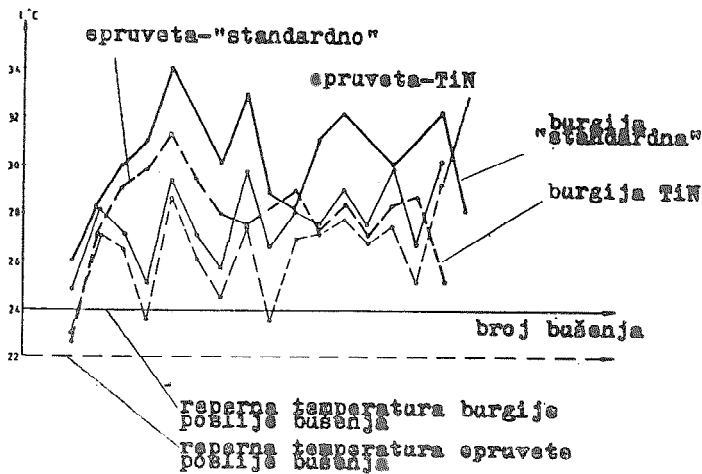
Iz istih razloga, a za slučaj da epruveta simulira situaciju kada bušenje na radnom komadu prethodi operacija skidanja kore, vršeno je bušenje čiji rezultati su demonstrirani na sl.2 ;



sl. 2

U ovom slučaju se razlika u kvaliteti dobijene mjere smanjuje, ali i dalje ostaje uočljiva. Bušenjem burgijom sa slojem TiN dobijaju se manja odstupanja od nazivne mjere i manja rasipanja odstupanja.

Kada se analizira ponašanje temperatura burgija kod bušenja, kao i temperature epruveta u zoni neposredno uz bušeni otvor, dobija se :



sl. 3

I u ovom slučaju je vidljivo da otpori bušenju, a uzrokovano i sporijim habanjem burgije presvučene slojem TiN, doprinose da se veće temperature kod bušenja mogu očekivati kod bušenja sa "standardnim" burgijama (proističe i ocjena o bržem habanju).

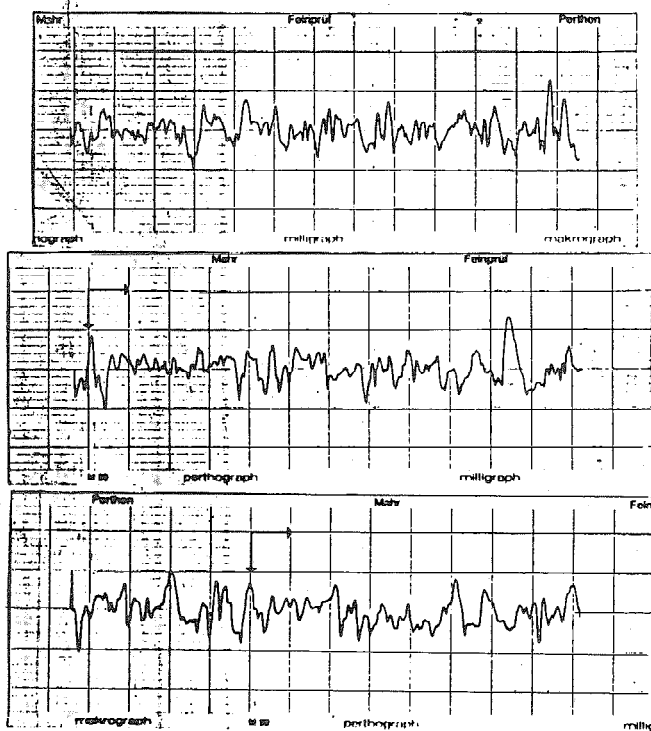
Vezano za habanje burgija vršena je i vizualna, uporedna kontrola obje vrste burgija i konstatovano da je ono intenzivnije kod "standardne" burgije, a posebno na poprečnom sječivu (nakon izbušenih 700 otvora "standardnom" burgijom i iste toliko burgijom presvučenom slojem TiN).

(Potrebno je ovdje napomenuti da je utjecaj nehomogene struktura SL-25 uzrokovao da je u prvom bušenju presvučenom burgijom kod 371. otvora došlo do značajnijeg krzanja završetka saleđa na glavnom sječivu, što se vezuje za pojavu uključaka livačkog pijeska u kori epruveta, pa je ispitivanje ponovljeno.)

b) Sva zapažanja vezana za habanje burgija koje su presvučene slojem TiN u odnosu na habanje kod "standardnih", a koja se odnose na ispitivanja u laboratorijskim uvjetima, odnose se i na rezultate koji su se očitovali u radnim uslovima.

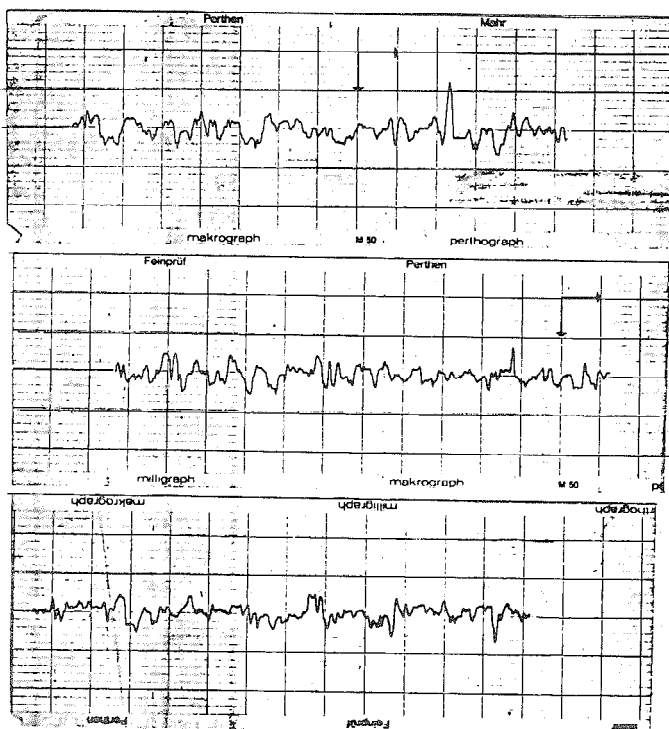
Ovdje je potrebno pomenuti i činjenicu da su hrapavosti dobijene bušenjem burgijom sa slojem TiN manje.

Slikama br. 4 i 5 prezentirani su rezultati mjerenja hrapavosti na otvorima dobijenim bušenjem "standardnom" burgijom i burgijom presvučenom slojem TiN :



sl. 4

Hrapavosti dobijene bušenjem  
"standardnom" burgijom



sl. 5  
 Hrapavosti dobijene bušenjem  
 burgijem presvučenom TiN

#### 4. ZAKLJUČAK

U cilju racionalizacije postupaka obrade sivog liva, te dobijanja kvalitetnijih rezultata rada u tehnologiji proizvodnje, neminovno je analizirati mogućnost uvođenja u primjenu alata višeg tehničkog nivoa.

I pored konstatacije da obradivost odlivaka od sivog liva zavisi od više faktora (relativna zapremina perlita u metalnoj osnovi, sadržaj grafita i njegov raspored u metalnoj osnovi, veličina i oblik lamela grafita, kompaktnost i homogenost mikrostrukturnog sastava po svim presjecima odlivka, sadržaj vezanog ugljika), ipak je moguće, na bazi postupnog uvođenja u primjenu alata sa presvlakama TiN kod obrade odlivaka, donijeti sud o efek-

tima rada sa ovim alatima.

Iz prethodno prezentiranih rezultata istraživanja proističe i ocjena o višem tehničkom nivou alata sa presvlakama od TiN u odnosu na "standardne" kod obrade sivog liva SL-25.

#### Reference.

1. Grupa autora : Ispitivanje obradivosti odlivaka od sivog liva, Tribologija u industriji 1/1988, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1988.
2. M. Kokić : Trošenje alata pri obradi odlivaka u serijskoj proizvodnji većeg obima, Tribologija u industriji 2/1982, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1982.
3. Grupa autora : Primerjalna analiza brušenih spiralnih svedrov oplemenitenih s TiN, Trde zaštitne prevleke, Institut "Jožef Stefan", Ljubljana, 1987.
4. Alatničar 1/86, Spiralne burgije, Društvo alatničara opštine Čačak, Čačak, 1986.
5. Alatničar 1/88, Režimi obrade, Društvo alatničara opštine Čačak, Čačak, 1988.

D. Babić

#### TESTING RESULTS AND EXPERIENCE IN CASTING'S PROCESSING WITH TOOLS SL25 COATED WITH HARD COATING TiN

#### S u m m a r y

JUSTIFICATION OF CUTTING TOOL'S USAGE WITH COATING IS CAUSED BY SEVERAL DIFFERENT FACTORS, SO BESIDES OTHER FACTS, FOR ITS USAGE SHOULD HAVE THE OBJECTIVE ESTIMATE ABOUT TOOL'S TECHNICAL UTILIZATION AND RANGE.

IN THESE PAPERS PRESENTED ARE RESULTS OF TESTINGS ABOUT TOOL'S USEFUL APPLICATION, WITH COATINGS TiN, DURING THE MANUFACTURING OF PARTS FOR SPECIFIC PRODUCTION.

TESTING RESULTS OF TOOL'S OPERATION CHARACTERISTICS CAN SHOW THAT SUCH TOOL'S HAS HIGHER TECHNICAL LEVEL. ESTIMATION OF TECHNICAL LEVEL IS MADE BY THE METHOD OF SELECTION FROM LOT, WHICH IS VERY SIMPLE, ENOUGH RELIABLE AND OBJECTIVE.

## 22 JUGOSLOVENSKO SOVETUVAŃE ZA PROIZVODNO MAŠINSTVO

ОХРИД 24 - 26 мај 1989 г.

B. Tadić, Z. Yi-gang

МАТЕМАТИЧКО СТАТИСТИЧКИ ПРИСТУП У ПОРЕДЈЕНЈУ ЕНЕРГЕТСКИХ  
БИЛАНСА РЕЗНИХ АЛАТА СА И БЕЗ ПРЕВЛАКЕ ОД TiN

## UVOD

Troškovi energije pored troškova alata i troškova živog rada predstavljaju značajan deo vrednosti kojom se opterećuje proizvodna operacija. Nove tehnologije prevlaćenja alata TiN, TiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> i druge dovele su do značajnog povećanja postojanosti istih i time im omogućile širok prodor u industriji prerade metala.

Prednost alata sa prevlakama sa aspekta postojanosti potvrđena je na mnogim proizvodnim operacijama a mnogi objavljeni radovi ukazuju da ova problematika postaje predmet interesovanja sve većeg broja istraživača.

Sa druge strane uticaj alatnog materijala na troškove energije znatno je manje poznat. Naime, vrlo malo istraživača dovodi u vezu potrošnju energije sa vrstom alatnog materijala. Nepostojanje pouzdanih pokazatelja ovog uticaja svakako treba povezati sa mnoštvom slučajnih faktora koji deluju na proces obrade rezanjem. U takvim uslovima znatno je otežano razdvojiti uticaj ispitivanog alatnog materijala na potrošnju energije naročito ako mu je red veličine uticaja blizak uticaju slučajnih faktora.

Ovu problematiku razmatrali smo kroz obradu rezultata niza potpunih eksperimenata vezanih za struganje ugljeničnih i legiranih čelika alatima sa i bez prevlake od TiN.

U radu je dat opis primenjenog matematičko statističkog aparata sa konačnim rezultatima obrade jednog eksperimenta dok su rezultati i postupak merenja zbog obimnosti rada izostavljeni.

\* Tadić Branko, dipl. inž. asistent Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, Ul. S. Janjić 6.

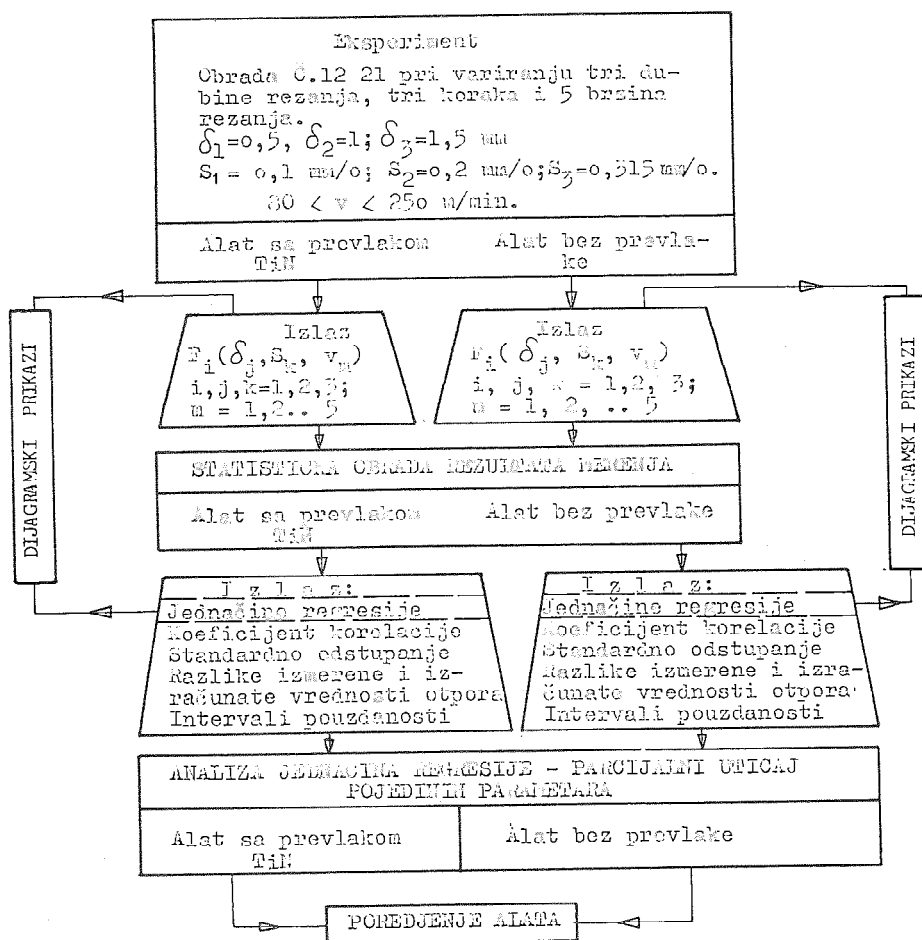
Z. Yi-gang, dipl. inž. asistent Mašinskog fakulteta u He-fei-u



## TOK ISPITIVANJA

Do pokazatelja uticaja parametara obrade i vrste alatnog materijala na potrošnju energije dolazi se na indirektan način.

Planirano je da se obradom rezultata merenja koje obuhvata paralelno praćenje komponentnih otpora pri variranju više parametara obrade (dubina, korak i brzina rezanja) dodje do pokazatelja o potrošnji energije pri struganju alatima sa i bez prevlake od TiN. Na slici 1. dat je šematski prikaz toka ispitivanja.



Slika 1

## STATISTIČKA OBRADA REZULTATA MERENJA

Obradom rezultata merenja dobivene su vrlo tesne korelative veze oblika  $F_i(\delta, s, v)$ . Radi ilustracije visoke korelativnosti otpora i parametara obrade na slikama 2-7 date su neke od dobivenih dijagramskih zavisnosti.

Krive na dijagramima crtane su po opštim jednačinama regresije (obraci dati u tabeli 1) dok su tačkama na dijagramima označene izmerene vrednosti otpora. Ovako visoka korelacija otpora i parametara obrade omogućava da se jednačine regresije usvoje kao baza za formiranje odredjenih integralnih pokazatelja uticaja alatnog materijala na potrošnju energije.

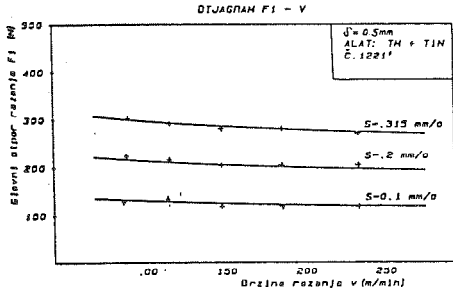
Obrada struganjem Č.1221	Alat sa prevlakom TiN	$F_1 = 1805 \delta^{0.852} s^{0.625} v^{-0.0716}$ koef. korel. $r=0.995$ ; stand. odst. $\sigma=0.049$  $F_2 = 1094 \delta^{0.39} s^{0.646} v^{-0.0839}$ koef. korel. $r=0.987$ ; stand. odst. $\sigma=0.06$  $F_3 = 948 \delta^{0.39} s^{0.47} v^{-0.090}$ koef. korel. $r=0.993$ ; stand. odst. $\sigma=0.072$
	Alat bez prevlake TiN	$F_1 = 2031.5 \delta^{0.91} s^{0.721} v^{-0.099}$ koef. korel. $r=0.999$ ; stand. odst. $\sigma=0.002$  $F_2 = 1762 \delta^{0.39} s^{0.66} v^{-0.136}$ koef. korel. $r=0.99$ ; stand. odst. $\sigma=0.053$  $F_3 = 1116 \delta^{1.234} s^{0.487} v^{-0.172}$ koef. korel. $r=0.996$ ; stand. odst. $\sigma=0.056$

Tabela 1.

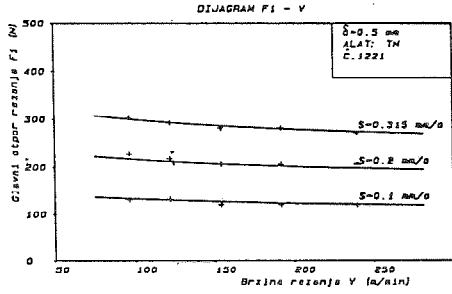
OBRAĐA STRUGANJEZ Č.1221 (dijagramske zavisnosti  $F_1 - v$ )

alat sa prevlakom od TiN

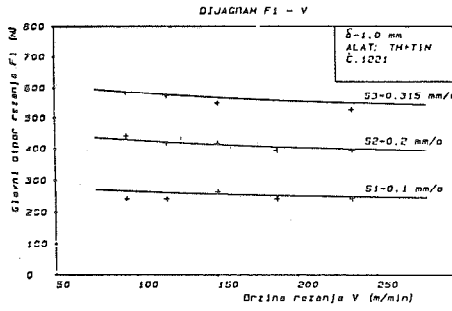
alat bez prevlake



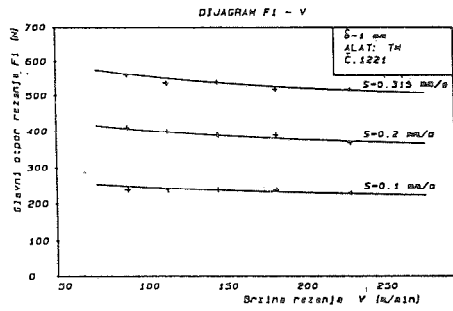
Slika - 2



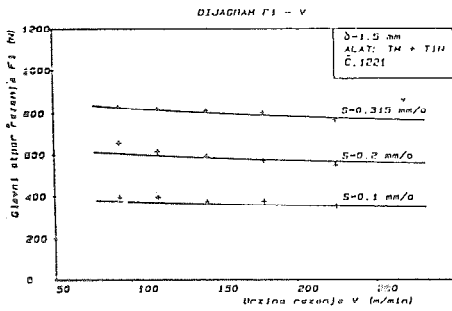
Slika - 5



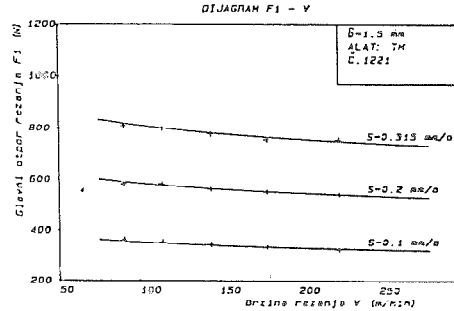
Slika - 3



Slika - 6



Slika - 4



Slika - 7

## ANALIZA JEDNAČINA REGRESIJE I POREDZENJE ALATA

Iz jednačina regresije datih u obliku stepene zavisnosti (tabela 1) teško je sagledati parcijalne uticaje pojedinih parametara obrade na veličinu komponentnih otpora rezanja.

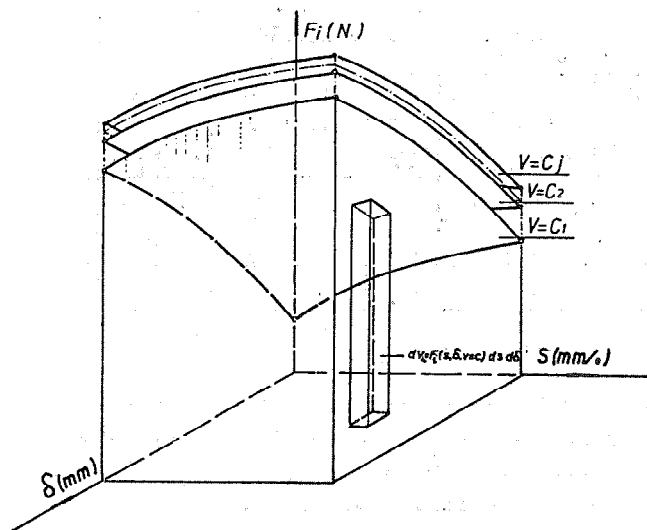
Pogodnom transformacijom ove jednačine se geometrijski gledano svode na trodimenzionalni prostor čime se znatno olakšava njihova analiza. Korelativna veza oblika  $F_i(\delta, s, v = c)$ ,  $i = 1, 2, 3$  matematički definiše površ u trodimenzionalnom prostoru. Za različite vrednosti konstante  $c$  dobiće se familija površi što je grafički predstavljeno na sl. 8.

Poredjenje zapremina koje površi  $F_i(\delta, s, v=c_1)$  i

$F_i(\delta, s, v=c_2)$  obrazuju sa koordinatnim ravnima adekvatno je poredjenju srednjih vrednosti otpora na odredjenom intervalu koraka i dubina pri brzini  $v = c_1$  i  $v = c_2$ .

Treba napomenuti da data zapremina fizički predstavlja energetska veličinu. Procenatni porast srednjeg otpora pri padu brzine za  $\Delta v = v_1 - v_2$  može se izračunati preko odnosa ovih zapremina, što se može napisati u obliku:

$$\Delta \bar{F}_i(\Delta v)\% = \frac{A(\delta, s, v_2) - A(\delta, s, v_1)}{A(\delta, s, v_2)} 100\%$$



Slika 8.

Imajući u vidu korelativnu vezu otpora, koraka, dubine i brzine rezanja ovaj pokazatelj se može izraziti relacijom:

$$\Delta \bar{F}_i(\Delta V) = \frac{c \cdot (V_2^z - V_1^z) \cdot \int_{\delta_1}^{\delta_2} \delta^x \cdot d\delta \int_{s_1}^{s_2} s^y \cdot ds}{c \cdot V_2^z \cdot \int_{\delta_1}^{\delta_2} \delta^x \cdot d\delta \int_{s_1}^{s_2} s^y \cdot ds} \cdot 100\% = \frac{(V_2^z - V_1^z) \cdot 100\%}{V_2^z}$$

Ovim se može zaključiti da procentni pad otpora usled povećanja brzine rezanja ne zavisi od veličine koraka i dubine rezanja. Sličnim postupkom može se preko pokazatelja  $\Delta F_i(\Delta \delta)$  i  $\Delta F_i(\Delta s)$  sagledati uticaj dubine i koraka na veličinu otpora rezanja, gde je:

$\Delta F_i(\Delta \delta)\%$  - procentni porast otpora pri promeni dubine od  $\delta_1$  do  $\delta_2$  i

$\Delta F_i(\Delta s)\%$  - procentni porast otpora pri promeni koraka od  $s_1$  do  $s_2$ .

Radi preglednosti svi ovi pokazatelji dati su tabelarno (tabela 2) za oba alata.

Tabela - 2		Obrada struganjem Č.1221					
		Alat sa prevlakom od TiN			Alat bez prevlake		
$\Delta F_i$	$v_1=100$	$\delta_1=0,5$	$s_1=0,1$	$v_1=100$	$\delta_1=0,5$	$s_1=0,1$	
	$v_2=220$	$\delta_2=1,5$	$s_2=0,315$	$v_2=220$	$\delta_2=1,5$	$s_2=0,315$	
	$\Delta v=120$	$\Delta \delta=1(\text{mm})$	$\Delta s=0,215$ (mm/ob)	$\Delta v=120$ (m/min)	$\Delta \delta=1(\text{mm})$	$\Delta s=0,215$ (mm/ob)	
$\Delta F_1(\Delta v)$	5,49 %	60,8 %	54,95 %	7,5 %	63,2 %	56,26 %	
$\Delta F_2(\Delta \delta)$	6,4 %	34,82 %	52,34 %	13,63 %	34,8 %	53,14 %	
$\Delta F_3(\Delta s)$	9,7 %	74 %	41,68 %	12,66 %	74,2 %	42,8 %	

Kao pokazatelj za energetska poredjenje alata koristi se procentni odnos srednjih vrednosti otpora  $F_i$  za odredjenu oblast koraka i dubine rezanja. Ovaj pokazatelj računa se za odredjenu brzinu rezanja i može se odrediti po obrascu:

$$K_{Fi} = \frac{\bar{F}_{iTiN}}{\bar{F}_{iTM}} \cdot 100\% = \frac{\int_{\delta_1}^{\delta_2} \int_{s_1}^{s_2} F_{iTiN}(\delta, s, v=c_1) \cdot d\delta \cdot ds}{\int_{\delta_1}^{\delta_2} \int_{s_1}^{s_2} F_{iTM}(\delta, s, v=c_1) \cdot d\delta \cdot ds} \cdot 100\%$$

gde je:  $\bar{F}_{iTiN}$  - srednja vrednost otpora pri radu alatom sa prevlakom od TiN za oblast  $\delta_1 < \delta < \delta_2$  i  $s_1 < s < s_2$  pri konstantnoj brzini ( $v = c_1$ ).

$\bar{F}_{iTM}$  - je srednja vrednost otpora pri radu neprevučenim alatom za istu oblast variranih parametara obrade.

Posebno je interesantno  $K_{Fi}$  izračunati za oblasti graničnih vrednosti koraka, dubine i brzine rezanja.

U tabeli 5. date su vrednosti ovog pokazatelja za različite oblasti variranih parametara obrade.

Tabela-3	Interval $\bar{F}_i$	$0,5 < \delta < 1,5$ $0,1 < s < 0,315$ $v=100$ m/min	$K_{Fi}$ %	$0,5 < \delta < 1$ $0,1 < s < 0,2$ $v=220$ m/min	$K_{Fi}$ %	$1 < \delta < 1,5$ $0,2 < s < 0,315$ $v=100$ m/min	$K_{Fi}$ %
		Obrada Č.1221 alat- om sa prevlakom TiN	$\bar{F}_1$ (N)	428,48	$K_{F1} = 101,5\%$ $K_{F2} = 105,9\%$ $K_{F3} = 105,9\%$	255,2	$K_{F1} = 119,6\%$ $K_{F2} = 110,2\%$ $K_{F3} = 110,2\%$
$\bar{F}_2$ (N)	263,4		181	336,36			
$\bar{F}_3$ (N)	249,36		135,74	363			
Obrada Č.1221 alat- om bez prevlake TiN	$\bar{F}_1$ (N)	409,89	$K_{F1} = 104,5\%$ $K_{F2} = 105,9\%$ $K_{F3} = 105,9\%$	232,71	$K_{F1} = 109,6\%$ $K_{F2} = 110,2\%$ $K_{F3} = 110,2\%$	593	$K_{F1} = 102,8\%$ $K_{F2} = 105,4\%$ $K_{F3} = 105,4\%$
	$\bar{F}_2$ (N)	259,45		163,7		332,2	
	$\bar{F}_3$ (N)	235,47		123,2		344,3	

### ZAKLJUČAK

Analiza rezultata eksperimenta ukazuje na razlike u veličini komponentnih otpora pri struganju Č.1221 prevučenim i neprevučenim alatom. S tim u vezi za ispitivanu oblast variranih parametara  $\delta$ ,  $s$  i  $v$  sa aspekta potrošnje energije prednost svakako pripada alatu bez prevlake od TiN.

Medjutim, analizom parcijalnih uticaja (uticaj dubine, koraka i brzine) i pokazatelja  $K_{fi}\%$  dolazi se do vrlo interesantnih zapažanja.

Pri većim koracima i dubinama rezanja razlika u otporima je vrlo mala, dok sa povećanjem brzine i smanjenjem koraka i dubine ova razlika asimptotski raste.

Ovo saznanje nameće pretpostavku da će se regresione površi koje definišu otpore rezanja pri struganju alatima sa i bez prevlake seći u prostoru.

Napominjemo da smo ovu pretpostavku potvrdili nizom kratkih eksperimenata obavljenih pri struganju Č.122o, Č.542o i Č.543o istim alatima.

Time se može zaključiti da postoje određene oblasti veličine koraka, dubine i brzine rezanja za koje je energetski posmatrano opravdana primena nekog od ovih alata.

#### LITERATURA

1. STANIĆ J., Metod inženjerskih merenja, Mašinski fakultet, Beograd, 1986.
2. IVANOVIĆ B., Obrada metala rezanjem, Izbor ekonomičnih režima obrade, Gradjevinska knjiga, Beograd, 1979.
3. VUKADINOVIĆ S., Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike, Beograd, 1981. god.

B. Tadić, Z. Yi-gang

#### MATHEMATICAL AND STATISTICAL APPROACH AT COMPARE BALANCE OF ENERGY AT CUTTING TOOL WITH AND WITHOUT TIN COATING

##### S u m m a r y

Presented in the paper are the results of experimental investigations into the effects of tool materials on the magnitude of component cutting resistances. Titanium nitride coated tools were compared in the experiments with untreated tools, measuring in both cases cutting resistance within a wide range of machining parameters (cutting depth, feed, and cutting speed).

The data obtained were processed numerically to yield regression surface equations that may be used for cutting resistance calculations. The tools were compared by computing integral indicators of the regression surface equations. Analysis was also performed of the effects of speed upon the amount of cutting resistance.

This work is only a preliminary step toward fuller investigations into the optimal choice of tools from the energy balance aspects.

Z. Nikić, S. Radonjić\*

KOMPARATIVNE KARAKTERISTIKE OKSIDNE,  
MEŠANE I NITRIDNE REZNE KERAMIKE

1. UVOD

Već više godina na TEHNIČKOM FAKULTETU u Čačku, u okviru projekata koje finansira Zajednica nauke SR Srbije i Fabrika reznog alata iz Čačka, se razvija tehnologija proizvodnje reznih keramika.

Paralelno sa razvojem tehnologije i proizvodnje keramike izvode se opsežna istraživanja u oblasti identifikacije reznih karakteristika sopstvene keramike i karakteristika rezne keramike inostranih proizvođača. U publikovanim radovima /1,2/ prezentirani su rezultati istraživanja kvaliteta oksidne keramike sopstvene proizvodnje i komparativne vrednosti drugih proizvođača.

Radeći sada na programu osvajanja tehnologije proizvodnje mešane i neoksidne keramike bilo je potrebno doći do repernih vrednosti kvaliteta tih keramika inostranih proizvođača.

U ovom radu se izlaže deo rezultata istraživanja radi definisanja kvaliteta tih keramika u našim proizvodnim uslovima. Tehnološki razvoj i proizvodnja mešane i neoksidne rezne keramike se zasniva i delom na neprestanoj komparaciji reznih karakteristika.

---

\*/ Dr Zoran Nikić, dipl.ing., redovni profesor Tehničkog fakulteta u Čačku, ul. Borisa Kidriča 65

Dr Snežana Radonjić, dipl.ing., docent Tehničkog fakulteta u Čačku, ul. Borisa Kidriča 65.



## 2. USLOVI EKSPERIMENTALNIH ISPITIVANJA REZNIH KARAKTERISTIKA KERAMIČKIH MATERIJALA

Ekperimentalna ispitivanja su vršena u Laboratoriji Tehničkog fakulteta u Čačku.

Materijal obratka: Č.1730 u poboljšanom stanju zatezne čvrstoće 110-120 daN/mm<sup>2</sup>. Polazne dimenzije ispitivanog materijala  $\phi$  104 x 450 mm i  $\phi$  150 x 360 mm. Stezanje: stezna glava i obrtni šiljak.

Mašina: Univerzalni strug PA-22 sledećih karakteristika:

- snaga  $P=4,05$  KW,
- broj obrtaja  $n=20-2000$  o/min,
- korak  $s=0,04-9,136$  mm/o.

Rezni alat: Keramičke pločice sledećih kvaliteta:

1. Mešana keramika SPK-Feldmühle (SNMN 120812T)

2. Mešana keramika MC2-HERTEL (SNMN 120812T)

3. Nitridna keramika TSI20- Tizit (SPGN 120308TN, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>)

4. Keramička pločica ZEKALIT (gustine  $\rho=3,27$  kg/dm<sup>3</sup>).

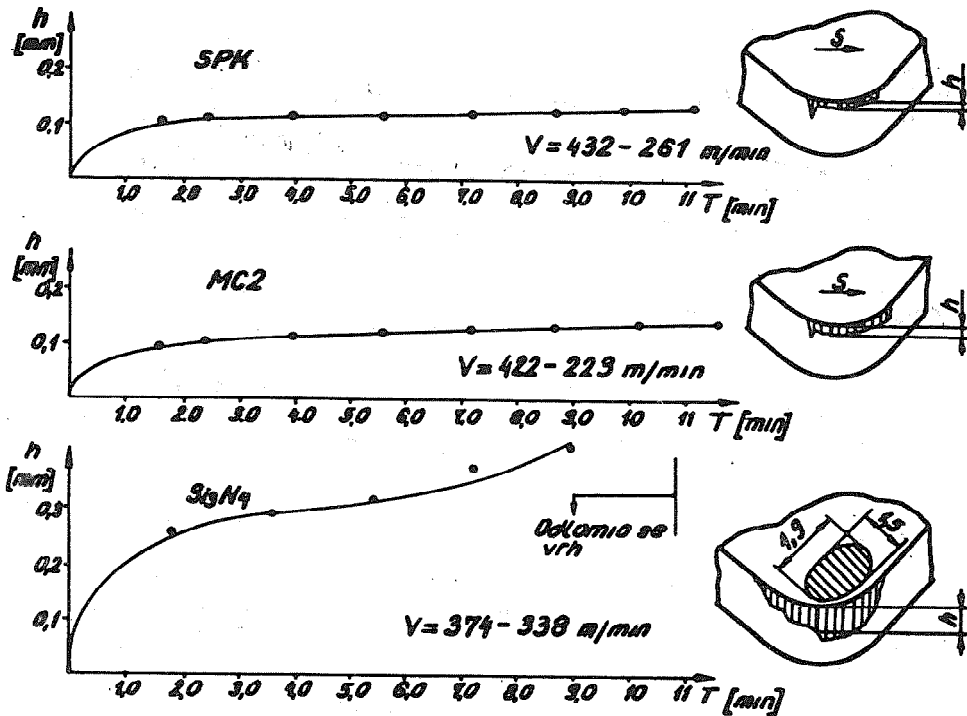
Geometrija alata: za alate pod red.br.1., 2. i 4.  $\alpha=6^\circ$ ,  $\beta=-6^\circ$  i  $\beta=75^\circ$ , a za alat pod brojem 3.  $\alpha=6^\circ$ ,  $\beta=5^\circ$  i  $\beta=75^\circ$ .

Režimi rezanja:  $v=432-350$  m/min,  $s=0,098$  mm/o;  $0,107$  mm/o i  $s=0,214$  mm/o,  $\delta=0,2$ ;  $0,5$  i  $1,25$  mm.

### 3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Na slici 1. dati su uporedni rezultati ispitivanja reznih karakteristika za tri rezne keramike pri gruboj obradi na strugu, sa režimima:  $v=432-223$  m/min,  $s=0,214$  mm/o i  $\delta=1,25$  mm.

Analizom dobijenih rezultata zapaža se skoro identično habanje pločice SPK i MC2, pri čemu može da se kaže da je habanje pločice MC2 ravnomernije (misli se na širinu pojasa habanja). Što se tiče nitridne pločice (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>), pri skoro istim režimima intenzivnije se haba kako po ledjnoj tako i po grudnoj površini. Po ledjnoj površini se haba neravnomerno, a na grudnoj je veoma izražen krater, što govori o pojačanom abrazivnom habanju. Pločica je rezala do  $tg=10,78$  min, a onda se odlomio vrh. Sa istom pločicom a drugom reznom ivicom rezano je sa  $v=470$  m/min i istim ostalim režimima do vremena  $tg=3,05$  min, kada se odlomio vrh.

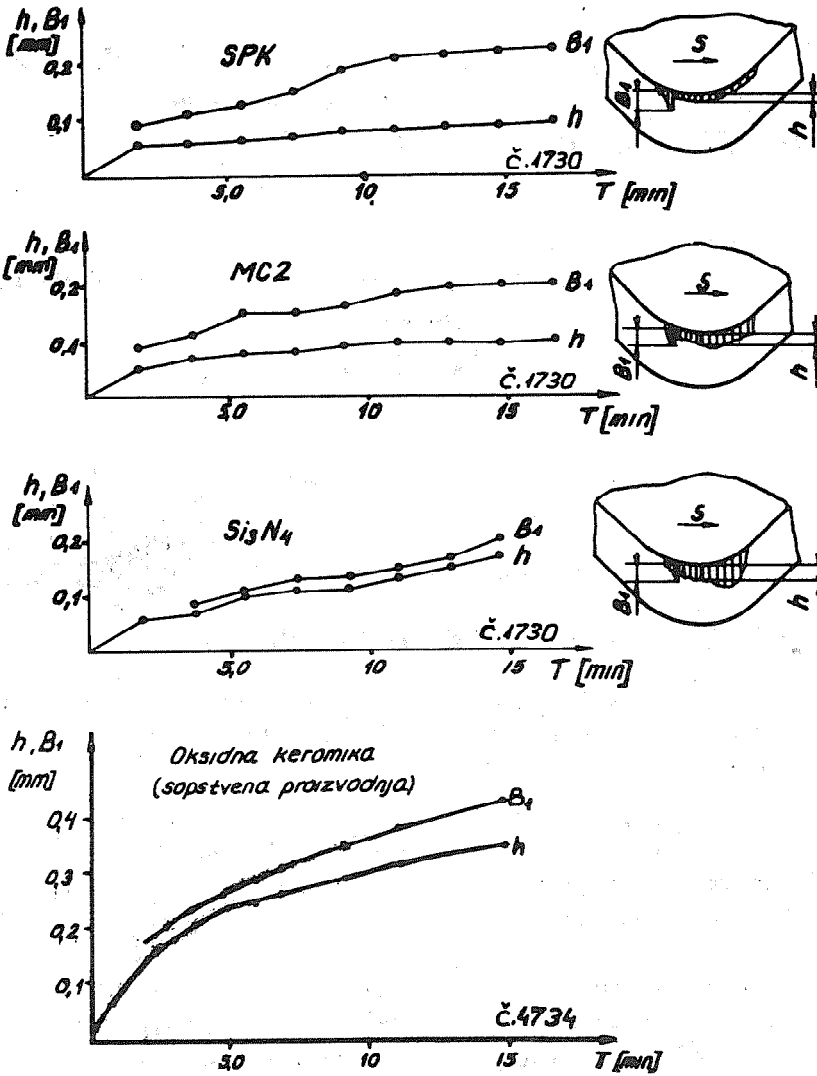


Sl.1. Usporedni rezultati ispitivanja mešane keramike (SPK i MC2) i nitridne keramike pri  $s=0,214$  mm/o i  $\delta=1,25$  mm

Sa pločicom SPK a drugom reznom ivicom obradjivan je Č.1730 u sirovom stanju, sa istim režimima rezanja kao na sl.1. do  $t_g=7,36$  min. Prekinuto je sa rezanjem, jer se pločica veoma sporo habala. Za navedeno vreme širina pojasa habanja je bila  $h=0,07$  mm.

Pri istim režimima kao u prethodnim eksperimentima pokušano je rezanje sa pločicom ZEKALIT. Medjutim, vrh pločice je bio odnešen nakon 0,2 min rezanja. I posle drugog pokušaja, za isto vreme rezanja, otišao je i drugi vrh rezne pločice.

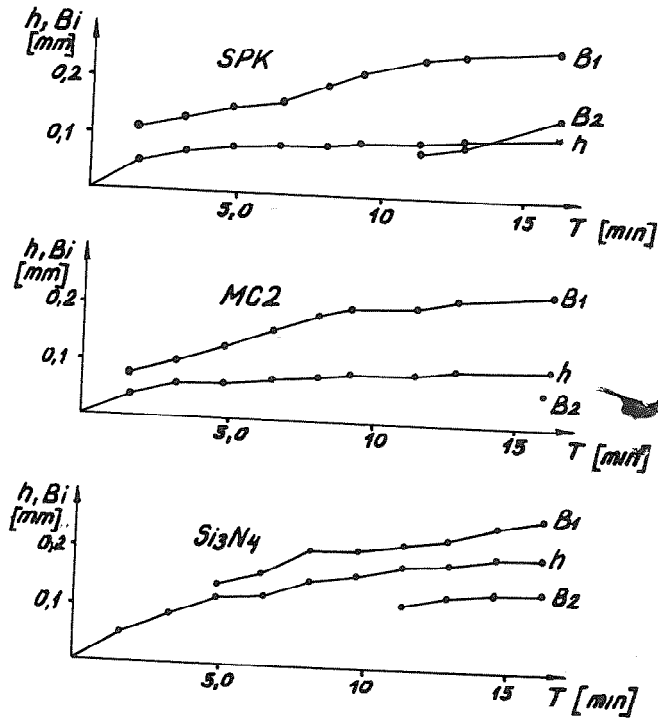
Na slici 2. dati su uporedni rezultati istraživanja rezne keramike stranih proizvođača: mešane keramike SPK i MC2 i nitridne keramike, i rezne keramike- oksidne sopstvene proizvodnje (proizvod Tehničkog fakulteta u Čačku)/1,2/. Obrada je vršena pri istim režimima rezanja:  $v=426-414$  m/min,  $s=0,107$



Sl.2. Uporedni rezultati ispitivanja mešane keramike (SPK i MC2), nitridne keramike i oksidne (sopstvene proizvodnje) keramike/1,2/, pri  $s=0,107$  mm/o,  $\delta=0,5$  mm i  $v=426-414$  m/min

mm/o i  $\delta=0,5$  mm. Na dijagramima je osim širine pojasa habanja

h data i veličina koncentrisanog habanja alata (žljeb  $B_1$ ) koji pri završnoj obradi utiče na kvalitet obradjene površine. Najpravnomernije se haba pločica SPK, a najneravnomernije pločica  $Si_3N_4$ . Rezultati naše pločice u odnosu na ispitivanih su zadovoljavajući.



Sl. 3. Krive habanja dobijene pri ispitivanju mešane keramike (SPK i MC2) i nitridne keramike, pri režimima:  $v=380$  m/min,  $s=0,098$  mm/o i  $\delta=0,2$  mm

Na slici 3. dati su rezultati istraživanja za sve tri ispitivane pločice pri obradi sa vrlo malim presecima strugotine:  $\delta=0,2$  mm,  $s=0,098$  mm/o i  $v=380$  m/min. Sličan je karakter habanja pločica kao i kod prethodnih režima rezanja (sl. 2). Kod pločice  $Si_3N_4$  zbog neravnomernog habanja razlika  $B_1-h$  je najmanja u oba slučaja.

#### 4. ZAKLJUČAK

Na bazi dobijenih rezultata istraživanja može da se zaključi sledeće:

1. Pri obradi Č.1730 u poboljšanom stanju sa mešanom keramikom SPK - Feldmühle i MG2-HERTEL dobijeni su približno isti rezultati istraživanja. I jedna i druga pločica dale su pozitivne rezultate kako u pogledu postojanosti, tako i u pogledu kvaliteta obradjene površine. Time je potvrđena njena moguća primena na klasičnim alatnim mašinama.
2. Pločica od Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> pokazala je lošije rezne karakteristike u odnosu na mešanu keramiku pri zadatim uslovima rezanja.
3. Upoređujući rezultate istraživanja oksidne keramike sopstvene proizvodnje /1,2./ sa ispitivanim keramikama, pri istim uslovima obrade, može da se kaže da su rezultati dobijeni sa našom keramikom zadovoljavajući (za isti period rezanja h i B<sub>1</sub> je nešto malo veći kod naše keramike).

#### Reference

- [1]. S. Urošević, Z. Nikić, M. Vlajić, Istraživanje procesa izrade keramičkih sečiva - Prilog razvoju domaće tehnologije obrade metala rezanjem, XIX Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Kragujevac, 1985.
- [2]. Z. Nikić, S. Radonjić, R. Milošević, M. Vratonjić, P. Nikšić, Rezultati ispitivanja reznih karakteristika mineralo-keramičkih pločica u obradi struganjem - izveštaj za makro projekat: "Razvoj opreme i tehnologije u obradi metala rezanjem", Čačak, 1985.

Z. Nikić, S. Radonjić

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF OXIDE,  
MIXED AND NITRIDE CUTTING CERAMICS

#### S u m m a r y

The paper presents a part of investigation results of mixed and nonoxide cutting ceramic characteristics of foreign production in our productive conditions.

These investigations are being carried out by Engineering faculty in Čačak within the program of mixed and nonoxide ceramics production technology.

D. Banjac\*

BRZINA OBRATANJA KRUŽNE REZNE PLOČICE  
PRI STRUGANJU SAMOBRITNIM NOŽEVIMA

1. UVOD

U okviru istraživanja i ubrzanog razvoja savremenih obradnih i tehnoloških procesa obrade rezanjem značajno mesto imaju dostignuća u povećanju reznih sposobnosti alata, vezana za usavršavanje konstrukcije i materijala alata. Istovremeno je primetno sve značajnije usavršavanje i konstrukcionih materijala, vrlo često teško obradljivih. Zbog toga razvijeni visokoproizvodni alati u obradi teško obradljivih materijala, pa i velikih kontinualnih površina obradaka, još uvek ne daju zadovoljavajuće proizvodno-ekonomske efekte. Otuda i značajna istraživanja i osvajanje proizvodnje novih specifičnih konstrukcija alata i odgovarajućih obradnih procesa, kako bi se navedeni problem praktično rešio.

Istraživanja i primena alata sa kružnim obrtnim reznim pločicama [1,3, 4,6,7,8,9,12] pokazuju da se pri obradi teško obradljivih materijala i delova sa velikim kontinualnim površinama mogu postići značajni tehnološko-ekonomski efekti, povoljniji nego u slučaju primene konvencionalnih alata sa stabilnim sečivom (reznim elementom). Ti efekti su bazirani na specifičnoj kinematici rezanja, koja omogućava značajno povećanje režima rezanja i postojanosti alata uz visok-zadovoljavajući nivo tačnosti i kvaliteta obradjenih površina. Medjutim, šira primena ovog, relativno složenog, procesa obrade bitno je ograničena nedostatkom dovoljnog obima pouzdanih i praksi dostupnih informacija.

Uzimajući u obzir navedeno, kao i potrebu rešavanja istaknutih problema u obradi teško obradljivih materijala i velikih kontinualnih površina na

---

\*) Mr Dragan Banjac, dipl.inž., predavač Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad, Ul. V.Perića-Valtera 2.

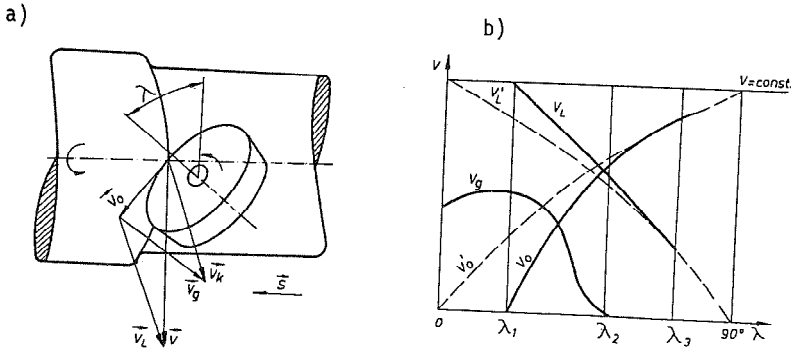
delovima u domaćoj industriji prerade metala, u Institutu za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, u toku dužeg vremenskog perioda, vrše se obimna istraživanja obrade struganjem kružnim samoobrotnim reznim pločicama od tvrdog metala [2,3,11]. Uzimajući u obzir da efekte ovog procesa obrade prvenstveno obezbeđuje uvođenje i kontrola dopunskog obrtnog kretanja kružne rezne pločice, u ovom radu se iznosi deo rezultata istraživanja zakonitosti dopunskog samoobrotnog kretanja, kako teorijskih tako i eksperimentalnih.

## 2. KINEMATIKA REZANJA I OSNOVNE KARAKTERISTIKE PROCESA OBRADJE

Istraživanja i primena procesa obrade kružnim obrtnim reznim pločicama zasnivaju se na širokom spektru konstruktivnih rešenja alata i odgovarajućih varijanti kinematskih šema rezanja [5], posebno pri obradama struganjem, rendisanjem i glodanjem. Kod obrade struganjem primenjuju se tri osnovne grupe varijanti alata: alati kod kojih je statička grudna površina kružne rezne pločice (ravna ili konična) istovremeno i radna grudna površina u procesu obrade, alati kod kojih je statička ledjna površina pločice, cilindrična ili konična, radna grudna površina i alati sa pločicama sa zavojnim zubima. Obrtno kretanje navedenih varijanti reznih pločica može biti prinudno ili samoobrotno [2].

Samoobrotno kružno kretanje rezne pločice ostvaruje se konstrukcijom držača alata, gde je pločica postavljena na vreteno koje je u držaču uležišteno odgovarajućim radialnim i aksijalnim uležištenjem, kliznim ili kotrljajnim. Na taj način se alatu u procesu obrade omogućuje jedan stepen slobode kretanja, obrtanje oko sopstvene ose - ose vretena, a ostvaruje se naginjanjem ose kružne pločice (vretena) u odnosu na pravac brzine glavnog kretanja za ugao nagiba sečiva  $\pm\lambda$  (sl.1.). Pri tome se, pod dejstvom sila rezanja, na kontaktnim površinama sečiva rezne pločice javljaju sile trenja, koje kod dovoljne vrednosti ugla  $\lambda$  izazivaju momenat veći od momenta trenja u uležištenju i na taj način dolazi do samoobrtanja rezne pločice. Zavisno od vrste i kvaliteta uležištenja pri dovoljno velikom uglu nagiba sečiva  $\lambda$  dolazi do stabilnog samoobrotnog kretanja, konstantne obimne brzine. Za slučaj da je  $\lambda < 0$  (kao na sl.1.) javlja se istosmerno rezanje [2].

U istraživanjima koja se u ovom radu prezentiraju, primenjeno je više konstrukcija alata i vrsta uležištenja, zasnovanih na prvoj varijanti alata, kada je statička konična površina kružne rezne pločice istovremeno i radna grudna površina, a ispitivanja su vršena pri  $\lambda < 0$ , tj. pri istosmernom rezanju (sl.1.).

S1.1. Kinematska šema rezanja za  $\lambda < 0$ 

Pri uzdužnom struganju, pored glavnog kružnog kretanja ( $V$ ) i pomoćnog kretanja ( $s$ ), dopunsko slobodno samoobratno kretanje rezne pločice  $V_0$  (sl.1a.), značajno menja kinematske odnose alata, obradka i strugotine u procesu obrade, u odnosu na konvencionalnu obradu prizmatičnim noževima. Naime, brzina samoobrotnog kretanja sečiva  $V_0$  izaziva bitnu promenu relativnih brzina klizanja strugotine po grudnoj površini ( $\vec{V}_g = \vec{V}_k - \vec{V}$ ) i brzine klizanja ledjne površine u odnosu na obradak ( $\vec{V}_L = \vec{V} - \vec{V}_0$ ). Pri tome treba naglasiti da je stvarna brzina strugotine  $V_k$  bitno manja u odnosu na konvencionalno rezanje, jer se zbog postojanja navedenog stepena slobode kretanja sečiva praktično radi o ortogonalnom rezanju, sa značajno manjim faktorima sabijanja strugotine [1,7,10].

Kao što će se videti kasnije, brzinu slobodnog obrtnog kretanja rezne pločice ( $V_0$ ) određuju sile trenja na kontaktnim površinama alata i otpori trenja u uležištenju, odnosno minimum energije rezanja [1,7,10], odnosno praktično brzina rezanja i ugao nagiba sečiva alata. Kvalitativni prikaz zakonitosti promene brzine samoobrtanja (sl.1b.) pokazuje da u zavisnosti od ugla nagiba sečiva dolazi do značajnih smanjenja brzina relativnih klizanja na grudnoj i ledjnoj površini sečiva ( $V_g, V_L$ ). Razlika linija u dijagramu za  $V_g$  i  $V_L$  u odnosu na teorijske krive  $V'_g$  i  $V'_L$  je zbog navedenih otpora trenja [2]. Teorijski je moguće za neko  $\lambda = \lambda_2$  ostvariti rezanje sa  $V_g = 0$ , tj. ostvariti trenje kotrljanja umesto trenja klizanja na grudnoj površini. Praktično je  $V_g > 0$ , ali manje od  $V_L$  i značajno manje u odnosu na konvencionalno rezanje.

Na bazi izloženog, zahvaljujući prikazanoj povoljnijoj kinematici rezanja, može se zaključiti da se značajno povećava aktivna dužina sečiva (jednaka obimu rezne pločice), bitno smanjuje temperatura rezanja zbog hladjenja sečiva u praznom hodu, manjih trenja klizanja na kontaktnim površinama i mogućnosti efikasnijeg dejstva sredstva za hladjenje i podmazivanje [1,3,6] i konačno u rezultatu svega višestruko povećava postojanost alata uz više brzine rezanja. Pri tome je značajno istaći i smanjenje faktora sabijanja strugotine.



Iako se zbog navoda u literaturnim izvorima i geometrije alata može očekivati visok nivo tačnosti i kvaliteta obradjene površine i dovoljna dinamička stabilnost procesa obrade, nepovoljan presek strugotine, uvodjenje uležištenja i periodizacija rezanja i toplotnog opterećenja sečiva, uslovljavaju potrebu za eksperimentalnim ispitivanjem modela habanja alata, dinamičkog ponašanja obradnog sistema i kvaliteta obradjene površine u cilju potvrđivanja i praktičnog ostvarivanja napred navedenih logičnih efekata. Zbog toga se na bazi rezultata sopstvenih i drugih istraživanja i pristupilo navedenom sveobuhvatnom programu kompleksnih istraživanja, očigledno relativno složenog procesa obrade struganjem kružnim samoobrotnim reznim pločicama.

Naglašena uloga i uticaj samoobrotnog kretanja, izraženog preko njegove brzine  $V_0$ , uslovljili su da se posebna pažnja posveti izučavanju zakonitosti promena te brzine i na osnovu toga obezbede podloge za optimalno upravljanje procesom.

### 3. TEORIJSKE OSNOVE ZAKONITOSTI PROMENE BRZINE SAMOObRTANJA

Kružni samoobrotni nož predstavlja mehanizam sa jednim stepenom slobode kretanja, obrtanja sečiva oko sopstvene ose, koje se uspostavlja automatski samim procesom rezanja. Pri tome brzina samoobrtanja odgovara minimumu energije rezanja [1,6,7,8], koja obuhvata deformacioni rad, rad trenja na grudnoj i ledjnoj površini i rad trenja u uležištenju. Na taj način iz uslova za minimum energije rezanja [1], a takodje i izraza za ravnotežu momenata navedenih trenja u odnosu na osu pločice [8], pri čemu je konstatovan najveći uticaj trenja na ledjnoj površini pločice [6], može se definisati praktično primenljiv izraz za odredjivanje brzine samoobrtanja oblika

$$V_0 = K \cdot V \cdot \sin \lambda \quad (1)$$

gde je  $K \leq 1$  - kinematski koeficijent koji uzima u obzir navedene sile trenja.

Detaljnija analiza uticaja pojedinih faktora i parametara procesa može se, takodje, prikazati primenom principa najmanjeg dejstva [7]. Za kružni samoobrotni nož sa idealnim osloncima (bez otpora uležištenja) moguće je očekivati da će iz svih mogućih trajektorija tačke sečiva u obradivanom materijalu stvarna trajektorija odgovarati minimalnoj energiji rezanja. Za stabilnu ugao-  
nu brzinu sečiva ( $\omega_0$ ) može se matematički napisati princip najmanjeg dejstva oblika

$$\delta \int_{\tau_1}^{\tau_2} w dL = \delta A = 0 \quad (2)$$

gde su:

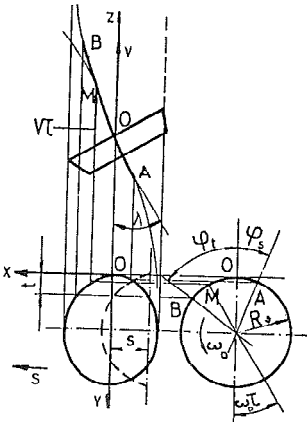
- $\delta$  - znak varijacije,
- $w$  - moguća brzina kretanja tačke sečiva u obradivanom materijalu,
- $dL$  - diferencijal luka moguće trajektorije,
- $\tau_1, \tau_2$  - granice integracije po vremenu,
- $A$  - dejstvo.

Ako za tačku sečiva  $M$  (sl.2.) izrazimo dejstvo svedeno na jedinicu vremena, kao proizvod broja obrtaja sečiva  $n_0$  i dejstva  $A_i$ , koje odgovara jednom obrtu u granicama ugla kontakta tačke sečiva sa obratkom ( $\phi_t + \phi_s$ ), dobijamo

$$A = n_0 A_i = \frac{\omega_0}{2\pi} \int_{-\phi_s}^{\phi_t} w dL \quad (3)$$

Za određivanje  $w$  i  $dL$  može se iskoristiti metod kinematske analize [5], pri čemu trajektoriju kretanja tačke  $M$  u obradivanom materijalu zadajemo koordinatama u parametarskom obliku:

$$\begin{aligned} x &= R_0 \cos \lambda \sin \omega_0 \tau \\ y &= R_0 (1 - \cos \omega_0 \tau) \\ z &= V\tau - R_0 \sin \lambda \sin \omega_0 \tau \end{aligned} \quad (4)$$



Sl.2. Trajektorija kretanja kod istosmernog rezanja

$$V_0 = V \frac{\sin \phi_t + \sin \phi_s}{\phi_t + \phi_s} \sin \lambda = VK_{st} \sin \lambda \quad (7)$$

jer su

$$\sin \phi_s = \frac{s}{2R_0 \cos \lambda}; \quad \sin \phi_t = \left(1 - \frac{t}{R_0}\right) \quad (8)$$

Diferenciranjem koordinata (4) po vremenu  $\tau$  dobijamo  $W$  i  $dL$ , uz smenu  $\omega_0 \tau = \phi$ , oblika:

$$\begin{aligned} W &= \sqrt{\left(\frac{dx}{d\tau}\right)^2 + \left(\frac{dy}{d\tau}\right)^2 + \left(\frac{dz}{d\tau}\right)^2} = \\ &= \sqrt{R_0^2 \omega_0^2 + V^2 - 2R_0 \omega_0 V \sin \lambda \cos \phi} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} dL &= W d\tau = \frac{W}{\omega_0} d\phi = \\ &= \frac{1}{\omega_0} \sqrt{R_0^2 \omega_0^2 + V^2 - 2R_0 \omega_0 V \sin \lambda \cos \phi} \cdot d\phi \end{aligned} \quad (6)$$

Zamenom izraza za  $W$  i  $dL$  u izraz (3) i  $R_0 \omega_0 = V_0$  i postavljanjem uslova  $dA/dV_0 = 0$ , dobijamo  $V_0$  za  $A_{\min}$ , što odgovara principu najmanjeg dejstva, u obliku:

Vidi se da koeficijent  $K_{st}$  zavisi od geometrijskih parametara kontakta ( $R_0, s, t$ ), te da je  $K_{st}=0$  za  $s=0$  i  $t=0$ , što znači da je uticaj  $s$  i  $t$  (pomaka i dubine rezanja) mali na  $V_0$ , jer su njihove vrednosti relativno male.

Eksperimentalna ispitivanja pokazuju da izraz (8) ne daje zadovoljavajuće rezultate jer su zanemarena trenja u uležištenju i kod nekih materijala povećani rad trenja na grudnoj površini. Zbog toga tačne proračune brzine samoobrtanja omogućava izraz

$$V_0 = K_{st} K_{\mu} K_d V \cdot \sin \lambda = K \cdot V \cdot \sin \lambda \quad (9)$$

gde su:

$K_{\mu} = 1 - \mu_{ek} \operatorname{ctg} \lambda$  - popravni koeficijent koji uzima u obzir ekvivalentni koeficijent trenja u uležištenju  $\mu_{ek}$ ,

$K_d$  - popravni koeficijent koji uzima u obzir specifične uticaje obradivanog materijala.

Na taj način je detaljnije razradjen uticaj kinematskog koeficijenta  $K = K_{st} K_{\mu} K_d$  na  $V_0$  u praktičnom izrazu (1). Pri tome je jasno da se  $K$  mora određivati eksperimentalno, kao i to da na brzinu samoobrtanja, pored osnovnog uticaja  $V$  i  $\lambda$ , odredjen manji uticaj imaju i parametri  $R_0, s$  i  $t$ , što treba uzeti u obzir pri eksperimentalnim ispitivanjima.

#### 4. PLAN I USLOVI EKSPERIMENATA

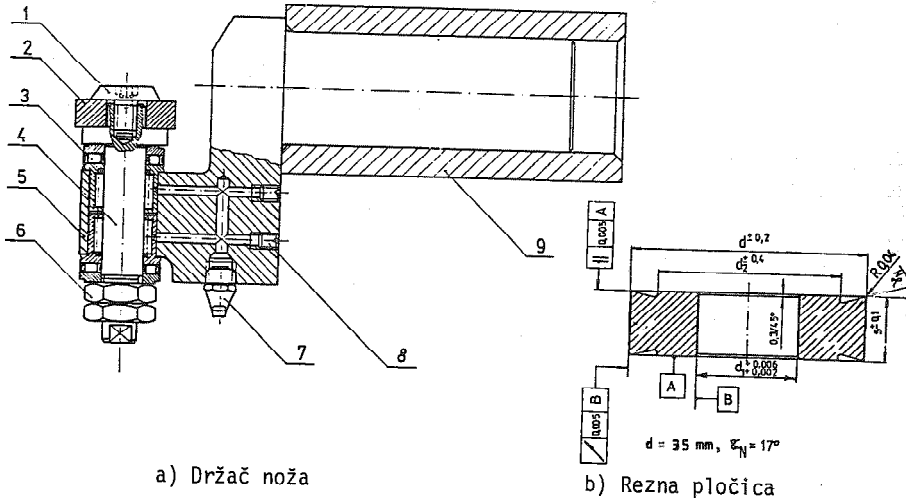
Na osnovu iznete teorijske analize može se zaključiti da se pri eksperimentalnim ispitivanjima brzine  $V_0$  mora uzeti u obzir uticaj, kako karakteristika uležištenja, tako i uticaj osnovnih parametara procesa ( $V, s, t, \lambda$ ). Zbog toga su eksperimentalna ispitivanja koja se ovde iznose, vršena pri obradi na suvo i sa primenom sredstva za hladjenje i podmazivanje (pri konstantnim ostalim uslovima), primenom jednofaktornog plana eksperimenta, prema matematičkom modelu (1) i četvorofaktornog, prema matematičkom modelu oblika

$$V_0 = C \cdot V^{a_1} s^{a_2} t^{a_3} \lambda^{a_4} \quad (10)$$

Uglavnom isti planovi i matematički modeli korišćeni su i pri eksperimentalnom utvrđivanju i svih ostalih bitnih funkcija stanja procesa obrade.

Ispitivanja su vršena na univerzalnom strugu PA-45 "Potisje", Ada, sa specijalno konstruisanim i izradjenim držačem alata i reznim pločicama, datim na slici 3. Uležištenje alata je izvršeno krutim i tačnim igličastim ležištima, a držač omogućava kontinualnu promenu ugla nagiba sečiva ( $\lambda$ ). Geometrija rezne pločice od tvrdog metala P10 prilagodjena je završnoj obradi uzoraka od čelika za poboljšanje, č.4732, normalizovanog. Obradak je bio kruto stegnut u tročeljusnu steznu glavu i poduprt šiljkom sa vrhom od tvrdog metala. Radi obezbedjenja neophodnog minimalnog radnog kinematskog ledjnog ugla (oko  $3^0$ )

sečivo pločice sa statičkim ledjnim uglom  $\alpha_N=0^0$  postavljeno je ispod ose obradka za 6 mm.



Sl.3. Kružni samoobrtni nož

Za ispitivanja završne obrade po četvorofaktornom ortogonalnom planu prvog reda, nivoi režima rezanja i ugla nagiba sečiva u planu eksperimenta usvojeni su na osnovu preporuka za date materijale obradka i alata, uzimajući u obzir mogućnosti struga PA-45 i potrebu zadovoljenja kinematske rezne geometrije (dato u tab.1. zajedno sa planom i rezultatima eksperimenta).

Merenje broja obrtaja rezne pločice, odnosno brzine samoobrtnjanja, vršeno je preciznim obrtomerom. Za kontrolu kvaliteta procesa vršena su i merenja makro i mikrogeometrije obradjenih površina na profilografu Taylor Hobson metodom otisaka.

## 5. REZULTATI EKSPERIMENATA I NJIHOVA OBRADA

Pri obradi na suvo realizacijom četvorofaktornog ortogonalnog plana prvog reda dobijene su vrednosti ugaonih brzina obrtnjanja rezne pločice (tab.1.). U prikazanom planu su:  $V|m/sec|$  - brzina rezanja,  $s|mm/ob|$  - pomak,  $t|mm|$  - dubina rezanja,  $LA=\lambda$  - ugao nagiba sečiva i  $\omega_0|sec^{-1}|$  - izmerena ugaona brzina pločice.

Obrada eksperimentalnih rezultata izvršena je na računaru, sa odredjivanjem koeficijenata regresije i ocenom adekvatnosti modela i signifikantnosti uticaja parametara. Uzimajući u obzir ocenu signifikantnosti za pouzdanu upot-

Tablica 1. četvorofaktorni plan pri obradi na suvo

V(n)	s	t	LA	X0	X1	X2	X3	X4	$\omega_o$   $\text{sec}^{-1}$	Y	YNAD
1.170	0.175	0.340	15.000	1	-1	-1	-1	-1	1.530	0.425	0.422
6.230	0.175	0.340	15.000	1	1	-1	-1	-1	9.670	2.269	2.240
1.170	0.701	0.340	15.000	1	-1	1	-1	-1	1.830	0.604	0.575
6.230	0.701	0.340	15.000	1	1	1	-1	-1	10.170	2.319	2.316
1.170	0.175	1.450	15.000	1	-1	-1	1	-1	2.170	0.775	0.746
6.230	0.175	1.450	15.000	1	1	-1	1	-1	11.170	2.413	2.410
1.170	0.701	1.450	15.000	1	-1	1	1	-1	2.420	0.884	0.880
6.230	0.701	1.450	15.000	1	1	1	1	-1	12.330	2.512	2.483
1.170	0.175	0.340	30.000	1	-1	-1	-1	1	3.920	1.366	1.337
6.230	0.175	0.340	30.000	1	1	-1	-1	1	18.170	2.900	2.896
1.170	0.701	0.340	30.000	1	-1	1	-1	1	4.700	1.548	1.544
6.230	0.701	0.340	30.000	1	1	1	-1	1	23.330	3.150	3.121
1.170	0.175	1.450	30.000	1	-1	-1	1	1	4.420	1.486	1.483
6.230	0.175	1.450	30.000	1	1	-1	1	1	21.670	3.076	3.047
1.170	0.701	1.450	30.000	1	-1	1	1	1	4.670	1.541	1.512
6.230	0.701	1.450	30.000	1	1	1	1	1	22.500	3.114	3.110
2.700	0.350	0.702	21.213	1	0	0	0	0	6.500	1.872	1.883
2.700	0.350	0.702	21.213	1	0	0	0	0	6.630	1.892	1.893
2.700	0.350	0.702	21.213	1	0	0	0	0	6.500	1.884	1.893
2.700	0.350	0.702	21.213	1	0	0	0	0	6.530	1.876	1.883

rebu u ispitivanim uslovima dobijeni su izrazi:

$$\omega_{os} = 0,106V^{0,98} s^{0,09} t^{0,11} \lambda^{1,08} |\text{sec}^{-1}| \quad (11)$$

$$V_{os} = 0,012V^{0,98} s^{0,09} t^{0,11} \lambda^{1,08} |\text{m/sec}| \quad (12)$$

Na bazi istog četvorofaktornog plana pri obradi sa upotrebom sredstva za hladjenje i podmazivanje dobijeni su izrazi oblika

$$\omega_{oe} = 0,053V^{0,95} s^{0,16} t^{-0,06} \lambda^{1,31} |\text{sec}^{-1}| \quad (13)$$

$$V_{oe} = 0,006V^{0,95} s^{0,16} t^{-0,06} \lambda^{1,31} |\text{m/sec}| \quad (14)$$

Analizom dobijenih izraza (11,12,13,14) vidi se da su dobijeni rezultati u saglasnosti sa izrazima (1,9) teorijske analize, odnosno da je uticaj pomaka i dubine rezanja praktično zanemarljiv. Takodje je potvrđen značajan uticaj hladjenja i podmazivanja na brzinu samoobrtnja, pa, prema tome, i na efekte koji iz toga proizlaze.

S obzirom na konstatovani mali uticaj preseka strugotine (s,t) na brzinu samoobrtnja i teorijski obrazložene oblike praktičnih funkcija (1,9), sa prevashodnim uticajem brzine rezanja i ugla nagiba sečiva, kao i kvaliteta ležištenja, izvršene su dve serije jednofaktornih eksperimenata (na suvo i sa 1HP) radi dobijanja izraza  $V_o = V_o(\lambda)$ . Za ilustraciju se prikazuju rezultati dobijeni pri obradi na suvo, pri jednakim uslovima kao kod četvorofaktornog eksperimenta i srednjim nivoima režima rezanja. Za oblast variranja  $-\lambda = 5^0 - 40^0$  do-

bijeni su, primenom metode najmanjih kvadrata na izmerene vrednosti brzina samoobrtanja, izrazi

$$\omega_{OS} = 20,8 \sin\lambda \quad (15)$$

$$V_{OS} = 2,29 \sin\lambda \quad (16)$$

Na osnovu ovih izraza i utvrđenog uticaja brzine rezanja u izrazima (11,12) može se utvrditi i vrednost kinematskog koeficijenta iz

$$V_{OS} = KV \sin\lambda = 2,29 \sin\lambda \quad i \quad V = 2,7, \quad K = \frac{2,29}{V} = \frac{2,29}{2,7} = 0,85$$

i konačan izraz oblika (1)

$$V_{OS} = KV \sin\lambda = 0,85V \sin\lambda \quad (17)$$

Treba naglasiti da su pri svim izvedenim eksperimentima dobijene zadovoljavajuće - visoke vrednosti kvaliteta obradjene površine.

## 6. ZAKLJUČCI

Na osnovu svega iznetog mogu se izvući sledeći zaključci:

- 1) Teorijska i eksperimentalna ispitivanja dala su pouzdane funkcije brzine samoobrtanja kružne rezne pločice za ispitivane uslove.
- 2) Brzinu samoobrtanja odredjuju brzina rezanja, ugao nagiba sečiva i otpori trenja u ležištima, dok je uticaj preseka strugotine zanemarljiv.
- 3) Uspostavljena korelacija između ugla nagiba sečiva i brzine samoobrtanja, pa prema tome i drugih karakteristika procesa, dokazuju da se upravljanje procesom može uglavnom ostvariti izborom ugla nagiba sečiva.

## Reference

- [1] Bobrov, V.F., Ierusalimskij, D.E.: Rezanje metallov samovraščajuščimisja rezcami, Moskva, 1972.
- [2] Banjac, D., Rodić, M.: Kinematska geometrija kružnih samoobrtanih noževa, XIII savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Banja Luka, 1979.
- [3] Banjac, D., Todić, V., Sovilj, B., Rodić, M. i dr.: Tehnoekonomska optimizacija elemenata tehnologije mašinske obrade, I deo, IPM, Novi Sad, 1980.
- [4] Venuvinod, P.K., Lau, W.S., Reddy, P.N.: Some Investigations Into Machining with Driven Rotary Tools, Journal of Engineering for Industry, Vol.103, 1981.
- [5] Granovskij, G.I.: Kinematika rezanija, Moskva, 1948.
- [6] Eckstein, F.: Hydrodinamisch geschmierte Zerspanung, Werkstatt und Betrieb, 112, №10, 1979.

- [7] Zemljanskij, V.A.: Kinematika rezanija i stojkost kruglih samovraščajuščih-sja rezcov, Vestnik mašinostroenija, N°6, 1968.
- 8 Konovalov, E.G., Gik, L.A: Oblasti primenenija rotacionih rezcov, Vestnik mašinostroenija, N°8, 1969.
- 9 Komanduri, A., Flom, D.G., Lee, M.: Highligts of the DARPA Advanced Machining Research Program, Journal of Engineering for Industry, N°4, 1985.
- 10 Paškevič, M.F.: Kinematika stružkoobrazovanija i usadka stružki pri rotacionom rezanii, Izvestija vuzov - Mašinostroenie, N°7, 1975.
- 11 Simić, B.: Ispitivanje alata za obradu struganjem kružnim samoobrnim reznim pločicama, Diplomski rad, FTN, Novi Sad, 1988.
- 12 Töllner, K.: Drehen mit Kreisförmiger umlaufender Schneidscheibe, VDI-Zeitschrift, 114, N°17, 1972.

#### Zusammenfassung

Die Bearbeitung mittels Kreisförmigen Schneidplatten ergibt günstige techno-oekonomische Effekte, vor allem durch Realisierung einer zusätzlichen Kreisbewegung um die eigene Achse. Durch die Geschwindigkeit dieser Kreisbewegung erzielt man eine Steuerung des Prozesses und erhebliche Erhöhung der Standzeit und der Arbeitsbedingungen bei der Bearbeitung.

Aus den genannten Gründen werden in der Arbeit Teilergebnisse der umfangreichen theoretischen und experimentellen Untersuchungen des Bearbeitungsprozesses mit selbstdrehenden kreisförmigen Schneidplatten dargelegt, die sich vor allem auf die Bestimmung der Drehgeschwindigkeit der Schneidplatte beziehen.

P. Dašić, Lj. Papić \*)

### ODREĐIVANJE POUZDANOSTI REZNIH ALATA NA OSNOVU IZBORA NAJBOLJE RASPODELE U FAZI REALNE EKSPLOATACIJE

#### 1. UVOD

Rezni alat spada u grupu podsistema (celina) čiji otkazi prouzrokuju zastoje u radu čitavog tehnološkog ili obradnog sistema. Ujedno se i na osnovu saznanja iz teorije obrade metala može konstatovati da otkazi alata u okviru tehnološkog ili obradnog sistema zavise od čitavog niza faktora i da predstavljaju vrlo kompleksnu pojavu. Pri tome se može zaključiti da vreme do otkaza nije konstantno već predstavlja slučajnu veličinu koju možemo prognozirati /5, 6/.

Osnovni pokazatelji pouzdanosti su /9,11,13,14,15/:

- funkcija pouzdanosti ili verovatnoća ispravnog funkcionisanja sistema:

$$R(t) = P(t) = \frac{n - N(t)}{n} = 1 - \frac{N(t)}{n} = \frac{n(t)}{n} = \frac{n(t)}{n(t) + N(t)} \quad [\%] \quad (1)$$

- funkcija nepouzdanosti ili verovatnoća pojave otkaza:

$$F(t) = \frac{N(t)}{n} = 1 - R(t) \quad [\%] \quad (2)$$

- funkcija učestanosti (gustine) otkaza ili učestanost pojave otkaza:

$$f(t) = \frac{\Delta n}{n} \quad [\%] \quad (3)$$

- funkcija inteziteta (brzine) otkaza ili brzina pojave otkaza:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{\Delta n}{n(t)} = \frac{\Delta n}{n - N(t)} \quad (4)$$

gde je:

$n$  - ukupan broj posmatranih elemenata sistema,

$N(t)$  - ukupan broj neispravnih elemenata ili elemenata koji su otkazali do trenutka  $t$ ,

$n(t)$  - ukupan broj ispravnih elemenata ili elemenata koji nisu otkazali do trenutka  $t$  i

$\Delta n$  - ukupan broj otkaza po grupnom intervalu (između granica intervala).

\*) Mr Predrag Dašić, Predavač, Viša tehnička mašinska škola R. Krstića 19, Trstenik  
Mr Ljubiša Papić, Asistent, Tehnički fakultet B. Kidriča bb, Čačak



Primenom statističkih metoda, a na osnovu praćenja otkaza reznog alata u fazi realne eksploatacije, moguće je utvrditi teorijski zakon raspodele kojim se najbolje aproksimiraju eksperimentalni podaci. Prema tome cilj metodologije izložene u ovom radu je da se po određenoj proceduri, bez određenog subjektivizma o navodnoj pripadnosti eksperimentalnih podataka o otkazima pojedinih komponenti tehničkih sistema tačno određenom teorijskom zakonu raspodele, odredi pouzdanost na osnovu izbora najbolje raspodele iz reda onih koje se najčešće primenjuju u oblasti pouzdanosti tehničkih sistema. To su najčešće: eksponencijalna, normalna, Weibullova dvoparametarska, Rayleigheva, log-normalna i raspodela minimalnih ili maksimalnih vrednosti tipa I.

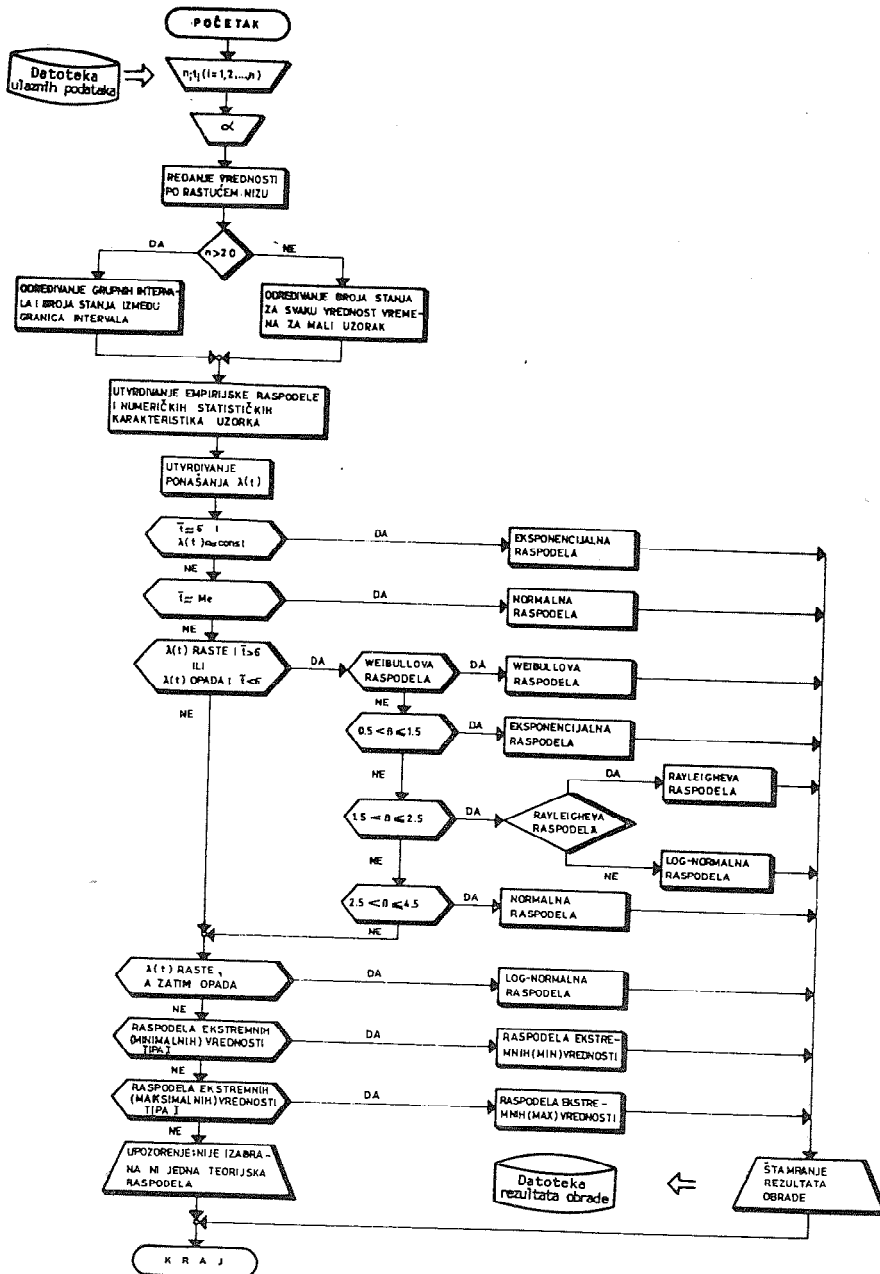
U radu je data metodologija izbora, algoritam i kratak opis programske realizacije određivanja pouzdanosti reznog alata na osnovu izbora najboljeg teorijskog zakona raspodele. Za konkretno praćenje otkaza reznog alata dat je primer primene prikazane metodologije i programa za utvrđivanje pouzdanosti reznog alata. Pri tome su prikazani: izabran teorijski zakon raspodele, karakteristike prave u verovatnosnom papiru, osnovni pokazatelji teorijskog modela pouzdanosti, provera saglasnosti eksperimentalnih podataka sa teorijskim modelom pouzdanosti pomoću neparametarskih testova i za određene verovatnoće vremena bezotkaznog rada reznog alata.

## 2. POSTUPAK UTVRĐIVANJA FUNKCIJE POUZDANOSTI KOJA NAJBOLJE APROKSIMIRA EKSPERIMENTALNE PODATKE

Postupak utvrđivanja funkcije pouzdanosti koja najbolje aproksimira eksperimentalne podatke zasniva se na veličini, odnosno obimu uzorka, vrednostima parametara i uslovima koji karakterišu određene teorijske zakone raspodele. Pri tome se mogu sresti uzorci bez grupisanja (takozvani mali uzorak kod kojeg je broj posmatranih elemenata  $n \leq 20$  ili 30 ili 50 u zavisnosti od autora) i uzorci sa grupisanjem (takozvani veliki uzorak kod kojeg je broj posmatranih elemenata  $n > 20$  ili 30 ili 50) vrednosti obeležja slučajne promenljive. Grupisanjem vrednosti obeležja slučajne promenljive stvaraju se grupni razmaci ili intervali, koji najčešće treba da budu jednaki. Ponekad je u praksi to veoma teško postići, naročito kada je varijacioni razmak veliki.

Algoritam određivanja pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu izbora najbolje raspodele obuhvata sledeće opšte algoritamske korake, odnosno sledeću proceduru (sl.1) /1,2/:

- čitanje vrednosti diskretne slučajne promenljive  $t_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) uzorka po slučajnom rasporedu iz datoteke, koja je organizovana na nekoj od spoljnih memorija,



Sl.1 Opšta grafička shema algoritma za određivanje pouzdanosti komponenti tehničkih sistema na osnovu izbora najbolje raspodele

- ređanje vrednosti diskretne slučajne promenljive  $t_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) uzorka po rastućem rasporedu,
- utvrđivanje broja posmatranih elemenata i ako je  $n \leq 20$  određivanje broja stanja za svaku vrednost  $a$  i ako je  $n > 20$  određivanje grupnih intervala i broja stanja između granica intervala,
- utvrđivanje empirijske raspodele i numeričkih statističkih karakteristika uzorka i utvrđivanje ponašanja funkcije inteziteta otkaza  $\lambda(t)$ ,
- izbor teorijskog zakona raspodele koji najbolje aproksimira eksperimentalne podatke,
- određivanje parametara teorijske prave (linerna regresija) u verovatnom papiru pomoću metode najmanjih kvadrata i ocena značajnosti koeficijenta korelacije,
- određivanje parametara teorijskog zakona raspodele i izračunavanje teorijskih pokazatelja pouzdanosti,
- provera saglasnosti empirijskog i teorijskog modela pouzdanosti pomoću neparametarskih testova i
- zapis izlaznih podataka ili rezultata obrade u datoteku, koja je organizovana na nekoj od spoljnih memorija.

Glavne karakteristike za izbor teorijskog modela raspodele koji najbolje aproksimira eksperimentalne podatke su /1,2,3,4/:

- srednje vreme bezotkaznog rada  $\bar{t}$ ,
- medijana  $M_e$ ,
- standardna devijacija uzorka  $\sigma$  i
- ponašanje funkcije inteziteta otkaza  $\lambda(t)$ .

Pri tome je procedura izbora najboljeg teorijskog zakona raspodele očita iz grafičke sheme algoritma sa sl.1.

Program po predloženoj metodologiji služi za proračunavanje najčešće korišćenih teorijskih zakona raspodele u oblasti pouzdanosti tehničkih sistema na bazi eksperimentalnih podataka u fazi realne eksploatacije. Program je rađen u FORTRAN 77 programskom jeziku na modularnom principu, a sadrži: glavni program, 22 opšta potprograma i 6 datoteka sa sekvencijalnim pristupom. Glavni program sadrži samo ulaz podataka, proceduru izbora najboljeg teorijskog modela pouzdanosti i pozive potprograma. Svaki opšti potprogram čini jednu nezavisnu programsku celinu, odnosno jedan moduo. Kompletan program je dobro čitljiv, razumljiv i metodološki poučan, a testiran je na računarskom sistemu EI-Honeywell DPS 6/95. Zbog obimnosti program se ne prikazuje.

### 3. PRIMER ODREĐIVANJA POUZDANOSTI REZNOG ALATA NA OSNOVU IZBORA NAJBOLJE RASPODELE

U cilju određivanja pouzdanosti reznog alata posmatrana je operacija struganja (zahvat spoljašnjeg konturnog struganja) zupčanika na KNU strugu MD 10S sa kontinualnom promenom broja obrtaja i koraka i pogonskom snagom mašine od 40 [KW]. Materijal zupčanika bio je Č.5421 žaren na dobru obradljivost. Rezni alat za obradu struganjem bila je izmenljiva pločica od tvrdog metala (držač pločice PDJNL 3225P 15 i izmenljiva pločica DNMG 150612 PGP015 sa poluprečnikom zaobljenja vrha alata  $r=1,2$  [mm]). Elementi režima rezanja bili su: dubina rezanja  $a=0,5$  [mm], broj prolaza  $i=1$ , brzina rezanja  $v=260$  [m/min] i korak  $s=0,2$  [mm/o], pri čemu je glavno mašinsko vreme  $t_g=0,35$  [min]. Sredstvo za hlađenje i podmazivanje bila je emulzija sa količinom protoka  $Q=45$  [l/min]. Prema gore navedenom može se zaključiti da je obrada struganjem realizovana pri konstantnim uslovima obrade (tehnološki faktori).

U toku obrade praćeni su otkazi reznog alata, pri čemu je kriterijum zaptupljenja bio tehnološki, vezan za pogoršanje kvaliteta obrađene površine (zahtevana hrapavost obrađene površine bila je  $R_a=1,6$  [ $\mu\text{m}$ ]). Otkazi reznog alata registrovani su i kao posledica otežanih uslova obrade ili pri promeni oblika strugotine. Eksperiment je realizovan u proizvodnim uslovima Industrije "14. oktobar" - Kruševac, kod veličine uzorka  $n=30$ . Otkazi reznog alata  $t$  u [min] i broj obrađenih komada do otkaza, odnosno broj obrađenih komada posle kojih je izvršena zamena reznog alata  $N$  u [kom/sec] prikazani su u tabeli T.1 /1/.

T.1

Redni broj	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$t$ [min]	14,0	15,05	15,4	14,35	13,65	13,3	15,4	14,7	15,75	16,45	16,1	16,45	16,8	15,75	16,45
$N$ [kom/sec]	40	43	44	41	39	38	44	42	45	47	46	47	48	45	47
Redni broj	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$t$ [min]	16,1	16,8	16,8	16,45	16,1	17,15	18,2	19,25	18,55	17,85	16,8	17,5	18,9	17,5	17,15
$N$ [kom/sec]	46	48	48	47	46	49	52	55	53	51	48	50	54	50	49

Na osnovu izvršene računarske obrade podataka za nivo značajnosti  $\alpha=10\%$  i za eksperimentalne podatke iz tabele T.1, mogu se uočiti glavne karakteristike na osnovu kojih se bira najbolji teorijski zakon raspodele, i to:

- srednje vreme bezotkaznog rada:  $\bar{t}=16,35$  [min],
- medijana:  $M_e=15,95$  [min],

- standardna devijacija uzorka:  $\sigma = 1,3808$  i
- ponašanje funkcije inteziteta otkaza: funkcija  $\lambda(t)$  raste.

Pošto je  $\bar{t} = 16,35 \approx M_e = 15,95$  izračunati su pokazatelji teorijskog normalnog modela pouzdanosti i proverena je njihova saglasnost sa eksperimentalnim podacima pomoću neparametarskih testova za nivo značajnosti  $\alpha = 10\%$  sl.2. Sa sl.2 može se uočiti da ima osnove da se prema testu Pearsona hipoteza o saglasnosti eksperimentalnih podataka i teorijskog normalnog modela pouzdanosti odbaci, pošto je  $\chi^2 = 4,0438 > \chi_{kr(k=1, \alpha=10\%)}^2 = 2,706$ .

NEPARAMETARSKI TESTOVI ZA PROVERU SAGLASNOSTI TEORIJSKOG  
NORMALNOG MODELA POUZDANOSTI  
Za nivo značajnosti alfa = 10 [%]

Naziv testa	k	Racun. vred	Krit. vred	Ocena
Test Pearsona	1	4.04387	2.7060	Hipoteza se odbacuje
Test Romanovskog	-	2.15234	3.0000	Hipoteza se prihvata
Test Kolmogorova	-	0.23424	1.2240	Hipoteza se prihvata
Test Kolmog. -Smir.	30	0.04277	0.2176	Hipoteza se prihvata
Test Misesa	-	0.06462	0.3473	Hipoteza se prihvata

Sl.2 Tabelarni prikaz provere saglasnosti eksperimentalnih podataka sa teorijskim normalnim modelom pouzdanosti

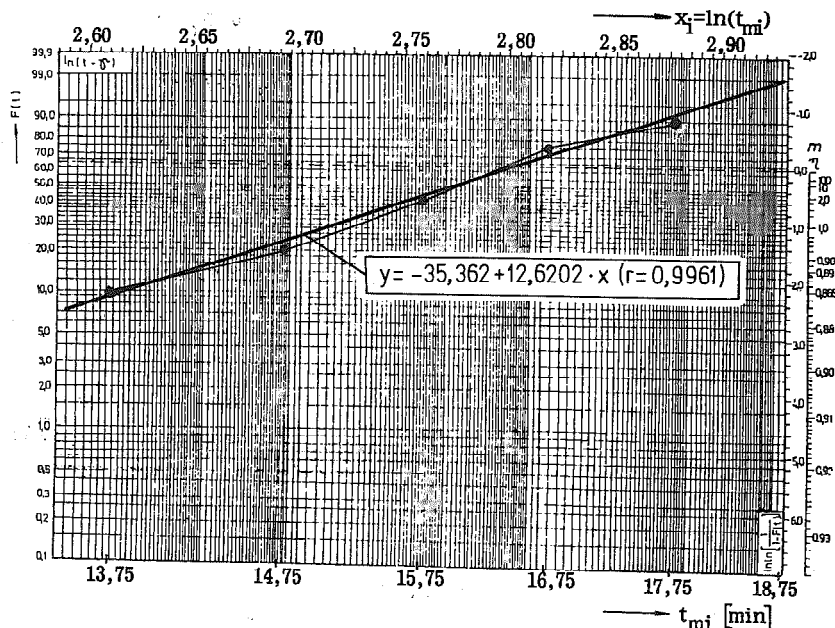
Nadalje, pošto funkcija  $\lambda(t)$  raste i pošto je  $\bar{t} = 16,35 > \sigma = 1,3808$  izračunati su pokazatelji teorijskog Weibullovog modela pouzdanosti.

Na osnovu metode najmanjih kvadrata određena je teorijska prava:

$$y = -35,362 + 12,6202 \cdot x \quad (5)$$

sa koeficijentom korelacije  $r = 0,9961$ . I ista je uporedo sa empirijskim tačkama prikazana u Weibullovom verovatnosnom papiru sl.3. Na osnovu jednačine (5) može se odrediti parametar oblika Weibullove raspodele  $\beta = 12,6202$  i parametar razmere Weibullove raspodele  $\eta = 16,4777$ .

Provera saglasnosti eksperimentalnih podataka sa teorijskim Weibullovim modelom pouzdanosti realizovana je pomoću neparametarskih testova za nivo značajnosti  $\alpha = 10\%$  sl.4. Sa sl.4 može se uočiti da se hipoteza o saglasnosti eksperimentalnih podataka i teorijskog Weibullovog modela pouzdanosti prihvata na osnovu sva pet neparametarska testa. Pri tome je kod testa Pearsona vođeno računa o objedinjavanju dva ili više susedna intervala sa  $\Delta n_e < 5$  u jedan, kako bi bio ispunjen uslov  $\Delta n_e \geq 5$ . Samim tim može se zaključiti, dosta pouzdano, da teorijski Weibullov model pouzdanosti dobro reprezentuje ekperimentalne podatke pri praćenju otkaza reznog alata.



Sl.3 Teorijska prava u Weibullovom verovatnosnom papiru

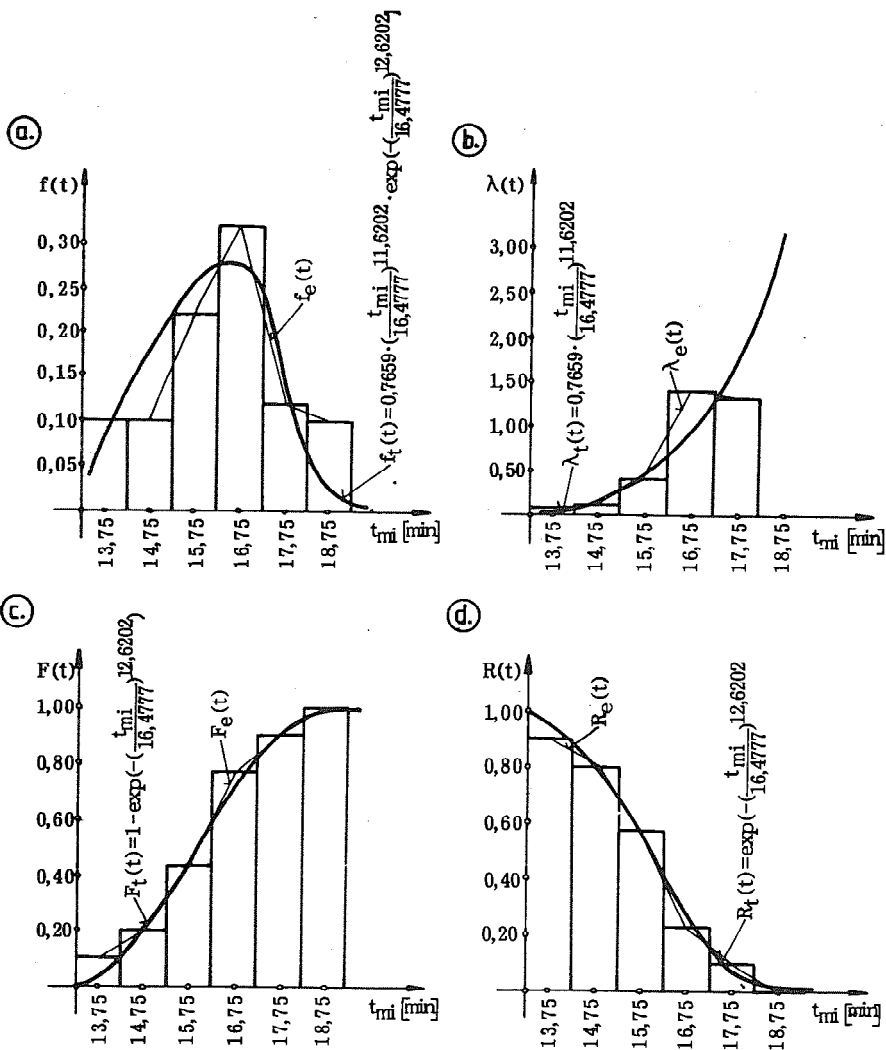
NEPARAMETARSKI TESTOVI ZA PROVERU SAGLASNOSTI TEORIJSKOG  
WEIBULLOVOG MODELA POUZDANOSTI :  
Za nivo značajnosti  $\alpha = 10$  [%]

Naziv testa	k	Racun. vred.	Krit. vred.	Ocena
Test Pearsona	1	1.74236	2.7060	Hipoteza se prihvata
Test Romanovskog	-	0.52493	3.0000	Hipoteza se prihvata
Test Kolmogorova	-	0.32331	1.2240	Hipoteza se prihvata
Test Kolmog.-Smir.	30	0.05903	0.2176	Hipoteza se prihvata
Test Misesa	-	0.06642	0.3473	Hipoteza se prihvata

Sl.4 Tabalarni prikaz provere saglasnosti eksperimentalnih podataka sa teorijskim Weibullovim modelom pouzdanosti

Na osnovu parametara  $\beta$  i  $\eta$  mogu se lako izračunati teorijski pokazatelji pouzdanosti. Pri tome su iste grafički prikazane uporedo sa empirijskim pokazateljima pouzdanosti na sl.5 i to: funkcija gustine otkaza  $f(t)$  na sl.5-a, funkcija inteziteta otkaza  $\lambda(t)$  na sl.5-b, funkcija nepouzdanosti  $F(t)$  na sl.5-c i funkcija pouzdanosti  $R(t)$  na sl.5-d.

Iz teorijskog modela pouzdanosti sa sl.5 moguće je odrediti za određenu verovatnoću vreme bezotkaznog rada. Na primer za verovatnoću 50% vreme



#### Sl.5 Empirijski i teorijski pokazatelji pouzdanosti reznog alata

bezotkaznog rada je  $T_{50\%} = 16,0061$  [min] a za verovatnoću 90 % vreme bezotkaznog rada je  $T_{90\%} = 13,7866$  [min].

#### 4. ZAKLJUČAK

Iz izloženog slede osnovni zaključci:

- Eksperimentalni deo rada realizovan je u proizvodnim pogonima Industrije

"14. oktobar" - Kruševac, što dobijenim rezultatima obezbeđuje visok stepen valjanosti,

- Programska realizacija omogućava kompletnu automatizaciju određivanja pouzdanosti reznog alata na osnovu izbora najbolje raspodele,
- Predložena metodologija omogućuje određivanje pouzdanosti reznog alata za sve tipove proizvodnje: pojedinačnu i maloserijsku proizvodnju (mali uzorak  $n \leq 20$ ) i velikoserijsku i masovnu proizvodnju (veliki uzorak  $n > 20$ ),
- Predložena metodologija omogućuje izbor funkcije pouzdanosti koja najbolje aproksimira eksperimentalne podatke na osnovu određenih karakteristika pouzdanosti, što se potvrđuje proverom saglasnosti datih modela pomoću neparametarskih testova. Ovakva metodologija omogućava u oblasti teorije pouzdanosti tehničkih sistema sveobuhvatno i pouzdano donošenje zaključaka o pouzdanosti datog reznog alata i
- Prikazani postupak utvrđivanja funkcije pouzdanosti koja najbolje aproksimira eksperimentalne podatke je opšteg karaktera i može se primeniti kod analiza pouzdanosti kako komponenti tako i složenih tehničkih sistema.

#### LITERATURA

- /1/ Dasic P., Stanic J., Papic Lj.: Reliability of Cutting Tools on the Basis of the Choice of the Best Distribution, Xth ICPR - The Tenth International Conference on Production Research, Nottingham, August 1989.
- /2/ Dašić P., Papić Lj.: Ocena parametarske pouzdanosti reznog alata na bazi izbora najbolje raspodele postojanosti, XI Jugoslovenski simpozijum NU-ROBOTI-FTS, Cavtat, 1989., s.115-122
- /3/ British Standard, BS 5760, Reliability of systems equipments and components, BSI, London, 1981.
- /4/ Zelenović D., Kamberović B., Kecojević S.: Postupak utvrđivanja parametara pouzdanosti u eksploatacionim uslovima, časopis Kvalitet i pouzdanost br. 59, God. 16 (1988), s.11-18
- /5/ Sekulić S.: Metodologija za određivanje pouzdanosti reznog alata, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad, 1983., br. 14, s.128-142
- /6/ Sekulić S.: Grafički postupak za određivanje pouzdanosti reznog alata zasnovan na broju obradaka obrađenih pojedinim alatima, XIX Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Kragujevac, 1985., s.218-222
- /7/ Popović B.: Pouzdanost reznog alata, časopis Tehnika br. 1, 1974.



- /8/ Кацев П. Г.: Оценка надежности инструмента на основу закона распределения стойкости, Надежность режущего инструмента (Сборник статей), Техника, Киев, 1972., с.33-45
- /9/ Hitomi K.: Reliability Analysis of Cutting Tools, Journal of Engineering for industry, Januar 10,1979.
- /10/ Vujanović N.: Teorija pouzdanosti tehničkih sistema, Vojnoizdavački i novinski centar, Beograd, 1987.
- /11/ Stanić J.: Upravljanje kvalitetom proizvodnje, Metodi I, IRO Građevinska knjiga, Beograd, 1985.
- /12/ Zelenović D., Stanivuković D.: Pouzdanost sistema, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 1979.
- /13/ Vukadinović S.: Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike, Privredni pregled, Beograd, 1981.
- /14/ Кацев П.Г.: Статистические методы исследования режущего инструмента, Машиностроение, Москва, 1974.
- /15/ Бетанели А.Н.: Прочность и надежность режущего инструмента, сопчота сахартвело, Тбилиси, 1973.
- /16/ Šor J.B.: Statističke metode analize i kontrole kvaliteta i pouzdanosti, SMEITS, Beograd, 1975.

P. Dašić, Lj. Papić

DETERMINATION OF THE RELIABILITY OF CUTTING TOOLS ON  
THE BASIS OF THE CHOICE OF THE BEST DISTRIBUTION IN  
THE PHASE OF REAL EXPLOATATION

S u m m a r y

The Study involves choice methodology, algorithm and the brief description of programme realisation regarding the cutting tool reliability determination on the basis of choosing the best theoretical distribution law. For the actual following of cutting tool failure there is an application example concerning the above mentioned methodology and the programme for determination of the cutting tool reliability. The chosen theoretical law of distribution, the characteristics of the theoretical live on the probability paper, the basic indicators of the theoretical model of reliability, the check of experimental data corresponding to the theoretical reliability model by the use of the non-parameter tests, as well as certain probabilities regarding the cutting tool operation time without the failure, are also shown.

S. Sekulić\*)

VEROVATNOSNA ANALIZA SREDNJEG I EKSTREMNIH VREMENA  
OTKAZA I POTREBNOG BROJA REZNOG ALATA U ZAVISNOSTI  
OD NJEGOVE POUZDANOSTI

## 1. U V O D

Normativi potrebnog broja alata najčešće se određuju na osnovu podataka o njegovoj pouzdanosti. Međutim, praćenjem ponašanja alata u proizvodnim uslovima uočava se vrlo veliko rasipanje otkaza alata, koje je posledica manje kontrolisanih uslova, veza-nih pre svega, za obradak i alat, a i ostale uslove koji prate proces. Treba naglasiti da u realnim uslovima obrade, do otkaza alata ne dolazi samo usled triboloških pojava u zoni rezanja, već i kao posledica drugih, slučajnih, poremećaja. Na osnovu gore izloženog može se zaključiti da je proces rezanja tipičan stohastički proces i da probalistički pristup na ovakve procese ima punog opravdanja [19].

2. PROGNOZA POTREBNE KOLIČINE ALATA ZA  
OBRADU ODREĐJENE KOLIČINE OBRADAKA

Ako je vreme do otkaza alata  $T$  a glavno (mašinsko) vreme po obratku  $t_g$  onda je broj obradaka koji se može obraditi jednim oštrim sečivom

$$n_{01s} = T/t_g \quad (1)$$

Ukoliko se neki novi alat može preoštriti  $i_0$  puta, broj obradaka koji se može obraditi jednim alatom iznosi:

$$n_{01a} = (i_0 + 1) n_{01s} = (i_0 + 1) T/t_g \quad (2)$$

\*) Dr Sava St. Sekulić, dipl.inž., redovni profesor Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, ul. V. Vlahovića 3.

Potreban broj alata za obradu  $n_0$  obradaka iznosi

$$N_a = n_0/n_{01a} = n_0 \text{tg}/(i_0+1)T \quad (3)$$

Ukoliko su alati sa izmenljivim pločicama od tvrdog metala, koje se ne preoštravaju, broj obradaka koji se mogu obraditi jednom pločicom sa  $x$  aktivnih ivica - sečiva, iznosi

$$n_{01p} = x n_{01s} = xT/\text{tg} \quad (4)$$

Potreban broj pločica za obradu  $n_0$  obradaka je prema tome

$$N_p = n_0/n_{01p} = n_0 \text{tg}/xT \quad (5)$$

Ekstremne vrednosti potrebnog broja alata odn. pločica iznosi:

$$N_{a \text{ max}} = n_0 \text{tg}(i_0+1)T_{\text{min}} \quad (6)$$

$$N_{p \text{ max}} = n_0 \text{tg}/x T_{\text{min}} \quad (7)$$

$$N_{a \text{ min}} = n_0 \text{tg}/(i_0+1)T_{\text{max}} \quad (8)$$

$$N_{p \text{ min}} = n_0 \text{tg}/x T_{\text{max}} \quad (9)$$

### 3. PROGNOZA SREDNJIH I EKSTREMNIH VREDNOSTI VREMENA OTKAZA ALATA

Prognozu potrebnog broja alata, prema izrazima (3) i (5) možemo realizovati, za realni stohastički proces, na osnovu srednjeg vremena bezotkaznog rada  $T = T_{sr}$ , ukoliko nam je poznata funkcija raspodela otkaza  $F(t)$ .

Kako se za otkaze alata najčešće primenjuje Weibull-ova raspodela [4,5]

$$F(t) = 1 - \exp |-(t/\eta)^\beta| \quad (10)$$

i ako su poznati njeni parametri  $\beta$  i  $\eta$  to je pouzdanost:

$$R(t) = 1-F(t) = \exp |-(t/\eta)^\beta| \quad (11)$$

frekvencija

$$f(t) = dR(t)/dt = \beta/\eta(t/\eta)^{\beta-1} \exp |-(t/\eta)^\beta| \quad (12)$$

i intenzitet otkaza

$$\lambda(t) = f(t)/R(t) = \beta/\eta(t/\eta)^{\beta-1} \quad (13)$$

a srednje vreme bezotkaznog rada se može odrediti preko gama funkcije

$$T_{sr} = n\Gamma(1/\beta+1) \quad (14)$$

Ukoliko se za određenu vrednost pouzdanosti  $R(t_z)$  zamena alata vrši nakon isteka vremena  $t_z = T$  koja joj odgovara i tada će se potreban broj alata za određenu količinu obradaka odrediti pomoću obrazaca (3) ili (5) [20].

Za primenu izrada (6) do (9) potrebno je prognozirati ekstremne vrednosti vremena otkaza alata, te preko njih i minimalne i maksimalne količine potrebnog broja alata za obradu određene količine obradaka [1-3,21].

Prema Gumbel-u određivanje ekstremnih vrednosti svodi se na grafički prikaz promene ekstremnih vrednosti  $x$  u zavisnosti od funkcije raspodele ekstrema

$$\phi(y) = \exp(-e^{-y}) \quad (15)$$

U koordinatnom sistemu  $x = \phi(y)$ . Zavisnost  $y = f(x)$  predstavlja, u ekstremnom verovatnosnom papiru, pravu liniju oblika

$$y = ax + b \quad (16)$$

Primenjujući na nju metodu najmanjih kvadrata, tj. da je zbir kvadrata pojedinih grešaka minimalan tj.

$$(\sum \Delta_i^2)_{\min} \quad (17)$$

dolazi se do sistema linearnih jednačina iz kojih se dobijaju numeričke vrednosti za  $a$  i  $b$ .

Ekstremne vrednosti nezavisno promenljive iznose

$$x = (y-b)/a = (1/a)y - b/a \quad (18)$$

Interval poverenja ekstremnih vrednosti obuhvata dijapazon  $0,15 \leq \phi(y) \leq 0,85$ , odn.  $-0,70 \leq y \leq 1,80$ .

Za  $y = 0$  je  $\phi(0) = \exp(-e^{-0}) = \exp(-1) = e^{-1} = 1/e = 0,3679$  dobija se najverovatnija vrednost slučajne promenljive  $x$  (modalna vrednost) za koju je frekvencija pojave najveća.

Pored toga na osnovu odnosa

$$T(x) = 1/|1-\phi(y)| = 1/|1-\exp(-e^{-y})| = 1/R(x) \quad (19)$$

(horizontalna osa  $T(x)$  u ekstremalnom verovatnosnom papiru) variranjem  $y$  odn.  $\phi(y)$  utvrđuje se deo uzorka na koji se prognoza ekstremnih vrednosti ne odnosi, odn. odnosi.

Deo uzorka na koji se prognoza ne odnosi iznosi

$$k_{Nm} = 1/T(x) = |1 - \exp(-e^{-y})| = 1 - \phi(y) = R(x) \quad (20)$$

a deo uzorka na koji se prognoza odnosi

$$k_{No} = 1 - k_{Nn} = 1 - |1 - \phi(y)| = \phi(y) \quad (21)$$

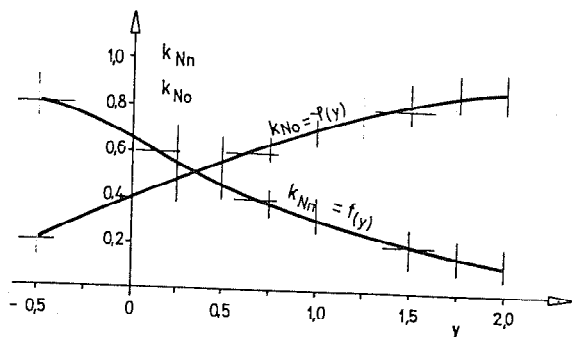
jer je

$$k_{Nn} + k_{No} = 1 \quad (22)$$

Numeričke vrednosti za  $k_{Nn}$  i  $k_{No}$  izračunate su na osnovu izraza (20) i (21) i svrstane u tablicu T.1, a njihova grafička interpretacija data je na slici Sl. 1.

Tablica T.1

y	-0,5	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0
$N_o = \phi(y)$	0,19230	0,36788	0,54524	0,69220	0,80001	0,87342
$N_n = 1 - \phi(y) = R(x)$	0,80770	0,63212	0,45476	0,30780	0,19999	0,12658



Sl. 1.

Prema tome ekstremne vrednosti brojeva alata na koje se prognoza se odnosi su

$$(N_{an})_{\min} = N_a \min k_{Nn} \quad (23)$$

$$(N_{an})_{\max} = N_a \max k_{Nn} \quad (24)$$

odn. na koje se odnosi

$$(N_{ao})_{\min} = N_a \min k_{No} \quad (25)$$

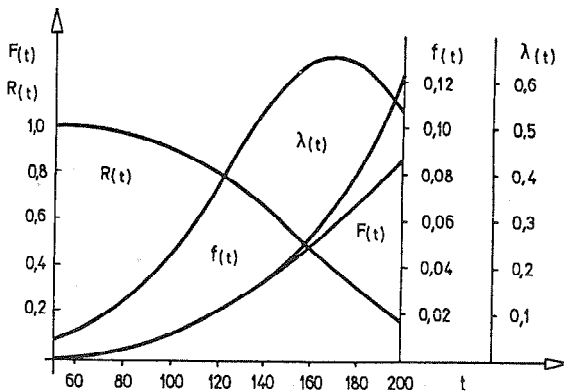
$$(N_{ao})_{max} = N_a \max k_{No} \quad (26)$$

## 4. PRIMER

Izvršiti analizu vrednosti vremena do otkaza alata i ekstremne vrednosti potrebnog broja alata za obradu 1000000 komada navrtki M16 koraka navoja  $s = 2,0$  mm i visine navrtke  $H=13$  mm, iz čelika č.0545 pri režimu obrade  $v = 0,2$  m/s ( $n=240$  min<sup>-1</sup>).

U cilju odredjivanja funkcije raspodele otkaza  $F(t)$  i analize ekstremnih vrednosti otkaza alata prečeni su otkazi na uzorku od 28 ureznika [19, 21].

U skladu sa predhodno iznetim odredjena je funkcija raspodele otkaza  $F(t)$ , frekvence  $f(t)$ , intenziteta  $\lambda(t)$  (sl. 2), i srednje vreme bezotkaznog reda  $T_{sr}$



$$F(t) = 1 - \exp \left[ -\left( \frac{t}{174,50481} \right)^{4,0666538} \right] \quad (27)$$

$$R(t) = \exp \left[ -\left( \frac{t}{174,50481} \right)^{4,0666538} \right] \quad (28)$$

$$f(t) = (1/42,911154) \left( \frac{t}{174,50481} \right)^{3,0666538} \cdot \exp \left[ -\left( \frac{t}{174,50481} \right)^{4,0666538} \right] \quad (29)$$

$$\lambda(t) = (1/42,911154) \left( \frac{t}{174,50481} \right)^{3,0666538} \quad (30)$$

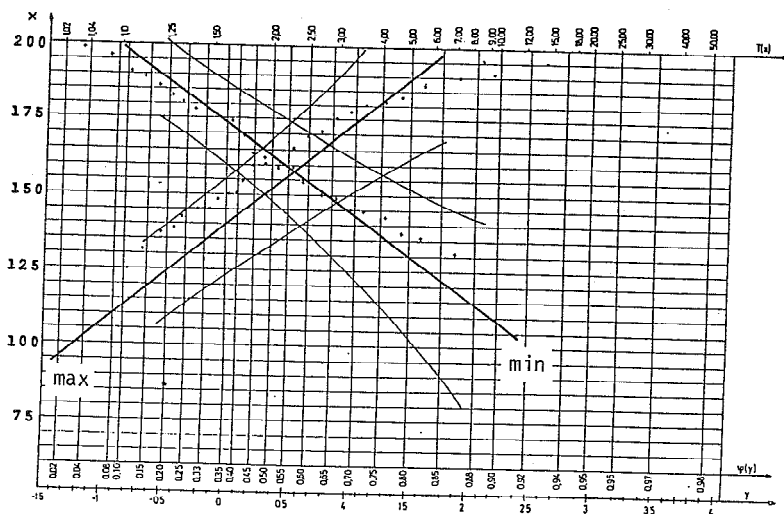
i

$$\begin{aligned} T_{sr} &= 174,50481 \Gamma(1/4,0666538+1) = \\ &= 174,50481 \cdot 0,907 = 158,276 \text{ min} \end{aligned} \quad (31)$$

kao i parametri regresionih pravih ekstremnih vrednosti maksimalnih

$$x = 32,922677 y + 139,865900 \quad (32)$$

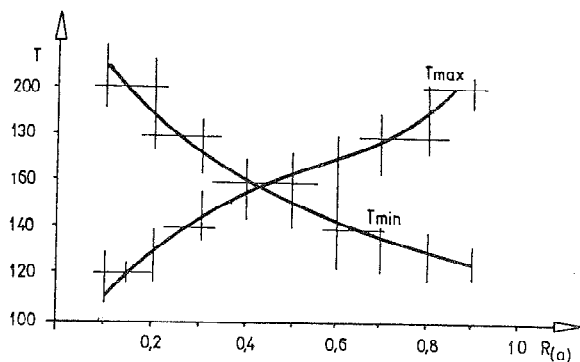
i minimalnih vremena otkaza alata (sl. 3).



S1. 3.

$$x = -29,265694 y + 172,952110 \quad (33)$$

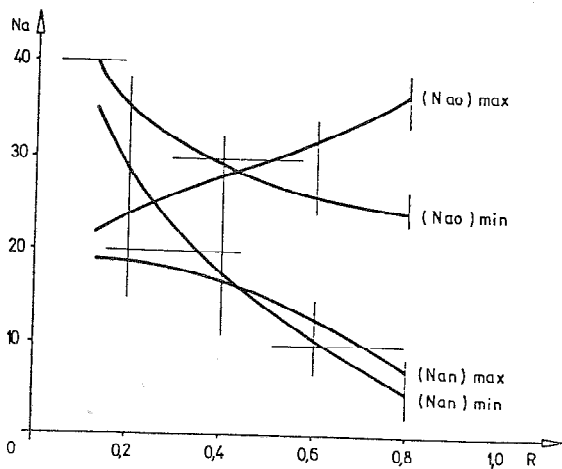
Za unapred usvojene vrednosti  $-0,50 \leq y \leq 2,00$  (koje zadovoljavaju uslov  $0,15 \leq \phi(y) \leq 1,85$ ) prema izrazima (20) i (21) određene su vrednosti  $k_{No}$  i  $k_{Nn}$  a prema (32) i (33)  $x_{max}$  i  $x_{min}$ . Na osnovu obrasca (23) do (26) izračunate su ekstremne vrednosti broja alata na koje se prognozirane vrednosti ne odnose odn. odnose. Ceo račun sproveden je u tabelici T.2, a odgovarajuće grafičke interpretacije date su na slikama S1. 4 i S1. 5.



S1. 4.

Tablica T.2

y	-0,5	0,0	0,5	1,0	1,5	2,0
$k_{No} = \phi(y)$	0,19230	0,36788	0,54524	0,69220	0,80001	0,87342
$k_{Nn} = 1 - \phi(y) = R(x)$	0,80770	0,63212	0,45476	0,30780	0,19999	0,12658
$x_{max} = T_{max}$	123,28	139,87	156,45	173,04	189,63	206,21
$x_{min} = T_{min}$	187,59	172,95	158,32	143,69	129,05	114,42
$N_{a min}$	36,64	32,29	28,87	26,10	23,82	21,90
$N_{a max}$	24,08	26,12	28,53	31,43	35,00	39,47
$(N_{an})_{min}$	25,59	20,41	13,13	8,03	4,76	2,77
$(N_{an})_{max}$	19,45	16,51	12,97	9,67	6,70	5,00
$(N_{ao})_{min}$	7,05	11,88	15,75	18,07	19,06	19,13
$(N_{ao})_{max}$	4,64	9,61	15,56	21,76	28,01	34,48



Sl. 5.

Sa slike Sl. 4 zaključujemo da visokim vrednostima pouzdanosti odgovaraju velike vrednosti prognoziranih maksimuma i male vrednosti vremena do otkaza alata, a sa slike Sl. 4 analogno slede i potrebne ekstremne količine alata. Medjutim, sa porastom pouzdanosti smanjuju se minimalne količine alata  $(N_{ao})_{min}$  a povećavaju maksimal-



ne  $(N_{a0})_{max}$  na koje se prognoze odnose.

Ekstremne modalne vrednosti dobićemo iz jednačina (32) i (33) ili sa slike Sl. 2 za  $y = 0$ , odn.  $\phi(0) = 1/e = 0,3679$

$$(T_{mod})_{max} = \sim 173 \text{ min i } (T_{mod})_{min} = \sim 140 \text{ min.}$$

## 5. Z A K L J U Č C I

Na osnovu napred izloženog mogu se doneti sledeći zaključci:

- primena Weibull-ove i Gumbel-ove (asimptotske) raspodele omogućuje prognozu srednje i ekstremnih vrednosti vremena do otkaza alata u zavisnosti od broja alata za obradu odredjene količine obradaka,
- za pojedine vrednosti pouzdanosti može se odrediti i broj alata, od prognoziranog broja, na koju se prognoza odnosi odn. ne odnosi i
- moguće je odrediti modalnu vrednost slučajne promenljive za koju je frekvencija otkaza alata najveća.

## Reference

- 1 Gumbel, E.J., Statistics of extremes, Columbia University press, New York, 1962.
- 2 Papić, Lj., Primena statistike ekstremnih vrednosti u analizi pouzdanosti tehničkih sistema, Tehnika-Mašinstvo 36 (1987)2, Beograd, 1987, T.197-203, M9-M15.
- 3 Papić, Lj., Mogućnosti primene Gumbelovog modela prognoze ekstremnih vrednosti, Zbornik radova SYM-OP-IS '87, Herceg Novi, 6-9. oktobra 1987., 623-630.
- 4 Sekulić, S., Odredjivanje pouzdanosti reznog alata u radioničkim uslovima, Zbornik radova, Prvog naučnog skupa EFTERS '75, Novi Sad, 71-82, 1975.
- 5 Sekulić, S., Statistical formulation of cutting tool reliability in a working conditions, Proc. XXI EQQC-Vama '77, Stream C, 2570270, 1977.
- 6 Sekulić, S., Odredjivanje potrebnog broja alata za obradu serije na osnovu njegove pouzdanosti, Obrada metala i tribologija, 5, 11-22, 1976.
- 7 Sekulić, S., Determination of tool quantum for application on the basis of tool reliability, Int. J. Prod.Res., Vol. 16, No. 1, 51-61, 1978.

- 8 Sekulić, S., Rezni alat kao limitirajući faktor kod protočnih automatskih linija, Zbornik radova Prvog naučnog skupa PPS'77, okt. 1977., Novi Sad, 453-463, 1977.
- 9 Sekulić, S., Total reliability of the cutting tools as a limiting factor for its replacement in automatic flow lines, Operations research Verfahren, Band 33, 389-400, 1978.
- 10 Sekulić, S., Ukupna pouzdanost reznog alata kao ograničavajući faktor za njegovu zamenu kod protočnih automatskih linija, Zbornik radova Drugog jugoslovenskog naučnog skupa EFTES '78, nov. 1978, Novi Sad, 211-224, 1978.
- 11 Sekulić, S., Troškovi alata i ukupni troškovi obrade u funkciji pouzdanosti alata kod protočnih automatskih linija, Tribologija u industriji, 1, 16-23, 1979.
- 12 Sekulić, S., Cost of cutting tools and total machining costs as a function of the cutting tool reliability in automatic flow lines, Int. J. Prod. Res., Vol. 20, No. 2, 187-200, 1982.
- 13 Sekulić, S., Odredjivanje pouzdanosti reznog alata na fleksibilnim automatskim linijama obrade, Zbornik radova KOMEOS '83, Tehnički fakultet Rijeka, 50-58, 1983.
- 14 Sekulić, S., Odredjivanje pouzdanosti reznog alata skraćenim postupkom, Zbornik radova XVII Savjetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Budva, 11-161.
- 15 Sekulić, S., Metodologije za odredjivanje pouzdanosti reznog alata, Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad, 128-142, 1983, 14.
- 16 Sekulić, S., Methodologies for determination of cutting tool reliability, Drugie miedzynarodnowe sympozijum NARZEDZIA '84, Politechnika krakowska, Krakow-Janovice, 160-164, 1984.
- 17 Sekulić, S., Determination of cutting tool reliability on flexible automatic flow lines, Toward the factory of the future, Proc. of the 8th Int. conf. on prod. Res.-ICPR '85, august 1985, Stuttgart, 163-168, 1985.
- 18 Sekulić, S., Grafički postupak za odredjivanje pouzdanosti reznog alata zasnovan na broju obradaka obradjenih pojedinim alatima, Zbornik radova XIX Savetovanja proizvodnog mašinstva Jugoslavije, septembar 1985., Kragujevac, 218-222, 1985.
- 19 Sekulić, S., Predlog načina prikupljanja podataka o postojanosti i otkazima alata u proizvodnim uslovima i njihova obrada, Zbornik radova 20. Savetovanja proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Proizvodne tehnologije, maj 1986., Beograd, 51-58, 1986.
- 20 Sekulić, S., Uzajamnost između vremena zamene i pouzdanosti alata, Zbornik radova 21. Savjetovanje proizvodnog strojarstva Jugoslavije, I knjiga, oktobar 1987, Opatija, 229-234, 1987.
- 21 Sekulić, S., Verovatnosna prognoza ekstremnih količina reznog alata za obradu odredjene količine obradaka, Zbornik radova 9. Medjunarodnog savjetovanja BIAM '88, jun 1988, Zagreb, 355-358, 1988.

S. Sekulić

THE PROBABILISTIC ANALYSIS OF MEAN AND EXTREMAL TIMES  
OF FAILURES AND NEEDED QUANTITIES OF CUTTING TOOLS  
AS A FUNCTION OF ITS RELIABILITY

S u m m a r y

In the paper the procedure for prognosis and analysis of mean and extremal values of the needed quantities of work pieces, with using of Weibull's distribution and Gumbel's model (asymptotic distribution type I), are presented.

Z. HARAČIĆ, A. MIŠKOVIĆ \*

PRILOG STUDIJI RAZVOJA METODA ZA DEFINISANJE  
EKSPLOATACIONIH KARAKTERISTIKA ALATA\*\*

1. UVOD

Pod eksploatacionim karakteristikama alata podrazumijeva se sveukunost osobina koje uslovljavaju njegovu sposobnost da ostvari proces rezanja za određeno vrijeme uz zadane režime obrade, obezbjeđujući određeni kvalitet obrade.

Funkcionalni kvalitet alata zavisi od velikog broja faktora koje možemo svrstati u slijedeće grupe: konstrukcija alata, osobina materijala alata i kvaliteta izrade alata.

U toku rada dolazi do oštećenja reznih elemenata alata usljed mehaničkih i toplotnih opterećenja.

Na ovim problemima radilo je više autora [1],[2],[3] koji su razvili niz metoda kojima su definisani pokazatelji kvaliteta alata i pouzdanosti rada alata.

U radu su predloženi rezultati istraživanja teorijsko-eksperimentalne metode /vibracija-ubrzanja/ za definisanje kvalitativnih pokazatelja za definisanje funkcionalnog kvaliteta.

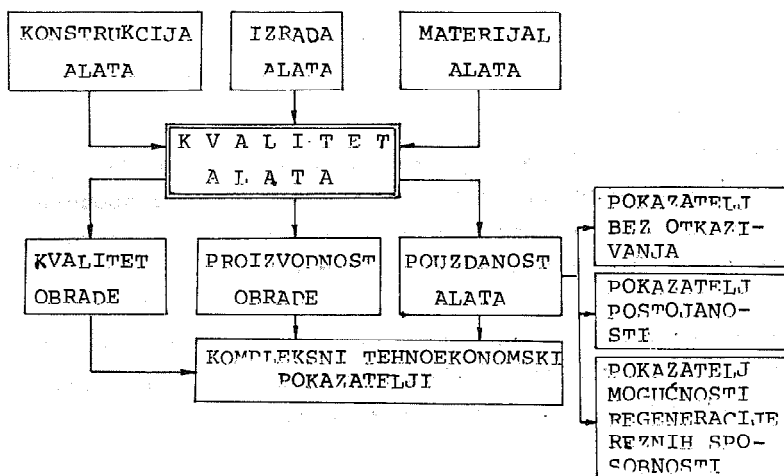
---

\* Zilad Haračić, dipl.ing. Vazduhoplovni zavod "ORAO" Ratlovac  
dr Anto Mišković, dipl.ing, profesor Mašinskog fakulteta  
u Mostaru

\*\* Rad je sastavni dio naučnoistraživačkog projekta "Produktika" kojeg finansira republička zajednica za naučni rad SR BiH i više organizacija udruženog rada.

## 2. KLASIFIKACIJA POKAZATELJA KVALITETA ALATA

Pored konstrukcije i osobine materijala alata na kvalitet alata utiče i kvalitet izrade koji zavisi od kvaliteta tehnološke opreme, tehnološkog procesa, načina proizvodnje, organizacije kontrole i ispitivanja alata.



Slika 1. Šematski prikaz pokazatelja kvaliteta i pouzdanosti alata

Pokazatelji kvaliteta reznog alata, u toku eksploatacije su: pokazatelji pouzdanosti alata, proizvodnost i kvalitet obrade dijelova.

Površina naprezanja koja izazivaju plastičnu deformaciju reznog dijela alata mogu se predstaviti jednačinom:

$$\sigma_P = \sigma_R + \sigma_Q + \sigma_T \neq \sigma_K \quad (1)$$

gdje je:  $\sigma_R$  - naprezanje uslijed otpora rezanja,  
 $\sigma_Q$  - toplotna naprezanja,  
 $\sigma_T$  - naprezanje koje odgovara predjelu tečenja  
 $\sigma_K$  - naprezanje uslijed impulsa sile rezanja/.

Visoki specifični pritisci, visoke temperature rezanja i trenje na kontaktnim površinama u zoni rezanja, izazivaju postepeno oštećenje - habanje grudne i leđne površine. Određena vrijednost širine pojasa habanja na leđnoj površini uzima se kao kriterij zatupljenja.

Ako je otkazivanje alata prouzrokovano habanjem onda se vjerovatnoća raspodjele postojanosti predstavlja jednačinom:

$$f(T) = \frac{1}{6\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{T - T_{sr}}{\sigma} \right)^2} \quad (2)$$

/pri čemu je:  $T_{sr}$  - srednja vrijednost postojanosti alata,  
 $\sigma$  - distribucija/.

Krzanje i lom alata dovodi do trenutnog gubljenja reznih sposobnosti alata a nastaje kod preopterećenja sječiva alata usljed toplotnih i mehaničkih naprezanja.

### 3. OSNOVNE KARAKTERISTIKE EKSPERIMENTALNO-TEORIJSKE METODE /VIBRACIJA-UBRZANJA/ I USLOVI ISPITIVANJA

Uporednim mjerenjem postojanosti alata i ubrzanja pri vibracijama noža izazvanim procesom obrade utvrđena je korelacija između mjernih veličina. Na osnovu tako dobivene korelacije-zavisnosti stvorena je mogućnost uvođenja metodologije mjerenja ubrzanja pri obradi umjesto mjerenja postojanosti alata.

Obezbjedjenom instrumentacijom i razvijenom metodologijom može se optimirati proces obrade odnosno geometrija alata uz znatno kraće vrijeme ispitivanja i manji utrošak alata i materijala.

U toku istraživanja korištena je legura nikla NIMONIC 263 koja ima:

- velika otpornost na smicanje,
- sklonost ka otvrdnjavanju u toku obrade,
- prisustvo tvrde, abrazivne intermetalne smjese u mikrostrukturi materijala,
- niska toplotna provodljivost, što rezultira koncentracijom toplote u zoni rezanja

Hemijski sastav legure NIMONIC 263 je propisan British standardom FR.10:

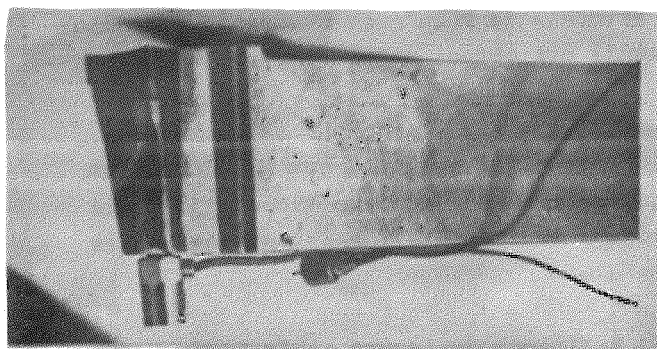
Element	C	Si	Mg	S	Ag	Al	B	Pi
%	0,04-0,08	0,4	0,06	0,007	0,0005	0,6	0,005	0,0001

Element	Co	Cr	Cu	Fe	Mo	Pb	Ti	Al+Ti	Ni
%	19-21	19-21	0,2	0,7	5,6-6,1	0,002	1,9-2,4	2,4-2,8	ost.

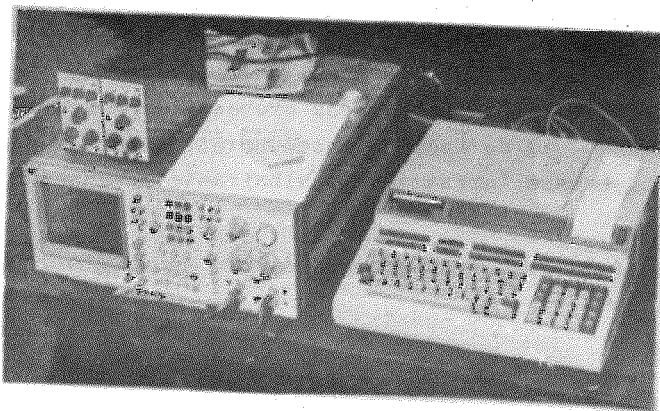
Legura NIMONIC 263 je prvenstveno namjenjena za izradu omotaša (plašteva) i prstenova na tzv. toplom dijelu turbomlaznih motora.

Mjerenja su vršena na CNC vertikalnom strugu "SCHIESS".

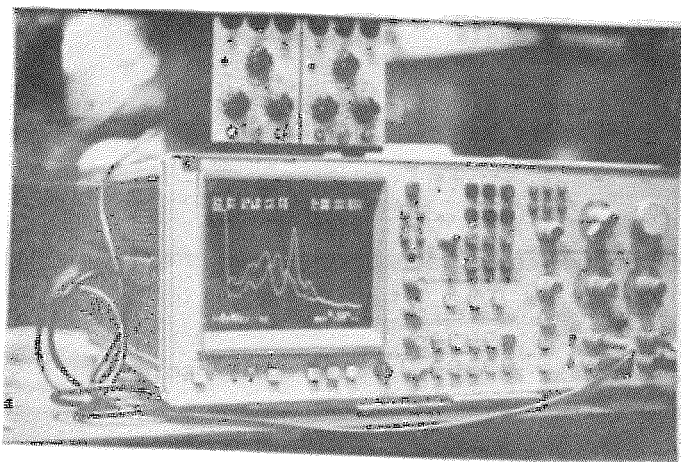
Za potrebe ovog ispitivanja je korišten nož sa mehanički držanom pločicom PDJNR 3225P10, s tim što je za mjerenje ubrzanja bilo neophodno da se ugrade akcelerometri. Rezna geometrija je varirana oštrenjem pločice KNUX 16040S-R12 kvaliteta PGP 1025.



lika 2. Izgled stružarskog noža sa ugradjenim akcelerometrom



Slika 3. Oprema za mjerenie ubrzanja pri vibracijama (pojačivači signala, spektralni analizator, računar i digitalni ploter x-y



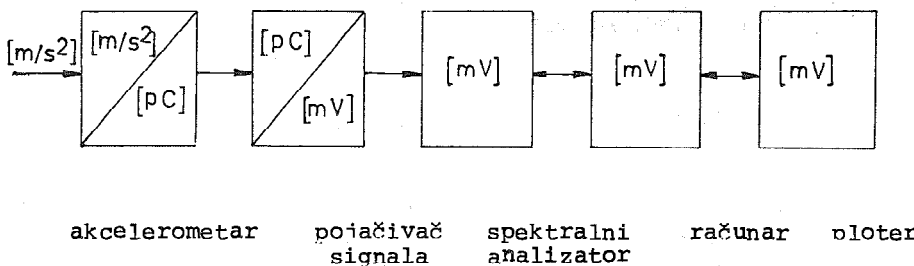
Slika 4. Spektralni analizator HP 3582 A

Mjerna konfiguracija je tako sastavljena da se u akcelerometrima (mjernim pretvaračima) koji su ugrađeni u nož, mehanička veličina ubrzanja  $(m/s)^2$  pretvara u proporcionalni signal električnog naboja (pC). U mjernom pojačalu se signal električnog naboja pretvara u standardni naponski signal (mV),



koji se potom mjeri na spektralnom analizatoru i prikazuje u dijagramima dobijenim na X-Y ploteru. Prema tome, izvršeno je linearno pretvaranje mehaničke veličine ubrzanja u električnu veličinu napona, a po potrebi je moguće svaku registrovanu veličinu električnog napona prevesti u odgovarajuću veličinu ubrzanja, te će radi jednostavnosti, u daljem tekstu upotrebljavati termin 'ubrzanje pri vibriranju' i označavati sa  $U$  (mV).

Principijelna šema ovih transformacija data je na slici 5:



Slika 5: Šema transformacije mehaničke veličine ubrzanja u električnu veličinu napona pri mjerenju vibracija

#### 4. REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA FUNKCIONALNOG KVALITETA ALATA

Pri ispitivanju pošlo se od modela za optimizaciju rezne geometrije noža u obliku:

$$T = Y = B_0 X_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_3 X_3 + B_1 X_1^2 + B_2 X_2^2 + B_3 X_3^2 + B_{12} X_1 X_2 + B_{13} X_1 X_3 + B_{23} X_2 X_3 + B_{123} X_1 X_2 X_3 \quad (\min) \Big| \max \quad (3)$$

odnosno

$$U = Y = B_0 X_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_3 X_3 + B_1 X_1^2 + B_2 X_2^2 + B_3 X_3^2 + \\ + B_{12} X_1 X_2 + B_{13} X_1 X_3 + B_{23} X_2 X_3 + B_{123} X_1 X_2 X_3 \text{ [mV]} \Big| \min \quad (4)$$

Koristeći elemente za optimizaciju [2], [7] promjenljive  $x_1, x_2, x_3$  predstavljaju vrijednosti vektora

$$x = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix}^*$$

a predstavljanju brojčane vrijednosti kojima se opisuje proces bušenja. Vektor  $x$  ima različite vrijednosti za različite konstrukcije alata i uslove obrade. Cilj je da se nađe takav vektor  $x$  koji maksimizira funkciju  $T(x)$ , odnosno minimizira  $U(x)$ .

Matematskom obradom podataka i pretpostavljenih modela dobivene su slijedeće vrijednosti parametara modela.

$$T = 6,74\alpha + 1,25\alpha^2 - 0,27\gamma^2 - 0,20\alpha^2 + 0,17\gamma\alpha - 84,16 \text{ [min]} \quad (5)$$

$$U = 1532,12 + 2,31\alpha^2 + 0,19\gamma^2 - 66,67\alpha - 21,25\gamma \text{ [mV]} \quad (6)$$

Prema kriteriju (5) imamo optimalne vrijednosti uslova:

$$\gamma_{opt} = 10,675^\circ, \alpha_{opt} = 12,127^\circ \text{ i } \beta_{opt} = 58,38^\circ, \text{ dok su}$$

$$\text{optimalne vrijednosti } \gamma_{opt} = 10,50^\circ, \alpha_{opt} = 14^\circ 15' \text{ i}$$

$$\beta_{opt} = 67^\circ 35' \text{ za kriterij (6).}$$

\* U našem slučaju to su (grudni ugao  $\gamma$ , ledni ugao  $\alpha$  i napađni ugao  $\beta$ ).

Faktori	Plan $2^3 + 1$				Eksp. T (min)	Pažun T (min)	Eksp. U (mV)	Račun U (mV)
		$\gamma$ [°]	$\alpha$ [°]	$\beta$ [°]				
osnovni nivo		10,5	11,5	60				
interval varij.		4,5	5,5	15				
Gornji nivo		15	17	75				
donji nivo		6	6	45				
kod faktora	$X_0$	$X_1$	$X_2$	$X_3$				
1	1	-1	-1	-1	27,92	22,82	471	433,67
2	1	1	-1	-1	14,40	25,60	500	421,67
3	1	-1	1	-1	9,44	24,72	357	302,17
4	1	1	1	-1	25,20	27,50	357	290,17
5	1	-1	-1	1	7,92	18,16	410	357,67
6	1	1	-1	1	13,00	20,94	415	345,67
7	1	-1	1	1	16,80	20,06	319	226,17
8	1	1	1	1	20,00	22,84	237	214,17
9	1	0	0	0	31,76	22,83	199	323,92
10	1	0	0	0	37,04	22,83	178	323,92
11	1	0	0	0	32,12	22,83	248	323,92
12	1	0	0	0	37,72	22,83	196	323,92

## 5. ZAKLJUČCI

Na osnovu iznijetog datu se slijedeći zaključci:

- Rezultati ispitivanja su pokazali da rezna geometrija ima veliki uticaj na postojanost alata kao i na intenzitet vibracija (ubrzanja) koje se javljaju pri obradi.
- Analiza izabраних parametara ubrzanja vrši se u tzv. spektralnom a ne u vremenskom domenu.
- Tehnika mjerenja je dosta jednostavna, a mjerenja traju veoma kratko što razvijenoj metodologiji daje poseban značaj.
- Za sagledavanje zakonitosti između parametara režima obrade, alata i stanja u zoni rezanja sa jedne strane i parametara (vibracija-ubrzanja) potrebno je nastaviti sa istraživanjima.

## LITERATURA:

- [1] Haračić Z. "Optimizacija obrade struganjem legure NIMONIC 263" - Magistarski rad, Mašinski fakultet Mostar 1988. godine
- [2] Stanić J. "Metod inženjerskog mjerenja - Osnove matematičke teorije eksperimenata" Mašinski fakultet Beograd 1981.
- [3] Vukelja D. Mišković A. "Konstrukcija alata za obradu rezanjem" Mašinski fakultet Mostar 1983. god.
- [4] J.G. Bollinger: "Machine-tool vibration" - chapter 40 "Shock and vibration"
- [5] Allen J. Curlis "Concepts in vibration data analysis" chapter 22 "shock and"
- [6] Haračić Z. Mišković A. "Prilog studiji optimizacije procesa obrade struganjem legure "NIMONIC 263", - VIII kongres Aeronautike Mostar 1987. god.
- [7] Vukelja D. Mišković A. "Inženjerske metode optimizacije sa primjerima iz prakse, Građevinska knjiga Beograd 1985. god.

Z. Haračić, A. Mišković,

ESSAY SUPPLEMENT THE DEVELOPMENT METHOD OF  
FUNCTIONAL QUALITY TOOL DEFINING INTENDED

S u m m a r y

In metal working industry, particularly with processing expensive and sophisticated materials, there is a need to specify in service tool characteristics fast. The study presents essential suppositions of "vibration-acceleration" method for testing processibility and for evaluating tool quality. Results obtained by the above method in productions on Nickel base alloy NIMONIC 263, confirm the method validity, as well as the advantages in relation to "wear" method.



S.Radonjić, V.Šolaja\*

NOVI MODEL KORELACIJE HABANJA ALATA I  
KVALITETA POVRŠINE PRI OBRADI NA STRUGU

1. UVOD

Pri svakoj obradi nameće se problem uspostavljanja korelacije habanja alata, kao vremenski promenljive funkcije i kvaliteta generisane površine.

Ovaj problem je posebno izražen pri završnim obradama.

Tako je, pri završnoj obradi čelika na strugu, u uslovima pojave koncentrisanog habanja alata, ovaj problem rešavan kako od strane domaćih istraživača tako i od stranih.

Drugi autor je, kao što je poznato, prezentirao domaćoj i stranoj javnosti tri modela (u širim vremenskim intervalima) za uspostavljanje korelacije koncentrisanog habanja alata i kvaliteta generisane površine /2,3/. Poslednji model je najsavršeniji i najviše odgovara stvarnom obliku pohabanog alata sa jednim žljebom koncentrisanog habanja, zbog čega je i visok nivo poklapanja teorijskih rezultata ( $R_{at}$  i  $R_{zt}$ ) dobijenih po ovom modelu i stvarnih izmerenih veličina ( $R_a$  i  $R_z$ ).

Koristeći kao polaznu osnovu ovaj model, a na bazi velikog broja eksperimentalnih istraživanja koncentrisanog habanja alata /1/, u ovom radu se predlaže novi, znatno uprošćeniji model za proračun parametra hrapavosti  $R_{at}$ .

2. NEKE NAPOMENE O KONCENTRISANOM HABANJU

Koncentrisano habanje se javlja na pomoćnoj ledjnoj površini na mestu izlaza sečiva iz obradjene površine. Najpre se

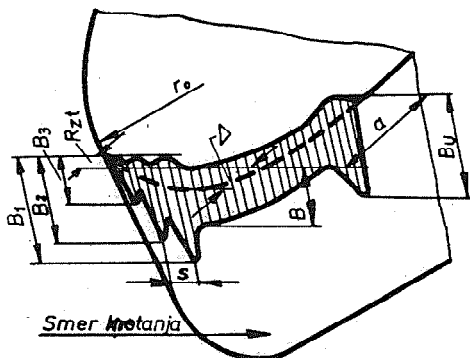
---

\*/ Dr Vladimir Šolaja, dipl.ing., redovni profesor  
Mašinskog fakulteta u Beogradu, ul.27.marta 80

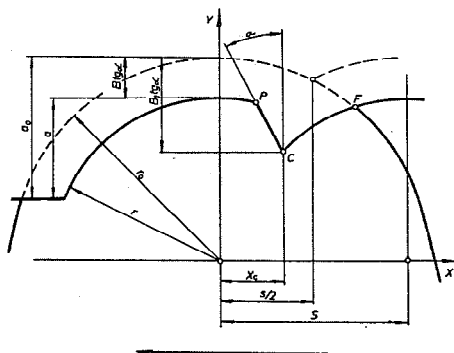
Dr Snežana Radonjić, dipl.ing.docent Tehničkog  
fakulteta u Čačku, ul.Borisa Kidriča 65

javlja jedan žljeb sa dužinom  $B_1 > B$  (sl.1), a sa vremenom rezanja, u zavisnosti od uslova obrade, mogu da se pojave više žljebova i to na rastojanju koje odgovara koraku  $s$  (mm/o). Pošto su formirani žljebovi na delu sečiva koji je u kontaktu sa obradjenom površinom, to direktno utiču na kvalitet obrade.

Na slici 2. prikazan je treći teorijski model drugog autora, sa jednim žljebom označenim tačkama P-C-F i elementima koji ga definišu (položaj žljeba u odnosu na meridijansku ravan - osa  $y$ ). Formirani žljeb se pomera u pravcu pomoćnog kretanja alata, jer se sa vremenom rezanja produbljuje i proširuje. Ovim modelom je obuhvaćena i promena položaja žljeba sa vremenom rezanja. Na slici 7. (a,b) dati su uporedni rezultati, dobijeni po ovom modelu (parametri hrapavosti  $R_{at}$  i  $R_{zt}$ ) i izmerene vrednosti.



Sl.1. Vrh alata sa koncentrisanim habanjem



Sl.2. Teorijski model koncentrisanog habanja alata /2,3/

### 3. MATEMATSKI MODEL ZA KORELACIJU KONCENTRISANOG HABANJA ALATA I KVALITETA POVRŠINE

Na slici 3. predstavljen je uprošćeni model koncentrisanog habanja alata za proračun parametra  $R_{at}$ . Kod ovog modela je prvi žljeb (P-C-F na sl.2.) predstavljen u vidu trougla ABC. U ovom trouglu vremenski promenljive veličine su dubina žljeba  $b_1$  i ugao  $\alpha_1$ .

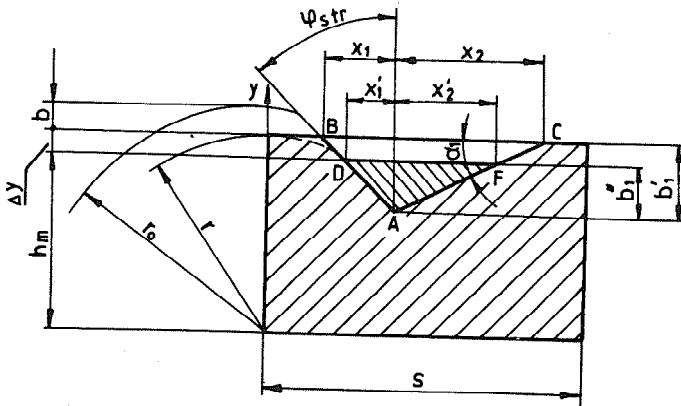
Na bazi izmerenih veličina sa pohabnog alata:

$B$  - širina pojasa habanja i

$B_1$  - dužina prvog žljeba (sl.1) određuju se veličine

$b = B \cdot \operatorname{tg} \alpha$  - radijalno habanje i

$b_1 = B_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha$  - dubina žljeba (posmatrano sa grudne strane alata)  
gde je  $\alpha$  - ledjni ugao.



Sl.3. Uprošćeni model koncentrisanog habanja alata

Teorijska veličina hrapavosti je:

$$Rz_{to} = r_0 - \sqrt{r_0^2 - s^2/4} \quad \dots (1)$$

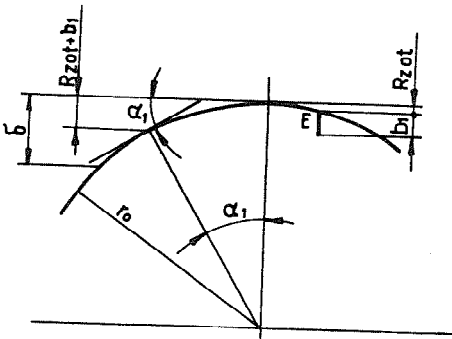
gde je:

$r_0$  - radijus oštrog alata,

$s$  - korak (mm/o).

Ugao  $\alpha_1$  određuje se prema slici 4., i predstavlja ugao koji zaklapa tercijarno sečivo sa pravcem pomoćnog kretanja, a određuje ga tangenta na radijusu u tački čiji je položaj u funkciji dubine žljeba  $b_1$ :

$$\alpha_1 = \arccos\left(1 - \frac{Rz_{to} + b_1}{r_0}\right) \quad \dots (2)$$



Sl.4. Određjivanje ugla  $\alpha_1$



Dobijene vrednosti za ugao  $\alpha_1$  po ovom izrazu poklapaju se sa izmerenim vrednostima na alatima.

Ugao koji sekundarno sečivo zaklapa sa y-pravcem (pravcem meridijanske ravni) slika 3., usvojen je kao konstanta, a odgovara uglu odvođenja strugotine  $\varphi_{str}$  (tačka 3.1).

Veća šrafirana površina na sl.3. određuje se:

$$A = s(r_0 - b) - (x_1 + x_2)b_1'/2 \quad \dots (3)$$

gde je:  $x_1 = b_1' \operatorname{tg} \varphi_{str}$ ,

$$x_2 = b_1' / \operatorname{tg} \alpha_1,$$

$$b_1' = (Rz_0 + b_1) - b,$$

zamenom ovih elemenata u izraz (3) i sredjivanjem dobija se:

$$A = s(r_0 - b \operatorname{tg} \alpha) - \frac{[Rz_0 + \operatorname{tg} \alpha \cdot (B_1 - B)]^2}{2} \cdot \left( \operatorname{tg} \varphi_{str} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_1} \right) \quad \dots (4)$$

Srednja linija profila određuje se:

$$h_m = A/s \quad \dots (5)$$

pa je veličina površine manjeg šrafiranog trougla ADF (sl.3.)

$$A_1 = (x_1' + x_2') b_1'' / 2 \quad \dots (6)$$

U ovom izrazu je:

$$x_1' = b_1'' \operatorname{tg} \varphi_{str}$$

$$x_2' = b_1'' / \operatorname{tg} \alpha_1$$

$$b_1'' = b_1' - \Delta y, \text{ a}$$

$$\Delta y = (r_0 - b) - h_m.$$

Zamenom u izraz (6) i sredjivanjem, dobija se:

$$A_1 = \frac{(Rz_0 + B_1 \operatorname{tg} \alpha - r_0 + h_m)^2}{2} \left( \operatorname{tg} \varphi_{str} + \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_1} \right) \quad \dots (7)$$

Srednje odstupanje profila može da se iskaže prema definiciji ovog parametra sa:

$$\operatorname{Rat}' = 2A_1/s \quad \dots (8)$$

Zbog aproksimacije ugla u tačku B (umesto radijusa - isprekidana linija na crtežu sl.3.), kao i uzimanje tercijarnog sečiva AC kao pravu liniju (u stvarnosti je nešto zaobljena), gre-

Ška koja se pravi u proračunu je manja od 10% (prilog 1./1/ ), pa se predlaže, da se proračunata vrednost po izrazu (8) uveća za 10% :

$$\text{Rat} = 1,1 \text{ Rat}' \quad \dots (9)$$

### 3.1. UGAO SEKUNDARNOG SEČIVA $\varphi_{\text{str}}$

Ugao koji sekundarno sečivo zaklapa sa pravcem meridijske ravni, prema hipotezi /1/ odgovarao bi uglu odvodjenja strugotine.

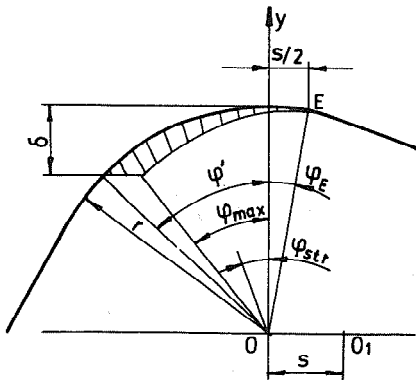
Proračun ovog ugla se vrši prema izrazima ruskih autora /4/ :

$$\varphi_{\text{str}} = \frac{2 \cdot \delta (2 \cdot \varphi_{\text{max}} - \varphi_E) + a_{\text{max}} \cdot \cos \varphi_{\text{max}} (\varphi' + \varphi_E)}{6 \delta} \quad \dots (10)$$

gde je prema slici 5.:

$$a_{\text{max}} = r - \sqrt{r^2 - 2s \sqrt{\delta(2r - \delta)} + s^2} \quad \text{- maksimalni presek strugotine,}$$

$$\varphi_E = \arcsin \frac{s}{2r}; \quad \varphi_{\text{max}} = \arcsin \frac{\sqrt{\delta(2r - \delta)} - s}{r - \delta} \quad \text{i} \quad \varphi' = \arcsin \frac{r - \delta}{r}.$$

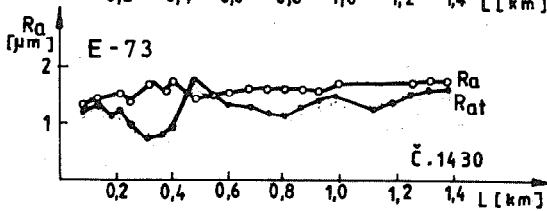
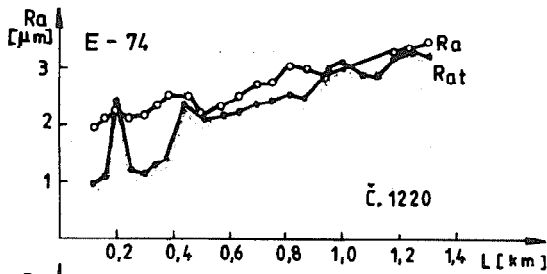
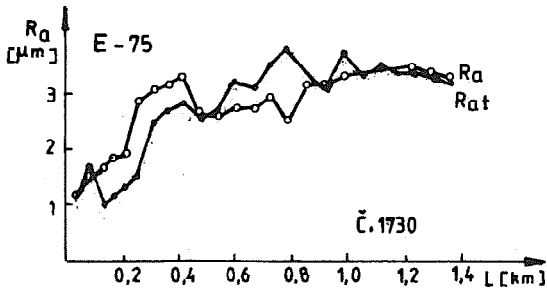


Sl.5. Šema odredjivanja ugla klizanja strugotine  $\varphi_{\text{str}}$

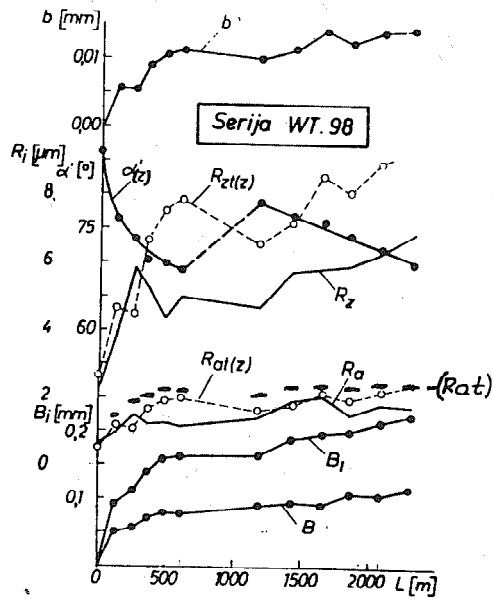
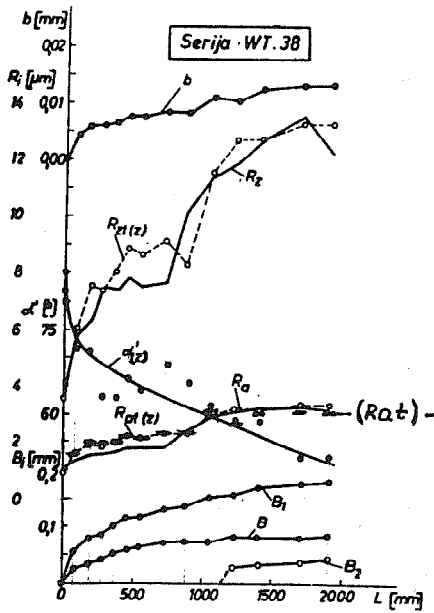
### 4. PROVERA PREDLOŽENOG MATEMATIČKOG MODELA ZA PRORAČUN PARAMETRA HRPAVOSTI Rat

Uporedni rezultati dobijeni eksperimentalnim putem (pri obradi tri različita materijala sa režimima:  $v=165$  m/min (č.1730)  $v=170$  m/min (č.1430),  $v=199,7$  m/min (č.1220),  $s=0,107$  mm/o i  $\delta=0,2$  mm, alat: P10,  $r=0,4$  mm) i računskim putem po predloženom modelu dati su na slici 6.

Pošto se radilo o velikom broju tačaka (u dijagramima) proračun



Sl.6. Komparativni rezultati parametra hrapavosti ( $R_a$ ) dobijeni merenjem i proračunom po modelu ( $R_{at}$ )



Sl.7. Komparativni rezultati dobijeni po modelu sl.2. /2,3/ i po predloženom modelu ( $R_{at}$ )--

parametra  $Rat=f(B, B_1)$  je izvršen na računaru.

Analizom rezultata može da se konstatuje visok nivo poklapanja stvarnih-izmerenih veličina i proračunatih po predloženom modelu.

Na slici 7. dati su, za dva eksperimenta /2,3/ uporedni rezultati po modelu sl.2. i po predloženom modelu sl.3. Ovakva komparativna analiza je napravljena za veći broj eksperimenata /2,3,4/ i skoro kod većine eksperimenata nisu zapažena veća odstupanja proračunatih od izmerenih veličina.

### 5. ZAKLJUČAK

Jednostavnost predloženog modela koncentrisanog nahanja alata za proračun srednjeg odstupanja profila  $Rat$  se ogleda u sledećem:

- koristi mali broj promenljivih veličina sa pohabanog alata  $B$  i  $B_1$ . Poznavajući ove veličine, kao i ulazne parametre  $r_0$ ,  $\alpha$ ,  $s$  i  $\delta$ , moguće je veoma brzo, i u toku procesa obrade, izračunati trenutnu hrapavost pri završnoj obradi struganjem,
- zbog jednostavnog proračuna može da se upotrebi u proizvodnim uslovima gde ne postoji aparat za merenje hrapavosti obradjene površine.

Proverom modela, došlo se do rezultata koji pokazuju visok nivo poklapanja eksperimentalnih i proračunatih veličina.

### Reference

- [1.] Radonjić S.: Dalji prilozi ispitivanju završne obrade na strugu, doktorska disertacija, Beograd, 1986.
- [2.] Šolaja V.: A Contribution to the Surface Finish Evaluation in Machining, 22. CIRP Conference, Stockholm, 1972.
- [3.] Šolaja V.: Novi model korelacije nahanja alata i kvaliteta površine pri strugovanju, Tehnika, (Mašinstvo) 2, 1973.
- [4.] Alejničenko F.G., Filonenko N.S.: Napravljenje shoda stružki pri tonkom točenju rezcima s zakrugleljnoju veršinoju, Odessa, Rezanje i instrument, Harkov, 1973., №8, 126-134.

S. Radonjić, V. Šolaja

A NEW MODEL CORRELATING TOOL WEAR  
AND SURFACE QUALITY IN TURNING

S u m m a r y

A simplified theoretical model of concentrated tool wear for the calculation of mean profile Ra deviation is given in the paper. When two variable values from the worn out tool  $B$  and  $B_1$  and the incoming parameters  $r_0$ ,  $\alpha$ ,  $s$  and  $\delta$  are known, it is possible to calculate immediate roughness of the worked surface very quickly.

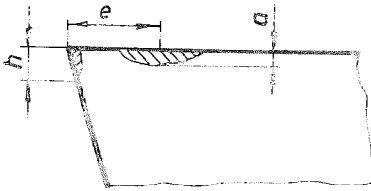
FUNKCIONALNA ZAVISNOST IZMEDJU KVANTNO TEMPERATURNE STANJA I VEKA TRAJANJA REZNE IVICE

V. Gordić, V. Šolaja, D. Vukelja \*

1. UVOD

Pošto habanje reznog alata direktno utiče na produktivnost, dimenzijsku tačnost, kvalitet obrađene površine ili na dinamičku stabilnost obradnog sistema, postojanosti alata se poslanja značajna pažnja.

Prema slici 1., pri obradi na strugu, a usled trenja između obrađene i ledne površine, odn. strugotine i grudne površine, dolazi do habanja alata, što kao posledicu ima njegovo zatupljenje posle izvesnog vremena.



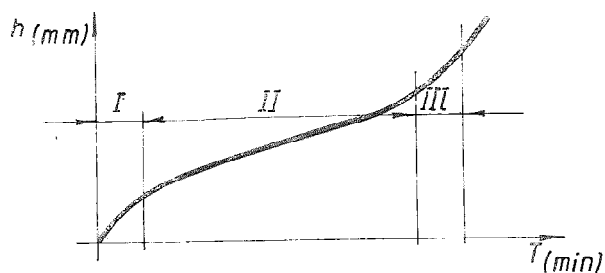
Sl. 1. Izgled habanja na lednoj i grudnoj površini alata: a-dubina kratera, e-udaljenost dna kratera od sečiva, h-širina pojasa habanja na lednoj površini.

\* Prof. dr Vujo Gordić, dipl.mašin.ing, Viša tehnička škola Titovo Užice

Prof. dr Vladimir Šolaja, dipl.mašin.ing, savetnik "LOLA" Instituta

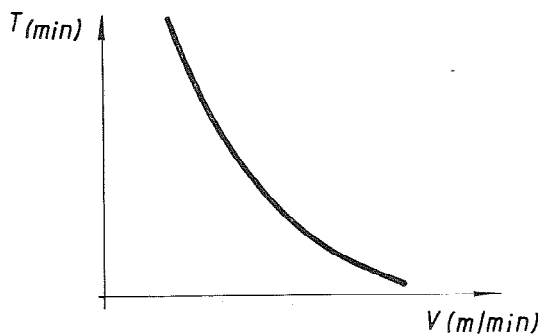
Prof. dr Dušan Vukelja, dipl.mašin.ing, Mašinski fakultet, Kragujevac.

Uzimajući širinu pojasa habanja na lednoj površini  $h$  kao meru postojanosti alata, intenzitet gubitka reznih svojstva posredstvom tog habanja, a pri nepromenjenim uslovima rada, može se pratiti u vremenu,  $h=f(T)$ , slika 2. Variranjem brzine



Sl.2. Širina pojasa habanja reznog alata  $h$  u zavisnosti od vremena rezanja  $T$ : I faza: inicijalno habanje, II faza: normalno habanje, III faza: intenzivno (katastrofalno) habanje.

rezanja  $v$ , i utvđujući neku širinu pojasa  $h=h_k$  kao kriterijum postojanosti, može se ona iskazati u zavisnosti od  $v$ , slika 3. Pritom Taylor-ov empirijski izraz za postojanost alata kao funkcija



Sl.3. Postojanost reznog alata  $T$  u zavisnosti od brzine rezanja  $V$ , pri  $h=h_k$

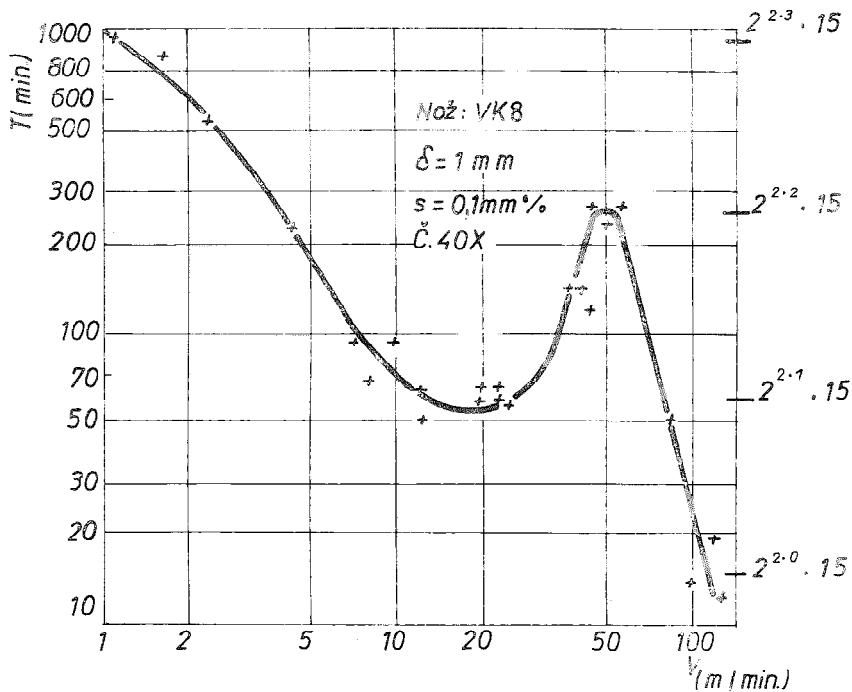
brzine rezanja glasi

$$T = C/V^Z,$$

gde su  $C$  i  $z$  - konstanta i eksponent, čije veličine zavise od vrste materijala obratka, vrste alata i obrade, primenjenog sredstva za hlađenje i podmazivanje i drugih proizvodnih uslova.

## 2. NEKI STRANI NALAZI

Brzina rezanja  $v$  je jedan od najuticajnijih faktora postojanosti alata, te je neophodno naći veze postojanosti alata i brzine rezanja,  $T = f(v)$ . Eksperimentalnim putem se dolazi do ovakve zavisnosti, i kao primer se iz [1] navodi slika 4., pri čemu su za različite brzine  $v$  merene odgovarajuće postojanosti alata  $T$ . Uočava se da za širok dijapazon  $v$  kriva  $T = f(v)$  nije

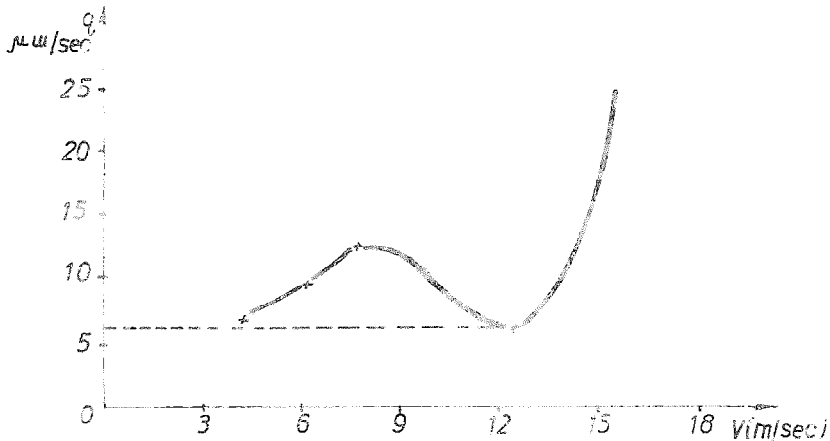


Sl. 4. Postojanost alata  $T$  u zavisnosti od brzine rezanja  $v$  [1].

monotono opadajuća kriva (postoji "oscilatorni" karakter), dok je, eliminišući neprihvatljivo niske brzine rezanja, optimalna postojanost u uskom području  $v$ .

Nadalje, u području brušenja volframkarbid-kobaltnog tvrdog metala VK8 grupa istraživača [2] je došla do krive prikazane na slici 5.

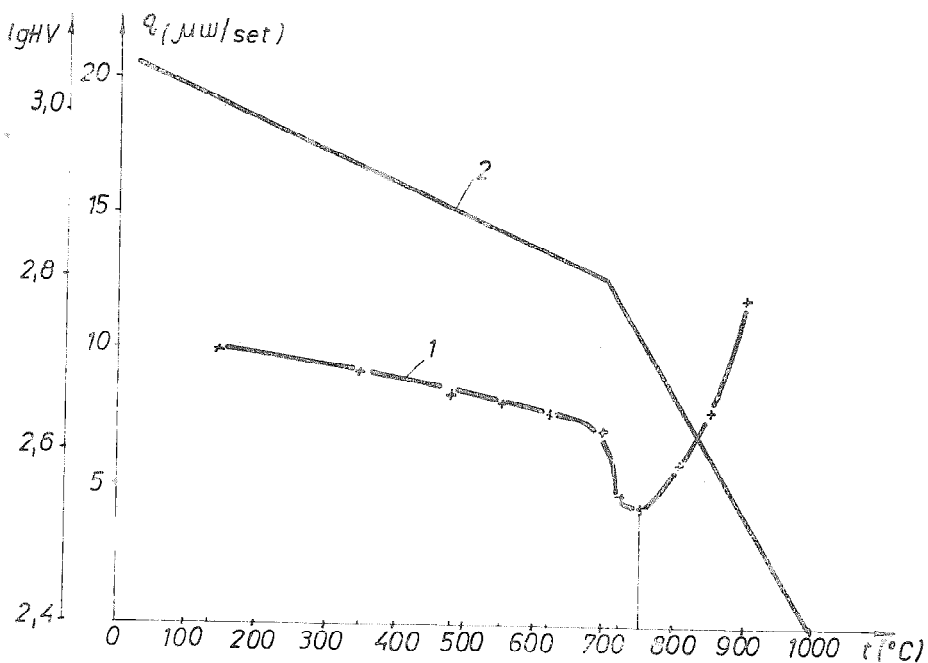




Sl. 5. Zavisnost dubine skinutog sloja  $q$  tvrdog metala VKB od brzine brušenja  $v$  pri specifičnom pritisku točila  $p = 17 \text{ gr/mm}^2$  [2].

Iako je reč o različitim operacijama, moguće je poređenje ishoda prema slikama 4. i 5.: očigledno je, naime, da je u procesu brušenja "postojanost tvrdog metala" vezana za brzinu operacije, i da čini nemonotonu ("oscilatornu") krivu  $q=f(v)$ . Ispitujući takođe i međuzavisnost "postojanosti tvrdog metala"  $q$  i varijacije temperature  $t$  došli su, nadalje, do dijagrama na Sl. 6.

Bez daljih komentara moguće je konstatovati da slike 4. - 6. iz [1] i [2] ne sugerišu monotoni, već "oscilatorni" karakter zavisnosti habanja reznog alata od temperature rezanja.



Sl. 6. Zavisnost brzine skidanja (kriva 1) i tvrdoće tvrdog metala VK8 (kriva 2) od temperature zagrevanja pri  $V=15,7$  m/sec i  $p=17$  gr/mm<sup>2</sup> [2].

### 3. NALAZI IZ NAŠIH ISTRAŽIVANJA

Cilj istraživanja koje je bilo prikazano u radu [3] bio je da se eksperimentalno proveri hipoteza o postojanju kritičnih temperatura za određeni alatni materijal pri kojima dolazi do bitnog smanjenja postojanosti, uz istovremeno sagledavanje moguće zakonitosti.

Hipoteza [4] se sastojala u sledećem: Ako orbitalnom sistemu, sl. 7, dovedeno količinu toplotne energije, ova će, posle određenog vremena, povećati unutrašnju energiju i izvršiti odgovarajući rad po izobari, pod uslovom da sistem, u toku procesa, nije iz okoline primio niti odao okolini količinu energije.

U tom slučaju jednačina glasi:

$$dU + dW = 0, \quad (1)$$

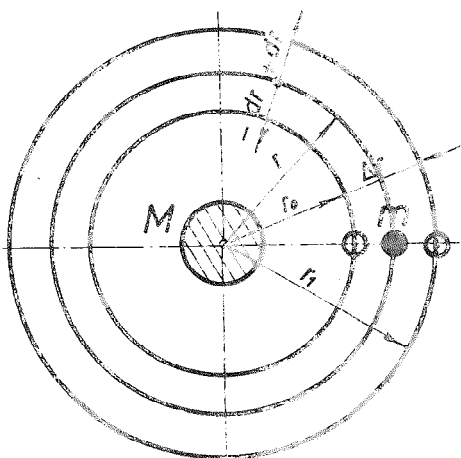
gde je:

$$dU = \dot{C}_p(M+m)dT \text{ i} \quad (2)$$

$$dW = p dV = F dr, \quad (3)$$

$$F = \gamma \frac{M \cdot m}{r^2}, \quad (4)$$

gde je:  $M$  i  $m$  - mase sa Sl. 7;  $\gamma$  - gravitaciona konstanta;  $r$  - razmak između masa sa Sl. 7.;  $F$  - Njutnova sila gravitacije;  $C_p$  - specifični toplotni kapacitet;  $dT$  - promena temperature;  $dr$  - promena poluprečnika.



Sl. 7. Orbitalni sistem:  $M$  - centralna masa;  $m$  - satelit (trabant)

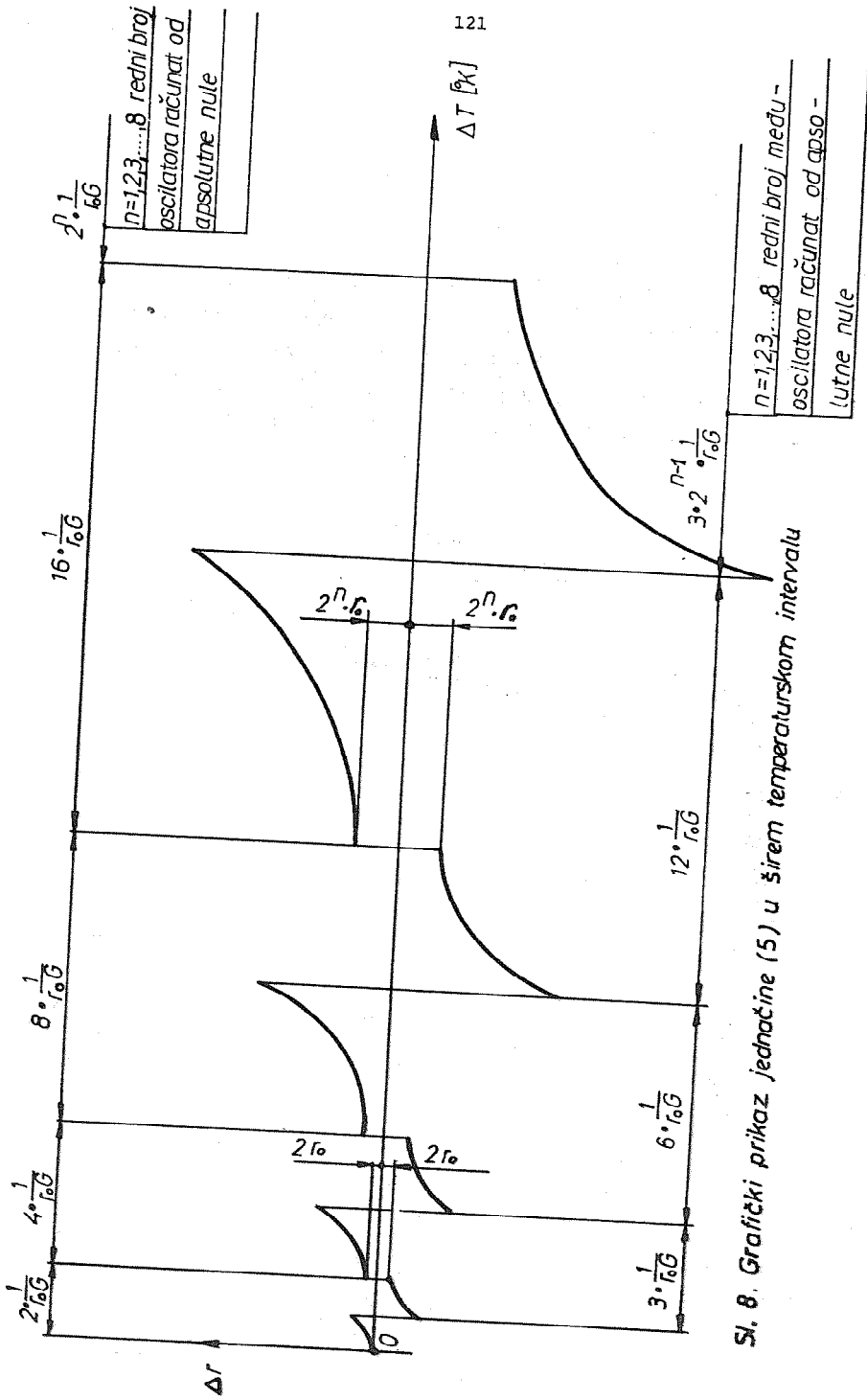
Zamenom jednačine (2) i (3), koristeći jednačinu (4), u jednačinu (1), a zatim integraljenjem jednačine (1) po temperaturi -  $T$  i poluprečniku -  $r$ , dobijamo jednačinu:

$$\Delta r = r_0 \left( \frac{1}{1 - r_0 \cdot G \cdot \Delta T} - 1 \right), \quad (5)$$

gde je:  $\Delta r = r_1 - r_0$  - prirast poluprečnika pri promeni temperature,

$$\Delta T = T_1 - T_0, \text{ a}$$

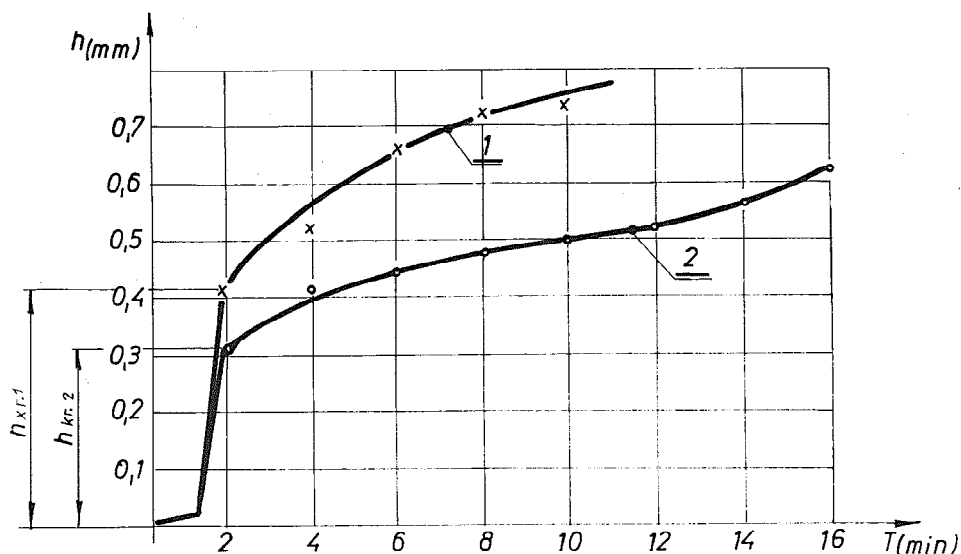
$$G = \left( \frac{1}{M} + \frac{1}{m} \right) C_p \quad (6)$$



Sl. 8. Grafički prikaz jednačine (5) u širem temperaturskom intervalu

Grafički prikaz jednačine (5) dat je na Sl. 8.

U ispitnim serijama korišćene su pločice tvrdog metala vrste P-20, SPUN 120308, proizvodnje "Prvi partizan", Titovo Užice, obradak iz Č.1940, poboljšanog na 49 - 51 HRC, tehnološki parametri rezanja:  $s = 0,214\text{mm/o}$ ,  $\delta = 0,25\text{mm}$ ,  $v = 45\text{ m/min}$  (pri  $d = 64,5\text{ mm}$ ), i dobijen je dijagram na sl.9. Pritom se kriva 1 odnosi na standardnu pločicu, dok kriva 2 na istu pločicu prethodno zagrevanu na oko  $800^\circ\text{C}$  u laboratorijskoj peći "Balzers", tipa MFU 105 (progrevanje oko 30 min sa hlađenjem na sobnu temperaturu).



Sl. 9. Postojanost alata P-20 "Prvi partizan", Titovo Užice: kriva 1-standardna pločica, kriva 2-standardna pločica progrevana 30 min na  $800^\circ\text{C}$  i hlađena na sobnu temperaturu [3].

Pored različitog toka dveju krivih  $h=f(T)$  na slici 9., ne se razlikuju u pogledu inicijalnog habanja (I faza) sa slike. Približno posle 90 sec. na sečivu se pojavila varnica u trajanju oko 5 sec. Merenja neposredno pre pojave varnice nisu pokazivala tragove pohabanosti na leđnoj površini, dok se merenjem neposredno posle pojave varnice pokazivalo da je pohabanost naglo orastala. To je omogućilo pretpostavku o diskontinuitetu krive abanja  $h=f(T)$ , i to kako na prelazu iz I u II, tako i iz II u

III zonu<sup>1)</sup>.

Krive 1 i 2 na slici 9. predstavljaju srednju vrednost iz opita sa tri pločice<sup>2)</sup>. Uočava se uticaj dopunskog termičkog tretmana na sniženje veličine pojasa habanja pri krzanju ( $h_{kr2}$  u odnosu na  $h_{kr1}$ ), što ukazuje da je krzanje od presudnog značaja za postojanost, te na  $h_{kr}$  valja obratiti posebnu pažnju.

U nastavljanju opita, i pri istim ostalim uslovima ( $v = 59$  m/min.), izvedena su dva termička tretmana: (i) grejanje na oko  $800^{\circ}\text{C}$  u laboratorijskoj peći "Balzers" tipa MFU 105, sa progrevanjem oko 30 min. i hlađenjem na sobnu temperaturu pre rezanja, i (ii) sa ponovnim grejanjem iste pločice na oko  $255^{\circ}\text{C}$  u laboratorijskoj peći "Heraeus" tipa MR 170 E, vreme progrevanja oko 30 min., rezanje je izvedeno u dve varijante. Nalazi su bili sledeći (srednje vrednosti iz tri ponovljena opita):

(i) sa hlađenjem (alat je na vazduhu sa  $255^{\circ}\text{C}$  slobodno ohlađen na sobnu temperaturu) je posle jednog minuta rezanja utvrđeno da je srednja vrednost pojasa habanja  $h_{(i)} = 0,24$  mm,

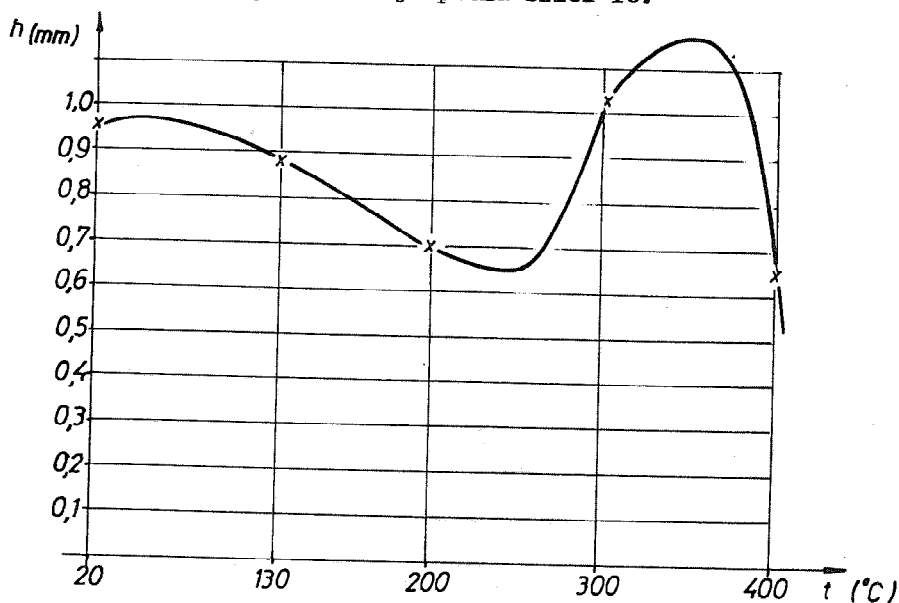
(ii) bez hlađenja (zagrejana pločica na  $255^{\circ}\text{C}$  je stavljena u držač i odmah se počelo sa rezanjem) je posle jednog minuta rezanja utvrđeno da je srednja vrednost pojasa habanja  $h_{(ii)} = 0,66$  mm.

U trećoj eksperimentalnoj seriji, inače izvedenoj pri istim osnovnim okolnostima ( $v = 57$  m/min.) sa prethodno tretiranim pločicama na oko  $800^{\circ}\text{C}$  (peć "Balzers"), hlađenim na sobnu temperaturu i potom tretiranim (peć "Heraeus") na  $20^{\circ}\text{C}$ ,  $130^{\circ}\text{C}$ ,  $200^{\circ}\text{C}$ ,  $300^{\circ}\text{C}$  i  $400^{\circ}\text{C}$ , sa potom neposrednim rezanjem bez hlađenja. U opitima rezanjem koji su trajali po četiri minuta dobijene su sre-

1) Prema ranijoj eksperimentalnoj evidenciji se čini, međutim, da ovo ne mora nužno da važi i za predeo tzv. "koncentrisanog habanja" alata, pošto se tragovi prvog žljeba sa "izlazne" strane sečiva zapažaju već posle kratkog početnog perioda rezanja [5].

2) Prvo su na jednoj pločici bez temperaturnog tretmana dobijene tačke za krivu 1, zatim njegovom primenom (uz okretanje pločice) kriva 2, što je ponovljeno tri puta.

dnje vrednosti pojasa habanja prema slici 10.



Sl. 10. Postojanost alata u funkciji temperature prethodnog zagrevanja iz treće eksperimentalne serije.

#### 4. MOGUĆE GENERALIZACIJE NA OSNOVU NALAZA

Eksperimentalna evidencija iz prethodna dva odeljka omogućuje da se utvrdi sledeće: (i) postojanost alata  $T=f(v)$  i  $q=f(v)$ , prema slikama 4. i 5., se ponaša nemonotono ("oscilatorno"), (ii) postojanost alata u zavisnosti od temperature je delimično naznačeno na slikama 6. i 10. i (iii) postojanost alata  $h=f(T)$  je izneta u slikama 2. i 9.

Iako bi dalja razmatranja valjalo da budu od opšte važnosti, kao konkretan primer se uzima tvrdi metal P-20 koji je bio korišćen u našim opitima. Na osnovu različitih izvora može se pretpostaviti da je najviša temperatura pri kojoj tvrdi metal može još da reže oko  $1000^{\circ}\text{C}$ , te bi se ona mogla smatrati jednom od kritičnih temperatura.

Na slici 10. se uočavaju dva maksimuma, prvi između  $300$  i  $400^{\circ}\text{C}$ , a drugi između  $20$  i  $130^{\circ}\text{C}$ . Prevođeći Celzijusove stepene

u Kelvinove dobija se  $1000^{\circ}\text{C} = 1272\text{ K}$ ). Nanese li se  $1272\text{ K}$  na temperatursku pravu i podeli na dva jednaka dela dobija se temperatura  $636\text{ K}$ , a ona leži između  $300$  i  $400^{\circ}\text{C}$ . Daljem deobom  $636\text{ K}$  sa dva dobija se  $318\text{ K}$ , a ona leži između  $20$  i  $130^{\circ}\text{C}$ . Na taj bi se način za tvrdi metal P-20 mogle definisati sledeće kritične temperature:  $1272\text{ K}$ ,  $636\text{ K}$  i  $318\text{ K}$ , saglasno jednačini (5) i sl. 8.

Pored kritičnih temperatura na kojima dolazi do naglašenog habanja postoje i optimalne temperature na kojima je habanje minimalno: u eksperimentima [3] su izdvojene temperature  $255^{\circ}\text{C} = 527\text{ K}$  i oko  $800^{\circ}\text{C} = 1072\text{ K}$ .

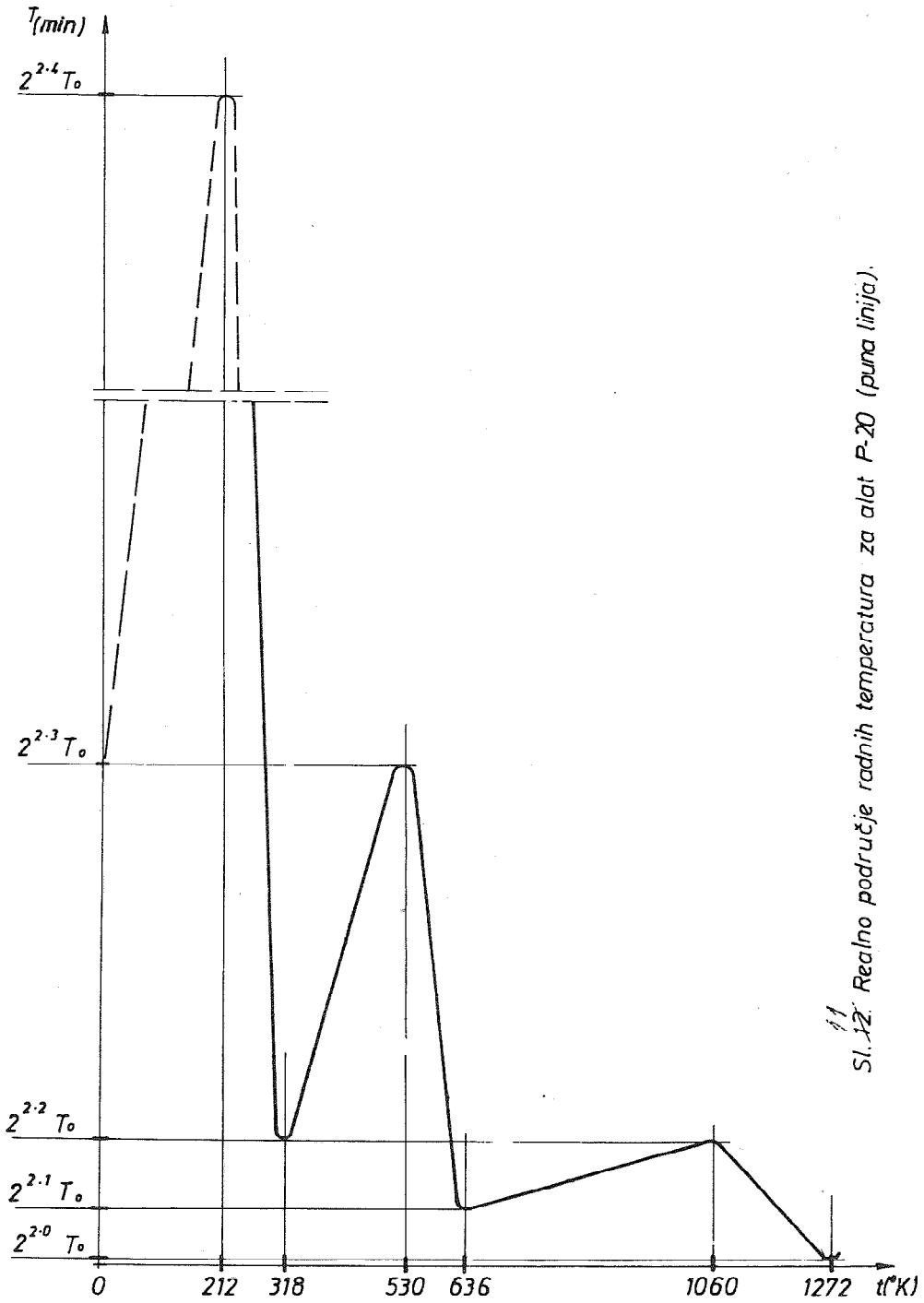
Moguće je, nadalje, sprovesti sledeće rezonovanje: za postojanost alata,  $T = f(v)$  prema slici 4. mogu se uneti s desne strane brojevi koji bi mogli da predstavljaju opštu zakonomernost nivoa maksimuma ili minimuma postojanosti  $T$  u obliku  $(2^{2 \times n} \times 15) = T$  (min), gde je  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Količnik dva uzastopna minimuma  $(2^{2 \times 0} \times 15) : (2^{2 \times 1} \times 15)$  je četiri odnos između dva uzastopna maksimuma  $(2^{2 \times 2} \times 15) : (2^{2 \times 3} \times 15)$  je takođe četiri. Odnos između maksimuma i desnog minimuma  $(2^{2 \times 2} \times 15) : (2^{2 \times 0} \times 15)$  ili  $(2^{2 \times 3} \times 15) : (2^{2 \times 1} \times 15)$  je šesnaest. Odnos između maksimuma i levog minimuma  $(2^{2 \times 2} \times 15) : (2^{2 \times 1} \times 15)$  je četiri.

Saglasno eksperimentalnim nalazima [3], za kritične temperature pri kojima habanje alata postaje izrazito, na dijagramu  $T = f(v)$  su minimumi. I obrnuto, za maksimume na dijagramu  $T = f(v)$  dobija se optimalno korišćenje alata. Moguće je da se pretpostavi da lokalni maksimum leži levo od lokalnog minimuma (koji odgovara kritičnoj temperaturi) približno na jednoj trećini temperaturske vrednosti razmaka dva uzastopna minimuma (kritične temperature), na primer  $(1272\text{ K} - 636\text{ K}) : 3 = 212\text{ K}$ , odnosno  $1272\text{ K} - 212\text{ K} = 1060\text{ K}$ , itd.

Sada bi, uz poznavanje kritičnih temperatura, koristeći jednačinu (5) i sl. 8. valjalo da bude moguće konstruisati dijagram  $T = f(t)$  poznavajući samo jednu vrednost postojanosti,  $T_{\min}$  ili  $T_{\max}$ . Saglasno tome je na slici 11. nacrtan dijagram  $T = f(t)$  za alat iz tvrdog metala P-20. Pritom su korišćene kritične

3)  $273,16\text{ K}$  zamenjeno je sa  $272\text{ K}$  zbog deljivosti sa parnim brojem

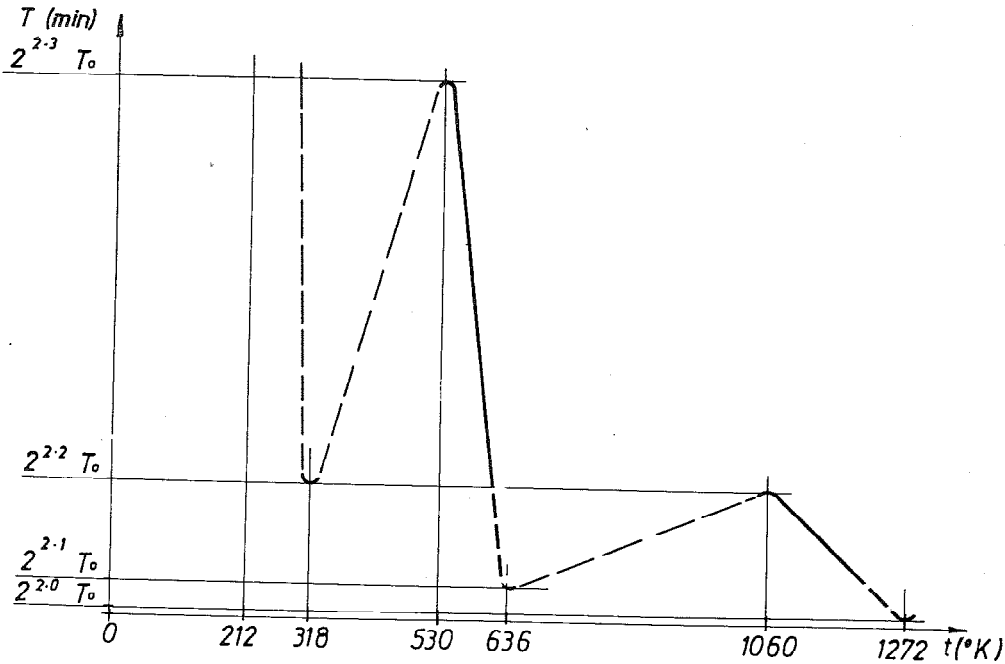




Sl.11. Principijelni izgled krive postojanosti karbidnog alata P-20 u zavisnosti od temperature  $T = f(t)$ .

Sl.12: Realno područje radnih temperatura za alat P-20 (puna linija).

čne temperature 318 K, 636 K i 1272 K, a takodje i izložene očekivane zakonomernosti ostalih činilaca.



Sl.12. Realne područje radnih temperatura za alat P - 20 (puna linija).

Valja napomenuti da su za krivu na slici 11. egzaktno temperature i međusobni odnosi maksimuma i minimuma. Tok krive između pojedinih maksimuma i minimuma (i obrnuto) je aproksimiran pravom linijom, iako je eksperimentalno i analitički utvrđeno da je reč o hiperboli. Takodje  $T_0(\text{min})$  nije izmereno zbog neraspolaganja preciznijim uređajima. Bez obzira na te manjkavosti, kriva na slici 11. bi uz pomoć izvedenih eksperimenata [3], slike 4. [1], jednačine (5) i sl. 8. mogla da predstavlja dobru osnovu za optimizaciju u procesu rezanjem alatom sa pločicom iz tvrdog metala vrste P-20.

Na kraju je moguće prema slici 12. pokušati sa optimizacijom alata iz P-20. Iz slike 12. je jasno da je puna linija - linija optimalnog korišćenja alata: trošiti, naime, jednako alat, pri nižim temperaturama usled manje brzine rezanja, umesto pri

većim brzinama i višim temperaturama ne bi moglo da bude prihvatljivo sa stanovišta produktivnosti i ekonomičnosti.

Dok bi se u principu za svaki alatni materijal moglo izvesti slično, za alat P-20 se može generalno konstatovati: opravdano je projektovati tehnološki proces koji će se odvijati u temperaturskom području 530 K do ~600 K i 1060 K do ~1200 K, ukoliko iz nekih razloga nije već moguće da se održavaju optimalne temperature 530 K i 1060 K.

## 5. ZAKLJUČAK

Na osnovu iznetih informacija i sprovedenih razmatranja je moguće utvrditi sledeće zaključke:

(1) Postoje temperature na kojima rezni alati iz različitih materijala pokazuju izrazitu nestopornost na habanje, i one se mogu nazvati kritičnim temperaturama.

(2) Za tvrdi metal vrste P-20 utvrđene su kritične temperature oko 318 K, 636 K i 1272 K.

(3) Zakonomernost pojava kritičnih temperatura vezana je za koeficijente  $2^n$  i  $3 \cdot 2^{n-1}$ ,  $n = 1, 2, 3, \dots, 8$ . [4]

(4) Za alat iz tvrdog metala vrste P-20 optimalna eksploatacijska oblast je pri radnim temperaturama 530 K do ~600 K i 1060 K do ~1200 K.

## REFERENCE

- [1] Vulf, A.M.: Rezanje metallov, Mašinstroenie, Leningrad, 1973.
- [2] Martirosjan, R.B., Tumanjan, V.A.: O šlifuenosti tver-dih splavov (separat), Vozdejstvie režuščego instrumenta na fizičeskie svojstva metallov - vypusk III, izd. AN Armanskoj SSR, Erevan, 1973.
- [3] Gordić, V.: Termodinamički i eksploatacijski aspekt proizvodnje alata za obradu metala rezanjem alatima dobijenim metalurgijom praša, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Kragujevac, 1987.

[4] Gordić, V.: Energija orbitalnih sistema, Naučna knjiga Beograd, 1989.

[5] Šolaja, V.: Prilog teoriji završne obrade na strugu, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Beograd, 1972.

[6] Vukelja, D.: Temperatursko polje strugarskog noža s obzirom na kompleksnu analizu toplotnih izvora i distribuciju toplotne energije, doktorska disertacija, Mašinski fakultet Beograd, 1969.

V. Gordić, V. Šolaja, D. Vukelja

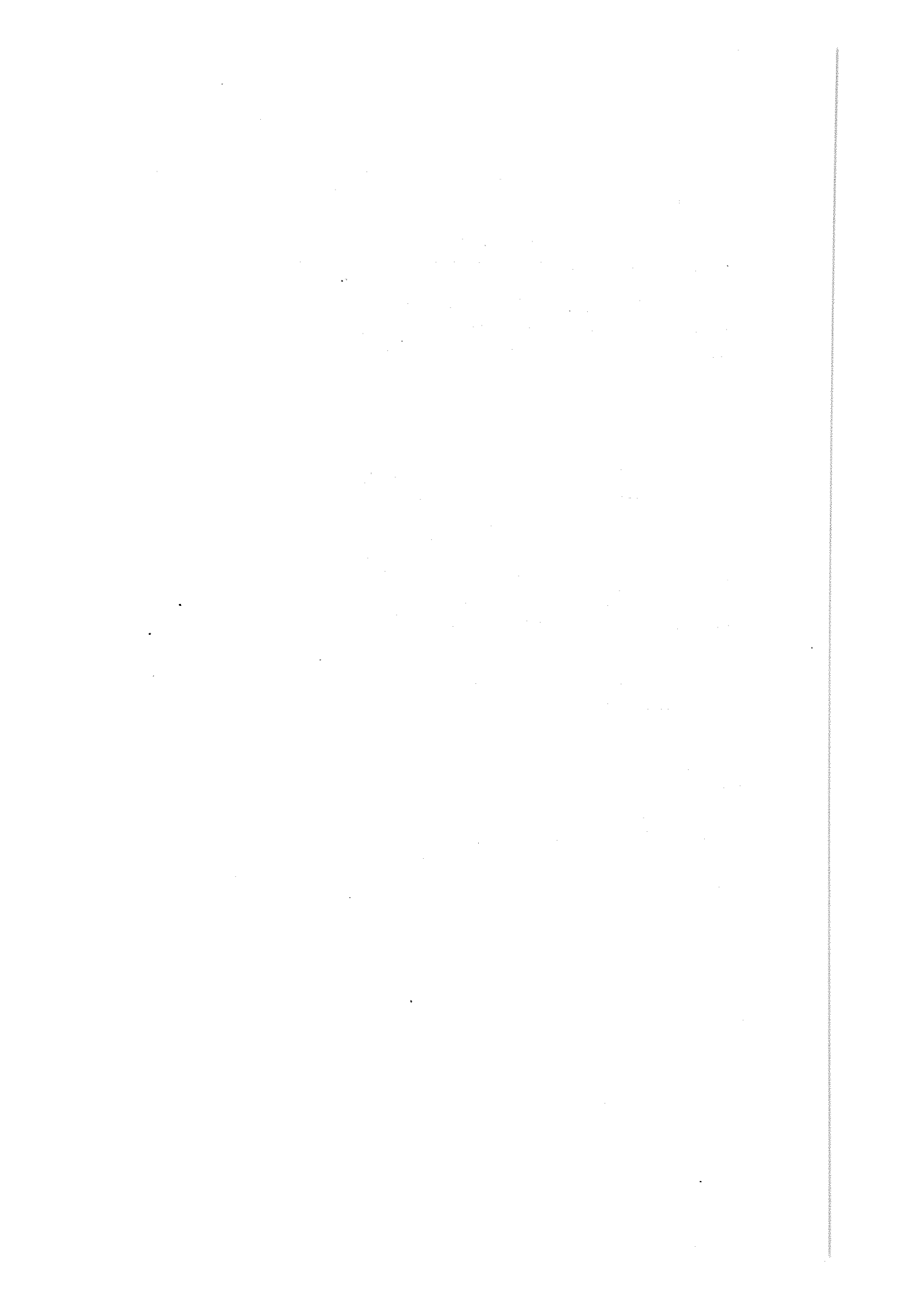
Functional dependence between quantum temperature conditions and life-time duration of the cutting edge

S U M M A R Y

Optimization of the technological process in cutting-machining represents a significant factor in productivity. Statistical methods allow for optimum technological cutting parameters for a given match, tool-workpiece.

However, this method does not answer the question whether some other tooling material is better in match with the given machining material than the one tested.

By introduction of the concept of critical temperature in process optimization of the technological process, in a very simple way, brings about the choice of the most optimum match of tool-workpiece. Establishing of the critical temperatures is closely tied to the quantum condition of the atom. Theoretic and experimental basis, for defining critical temperatures by way of quantum theory, is given in this paper.



М. Воџић \*

VREME OBRADJE - MOGUĆI KRITERIJUM ZA ODREĐJIVANJE  
STANJA ZATUPLJENOSTI REZNIH ALATA

1. UVOD

U procesu rezanja alat se intenzivno haba usled čega dolazi do njegovog zatupljenja. Odredjivanje stanja zatupljenosti alata je veoma značajno i delikatno.

Na osnovu vlastitih ispitivanja, iznose se u ovom radu mogućnosti odredjivanja stanja zatupljenosti alata na osnovu kriterijuma vremena obrade. Ovo je omogućeno na taj način što se pomoćno kretanje ostvaruje pod dejstvom određene sile, dok otpor pomoćnog kretanja, pomoćno kretanje i vreme obrade zavise od stanja zatupljenosti alata. Ovaj logičan, pouzdan i jednostavan metod prikazan je na primerima struganja, bušenja i sečenja.

2. KRITERIJUM VREMENA OBRADJE

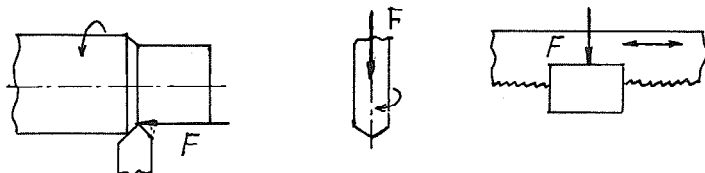
Koliko je autoru poznato, vreme obrade ili produktivnost obrade, kao kriterijum za odredjivanje stanja zatupljenosti alata u literaturi se i ne spominje. Razlog za to treba tražiti verovatno u tome što se, u mašinskoj obradi rezanjem, pomoćno kretanje ostvaruje prinudno i automatski, sa konstantnom brzinom koja i ne zavisi od stanja zatupljenosti alata.

Ukoliko se međjutim, isključi automatsko pomoćno kretanje, pa se ono ostvari pod dejstvom određene i konstantne sile  $F$  (sl. 1), pomoćno kretanje i vreme obrade jednog zahvata zavisice direktno od stanja zatupljenosti alata. Na taj način se jednostavnim merenjem glavnog vremena obrade odredjenog zah-

---

\* / Miodrag Božić, dipl. inž. maš., viši stručni saradnik, profesor više škole, Institut za Bakar, Bor, ul. AVNOJ-a 33-35

vata može dobiti predstava o stanju zatupljenosti alata. Pri tom je sila  $F$  određena tako da u početku rada daje uobičajene (preporučene) vrednosti pomoćnog kretanja.



Sl. 1 Pomoćno kretanje ostvareno samo pod dejstvom konstantne sile  $F$

Za razliku od uobičajenog glavnog, mašinskog vremena obrade  $t_g$ , glavno mašinsko vreme ostvareno pod ovim uslovima označimo sa  $t'_g$ . Ono je

$$t'_g = \frac{l}{n s'} \quad [\text{min}] \quad (1)$$

Ovde su:  $l$  - dužina obrade;  $n$  - broj obrta (ili broj duplih hodova mašine);  $s'$  - korak pomoćnog kretanja koji je promenljiv jer zavisi od stanja zatupljenosti alata.

Jednačinom (1) određena je trenutna vrednost koraka  $s'$ , a pomoću nje i poznatih relacija moguće je odrediti i trenutne vrednosti otpora rezanja. Pri tome se u toku rada, sa zatupljenjem alata, povećava otpor rezanja, zbog čega se smanjuje korak, usled čega se opet dodatno povećavaju otpori rezanja, pošto oni rastu progresivno sa smanjenjem preseka strugotine (Kronenbergov obrazac). Ovaj efekat povećava osetljivost metode merenja zatupljenosti alata pomoću kriterijuma vremena obrade.

### 3. PRIMER SEČENJA

Eksperiment je izveden na motornoj okvirnoj testeru. Ovaj postupak obrade ima izvanrednu osobinu da kod njega vreme obrade zahvata i produktivnost rada zavise direktno od stanja zatupljenosti alata. Ova pojava svojstvena je samo okvirnim (oscilatornim) testerama.

#### 3.1. ELEMENTI I USLOVI ISPITIVANJA

Na sl. 2 prikazani su rezultati merenja promene mašins-

kog vremena sečenja u toku rada testere do njenog zatupljenja, za dve vrste čelika Č.0445 i Č. 4230. Prvi čelik je relativno male a drugi veoma velike zatezne čvrstoće. Sečen je materijal u vidu okrugle šipke prečnika  $\varnothing$  50 mm. Sečenje je vršeno testerama 600 x 50 x 2,5/6 JUS K. D1. 030 od brzoreznog čelika Č.5880 i sa uglovima rezanja  $\gamma=10^\circ$  i  $\alpha=30^\circ$ . Korišćena je okvirna (oscilatorna) testera "Merkur" tipa M-35 proizvođač "Pobeda" - Novi Sad), sa pogonskom snagom elektromotora 2,2 kW. Mašina ima hidraulički uređaj za dizanje i spuštanje testere. Testera je radila sa 60 duplih hodova u minuti i konstantnom silom pritiska na ramu testere. Kao sredstvo za hladjenje korišćen je 4-% - ni rastvor u vodi ulja za sečenje "Antolin-S" (proizvođač Naftagas - Beograd). Protok sredstva za hladjenje bio je  $Q=3$  l/min = 0,05 l/s.

Radi uporedjenja, stanje zatupljenosti alata prećeno je i preko habanja alata. Kod ispitivanih testera habanje se najbolje manifestovalo preko: smanjenja visine zuba h i smanjenja širine zuba b. Zbog toga su praćene ove promene u toku rada testere do njenog zatupljenja, što je prikazano dijagramima na sl. 3. Vrednosti za h i b u dijagramu predstavljaju srednje vrednosti visine i širine zuba od po 6 zuba merenih na sredini dužine sečenja testere.

### 3.2. REZULTATI ISPITIVANJA

1. Iz dijagrama ( sl. 2 ) vidi se da mašinsko vreme raste veoma progresivno sa dužinom rada alata (brojem odsećenih komada n), da se u toku rada povećalo višestruko i da predstavlja izvanredno jasan i pouzdan kriterijum za odredjivanje stanja zatupljenosti alata.

2. Nagli porast vremena obrade na kraju rada alata pouzdano ukazuje na njegovo potpuno zatupljenje.

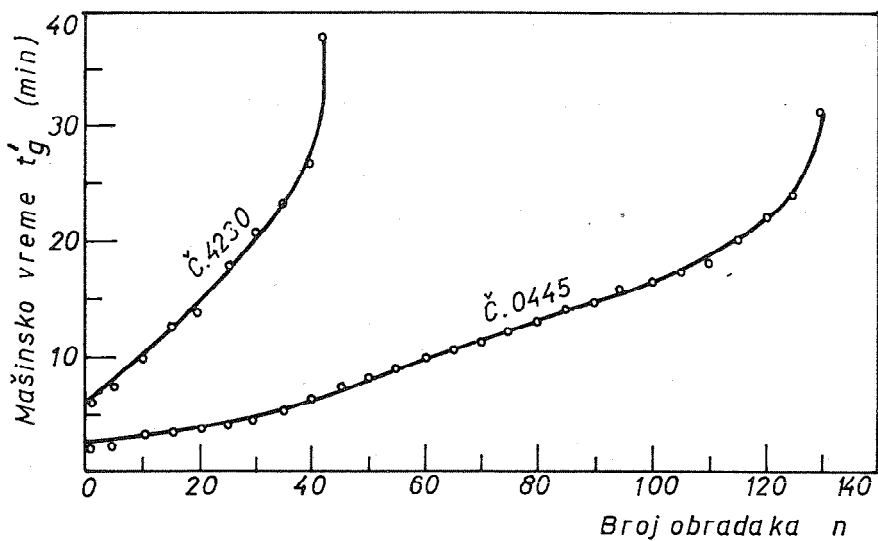
3. Vreme obrade je daleko jasniji i pouzdaniji kriterijum za odredjivanje stanja zatupljenosti alata od posmatranih parametara habanja.

### 4. PRIMER BUŠENJA

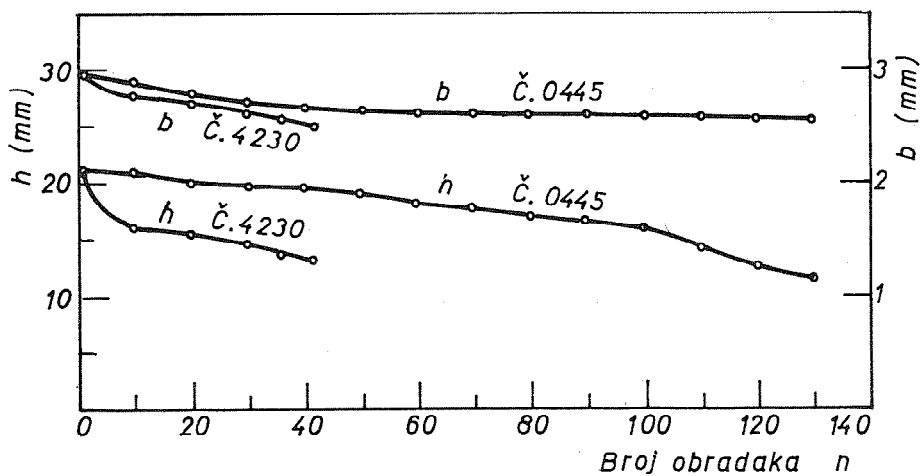
#### 4.1. ELEMENTI I USLOVI ISPITIVANJA

Ispitivana je promena vremena obrade u zavisnosti od stanja zatupljenosti alata - standardnih spiralnih burgija preć-





Sl.2 Promena mašinskog vremena sečenja  $t'_g$  u zavisnosti od stanja zatupljenosti alata



Sl.3 Promena visine zuba  $h$  i širine razmaka zuba  $b$  u zavisnosti od stanja zatupljenosti alata

nika  $\phi$  10 mm. Bušeni su otvori u dva materijala.

Prvi materijal je bio čelik Č.0345 u vidu šipke dimenzija 60x60x500 mm u kome su bušene rupe dubine 25 mm sa brojem obrta  $n=820 \text{ min}^{-1}$ . Prinudno kretanje burgije ostvareno je pod dejstvom tereta  $G=165 \text{ N}$  koji je bio obešen na koturaču koja je bila postavljena na vratilo ručice za pomoćno kretanje mašine. Aksijalna sila pod kojom je burgija vršila pomoćno kretanje iznosila je  $F=500 \text{ N}$ .

Drugi materijal je bio čelik Č.1730 u obliku kružnih ploča dimenzija  $\phi$  500 x 20 mm u kome su bušeni otvori dužine  $l=20 \text{ mm}$  sa brojem obrta  $n=480 \text{ min}^{-1}$ . Odgovarajuća aksijalna sila na burgiji iznosila je  $F = 700 \text{ N}$ .

Pri bušenju nije korišćeno nikakvo sredstvo za hladjenje. Eksperimenti su izvedeni na stubnoj bušilici tipa USB-32, snage  $P = 1,4 \text{ kW}$ , (proizvodjač "Sarlah" - Pirot).

Mereno je vreme bušenja svakog otvora do zatupljenja burgije. Rezultati ispitivanja prikazani su dijagramima na slikama 4 i 5. Posle bušenja poslednjih rupa, vreme bušenja je postalo beskonačno veliko, tj. otvor se više nije mogao izbušiti. To praktično znači da je, usled zatupljenosti alata, otpor rezanja porastao do te mere da je uspostavio ravnotežu aktivnoj sili rezanja  $F$  usled čega je onemogućen dalji rad alata.

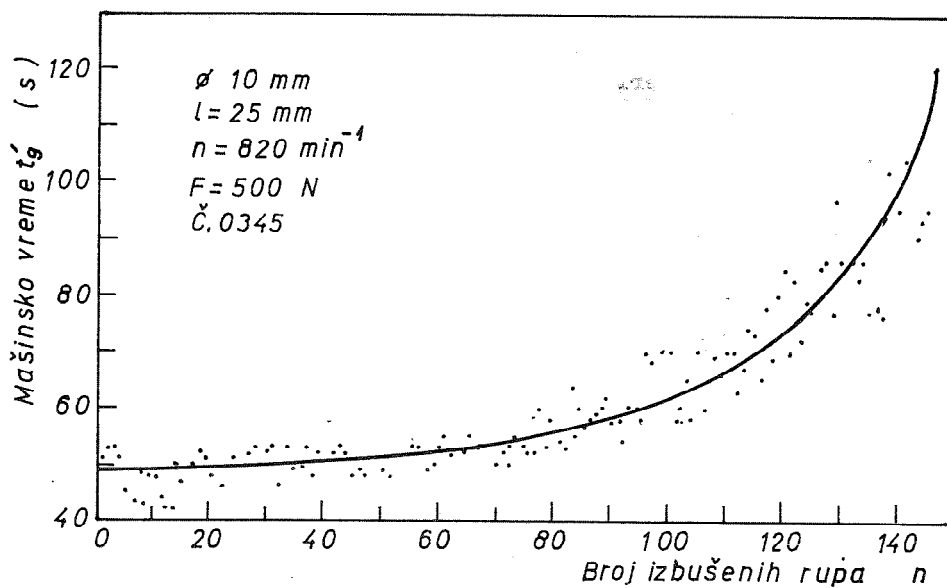
#### 4.2. REZULTATI ISPITIVANJA

1. Iz dijagrama se vidi da, pod ovim uslovima obrade, mašinsko vreme raste veoma uočljivo sa vremenom rada alata te da veoma dobro odražava stanje njegove zatupljenosti. Na kraju rada vreme obrade je poraslo u odnosu na vreme obrade na početku rada za 2 do 3 puta.

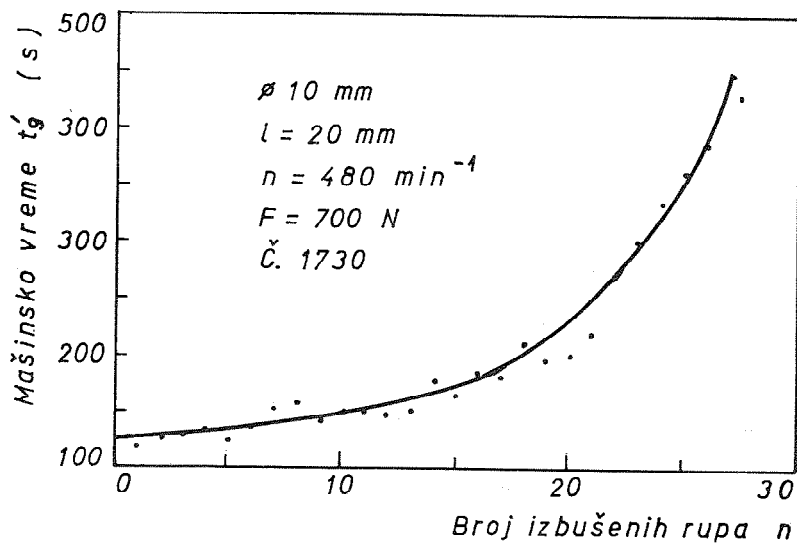
2. Zbog toga se može konstatovati da i kod bušenja vreme obrade može da predstavlja izvanredno jasan i pouzdan kriterijum za odredjivanja stanja zatupljenosti alata.

#### 5. PRIMER STRUGANJA

Analogno postupku iz prethodna dva primera, testirana je i kod obrade struganjem mogućnost primene vremena obrade kao kriterijuma za odredjivanje stanja zatupljenosti alata.



Sl. 4 Promena mašinskog vremena bušenja  $t'_g$  u zavisnosti od stanja zatupljenosti alata



Sl. 5 Promena mašinskog vremena bušenja  $t'_g$  u zavisnosti od stanja zatupljenosti alata

## 5.1. ELEMENTI I USLOVI ISPITIVANJA

U prvom eksperimentu čiji rezultati su prikazani dijagramom na sl. 6, vršena je uzdužna spoljašnja obrada obradaka od čelika Č.1730, dimenzija  $\varnothing$  50x80 mm, sa dubinom rezanja  $t=4,5$  mm na dužini  $l=36$  mm i brojem obrta  $n=600 \text{ min}^{-1}$ , strugarskim nožem sa zalemljenom pločicom od tvrdog metala kvaliteta P20.

U drugom eksperimentu, čiji rezultati su prikazani dijagramom na sl. 7, vršena je uzdužna spoljašnja obrada obradaka od čelika Č.1730, dimenzija  $\varnothing$  45x80, sa dubinom rezanja  $t=4,5$  mm na dužini  $l=30$  mm i brojem obrta  $n=410 \text{ min}^{-1}$ , strugarskim nožem sa zalemljenom pločicom od tvrdog metala kvaliteta P30.

Obrada je vršena na univerzalnom strugu tipa TES-3 (proizvođač "Prvomajska - Zagreb) sa snagom pogonskog elektro motora  $P=3$  kW. Nije korišćeno nikakvo sredstvo za hladjenje i podmazivanje.

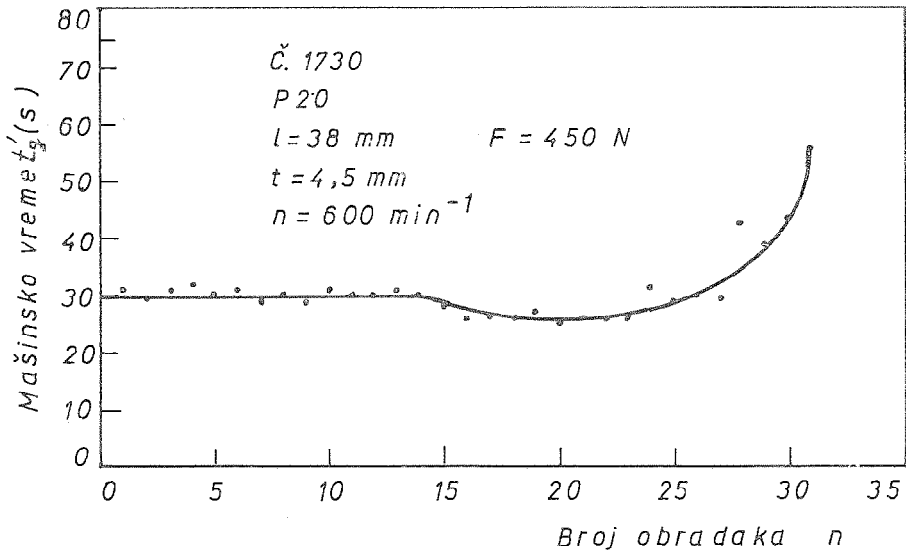
U prvom eksperimentu sila na nožu u pravcu pomoćnog kretanja bila je  $F=450$  N, dok je u drugom eksperimentu ona iznosila  $F=1100$  N. Ove sile su ostvarene na sličan način kao i kod bušenja.

## 5.2. REZULTATI ISPITIVANJA

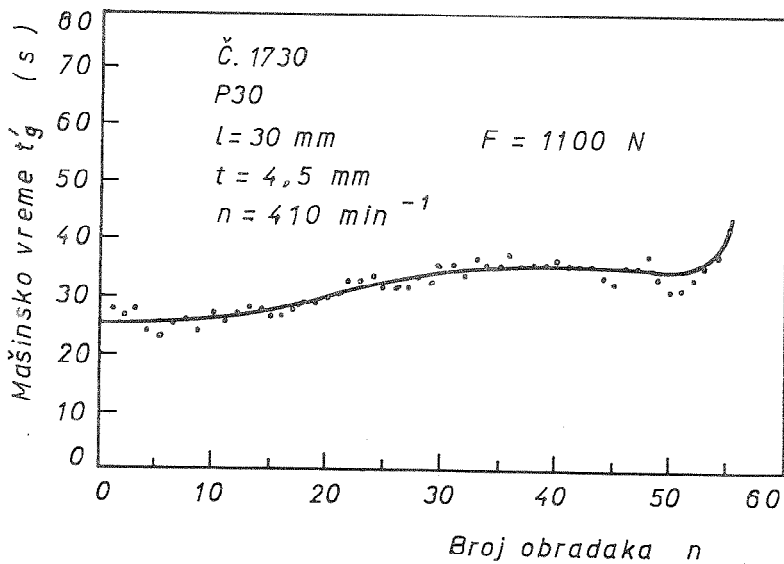
1. Vreme obrade poslednjih obradaka povećano je za 20% do 80% u odnosu na vreme na početku obrade.
2. Dalja obrada sa datim silama  $F$  nije više bila moguća.
3. Vreme obrade osetno je poraslo tek pri kraju obrade, što je u saglasnosti sa kriterijumom Šlezingera za određivanje zatupljenosti alata na osnovu porasta otpora rezanja.
4. Izvesno smanjenje vremena obrade u toku rada alata kod prvod eksperimenta može se objasniti efektom samooštrenja alata.
5. Dobijeni rezultati ukazuju da je verovatno moguće da se vreme obrade koristi kao kriterijum za određivanje stanja zatupljenosti alata i kod obrade struganjem.

## 6. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata ispitivanja, datih u odeljcima 3.2., 4.2. i 5.2., nameće se zaključak da je vreme ili produktivnost obrade moguće koristiti kao jednostavan i pouzdan kri-



Sl. 6 Promena mašinskog vremena struganja  $t'_g$  u zavisnosti od stanja zatupljenosti alata



Sl. 7 Promena mašinskog vremena struganja  $t'_g$  u zavisnosti od stanja zatupljenosti alata

terijum za određivanje stanja zatupljenosti reznih alata.

#### Reference

- [1.] Božić, M., Ristić, V.,:Mašinsko vreme kao kriterijum za određivanje stanja zatupljenosti alata; prilog ispitivanju obradljivosti materijala na motornoj okvirnoj testeri, Saopštenja XV oktobarskog savetovanja rudara, metalurga, tehnologa i mašinaca, Bor, 1983
- [2.] Božić, M.,:Optimalna postojanost alata kod motorne okvirne testere, Saopštenja XV oktobarskog savetovanja rudara, tehnologa i mašinaca, Bor, 1983

M. Božić

#### TIME OF MACHINING - POSSIBLE CRITERIA FOR DETERMINING TOOLS DULLNESS STATE

#### S u m m a r y

A tool is intensively worn at process of cutting, this causes its dullness. Determining of tool dullness state is very important and delicate.

According to his own testing, the author in this article presents possibilities of determining tool dullness state on the base of machining time criteria. This is made possible by auxiliary movement which is implemented under certain force, while resistance of auxiliary movement, auxiliary movement and the machining time depends on the dullness of this tool.

This logical, reliable and simple method is illustrated on examples of grinding, drilling and cutting.



Kakaš D., Šidjanin L., Bajić V., Škorić B.

UTICAJ KVALITETA ČELIKA ZA RAD NA TOPLO NA  
REZULTATE TERMICKE OBRADJE ALATA

1.0. UVOD

Alati za livenje pod pritiskom su izloženi kompleksnom delovanju mehaničkih i toplotnih napona kao i eroziji, koroziji, toplotnom zamoru, temperaturnom šoku i drugim uticajima. Ovi alati rade na povišenim temperaturama i ciklično su opterećeni. Za jedan definisan oblik alata na trajnost alata značajno utiču: tehnološki parametri procesa livenja, tehnološki postupak mehaničke i termičke obrade kao i sam materijal alata.

Trendovi razvoja mašina za livenje pod pritiskom postavljaju sve više zahteve za alate sa gledišta naprezanja alata i primene legura koje se teže liju pod pritiskom. Stoga se ističe poseban značaj razvoja materijala za alate, pri čemu su dominantna dva pravca:

- proizvodnja "premijum" kvaliteta kao rezultat usavršavanja postojeće koncepcije materijala alata za rad na toplo
- potpuno novi kvalitet čelika kao rezultat uvođenja mikrolegiranja.

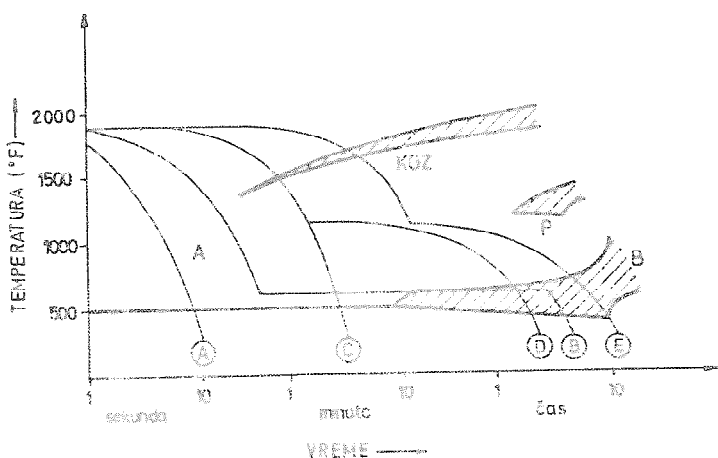
U svetu postoji širok izbor čelika za rad na toplo legiranih sa Cr, Mo, V a sada se razvija nova klasa mikrolegiranih čelika gde treba posebno istaći švedski čelik UHB QRO 80M koji sadrži 0,40%C, 0,24%Si, 0,76%Mn, 2,7%Cr, 2,0%Mo, 1,25%V /1/.

U Jugoslaviji postoji osam vrsta čelika koji se preporučuju za izradu alata za rad na toplo pri čemu se najviše koristi čelik č.4751 (UTOP Mo1) te je stoga ovaj čelik bio predmet istraživanja u ovom radu. Sem vrste čelika na kvalitet alata u velikoj meri utiče polazno stanje materijala

Dr Damir Kakaš, doc., Dr Leposava Šidjanin, doc., Mr Vladimir Bajić, asist., Škorić Branko, asistent, Fakultet tehničkih nauka, Institut za proizvodno mašinstvo, 21000 NOVI Sad, V.Perića-Valtera 2.



kao i rezultati termičke obrade, na slici 1. je šematski prikazana zavisnost izmedju brzine hlađenja i tipa strukture koji će nastati nakon hlađenja. Pri tome oznaka "A" odgovara najbržim uslovima hlađenja a oznaka "E" najsporijim uslovima hlađenja. Jedino uslovi hlađenja "A" i "B" omogućuju da ne nastane izlučivanje karbida po granicama zrna, a time se ujedno obezbeđuje i najviša žilavost materijala. Nakon otpuštanja postiže se ili čista struktura otpuštenog martenzita ili struktura donjeg beinita, što su optimalne strukture sa aspekta eksploatacije /2/. Medjutim navedeni



Sli.1. Uticaj brzine hlađenja na tip strukture

uslovi hlađenja "A" i "B" su najopasniji sa gledišta mogućnosti nastanka pucanja i deformacija pri hlađenju.

Termička obrada alata za rad na toplo u principu se sastoji iz:

- stabilizacionog žarenja
- kaljenja
- otpuštanja

Postupak stabilizacionog žarenja ima zadatak da smanji unutrašnje napone u alatu (nastale u toku izrade alata) čime se izbegavaju deformacije i smanjuje opasnost od pucanja alata.

Kaljenje sadrži tri delikatne faze od kojih svaka ima izuzetan uticaj na rezultate termičke obrade. Prva faza je proces zagrevanja koja po pravilu mora biti višestepena sa tačno izabranim parametrima, obzirom na dimenzije i složenost oblika alata. Druga faza je proces austenitizacije

gde previsoke temperature i predugo držanje na temperaturi izaziva povećanje zrna i izlučivanje karbida po granicama zrna što rezultuje višim tvrdoćama ali manjom žilavošću materijala alata. Preniska temperatura i kratko držanje na temperaturi austenitizacije onemogućavaju homogenizaciju austenita, što smanjuje tvrdoću i otpornost na otpuštanje. Odavde je očigledno da na ovu fazu procesa izuzetan uticaj ima homogenost materijala u polaznom stanju.

Treća faza pretstavlja hladjenje sa temperature austenitizacije sa tokom datim na slici 1 ("A" do "E"). Tip hladjenja "B" se najlakše postiže hladjenjem u termalnim kupkama. Tip hladjenja "A" obezbedjuje najpovoljniju strukturu ali zahteva permanentnu kontrolu temperaturnog gradijenta po preseku komada što se može postići kontrolisanim hladjenjem u struji azota pod pritiskom od 1 do 5 bara.

Otpuštanje ima trostruku funkciju u pogledu optimalnih osobina alata. Prvo otpuštanje treba da omogući što finije i što ravnomernije izlučivanje karbida. Drugo otpuštanje obezbedjuje postizanje optimalnog odnosa između tvrdoće i žilavosti koji se bira u zavisnosti od namene alata. Treće otpuštanje se radi nakon završnog poliranja čime se povećava trajnost alata.

Rezultati termičke obrade jako zavise od tipa uređaja odnosno sredine u kojima se vrši zagrevanje sredine u kojima se vrši zagrevanje i hladjenje. Osnovni tipovi uređaja su sona kupatila, peći za kontrolisanom atmosferom i vakumski uređaji.

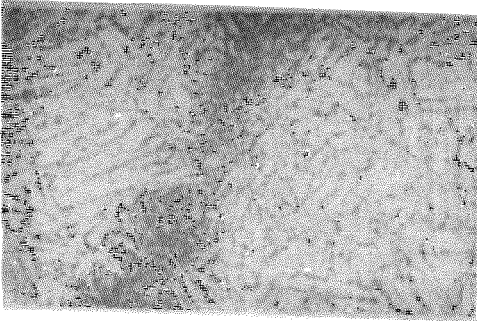
## 2.0. POSTAVKA EKSPERIMENTA

U radu je korišćen uzorak ploče od čelika č.4751 sa dimenzijama 96x196x x296 mm. Iz ploče su isečene epruvete iz zone površine i zone jezgra. Na ploči je izvršeno ispitivanje hemijskog sastava površine i jezgra i nije uočena segregacija pojedinih elemenata.

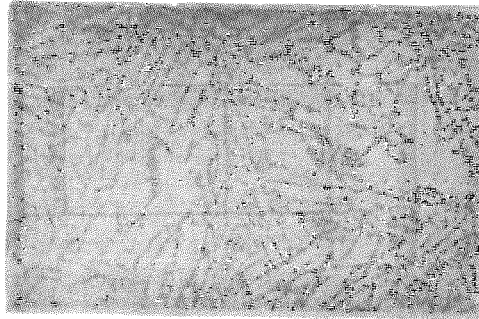
Ispitivanje mehaničkih osobina u sirovom stanju pokazalo je značajnu razliku žilavosti kod epruveta iz površinske zone (33J) i zone jezgra (25J) iako se tvrdoća nije razlikovala (srednja tvrdoća 249 HV).

Metalogrfska analiza polazne strukture ukazala je da postoji trakavost strukture (Sl.2), neravnomeran raspored karbida u feritnoj osnovi i izlučivanje karbida po granicama zrna (sl.3). Takodje je uočeno prisustvo uključaka A3, B3, C3 po JK skali. Pomenute segregacije strukture su bile znatno više izražene kod uzoraka iz sredine ploče.

Termička obrada je vršena u tri različite vrste opreme pri čemu su za svaku vrstu opreme, (s obzirom na dimenziju uređaja i dimenziju šarže birani najpovoljniji režimi.



S1.2. 500x  
Trakavost strukture sa neravnomernim rasporedom karbida



S1.3. 500x  
Neravnomerni raspored karbida u feritnoj osnovi i izlučivanje karbida po granicama zrna

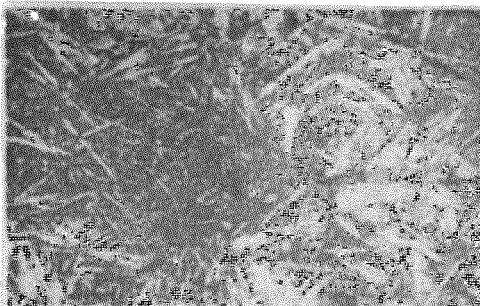
Zbog ograničenog prostora ne daju se detaljno svi parametri termičke obrade ali je osnovno kod svih postupaka bilo:

- |  |          |
|--|----------|
| a) stabilizaciono žarenje                            | 630°C    |
| b) višestepeno zagrevanje                            |          |
| c) kaljenje sa temperature                           | 1020°C   |
| d) dvostepeno otpuštanje sa ciljem dobijanja tvrdoće | 46±2 HRC |

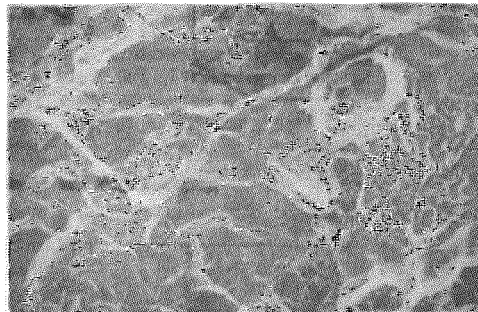
Parametri termičke obrade su birani u skladu sa preporukama datim u svetskoj literaturi /3/, /4/, /5/, /6/.

### 3.0. REZULTATI I DISKUSIJA

Uzorci, termički obradjeni u zaštitnoj atmosferi, odlikovali su se relativno niskom žilavošću na površini 7,6 J a 5,8 J u jezgru. Ovi rezultati se mogu objasniti krtošću strukture metalne osnove koja je nehomogena i pretežno se sastoji od gornjeg beinita sa prisutnim zonama otpuštenog martenzita i izlučenih karbida.



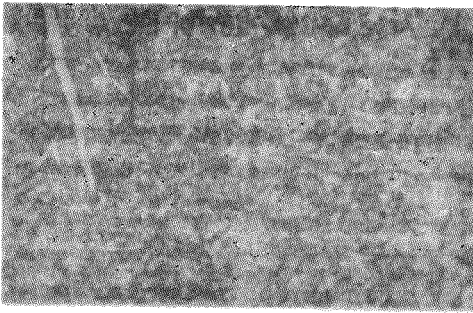
S1.4. 500x  
Beinitno-martenzitna struktura



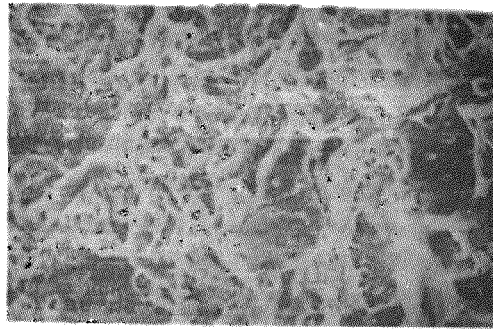
S1.5. 200x  
Mešoviti karakter preloma - preovladjuje interkristalni lom

Prelom je mešovitoj karaktera ali preovladjuje interkristalni lom. Pored interkristalnog loma prisutne su zone transkristalnog loma (zone kvazi cepanja) karakteristične za strukturu otpuštenog martenzita.

Uzorci termički obradjeni u sonim kupatilima su pokazali znatno višu žilavost - 18,4 J na površini i 12,7 J u jezgru. Ovi rezultati se objašnjavaju nastankom strukture koja je pretično otpušten martenzit (Sl.6). Lom je mešovitoj tipa ali preovladjuje transkristalni lom (sl.7).



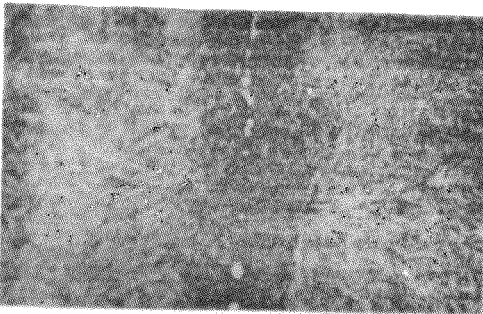
Sl.6. 500x  
Struktura otpuštenog martenzita sa nemetalnim uključkom MnS



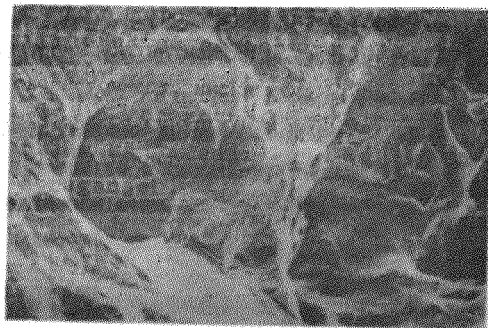
Sl.7. 1200 x  
Mešoviti karakter preloma - preovladjuje transkristalni lom.

Zone transkristalnog loma imaju duktilne jamice uz prisustvo interkristalnih površina što se objašnjava prisustvom mikrosegregacije.

Uzorci termički obradjeni u vakuum pećima odlikovali su se sniženom žilavošću - 7,4 J na površini i 6,8 J u jezgru. Struktura metalne osnove se odlikovala izraženom segregacijom. Došlo je do okrupnjavanja zrna i izlučivanja karbida po



Sl.8.  
Struktura otpuštenog martenzita sa izlučenim karbidima po granici zrna.



Sl.9. 150 x  
Mešoviti karakter preloma - preovladjuje interkristalni lom.

granicama zrna. Karakter loma je mešoviti ali preovladjuje interkristalni lom koji je u pojedinim zonama potpuno krak sa ravnim površinama nastalim na granicama prethodnih austenitnih zrna.

Analizirajući korelaciju između parametra term. obrade i rezultata može se konstatovati da su se najbolje pokazali oni uzorci koji su imali kraće trajanje zagrevanja u intervalu  $850 \pm 1020^{\circ}\text{C}$  i kraće držanje na temperaturi austenitizacije. Veliki uticaj je imala brzina hladjenja, odnosno najpovoljnija struktura je dobijena pri hladjenju u sonim-termalnim kupatilima. Sve ovo ukazuje da je neophodno vršiti pažljiv izbor opreme u cilju postizanja optimalnih režima za različite dimenzije alata. Važno je napomenuti da se ni sa jednim postupkom termičke obrade nije postigla vrednost žilivosti odnosno kvalitet strukture, koja se preporučuje za ovaj tip čelika u svetskoj literaturi a koja iznosi  $25 \pm 30 \text{ J}$  za tvrdoću 46 HRC. To se može objasniti prisustvom grešaka u polaznoj strukturi.

#### 4.0. Z A K L J U Č A K

Rezultati koji su prezentirani u radu ukazuju na problem, koji je prisutan kod mnogih proizvođača alata, kako definisati stepen odgovornosti term. obrade i ulogu polaznog kvaliteta materijala za rad na toplo. Variranjem parametara term. obrade, pre svega uslova zagrevanja i brzine hladjenja može se značajno uticati na strukturu i kvalitet materijala alata. Rezultati žilivosti pokazuju da se žilivosti razlikuju preko 100%, međutim polazno stanje materijala odnosno polazni kvalitet u smislu prisustva nehomogenosti strukture nemetalnih uključaka, nehomogenosti u pogledu meh. osobina (što nije definisano JUS-om) može da ima izuzetno veliki uticaj na kvalitet alata često i veći od uticaja parametara term. obrade.

Sve ovo ukazuje na razloge što se u svetu prelazi na korišćenje viših polaznih kvaliteta materijala kao što su "PREMIJUM" kvalitet čelika Č.4751 ili potpuno nove vrste čelika (UHB QRO 80M), ali i na korišćenje moderne aparature za term. obradu koja obezbeđuje optimalne brzine zagrevanja i hladjenja za svaki oblik i dimenzije alata.

THE INFLUENCE OF THE HOT WORKING STEEL QUALITY ON RESULTS OF  
TOOL HEAT TREATMENT

Summary

*This paper presents the influence of the initial microstructure of dies casting steel Č.4751, on the heat treatment results, which were obtained by the furnace with controlled atmosphere, vacuum furnace and salt baths. The best results were got with salt bath specimens, as result of the optimum cooling rate conditions.*

*However the results of the toughness obtained from the specimens treated in salt bath were never as good as the results suggested by standards, because the initial steel microstructure was not appropriate.*

5.0. L I T E R A T U R A

- /1/ Gaven J.A., Norstrom L.A., Worby J.: Proceeding - 12th International Die Casting Congress and Exploitation, Paper No G-T83-011, 1983.
- /2/ Wallace J.: Die Casting Management, Mart-April 1986, strana 16-21.
- /3/ Metals Handbook Vol.4 (Heat Treating), ASM Metals Park, Ohio, 1981.
- /4/ Artluger T.: Practical Considerations for Heat Treating, Die Casting Engineer.
- /5/ Fitzgerald J.A.: Vacuum Heat Treatment Premium H13 Die Casting Dies, Die Casting Engineer, Sept/October, 1984.
- /6/ Norstrom L.A., Roberts W.: Premium Die Steel and their Heat Treatment Die Casting Engineer, July/August, 1985.



L.Kravanja

SISTEMI SA KONSTANTNOM SILOM I BRZINOM REZANJA  
KOD HORIZONTALNOG TRAČNOG PILJENJA

1. UVOD

Horizontalne tračne pile su strojevi za najproduktivnije odrezivanje materijala. U odnosu na druge poznate sisteme za odrezivanje (kao što je odrezivanje okvirnim pilama, cirkularima, plameno itd.) utrošak energije je minimalan a vrijeme odrezivanja manje. Da bi obradni sistem zadovoljio te uvjete pored kvalitetnog alata treba posjedovati i kvalitetan stroj, čija kvaliteta naročito ovisi o posmičnom sistemu.

Budući da opterećenje zubi ovisi o posmičnoj brzini, sili rezanja, vrsti materijala obratka te alata to je zadatak ovog rada bio istraživanje različitih posmičnih sistema.

U točki 2. su dani teoretski modeli posmičnih sistema sa konstantnom i promijenjivom silom odrezivanja, a u daljnjem radu su pokusima i analizom rezultata pokazani zaključci iz točke 2.

2. TEORETSKI PRIKAZ POSMIČNIH SISTEMA

2.1. Posmični sistemi sa konstantnom silom rezanja

Sila rezanja na vrhu oštrice zuba :

$$F_z = k_s \cdot b \cdot s_z \dots\dots\dots (1)$$

Ukupna sila rezanja za Z zubi u zahvatu na dužini

$$l = f(x) = 2 \sqrt{Dx-x^2} \dots\dots\dots (1a)$$

$$F = F_z \cdot Z \cdot l = k_s \cdot b \cdot s_z \cdot Z \cdot 2\sqrt{Dx-x^2} \dots\dots\dots (2)$$

Kako su  $k_s$ ,  $b$ ,  $Z$  i  $D$  konstantne vrijednosti to karakter izraza (1) i (2) ovisi o posmaku po zubu i dužini zahvata.

/ Livio Kravanja, dipl.ing., RO"PRVOMAJSKA-RAŠA" RAŠA



Iz (1) i (2) slijedi posmak po zubu

$$s_z = \frac{F}{k_s \cdot b \cdot Z \cdot 2 \cdot \sqrt{Dx - x^2}} \dots \dots \dots (3)$$

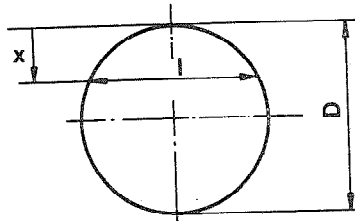
Što znači da u slučaju  $F = \text{konstantno}$  izraz (3) ima promijenjivu vrijednost te je  $s_z = f(x)$ .

Analogno vrijedi za posmičnu brzinu  $s$ :

$$s = s_z \cdot Z \cdot v \dots \dots \dots (4)$$

a nakon uvrštenja (3) u (4) dobivamo:

$$s = \frac{F \cdot v}{k_s \cdot b \cdot 2 \cdot \sqrt{Dx - x^2}} \dots \dots \dots (5)$$



sl.1. Dužina piljenja  $l = 2\sqrt{Dx - x^2}$

Učin rezanja se definira kao kvocijent površine obratka i vremena odrezivanja, te ga u jednom rezu smatramo konstantnim:

$$U = \frac{D^2 \pi}{4 \cdot T} \dots \dots \dots (6)$$

Kako učin rezanja možemo prikazati i kao produkt posmične brzine i dužine zahvata, to je

$$U = s(x) \cdot l(x) \dots \dots \dots (7)$$

a nakon uvrštenja (5) i (1a)

$$U = \frac{F \cdot v}{k_s \cdot b} \dots \dots \dots (8)$$

Iz (8) i (6) proizlazi

$$F = \frac{k_s \cdot b \cdot D^2 \pi}{4 \cdot T \cdot v} \dots \dots \dots (9)$$

što ukazuje da je sila rezanja konstantna dok su izrazi (1), (3) i (5) promijenjivi.

## 2.2. Posmični sistem sa promijenjivom silom rezanja

Analognim razmatranjem dolazimo do izraza za posmičnu brzinu:

$$s = \frac{D}{T} = \text{konst.} \dots\dots\dots (10)$$

- posmak po zubu:

$$s_z = \frac{D}{T \cdot v \cdot Z} = \text{konst.} \dots\dots\dots (11)$$

- sila po zubu :

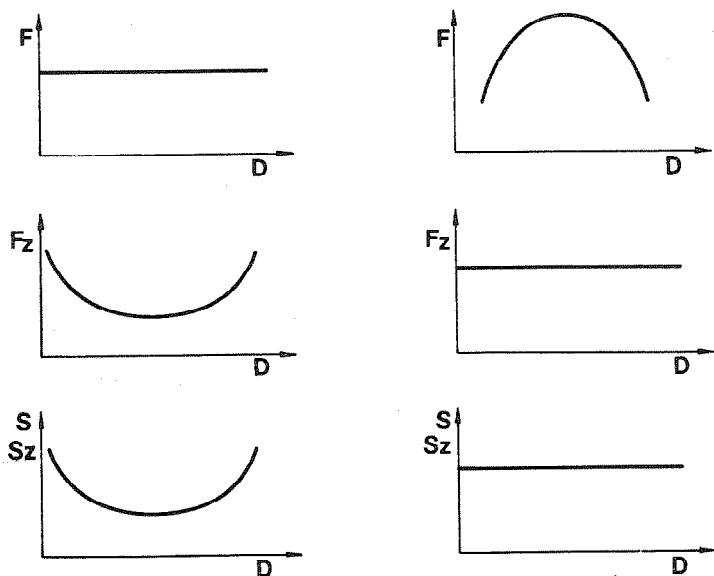
$$F = \frac{k_s \cdot b \cdot D}{T \cdot v \cdot Z} = \text{konst.} \dots\dots\dots (12)$$

dok je sila rezanja:

$$F = F_z \cdot Z \cdot l(x) = \frac{2k_s \cdot b \cdot D \sqrt{Dx-x^2}}{T \cdot v} \dots\dots\dots (13)$$

Ovi analitički izrazi prikazani su na slici 2:

Zadatak daljnjeg rada je da ustanovi ima li bitne razlike između sistema 2.1. i 2.2. Na osnovu relacije (3) i (11) za očekivati je da je ravno - mjerniji rad pri konstantnom posmaku po zubu a time i opterećenju po zubu.



sl. 2. Posmični sistemi , lijevo konstantna , a desno promjenjiva sila odrezivanja.

### 3. PLAN POKUSA

Na stroju opisanom u 4. napravljene su probe sa po tri trake do potpunog istrošenja. Uvjet istrošenja trake dan je u [1]. Ukoliko dolazi do loma zubi taj kriterij se također uzima u obzir.

Materijal, dimenzije, alat i brzina rezanja su bili istovjetni za oba nivoa pokusa, te dobiveni rezultati služe za komparaciju i daljnju obradu.

Pri odrezivanju mjeri se vrijeme i sila odrezivanja.

Ostale veličine dobivene su proračunom iz točke 2.

### 4. UVJETI IZVOĐENJA POKUSA

Za definiranje uvjeta izvođenja pokusa dat je pregled dijelova obradnog sistema : alatnog stroja, alata i obratka .

#### 4.1. Alatni stroj

Horizontalna tračna pila "PRVOMAJSKA-JAESPA 400" u osnovnoj izvedbi ima konstantnu posmičnu brzinu okvira a regulatorom protoka se mijenja sila rezanja koja se očitava na manometru kao jedinica pritiska.

Isti stroj je ( preinakom regulatora protoka i uvođenjem novog proporcionalnog regulatora protoka u paralelnom spoju) modificiran tako da mu je posmična brzina okvira bila promijenjiva uz konstantnu silu rezanja.

Prije izvođenja pokusa stroj je u praznom hodu namiješten na vrijeme praznog hoda od 250 sekundi i visinu 200 mm.

Vrijem praznog hoda je u svim pokusima bilo isto. U prvim rezovima vrijeme rezanja se odmah povećavalo na 270 sekundi, što je cca 7% sporije od vremena praznog hoda.

Karakteristike stroja:

- najveći promjer odrezivanja 400 mm
- dužina donosa 10 m
- instalirana snaga 7,5 kW

#### 4.2. Alat

Bimetalna traka od brzoreznog čelika HSS- M42. Nakon termičke obrade tvrdoća vrha zuba je iznosila 69 HRc.

Dimenzije trake 4570x32x1,1 mm sa 3 zuba na col. Ozubljenje i razmetanje je standardno a kosina zavarenog dijela ispod 0,1 mm/100 mm.

Svaka traka je vizuelnom kontrolom ispitana i nisu primjećene pukotine ili oštećenje zuba.

#### 4.3. Obradak

U svim slučajevima rezao se Č.1530, promjera 200 mm. Srednja tvrdoća je bila 180 HB.

Debljina izrezanog obratka je bila 5 mm.

Za podmazivanje i hlađenje upotrebljavana je emulzija sa 10% sintolin ulja.

## 4.4. Režimi rada

Za Č.1530, promjera 200 mm i bimetalnu traku sa 3 Z na col odgovara brzina rezanja od 50 m/minuti.

## 5. ANALIZA REZULTATA

Na tablici 1 i 2 su prikazani rezultati piljenja

	N	1	25	50	75	100	125
1	t <sub>1</sub>	4,5	4,8	5,1	5,5		
2	t <sub>2</sub>	4,5	4,7	4,9	5,7	6,7	
3	t <sub>3</sub>	4,5	4,8	5,2	5,5	6,9	

Tab.1. Vremena odrezivanja za sistem sa konstantnom silom odrezivanja.

	N	1	25	50	75	100	125	150	175	200	225
1	t <sub>1</sub>	4,5	4,5	4,6	4,5	4,6	4,8	4,7	4,7	4,8	5,2
2	t <sub>2</sub>	4,5	4,5	4,5	4,6	4,7	4,6	4,7	4,7	4,7	6,2
3	t <sub>3</sub>	4,5	4,6	4,5	4,5	4,6	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5

Tab.2. Vrijeme odrezivanja za sistem sa promjenjivom silom odrezivanja.

Pri promatranju sistema sa konstantnom silom ista je iznosila  $F = 410$  N. Na osnovu točke 2. ostale veličine imaju slijedeće vrijednosti:

$$F_z^{\max} = 38,4 \text{ N}; \quad F_z^{\min} = 17 \text{ N}; \quad s_z^{\max} = 12 \mu\text{m/Z}; \quad s_z^{\min} = 6 \mu\text{m/Z};$$

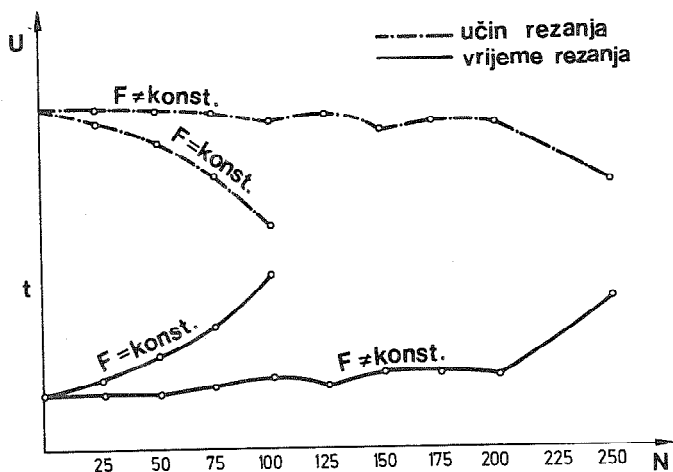
$$s^{\max} = 1,16 \text{ mm/s}; \quad s^{\min} = 0,58 \text{ mm/s}; \quad U = 117 \text{ mm}^2/\text{sek}$$

Pri promatranju sistema sa promijenjenom silom rezanja izmjerena je maksimalna sila rezanja  $F = 521$  N.

Ostale veličine iz točke 2.:

$$F_z = 22 \text{ N}; \quad s_z = 7 \mu\text{m/Z}; \quad s = 0,74 \text{ mm/s}; \quad U = 117 \text{ mm}^2/\text{sek}.$$

Učini na početku rezanja su bili jednaki, a nakon 25 reza počelo se vrijeme piljenja mijenjati te se u prvom sistemu analogno počeo smanjivati učin. Na slici 3. su date prosječne autentične vrijednosti vremena i učina rezanja.



sl.3. Vrijeme i učini odrezivanja

## 6. ZAKLJUČNA RAZMATRANJA

- Na osnovu promatranog uočljivo je da opterećenje po jednom zubu (izraz 1) raste na početku i kraju piljenja dok u sredini obratka poprima najmanju vrijednost.
- Promatrajući i uspoređujući posmični sistem 1 i 2 vidimo da su trake u sistemu 1 u prosjeku izdržale 3-3,5 m<sup>2</sup> odrezne površine (od 100 do 117 rezova).

Trake koje su primjenjene u sistemu 2 imale su puno duži vijek trajanja tako da je prosječna odrezna površina 7 do 7,5 m<sup>2</sup>.

Razlika u postojanosti alata je od 200-250 %.

Razlog brzog trošenja zubi je u promijenjivom opterećenju po pojedinom zubu, čime se poremećuje širina razmetanja. Posljedice veće širine razmetanja vide se kao koncentrični krugovi na obratku. U procesu piljenja zbog preopterećenja dolazi do povećane bočne komponente sile rezanja čime se povećava trenje, te dolazi do pregrijavanja zuba i do konačnog loma ili

trošenja.

Posmična brzina time opada a vrijeme odrezivanja raste. Učini rezanja se smanjuju.

- c) Pri promatranju sistema sa promijenjivom silom rezanja a konstantnom posmičnom brzinom vidljivo je iz izraza (12) da je opterećenje po zubu konstantno i ravnomjerno, te alat u takvom sistemu ima veći vijek trajanja a vremena odrezivanja se bitno ne razlikuju.
- d) Iz iznešenoga slijedi zaključak da se na horizontalnim tračnim pilama moraju primjeniti sistemi konstantne posmične brzine, kako bi se produktivnost povećala uz povećanje postojanosti alata.

#### OZNAKE

- F - glavna sila odrezivanja u N  
 $F_z$  - sila po jednom zubu u N  
 $k_s$  - specifični otpor odrezivanja u  $N/mm^2$   
 b - širina razmetanja pile u mm  
 $s_z$  - posmak po zubu u mm/Z  
 l - dužina zhvata u obratku promjera D u mm  
 D - promjer obratka u mm  
 Z - broj zubi na dužini jednog cola  
 v - brzina rezanja u m/min  
 U - učir. rezanja u  $mm^2/sek.$   
 T,  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  - vremena odrezivanja u minutama  
 N - broj rezova

#### LITERATURA

- [1.] Istraživanje horizontalnog tračnog piljenja, Laboratorij za obradu i eksploataciju obradnih sistema, TFR 1979.
- [2.] Istraživanje osnovnih dijelova obradnog sistema za odrezivanje tračnim piljenjem, Laboratorij za obradu materijala i alatne strojeve, TFR 1987.
- [3.] E.Kuljanić, L.Kravanja: Odrezivanje bimetalnim trakama na horizontalnim tračnim pilama, Zbornik 3.MMA 83 Novi Sad
- [4.] L.Kravanja: Obradni sistemi za piljenje, Zbornik radova 21.savjetovanja proizvodnog strojarstva Jugoslavije, TFR, Opatija 1987.

L.Kravanja: SISTEMI SA KONSTANTNOM SILOM I BRZINOM REZANJA KOD HORIZONTALNOG  
TRAČNOG PILJENJA

KLJUČNE RIJEČI:

Konstantna sila rezanja  
Konstantna brzina rezanja

SAŽETAK :

U radu su prikazana dva osnovna posmična sistema:

- posmični sistem sa konstantnom silom rezanja
- posmični sistem sa konstantnom brzinom rezanja

Data je osnovna razlika između dva sistema, te su analizirani pokusi piljenja.

L.Kravanja: SYSTEME MIT EINER KONSTANTEN SCHNITTKRAFT UND SCHNITTGESCHWINDIG-  
KEIT BEIM HORIZONTALBANDSÄGEN

SCHLÜSELWÖRTER:

Konstante Schnittkraft  
Konstante Schnittgeschwindigkeit

ZUSAMMENFASSUNG:

Es wurden zwei Vorschubsysteme dargestellt:

- Vorschubsystem mit der konstanten Schnittkraft
- Vorschubsystem mit der konstanten Schnittgeschwindigkeit

Es wurde ein Grundunterschied zwischen den beiden Systemen aufgeführt und dabei wurden auch die Sägeversuche analysiert.

J. Kopač, M. Soković<sup>\*)</sup>

PRISPEVEK K IDENTIFIKACIJI REZALNEGA PROCESA PRI ODREZAVANJU  
AVSTENITNEGA MANGANOVEGA JEKLA 12 Mn

1. UVOD

Z raziskavami obdelovalnosti težko obdelovanih materialov smo v zadnjih nekaj letih uspeli predpisati tehnologijo obdelave z odrezavanjem na materialih, za katere so veljala priporočila, da jih z odrezavanjem ne oblikujemo. Pristop z orodji iz kvalitete karbidne trdine, predpisana geometrija rezalnega robu in prevlečenje s titanovim karbidom, so doprinesli možnost obdelave avstenitne manganove litine ČL.3462 s struženjem, frezanjem in vrtanjem. Ugotovljene optimalne rezalne hitrosti so med 60 in 80 m/min.

Izredno visoka cena rezalnih orodij iz kubičnega borovega nitrida zahteva ekonomsko upravičenost rezalnega procesa. Zato moramo s to kvaliteto orodja dosegati rezalne hitrosti, ki so optimalne pri 200 m/min. Vendar pa bi pri normalnem poteku obrabe na rezalnem robu dosegli hitro porušitev rezalnega robu oziroma kratko obstojnost orodja. V praksi pa se razmere na rezalnem robu pri velikih hitrostih spremenijo, saj prvotna tvorba utrjene plasti poveča potrebno deformacijo v strižni coni. Posledica tega je močno segrevanje odrezka, ki se prezentira v obliki rekristalizacije. Temperatura je namreč tako visoka, da iz faze hladne utrditve preide odrezek v temperaturno področje 900°C, kjer spremeni strukturo.

V področju hladne utrditve je prisotna hitra in močna obraba rezalnega robu, kar se kaže tudi v nestabilnosti rezalnega procesa. Stabilen rezalni proces izmerimo

---

<sup>\*)</sup> dr. Janez Kopač, dipl.inž., docent, Fakulteta za strojništvo v Ljubljani, Murnikova 2  
mag. Mirko Soković, dipl.inž., višji predavatelj, Fakulteta za strojništvo v Ljubljani, Murnikova 2



s pomočjo energijskega spektra po prehodu v področje, kjer nastajajo rekristalizacijski odrezki.

## 2. PREGLED SPECIFIČNIH POJAVOV PRI OBDELAVI MATERIALA ČL.3462

V osnovi je jeklena litina 12 Mn v surovem, to je litem stanju in kot taka vsebuje poleg avstenitne strukture na kristalnih mejah še lamelarne karbide. Velik abrazivni vpliv karbidov na orodje in podatek, da se material ČL.3462 uporablja v gašenem stanju nas je privedel do rezultata, da je upravičena le obdelava materiala s čisto avstenitno strukturo /1/. Avstenitna struktura pa ima za posledico močno utrjanje materiala, ki ga pri odrezavanju deformiramo. Močno je deformiran material v odrezku, kjer se vrši transformacija odvzetega materiala in znaša tudi do vrednosti 2,7 krat osnovne trdote obdelovanca. Zaradi razdvajanja materiala in delovanja rezalnih sil na obdelano površino tokom odrezavanja, pa zasledimo na površini zaostale napetosti, ki segajo tudi do 0,2 mm pod površino in so lahko vzročno povezane s kasnejšimi mikrorazpokami, razpokami in lomi izdelka /2/.

Utrjena površina ne dopušča obdelave z orodji iz karbidne trdine, kadar želimo izvesti končni fini rez obdelave, kjer je globina rezanja manjša od globine utrditve obdelovanca. V teh primerih je upravičena uporaba orodja iz kubičnega borovega nitrida. Ker je dinamika rezalnega procesa pri velikih rezalnih hitrostih v višjem frekvenčnem pasu, stremimo za obdelavo z orodji KBN pri hitrostih od 200 m/min, s tem dobimo tečenje rekristaliziranega odrezka in stabilen rezalen proces /3/.

## 3. STRUKTURNE SPREMEMBE V ODREZKU

Struženje materiala ČL.3462 z orodjem iz karbidne trdine, kvalitete P25, geometrija je razvidna iz slike 1, nam da glede na režime dela različno utrjene odrezke. Raziskali smo strukturo odrezkov dobljenih v področju rezalnih hitrosti med 40 in 80 m/min, ter pri podajanjih od 0,054 do 0,303 mm/vrt. Metalografski posnetki jedkanih odrezkov so zbrani na sliki 1. Razvidna je največja hladna utrditev pri rezalni hitrosti  $v_c = 63$  m/min in podajanju 0,303 mm/vrt v obliki izločenih drsnih ravnin in dislokacij. Dislokacijske črte v več različnih smereh so pokazatelj velike deformacije v strižni coni. Na spodnjih dveh fotografijah na sliki 1 je vidno tudi zvižanje teksturnih linij, kar je karakteristika sekundarnega striga v rezalni coni. S prehodom na večje rezalne hitrosti uporaba rezalnega orodja iz karbidne trdine ni več racionalna zaradi prevelike obrabe. Že



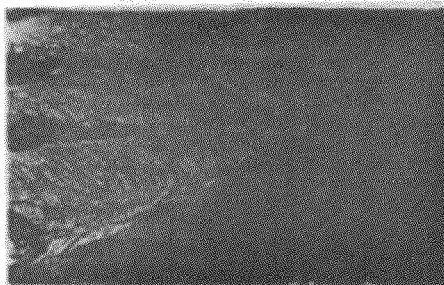
$v_c = 40 \text{ m/min}$   
 $f = 0,054 \text{ mm/vrt}$



$v_c = 63 \text{ m/min}$   
 $f = 0,106 \text{ mm/vrt}$



$v_c = 40 \text{ m/min}$   
 $f = 0,106 \text{ mm/vrt}$



$v_c = 63 \text{ m/min}$   
 $f = 0,303 \text{ mm/vrt}$

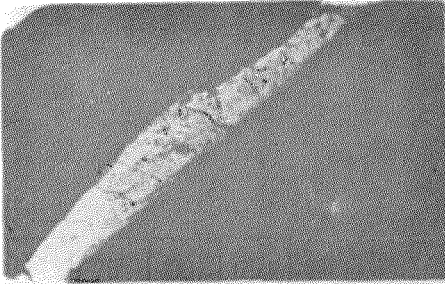
Oblika orodja: SNMN 120408 - P 25

Globina rezanja:  $a_p = 2 \text{ mm}$

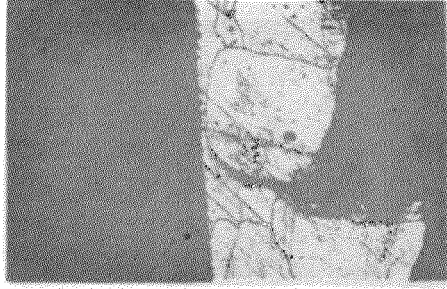
$\alpha$	$\gamma$	$\lambda$	$\kappa$	$r$
$+6^\circ$	$-6^\circ$	$-6^\circ$	$70^\circ$	0,8 mm

Sl. 1. Odrezki, ki so hladno utrjeni (material ČL.3462).

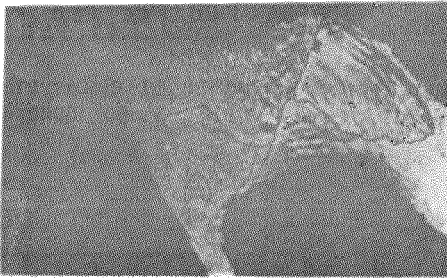
pri hitrosti od 100 m/min dalje uporabljamo za obdelavo ČL.3462 le še orodja iz kubičnega borovega nitrida. Večje rezalne sile, ki so tudi posledica faze na orodju povzročijo pri transformaciji materiala v strižni coni tako visoke temperature, da odrezek rekristalizira. S tem se odstranijo napetosti v odrezku, ki so v pričetku transformacije izvirale iz hladne utrditve, tvorijo pa se zatem novi večji kristali. Njihova velikost, oblika in eksaktno določene kristalne meje pa so razvidne iz slike 2.



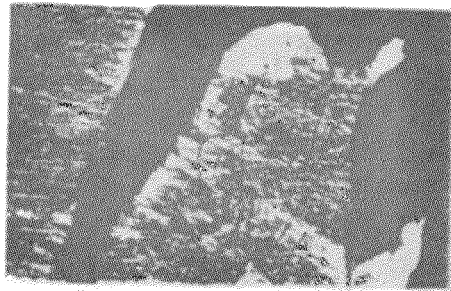
$v_c = 100 \text{ m/min}$   
 $f = 0,106 \text{ mm/vrt}$



$v_c = 100 \text{ m/min}$   
 $f = 0,193 \text{ mm/vrt}$



$v_c = 100 \text{ m/min}$   
 $f = 0,303 \text{ mm/vrt}$



$v_c = 160 \text{ m/min}$   
 $f = 0,106 \text{ mm/vrt}$

Oblika orodja: RNGN 09 03 00 T - KBN

Globina rezanja:  $a_p = 2 \text{ mm}$

$\alpha$	$\gamma$	$\lambda$	$r$
$+6^\circ$	$-6^\circ$	$-4^\circ$	4,75 mm

Sl. 2. Odrezki, ki so zaradi visoke temperature v deformacijski coni rekristalizirali. (material CL.3462).

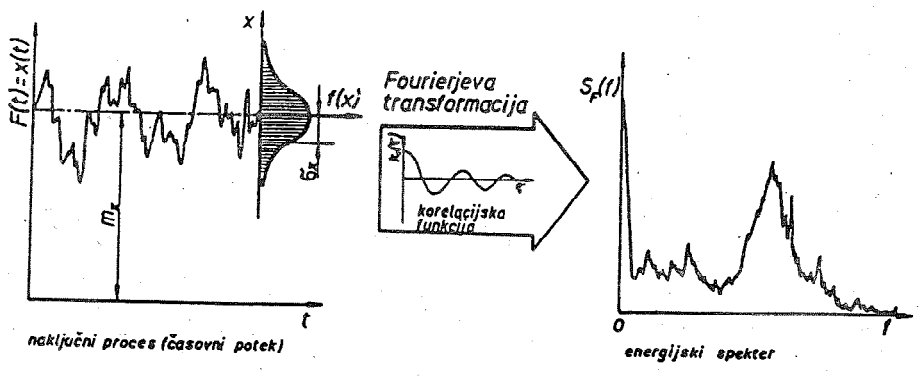
#### 4. ANALIZA ENERGIJSKEGA SPEKTRA DINAMIČNIH REZALNIH SIL

Proces odrezavanja je dinamičen proces, ki se s časom spreminja in ga lahko zelo dobro okarakteriziramo z rezalnimi silami, ki so tudi dinamičnega karakterja /4/. Pri nespremenjenih pogojih rezanja ( $v_c$ ,  $f$ ,  $a_p$  ...) lahko smatramo rezalno silo, kot vrsto statične in dinamične komponente

$$F(t) = F_{st} + F_d(t).$$

Če privzamemo, da je proces odrezovanja stacionaren naključni proces, potem predstavlja (s statističnega vidika) statična komponenta srednjo vrednost rezalne sile oziroma prvi položajni moment  $m_x$ , dinamično komponento pa lahko

izrazimo z varianco  $\sigma_x^2$  ali drugim centralnim momentom, ki predstavlja mero raztrosa okoli srednje vrednosti  $m_x$ , slika 3 (levo).



Sl. 3. Model vrednotenja naključnega procesa.

Nova mera, ki omogoča popis stacionarnega naključnega procesa po času je korelacijska funkcija. S Fourier-ovo transformacijo korelacijske funkcije dobimo spekter moči v frekvenčnem prostoru slika 3 (desno). Ta predstavlja frekvenčno sestavo naključnega procesa. Pri tem varianca  $D_{xk}$ , ki se v stacionarnem procesu pojavi pri frekvenci  $\omega_k$  niha v povprečju s to frekvenco.

S spektralno analizo dinamičnih rezalnih sil skušamo ugotoviti ali je proces odrezavanja stabilen. Pojav nestabilnosti procesa zasledimo kot povečanje jakosti spektra pri določeni frekvenci; to pa hkrati odpira možnosti zasledovanja in identifikacije obdelovalnega procesa ter v nadaljnjem koraku tudi adaptivno krmiljenje in optimiranje obdelovalnih sistemov.

V okviru raziskav dinamike rezalnega procesa, pri odrezovanju avstenitnega manganovega jekla 12 Mn, smo uporabljali orodja različne geometrije rezanja in kakovosti rezalnega materiala. Dinamične rezalne sile smo merili z dinamometrom Kistler tip 9239 A, dinamično analizo signalov /5/ pa smo opravili z analizatorjem HP DYNAMIC-SIGNAL ANALYSER tip 3562 A.

Kompletni rezultati raziskav energijskih spektrov dinamičnih rezalnih sil, pri odrezovanju manganovega jekla 12 Mn, so zbrani v posebnem gradivu /6/. V pričujočem prispevku bo podanih le nekaj zanimivih spektrov dinamičnih sil, ki smo

jih dobili pri odrezovanju z orodjem iz karbidne trdine (sl.4) ter s kubičnim borovim nitridom (sl.5). V obeh prikazih je poudarek na spremembi dinamičnega spektra pri dvakratnem povečanju rezalne hitrosti oziroma podajanja.

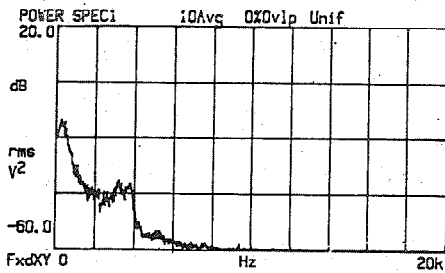
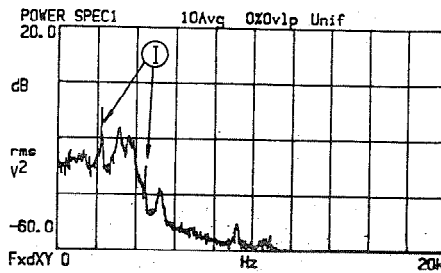
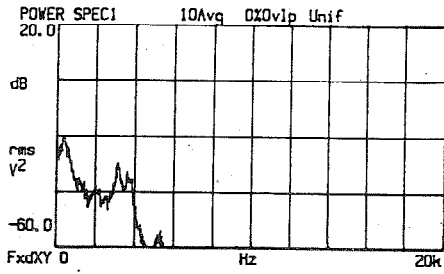
S slike 4 je razvidno, da pri rezanju s ploščico iz karbidne trdine P 25 povečanje hitrosti od 15 m/min na 30 m/min povzroča povečanje nestabilnosti rezalnega procesa (večja amplituda značilnega vrha ter premik težišča spektra proti višjim frekvencam). Hladno utrjanje odrezka povzroča močno obrabo rezalnega robu kar se kaže v nestabilnosti procesa. Povečanje podajanja pa nasprotno vpliva na stabilizacijo rezalnega procesa.

Pri rezanju z orodjem iz kubičnega borovega nitrida se, zaradi že omenjenih ekonomskih razlogov, zahtevajo bistveno večje rezalne hitrosti. Raziskave so potrdile, da se pri določeni rezalni hitrosti odrezek tako močno segreje, da nastopi rekristalizacija. S tem se bistveno spremenijo razmere na rezalnem robu, ki vodijo k stabilnejšem rezalnemu procesu. Na sliki 5 je razvidno, da se pri rezanju v območju hitrosti od 40 do 100 m/min, stabilnost procesa bistveno nespeminja (če ravno je močnejše izražena, kot v primeru rezanja s P 25). Vzrok je močnejša utrditev odrezka, ki pri teh hitrostih še ne dosega temperature rekristalizacije.

## 5. SKLEPNE UGOTOVITVE

Pri obdelavi avstenitnih manganovih jekel (npr. ČL.3462) je poglobitni problem utrjevanje materiala pri odrezovanju. Utrjevanje materiala povzroča močno povečanje obrabe orodja in vpliva na dinamično rezalnega procesa. Iz omenjenih razlogov je možna uporaba klasičnih orodij pri struženju, vrtanju in frezanju le z rezalno hitrostjo okoli 60 m/min. Za obdelavo pri večjih rezalnih hitrostih pa uporabljamo sodobna orodja iz kubičnega borovega nitrida, ki pri končnem finem rezu brez težav odstranijo tanek sloj utrjene plasti. Pri tem so rezalne hitrosti okoli 200 m/min. Raziskave so pokazale, da velike rezalne hitrosti in manjši prerez odrezka vodijo k rekristaliziranemu torej neutrjenemu odrezku. Ob tem se občutno zmanjšajo rezalne sile, zveča pa se obstojnost orodja iz kubičnega borovega nitrida.

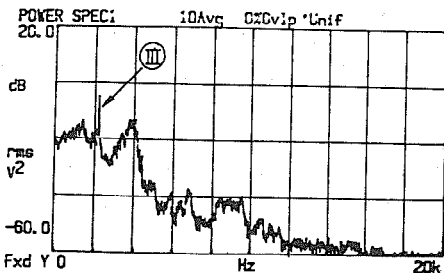
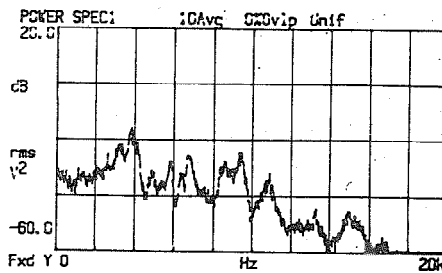
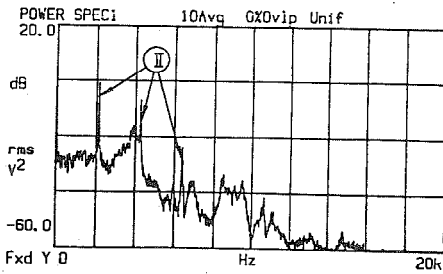
V prispevku je prikazana strukturna analiza odrezka ter sprememba strukture odrezka glede na režime dela: prehod iz utrjenega-hladno deformiranega v pregret, mehak-rekristaliziran odrezek.



f \ v <sub>c</sub>	15	30
0,10	x	x
0,24	x	

orodje: SNGN 120408 - P 25  
 glob.rezanja: a<sub>p</sub> = 2,0 mm

Sl. 4. Primerjava energijskih spektrov dinamičnih rezalnih sil (ČL.3462 - karbidna trdina P 25).



f \ v <sub>c</sub>	40	100
0,10	x	x
0,24	x	

orodje: RNGN 090300 T - KBN  
 glob.rezanja: a<sub>p</sub> = 2,00 mm

Sl. 5. Primerjava energijskih spektrov dinamičnih rezalnih sil (ČL.3462 - kubični borov nitrid, Amborite).

Z analizo energijskega spektra dinamičnih sil ugotavljamo ali je proces odrezavanja stabilen ter pogoje, pri katerih se kažejo določene nestabilnosti. Sprotna identifikacija rezalnega procesa omogoča odkrivanje zgodnjih pojavov nestabilnosti procesa, ki se manifestirajo kot povečanje jakosti spektra pri določeni frekvenci, in s tem možnost za napovedovanje loma orodja.

#### L i t e r a t u r a

- /1/ Kopač, J.; Seljak, Z.: Transformacija materiala na rezalnem robu pri struženju avstenitnih manganovih jekel, XIX. Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Kragujevac, 1985.
- /2/ Kopač, J.; Seljak, Z.: Zaostale napetosti po odrezovanju Mn-jekel, XX. Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Beograd, 1986.
- /3/ Skupina avtorjev: Struženje močno legiranih manganovih avstenitnih jekel, Poročilo o raziskavah za RSS, Ljubljana, 1987.
- /4/ Peklenik, J.; Mosedale, T.: A Statistical Analysis of the Cutting System Based on an Energy Principle, Proc. of the 8th Int. MTDR Conf., Manchester, 1967.
- /5/ x x x : Hewlett Packard - The fundamentals of signal analysis, prospektno gradivo.
- /6/ Soković, M. in sod.: Raziskave spektralne analize rezalnega procesa pri ogljikovih in modificiranih legiranih konstrukcijskih jeklih, Posebno poročilo (v rokopisu), 1988.

J. Kopač, M. Soković

#### CONTRIBUTION TO CUTTING PROCESS IDENTIFICATION IN CUTTING 12 Mn MANGANESE STEEL

The main problem in machining austenite manganese steel (e.g. ČL.3462) is material hardening by cutting. This causes a strong increase in the wear rate and affects the dynamics of the cutting process. Investigations have shown that cutting speeds and a smaller cross-sectional area of the chip lead to recrystallisation, which means an unhardened chip. This considerably reduces the cutting forces, at the same time increasing the life time of the tool made of cubic boron nitride. The contribution presents an analysis of the chip structure and structural changes of the chip with regard to the cutting conditions: the transition from the hardened cold-deformed chip into an overheated soft-recrystallized chip.

Analyzing the energy spectrum of the dynamic forces, it was found out whether the cutting process is stable and at which conditions certain instabilities arise. A continuous identification of the cutting process enables an early discovery of the instabilities of the process which manifest themselves in the increased intensity of the spectrum at a certain frequency. Thus a possibility was found to predict the failure of the tool.

S. Dolinšek, J. Kopač<sup>\*)</sup>

ANALIZA REZALNEGA PROCESA PRI VRTANJU S KARBIDNIMI TRDINAMI

1. UVOD

Znaten napredek na področju vrtanja je bil nedvomno narejen z uspešno uporabo posebno konstruiranih svedrov z rezalnim delom z izmenljivimi ploščicami iz karbidnih trdin, ki omogočajo izdelavo izvrtin premerov od 18 do 100 mm in več ter globin do štirikratnega premera svedrov. Od začetnih eksperimentalnih poskusov so nastali z modifikacijo rezalnih robov svedri, ki se danes zanesljivo uporabljajo na NC in CNC strojih in jih najdemo v proizvodnem programu vseh pomembnejših izdelovalcev orodij. Prednosti, kot so: visoke rezalne in podajalne hitrosti, zanesljivo odvajanje velike količine odrezkov, zadovoljiva točnost obdelave, kratka pot za vtek in iztek orodja, ohranjanje konstantne dolžine in uporabnost za različne tehnološke operacije odrezavanja, so privedle do uporabe teh svedrov namesto vijlačnih na modernih obdelovalnih centrih pa tudi klasičnih obdelovalnih strojih /1/.

Vendar se razvoj svedrov z izmenljivimi ploščicami še nadaljuje. Posebno področje je vrtanje neugodnih obdelovanih materialov (avsteniti, kaljeni, cementirani, ..., materiali). Raziskave so usmerjene v določitve ustreznih rezalnih materialov in rezalnih parametrov za uspešno vrtanje takšnih materialov, s čimer zamenjamo alternativne drage postopke izdelave izvrtin /2/. V področju dobro obdelovanih materialov pa se razvoj nadaljuje v smeri optimiranja geometrične oblike rezalnega robu, z raziskavami določamo obdelovalnost različnih obdelovanih materialov in z obdelovalnimi podatki dopolnjujemo banko tehnoloških podatkov /3/.

<sup>\*)</sup> mag. Slavko Dolinšek, dipl. inž., asistent, Fakulteta za strojništvo v Ljubljani Murnikova 2

dr. Janez Kopač, dipl. ing., docent, Fakulteta za strojništvo v Ljubljani, Murnikova 2



## 2. OPIS NAMENA RAZISKAVE, OBDELOVANEGA MATERIALA, ORODJA IN MERILNE OPREME

Največji problem, ki se pojavlja pri uporabi svedrov z izmenljivimi ploščicami je v tem, da rezalnega procesa med vrtnjem ne moremo spremljati. Vizuelno lahko sklepamo na ugodno rezanje na rezalnih robovih svedra iz oblike odrezkov, senzorično pa iz signala rezalnih sil na svedru. Pomembno je, da se med rezanjem ne lomijo rezalni robovi karbidnih trdin, kar ima za posledico neuporabnost orodja in izdelka. Če lahko pri uporabi vijčnih svedrov iz zvočnega signala zaznamo njegovo izrabljenost, tega pri svedru z izmenljivimi ploščicami ne more. Ustrezna izbira rezalnih parametrov je povezana z ugodno obliko odrezka in stabilnim vrtnjem. Tako lahko pričakujemo enakomerno obrabo rezalnih robov ploščic iz karbidne trdine do eksperimentalno določenega obstojnostnega kriterija.

V raziskavi so prikazani rezultati dobljeni pri vrtnju vzmetnega jekla zaboljšanje trdote 33 HRC z naslednjo vsebnostjo legirnih elementov:

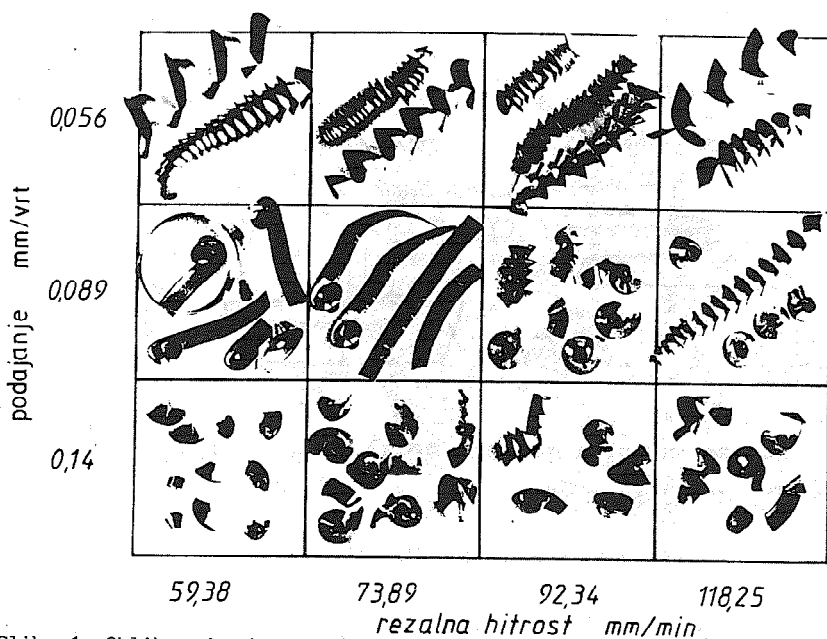
vsebnost	%C	%Si	%Mn	%Cr	%Ni	%Mo	%V	max %Cu	max %S	max %P
od	0,42	0,17	0,50	0,80	1,30	0,20	0,10	0,25	0,007	0,02
do	0,50	0,37	0,80	1,10	1,80	0,30	0,18			

Vrtali smo s svedrom firme SANDVIK Coromant oznake T-MAX R 416.1-0210-20-03, za vrtnje izvrtin premera  $d = 21$  mm, izmenljive ploščice so trikotne oblike z oznako WCMX 04 02 08 R - 53, kvalitete rezalnega materiala po proizvajalcu je 135 P 35 kar ustreza po standardu P 35 . Uporabljeni obdelovalni stroj je bil zaradi potreb po zadostni togosti univerzalni frezalni stroj GUK - 3N proizvajalca Prvomajska Zagreb.

Za kvalitetne rezultate moramo zasnovati in sestaviti ustrezen merilni sistem. Uporabili smo merilne naprave, ki so se pri podobnih meritvah že izkazale za zanesljive. Za analizo nastajanja odrezka v coni rezanja smo uporabili napravo za trenutno ustavitev rezanja pri vrtnju . Statično in dinamično karakteristiko rezalne sile smo zasledovali preko piezoelektričnega merilnika sile firme KISTLER z oznako KIAG 9273 in ojačevalca naboja KISTLER tip 5001. Za zapis in analizo dinamičnih rezalnih sil smo uporabili dinamični signalni analizator HP tip 3562 A in ustrezen dvokomponentni pisalnik. Potek obrabe na rezalnih robovih smo odčitavali optično preko orodjarskega mikroskopa.

### 3. DOLOČITEV OBMOČJA REZALNIH PARAMETROV IN POTEKA OBRABE NA REZALNIH ROBOVIH SVEDRA

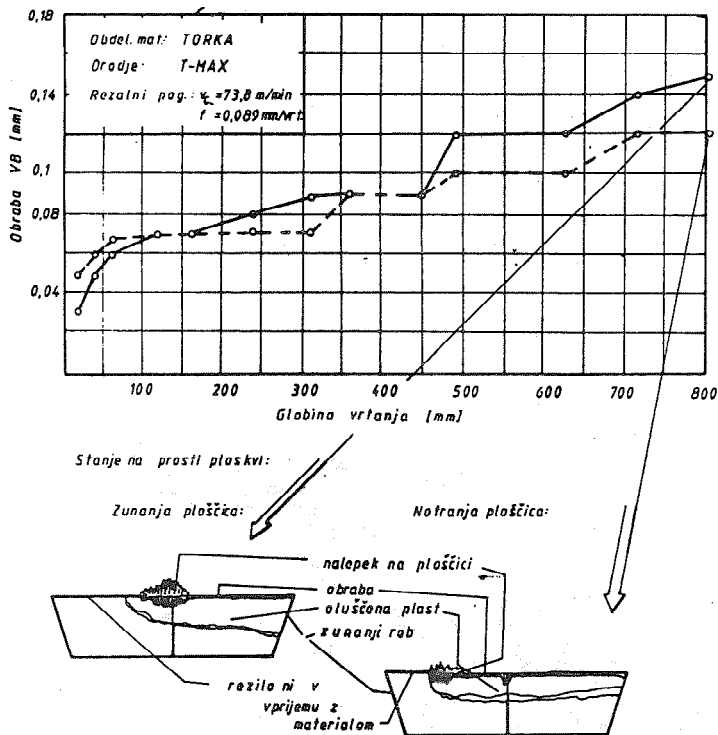
Območje rezalnih parametrov (rezalne hitrosti in podajanje) je pri vrtnanju s svedrmi z izmenljivimi ploščicami v večji meri predpisana z obliko odrezkov kot pa s trdnostjo rezalnih robov ali stebila svedra. Pri vrtnanju žilavega vzmetnega jekla, pa je to območje še dosti ožje kot pri vrtnanju dobro obdelovanih materialov, ker nastaja neugodna oblika odrezka. Če vzamemo vse ostale vplive na oblikovanje odrezkov kot predpisano dejstvo lahko na njihovo obliko vplivamo k spreminjanjem rezalne in podajalne hitrosti. Na sliki 1 vidimo, da se nahajamo v ugodnem območju odrezkov pri podajanjih nad 0,1 mm/vrt in rezalnih hitrostih nad 90 m/min. Za vrtnanje s sinchrom z izmenljivimi ploščicami lahko ugotovimo, da ne moremo uporabljati podobnih klasifikacijskih tabel oblike odrezkov, kot pri vrtnanju z vijačnim svedrrom /4/ in je potrebno izdelati drugačne klasifikacijske tabele.



Slika 1: Oblika odrezkov v odvisnosti od rezalne hitrosti in podajanja pri vrtnanju vzmetnega jekla s svedrmi z izmenljivimi ploščicami.

Kljub ugodni obliki odrezkov v višjih območjih rezalnih parametrov pa smo kasneje omejeni pri prevelikih presekih odrezkov, zaradi lomljenja rezalnih robov ploščic proti osi svedra (v območju nižjih rezalnih hitrosti), kar smo ugotovili

s trenutno prekinitivjo rezanja. Tako znaša sprejemljivo območje rezalnih hitrosti od 90 m/min do 120 m/min in podajanj od 0,1 m/vrt do 0,2 mm/vrt. V tem območju tudi določamo obstojnost svedra z izmenljivimi ploščicami, poteka obrabljanja ploščic pri enem od eksperimentalnih zasledovanj kaže slika 2.



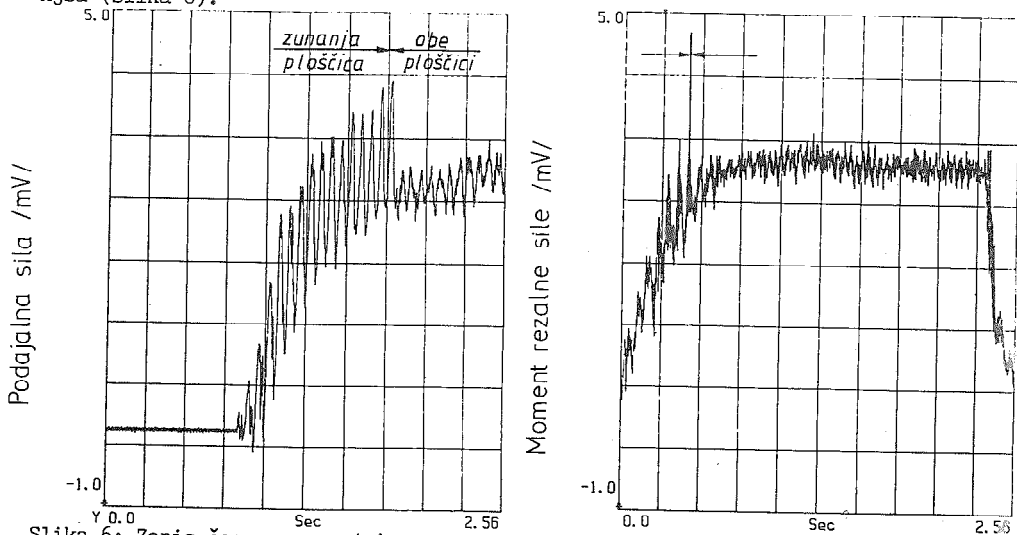
Slika 2: Oblika in potek obrabljanja ploščic svedra z izmenljivimi ploščicami pri vrtanju vzmetnega jekla.

#### 4. REZALNE SILE IN DOLOČITEV SPECIFIČNIH REZALNIH SIL

Rezalne sile na rezalnih robovih so pokazatelj rezalnega upora na ploščicah svedra. Vendar s svojo statično karakteristiko (povprečno vrednostjo) še ne dajo dovolj informacij, da bi bilo mogoče predvideti zlom rezalnih ploščic. Dinamična karakteristika rezalnih sil pa nakazuje na stabilnost procesa rezanja in določa območje rezalnih parametrov. Statično komponento rezalnih sil običajno izrazimo preko specifičnih rezalnih sil. Za vrtanje z vijaknimi svetri poteka njihovo določanje po uveljavljenem principu. Kienzlejeve enačbe s predpostavkami

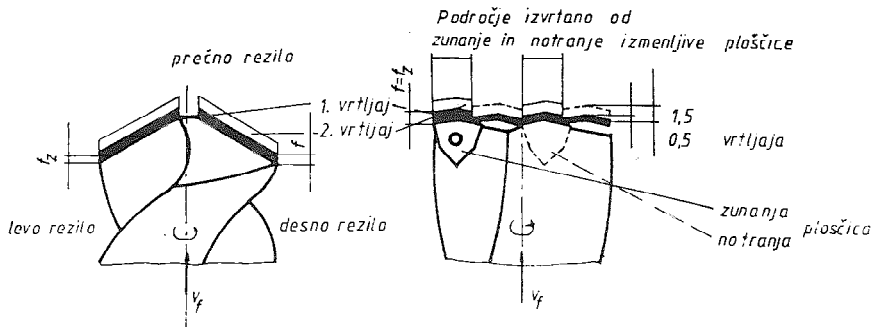
o enakih presekih odrezkov na rezalnih robovih vijakačnega svedra in neodvisnosti od rezalne hitrosti, kar pa ne drži za svedre z izmenljivimi ploščicami. Slika 3 kaže primerjavo presekov odrezkov na obeh svedrih . Sveder z izmenljivimi ploščicami nima prečnega rezalnega robu ampak le dve nesimetrično nameščeni rezalni ploščici. Zato je geometrična razdelitev rezalnih sil drugačna kot pri vijakačnem svedru (slika 4) /5/. Izmerjene velikosti rezalnih sil pri različnih rezalnih parametrih kaže slika 5. Na sliki so podane tudi vrednosti specifičnih rezalnih sil, ki upoštevajo tudi vpliv rezalne hitrosti.

Z analizo dinamične komponente rezalnih sil smo želeli poiskati sklepe o stabilnosti procesa vrtnanja. Zanimiv je odziv ob pričetku vrtnanja. Zaradi posebne geometrične oblike konice svedra začne rezati naprej ena ploščica, ko režeta obe ploščici, pa se velikost dinamične in statične komponente rezalne sile zmanjša (slika 6).

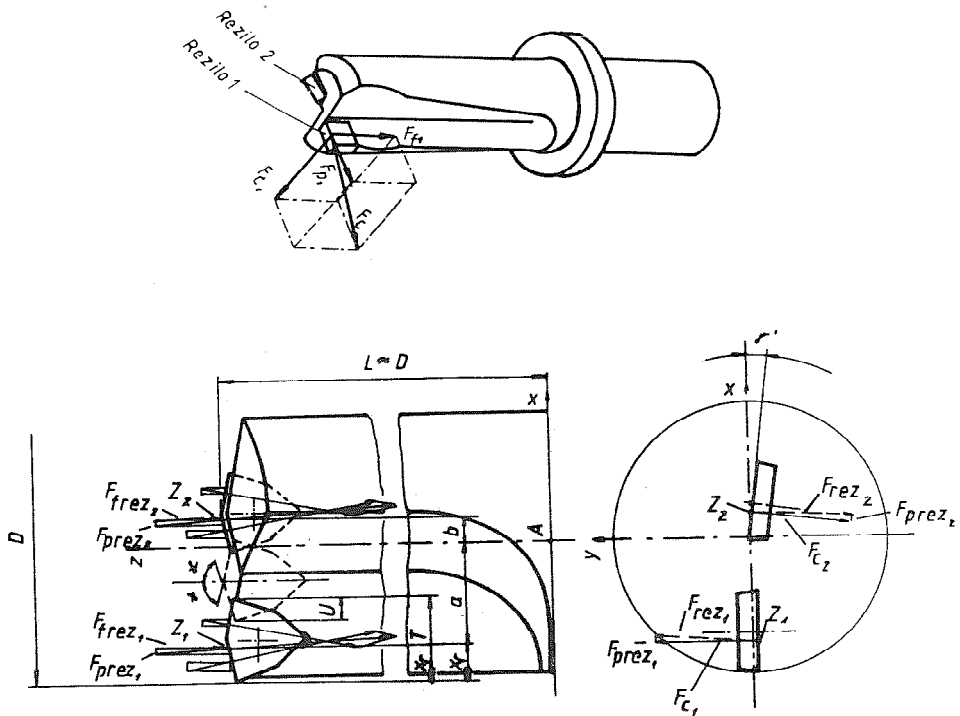


Slika 6: Zapis časovnega poteka rezalnih sil pri začetku rezanja svedra z izmenljivimi ploščicami.

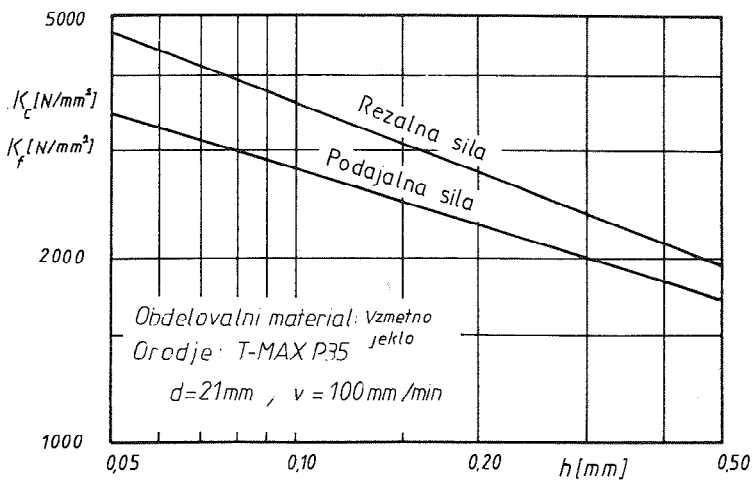
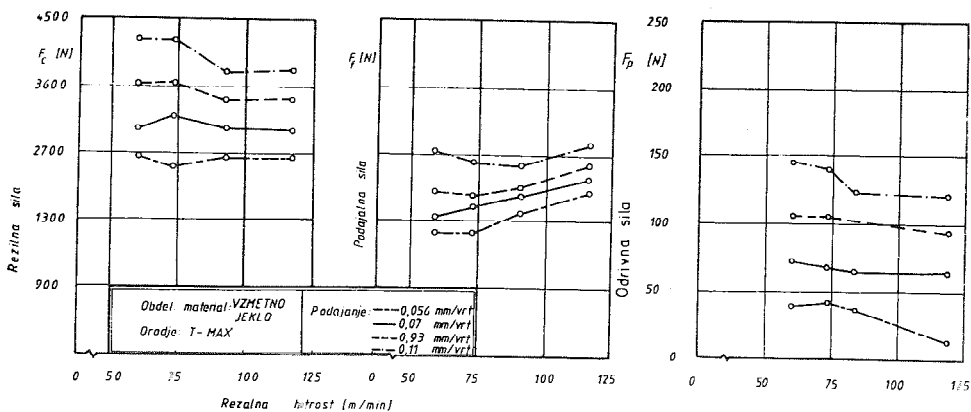
Analiza rezalnih sil v časovni in frekvenčni domeni je pokazala, da se z večanjem rezalne in podajalne hitrosti stabilizira rezalni proces, kar lahko sklepamo iz nihanja signala rezalne sile in oblike energijskega spektra signala. Začetni rezultati analize dinamične komponente rezalnih sil so se ujemali s predhodnimi sklepi in nam dali osnovo za nadaljne raziskave na tem področju, katerih cilj naj bi bila možnost sprotne kontrole rezalnega procesa.



Slika 3: Preseki odrezkov na rezalnih robovih vijačnega in svedra z izmenljivimi ploščicami.



Slika 4: Geometrična porazdelitev sil na svedru z izmenljivimi ploščicami /5/.



Slika 5: Vrednosti izmerjenih rezalnih sil in izračunanih specifičnih rezalnih sil na svedru z izmenljivimi ploščicami.

## 5. SKLEPNE UGOTOVITVE

V prispevku so prikazani rezultati vrtnja vzmetnega jekla s svedri z izmenljivimi ploščicami. Zaradi drugačnih rezalnih razmer na rezalnih robovih svedra od vrtnja lahko obdelovalnih materialov smo pozornost usmerili v nastajanje in oblikovanje odrezka v odvisnosti od rezalnih parametrov. Območje izbire rezalne in podajalne hitrosti lahko predpišemo glede na ugodno obliko odrezkov, ki je v povezavi z enakomerno obrabo rezalnih robov ploščic izključujoč poškodbe in lome. Pomemben pokazatelj obdelovalnosti je tudi velikost rezalnih sil. Uporabljen model za izračun specifičnih rezalnih sil je bil razvit glede na geometrijske karakteristike svedra z izmenljivimi ploščicami, podatki obdelovalnosti pa vnešeni v banko tehnoloških podatkov. Stabilnost procesa vrtnja pa se odraža preko dinamičnih rezalnih sil, rezultati se ujemajo s predhodnimi ugotovitvami oblikovanja odrezkov in dajejo osnovo za nadaljne raziskave.

## 6. LITERATURA

- /1/ Reiter N.: Bohren ins volle mit einem neuen Wendeschneidplatten-Kurzlochbohrer, Industrie anzeiger 103(1981), št.13, str. 28 do 32.
- /2/ Steinmetz K.: Harte Eisenkerstoffe wirtschaftlich zerspan, Industrie Anzeiger, 106(1984), št.8, str. 49-53.
- /3/ Seljak Z., Dolinšek S.: Vrtanje s svedri z izmenljivimi ploščicami, XXI. Svetovanje proizvodnog strojarstva Jugoslavije, Opatija 1987.
- /4/ Skupina avtorjev: Določanje obdelovalnosti pri struženju, vrtnanju in frezanju, navodila za interno uporabo, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana 1986.
- /5/ Striegl G.: Zerspanungskräfte und momente beim Bohren mit Wendeschneidplatten-Vollbohrern, Werkstatt und Betrieb 114(1981), št.2, str. 103 do 105.

S. Dolinšek, J. Kopač

## ANALYSIS OF CUTTING PROCESS IN DRILLING WITH HARD METAL

The contribution presents the results of drilling spring steel with indexable insert-tipped drills. Due to the different conditions of cutting on the drill cutting edges than those present in drilling materials which are easy to machine, the attention was focussed on chip formation in dependence on cutting parameters. The range of the cutting speed and feed rate can be prescribed with regard to desirable chip formation and is connected with the uniform wear of the cutting plates excluding damage and failure. An important indicator of machinability is also the magnitude of the cutting forces. The model used for the calculation of specific cutting forces was developed taking into account the geometry of the indexable-insert tipped drills, and the machinability data were entered into the technology database. The stability of the process of drilling is reflected in the dynamical cutting forces. The results are in good agreement with previously established findings about chip formation and can serve as a firm basis for further research.

B. Sovilj, D. Milikić, M. Gostimirović\*)

METODA MERENJA TEMPERATURE REZANJA PRI ODVALNOM  
GLODANJU

1. UVOD

Jedan od veoma bitnih parametara koji utiču na proces obrade odvalnim glodanjem je i generisana toplota u zoni rezanja koja dovodi do formiranja temperaturnih polja u odvalnom glodalu, strugotini i obradku. Tačno definisanje temperaturnog polja u zubu odvalnog glodala, od koga zavisi i proces habanja na njemu, u mnogo-me bi olakšalo napore da se odrede optimalni uslovi eksploatacije ovog reznog alata. Nažalost, složenost procesa odvalnog glodanja sa velikim brojem definisanih i ne-definisanih uticajnih parametara onemogućava uspešno izvršenje gornjeg zadatka.

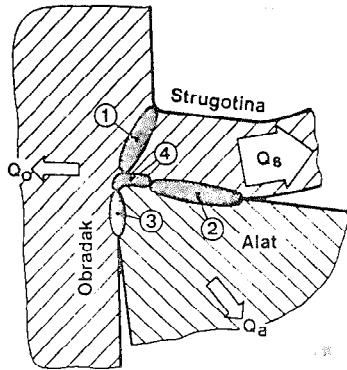
U procesu obrade rezanjem dovedena mehanička energija transformiše se u zoni rezanja, putem elastične i plastične deformacije, trenja na kontaktnim površinama i unutrašnjeg trenja u materijalu u toplotnu energiju. Pretvaranje mehaničke energije u toplotnu odvija se u četiri karakteristične zone (sl. 1 |1|), pri čemu se pojedine zone delimično preklapaju. Zone deformacije i trenja predstavljaju toplotne izvore pri rezanju. Od navedenih toplotnih izvora se toplotna energija odvodi preko strugotine ( $Q_s$ ), alata ( $Q_a$ ) i obradka ( $Q_o$ ). Kao rezultat takvog toplotnog bilansa obrazuje se u obradsku, alatu i strugotini odgovarajuće temperatursko polje, koje se menja sve dok se ne uspostavi ravnoteža između razvijene i odvedene količine toplote.

Kao što je poznato razvijene su metode za približno određivanje vrednosti temperatura u alatu zasnovanih uglavnom na analitičko-eksperimentalnim principima, metodama numeričke matematike i analogije (sl. 2 |4|).

---

\*) Dr Bogdan Sovilj, dipl.ing., docent, Dr Dragoje Milikić, dipl.ing., vanr.profesor, Mr Marin Gostimirović, dipl.ing., asistent, Fakultet tehničkih nauka - Institut za proizvodno mašinstvo, Novi Sad, ul. Vladimira Perića - Valtera br. 2.

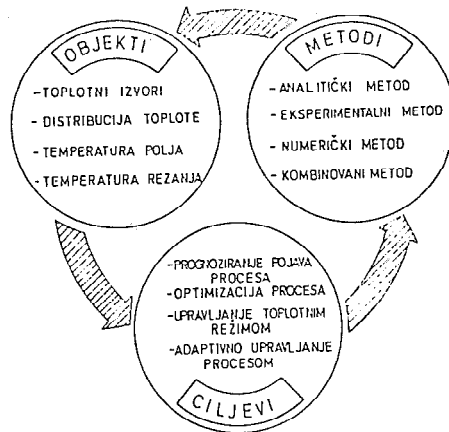




1. Toplota deformacija u ravni smicanja
2. Toplota trenja na grudnoj površini
3. Toplota trenja na ledjnoj površini
4. Toplota deformacije i unutrašnjeg trenja u kočionom sloju

Sl. 1. Šema nastajanja i distribucija toplotne energije pri odvalnom glodanju

Merenje temperatura u zoni rezanja, zbog koncentracije toplotne energije na vrlo uskom prostoru, velikih specifičnih pritisaka i ekstremno visokih temperatura uobičajenim postupcima merenja temperatura, koji se koriste u tehničkim i fizikalnim istraživanjima, ovde je uglavnom neprimenljivo. Ove poteškoće merenja temperatura pri rezanju podstakle su sistematska istraživanja, na tom području, kako bi se uz primenu savremenijih uređaja i iskustava razvile efikasne i pouzdane metode za ova merenja.



Sl. 2. Objekti, metodi i ciljevi termodinamike rezanja.

Veoma široku primenu pri obradi metala rezanjem, zbog relativno jednostavne primene, našle su metode koje koriste termoelektrični efekat. Za merenje temperatura pri obradi rezanjem koriste se tri varijante ove metode i to: prirodni, poluveštački i veštački termoparovi [6].

Specifična osobenost geometrijske forme odvalnog glodala i obradka, a tako-  
dje i posebna složenost procesa rezanja stvaraju poteškoće pri merenju temperatura.  
Kao rezultat toga poznato je malo metoda i rezultata merenja temperatura pri ob-  
radi odvalnim glodanjem. Nasuprot tome, razvijen je veliki broj metoda za merenje  
temperatura pri obradi struganjem, bušenjem i glodanjem. Zbog specifičnog alata i  
obradka pri odvalnom glodanju teško je primeniti metode i rezultate ostvarene pri  
drugim obradama.

Na osnovu analize razvijenih dosadašnjih metoda i koristeći dosadašnja iskustva  
prišlo se razvoju vlastite metode sa željom da se sagledaju kakve se temperature  
javljaju na ledjnoj površini zuba odvalnog glodala.

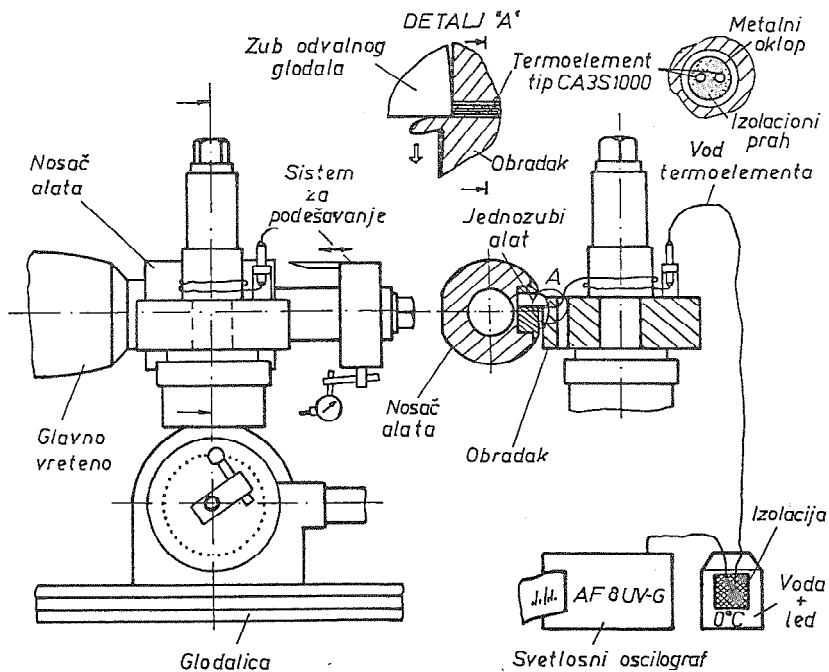
## 2. PRIKAZ RAZVIJENE METODE ZA MERENJE TEMPERATURE PRI ODVALNOM GLODANJU

Zbog velikog značaja koje ima poznavanje temperatura u procesu rezanja odval-  
nim glodanjem nametnula se potreba za metodom sa kojom bi se merile temperatu-  
re koje su najinteresantnije sa stanovišta habanja alata.

Razvoj triboloških procesa na površinama zuba odvalnog glodala dovodi do defor-  
macije vrhova i do promene geometrije. Sa porastom deformisanosti vrha zuba bilo  
koje vrste, sposobnost odvalnog glodala da vrši rezanja se smanjuje. U jednom tre-  
nutku pohabanost odvalnog glodala dostiže takav stepen da dalje rezanje sa njim ni-  
je moguće. Kritična pohabanost odvalnog glodala naziva se najčešće "**kriterijum za-  
tupljenja**" odvalnog glodala. Veličina kritične pohabanosti alata zavisi od velikog bro-  
ja faktora koji se odnosi na obradak, mašinu i ekonomiku procesa rezanja u celini.  
Uticaj kriterijuma zatupljenja alata na troškove obrade svake proizvodne operacije  
obrade metala rezanjem je veliki, pa se njegovom izboru pri istraživanjima posvećuje  
posebna pažnja. Na bazi brojnih eksperimentalnih merenja utvrđeno je da se kao  
kriterijum za ocenu potpune zatupljenosti odvalnog glodala može usvojiti širina kon-  
centrisanog habanja po ledjnoj površini zuba na delu prelaznog radijusa od izlaznog  
bočnog prema temenom sečivu ( $h_1$ ).

Osnovna pretpostavka od koje se pošlo pri razradi merne metode je postojanje  
minijaturnih termoelemenata, koji se danas mogu naći na tržištu, a čiji spoljašnji  
prečnik zaštitnog omotača iznosi 0,5 mm i manje. Pri razradi ove metode krenulo se  
od ideje da se minijaturni veštački termopar ugradi u obradak. Zbog napred navede-  
nih složenosti alata, obradka i procesa odvalnog glodanja pri ovim istraživanjima ko-  
rišćeno je razvijeno modelsko odvalno glodanje [3], ali sada prilagodjeno radu na  
univerzalnoj glodalici. Kao alat korišćeno je jednozubo odvalno glodalo [3]. Zub od-  
valnog glodala izradjen je od Č9780, a prečnik alata podešen je na  $\phi$  125 mm. Za  
postavljanje alata i obradka na univerzalnu glodalicu konstruisani su i izradjeni nosa-

či i elementi za stezanje. Da bi se dobila odgovarajuća kinematika kretanja, pored postojećih zupčanika, konstruisan je i izradjen neophodni zupčanik. Sem toga za tačno pozicioniranje obradka u odnosu na alat konstruisan je i izradjen uređaj sa komparatorom. Zahvaljujući ovom uređaju moguće je postaviti obradak u odnosu na modelsko odvalno glodalo, odnosno zub odvalnog glodala u željeni položaj. Odvalno glodalo ima obrtno kretanje, obradak se takodje obrtno kreće, ali samo za odredjen ugao. Sto glodalice sa podeonom glavom na kome je postavljen obradak kreće se podužno odredjenom brzinom. Pri ovoj obradi obradjuje se samo jedan zub, odnosno jedno medjuzublje. Kada obradak i alat nisu u zahvatu, tj. kada se preko graničnika zaustavi kretanje stola isti se vraća u početni položaj, koji je takodje regulisan graničnikom. Sto se podiže ili spušta za odabrani aksijalni korak, pa se zatim izvrši obrada i sve to ponavlja dok se ne obradi cela širina zupčanika.



Sl. 3. Šema korišćene instrumentacije pri merenju temperature pri odvalnom glodanju.

Kao obradak korišćen je uzorak od Č4721 prečnika  $d_0 = 141$  mm i širine  $b = 54$  mm. Na obradku je izbušeno 8 otvora  $\phi 15$  mm na udaljenju oca 15,5 mm od spoljne ivice obradka. Na spoljne strane obradka, u osama izbušenih otvora od  $\phi 15$  mm izbušeni su otvori  $\phi 0,6$ . Prvi otvor nalazi se na rastojanju 2 mm od gornje čeonje površine, drugi na rastojanju 52 mm, a treći na rastojanju 2 mm od donje čeonje površine obradka.

U prvi otvor, koji se nalazi na 2 mm od gornje čone površine, uvučen je termoelemenat i zalepljen sa unutrašnje strane kroz otvor  $\phi$  15 mm. Minijaturni termoelemenat tip CA 3S100 izabran je iz serije "Thermocoax". Karakteristike termoelementa su:

- žica termopara	NiCr-Ni (Chromel-Alumel)
- polariteti	(C50000S) NiCr (+) Ni (-)
- naponska karakteristika i tolerancija	odgovara DIN 43710
- termonapon	cca 41 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
- izolacija	MAGNEZIJUMOKSID MgO
- spoljni prečnik	0,5 mm
- prečnik žice termopara	0,08 mm
- zaštitni omotač	nerdjajući čelik
- debljina zaštitnog omotača	0,06 mm
- temperaturno područje	-200 $^{\circ}\text{C}$ do 1200 $^{\circ}\text{C}$
- minimalni prečnik savijanja	0,5 mm.

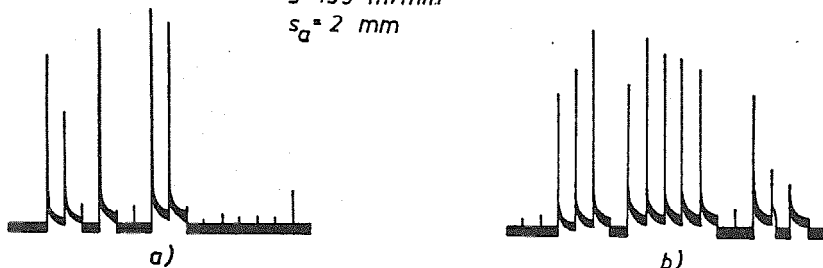
Dužina termoelementa je 1000 mm, dužina odgovarajućeg voda (C5000S) za vezu sa instrumentom 5000 mm, a veze između termoelementa i voda izvedena je specijalnim utikačem LBE1/LSA1. Na slici 3 prikazan je termoelemenat sa zaštitnim omotačem firme PHILIPS.

Na obradku (uzorku) je postavljen držač za utikače. Vod se povezuje sa Cu-provodicima sa kojim se termoelemenat spaja sa mernom instrumentacijom. Kao merni instrumenat korišćen je svetlosni oscilograf "August Fischer", Typ AF 8 UV-G. Svetlosni oscilograf poseduje vrlo osetljivi galvanometar sa elektromagnetnim prigušivačem tip GA 1,1/8H. Spoj voda i Cu-provodka se postavlja u posudu sa ledom radi održavanja nule.

Probna ispitivanja izvedena su pri korišćenju suprotnosmernog i istosmernog procesa odvalnog glodanja. Gornja dva otvora poslužila su za postavljanje termoparova pri suprotnosmernom odvalnom glodanju, a donji otvor korišćen je pri istosmernom odvalnom glodanju.

Na osnovu probnih ispitivanja dobijeni su zadovoljavajući odzivi (sl. 4). Da bi se veličine odziva registrovanih na hartiji oscilografa prevele u iznose za termonapon, odnosno temperaturu, izvršeno je kalibrisanje. Ono je ostvareno pomoću kompenzacionog instrumenta "Thermocontrol" tip YHK, kojim se može vrlo precizno ostvariti jednosmerni napon od 0mV do 100 mV.

MO: Č.4721  
 MA: Č.9780  
 $n=195 \text{ } ^\circ/\text{min}$   
 $s=135 \text{ m/min}$   
 $s_a=2 \text{ mm}$



Sl. 4. Karakteristični zapis merenih temperatura rezanja pri odvalnom glodanju: (a) suprotnosmerno; (b) istosmerno.

### 3. ZAKLJUČAK

Metoda za merenje temperature pri odvalnom glodanju je testirana i daje zadovoljavajući odziv.

Na osnovu ove merne metode može se doći do osnovnih zakonitosti na kojima počiva raspored toplotnih izvora i karakter temperaturnih polja u zubu odvalnog glodala, obradku i strugotini.

Razvijena merna metoda za merenje temperature, uz istovremeno praćenje habanja zuba odvalnog glodala omogućuje uspostavljanje korelacije između temperature i habanja alata.

### REFERENCE

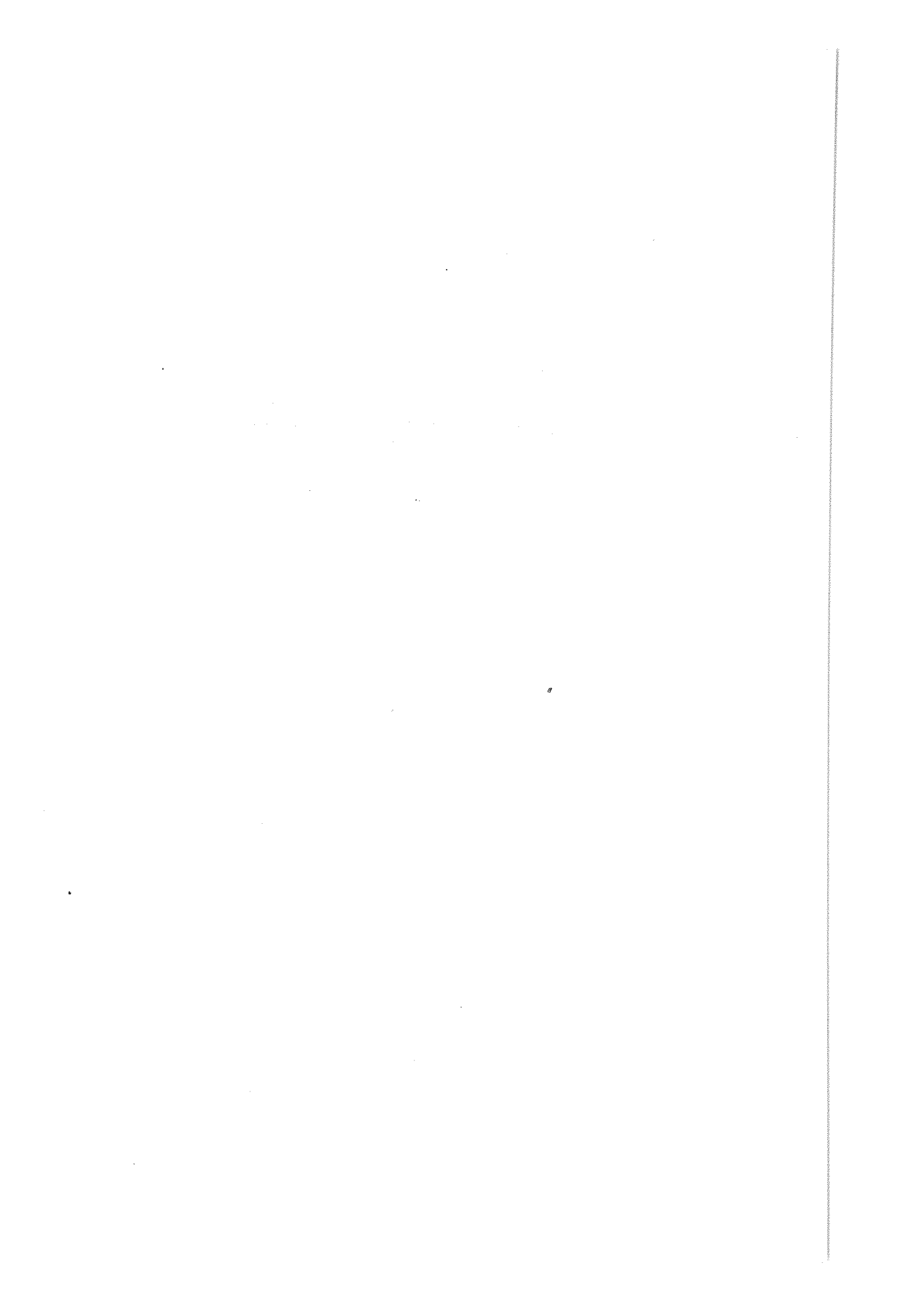
- [1] Milikić, D.: Nova metoda za merenje temperature pri obradi rezanjem i mogućnosti njene tehnološke i senzorske primene, Doktorska disertacija, FTN, Novi Sad, 1980.
- [2] Stanić, J.: Teorija obrade metala I, Mašinski fakultet, Beograd, 1986.
- [3] Sovilj, B.: Optimizacija geometrijskih parametara odvalnog glodala, Magistarski rad, FTN, Novi Sad, 1980.
- [4] Sovilj, B.: Identifikacija triboloških procesa pri odvalnom glodanju, Doktorska disertacija, FTN, Novi Sad, 1988.
- [5] Zahar, C.: Analiza procesa odvalnog glodanja, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1978.
- [6] Gostimirović, M., Milikić, D., Kovač, P.: Merni sistem za određivanje srednje temperature pri obradi rezanjem integrisan sa mikroročunarom, Deseto savetovanje o mjeranju, Plitvička jezera, 1988.
- [7] Mitrović, R.: Modelska ispitivanja procesa odvalnog glodanja, Doktorska disertacija, FSB, Zagreb, 1977.
- [8] Bouzakis, D.K.: Konzept und technologische Grundlagen zur automatisierten Erstellung optimaler Bearbeitungsdaten beim Wälz fräsen, VDI-Verlag GmbH, Disseldorf, 1981.

B. Sovilj, D. Milikić, M. Gostimirović

### Zusammenfassung

#### DIE METHODE FÜR DIE MESSUNG VON TEMPERATUREN BEIM WALZFRASEN

In dieser Arbeit wird die Entwicklung einer Messmethode für die Temperaturmessung beim Walzfräsen dargestellt. Diese Methode, die gleichzeitig die Gestellung des Werkzeugverschleisses ermöglicht, bietet die Möglichkeit einen Korrelationzusammenhang zwischen Temperatur bei Spanen und Werkzeugverschleisses zu definieren.



P. Kovač\*

ZAVISNOST OTPORA REZANJA OD ELEMENATA  
REŽIMA REZANJA I HABANJA ALATA

## 1. UVOD

Istraživanja vezana za promenu komponenata otpora rezanja u funkciji habanja reznog klina su relativno novijeg datuma. Ona su proizašla iz potrebe posrednog praćenja habanja alata pomoću parametara koji se lako mogu kontinualno pratiti. Pošto se komponente otpora rezanja u najnovije vreme mere pomoću dinamometara čiji su izlazni signali električni mogu se koristiti kao ulazni za adaptivno upravljanje procesom jer se preko njih posredno vrši merenje "ekvivalentnog habanja". Polazeći od ovih pretpostavki razradjene su metodologije utvrđivanja obradljivosti materijala obradaka pri različitim materijalima alata i elementima režima obrade, pri čemu se ukazuje na mogućnosti korelacije između komponenti otpora rezanja i parametara habanja VB, [1,2,4].

Za prikazivanje komponenti otpora rezanja najčešće se koriste zavisnosti (Kienzle-Victor), koje baziraju na specifičnom otporu rezanja  $k_{i1}$ :

$$F_i = a \cdot h^{1-c_i} \cdot k_{i11} \quad (1)$$

gde je:  $axh$  - presek strugotine

$i$  - indeks koji odgovara komponenti otpora rezanja.

Da bi se uzelo u obzir habanje alata jednačina (1) se proširuje članom koji se odnosi na dužinu rezanja  $l$ :

$$F_{i(hab)} = a \cdot h^{1-c_{ih}} \cdot k_{i111} \cdot l^{c_{il}} \quad (2)$$

\* Dr Pavel Kovač, dipl. ing, docent Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, ul. Veljka Vlahovića 3.



Ovde se uvodi specifični otpor rezanja za dužinu  $l=1$  m:

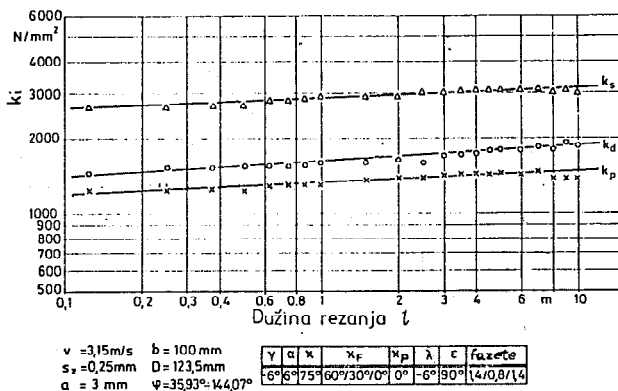
$$a = 1 \text{ mm}$$

$$k_{i111} = k_{i1} \quad h = 1 \text{ mm} \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

$$l = 1 \text{ m}$$

Konstante  $C_{ih}$  i  $C_{il}$  zavise od materijala obradka i uslova obrade.

Zavisnost specifičnog otpora rezanja  $k_i$  od dužine rezanja  $l$  za sve tri komponente otpora rezanja prikazana je na slici 1 /1/.



Sl.1. Specifični otpor rezanja u zavisnosti od dužine rezanja /1/

## 2. MATEMATIČKI MODEL KOMPONENTI OTPORA REZANJA

Na osnovu ranijih istraživanja može se zaključiti da najznačajniji parametri procesa obrade, kao što su otpori rezanja [4], hrapavost obradjene površine [3] i temperature pri rezanju, zavise od parametara habanja alata. U matematički model uvodi se širina pojasa habanja na ledjnoj površini kao najznačajniji parametar  $a$  koji se i najlakše meri. Iz gore navedenih razloga se predlaže da se u matematički model unose širina pojasa habanja  $VB$ , kao univerzalni parametar za sve parametre procesa obrade.

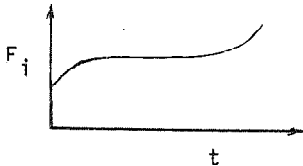
Matematički model za komponente otpora rezanja u funkciji od habanja alata potražen je u obliku linearne i eksponencijalne zavisnosti.

$$F_i = a_{1i} + b_{1i} VB \quad (4)$$

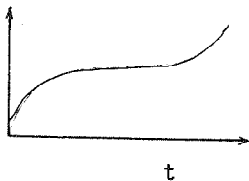
$$F_i = a_{2i} \cdot VB^{b_{2i}} \quad (5)$$

Linearna zavisnost je pogodnija za upravljanje procesom a eksponencijalni oblik više odgovara dosadašnjim modelima koji se koriste u procesima obrade rezanjem.

Za određivanje konstanti u predloženim matematičkim modelima korišćena je metoda najmanjih kvadratnih odstupanja u (4) određene su zavisnosti (4) i (5). Na osnovu tih ispitivanja [3] može se zaključiti da otpori rezanja zavise od elemenata režima i vremena rezanja:

$$F_i = f_1(v, s_z, \delta, t) \quad (6)$$


Uslovna veličina habanja pri obradi je takodje funkcija režima i vremena rezanja

$$H_i = f_2(v, s_z, \delta, t) \quad (7)$$


Ako se iz jednačine (6) izrazi vreme rezanja i zameni u jednačinu (7) dobiće se zavisnost komponenti otpora rezanja od režima rezanja i izabranog parametra habanja:

$$F_i = f_s(v, s_z, \delta, H_i) \quad (8)$$

Izabrani parametar habanja je srednja vrednost širine pojasa habanja na ledjnoj površini VB, koji se najčešće uzima kao kriterijum zatupljenja. Funkcionalna zavisnost izmedju komponenti otpora rezanja potražiće se u obliku:

$$F_i = C_i v^x s_z^y \delta^z VB^u \quad (9)$$

### 3. USLOVI PRI EKSPERIMENTALNOM ISPITIVANJU

#### 3.1. Materijal-obradak

Eksperimentalna ispitivanja su vršena na čeliku za

poboljšanje č.1730. Isporučen je u obliku šipke  $\varnothing$  130x4000 mm. Šipka je isečena na manje komade dužine 700 mm, čime je obezbeđeno da materijal bude ujednačenog kvaliteta. Za ispitivanja, komadi materijala obradjivani su na dimenzije 100x130x700 mm, da bi se obezbedila konstantna širina glodanja.

Na osnovu metalografske analize utvrđeno je da je materijal isporučen u normalizovanom stanju. Sprovedena hemijska analiza pokazala je da je hemijski sastav osnovnih elemenata u granicama, standardom predviđenim, za ovaj čelik. Tvrdoća materijala HB=226, a zatezna čvrstoća  $800 \cdot 10^6$  Pa.

### 3.2. Mašina i alat

Ispitivanja su izvršena na vertikalnoj glodalici "PRVOMAJSKA" FSS-GVK-3, koja ima: snagu pogonskog elektromotora 14 kW, snagu pomoćnog elektromotora 2,2 kW, raspon brojeva obrtaja od 28 do 1400 o/min (18 stupnjeva), raspon brzine pomoćnog kretanja od 16 do 800 mm/min (18 stupnjeva), maksimalni prečnik glodala 315 mm.

Pri ispitivanju korišćena je glava za glodanje "JUGOALAT" G.715  $\varnothing$ 125 mm, sa mehanički pričvršćenim pločicama od tvrdog metala. Broj zuba 8, napadni ugao  $75^\circ$ , grudni ugao  $7^\circ$ , ledjni ugao  $18^\circ$ .

Kao rezni materijal alata korišćene su kvadratne okretne pločice od tvrdog metala "Prvi partizan". Oznaka pločice SPAN 12 03 ER, kvaliteta P25. Rezanje je vršeno sa jednim zubom.

Rezanje je vršeno pri srednjem položaju glodala u odnosu na alat i bez upotrebe sredstva za podmazivanje i hladjenje.

### 3.3. Režim obrade

Režim obrade je obuhvatio sledeće elemente:

- brzinu rezanja  $v$  (m/s), odnosno odgovarajući broj obrtaja na mašini  $n$  (o/min),
- pomak po zubu  $s_z$  (mm/z), odnosno odgovarajuća brzina kretanja stola mašine  $S$  (mm/min),
- dubina rezanja  $\delta$  (mm).

Varirani režimi rezanja su prikazani u tabeli 1.

### 3.4. Merenje habanja alata

U cilju utvrđivanja karaktera kao i veličine parametara habanja alata u funkciji vremena rezanja, vršeno je praćenje habanja po grudnoj i ledjnoj površini.

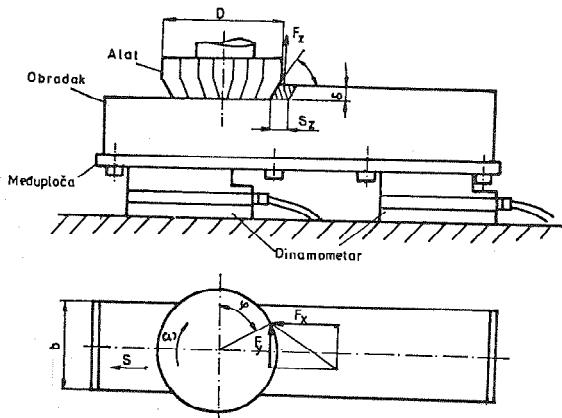
Na ledjnoj površini alata praćena je srednja vrednost širine pojasa habanja na fazetama  $VB_g$  i  $VB$ .

Na grudnoj površini merena je širina kratera  $KB$  i odstojanje sredine kratera  $KM$ , tako što je pločica pri merenju ležala na stolu alatnog mikroskopa "Zeiss". Merenje dubine kratera  $KT$  vršeno je na šmalc-ovom mikroskopu.

### 3.5. Merenje otpora rezanja

Da bi se ostvarilo kontinualno merenje otpora rezanja do zatupljenja alata, obradak je postavljen na dve trokomponentne merne platforme "Kistler" tip 9257A, koje imaju sledeće karakteristike: max.merno područje  $F_x=5000$  N;  $F_y=5000$  N;  $F_z=1000$  N moguće preopterećenje 50%, inertnost <1%, histerezis <1%.

Povezivanje platformi i stezanje obradaka izvršeno je pomoću medjuploče (slika 2).



### Sl.2. Spajanje dinamometara i obradaka

Smanjenje mernih platformi pomoću medjuploče i njihovo električno povezivanje omogućuje da se u bilo kom polizaju glodala, po dužini obradka dobijaju iste vrednosti otpora rezanja ukoliko su isti ostali uslovi. Takodje je izbegnuto konzolno opterećenje

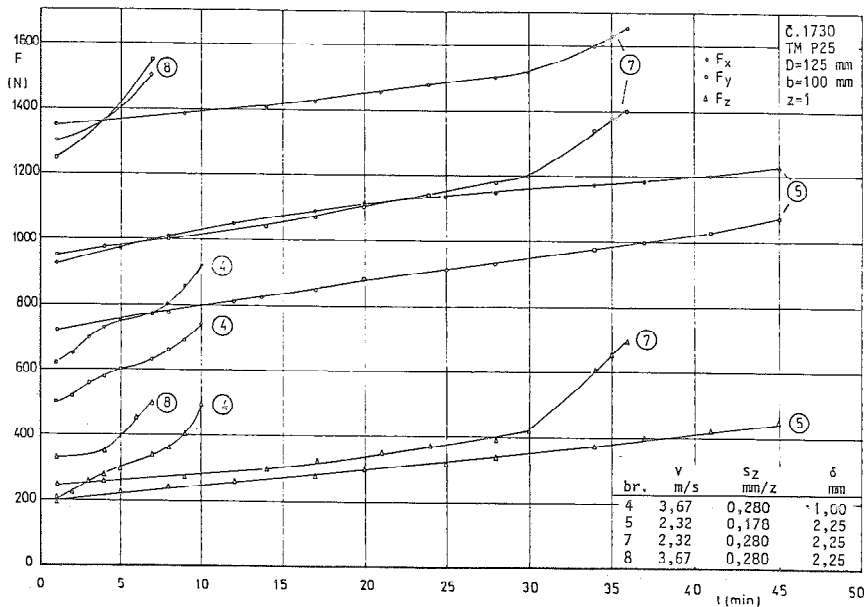
i preopterećenje dinamometra. Težina obradka se automatski kompenzira pomeranjem početnog položaja zraka na oscilografu.

Električni signali sa obe merne platforme se spajaju i kao jedan za svaku od komponenata ulaze u kapacitivni pojačivač "Kistler" tip CA5001 i galvanometarski pojačivač "Kistler" tip GA 5211 A na tri kanala svetlosnog oscilografa "August Fischer K5", tip AF 8 UV-6.

#### 4. REZULTATI MERENJA I NJIHOVA OBRADA

Da bi se odredile konstante u matematičkom modelu potražene su promene u vremenu komponenti otpora rezanja od zatupljenja alata, kao i promenu parametara habanja alata u vremenu rezanja. Ove promene praćene su za različite režime rezanja (tabela 1), prema planu eksperimenta i prikazane su u [3,4]. Na osnovu tih zavisnosti i vrednosti širine pojasa habanja na ledjnoj površini određene su vrednosti komponenti otpora rezanja upisane u tabelu 1. Na slici 2. su prikazane promene komponenti otpora rezanja za neke od izabranih režima rezanja.

Obrada podataka prikazanih u tabeli 1 izvršena je pomoću elektronskog računara na interaktivnom principu [3] i obuhvata regresionu i disperzionu analizu kao i ocenu tačnosti matemati-



Slika 2. Komponente otpora u vremenu rezanja

Tabela 1

Redni broj	Kod faktora				Faktor			Mereni			Računsko				
	x <sub>0</sub>	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	V [m/s]	S <sub>z</sub> [mm <sup>2</sup> /z]	δ [mm]	VB [mm]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]	F <sub>x</sub> [N]	F <sub>y</sub> [N]	F <sub>z</sub> [N]
1.	1.	-1.	-1.	-1.	-1.	2,32	0,178	1	0,12	530	440	260	531	416	237
2.	1.	-1.	-1.	-1.	-1.	3,67	0,178	1	0,12	440	380	200	495	410	203
3.	1.	-1.	-1.	-1.	-1.	2,32	0,280	1	0,12	730	560	280	740	572	285
4.	1.	-1.	-1.	-1.	-1.	3,67	0,280	1	0,12	650	520	220	690	564	244
5.	1.	-1.	-1.	-1.	-1.	2,32	0,178	2,25	0,12	1010	770	240	1024	805	288
6.	1.	-1.	-1.	-1.	-1.	3,67	0,178	2,25	0,12	950	730	250	995	793	247
7.	1.	-1.	-1.	-1.	-1.	2,32	0,280	2,25	0,12	1380	1000	270	1427	1106	346
8.	1.	-1.	-1.	-1.	-1.	3,67	0,280	2,25	0,12	1350	1350	350	1320	1090	297
9.	1.	-1.	-1.	-1.	-1.	2,32	0,178	1	0,28	650	580	410	627	519	376
10.	1.	-1.	-1.	-1.	-1.	3,67	0,178	1	0,28	580	530	310	585	511	323
11.	1.	-1.	-1.	-1.	-1.	2,32	0,280	1	0,28	850	730	440	874	713	452
12.	1.	-1.	-1.	-1.	-1.	3,67	0,280	1	0,28	870	700	420	815	702	388
13.	1.	-1.	-1.	-1.	-1.	2,32	0,178	2,25	0,28	1215	1060	435	1209	1004	457
14.	1.	-1.	-1.	-1.	-1.	3,67	0,178	2,25	0,28	1090	910	360	1127	989	393
15.	1.	-1.	-1.	-1.	-1.	2,32	0,280	2,25	0,28	1560	1250	500	1184	1358	550
16.	1.	-1.	-1.	-1.	-1.	3,67	0,280	2,25	0,28	1470	1500	480	1570	1358	472
17.	1.	0.	0.	0.	0.	2,95	0,223	1,5	0,18	940	780	380	908	748	330
18.	1.	0.	0.	0.	0.	2,95	0,223	1,5	0,18	920	760	350	908	748	330
19.	1.	0.	0.	0.	0.	2,95	0,223	1,5	0,18	900	700	370	908	748	330
20.	1.	0.	0.	0.	0.	2,95	0,223	1,5	0,18	950	740	360	908	748	330
21.	1.	0.	0.	0.	0.	2,95	0,223	1,5	0,18	930	760	335	908	748	330
22.	1.	0.	0.	0.	0.	2,95	0,223	1,5	0,18	920	730	340	908	748	330
23.	1.	-2.	0.	0.	0.	1,83	0,223	1,5	0,18	970	780	375	976	760	386
24.	1.	2.	0.	0.	0.	4,65	0,223	1,5	0,18	880	740	220	847	736	283
25.	1.	0.	-2.	0.	0.	2,95	0,142	1,5	0,18	685	590	290	652	544	274
26.	1.	0.	2.	0.	0.	2,95	0,351	1,5	0,18	1370	1080	430	1266	1027	396
27.	1.	0.	0.	-2.	0.	2,95	0,223	0,67	0,18	490	370	240	473	388	272
28.	1.	0.	0.	2.	0.	2,95	0,223	3,37	0,18	1890	1440	460	1747	1444	401
29.	1.	0.	0.	-2.	0.	2,95	0,223	1,5	0,08	820	650	260	775	605	217
30.	1.	0.	0.	2.	0.	2,95	0,223	1,5	0,40	1070	880	500	1061	920	510

Tabela 2

Komponente	Koficijenti		
	Oznake	Regresije	Signifikantni Vrednost
F <sub>x</sub>	c	3237,39	1844670
	x <sub>1</sub>	-0,1534	38,79
	y <sub>1</sub>	0,7327	874,56
	z <sub>1</sub>	0,8088	3414,72
	u <sub>1</sub>	0,1954	217,51
F <sub>y</sub>	c	2495,2	248399
	x <sub>2</sub>	-0,0330	34,05
	y <sub>2</sub>	0,4070	50,00
	z <sub>2</sub>	0,2407	56,03
	u <sub>2</sub>	0,5465	315,28
F <sub>z</sub>	c	2012,9	248399
	x <sub>3</sub>	-0,3318	34,05
	y <sub>3</sub>	0,4070	50,00
	z <sub>3</sub>	0,2407	56,03
	u <sub>3</sub>	0,5465	315,28

čkog modela. Konstante i eksponenti prema jednačini (9) prikazani su u tabeli 2.

## 5. ZAKLJUČCI

Na osnovu ranije iznesenog može se zaključiti:

- U radu je predložen matematički model, koji opisuje vremenski karakter procesa rezanja.
- Uočava se da komponente otpora drastično rastu u vremenu rezanja zbog habanja alata. Vremenska promena je složena funkcija, slična po karakteru promeni habanja alata. Ova promena zavisi od elemenata režima rezanja
- Da bi se opisao vremenski karakter promena otpora rezanja predloženi su matematički modeli (9) u funkciji elemenata režima rezanja ( $v, s_z, \delta$ ) i srednje vrednosti širine pojasa habanja ( $VB$ ). Svi modeli su adekvatni i svi parametri signifikantni (osim brzine rezanja u modelu za  $F_y$ )

### Reference

- /1/ Kamm, H.: Beitrag Zur Optimierung des MesserkopfräSENS, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1977.
- /2/ König W., Langhammer K., Schemmel N.U.: Correlations between Cutting Force Components and Tool Wear, Annals of the CIRP, Vol. 21/1/1972.
- /3/ Kovač P.: Istraživanje podloga za upravljanje procesom čeonog glodanja. Doktorska disertacija, FTN, IPM, Novi Sad, 1987.
- /4/ Kovač P.: Zavisnost otpora rezanja od habanja alata, Zbornik radova Instituta za proizvodno mašinstvo br.5,6 Novi Sad, 1989.
- /5/ Müller M.: Zerspankraft, Werkzeugbeanspruchung und Verschleiss beim FräSEN mit Hartmetall, Dissertation Universität Karlsruhe, 1982.

P. Kovač

### CUTTING FORCES AS A FUNCTION OF CUTTING CONDITIONS AND TOOL WEAR

#### S u m m a r y

This paper presents the experimental results of cutting forces of single tool face milling cutter. Investigations have been performed with various values of cutting conditions, tool wear and cutting forces in time change was observed. Functional relationship between cutting forces, cutting conditions and tool wear by response surface methodology were determined by processing experimental data on computer.

D. Trifunović, P. Dašić \*)

KORELACIONA ZAVISNOST KOMPONENTI OTPORA REZANJA I  
ELEMENTATA REŽIMA REZANJA PRI OBRADI SIVOG LIVA NA STRUGU

1. UVOD

U procesu rezanja javljaju se otpori koje rezni alat pri svom kretanju mora da savlada. Samim tim otpori rezanja predstavljaju osnovne kategorije mehanike procesa rezanja, što znači da se pomoću istih iskazuje jedna od osnovnih karakteristika stanja i ponašanja procesa rezanja.

Rezultujući otpor rezanja u obradi struganjem možemo razložiti na tri međusobom upravne komponente:

- $F_1$  - glavni otpor rezanja ili tangencijalni otpor, koji deluje u pravcu glavnog kretanja, odnosno tangencijalno na obrađenu površinu. Pomoću glavnog otpora proračunava se obrtni moment i snaga rezanja,
- $F_2$  - otpor prodiranja ili radijalni otpor, koji deluje u pravcu radijalnog pomoćnog poprečnog kretanja, odnosno normalan je na obrađenu površinu. Otpor prodiranja pospešuje (potpomaže) vibracije u horizontalnoj ravni. Od svih komponenti otpora rezanja otpor prodiranja ima najveći uticaj na tačnost i geometrisku formu obrađene površine. Pomoću otpora prodiranja proračunava se ugib obratka, otpornost alata i mehanizam poprečnog koraka mašine i
- $F_3$  - otpor pomoćnog kretanja ili aksijalni otpor, koji deluje u pravcu pomoćnog kretanja alata. Mehanizam koraka mora u toku obrade savladati ovaj otpor. Pomoću otpora koraka proračunava se dozvoljeno opterećenje alata i mehanizam izdužnog koraka mašine.

---

\*) Dragan Trifunović, dipl.ing., Profesor, Viša tehnička mašinska škola  
R. Krstića 19, 37240 Trstenik  
Mr Predrag Dašić, Viša tehnička mašinska škola R. Krstića 19, Trstenik



U radu su data ispitivanja sve tri komponente otpora rezanja u zavisnosti od režima obrade (koraka  $s$ , dubine rezanja  $a$ , brzine rezanja  $v$  i širine pojasa habanja ledne površine  $h$ ) pri obradi sivog liva na strugu višestruko prevučenicima od tvrdog metala. Analizom izbora varijante matematičkog modela data je jednačina regresije koja ima najadekvatniju korelaciju zavisnost.

## 2. FUNKCIJE KOMPONENTI OTPORA REZANJA PRI OBRADI NA STRUGU

Za glavni otpor rezanja obično se koristi Kronenberg-ov izraz /7/ u obliku:

$$F_1 = k_s \cdot A = k_s \cdot a \cdot b \quad [N] \quad (1)$$

U novije vreme, u široj naučnoj javnosti dobro je poznato, da se komponente otpora rezanja određuju preko proširenog izraza /6,8/:

$$F_i = C_{ki} \cdot a^{x_i} \cdot s^{y_i} \cdot v^{z_i} \cdot h^{w_i}; \quad i=1,2,3. \quad (2)$$

Međutim, poznato je da na veličinu komponenti otpora rezanja utiču sledeći faktori: fizičko-mehanička svojstva obrađivanog materijala, materijal reznog dela alata, dubina rezanja, korak, grudni ugao  $\gamma$ , glavni napadni ugao  $\kappa$ , poluprečnik zaobljenja vrha alata  $r$ , brzina rezanja, habanje alata i sredstvo za hlađenje i podmazivanje.

U ovom radu je razmatran uticaj dubine rezanja  $a$ , koraka  $s$ , brzine rezanja  $v$  i širine pojasa habanja ledne površine  $h$  na komponente otpora rezanja, pomoću funkcija:

$$F_i = f_i(a, s, v, h); \quad i=1,2,3 \quad (3)$$

odnosno u obliku:

$$F_i = C_{ki} \cdot a^{x_i} \cdot s^{y_i} \cdot v^{z_i} \cdot h^{w_i}; \quad i=1,2,3 \quad (4)$$

Numeričke vrednosti parametara obradljivosti  $C_{ki}$ ,  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  i  $w_i$  određuju se na osnovu eksperimentalno-analičke metode. Na osnovu specijalnih eksperimentalnih planova i određene merne tehnike mere se vrednosti komponenti otpora rezanja a zatim se primenom regresione analize, na dobijene eksperimentalne rezultate, iznalaze regresione jednačine komponenti otpora rezanja. Regresione jednačine ustvari predstavljaju matematičke modele kojima se prognoziraju vrednosti komponenti otpora rezanja u zavisnosti od ulaznih veličina (u ovom slučaju  $a, s, v$  i  $h$ ). Međuzavisnost ili veza komponenti otpora rezanja i ulaznih veličina sagledava se na osnovu korelacije, odnosno koeficijenta korelacije.

Kada se na ovaj način odrede funkcije komponenti otpora rezanja, tada se iste koriste za:

- Proračun snage koja se troši u zadatom zahvatu ili operaciji i u pojedinim slučajevima i pri izboru odgovarajućeg motora mašine alatke,
- Izbor i proračun sistema glavnih i pomoćnih prenosnih mehanizama od izvora snage do reznog alata,
- Proračun čvrstoće i dimenzionisanje elemenata i podsistema mašine alatke,
- Određivanje dimenzija i proračun pomoćnih pribora u projektovanoj tehnologiji obrade,
- Izbor tipova i dimenzija reznog alata (na osnovu proračuna čvrstoće reznih elemenata),
- Proveru stabilnosti reznog alata u celini,
- Određivanje elemenata režima rezanja pri projektovanju optimalnih varijanti tehnološkog procesa obrade i
- Proračun tačnosti i proveru mogućnosti obrade (na datoj mašini i za date režime obrade) nekog mašinskog dela sa stanovišta propisanog kvaliteta.

Na ovaj način se u proizvodnim uslovima, na osnovu poznavanja i korišćenja funkcija komponenti otpora rezanja, obezbeđuje pouzdana konstrukcija i ekonomična eksploatacija mašina alatki, reznih alata i pomoćnih pribora, optimizacija procesa obrade kao i razvoj određenih koncepata adaptivno upravljanih obradnih sistema (budući da komponente otpora rezanja i momenti pripadaju grupi osnovnih procesnih veličina u tehnologiji adaptivnog upravljanja).

Najzad komponente otpora rezanja stoje u direktnoj ili indirektnoj korelaciji sa nizom značajnih fenomena koji prate fizički proces rezanja kao što su, na primer, temperatura u zoni rezanja, habanje reznih delova alata i td.

### 3. ANALIZA IZBORA VARIJANTE MATEMATIČKOG MODELA IZ SKUPA SVIH JEDNAČINA REGRESIJE

Planovi prvog i višeg reda koriste se pri statističkoj identifikaciji matematičkog modela prvog i višeg reda na osnovu kojih se matematički opisuje cilj istraživanja u jedno, dvo i višedimenzionalnom prostoru. Pri tome planovi mogu biti potpuni ili parcijalni.

Za pojednostavljenje proračuna matrica primenjuje se kodiranje faktora,

na tri nivoa: +1, 0 i -1 preko jednačina transformacije /3,5/.

Za sagledavanje veze između funkcije odziva i nezavisno promenljivih i za ocenu kvaliteta veličina, koje karakterišu udeo koeficijenata regresije u jednačini matematičkog modela, primenjuje se koeficijent višestruke korelacije, čije se značenje određuje po obrascu /2,3,4,5/:

$$R = \sqrt{1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

Izbor varijante matematičkog modela iz skupa svih jednačina regresije može se realizovati pomoću više kriterijuma. U ovom radu kriterijum će biti vrednost koeficijenta korelacije R za svaku jednačinu regresije.

#### 4. ISPITIVANJE ZAVISNOSTI KOMPONENTI OTPORA REZANJA I ELEMENATA REŽIMA REZANJA PRI OBRADI SIVOG LIVA NA STRUGU

Za ispitivanje komponenti otpora rezanja korišćena je metoda dinamometrije. Cilj ispitivanja bio je da se na osnovu elemenata režima rezanja utvrde funkcije komponenti otpora rezanja.

##### 4.1. Uslovi izvođenja eksperimenta

Eksperiment je realizovan u sledećim uslovima /1/:

- tip zahvata: spoljašnje uzdužno struganje,
- materijal obratka: SL-260,
- mašina: univerzalni strug D-480,
- rezni alat: izmenljiva pločica od tvrdog metala GC 315 višestruko prevučena,
- obrada bez sredstva za hlađenje i podmazivanje i
- merna instrumentacija: trokomponentni piezo dinamometar KISTLER sa pojačivačem i ploterom.

##### 4.2. Izvođenje eksperimenta

U matematičkoj teoriji regresione analize široko je rasprostranjen matični račun, pri čemu se pri planiranju eksperimenta sastavlja plan matrica, koja poseduje optimalna svojstva. U ovom slučaju plan matrice se formira korišćenjem koncepta parcijalnih višefaktornih ortogonalnih planova ili parcijalnih replika. Pri tome je od četvorofaktornog potpunog plana  $2^4$  formirana polureplika  $2^{4-1}=8$  bez ponavljanja eksperimenta.

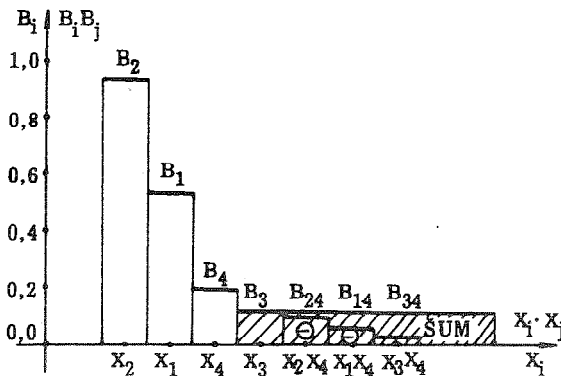
U toku ispitivanja praćene su komponente otpora rezanja. Pri tome je u tabeli T.1 prikazana plan-matrica polureplike i izmerene vrednosti komponenti otpora rezanja. Plan-matrica iz T.1, osim linijskih faktora proširena je sa interakcijom prvog reda, odnosno združena dejstva faktora  $X_4$  sa ostalim faktorima ( $X_1X_4$ ,  $X_2X_4$  i  $X_3X_4$ ).

Br. ek. n	Kod promenljivih								Nezavisno promenljive				Izmerene vrednosti		
	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>4</sub>	X <sub>3</sub> X <sub>4</sub>	a	s	v	h	F <sub>1</sub> [N]	F <sub>2</sub> [N]	F <sub>3</sub> [N]
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,4	0,4	149,5	0,4	1269,0	783,75	460,0
2	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	0,6	0,1	149,5	0,4	337,5	295,00	242,5
3	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1,4	0,1	120,1	0,4	480,0	362,50	335,0
4	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	0,6	0,4	120,1	0,4	695,0	415,00	325,0
5	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1,4	0,4	149,5	0,1	1203,0	717,00	420,0
6	1	-1	-1	1	-1	1	1	-1	0,6	0,1	149,5	0,1	237,0	210,00	150,0
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1,4	0,1	120,1	0,1	385,0	270,00	240,0
8	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	0,6	0,4	120,1	0,1	603,0	360,00	240,0

#### 4.3. Određivanje efekata faktora

Matematička obrada eksperimentalnih podataka obuhvata određivanje numeričkih vrednosti parametara obradljivosti u matematičkom modelu.

Za izbor varijante matematičkog modela važna činjenica svakako je selekcija i rangiranje faktora na izlaz procesa. Nakon izvršene matematičke obrade eksperimentalnih podataka rezultati rangiranja efekata faktora na glavni otpor rezanja  $F_1$  prikazani su na sl.1.



Sl.1 Dijagram efekata faktora na glavni otpor rezanja  $F_1$

## 4.4. Analiza izbora varijante matematičkog modela komponenti otpora rezanja

Procedura izbora varijante matematičkog modela glavnog otpora rezanja  $F_1$  iz skupa najboljih jednačina regresije za pojedine grupe prikazana je u tabeli T.2.

T.2

Red. br.	Jednačina regresije u kodiranom obliku	Jednačina regresije u prirodnim koordinatama	R
1	$y = 6,325 + 0,471 \cdot X_2$	$F_1 = 1666,83 \cdot s^{0,679}$	0,84829
2	$y = 6,325 + 0,266 \cdot X_1 + 0,471 \cdot X_2$	$F_1 = 1760,71 \cdot a^{0,629} \cdot s^{0,679}$	0,97448
3	$y = 6,325 + 0,266 \cdot X_1 + 0,471 \cdot X_2 + 0,096 \cdot X_4$	$F_1 = 2201,29 \cdot a^{0,629} \cdot s^{0,679} \cdot h^{0,139}$	0,98976
4	$y = 6,325 + 0,266 \cdot X_1 + 0,471 \cdot X_2 + 0,057 \cdot X_3 + 0,096 \cdot X_4$	$F_1 = 172,55 \cdot a^{0,629} \cdot s^{0,679} \cdot v^{0,520} \cdot h^{0,139}$	0,99606
5	$y = 6,325 + 0,266 \cdot X_1 + 0,471 \cdot X_2 + 0,057 \cdot X_3 + 0,096 \cdot X_4 - 0,047 \cdot X_2 \cdot X_4$	$F_1 = 133,69 \cdot a^{0,629} \cdot s^{0,521} \cdot v^{0,520} \cdot h^{-0,020} \cdot \exp(-0,137 \cdot \ln s \cdot \ln h)$	0,99871
6	$y = 6,325 + 0,266 \cdot X_1 + 0,471 \cdot X_2 + 0,057 \cdot X_3 + 0,096 \cdot X_4 - 0,028 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,047 \cdot X_2 \cdot X_4$	$F_1 = 131,93 \cdot a^{0,477} \cdot s^{0,521} \cdot v^{0,520} \cdot h^{-0,028} \cdot \exp[\ln h(-0,094 \cdot \ln a - 0,137 \cdot \ln s)]$	0,99995
7	$y = 6,325 + 0,266 \cdot X_1 + 0,471 \cdot X_2 + 0,057 \cdot X_3 + 0,096 \cdot X_4 - 0,028 \cdot X_1 \cdot X_4 - 0,047 \cdot X_2 \cdot X_4 + 0,006 \cdot X_3 \cdot X_4$	$F_1 = 74,15 \cdot a^{0,477} \cdot s^{0,521} \cdot v^{0,637} \cdot h^{-0,386} \cdot \exp[\ln h(-0,094 \cdot \ln a - 0,137 \cdot \ln s + 0,073 \cdot \ln v)]$	0,99999

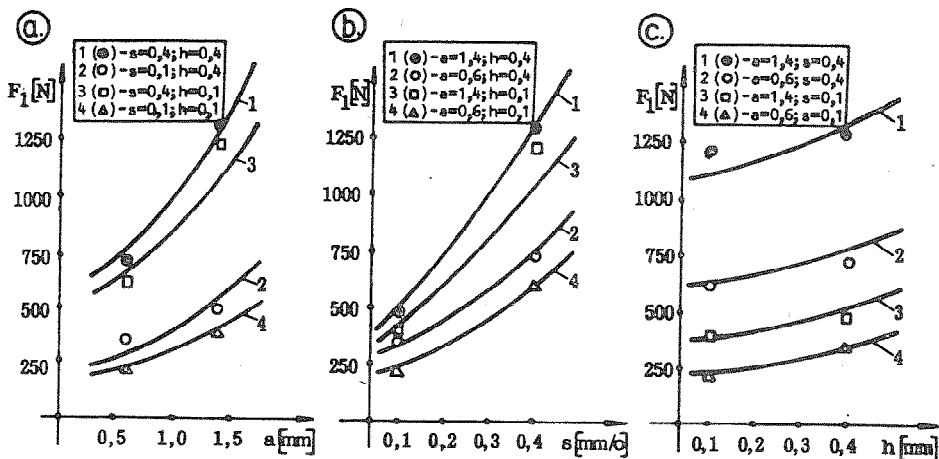
Iz tabele T.2 vidi se da zadnje šest jednačina regresije imaju koeficijente korelacije koji se malo razlikuju, ovo se naročito odnosi na zadnje četiri jednačine. Dalje se može primetiti da jednačina regresije koja uključuje nezavisno promenljive  $a$ ,  $s$  i  $h$  objašnjava 97,962 % od ukupne varijacije zavisno promenljive  $F_1$ , dok preostale nezavisno promenljive  $v$ ,  $\ln a \cdot \ln h$ ,  $\ln s \cdot \ln h$  i  $\ln v \cdot \ln h$  objašnjavaju svega  $99,998 - 97,962 = 2,036$  % iste varijacije. Zbog toga bi se mogli odlučiti za sledeću jednačinu regresije:

$$F_1 = 2201,29 \cdot a^{0,629} \cdot s^{0,679} \cdot h^{0,139} \quad (6)$$

jer je njen koeficijent korelacije  $R = 0,98976$ . Razlog je u tome što jednačina regresije (6) sa svega tri promenljive objašnjava 97,962 % od ukupne varijacije. Slično se može reći i za jednačinu regresije koja uključuje samo nezavisno promenljive  $a$  i  $s$ , jer ista sa svega dve promenljive objašnjava 94,961 % od ukupne varijacije.

Na sl.2 grafički je prikazana zavisnost glavnog otpora rezanja  $F_1$  od  $a$ ,  $s$  i  $h$ .

Uticao brzine rezanja na komponente otpora rezanja u ovom primeru malo odstupa od dosadašnjih teorijskih saznanja. Međutim, može se prema tabeli T.2 konstatovati da jednačina regresije sa uključenom brzinom rezanja objašnjava



Sl.2 Grafički prikaz zavisnosti glavnog otpora rezanja  $F_1$  od  $a$ ,  $s$  i  $h$

svoga 99,014-97,962=1,052 % od ukupne varijacije zavisno promenljive  $F_1$ . Taj procenat od 1,052 je dosta mali pa se može zaključiti da se uticaj brzine rezanja može svrstati u šum procesa. Te da se ovakvo odstupanje iste može i ovim objasniti. Ono još može biti i uticaj poremećajnih faktora, kao što su: dužina obratka, mali dijapazon variranja brzine rezanja i sl.

Na isti način može se doći i do jednačina regresije za otpor prodiranja:

$$F_2 = 871,14 \cdot a^{0,526} \cdot s^{0,475} \quad (7)$$

čiji je koeficijent korelacije  $R=0,92608$  i otpor pomoćnog kretanja:

$$F_3 = 681,60 \cdot a^{0,503} \cdot s^{0,296} \cdot h^{0,218} \quad (8)$$

čiji je koeficijent korelacije  $R=0,97786$ .

## 5. ZAKLJUČAK

Iz izloženog slede osnovni zaključci:

- zavisnosti komponenti otpora rezanja mogu se uspešno predstaviti predloženim jednačinama regresije (6), (7) i (8).
- najveći uticaj na komponente otpora rezanja svakako imaju dubina rezanja  $a$  i korak  $s$ , što se moglo i očekivati, pa se dovoljno pouzdano a i zbog generalizacije rešenja mogu uzeti samo jednačine regresije koje uključuju ova dva faktora,
- uticaj širine pojasa habanja ledne površine  $h$  za dijapazon od 0,1 do 0,4 mm je daleko manji nego što je to uticaj dubine rezanja  $a$  i koraka  $s$ , što se može reći i za međudejstva predloženih faktora,
- uticaj brzine rezanja  $v$  u funkcijama komponenti otpora rezanja mogao bi da se zanemari u ovom primeru istraživanja i

- pri izboru varijante matematičkog modela iz skupa svih jednačina regresije a pri ispunjenju svih kriterijuma treba voditi računa da se izabere matematički model sa najmanjim brojem članova aproksimirajućeg polinoma zbog pogodnije optimizacije elemenata režima rezanja.

## LITERATURA

- /1/ Trifunović D.: Otpori rezanja pri struganju alatima od tvrdog metala sa prevlakama od TiN, magistarski rad (u pripremi), Mašinski fakultet, Kragujevac, 1989.
- /2/ Dašić P.: Analiza izbora varijante matematičkog modela u oblasti ispitivanja obradljivosti metala rezanjem, XXI Savetovanje proizvodnog strojarstva Jugoslavije, knjiga II, Opatije, 1987., s.137-146
- /3/ Stanić J.: Metod inženjerskog merenja, Osnovne matematičke teorije eksperimenata, Mašinski fakultet, Beograd, 1981.
- /4/ Hadživuković S., Zegnal B., Čobanović K.: Regresiona analiza, Privredni pregled, Beograd, 1982.
- /5/ Kacev P. G.: Statističke metode isledovanja rezušćeg instrumenta, Mašinstvo, Moskva, 1974.
- /6/ Ivković B.: Obrada metala rezanjem, Izbor ekonomičnih režima obrade, Građevinska knjiga, 1979.
- /7/ Kronenberg M.: Grundzuge der Zerspanungslehre Erster Band, Auflage, Springer - Verlag, Berlin, 1954.
- /8/ Kalajdžić M.: Tehnologija mašinogradnje I, Mašinski fakultet, Beograd, 1983.
- /9/ Sekulić S., Kovač P.: Komponente otpora rezanja pri obradi na strugu u zavisnosti od elementa preseka rezućeg sloja, poluprečnika zaobljenja vrha alata i napadnog ugla, XIV Savetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, knjiga II, Čačak, 1980., s.359-371
- /10/ Sekulić S.: Glavni otpor u funkciji preseka, vitkosti i termo-napona pri obrazi na strugu, Naučni-stručni skup NMA'76, Novi Sad, 1976., s.109-126

D. Trifunović, P. Dašić

CORRELATIVE INDEPENDENCE OF CUTTING RESISTANCE  
COMPONENTS AND CUTTING CONDITION ELEMENTS WHEN  
MACHINING THE GREY CAST IRON ON THE LATHE

S u m m a r y

The Study deals with the examination of all three cutting resistance components depending on machining conditions (pitch  $s$ , cutting depth  $a$ , cutting speed  $v$  and wear belt width of the back surface  $h$ ) when machining the grey cast iron on the lathe by multi-layer coated hard metal plates. Analysing the choice of mathematical model variations resulted in regression equation having the most adequate correlative interdependence.

J. Grum\*, P. Zerovnik\*\*

VPLIV OBRABE GRODJA NA PORAZDELITEV ZAOSTALIH NAPETOSTI  
V POVRŠINSKEM SLOJU PRI OBDELAVI AVSTENITNIH JEKEL

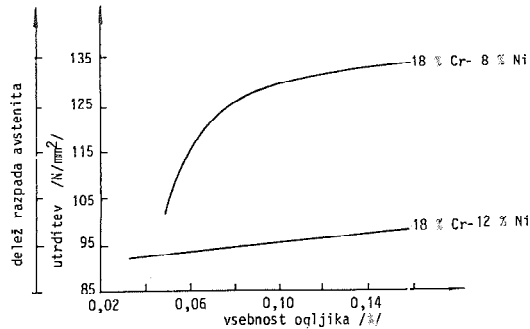
1. UVOD

Procesna tehnika obsega industrijsko proizvodnjo in predelavo snovi različnih agregatnih stanj s pomočjo različnih mehanskih, termičnih, kemičnih oziroma elektrokemičnih procesov. Izjemno zahtevni obratovalni pogoji najrazličnejših naprav kot npr. tlaki, temperature in različni bolj ali manj agresivni mediji zahtevajo dobro poznavanje materialov. Materiali imajo zaradi ustreznih legiranih elementov izjemne kemijske in toplotne lastnosti, pri čemer pa imajo znatno slabše mehanske lastnosti. V našem primeru obravnavamo nerjavno in kemično odporno jeklo z visoko vsebnostjo kroma in niklja z dodatkom titana. Na žilavost avstenitnih nerjavnih jekel lahko izraziteje vplivamo s hladno deformacijo in/ali z različnimi izločevalnimi procesi. Omenjena vpliva sta v nekaterih primerih tako intenzivna, da doseže žilavost spodnjo mejo uporabnosti. Učinke utrjevanja s hladno deformacijo pripisujemo spremembi metastabilnega avstenita v martenzit. Na sliki 1 so prikazani vplivi vsebnosti ogljika in niklja v avstenitnih jeklih na stopnjo utrevanja. Jeklo z 18 % Cr in 12 % Ni ali krajše zapisano jeklo 18/12 ima komaj opazno utrditev z naraščajočo vsebnostjo ogljika. Nasprotno pa pri drugem jeklu 18/8 opazimo intenzivno naraščanje hladne utrditve (utrditev zaradi učinkov hladne deformacije) predvsem pri večjih vsebnostih ogljika od 0,05 %. Ugotovimo lahko, da v nerjavnih avstenitnih jeklih z večjo vsebnostjo niklja zadržimo stabilnost avstenita in tako preprečimo efekte hladne utrditve. Drugi avtorji dokazujejo, da povečanje stabilnosti avstenita

\* Janez Grum, dr.mag., dipl.ing., izr.profesor, Fakulteta za strojništvo, Univerze E. Kardelja v Ljubljani, Murnikova 2, 61000 Ljubljana

\*\* Pavle Zerovnik, dipl.ing., asistent, Fakulteta za strojništvo, Univerze E. Kardelja v Ljubljani, Murnikova 2, 61000 Ljubljana





S1. 1 Vpliv ogljika in niklja na utrditev jekla z 18 % Cr pri hladni plastični deformaciji

lahko dosežemo tudi s prisotnim dušikom in/ali manganom. Zato je potrebno pripraviti vsako avstenitno jeklo pred hladno deformacijo z ustreznim postopkom toplotne obdelave. V ta namen se pogosto priporoča ustrezna in sprrotna analiza avstenitnega jekla, ki naj v končni fazi omogoča predpis ustrezne tehnologije obdelave.

## 2. EKSPERIMENTALNA ZASNOVA

### Opis jekla

Za analizo integritete površin materiala orodja in obdelovanca smo izbrali standardno krom-nikljevo avstenitno jeklo č.4572 (interna oznaka Železarne Ravne Prokron 11 Spec.), kateremu ustreza jeklo po DIN standardu X10CrNiTi18 9 ali po ameriškem standardu AISI jeklo 321. Dano jeklo je obstojno na vplive vode, vodne pare, morske vode in številnih anorganskih in organskih kislin ter natrijevega luga. Izjemna prednost tega jekla je skoraj enaka korozijska obstojnost v litem, kovanem ali valjanem stanju. S pravilno toplotno obdelavo, to je z gašenjem dosežemo učinkovito homogenizacijo in stabilnost avstenita, kar uspešno zmanjšuje vplive za razvoj interkristalne korozije. Odpornost na interkristalno korozijo se zelo uspešno poveča z dodatkom titana v razmerju z ogljikom  $\frac{Ti}{C} \geq 4$ . Praktično enake učinke lahko dosežemo tudi z zmanjševanjem deleža ogljika v jeklu in s toplotno obdelavo, ki omogoča koagulacijo karbidov. Področje uporabe avstenitnih nerjavnih jekel stabiliziranih s titanom je v temperaturnem intervalu med  $-180$  do  $+550^{\circ}C$ . Poleg tega pa je to jeklo dobro odrezovalno s struženjem ali frezanjem in tudi z brušenjem ali poliranjem. Priporoča se odrezavanje z ostrimi orodji, ki zagotavljajo ustrezno razmerje med učinki rezanja in plastične deformacije pri generiranju tehničnih površin.

Kemična sestava jekla je naslednja:

0,06% C - 17,8% Cr - 10,8 % Ni - 0,43% Ti- 1,28% Mn - 1,14% Si - 0,22% Cu -  
- 0,13% Mo - 0,04% Al - 0,018% S - 0,016% P

Mehanske lastnosti jekla č.4572 so naslednje:

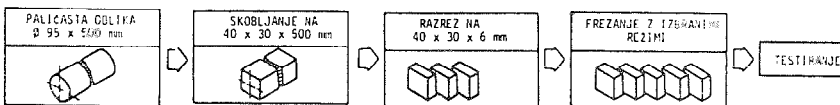
natezna trdnost ...  $R_m = 625 \text{ N/mm}^2$   
meja tečenja na ...  $R_p = 205 \text{ N/mm}^2$   
temperaturi okolice  
meja tečenja na ...  $R_p = 127 \text{ N/mm}^2$   
temperaturi 550°C  
trdota ... 130 ... 190 HB

#### Priprava preskušancev

Železarna Ravne nam jedostavila jeklo za preskušanje v obliki okroglih palic premera 90 mm. Najprej smo okrogle palice obdelali s skobljanjem v pravokotno obliko prereza 40 x 30 mm<sup>2</sup>. Tako pripravljene palice smo nato razžagali na plošče debeline 6 mm in jih v končni fazi obdelali na različne načine. Priprava preskušancev je v shematični obliki predstavljena na sliki 2. Preskušanci so bili pripravljene na tri različne načine in sicer:

- skobljanje in žaganje;
- po skobljanju in žaganju še dodatno obdelani z žarjenjem za sproščanje napetosti na temperaturi 650°C in v času 1 ura;
- po skobljanju in žaganju še dodatno gašeni s temeprature 1050°C in po 5min pregrevanju,

Pripravljene preskušance smo obdelali na frezalnem stroju Prvomajska -GUK 3N s frezalno glavo F6 755 M in rezalnim orodjem iz karbidne trdine z oznako SNAN 1204 EN FN kvalitete SV 25 - proizvajalec SINTAL iz Zagreba. Vpenjanje preskušancev smo izvedli s pomočjo primeža s prigradenim posebnim naslonom za zagotavljanje togega vpetja. Postopek čelnega freziranja smo opravili z vpetjem le ene rezalne ploščice iz karbidne trdine v frezalno glavo. Tako smo na prvem preskušancu obdelali zgornjo ploskev z rezom 1 in nato izmerili obrabo na prosti ploskvi orodja VB<sub>1</sub>. Nato smo izpeli prvi preskušanec,



Sl. 2 Simbolični prikaz priprave preskušancev iz surovca paličaste oblike s skobljanjem in žaganjem

vpeli drugega in opravili drugi rez z istim orodjem in izmerili obrabo  $VB_2$ . Sledi tretji rez na tretjem preskušancu in povečano obrabo orodja na  $VB_3$ . Nato smo izvedli še četrti in peti rez na četrtem oziroma petem preskušancu, pri katerih smo po obdelavi izmerili obrabo orodja  $VB_4$  oziroma  $VB_5$ . Postopek smo ponovili z novim orodjem na nasprotnih straneh istih petih preskušancev z novim orodjem in po istem vrstnem redu. Pri pripravi preskušancev smo morali zagotoviti na obeh straneh preskušancev istosmernost frezanja in simetričnost odvzema materiala, da zagotovimo enako napetostno stanje na obeh straneh. Obdelovalni pogoji čelnega frezanja so prikazani v tabeli 1 in jih sestavljajo omejene kombinacije treh rezalnih hitrosti v (m/min), treh podajanj na zob  $f_z$  (mm/zob) in pri enotni globini frezanja  $a$  (mm).

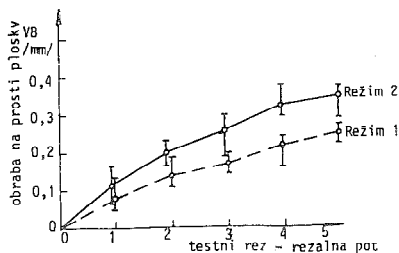
Režim frezanja	1	2	3	4	5	6
$v$ /m/min/	70,7	109	135	70,7	70,7	70,7
$f_z$ /mm/zob/	0,175	0,175	0,175	0,350	0,175	0,000
$a$ /mm/	1	1	1	1	1	1

Tabela 1 Izbrani obdelovalni pogoji čelnega frezanja

### 3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI IN ANALIZA

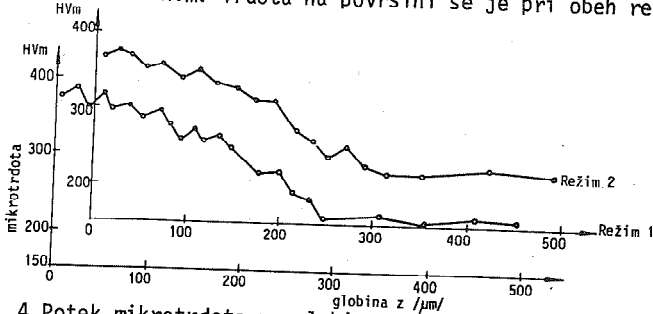
Mikrotrdota v površinskem sloju in obraba orodja

Kvaliteto obdelane površine po frezanju smo opisali z merjenjem trdote, zaostalih napetosti in hrapavosti v odvisnosti od obdelovalnih pogojev. Iz spoznanj, da je kvaliteta površine močno odvisna od stanja orodja, smo se v sklopu eksperimentalnega dela odločili za prekinjeni postopek frezanja s petimi rezi. Po vsakem izvedenem rezu na posameznih preskušancih smo definirali tudi pripadajočo velikost obrabe na prosti ploskvi orodja. Na sliki 3 je prikazan potek obrabe na prosti ploskvi orodja iz karbidne trdine  $VB_1, VB_2 \dots VB_5$ , po posameznih rezih  $R_1, R_2 \dots R_5$  oziroma po rezalnih poteh  $L_1, L_2 \dots L_5$ . V diagramu sta vrisani dve krivulji, ki podajata naraščanje obrabe na prosti ploskvi orodja  $VB$  pri obdelovalnih pogojih



Sl. 3 Obraba orodja na prosti ploskvi  $VB_i$  po posameznih rezih oziroma po rezalnih poteh  $L_i$

popisanih z oznako režim 1 in režim 2, kot je definirano v tabeli 1. Vsak preskus je izveden s šestimi ponovitvami in je pri posameznih rezi  $R_i$  opredeljen s srednjo vrednostjo obrabe, oziroma z mejo sipanja rezultatov. Rezultati obrabe kažejo, da so razmere pri obdelavi avstenitnega jekla v mejah pričakovanja in je po petem rezu še vedno v stacionarnem delu. Na osnovi zbranih podatkov v strokovni literaturi lahko trdimo, da imajo toplotne in deformacijske razmere občutnejši vpliv na integriteto površin. V želji, da potrdimo vpliv stanja orodja na kvaliteto površine obdelovanca smo se v prvi fazi odločili za merjenje mikrotrdote po Vickersu. Na sliki 4 je prikazan potek mikrotrdote v površinskem sloju 500  $\mu\text{m}$  pri izbranih režimih obdelave z oznakama 1 in 2. Potek trdote je zelo podoben, saj na površini dobimo trdoto 400 HVm, v globini 300  $\mu\text{m}$  pa trdoto osnovnega materiala v mehkem stanju 200 HVm. Trdota na površini se je pri obeh režimih povečala



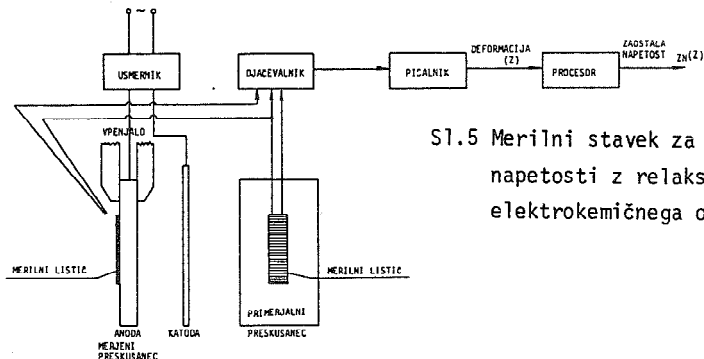
Sl. 4 Potek mikrotrdote v globino preskušanca po čelnem frezanju z režimom 1 in 2

za 100 % in sicer od 200 HVm na 400 HVm. Izrazitejšo odstopanje v poteku mikrotrdote pa opazimo pri režimu 3, kjer je znatno položnejši potek trdote v globino, kot rezultat večjih rezalnih sil oziroma večje stopnje deformacije. Zanimivo pa je, da je trdota na površini pri obdelavi z režimom 3 še vedno ohranjena v iznosu kot pri režimu 1 in 2, to je 400 HVm.

#### Zaostale napetosti v površinskem sloju

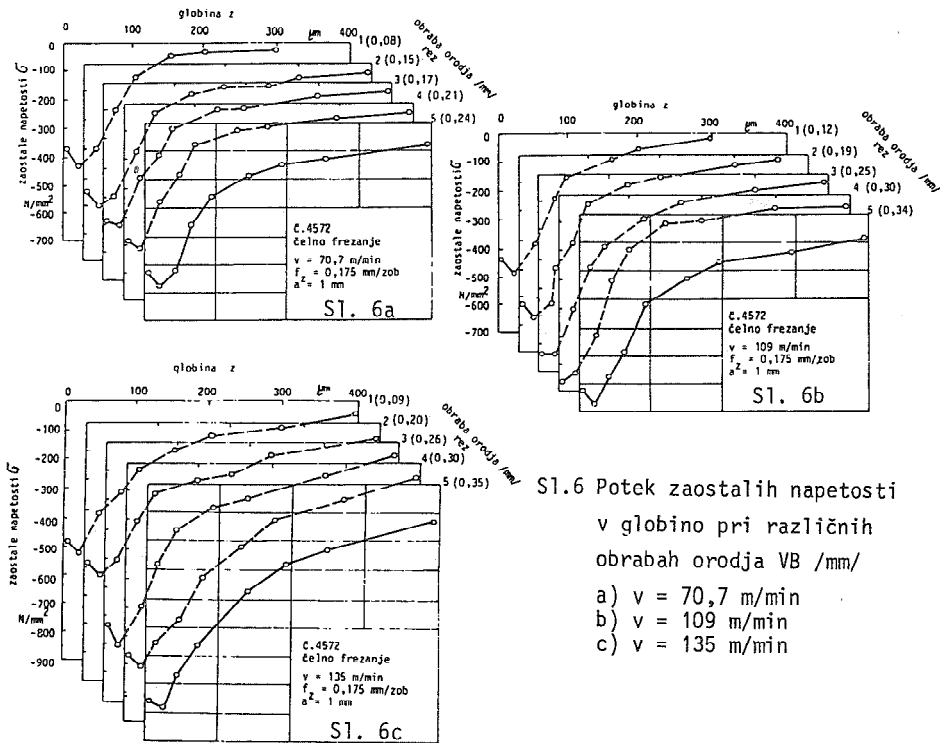
Potek in velikost zaostalih napetosti, ki nastanejo zaradi utrditve s hladno deformacijo pogojeno z različno stopnjo obrabe orodja smo merili po relaksacijski metodi. Relaksacijo oziroma deformacijo preskušancev smo ustvarili na umeten način s pomočjo elektrokemičnega odvzema. Z odstranjevanjem tankih površinskih slojev smo porušili ravnotežno stanje, kar je povzročilo deformacijo oziroma vzpostavljanje novega ravnotežnega stanja. Deformacijo smo merili s pomočjo uporovnih merilnih lističev v polmistični vezavi. Izmerjeno deformacijo nato pretvorimo na osnovi matematičnega

popisa in z ustrezno programsko podporo na računalniku v velikost zaostalih napetosti. Na sliki 5 je prikazana shema merilnega stavka za merjenje deformacij in za izračun zaostalih napetosti.



Sl.5 Merilni stavek za merjenje zaostalih napetosti z relaksacijo in pomočjo elektrokemičnega odvzema

Na slikah 6a, 6b in 6c so prikazani poteki zaostalih napetosti v površinskem sloju pri različnih rezalnih hitrostih  $v = 70,7$  m/min,  $v = 109$  m/min in  $v = 135$  m/min ter srednjem podajanju  $f_z = 0,175$  mm/zob. Podatki o obdelovalnih pogojih so podani v legendi, ki se nahaja v spodnjem desnem kotu posameznih diagramov. Na sliki 6a imamo prikazan potek zaostalih napetosti pri hitrosti 70,7 m/min. Prva krivulja predstavlja potek zaostalih napetosti na preskušancu s prvim rezom in pri obrabi orodja  $VB_1 = 0,08$  mm, druga krivulja predstavlja preskušane z drugim rezom in z obrabo orodja  $VB_2 = 0,15$  mm itd. Potek zaostalih napetosti v globino postopno narašča z obrabo orodja, saj imamo pri ostrem rezalnem robu maksimalno tlačno zaostalo napetost - 420 N/mm<sup>2</sup>, dočim je pri topem orodju maksimalna tlačna zaostala napetost okoli -590 N/mm<sup>2</sup>. Maksimum tlačnih napetosti se nahaja tik pod površino na oddaljenosti 15 - 20  $\mu$ m, dočim je pri ostrem orodju ta potek bolj strm kot pri topem orodju. Na sliki 6b imamo prikazane zaostale napetosti po rezanju avstenitnega jekla 18/10 z rezalno hitrostjo 109 m/min. Ugotovimo lahko, da je v splošnem potek zaostalih napetosti zelo podoben saj so v vseh primerih (po posameznih rezih ali obrabah orodja) tlačne narave, da so maksimalne vrednosti pri ostrem orodju -510 N/mm<sup>2</sup> a pri topem orodju -590 N/mm<sup>2</sup>. Maksimalne vrednosti so v globini 20  $\mu$ m, dočim je potek za prva dva reza zelo podoben kot pri hitrosti 70,7 m/min; po ostalih rezih dobimo nekoliko povečane napetosti v globini. Na sliki 6c pa imamo prikazane zaostale napetosti po rezanju z največjo rezalno hitrostjo  $v = 135$  m/min. Ugotovimo lahko podobno: imamo tlačne napetosti z maksimumom pri ostrem orodju -520 N/mm<sup>2</sup>, a pri topem orodju pri -890 N/mm<sup>2</sup>. Poteki zaostalih napetosti v globino močnejše odstopajo predvsem pri topem orodju  $VB_1$ ,  $VB_4$  in  $VB_5$  - zadnje tri krivulje.



Sl.6 Potek zaostalih napetosti v globino pri različnih obrabah orodja VB /mm/

- a)  $v = 70,7 \text{ m/min}$   
 b)  $v = 109 \text{ m/min}$   
 c)  $v = 135 \text{ m/min}$

#### 4. ZAKLJUČKI

Rezultati raziskav o vplivu obrabe orodja na porazdelitev zaostalih napetosti v površinskem sloju pri obdelavi avstenitnega krom-nikljevega jekla č.4572 oziroma jekla 18/10 so pokazali, da smo izbrali pravilno metodologijo preskušanja. Prikazali smo le nekatere segmente preskušanja iz raziskovalne naloge s težiščem na obrabi orodja in popisom mikrotrdoti oziroma zaostalih napetosti v površinskem sloju obdelovanca.

Potek mikrotrdoti smo zasledovali v površinskem sloju do globine  $500 \mu\text{m}$  na prečnem prerezu preskušanca. Ugotovili smo, da se je površina ne glede na obdelovalne pogoje utrdila na mikrotrdoto  $400 \text{ HVm}$ . To pa predstavlja  $100\%$  povečanje trdote od trdote jekla v mehkem stanju z  $200 \text{ HVm}$ . Potek mikrotrdote v globino je zelo strm pri manjši rezalni hitrosti, nato pa z naraščajočo rezalno hitrostjo postaja potek vse bolj položen. Spremembe v mikrotrdoti so zaznane do globine  $300 \mu\text{m}$ .

Potek zaostalih napetosti je pogojen z učinki hladne deformacije, ki so v vseh primerih tlačne narave. Potek je zelo odvisen od stanja orodja, saj dosežemo pri ostrem orodju zelo podobne rezultate ne glede na velikost

rezalne hitrosti, dočim dobimo močnejša odstopanja v poteku in absolutni vrednosti napetosti pri povečani obrabi orodja na prosti ploskvi.

### L i t e r a t u r a

- /1/ Grum, J.: Development of Metal Materials Database Adapted for Computer Aided Information System, 26<sup>th</sup> Int. Machine Tool Design and Research Conference, Manchester 1986
- /2/ Grum, J. Ferlan, D.: The Development of Database on Steels with Special Emphasis on Technological and Operating Capabilities, 11. Int. Symposium "Computer at the University", Cavtat 1988
- /3/ Scholtes, B.: Residual Stresses Introduced by Machining, Advances in Surface Treatments, Ed.: A. Niku-Lari, Pergamon Press, Oxford 1987, 59-71.
- /4/ Peckner, D.; Bernstein, I.M.: Handbook of Stainless Steels, Mc Graw-Hill Book Company, New York 1977
- /5/ Bringsmeier, E., Cammett, I.T., König, W., Leskovar, P., Peters, J.: Residual Stresses - Measurement and Causes in Machining Processes, Key-note-Paper, Annals of the CIRP, vol. 31, no. 2, 1981, 153 - 163

J. Grum, P. Žerovnik

#### THE EFFECT OF TOOL WEAR ON THE DISTRIBUTION OF RESIDUAL STRESSES IN THE SURFACE LAYERS DURING MACHINING OF AUSTENITIC STEELS

#### S u m m a r y

In chemical and processing techniques various parts are frequently exposed to corrosion and high pressure. To prevent this, chromium nickel austenitic steels of the type 18/9 with the designation according to DIN x10CrNiTi 189 are very often used. The main advantage of this steel is that in the cast state it has almost the same corrosion resistance as in the forged or rolled state. The quality of the machined surface after the milling process was described by residual stress and hardness measurements in dependence on the machining conditions. Besides this, the state of the tool was followed by observing the wear on the clearance face. A method measuring residual stresses brought into the surface layer by chemical etching in a 5 % NaCl solution, was chosen. During machining with a sharp tool the compressive residual stresses move between 420-520 N/mm<sup>2</sup> which with a blunt tool increases onto 590-890 N/mm<sup>2</sup>. The experimental results of residual stress measurements confirm the assumption that to achieve the required quality of the surface and the layers beneath it, a suitable selection of the steel and the technological procedure have to be made.

B. Vasiljević\*

**UTICAJ SADRŽAJA MEHANIČKIH NEČISTOĆA I VRSTE SREDSTVA  
NA HLADNENJE I PODMAZIVANJE NA KVALITET OBRADJENE  
POVRŠINE U OPERACIJAMA FINOG BRUŠENJA**

**1. UVOD**

Mehaničke nečistoće prisutne u SHP, posebno čestice abrazivnog sredstva i metalni opiljci, utiču na snižavanje kvaliteta obradjene površine, pojavu mikroorganizama, tačnost obrade, promenu profila tocila, itd. Nepovoljni uticaj mehaničkih nečistoća je posebno izražen u uslovima kada kvalitet i tačnost obrade predstvaljaju dominantne tehnološke zahteve, kao što je to slučaj u obradi finim brušenjem. Ako analiziramo obradu metala brušenjem možemo zapaziti da mehaničke nečistoće prisutne u SHP u procesu obrade dolaze u kontakt sa abrazivnim zrnima, vezivnim sredstvom i površinom koja se obradjuje. Na površini radnog predmeta dolazi do pojave mikrorezanja čija dubina i broj zavise od prirode, tvrdoće i sadržaja mehaničkih nečistoća u SHP. U početnom stadijumu brušenja, kada uticaj stepena pohabanosti tocila na kvalitet obrade možemo zanemariti, broj mikroreзова na površini obrade raste linearno sa povećanjem sadržaja mehaničkih nečistoća u SHP .

---

\* / Mr Bogdan Vasiljević, dipl.ing., asistent Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, ul. Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac



Dubina mikrorazova, koje tvrde mehaničke nečistoće prouzrokuju na površini predmeta obrade ne zavisi od koncentracije već od vrste, veličine i tvrdoće čestica. Tvrde mehaničke čestice zajedno sa sredstvom za hladjenje i podmazivanje dolaze u zonu obrade gde se velikom brzinom sudaraju sa česticama abrazivnog i vezivnog sredstva, što izaziva oštećenja i snižava postojanost alata.

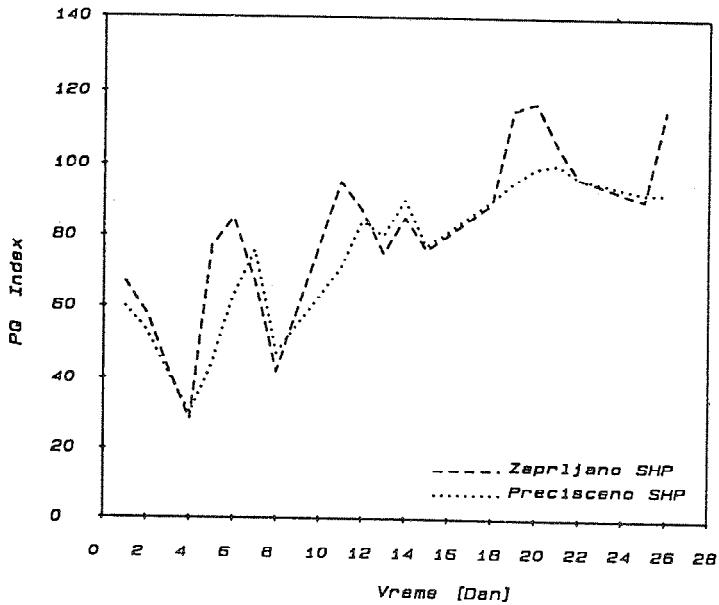
Uticaj sadržaja mehaničkih nečistoća na kvalitet i tačnost obrade je vrlo složen tako da se kod projektovanja sistema za prečišćavanje svi navedeni faktori moraju uzeti u obzir.

## 2. REZULTATI ISTRAZIVANJA

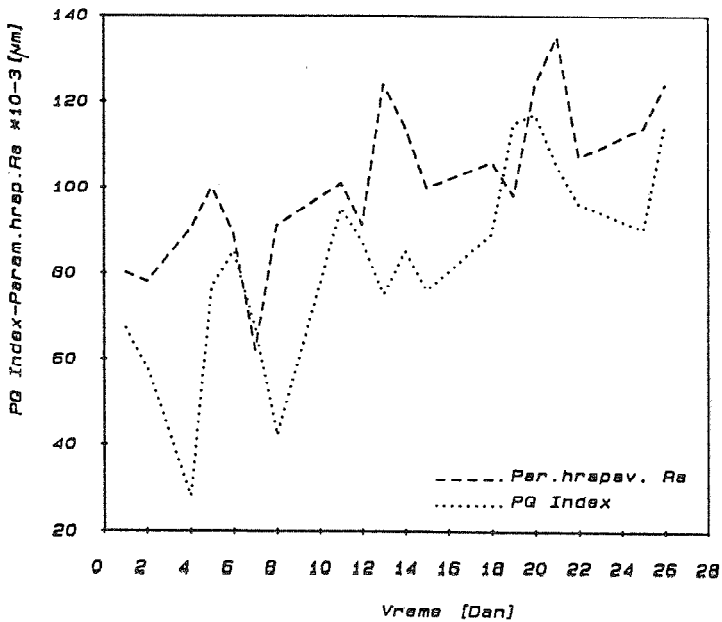
Kako je jedan od najznačajnijih faktora obrade na analiziranoj liniji za brušenje ostvareni kvalitet obrade i geometrija izrade, izvršeno je detaljno snimanje postojećeg stanja i povezivanje sa vrstom SHP i sadržajem mehaničkih nečistoća. Rezultati praćenja sadržaja mehaničkih nečistoća i kvaliteta prečišćavanja prikazani su na slici 1. Utvrđeno je da hidrociklonski prečištači ne funkcionišu pravilno jer je kvalitet prečišćavanja minimalan. To se odrazilo i na kvalitetu obradjene površine, Slika 2. Evidentan je kumulativni porast sadržaja mehaničkih nečistoća sa vremenom što je takodje posledica otkaza u sistemu za prečišćavanje.

Na liniji za brušenje je instalirano postrojenje za prečišćavanje SHP gravitaciono-hidrociklonskog tipa, sa rezervoarom taložnikom zapremine 860 litara, grabuljastim transporterom za izvajanje nataloženih čestica i dva hidrociklona na izlazu. Deklarisana finoća prečišćavanja je  $10\ \mu\text{m}$  uz efikasnost od 98%. Medjutim navedene karakteristike se odnose samo na metalne čestice veće od  $10\ \mu\text{m}$ . Ukoliko se analiziraju i ostale mehaničke nečistoće koje potiču od brusnog sredstva, industrijska prašina itd, kao i fine metalne čestice veličine manje od  $10\ \mu\text{m}$ , što je za obradu brušenjem i karakteristično, dobija se potpuno drugačija slika o karakteristikama uredjaja. Rezultati praćenja

### Kvalitet preciscavanja I



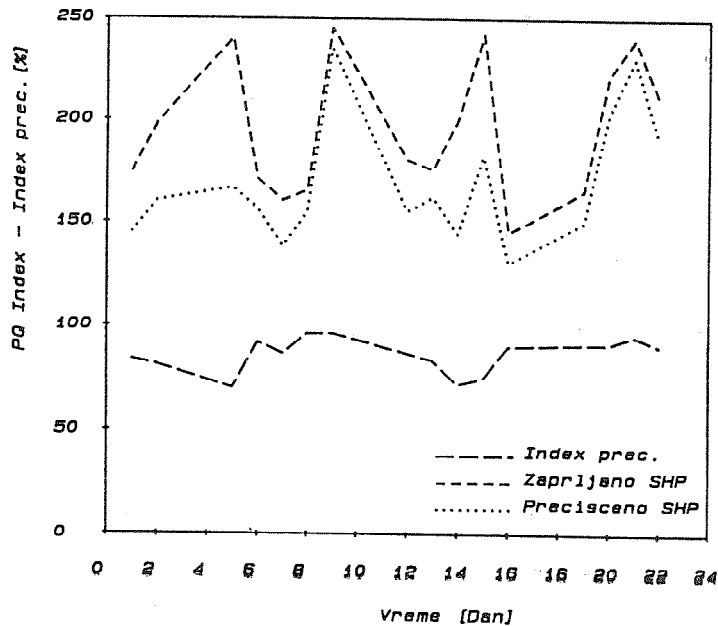
### Uticaj PQ Indeksa na Ra



ukupnog sadržaja mehaničkih nečistoća u SHP na ulazu i na izlazu iz sistema za prečišćavanje pružaju pravu sliku o ukupnom kvalitetu prečišćavanja za sve vrste čestica bez obzira na veličinu. Očigledno je da ukoliko se želi postizanje više efikasnosti prečišćavanja, što je svakako poželjno sa aspekta dužeg veka trajanja SHP, višeg kvaliteta obrade i zaštite mašine i radnog predmeta, neophodno je, u konkretnom slučaju, osim podešavanja rada hidrociklona uvesti i treći stepen prečišćavanja.

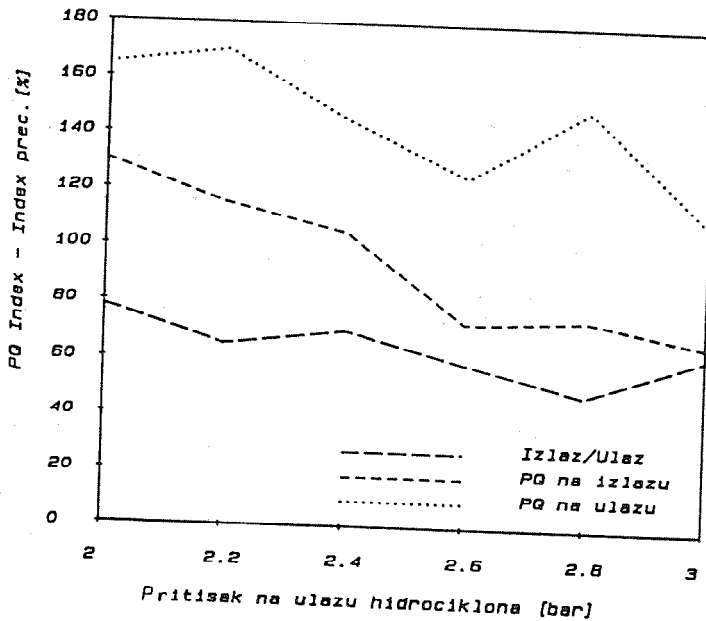
Prvi pokušaj optimizacije rada hidrociklona promenom ulaznog pritiska u opsegu od  $2 - 3 \times 10^5$  Pa, prikazan na slici 3, nije pružio očekivane rezultate i pored nešto više efikasnosti izvajanja. Nakon demontaže hidrociklona utvrđeno je prisustvo naslaga mehaničkih nečistoća koje se povremeno odvajaju od zidova uređaja i ometaju pravilan rad hidrociklona. Na slici 4 je prikazan uticaj pritiska na ulazu u hidrociklon na kvalitet prečišćavanja. Najbolji rezultati, u analiziranom opsegu, odgovaraju pritisku od  $p = 2,8 \times 10^5$  Pa. Neophodno je napomenuti da je i pored izvršenog čišćenja hidrociklona u toku merenja

## Kvalitet preciscavanja II



Slika 3.

## Optimizacija rada hidrociklona



Slika 4.

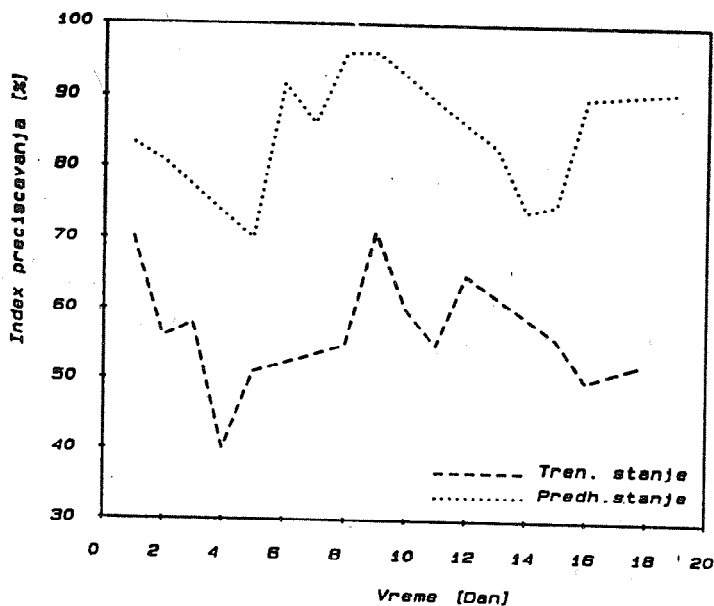
opet dolazilo do odvajanja nataloženih mehaničkih nečistoća sa zidova ulaznog rezervoara i remećenja normalne cirkulacije SHP unutar hidrociklona, što ukazuje na neophodnost periodičnog detaljnog čišćenja svih elemenata uređaja.

Tek nakon trećeg čišćenja sistema za prečišćavanje SHP i podešavanja osnovnih parametara rada hidrociklona uspostavljen je zadovoljavajući režim rada, što se odrazilo i na dijagramu efikasnosti prečišćavanja prikazanom na slici 5. Izmene su rezultirale u značajnom povećanju efikasnosti prečišćavanja i znatno nižem sadržaju mehaničkih nečistoća na izlazu iz sistema za prečišćavanje SHP. Može se konstatovati da je ukupna efikasnost izdvajanja mehaničkih nečistoća iz SHP u konkretnom slučaju povećana sa samo 10-12% na skoro 55%, mereno preko PQ Indeksa\*.

Osim mehaničkih nečistoća ispitivan je i uticaj vrste i kvaliteta SHP na ostareni kvalitet obradjene površine. Na slici 6 su prikazani rezultati praćenja prosečnog kvaliteta obradjene površine u periodu od 20 dana. Rezultati pokazuju da sa aspekta kvaliteta obradjene površine najbolje rezultate pokazuje SHP

\*/ Merenje sadržaja mehaničkih nečistoća je vršeno na mernom sistemu PQ-2000.

## Kvalitet preciscavanja III



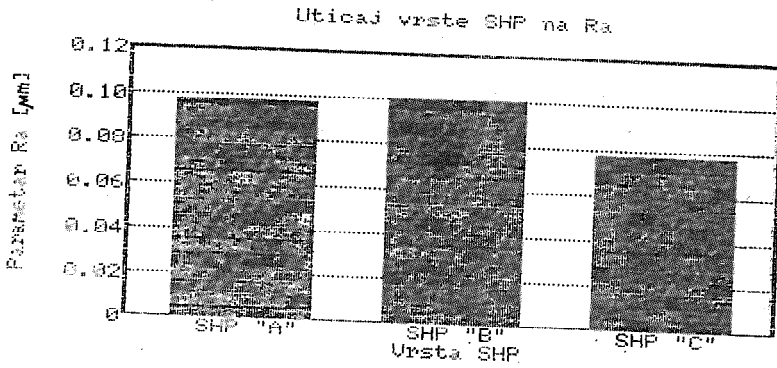
Slika 5.

"C", dok ostala dva ispitivana SHP ( SHP "A" i SHP "B" ) pokazuju nešto lošije rezultate. Osim kvaliteta obradjene površine pratila se i količina dolivanja, intenzitet stvaranja pene, isparavanje i prisustvo čestica SHP u vazduhu i pojava korozije na elementima mašina i radnom predmetu, Tabela 1. Na osnovu praćenja svih navedenih faktora može se zaključiti da su najbolji rezultati postignuti primenom SHP "C".

Tabela 1.

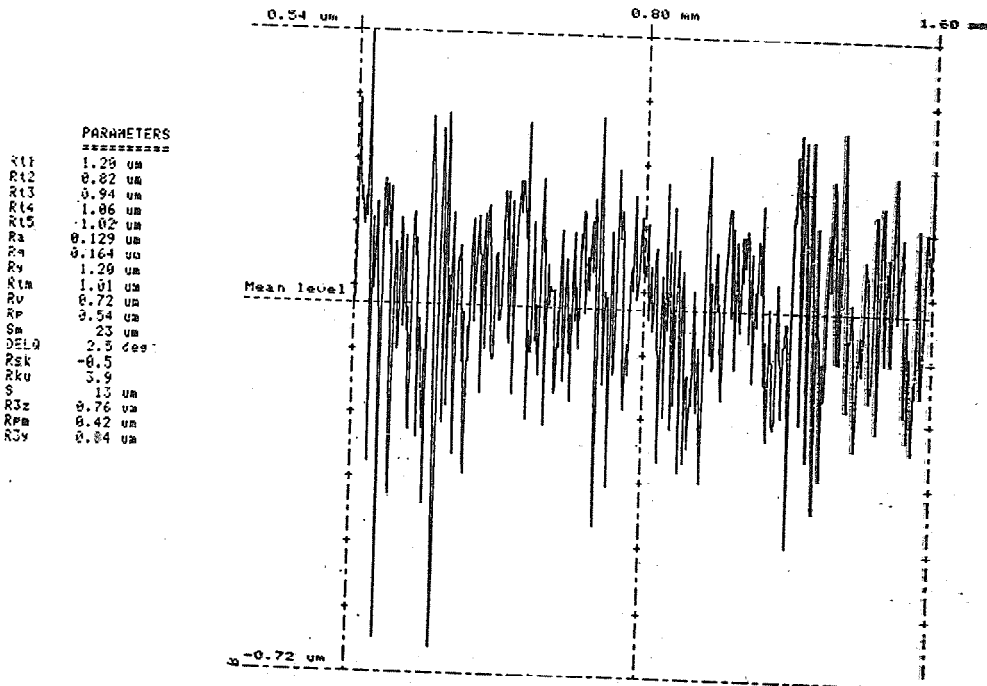
SHP	Srednji kval. obrade Ra(μm)	Pojava pene	Isparavanje i čestice SHP u vazd.	Korozijska zija *)
SHP "A"	0.098	ne	izraženo	ne
SHP "B"	0.100	intenzivno	minimalno	ne
SHP "C"	0.078	minimalno	minimalno	ne

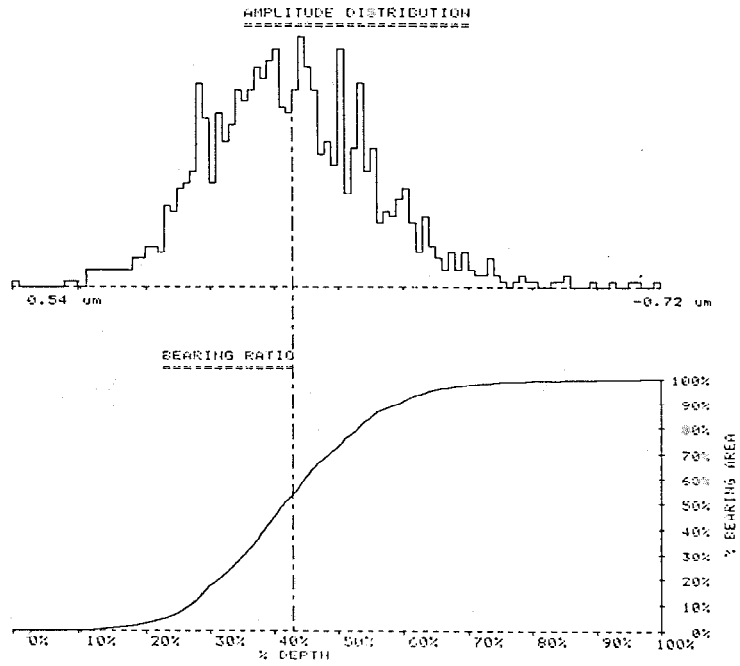
\*/ u periodu praćenja od mesec dana.



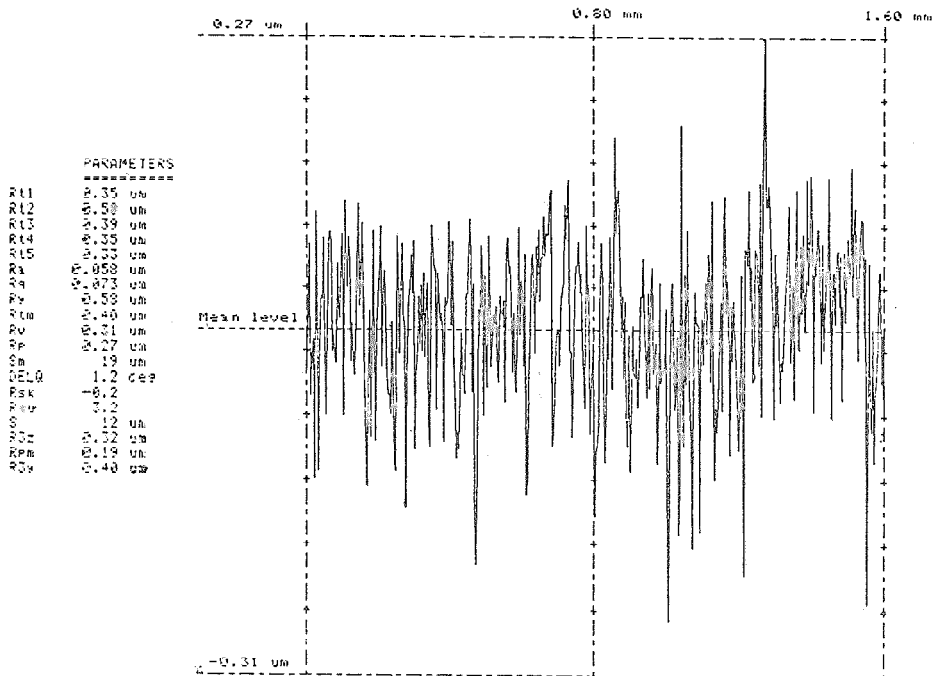
Slika 6.

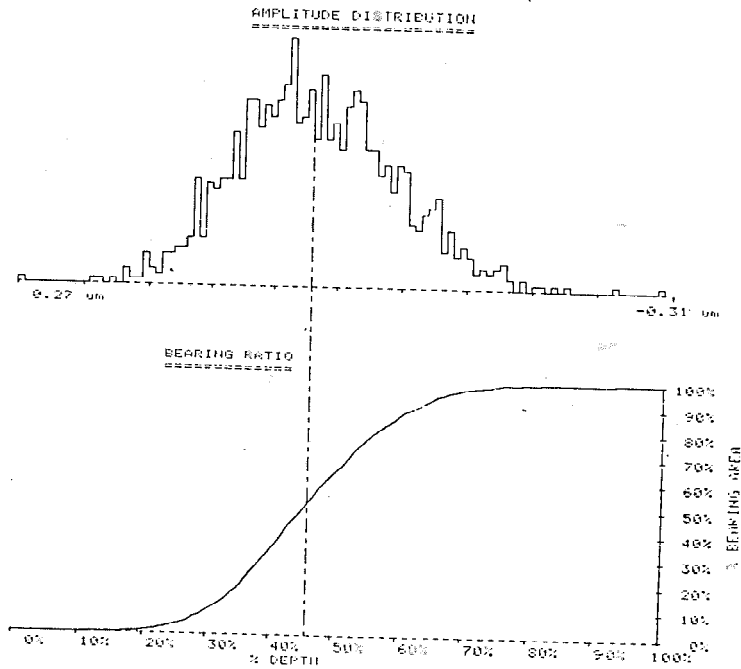
Na slikama 7 i 8 su prikazani rezultati analize kvaliteta obradjene površine delova uzetih sa linije za brušenje pre i nakon izvršenih izmena vrste SHP i režima rada sistema za prečišćavanje. Evidentno je značajno povećanje ostvarenog kvaliteta obradjene površine čime se obezbedjuje znatno kvalitetniji proizvod.





Slika 7.





Slika 8.

### 3. ZAKLJUČAK

Rezultati eksploatacionih i laboratorijskih istraživanja izloženi u ovom radu ukazuju na izuzetan značaj efikasnosti prečišćavanja SHP u eksploataciji i pravilnog izbora vrste i kvaliteta SHP. Viši kvalitet obradjene površine ostvaren na osnovu povećanja efikasnosti prečišćavanja i izmene vrste SHP ukazuje na jedan od mogućih pravaca poboljšanja postojećih tehnologija uz minimalna ulaganja.

Nažalost ovoj problematici se u domaćoj industriji ne posvećuje nužna pažnja. Veoma su retke radne organizacije koje imaju dobro organizovane i kadrovski osposobljene službe za poslovanje sa SHP, što svakako ne odgovara značajnoj ulozi koju SHP ostvaruje u obradnim procesima.



## Literatura

1. В. IVKOVIĆ: Tribologija rezanja, Gradjevinska knjiga, Beograd, 1979.
2. Е. Г. БЕРДИЧЕВСКИЙ: Смазочно-охлаждающие технологические средства для обработки материалов, Машиностроение, Москва, 1984.
3. М. И. КЛУВИН: Технологические свойства новых СОЖ для обработки резанием, Машиностроение, Москва, 1979.
4. Л. В. ХУДОБИН: Смазочно-охлаждающие средства, Машиностроение, Москва, 1971.
5. Ю. В. ПОЛЯНСКОВ, Е. М. БУЛЫЖЕВ, Е. А. КАРЕВ: Пути повышения эффективности процессов сепарации СОЖ при шлифовании, Вестник машиностроения, № 10, 1975.
6. Л. В. ХУДОБИН, Ю. В. ПОЛЯНСКОВ, Е. А. КАРЕВ: Оптимизация конструктивных параметров и режимов работы гидроциклонов и батареи гидроциклонов при очистке СОЖ от шлифовального шлама, Вестник машиностроения, № 1, 1981.
7. M. Bobić, B. Vasiljević, Uticaj sredstva za hlađenje i podmazivanje na karakteristike brušenih površina. 21. Savetovanje proizvodnog strojarstva Jugoslavije, Opatija, 1987.
8. B. Vasiljević, M. Bobić, Optimizacija poslovanja sa sredstvima za hlađenje i podmazivanje. 21. savetovanje proizvodnog strojarstva Jugoslavije, Opatija, 1987.

B. Vasiljevic

THE EFFECTS OF THE CONTENTS OF MECHANICAL IMPURITIES AND THE KIND OF CUTTING FLUID ON MACHINING QUALITY IN FINE GRINDING OPERATIONS

## Summary

Presented in the paper are the results of laboratory and shop floor investigations into the influence of contamination level in the cutting fluid upon the machining quality in fine grinding operations. The subject of investigation was the influence of the quality of cutting fluid purification in a central system with two-stage, gravity/hydrocyclone type cleansing upon the machining quality. Various cutting fluids were used in the tests. It was found that through optimization of the principal parameters of the hydrocyclone operation, and through modifications in the central plant for cutting fluid cleansing one can significantly improve both the machining quality and the resulting tribological characteristics of the workpiece.

M. Lazić, D. Ranković \*)

SMANJENJE NIVOA ZAGADJENJA MIKROKLIME U OBRADI  
ODVALNIM GLOĐANJEM

1. UVOD

Stalna težnja ka uvodjenju novih i savremenijih reznih alata za obradu odvalnim glođanjem (posebno presvučenih i na drugi način oplemenjenih) dovodi do povećanja brzine rezanja (iznad 50 m/min). Sa porastom brzine rezanja raste i količina generisane toplote, koju čista ulja za rezanje ne mogu odvesti. Povećanje količine generisane toplote izaziva pojavu sagorevanja pojedinih komponenti iz sastava čistih ulja za rezanje i stvaranje otrovnih para, neprijatnog mirisa i drugih vidova zagadjenja mikroklimе.

Jedno od rešenja nastalog problema, posebno u uslovima otežanog obezbedjenja reznih ulja visokog kvaliteta, je i uvodjenje emulzije kao sredstva za hladjenje i podmazivanje. Rezultati preliminarnih ispitivanja, izvedenih u Laboratoriji za obradu metala i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu [3], su ukazali na mogućnost primene emulzija polusintetičkih emulgirajućih ulja u proizvodnim operacijama odvalnog glođanja. Proizvodna (eksploatacijska) ispitivanja izvode se u uslovima karakterističnim za proces izrade zupčanika u Zavodima "Crvena Zastava", u toku realizacije proizvodnog programa, bez njegovog narušavanja i pri utvrdjenim tehnološkim rešenjima.

2. USLOVI ISPITIVANJA

Osnovni ciljevi ispitivanja mogućnosti smanjenja nivoa zagadjenja mikroklimе obuhvataju analizu i ocenu uticaja vrste i koncentracije sredstva za hladjenje i podmazivanje na koncentraciju hemijskih štetnosti na i u okolini radnih mesta na kojima se izv-

\*) Dr Miodrag Lazić, dipl. ing., vanredni profesor Mašinskog fakulteta u Kragujevcu

\*) Dragan Ranković, dipl. ing., direktor sektora ozubljenja, OOUR Mehanička obrada, PO ZJA, Zavodi "Crvena Zastava"

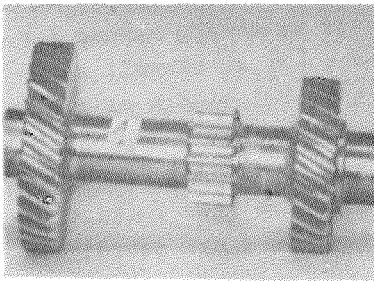
odi obrada odvalnim glodanjem. Kompletnost analize i ocene zahteva i praćenje niza drugih, manje ili više relevantnih, pokazatelja procesa, kao što su:

- tačnost i kvalitet izrade zupčanika,
- habanje reznih elemenata alata i postojanost alata,
- nivo troškova poslovanja sa sredstvima za hladjenje i podmazivanje,
- produktivnost živog i minulog rada i sl.

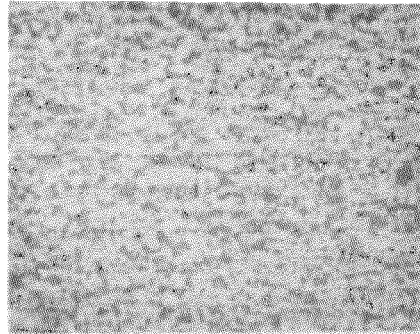
Polazeći od navedenih ciljeva formiran je i odgovarajući program istraživanja, kojim je obuhvaćeno merenje i praćenje svih karakterističnih parametara procesa, uticajnih na tehnološko-ekonomske pokazatelje procesa izrade zupčanika i kvalitet ocene nivoa zagađenosti mikroklimе.

Uslovi izrade zupčanika određeni su sledećim osnovnim karakterističnim parametrima:

- predmet obrade: zupčanik putničkog automobila (sl.1) modula  $m=2$  mm sa 24 zuba,
- rezni alat: odvalno glodalo prečnika 90 mm sa 12 češljeva (broj reznih elemenata-zuba češlja 20-21), izradjeno od čelika Č.9780 i presvučeno titan-nitridom,



predmet obrade



mikrostruktura materijala zupčanika (uvećanje x 100)

Sl.1. Izgled predmeta obrade i snimak mikrostrukture materijala predmeta obrade

-mašina: odvalna glodalica visoke krutosti i stabilnosti tipa PFAUTER RA-180,

-režim obrade: brzina rezanja 62 m/min i aksijalni korak  $s=3,15$  mm/o,

-sredstvo za hladjenje i podmazivanje: čisto režno ulje (propisano tehnologijom) i 6 %-tna emulzija mineralnog emulgirajućeg

ulja i sl.

Tehnološko-metalurška ispitivanja materijala zupčanika (čelik Č.7422), izvedena u Zavodima "Crvena Zastava", su pokazala da materijal predmeta obrade odgovara tehničkim uslovima i standardima u pogledu hemijskog sastava (tablica 1), tvrdoće, mikrostrukture i usmerenosti (izdiferencirana struktura ferita i lamelarnog perlita-stepen 1-sl.1), kao i u pogledu mikročistoće i veličine austenitnog zrna.

Tablica 1: Hemijski sastav materijala predmeta obrade

	s a d r ž a j (%)							
	C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo	S	P
prema tehničkim uslovima	0,18-0,23	0,70-0,90	≤0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	0,02-0,04	≤0,035
materijal predmeta obrade	0,18	0,78	0,30	0,60	0,62	0,21	0,02	0,022

### 3. REZULTATI ISPITIVANJA

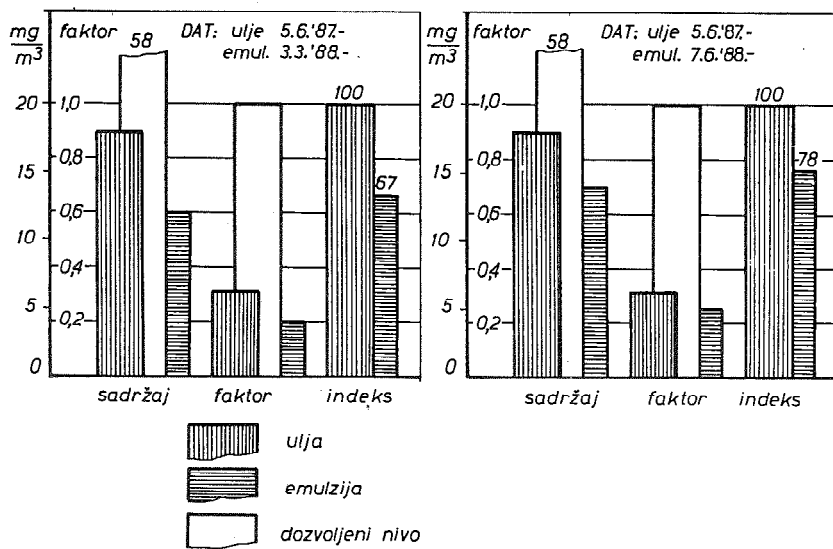
#### 3.1. Koncentracija hemijskih štetnosti

Identifikacija nivoa zagadjenja mikrokline i analiza uticaja vrste i koncentracije sredstva za hladjenje i podmazivanje izvedena je merenjem koncentracije hemijskih štetnosti na i u okolini radnih mesta na kojima se izvodi proces odvalnog glodanja. Merenja, ostvarena od strane Zavoda za medicinu rada Zavoda "Crvena Zastava", su izvedena prema svim pravilima, propisima i standardima zaštite na radu. Merenjima je obuhvaćena identifikacija sadržaja:

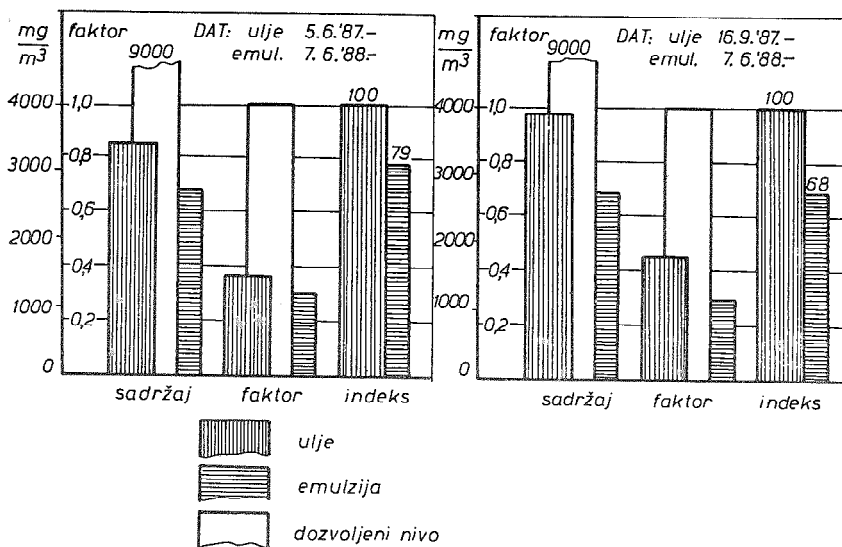
- mineralnih ulja,
- akroleina,
- ugljen-monoksida,
- ugljen-dioksida i sl.,

u uslovima primene kako čistih ulja za rezanje tako i emulzija mineralnih emulgirajućih ulja.

Uporedni prikaz dela rezultata merenja koncentracije hemijskih štetnosti prikazan je na sl. 2 i 3. Prikazani rezultati merenja koncentracije hemijskih štetnosti ukazuju na nekoliko evidentnih činjenica:

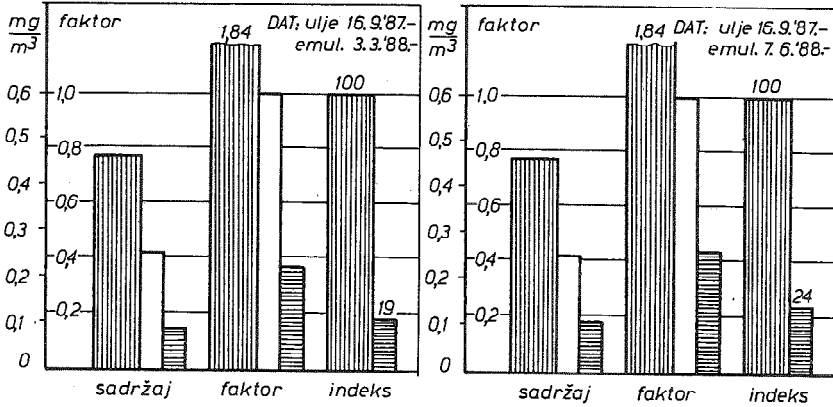
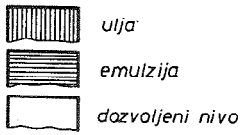


sadržaj ugljen-monoksida

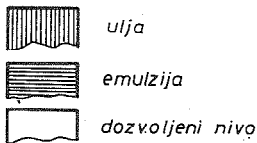
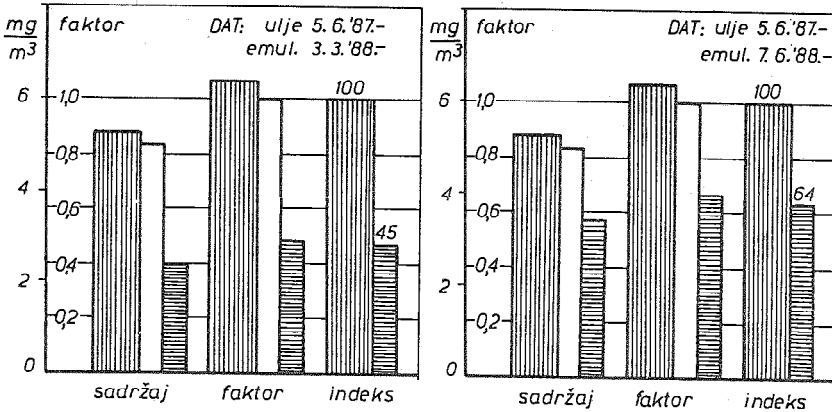


sadržaj ugljen-dioksida

Sl.2. Uporedni prikaz sadržaja ugljen-monoksida i ugljen-dioksida na radnim mestima obrade odvalnim glodanjem



sadržaj akroleina



sadržaj mineralnih ulja

Sl.3. Uporedni prikaz sadržaja akroleina i mineralnih ulja na radnim mestima obrade odvalnim glodanjem

i -u uslovima primene čistih ulja za rezanje sadržaj ugljen-monoksida i ugljen-dioksida je u granicama dozvoljenog nivoa (stvarni faktor sadržaja 0,31 za CO i 0,44 za CO<sub>2</sub>), dok sadržaj mineralnih ulja (faktor 1,12) i akroleina (faktor 1,84) značajno prevazilazi granice dozvoljenog nivoa (faktor 1),

ii -u uslovima primene emulzija koncentracija hemijskih štetnosti je znatno ispod dozvoljenog nivoa i iznosi za:

-ugljen-dioksid, faktor 0,27,

-ugljen-monoksid, faktor 0,17,

-akrolein, faktor 0,36 i

-mineralna ulja, faktor 0,56,

iii -primena emulzija obezbedjuje značajno smanjenje koncentracije hemijskih štetnosti u odnosu na primenu reznih ulja. To je očigledno na bazi indeksa sadržaja štetnosti, koji se kreće u granicama 31-78 kod primene emulzija, kada se indeks sadržaja štetnosti kod primene reznih ulja označi sa 100.

### 3.2. Ostala ispitivanja

Praćenja i merenja parametara koncentracije hemijske štetnosti su pokazala da se zamenom čistih ulja za rezanje emulzijama može smanjiti nivo zagađenja mikroklima. Međutim, za ukupnu ocenu mogućnosti primene emulzija neophodno je praćenje i niza drugih, relevantnih parametara, a pre svega parametara kvaliteta, tačnosti izrade i habanja reznih elemenata alata.

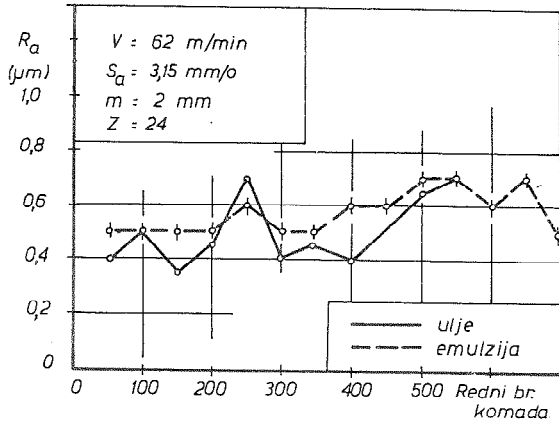
Neznatan deo rezultata ovih ispitivanja prikazan na sl.4 i 5, pokazuje da se parametri tačnosti i kvaliteta izrade nalaze u granicama dozvoljenih odstupanja i da je intenzitet habanja reznih elemenata alata približno isti, bez obzira na vrstu sredstva za hladjenje i podmazivanje (posmatrano ulje ili emulziju).

### 4. ZAKLJUČAK

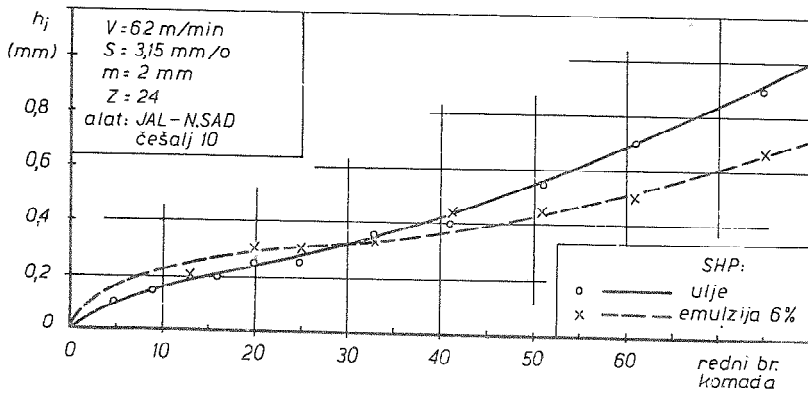
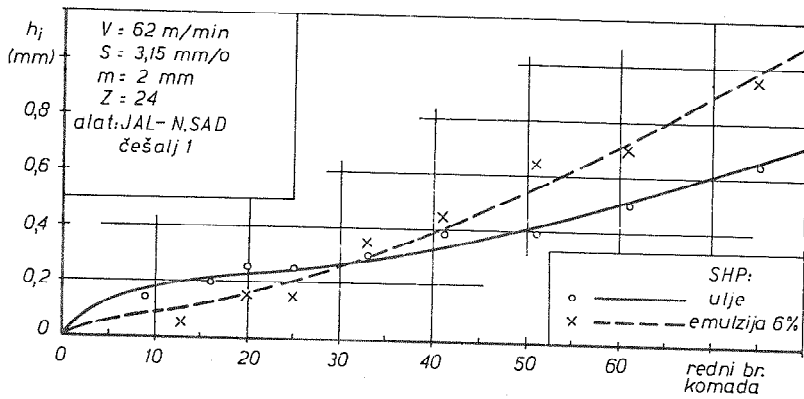
Prikazani rezultati i analize su pokazali da se primenom navedene emulzije mineralnih emulgirajućih ulja umesto čistih reznih ulja, u uslovima obrade odvalnim glodanjem, kod značajnijeg povećanja brzine rezanja, postiže:

i -značajno smanjenje koncentracije hemijskih štetnosti,

ii -sprečavanje neželjenih pojava koje nastaju pri primeni čistih ulja za rezanje i



Sl.4. Uporedni prikaz srednjeg aritmetičkog odstupanja od srednje linije profila bočnih površina zuba zupčanika



Sl.5. Uporedni prikaz habanja reznih elemenata odvalnih glodala pri radu bez "šiftinga"



iii -poboljšanje uslova rada odnosno smanjenje nivoa zagađenja mikroklimе.

Rezultati ispitivanja ukazuju i na sve izraženiju potrebu detaljnijeg sagledavanja problematike procesa obrade i sa aspekta nivoa zagađenja mikroklimе. Dalja ispitivanja usmerena ka poboljšanju uslova rada i smanjenju nivoa zagađenja mikroklimе obuhvataju analizu uticaja tipa i koncentracije sredstva za hladjenje i podmazivanje.

#### 5. LITERATURA

- [1] GRUPA AUTORA, Mogućnost zamene čistih ulja za rezanje emulzija-  
ma, Elaborat No. 6/88, LOMT, Mašinski fakultet, Kragujevac,  
1988
- [2] LAZIĆ M., RANKOVIĆ D., Poboljšanje uslova rada kroz izbor sreds-  
tva za hladjenje i podmazivanje u obradi odvalnim gl-  
odanjem, Tribologija u industriji, No. 3, 1988
- [3] MILOŠEVIĆ M., Izveštaj o ispitivanjima triboloških karakterist-  
ika polusintetičkog sredstva za hladjenje i podmaziv-  
anje pri odvalnom glodanju, LOMT, Mašinski fakultet, Kr-  
agujevac, 1981

M. Lazić, D. Ranković

#### REDUCTION OF THE MICROCLIMATE POLLUTION LEVEL IN HOB MILLING

Constant strive toward introducing new and modern cutting tools for hob milling gives rise to increases in the cutting speed, which in turn results in larger amounts of heat being generated. When the oils are used as the cutting fluids, higher amounts of the heat cause the destruction of individual components of the oils, the consequences being appearance of poisonous vapours, various evaporations, and other forms of microclimate pollution.

One of the solutions to this problem in the conditions of difficulties in quality oil supply, consists of using emulsions as the cutting fluids in gear cutting. Presented in paper is a part of the results obtained in investigations into the possibilities cutting oils with emulsions.

R. Kovač, S. Jojin\*

PRILOG ANALIZI MEHANIZMA NASTAJANJA PUKOTINA  
PRI BRUŠENJU

1. UVOD

U procesu obrade brušenjem u površinskom sloju materijala obradka protiču složena dejstva sile rezanja i temperature. Temperature nastale u zoni brušenja mogu dostići vrlo visoke vrednosti 600-1000°C pa i temperature lokalnog topljenja materijala /6,1,2/. U takvim uslovima u površinskom sloju materijala ostvaruju se vrlo složeni procesi: elastično-plastične deformacije, strukturne transformacije, obrazovanje vremenskih i zaostalih napona, obrazovanje pukotina i druge pojave.

Cilj rada je da da prilog analizi mehanizma nastajanja pukotina i da ukaže na dominirajuće faktore koji utiču na taj mehanizam. Prilaz razmatranju ove problematike zasniva se na modeliranju toplotnih procesa pri brušenju, saznanjima iz literature i praktičnim zapažanjima.

2. TEMPERATURNO POLJE I DEFORMACIJE U POVRŠINSKOM  
SLOJU MATERIJALA OBRADKA

U površinskom sloju materijala obradka u procesu brušenja se javljaju toplotni izvori, usled prelaza u toplotu energije deformacije obradljivog materijala i rada trenja na kontaktnoj površini /1/. Ova pojava omogućava da se razmatranje toplotnih procesa pri brušenju svede na razmatranje dejstva toplotnih izvora, je što se proces prenosa toplote zasniva na elemen-

\*Dr Risto Kovač, dipl.ing., vanr.prof., Mr Siniša Jojin, dipl.ing., asistent  
Institut za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad,  
V.Perića-Valtera 2.

tarnim tačkastim izvorima (izazvanim dejstvom zrna tocila), koji se mogu sumirati za određenu konkretnu površinu.

Za određivanje temperaturnog polja površinskog sloja brušenog obradka, u osnovi se mogu koristiti dve metode, a to su analitička i eksperimentalna. U radu je korišćena analitička metoda. Pri korišćenju analitičke metode realni sistemi se znatno uprošćavaju, putem izbora određenih modela, ali istovremeno ova metoda omogućava da se uspostavi veza između temperature, intenziteta toplotnog izvora, toplotno-fizičkih svojstava materijala obradka i drugih parametara sistema. Pri analitičkoj metodi određivanja temperaturnog polja površinskog sloja obradka mogu se razlikovati četiri osnovna oblika rasporeda temperature: a) temperatura u zoni dejstva jediničnog abrazivnog zrna-lokalna temperatura, b) srednja temperatura po površini kontakta tocila i obradka pri dejstvu mnogo abrazivnih zrna, a u periodu kada se njihov uticaj sumira - kontaktna temperatura, c) srednja uspostavljena temperatura po obradenoj površini nakon prolaza tocila, d) srednja uspostavljena temperatura u posmatranoj zapremini obradka /1/.

Za određivanje temperaturnog polja obradka oblika polubeskonačne ploče koristiće se jednačina /8,10/

$$T_{i(x,\tau)} = \frac{Q_i}{c \cdot \rho \cdot (4\pi a \tau)^{1/2}} \cdot \exp(-x^2/4a\tau) \quad (1)$$

gde je  $Q_i$  - intenzitet toplotnog izvora u nekoj tački (y,z) površine obradka,  $a = \lambda / \rho c$  - temperaturska provodljivost materijala obradka  $\tau$  - vreme i  $x$  - koordinata po dubini obradka. Jednačina (1) predstavlja trenutni površinski toplotni izvor, ali se uopštavanjem može smatrati kao niz temperaturnih, impulsnih, tačkastih izvora toplote raspoređenih po kontaktnoj površini. Ako se brusi neka ravna ploča debljine  $X$ , a ploča nema mogućnosti da se širi u pravcu osa  $Y$  i  $Z$  tada će pri uslovu nestišljivosti ( $\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z = 3\alpha \cdot T$ ) /6/ deformacija u pravcu ose  $X$  biti:

$$\epsilon_x = \frac{3\alpha \cdot Q_i}{c \cdot \rho \cdot (4\pi a \tau)^{1/2}} \cdot \exp(-x^2/4a\tau) \quad (2)$$

gde je  $\alpha$  - koeficijent širenja materijala obradka, koji je u radu uzet kao konstantna veličina.

U teoriji malih elastično-plastičnih deformacija intenzivnost (veličina) deformacije određiće se prema sledećem izrazu /6/

$$\epsilon_i = \frac{(2)^{1/2}}{3} (\epsilon_x - \epsilon_y) - (\epsilon_y - \epsilon_z) + (\epsilon_z - \epsilon_x)^{1/2} \quad (3)$$

iz prethodne jednačine pri napred navedenim uslovima ( $\epsilon_y = \epsilon_z = 0$ ) dobija se:

$$\epsilon_i = \frac{(2)^{1/2}}{3} \cdot (2\epsilon_x^2)^{1/2} = \frac{2}{3} \epsilon_x \quad (4)$$

Iz (4) i (2) sledi da je intenzivnost deformacije, pri  $\alpha = \text{const}$ , direktno proporcionalna temperaturi. Usled toga maksimalna intenzivnost deformacije u nekoj tački dostiže se u trenutku kada ta tačka ima maksimalnu temperaturu. Trenutak dostizanja naksimalne deformacije odrediće se iz (2) i (4) a pri uslovu  $\partial \epsilon_i / \partial \tau = 0$ , te je

$$\frac{\partial \epsilon_i}{\partial \tau} = \frac{e^{-\frac{x^2}{4a\tau}}}{\tau^{1/2}} \cdot \left( \frac{x^2}{4a\tau} \right) - \frac{e^{-\frac{x^2}{4a\tau}}}{2\tau^{3/2}} = 0 \quad (5)$$

odakle se dobije izraz koji odredjuje vreme dostizanja maksimalne deformacije:

$$\tau = \frac{x^2}{2a} = \frac{x^2 \cdot \rho \cdot c}{2\lambda} \quad (6)$$

Iz (6) sledi da svaka tačka po dubini površinskog sloja ( $x > 0$ ) ima različito vreme dostizanja maksimalne temperature, što pri istom intenzitetu toplotnog izvora zavisi od toplotne provodljivosti  $\lambda$  materijala obradka.

Da bi se odredila maksimalna intenzivnost deformacije u (2) će se uneti izraz (6) a zatim (2) u (4)

$$\epsilon_{i(\max)} = \frac{\alpha \cdot Q_i}{c \cdot \rho \cdot x (\pi e/2)^{1/2}} \quad (7)$$

Ukupna intenzivnost deformacije  $\epsilon_i$  sastoji se iz elastične deformacije  $\epsilon_e$  i plastične  $\epsilon_p$ , tj.

$$\epsilon_i = \epsilon_e + \epsilon_p \quad (8)$$

U tačkama gde dolazi do plastične deformacije u periodu rasta temperature i širenja materijala tj. kada intenzivnost napona  $\sigma_i > \sigma_T$  (gde je  $\sigma_T$  - granica tečenja materijala) veličina elastične deformacije može se odrediti prema sledećem izrazu /6/

$$\epsilon_e = \frac{2(1+\mu)}{3E} \sigma_i = \frac{2}{3} (1+\mu) \frac{\sigma_T}{E} \quad (9)$$

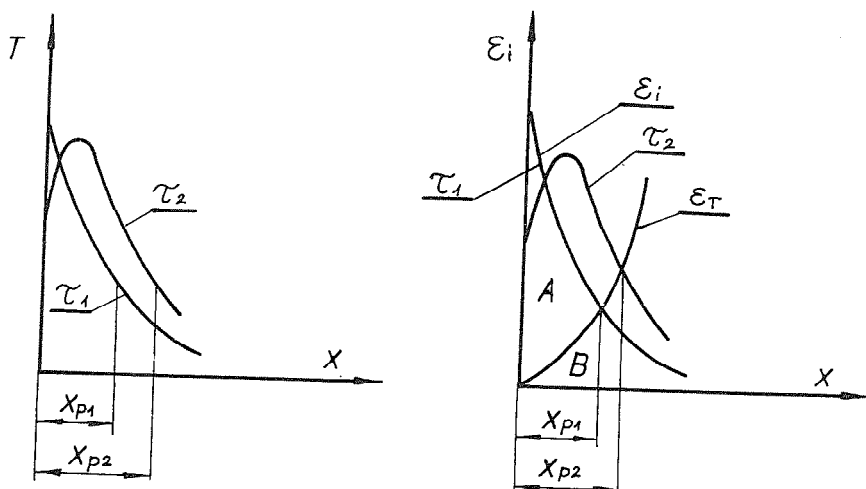
gde je  $\mu$  - Puasonov broj, a  $E$  - modul elastičnosti materijala obradka.

Odnos  $\sigma_T/E$  se umanjuje sa porastom temperature i dostiže minimum pri maksimalnoj temperaturi odnosno pri  $\partial \epsilon_i / \partial \tau = 0$ .

Plastična deformacija u nekoj tački javlja se pri uslovu  $\epsilon_i \geq \epsilon_T$  tada se izraz (7) i (9) mogu izjednačiti i dobiti izraz na osnovu koga se može odrediti dubina do koje se prostire plastična deformacija u površinskom sloju, na mestu dejstva trenutnog toplotnog izvora. Uzimajući da je u (7)  $x = x_p$  dobija se:

$$x_p = \frac{3}{2} \frac{\alpha \cdot Q_i}{c \cdot \rho \cdot (\pi e/2)^{1/2}} \cdot \frac{E}{\sigma_T(1+\mu)} \quad (10)$$

gde je  $x_p$  - dubina do koje se u površinskom sloju javljaju plastične deformacije kao posledica dejstva temperature.



Sl.1.

Dubina  $x_p$  mogla bi se uslovno nazvati dubina dejstva toplotnog izvora, koji kao što će se kasnije videti ima značajan uticaj na karakter pukotina. Na slici 1a. prikazan je šematski raspored temperature po dubini površinskog sloja ( $x > 0$ ) u trenutku  $\tau_1$  dejstva toplotnog izvora i trenutku  $\tau_2$  dejstva rashladnog sredstva. U trenutku  $\tau_1$  površinski slojevi imaju najvišu temperaturu šire se, čemu se suprotstavljaju slojevi sa nižom temperaturom, te su u trenutku  $\tau_1$  površinski slojevi izloženi naponima na pritisak.

U trenutku  $\tau_2$  dejstva rashladnog sredstva raspored temperatura ima drugačiji karakter. Skupljanju površinskih slojeva koji se brže hlade i imaju nižu temperaturu suprotstavljaju se slojevi ispod njih koji imaju višu temperaturu, te su tanki površinski slojevi izloženi naponima na istezanje. Ovo pri određenim uslovima može dovesti do pojave pukotina.

Isti uticaj na obrazovanje napona na istezanje u površinskom sloju mogu imati i slojevi u ravni brušenja ( $x \rightarrow 0$ ) koji imaju nižu temperaturu i ometaju skupljanje slojeva sa višom temperaturom. Odavde se može izvesti zaključak da se pukotine u površinskom sloju obradka ne javljaju u trenutku dejstva sile rezanja već u periodu hladjenja.

Na slici 1b šematski je prikazan raspored deformacija u trenutku  $\tau_1$  i  $\tau_2$  u površinskom sloju obradka. Raspored je potpuno identičan rasporeda temperature jer je  $\epsilon = \alpha \cdot T$ . U trenutku  $\tau_2$  raspored deformacija u površinskom sloju je kao i raspored temperature.

Na veličinu  $x_p$  utiče intenzivnost toplotnog izvora  $Q_i$  (koji u osnovi zavisi od tehnoloških parametara rezanja, tvrdoće materijala obradka i svojstava tocila) i svojstva materijala obradka na prvom mestu granica tečenja  $\sigma_T$  odnosno  $\epsilon_T$  i toplotna provodljivost  $\lambda$  (vidi (6)). Različiti materijali ili njihove elementarne zapremine će pri istim ostalim uslovima imati različite veličine  $x_p$ . Na slici 1b oblast A predstavlja plastične, a oblast B elastične deformacije. Idući od površine ka unutrašnjosti površinskog sloja veličina plastične deformacije opada i na preseku  $\epsilon_1$  i  $\epsilon_T$  je jednaka nuli.

### 3. O MEHANIZMU NASTAJANJA PUKOTINA I PARAMETRI KOJI UTIČU NA NJIHOVO NASTAJANJE

Radi vršenja određenih analiza uzeće se da svaki toplotni izvor  $Q_i$  koji egzistira u jednačini (1) izaziva neku temperaturu  $T_i$  koja dostiže maksimum u trenutku  $\tau$  određenom izrazom (6). Kako elementarne površine u ravni brušenja, kao i slojevi ispod njih, imaju različite vrednosti temperatura to će u periodu hladjenja doći do ometanog skupljanja u pojedinim elementarnim površinama i slojevima ispod njih. Skupljanje neće proticati ravnomerno u kontaktnoj površini zahvaćenoj toplotnim izvorima različitog intenziteta. Ovu neravnomernost uvećavaju nehomogena svojstva materijala obradka usled čega može doći do znatnog porasta vrednosti lokalne temperature. Ometano lokalno skupljanje izaziva lokalne deformacije na istezanje koje pri dostizanju određene veličine mogu izazvati pukotine.

Neka je  $T_i$  - maksimalna temperatura na nekoj elementarnoj površini,  $T$  - tekuća temperatura koja se menja od  $T_i$  do sobne temperature. Ako bi se elementarni površinski sloj slobodno skupljao i ravni Y-Z njegova

slobodna deformacija  $\epsilon_{sl}$  bi bila:

$$\epsilon_{sl} = \alpha(T_i - T) \quad (11)$$

Kako je slobodno linearno skupljanje i-tog elementarnog površinskog sloja ometano elementarnim površinskim slojevima sa nižom temperaturom to će elementarni površinski sloj sa višom temperaturom biti deformisan za neku dopunsku deformaciju  $\epsilon'$ . Usled toga stvarna deformacija  $\epsilon$  nekog i-tog površinskog sloja, u ravni Y-Z, čije je skupljanje ometano je:

$$\epsilon = \epsilon_{sl} + \epsilon' \quad (12)$$

Ako se (12) podeli sa  $\epsilon_{sl}$  dobija se:

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_{sl}} = \frac{\epsilon_{sl}}{\epsilon_{sl}} + \frac{\epsilon'}{\epsilon_{sl}} = 1 + \frac{\epsilon'}{\epsilon_{sl}} = K \quad (13)$$

Veličina  $1 + \epsilon'/\epsilon_{sl} = K$  i predstavlja koeficijent koncentracije deformacije. Kako je  $\epsilon > 0$  to je  $K > 1$ . Izraz (13) se može napisati u obliku:

$$\epsilon = K \cdot \alpha \cdot (T_i - T) \quad (14)$$

Iz izraza (14) sledi da koeficijent K pokazuje koliko puta je stvarna deformacija  $\epsilon$  u nekom elementarnom površinskom sloju (preseku) veća od slobodne deformacije  $\epsilon_{sl}$ , tj. od deformacije koja bi se trebala ostvariti pri hladjenju u datom momentu vremena pri ravnomernom rasporedu temperatura. Koeficijent koncentracije deformacije K ima najveću vrednost na mestima gde elementarni površinski slojevi sa nižom temperaturom izazivaju maksimalno izduženje (ometaju skupljanje) površinskih slojeva sa višom temperaturom. Prema tome najveća vrednost koeficijenta K i stvarne deformacije  $\epsilon$  biće na mestima površine obradka koji imaju najvišu temperaturu. U homogenom materijalu najvišu temperaturu imaju mesta gde veličina  $x_p$  određena izrazom (10), dostiže maksimalnu vrednost, tj. na mestu dejstva lokalnog toplotnog izvora sa najvišim intenzitetom.

Pukotine u površinskom sloju materijala obradka će se pojaviti kada se ispuni uslov:

$$\epsilon_m - \epsilon = 0 \quad (15)$$

gde je  $\epsilon_m$  - veličina relativne deformacije u elementarnom površinskom sloju pri kojoj se javljaju pukotine, a  $\epsilon$  - je stvarna relativna deformacija na istežanje elementarnog površinskog sloja u trenutku pojave pukotine i od-

redjena je izrazom (14). Iz izloženog proizilazi da će se pukotine u površinskom sloju obradka javiti kada pri ometanju slobodnog linearnog skupljanja površinskog sloja, usled lokalizacije deformacije na istezanje u "toplím mestima" se ispuni uslov (15) tj. kada napon na istezanje  $\sigma$  u tom sloju dostigne njegovu čvrstoću  $\sigma_m$  ( $\sigma_m - \sigma = 0$ , što je identično sa  $\epsilon_m - \epsilon = 0$ ).

Osim dejstvom toplotnog izvora "topla mesta" u površinskom sloju obradka mogu biti izazvana ili pojačana prisustvom u materijalu faza koje služe kao barijere provodjenju toplote, tj. imaju znatno nižu toplotnu provodljivost od osnovnog materijala (npr. prisustvo šljake, karbida, austenitne strukture kao i prisustvo grešaka u obliku poroznosti i pukotina. Čelici za cementaciju, nitriranje i legirani čelici sadrže faze: karbide, nitride, intermetalide čija se toplotno-fizička svojstva, u prvom redu toplotna provodljivost  $\lambda$  i koeficijent širenja materijala  $\alpha$  mogu bitno razlikovati od osnovnog materijala. U materijalu je moguće prisustvo šljake, poroznosti, mikropukotina, zaostale strukture čija se svojstva bitno razlikuju od osnovne strukture, što sve utiče na anizotropiju toplotno-fizičkih svojstava, što opet delujući u jednom ili drugom pravcu može doprineti lokalnoj koncentraciji deformacije i pojavi pukotina.

Razlika u veličinama koeficijenta širenja osnovnog materijala  $\alpha_m$  i prisutne faze  $\alpha_f$  čak pri istoj temperaturi  $T$  može izazvati značajnu deformaciju na granici faza. Na primer, prema /2/ koeficijent širenja karbida je za oko 30% manji od koeficijenta širenja osnovnog materijala visokohromnog čelika. U tom slučaju deformacija na granici osnovni materijal faza je:

$$\epsilon_{m-f} = (\alpha_m - \alpha_f) \cdot T \quad (16)$$

Ovaj slučaj izazivanja lokalne koncentracije deformacije, na granici osnovni materijal faze, pri nekoherentnoj vezi (npr. osnovni materijal-šljaka) pri ispunjavanju uslova (15) dovodi do pojave pukotina. Medjutim, treba imati u vidu da i temperature ovih faza mogu biti različite (usled različitih koeficijenata trenja zrna tocila i različitog prelaza u toplotnu energiju - energija deformacija faza) što povećava intenzivnost deformacije određene sa (16). Na pojavu lokalne koncentracije deformacije i njen porast pri dejstvu nekih parametara može uticati i prisustvo u površinskom sloju materijala obradka struktura (austenita, perlit, martenzit i dr.), koje u osnovi nisu postojane na temperaturama, na kojima se dešavaju deformacije koje su uzrok obrazovanja pukotina.

Iz izloženog sledi da se mehanizam obrazovanja pukotina zasniva na toplotnim procesima u površinskom sloju materijala obradka. Ovi procesi



su izazvani tehnološkim parametrima brušenja (dubina, brzina pomeranja obradka, obima brzine tocila i dr.), karakteristikama tocila (veličina i tvrdoća zrna, čvrstoća veze zrna i dr.) kao i svojstva materijala koji se brusi (tvrdoća, prisustvo faza, lokalna toplotno-fizička svojstva materijala i dr.) što ukazuje na medjuzavisnost uticaja pojedinih parametara na obrazovanje pukotina. Gotovo svaki od navedenih parametara, ako se ovim doda i hladjenje, utiče na raspored temperatura kako po dubini površinskog sloja (sl.1a) tako i u ravni brušenja Y-Z.

Raspored temperatura u ravni Y-Z obradka s obzirom na parametre brušenja (dubina, brzina obradka, širina tocila, uslovi hladjenja) u osnovi je oblika pravougaonika. Orijehtacija ovog pravougaonika može biti takva da su duže strane normalne na pravac brušenja (trag brušenja) i da imaju pravac brušenja.

Za dalje analize koristiće se konstatacija da će se deformacije zagrejanih površinskih slojeva oblika pravougaonika, u procesu hladjenja, obavljati u pravcima kojima je deformacija tih slojeva najmanje ometana. Pukotine će se javiti na mestima lokalne koncentracije deformacije  $K > 1$  i imaju pravac normalan na pravac deformacije (skupljanja) površinskog sloja.

#### 4. KARAKTERISTIKE PUKOTINA

Pod karakteristikama pukotina smatra se njihov pravac u odnosu na trag brušenja, oblik, veličina i dubina. S obzirom na napred izloženo moguće je ukazati na neke karakteristične slučajeve nastajanja pukotina pri "velikim i malim" dubinama brušenja, pri "malim i velikim" brzinama pomeranja obradka i dr. Ove veličine su uzete uslovno, bez pretenzija na ukazivanje na njihove granične vrednosti. O poimanju ovih veličina videti /2,1,3 i dr./.

Pri velikim dubinama brušenja i malim brzinama obradka može se reći da, na kontaktnu površinu dejstvuje toplotni izvor velikog intenziteta. Ovim su stvoreni uslovi za stvaranje visokih temperatura u površinskom sloju kao i na većim dubinama površinskog sloja (zbog male brzine obradka). S obzirom na mogućnost obavljanja (proticanja) deformacije pri hladjenju površinskog sloja, za očekivati je da pukotine imaju pravac tragova brušenja. Pukotine će imati relativno veliku dubinu i u osnovi ne zavise od prisustva faza u površinskom sloju obradka. Posledica su isključivo tehnoloških parametara brušenja za odredjen materijal.

U drugom slučaju, pri velikim dubinama brušenja i većim brzinama obradka nego u prethodnom slučaju, pod uslovom da su se obrazovale tako-

dje visoke temperature u površinskom sloju (npr. nema hladjenja) te je površinski sloj zahvaćen visokom temperaturom tada će deformacija pri skupljanju zagrejanih površinskih slojeva proticati u pravcu tragova brušenja. Pukotine će imati pravac normalan na trag brušenja.

U trećem slučaju, pri manjim dubinama brušenja i malim brzinama pomeranja obradka, dejstvo tehnoloških parametara je takvo da se može smatrati kao veći toplotni izvor (zbog male brzine pomeranja), te je moguće obrazovanje pukotina po karakteristikama sličnim prvom slučaju.

U četvrtom slučaju, pri malim dubinama brušenja i velikim brzinama pomeranja obradka, dejstvo toplotnog izvora je takvo da su manje debljine površinskih slojeva zahvaćene visokim temperaturama. U tom slučaju značajan uticaj na pojavu pukotina i njihovu orijentaciju ima prisustvo faza u površinskom sloju brušenog uzorka, kao što su karbidi, nitridi, metalidi i dr. Pukotine su bez uočljive orijentacije, a mogu imati oblik nepravilnih polukrugova, gotovo zatvorenih krugova, oblik mreže što zavisi od prisustva i rasporeda faza u površinskom sloju obradka. Na nastajanje pukotina mogu imati uticaj toplotno-fizička svojstva osnovnog materijala i faza, kao i nekoherentnost veze nekih faza sa osnovnim materijalom. Ovaj oblik pukotina je karakterističan za cementirane čelike kada se u cementiranom sloju obrazuju karbidi ili karbidna mreža. Mehanizam i uzroci nastajanja ovih pukotina u pojedinim elementima se razlikuje od prva tri slučaja.

Kao što se vidi na orijentaciju (pravac) pukotina utiče orijentacija "pravougaone površine" u ravni brušenja zahvaćene visokim temperaturama, dubina površinskog sloja zahvaćena tim temperaturama (u tri prva slučaja) i prisustvom faza u površinskom sloju (četvrti slučaj). Orijentacija pukotina može poslužiti, u praksi kao pokazatelj uzroka njihovog nastajanja.

## 5. ZAKLJUČAK

Na osnovu napred izloženog mogu se izvesti sledeći, osnovni, zaključci:

1. Pukotine u površinskom sloju obradka posledica su neravnomernog (ometanog) skupljanja površinskih slojeva obradka, u procesu hladjenja, što se izražava različitim vrednostima lokalnog koeficijenta koncentracije deformacije (K) u pojedinim površinskim slojevima.
2. Pukotine se javljaju na mestima koja u procesu hladjenja imaju najviše temperature, tzv. "topla mesta".
3. Pravac pukotina je normalan na pravac deformacije elementa po-

vršinskog sloja u kome ista nastaje.

4. Pukotine usmerene normalno ili paralelno na pravac (trag) brušenja, posledica su u prvom redu neadekvatnih tehnoloških parametara brušenja (dubine i brzine obradka) i mogu se javiti u homogenim materijalima, kao i u materijalima u čijim su površinskim slojevima prisutne faze (karbidi, nitridi, metalidi i dr.).
5. Pukotine koje se u površinskom sloju obradka javljaju bez orijentacije nastaju u uslovima dominantnog uticaja faza u površinskom sloju, a ne usled dominantnog uticaja tehnoloških parametara brušenja (dubine brušenja i brzine kretanja obradka).

#### L I T E R A T U R A

1. A.N.Reznikov: Teplofizika processov mehaničeskoj obrabotki materijalov, Moskva, Mašinstroenie, 1981.
2. A.B. Jakimov: Optimizacija processa šlifovanija, Moskva, Mašinstroenie, 1975.
3. S.A.Popov, N.P.Malevskij, L.M.Tereščenko: Almazno-abrazivnaja obrabotka metalov i tverdyh splavov, Moskva, Mašinstroenie, 1977.
4. E.M.Trent: Tezanie metalov, Moskva, Mašinstroenie, 1980.
5. T.N.Loladze: Pročnost i iznosostojkost režuščego instrumenta, Moskva, Mašinstroenie, 1982.
6. A.V.Podzej, A.M.Sulima, M.I.Evstignej, G.Z.Serebrenikov: Tehnologičeskie ostatočnye naprjaženija, Moskva, Mašinstroenie, 1973.
7. M.Jovičić, B.Kršljak, R.Vukasojević, V.Drobnjak: Obrada brušenjem, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Jupiter zajednica, Beograd, 1986.
8. V.Palić: Zavarivanje, Novi Sad, 1987.
9. L.S.Konstatinov, A.P.Truhov: Naprjaženija i deformacijii i treščiny v otlivkah, Mašinstroenie, Moskva, 1981.
10. N.N.Rykalin: Rasčety teplovyh processov pri svarke, Mašinstroiteljnaja literatury, Moskva, 1951.

R.Kovač, S.Jojin

#### CONTRIBUTION TO THE ANALYSIS OF THE CRACK APPEARANCE DURING GRINDING

#### S u m m a r y

According to the conservation of energy, the mechanism of appearing of the cracks on the surface of specimens during grinding is presented. Because of disturbed shrinkedge in local areas of the sample surface the concentration of strain occurs. If the critical values are reached the cracks will be formed. The orientation and shape of the cracks are related with parameters of grinding and properties of used material.

B. Kršljak \*

BRUŠENJE ALATNOG ČELIKA SA POVEĆANIM SADRŽAJEM UGLJENIKA

1. U V O D

Teškoobradljivi alatni čelici karakterišu se lošom brusivosti tj., niskom vrednosti učinka tocila (odnos zapremine obrušenog materijala i zapremine trošenja tocila), lošim kvalitetom brušenja površine i visokim troškovima obrade.

Na učinak tocila, kvalitet brušene površine i troškove obrade utiče više parametara medju kojima su vrlo značajni karakteristike tocila i veličine elemenata režima brušenja.

U radu je obuhvaćeno ispitivanje procesa ravnog brušenja alatnog čelika konvencionalnim tocilom domaće proizvodnje variranjem elemenata režima brušenja.

---

\* Dr Bogoljub Kršljak, dipl.maš.inž., profesor Više metalske škole u Novom Beogradu, Bulevar AVNOJ-a 152-a.

## 2. METODOLOGIJA I USLOVI IZVODJENJA ISPITIVANJA

Ispitivanja su obavljena na brusilici za ravno brušenje sa pravougaonim stolom tip 3G71 proizvedene u SSSR /1/.

Uzorci za ispitivanje su bili od alatnog čelika č.4750 (1,65%C; 12% Cr; 0,5% W; 0,6% Mo; 0,1% V), prizmatičnog oblika dimenzija 100 x 42 x 20 mm i iz iste sipke tvrdoće 60 H<sub>RC</sub>.

Brušenje je vršeno koturastim elektrokorundnim točilom 4B54K6V, proizvodnje Industrije "8 Mart". Dimenzije točila su bile 200 x 76 x 10 mm. Točilo je pre poretka rada statički i dinamički uravnoteženo.

Ispitivanja su izvodjena variranjem elemenata režima brušenja; uzdužnog pomaka  $v_u$ , poprečnog pomaka  $s_p$  i dubine brušenja  $a$ . U prvoj seriji ispitivanja uzdužni pomak i poprečni pomak su bili konstantni ( $v_u=10$  m/min,  $s_p=0,8$  mm/h) a varirana je dubina brušenja  $a = (0,005; 0,01$  i  $0,02)$  mm. U drugoj seriji ispitivanja dubina brušenja i uzdužni pomak su bili konstantni ( $a=0,01$  mm,  $v_u=10$  m/min) a menjan je poprečni pomak  $s_p = (0,4; 0,8$  i  $1,6)$  mm/h. U trećoj seriji ispitivanja dubina brušenja i poprečni pomak su bili stalni ( $a=0,01$  mm,  $s_p=0,8$  mm/h) a menjana je brzina stola (uzdužni pomak)  $v_u=(5; 10$  i  $20)$  m/min.

Za hladjenje je korišćeno ulje "Castrol ilogrind 483" a količina rashladnog sredstva je održavana stalnom pomoću regulatora protoka.

Trošenje točila je određivano računskim putem na bazi merenja smanjenja poluprečnika točila  $\Delta R$  pomoću mernog sistema /1/.

Učink točila je izračunavan na osnovu obrušene zapremine metala sa uzorka za dodatak za brušenje  $\delta = 0,1$  mm po obrascu  $G = V_m / V_t$  /mm<sup>3</sup>/mm<sup>3</sup>/, gde je  $V_m = 100 \times 42 \times 0,1 = 420$  mm<sup>3</sup> - zapremina obrušenog metala, a  $V_t$  - zapremina trošenja točila.

Merenje srednje aritmetičke hrapavosti je vršeno pomoću analognog mernog sistema Perth-o-metra W5A.

## 3. REZULTATI ISPITIVANJA

Izmerene vrednosti zapremine trošenja točila, glavnog vremena brušenja, hrapavosti i izračunate veličine učinka točila za različite veličine elemenata režima brušenja date su u tabeli 1.

Na osnovu tabelarnih vrednosti konstruisani su dijagrami promene učinka točila od elemenata režima brušenja (odnosno proizvodnosti obrade  $Q = a s_p v_u 1000/60/\text{mm}^3/\text{s}$ ), kao združene promenljive elemenata režima brušenja) i dati na sl. 1.

Iz dijagrama (sl.1) vide se zakonitosti uticaja elemenata režima obrade na učinak tocila i može se uočiti da najveći uticaj na učinak ima poprečni pomak a najmanji dubina brušenja. Iz dijagrama se takodje uočava da sa porastom elemenata režima brušenja učinak tocila opada, jer sa povećanjem elemenata

Tabela 1

Varijacija dubine brušenja	a /mm/	Q /mm <sup>3</sup> /s/	V <sub>t</sub> <sup>3</sup> /mm <sup>3</sup> /	V <sub>m</sub> <sup>3</sup> /mm <sup>3</sup> /	G /mm <sup>3</sup> /mm <sup>3</sup> /	t <sub>g</sub> /min/	R <sub>a</sub> /μm/
s <sub>p</sub> = 0,8 v <sub>u</sub> = 10	0,005	0,667	27,025	420	15,541	14,862	0,102
	0,01	1,333	28,080		14,957	7,011	0,126
	0,02	2,667	29,175		14,396	3,305	0,158
Varijacija poprečnog pomaka	s <sub>p</sub> /mm/h/	Q /mm <sup>3</sup> /s/	V <sub>t</sub> /mm <sup>3</sup> /	V <sub>m</sub> /mm <sup>3</sup> /	G /mm <sup>3</sup> /mm <sup>3</sup> /	t <sub>g</sub> /min/	R <sub>a</sub> /μm/
a = 0,01 v <sub>u</sub> = 10	0,4	0,667	22,720	420	18,486	14,064	0,074
	0,8	1,333	28,080		14,957	7,011	0,126
	1,6	2,667	34,677		12,112	3,490	0,216
Varijacija brzine stola	v <sub>u</sub> /m/min/	Q /mm <sup>3</sup> /s/	V <sub>t</sub> /mm <sup>3</sup> /	V <sub>m</sub> /mm <sup>3</sup> /	G /mm <sup>3</sup> /mm <sup>3</sup> /	t <sub>g</sub> /min/	R <sub>a</sub> /μm/
a = 0,01 s <sub>p</sub> = 0,8	5	0,667	24,130	420	17,406	14,157	0,121
	10	1,333	28,080		14,957	7,011	0,126
	20	2,666	32,673		12,855	3,466	0,131

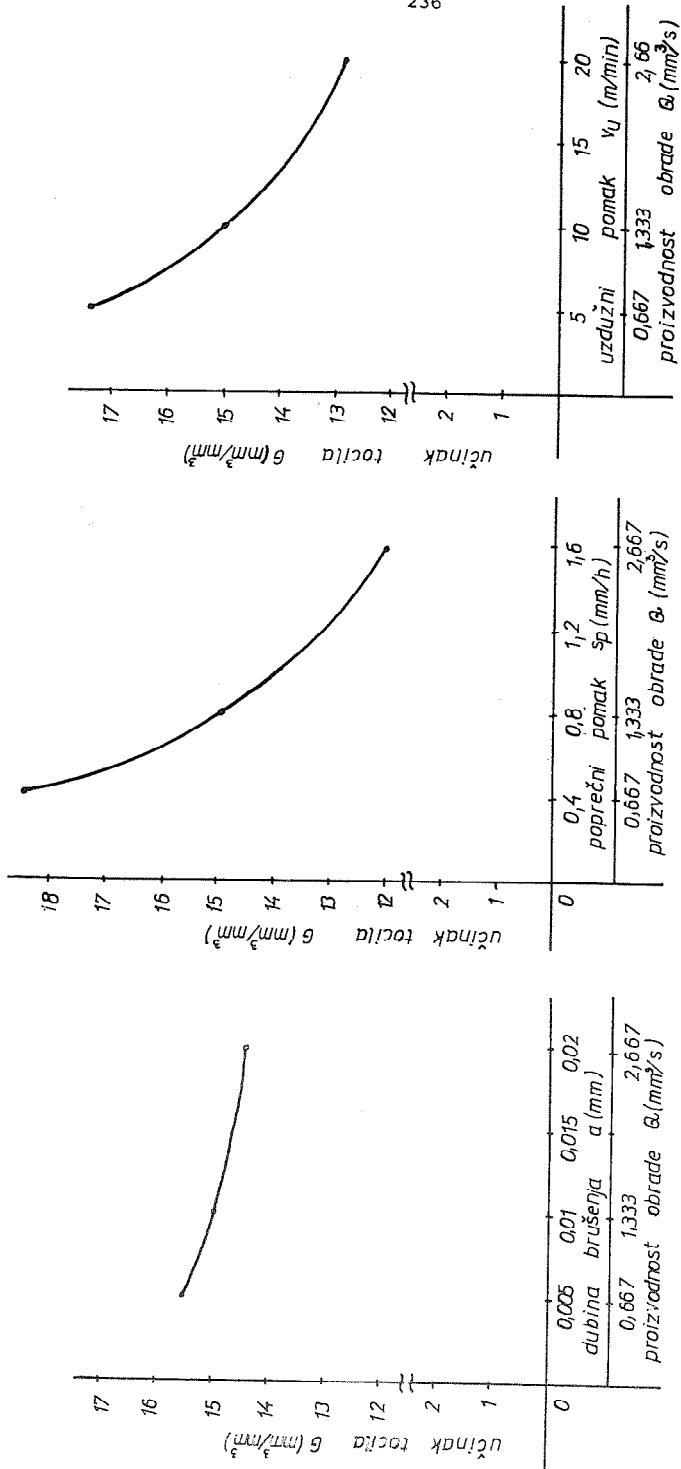
režima obrade rastu komponente otpora rezanja i njihove varijacije, usled čega se pojavljuju intezivnije vibracije u obradnom sistemu koje doprinose većem trošenju tocila i smanjenju njegovog učinka. U vezi sa ovim, stvarne vrednosti glavnog vremena brušenja po komadu se razlikuju od teorijskih koje se dobijaju na osnovu režima rada i veličine dodatka za brušenje.

Teorijske vrednosti glavnog vremena brušenja u zavisnosti od elemenata režima brušenja za odstranjenje dodatka za brušenje  $\delta = 0,1$  mm date su u tabeli 2.

tabela 2

a mm	s <sub>p</sub> mm/h	v <sub>u</sub> m/min	t <sub>g</sub> min
0,005	0,4	5	13,00
0,01	0,8	10	6,50
0,02	1,6	20	3,25

Promene srednje aritmetičke hrapavosti brušene površine od elemenata režima brušenja i proizvodnosti obrade prikazane su na sl. 2. Sa slike se vidi da sa porastom elemenata režima brušenja raste hrapavost brušene površine



S1. 1 Učinek tocila u zavisnosti od elemenata režima brušenja i proizvodnosti obrade

i da najveći uticaj na hrapavost ima poprečni pomak.

Troškovi brušenja pri radu sa elektrokorundnim točilom mogu se

odrediti po obrascu:  $T_R = T_R(r.m.) + T_R(V_t) + T_R(t_p) + T_R(V_{tp}) \cdot 1/1$ .

Troškovi radnog mesta  $T_R(r.m.) = (C_M + C_P) t_g$ , gde je:

$C_M$  - troškovi mašinskog minuta /din/min/,

$C_P$  - troškovi ličnih dohodaka radnika /din/min/,

$t_g$  - glavno vreme brušenja jednog komada /min/kom/.

Troškove trošenja točila  $T_R(V_t) = C_t V_t$  gde je:

$C$  - cena jedinice radne zapremine točila /din/mm<sup>3</sup>/,

$V_t$  - zapremina trošenja točila pri brušenju /mm<sup>3</sup>/kom/.

Tabela 3

Broj prolaza (stvarni) za $d^* = 0,1$ mm	22	11	6
a	0,005	0,01	0,02
$s_p$	0,4	0,8	1,6
$v_u$	5	10	20
Broj poravnavanja točila	6	3	2

Troškovi trošenja točila poravnavanjem  $T_R(V_{tp})$  i troškovi vremena poravnavanja točila  $T_R(t_p)$  određeni su eksperimentalnim putem na osnovu zapremine

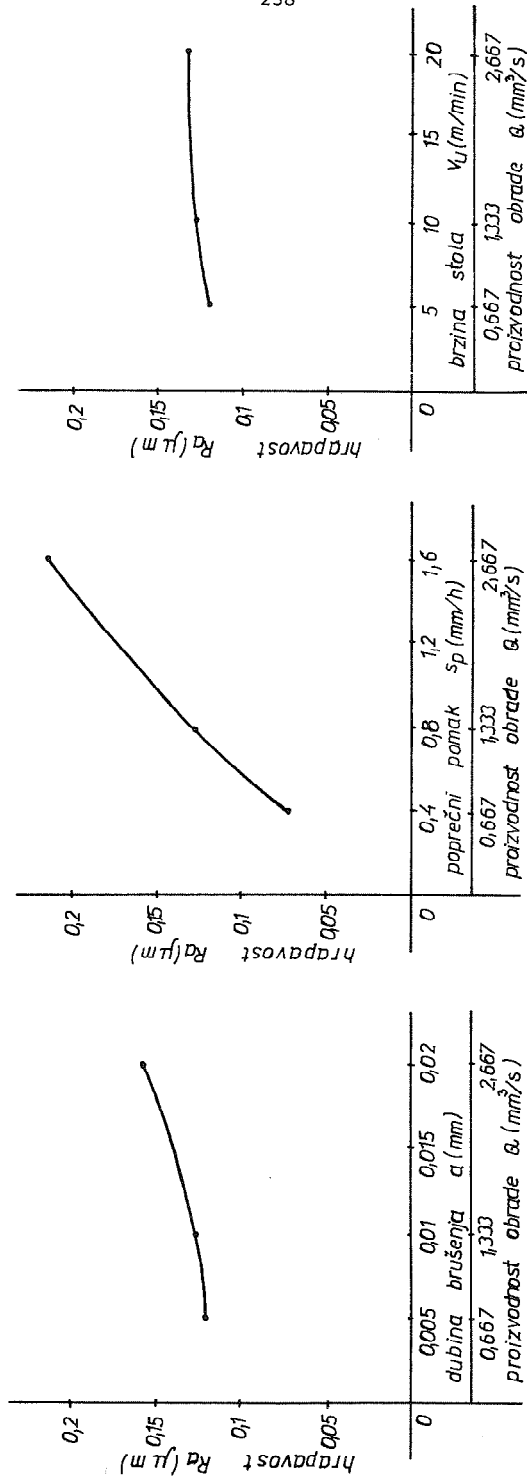
točila koja se odstrani poravnavanjem i na osnovu broja poravnavanja koji se izvedu po komadu. Vreme poravnavanja točila je mereno a zapremina trošenja točila poravnavanjem je računata na osnovu izmerene veličine smanjenja polupreč-

Tabela 4

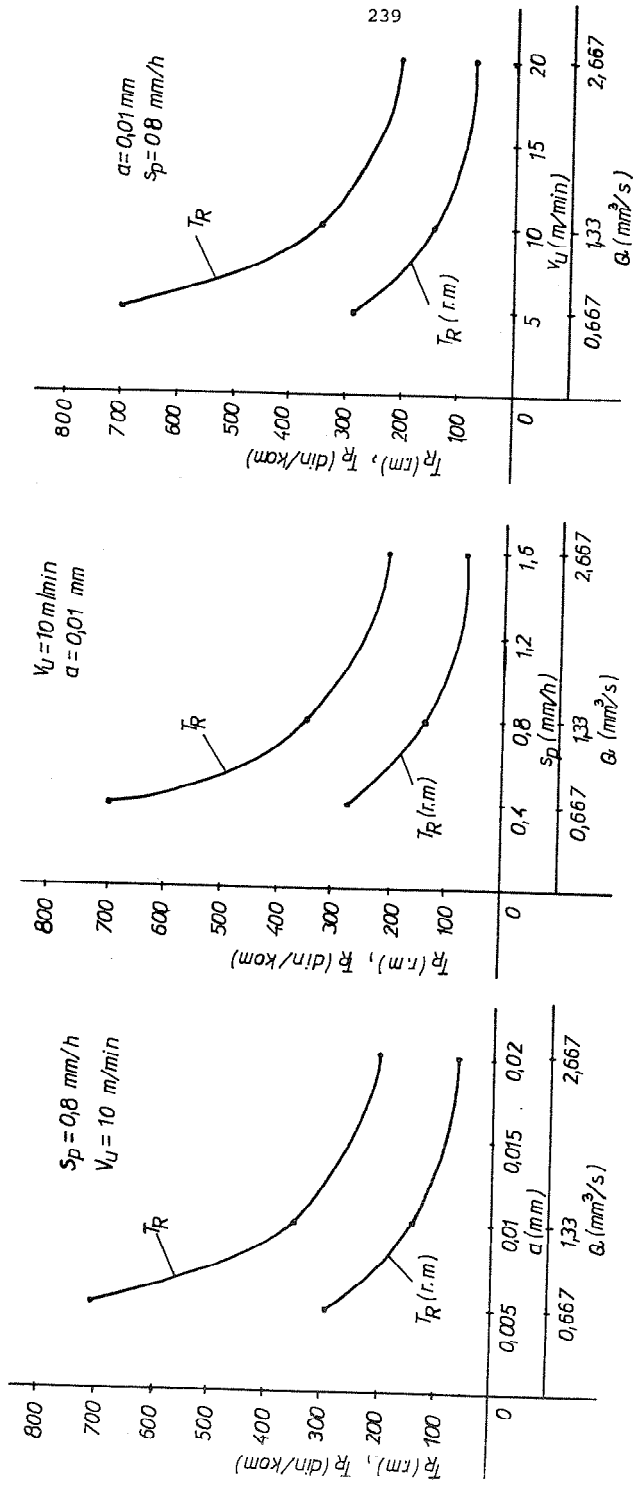
Varijacija du- bine brušenja	a /mm/	Q /mm <sup>3</sup> /s/	$T_R(r.m.)$ /din/kom/	$T_R(V_t)$ /din/kom/	$T_R(V_{tp})$ /din/kom/	$T_R(t_p)$ /din/kom/	$T_R$ /din/kom/
$s_p = 0,8$ $v_u = 10$	0,005	0,667	297,24	1,351	180,00	240,00	718,59
	0,01	1,333	140,22	1,404	90,00	120,00	351,62
	0,02	2,667	66,10	1,459	60,00	80,00	207,56
Varijacija po- prečnog pomaka	$s_p$ /mm/h/	Q /mm <sup>3</sup> /s/	$T_R(r.m.)$ /din/kom/	$T_R(V_t)$ /din/kom/	$T_R(V_{tp})$ /din/kom/	$T_R(t_p)$ /din/kom/	$T_R$ /din/kom/
a = 0,01 $v_u = 10$	0,4	0,667	281,28	1,136	180,00	240,00	702,42
	0,8	1,333	140,22	1,404	90,00	120,00	351,62
	1,6	2,667	69,80	1,734	60,00	80,00	211,53
Varijacija brzine stola	$v_u$ /m/min/	Q /mm <sup>3</sup> /3/	$T_R(r.m.)$ /din/kom/	$T_R(V_t)$ /din/kom/	$T_R(V_{tp})$ /din/kom/	$T_R(t_p)$ /din/kom/	$T_R$ /din/kom/
a = 0,01 $s_p = 0,8$	5	0,667	283,14	1,206	180,00	240,00	704,35
	10	1,333	140,22	1,404	90,00	120,00	351,62
	20	2,667	69,32	1,634	60,00	80,00	210,95

nika točila  $\Delta R$  pri poravnavanju. Veličina  $\Delta R$  je merena pomoću mernog sistema /1/. Zapremina točila koja se odstrani jednim poravnavanjem, u ovom slučaju, iznosi  $V_{tp} = 600$  mm<sup>3</sup> a vreme jednog poravnavanja  $t_p = 2$  min. Broj poravnavanja točila i stvarni broj prolaza po komadu u zavisnosti od elemenata režima brušenja dat je u tabeli 3. Prema podacima iz 1988. godine usvojeno je  $C_M = 15$  din/min,  $C_t = 0,05$  din/mm<sup>3</sup>, dobijaju se podaci koji su dati u tabeli 4/2/.





S1.2 Zavisnost srednje aritmetičke hrapavosti od elemenata režima brušenja i proizvodnosti obrade



Sl.3 Troškovi brušenja u zavisnosti od elemenata režima brušenja i proizvodnosti obrade

Na osnovu podataka iz tabele 4 konstruisani su dijagrami troškova brušenja u zavisnosti od elemenata režima brušenja i proizvodnosti obrade i prikazani na sl. 3. Iz dijagrama se vidi da sa porastom elemenata režima brušenja troškovi opadaju jer se tada smanjuje glavno vreme brušenja.

#### 4. Z A K L J U Č A K

Na osnovu dobijenih rezultata može se zaključiti da elementi režima brušenja imaju vrlo značajan uticaj na hrapavost brušene površine i troškove brušenja pri brušenju teškoobradljivih čelika, i da izboru njihovih veličina treba pokloniti posebnu pažnju.

#### R E F E R E N C E

/1/ Kršljak, B.: Optimizacija procesa ravnog brušenja alatnih čelika sa stanovišta uticaja karakteristika točila i uslova obrade. Doktorska disertacija, Mašinski fakultet, Beograd, 1981.

/2/ Kršljak, B.: Brušenje brzoreznog čelika sa konvencionalnim točilom i točilom na bazi kubnog nitrida bora. Petnaesta JUPITER konferencija, Cavtat '89.

B. Kršljak

#### TOOL STEEL GRINDING WITH INCREASED CARBON CONTENT

- Summary -

Investigation results of plane grinding process of tool steel characterized by low grinding quality, that is, low grindstone specified efficiency value, low ground surface quality and high expenses are given in the paper

The Following parameters are investigated and analyzed: grindstone efficiency, mean arithmetic roughness of ground surface and grinding expenses.

N. Bajić\*

IDENTIFIKACIJA OTPORA BRUŠENJA POMOĆU  
STATISTIČKIH REPREZENATA

1. UVOD

Svodjenjem problema brušenja u realne okvire, kada na tehnički sistem brusilice istovremeno djeluje čitav skup poremećajnih faktora sa najrazličitijim mehanizmom međusobnog uticaja, postavlja se složen zadatak identifikacije njegovih karakterističnih parametara.

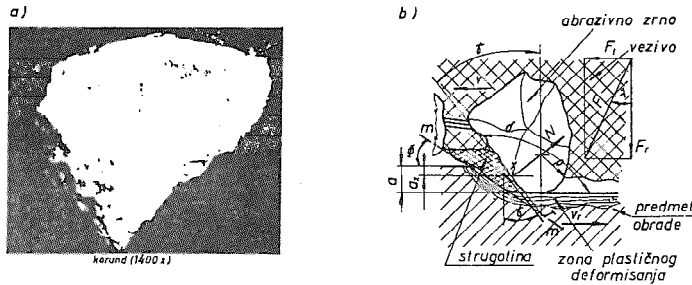
Korelaciona analiza, razvijena kao posebna disciplina u okviru teorije vjerovatnoće, čini se sposobnom da u potpunosti identifikuje dinamičke karakteristike otpora brušenja, koji ima izrazito stohastičku prirodu. U tom smislu se u radu, kroz niz statističkih reprezentata, objektivizira značaj vremenske funkcije otpora brušenja dobivene eksperimentalno. Analizira se stacionarnost i ergodičnost uslova brušenja i vrši odredjivanje korelacionih funkcija i spektra snage posmatranog otpora brušenja. Na kraju, predlaže se model sistemskog pristupa identifikaciji korištenjem funkcije frekventnog odziva, posmatrajući otpor rezanja u sistemu sa nekim drugim parametrom, npr. efektivnim profilom tocila.

2. GENERISANJE SILA MIKROREZANJA PRI BRUŠENJU

Pri mikrorezanju uočeni element zrna abraziva ima zaobljen vrh radijusa  $\rho$ , na koji djeluje spoljna sila  $F$  sa tangencijalnom  $F_t$  i radijalnom  $F_r$  komponentom, sl.1. Na prednjoj površini odrezanog sloja djeluju elementarne normalne ( $N_1, N_2, \dots, N_n$ ) i reaktivne sile trenja ( $T_1, T_2, \dots, T_n$ ). Definisanje

\* Dr Nedžo Bajić, dipl. ing., docent Mašinskog fakulteta u Mostaru

ovih elementarnih sila još danas nije moguće, stoga ih zamjenjujemo sumarnim reaktivnim silama  $N$  i  $T$ .



Sl.1 Model mikrorezanja pri brušenju: a-fotografija zrna, b-zrno pri mikrorezanju

Pri determinističkom pristupu ovoj problematici, a iz uslova ravnoteže sila imamo:

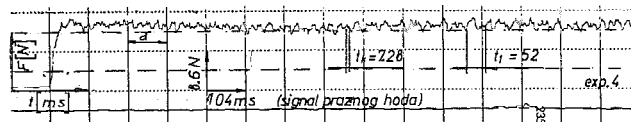
$$F_r = F \sin \lambda = N (\sin \lambda + \mu \cos \lambda); \quad F_t = F \cos \lambda = N (\cos \lambda - \mu \sin \lambda), \quad (1)$$

gdje smo silu trenja zamijenili sa  $T = \mu N$ ,  $\mu$  - koeficijent trenja korištenjem principa klasične mehanike, respektovanjem trenja na kontaktnim površinama kao i unutrašnjeg trenja deformisanog brušenog metala, autor [2] definiše izraz za silu smicanja, u ravni smicanja  $m-m$  sl.1 definisanu uglom  $\phi$ , i okomito na ravan smicanja, a potom normalnu silu  $N$ :

$$N = \frac{A \tau_{sr}}{\sin \phi [(1 - \mu \mu') \cos(\lambda + \phi) - (\mu + \mu') \sin(\lambda + \phi)]}, \quad (2)$$

gdje je  $A$  poprečni presjek reza,  $\tau_{sr}$  jačina materijala na smicanje, a  $\mu'$  - koeficijent unutrašnjeg trenja.

Slučajni karakter reznih elemenata abraziva, njihovo elastično oslanjanje u vezivnom materijalu, te različiti oblici zasićenja, akumuliranja energije i histerezisa, umanjuju praktičan značaj predloženih modela. Pomenuti oblici nelinearnosti, determinističkim pristupom, teško se mogu obuhvatiti matematskim modelom. Zato pri statističkom konceptu identifikacije otpora brušenja, važno mjesto zauzima njegova vremenska funkcija, eksperimentalno dobivena, prikazana na sl.2.

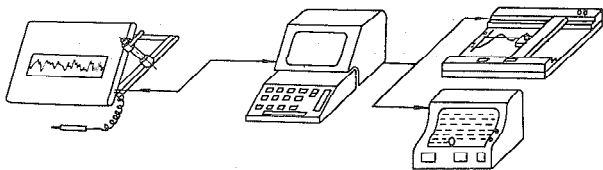


Sl.2 Vremenska funkcija otpora brušenja

### 3. STATISTIČKI KONCEPT IDENTIFIKACIJE

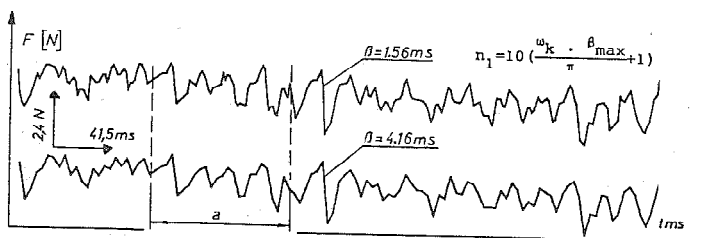
Koncept statističke identifikacije podrazumijeva proračun skupa statističkih reprezentata: matematičkog očekivanja i disperzije rezultata, korelacionih i kroskorelacionih funkcija, te odgovarajućih spektara snage. Definicije navedenih pojmova su opšte poznate, pa je njihovo navodjenje izostalo, a čitaoca se upućuje na literaturu [1] i [6].

Statistička analiza podrazumijeva rad sa aktuelnim numeričkim vrijednostima, pa je nužno funkciju otpora digitalizovati, pri čemu se nelinearni efekti automatski linearizuju. Na osnovu ocijenjenih vrijednosti kružne frekvencije najnižeg i najvišeg harmonika u signalu na sl.2, a saglasno sa [3], moguće je postaviti granice za korak digitalizacije - parametar  $\beta$ , u konkretnom slučaju  $0,4 < \beta < 3,39$  ms. U nedostatku savremenih A/D konvertora i korelatora, postupak digitalizacije i proračuna ostvaruje se primjenom računara sl.3. Rezultati digitalizacije



Sl.3 Kompozicija hardware za numeričku obradu vremenskih funkcija

funkcije prema sl.2, prikazani su na sl.4. Upoređivanjem toka

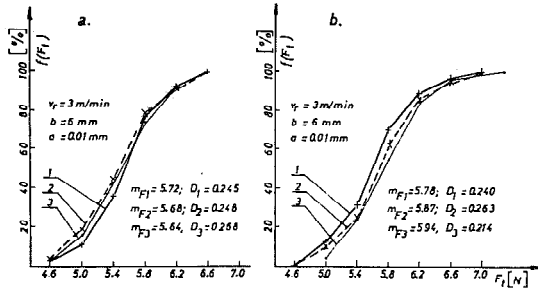


Sl.4 Digitalizirana funkcija otpora brušenja

originala i digitaliziranih funkcija (karakteristični interval  $a$ ), uočava se da digitalizirana funkcija sa  $\beta = 1,56$  vjernije prati originalnu funkciju, dok za  $\beta = 4,14$  postoji veća greška.

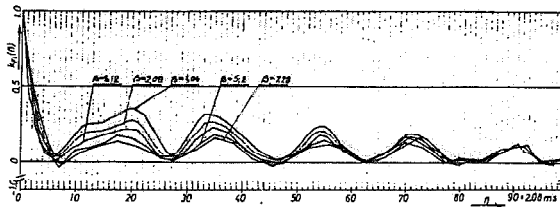
Stacionarnost i ergodičnost vremenskih funkcija, utvrđuje se kroz analizu njihovih dugoročnih osobina. Konstantnost

matematičkog očekivanja  $m_x(t)$  i disperzije  $D_x(t)$  formiranih po vremenu i ansamblu pouzdan su znak stacionarnosti i ergodičnosti posmatrane pojave. Dio rezultata prikazanih na sl.5, pri brušenju čelika Č.1730 točilom 4B60K6V, ilustruje analizu o stacionarnosti i ergodičnosti otpora brušenja.



Sl.5 Kumulativne funkcije raspodjele otpora po: a- vremenu i b-ansamblu

Potvrđan odgovor o stacionarnosti i ergodičnosti obezbjeđuje pretpostavku za uspješno definisanje korelacionih i kros korelacionih funkcija i spektra snage. Korelacione funkcije sadrže informacije o nasljednim osobinama vremenskih funkcija, pa su veoma pogodne za identifikaciju, naročito frekventnog sadržaja, stohastičkih procesa. Korelaciona funkcija tangencijalnog otpora brušenja, koji ima digitalizovanu funkciju predstavljenu na sl.4, prikazana je na sl.6. Na sl.6 uočljiv je uticaj



Sl.6 Normalizovana korelaciona funkcija exp.br4

$\beta$  - koraka digitalizacije na oblik korelacione funkcije. Za različite pomake iz intervala  $\beta$  informacija o frekventnom sadržaju signala ostaje sačuvana, dok je nivo korelacije veći (manje je učešće slučajne komponente) pri nižim vrijednostima. Ova i ranija saznanja nameću obavezu izbora optimalnog  $\beta$ , jer niže vrijednosti produžavaju vrijeme obrade signala.

#### 4. UTICAJ AMBIJENTA BRUŠENJA NA OBLIK KORELACIONIH FUNKCIJA

Identifikacija otpora brušenja pomoću korelacionih funkcija vodjena je s ciljem analize uticaja: režima rezanja, vrste

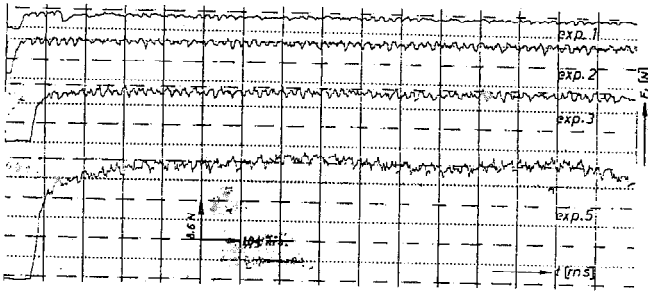
materijala predmeta obrade i karakteristika tocila. Režim rezanja sa kojim su vršena istraživanja ravnog brušenja, predstavljani su u tabeli br.1, koja sadrži i neke rezultate. Brušenja

Tabela br.1

Exp. br.	Režim rezanja				$m_{Ft}$ [N]	$D_{Ft}$ [N <sup>2</sup> ]	korela. funkc. sl. br.	Parametri funkcija	
	$v_r$ [m/min]	$b$ [mm]	$a$ [mm]	$V_M$ [mm <sup>3</sup> /min]				$\beta_{0,5}$ [ms]	Frekven. [Hz]
1	5	2	0,01	100	3,29	0,06	8	3,24	45
2	5	4	0,01	200	7,38	0,13	8	4,66	43
3	5	6	0,01	300	11,75	0,19	8	7,87	42
4	5	8	0,01	400	12,82	0,54	6	3,52	26
5	5	10	0,01	500	26,65	1,12	8	14,67	26

su izvedena na čeliku Č.1730 sa  $v=35$  m/s, oštirim točilom 4B60K-6V regenerisano režimom  $s_d=0,1$  mm/o i  $a_d=0,1$  mm, bez upotrebe sredstva za hladjenje i podmazivanje.

Grafička interpretacija serije vremenskih funkcija  $F_t$  otpora brušenja prema tabeli br.1, prikazana je na sl.7, a njihove odgovarajuće korelacione funkcije na sl.8.

Sl.7 Serija funkcija  $F_t$  otpora brušenja

Uticaj vrste materijala predmeta obrade i karakteristika tocila na tangencijalni otpor rezanja pri ravnog brušenju prikazan je na sl.9. Brušenje je ostvareno u nepromijenjenim uslovima režimom:  $v=35$  m/s,  $v_r=8$  m/min,  $b=12$  mm i  $a=0,015$  mm.

##### 5. IDENTIFIKACIJA POMOĆU FUNKCIJE FREKVENTNOG ODZIVA

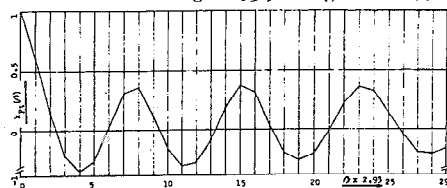
U analizi stohastičkih funkcija, za opisivanje ponašanja sistema, koristi se relacija [4]:

$$|G(j\omega)|^2 = S_Y(\omega)/S_X(\omega), \quad (3)$$

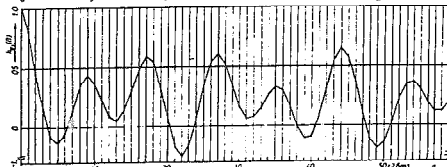
koja povezuje ulazno  $S_X(\omega)$  - izlazne  $S_Y(\omega)$  spektre snage.



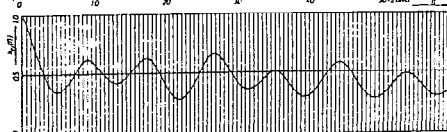
Istina relacija (3) daje kvadrat modula funkcije frekventnog



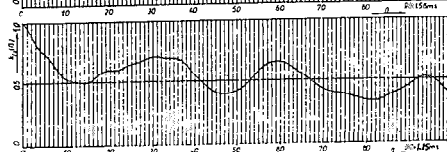
exp. br.1



exp. br.2

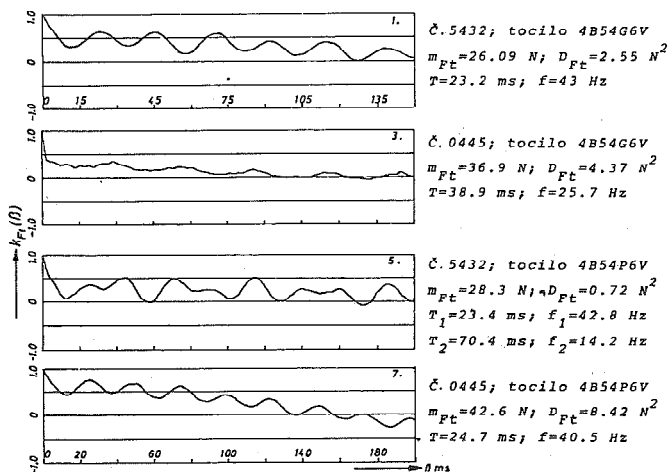


exp. br.3



exp. br.5

Sl.8 Serija normalizovanih korelacionih funkcija  $F_t$  otpora brušenja prema tabeli br.1

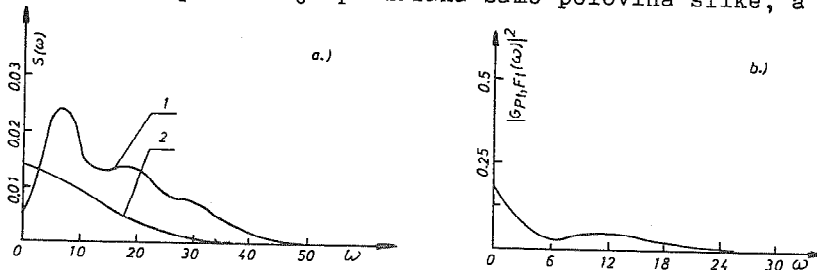


Sl.9 Serija normalizovanih korelacionih funkcija  $F_t$  otpora brušenja

odziva, no, lakoće radi koristi se termin "funkcija frekventnog odziva".

Na sl.10, za posmatrani sistem: efektivni profil tocila (definisan prema [5]), kao ulaz, - tangencijalni otpor brušenja, kao izlaz, sa odgovarajućim spektrima snage respektivno  $S_{Pt}(\omega)$  i  $S_{Ft}(\omega)$ , prikazana je funkcija frekventnog odziva. Pošto je

$S(\omega)=S(-\omega)$ , kod spektara je prikazana samo polovina slike, a

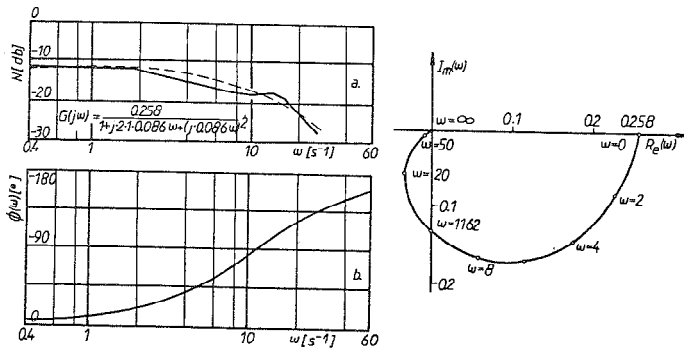


Sl.10 a) Spektari snage: 1-efektivnog profila tocila i 2-tangencijalnog otpora; b) funkcija frekventnog odziva: profil - otpor

rezultati su dobiveni pri brušenju čelika Č.5432 tocilom 4B54-P6V, regenerisano režimom  $a_d=0,1$  mm i  $s_d=0,1$  mm/o, i režimom rezanja:  $v_r=8$  m/min,  $b=12$  mm i  $a=0,015$  mm.

Dosadašnja analiza dinamike procesa brušenja pomoću statističkih reprezenata i funkcije frekventnog odziva ne daje nikakvu informaciju o faznom pomjeranju i faktoru prigušenja u dinamičkom sistemu. Ipak, korištenjem funkcije frekventnog odziva, izražene u formi Bode dijagrama, moguće je doći do ovih veličina. Pri poznatom Bode dijagramu dinamičkog sistema, a korištenjem asimptotskih aproksimacija, moguće je doći do prenosne funkcije sistema u kompleksnom obliku. Oдавde se uz primjenu poznatih principa korištenih u teoriji sistema, može lako doći do zavisnosti faza - frekvencija i do ocjene stabilnosti sistema. Znači omogućava se potpuna identifikacija.

Na sl.11 prikazani su Bode dijagrami za funkciju frekventnog odziva: efektivni profil tocila - tangencijalni otpor u uslovima predstavljenim na sl.10.



Sl.11 a i b- Bode dijagrami; c-Nyquist-ov dijagram

Prema pojednostavljenom Nyquist-ovom kriterijumu i poznatom njegovom dijagramu, možemo odmah suditi o stabilnosti sistema. Tako npr. uslovi rezanja čiji su rezultati predstavljani na sl.11 definišu stabilan sistem: efektivni profil točila - tangencijalni otpor brušenja, jer Nyquist-ov dijagram ne sadrži tačku  $(-1, j0)$ .

## 6. ZAKLJUČAK

Na osnovu do sada rečenog i rezultata provedenih eksperimenata, mogu se izvesti slijedeći zaključci:

Stohastička priroda tangencijalnog otpora brušenja uslovljava njegovu statističku identifikaciju.

Niže vrijednosti koraka digitalizacije, iz intervala mogućih veličina  $\beta$ , umanjuju grešku statističkog koncepta identifikacije, ali nužno uvećavaju vrijeme potrebno za analizu.

Korelaciona funkcija svojim karakteristikama: frekventnim sadržajem, nivoom slučajne komponente i karakterističnim vremenima  $\beta_{0,5}$  i  $\beta_{0,1}$ , otkrivaju sve promjene otpora brušenja (sl.8 i 9; tab. br.1), izazvane promjenama režima rezanja, vrstom materijala predmeta obrade i karakteristika točila.

Statistički koncept, pomoću funkcije frekventnog odziva i odgovarajućih Bode dijagrama, podržava opšti sistemski pristup identifikaciji. Omogućava potpunu informaciju o sistemu; konkretan sistem: efektivni profil točila - tangencijalni otpor brušenja, sl.10 i sl.11.

## 7. LITERATURA

- [1] Bendat J.S., Piersol G.A., Measurement and Analysis of Random Data, J. Wiley, N. York, 1966.
- [2] Maslov E.N., Teorija šlifovanja materijalov, Mašinstroenije, Moskva, 1974.
- [3] Peklenik J., Automatisierung der Messwertverarbeitung in der fertigungstechnischen Forschung und Entwicklung, Wt-Z Ind. Fertig. 61., 1971.
- [4] Peklenik J., Untersuchung zur Korrelationstheorie des Schleifvorganges, Strojniški vestnik Nr. 415, Ljubljana, 65.

- [5] Peklenik J., Statistikal mehanizm of chip formation in grinding proces, Univerzity of Ljubljana, 1970.
- [6] Pugačov V.S., Teorija slučajnih funkcija i ee primenenie k zadaščam avtomatičeskogo upravljenja, Gosvd, Izd. fizikoma-tematičeskogo upravljenja, Moskva, 1962.

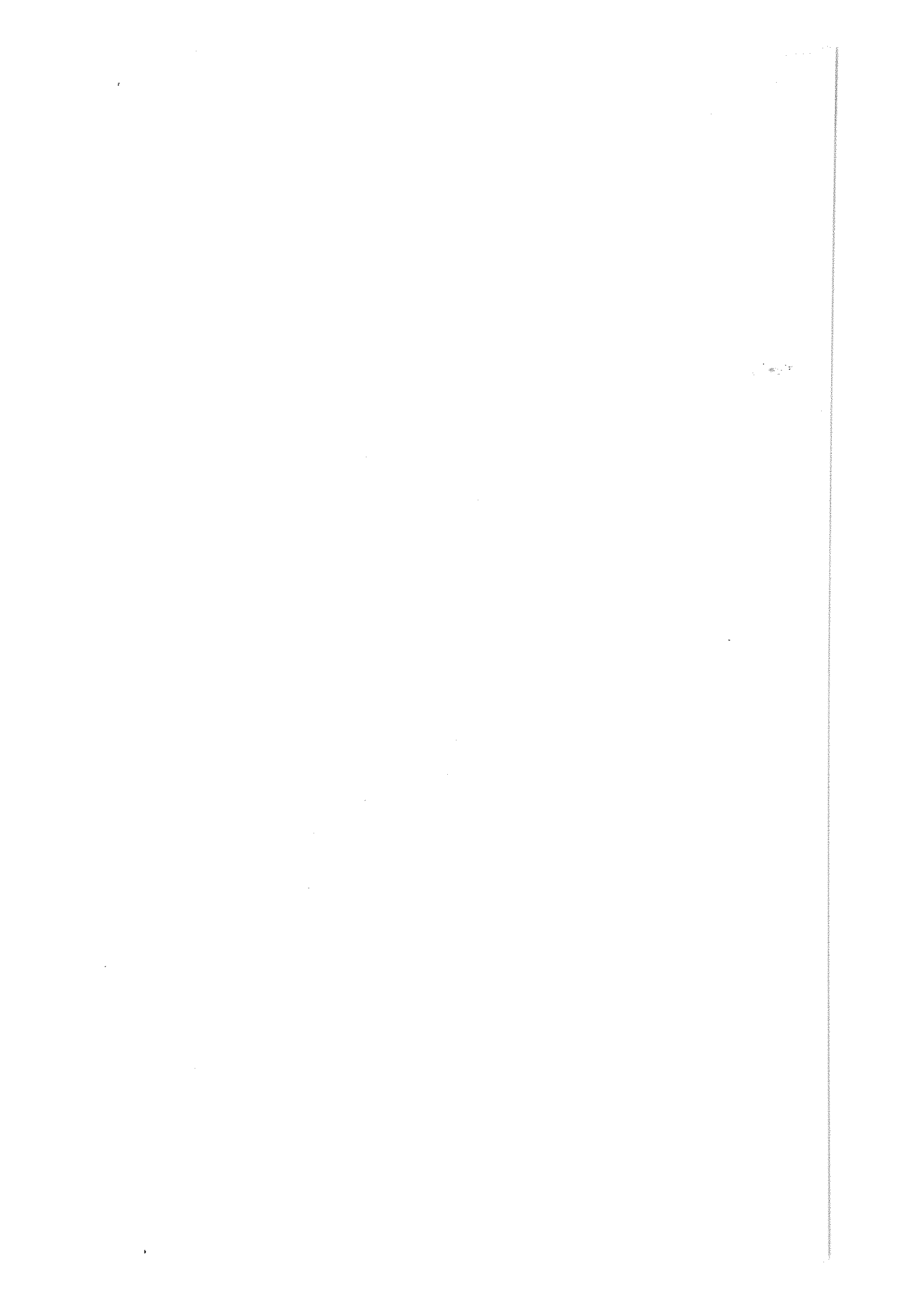
N. Bajić

IDENTIFICATION DES EFFORT D'AIGUISAGE À L'AIDE  
DES REPRÉSENTATIONS STATISTIQUES

R é s u m é

Par l'application, pendant le travail, des représentations statistiques de l'attente mathématique, de la dispersion et des fonctions corrélatives, on a identifié la nature stochastique de l'effort d'aiguisage. Les paramètres d'identification sont les éléments du régime de l'aiguisage.

Ensuite, par l'application des spectres de la force pour le profilé effectif du queue et l'effort d'aiguisage, on a défini la fonction de l'écho fréquent du système: profilé du queue - effort d'aiguisage. Inivant cette fonction, exprimée sous forme du diagramme Bode, on est arrivé jusqu'à la fonction de transfert, cest à dire jusqu'à la caractéristique complète du système considéré.



V.Šolaja, S.Ekinović, S.Brdarević\*

ISTRAŽIVANJE UTICAJA REŽIMA MEDJUFAZNE  
TERMIČKE OBRADJE SLOBODNO KOVANOG OTKOVKA  
OD ČELIKA Č.5432 NA REZNE SPOSOBNOSTI ALATA

1. UVOD

Najpovoljnija struktura čelika za mašinsku obradu rezanjem je zrnasto-perlitna. Stoga se u cilju bolje obradljivosti, nakon provedenog slobodnog kovanja pripremak-otkovak podvrgava medjufaznoj tehničkoj obradi. U slučaju čelika Č.5432 ona se sastoji od normalizacije i mekog žarenja. Svrha normalizacije je usitnjavanje i homogenizacija strukture, a mekog žarenja prevodjenje lamelastog u zrnasti perlit, tj. "omekšavanje" čelika.

Ispitivanja sa ciljem definisanja uticaja režima medjufazne termičke obrade (mekog žarenja) na postojanost alata provedena su prema sljedećem redu.

2. METALOGRAFSKO ISPITIVANJE MIKROSTRUKTURE I ISPITIVANJE MEHANIČKIH OSOBINA NAKON SLOBODNOG KOVANJA

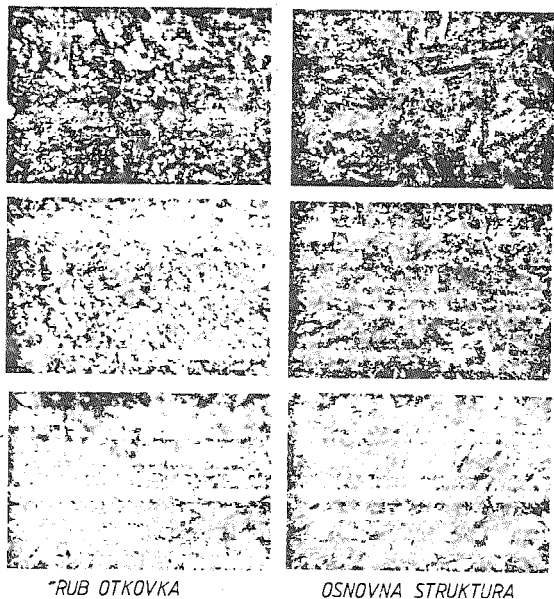
Na slici 1 prikazani su rezultati metalografskog ispitivanja mikrostrukture koji pokazuju da je struktura dosta neujednačena. U strukturi preovladava, u manjoj ili većoj mjeri, lamelasti perlit kako na rubu otkovka tako i u osnovnoj strukturi.

Snimak makrostrukture poprečnog presjeka otkovka, slika 2, pokazuje da su i makrouključci takodje neravnomjerno raspoređeni.

Ispitivanje mehaničkih osobina i tvrdoće, čiji su rezultati prikazani u tabeli 1, pokazuju rasipanje rezultata od probe do

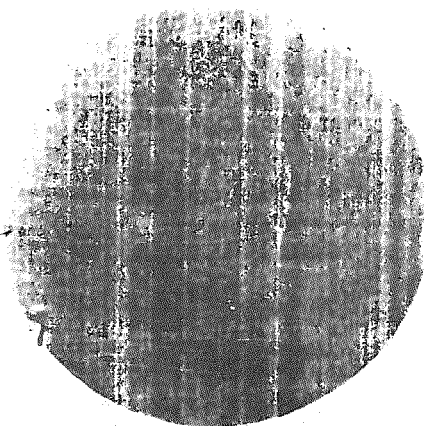
-----  
\*/ dr Vladimir Šolaja, redovni profesor Mašinskog fakulteta u Beogradu, ul. 27 marta 80.,  
Sabahudin Ekinović, asistent Mašinskog fakulteta u Zenici,

dr Safet Brdarević, vanredni profesor Mašinskog fakulteta u Zenici, ul. 12 aprila 1.



Slika 1. Rezultati metalografskog ispitivanja mikrostrukture nakon slobodnog kovanja

probe, što navodi na zaključak da je čelik sa ovakvom strukturom; sa krupnim zrnom, lamelastim perlitom, neravnomjerno raspoređenim makrouključcima i promjenljivim mehaničkim osobinama, teško obradiv.



Slika 2. Snimak makrostrukture

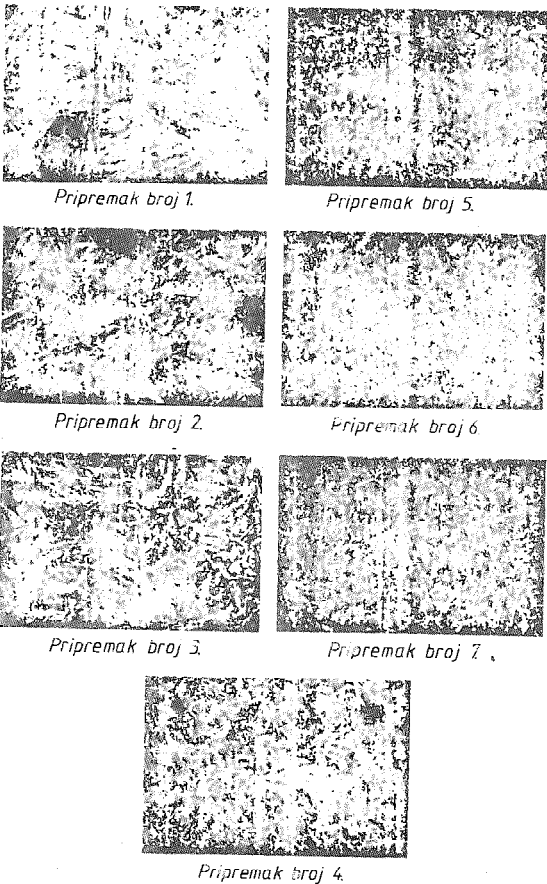
Tabela 1. Rezultati ispitivanja mehaničkih osobina nakon slobodnog kovanja

PROBA	TVRDOĆA		G <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	G <sub>v</sub> N/mm <sup>2</sup>	G <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	Izluženje %	Kopfrak- Cija %	Zilavost ϕ <sub>15</sub> (+20°)
	HB	G <sub>v</sub>						
1	245	-	1105	-	1105	6,54	11,51	4
2	363	1044	1140	1044	1140	7,33	13,33	15
3	359	1021	1173	1021	1173	7,33	11,33	15
Srednja vrijednost	320	1033	1173	1033	1173	7,35	11,37	14

## 3. DVOSTRUKA NORMALIZACIJA

Nakon provodjenja dvostruke normalizacije na  $890^{\circ}\text{C}$  sa zadržavanjem od 3,5 sati i  $870^{\circ}\text{C}$  sa zadržavanjem od 2,5 sati izvršeno je metalografsko ispitivanje mikrostrukture i ispitivanje mehaničkih osobina, čiji su rezultati prikazani na slici 3 i tabeli 2. Kod priprema-otkovaka 1, 2, 3 (slika 3) struktura je još uvijek gruba sa, u većoj količini formiranim beinitom, dok je kod priprema 4, 5, 6 i 7 prisutna fina feritno-beinitna struktura. Međutim, efekat normalizacije je postignut, jer upoređivanjem strukture prije i poslije normalizacije vidi se da je došlo do smanjenja veličine zrna. Kod priprema 1, 2 i 3 u manjoj

mjeri je formiran martenzit (u obliku iglica) što će vjerovatno uticati na povećanje tvrdoće. Rezultati ispitivanja mehaničkih osobina (tabela 2) pokazuju da je došlo do neznatnog povećanja tvrdoće (zbog izdvojenog martenzita), ali i da je prisutna ujednačenost od priprema do priprema. Granice razvlačenja i čvrstoće prije i poslije dvostruke normalizacije su približne, dok je došlo do povećanja izduženja, kontrakcije i žilavosti.



Slika 3. Rezultati ispitivanja mikrostrukture nakon dvostruke normalizacije



Tabela 2. Rezultati ispitivanja mehaničkih osobina nakon dvostruke normalizacije

PRIPREMAK (OTKOVAK)	TVRDOĆA HB	$\sigma_v$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>	Izduženje %	Kontrak- cija %	Žilavost $\psi_{0,5}(+20^\circ)$
1	314	939	1095	11,7	38,3	12
2	323	948	1124	12,6	43,8	25
3	315	955	1104	11,7	40,5	16
4	335	948	1134	14,7	46,9	25
5	325	955	1163	14,3	52,0	33
6	332	981	1153	14,3	49,0	30
7	325	1020	1169	13,5	49,0	31
Srednja vrijednost	326	964	1135	13,1	45,4	25

## 4. MEKO ŽARENJE

Pripreмки su nakon dvostruke normalizacije podvrgnuti mekom žarenju, ali sa različitim režimima. Na osnovu pretpostavke da bi režim termičke obrade mekog žarenja mogao uticati na postojanost alata, matematički model funkcije postojanosti  $T = T(\nu, h)$  je pretpostavljen u obliku

$$T = C_{T0} \nu^a h^b \exp(c \ln \nu \ln h) \quad (1)$$

gdje je

$\nu, ^\circ\text{C}$ , temperatura mekog žarenja,  
 $h$ , sati, vrijeme zadržavanja na temperaturi mekog žarenja,  
 $C_{T0}, a, b, c$ , konstante koje zavise od režima mekog žarenja, pripreмка, alata, režima rezanja i sl., a koje se eksperimentalno trebaju odrediti.

## 4.1. Planiranje eksperimenta

Odabran je dvofaktorni potpuni ortogonalni plan sa ukupno  $N = 2^k + n_0 = 2^2 + 3 = 7$  eksperimenata. Usvojeni su nivoi faktora

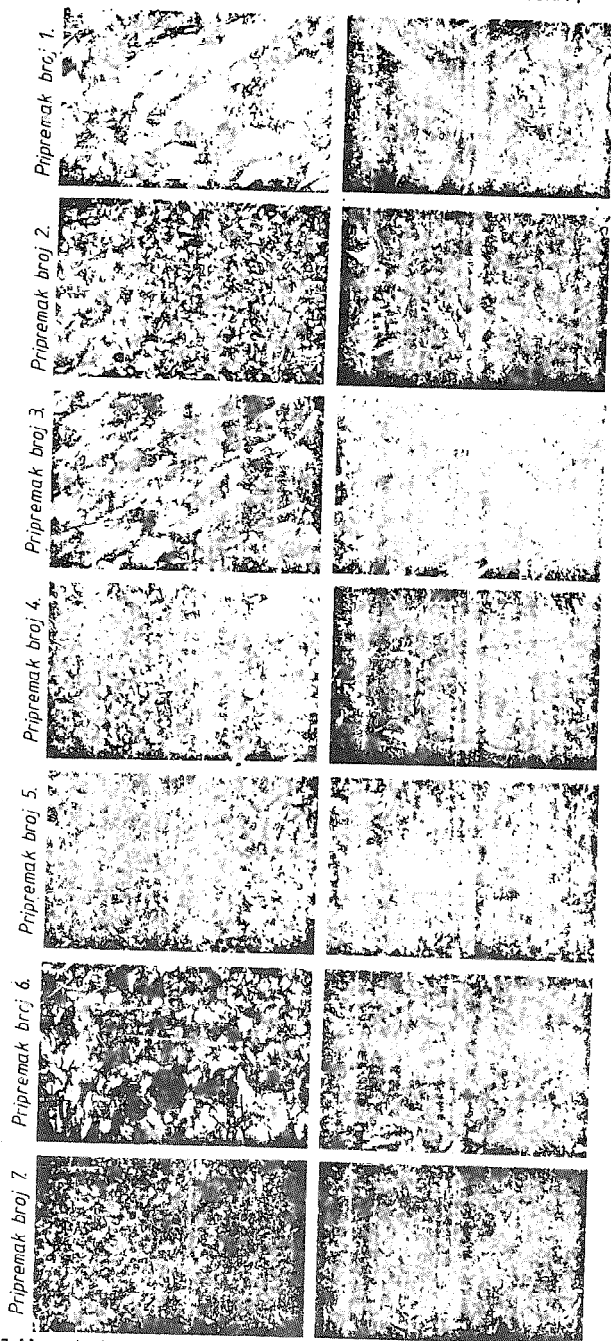
$x_1$  (temperatura  $\nu, ^\circ\text{C}$ ): 690; 705; 720 i

$x_2$  (vrijeme  $h$ , sati): 8; 10,5; 14.

Saglasno plan-matrici iz tabele 4 provedeno je meko žarenje nakon čega je izvršeno metalografsko ispitivanje mikrostrukture (slika 4) i ispitivanje mehaničkih osobina (tabela 3). Metalografsko ispitivanje pokazuje da je struktura promjenljiva od pripreмка do pripreмка, tako da je kod pripreмка broj 1 i 3 perlitno-feritna sa nešto beinita, dok pripreмки 2 i 4 imaju sitniju strukturu, ali sa nedovršenim procesom koagulacije perlita. Pripreмки 5, 6 i 7 imaju nešto povoljnije strukture, ali s obzi-

RUB PRIPREMKA

OSNOVNA STRUKTURA



Slika 4. Rezultati metalografskog ispitivanja mikrostrukture nakon mekog žarenja

rom na temperaturu  $t = 705^{\circ}\text{C}$ , ni kod njih proces mekog žarenja nije proveden do kraja.

Uočava se rasipanje rezultata ispitivanja svih pokazatelja mehaničkih osobina od priprema do priprema što je i razumljivo s obzirom na različite režime mekog žarenja kojim su isti bili podvrgnuti. Međutim, upoređujući srednje vrijednosti dobivenih rezultata sa srednjim vrijednostima mehaničkih osobina prije mekog žarenja (tabela 2), vidi se da je došlo do smanjenja tvrdoće, granice razvlačenja i čvrstoće, dok su izduženje, kontrakcija i žilavost nešto povećani. Jasno je da će dobivene niže mehaničke osobine poslije mekog žarenja obezbjediti bolju obradljivost čelika. S obzirom da postoji rasipanje rezultata ispitivanja mehaničkih osobina od priprema do priprema, za očekivati je i

Tabela 3. Rezultati ispitivanja mehaničkih osobina nakon mekog žarenja

PRIPREMAK (OTKOVAK)	TVRDOĆA HB	$\sigma_y$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_m$ N/mm <sup>2</sup>	Izduženje %	Kontrakcija %	Žilavost $\rho_{45}(+20^\circ)$
1	253	669	841	16,4	44,8	28
2	264	630	799	19,9	57,8	45
3	257	624	802	20,0	60,5	51
4	243	627	786	17,9	59,6	43
5	258	630	802	19,3	57,8	49
6	265	633	854	16,4	46,9	43
7	237	676	821	18,9	54,0	39
Srednja vrijednost	254	640	816	18,4	54,5	43

različite postojanosti alata kojim će se isti obradivati.

#### 4.2. Uslovi ispitivanja i izvodjenje eksperimenta

Ispitivanje je izvršeno u Laboratoriji za obradu rezanjem i alatne mašine (LORAM) Mašinskog fakulteta u Zenici na strugu PA501M/1500 Potisje Ada. Alat kojim je vršena obrada je domaće proizvodnje sa drškom od konstrukcionog čelika (32x32) i lemljenom pločicom od TM kvaliteta P30 (JUS K.Cl.051). Pripreмки su slobodno kovani otkovci od čelika Č.5432 (Ø 100 x 500). Sredstvo za hladjenje i podmazivanje se nije upotrebljavalo.

Nakon određenih vremenskih intervala prekidan je proces obrade i mjerena je veličina habanja ledjne površine alata stereobiokularnim mikroskopom MBS-9, sovjetske proizvodnje. U tabeli 4 data je plan-matrica sa kodovima faktora, eksperimentalnim rezultatima postojanosti alata kao i rezultatima regresione i disperzione analize.

#### 4.3. Obrada eksperimentalnih rezultata

Koeficijenti regresije, dati u tabeli 4, daju modelski oblik

$$\hat{y} = 3,2513 - 0,3668 x_1 - 0,46232 x_2 - 0,41228 x_1 x_2 \quad (2)$$

tako da je, preko jednačine transformacije, traženi model funkcije postojanosti alata

$$T = \frac{v^{146,11} h^{452,43}}{\exp(951,101) \cdot \exp(69,24 \ln v \ln h)} \quad (3)$$

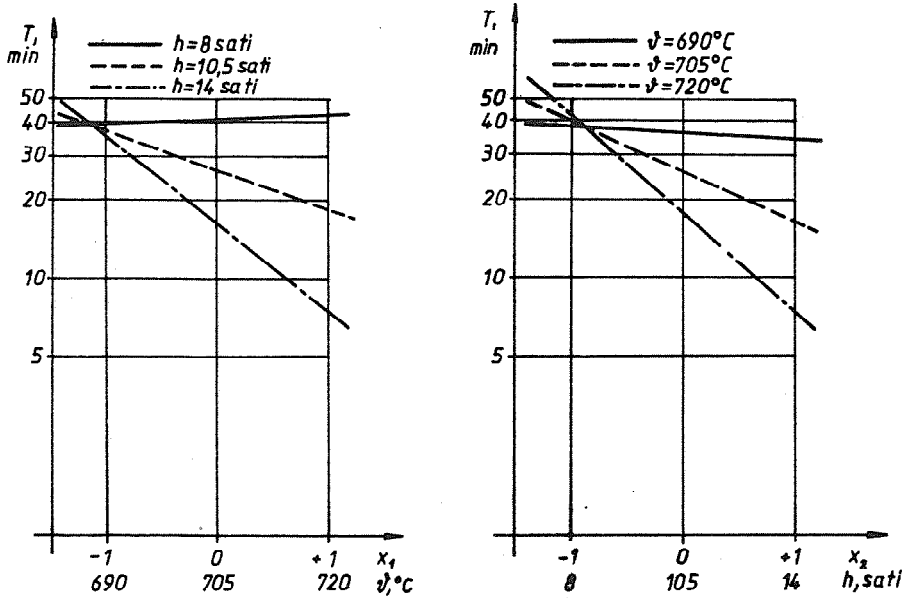
Disperziona analiza pokazuje da parametar  $b_1$  nije signifikantan, što znači da faktor  $x_1$  (temperatura  $v$ ) ne utiče na postojanost alata. Nesignifikantnost temperature se može objasniti malim intervalom varijacije (690-720°C). Međutim, sa širim intervalom varijacije se nije smjelo vršiti meko žarenje jer bi se

u tom slučaju moglo desiti visoko napuštanje (da je temperatura bila niža od  $650^{\circ}\text{C}$ ) ili povećana prokaljivost (da je temperatura bila veća od  $720^{\circ}\text{C}$ ). S obzirom da je računski vrijednost disperzionog odnosa ( $F_{r1}=18,5$ ) bliska tabličnoj ( $F_t=19,51$ ) i s obzirom da je dvojni uticaj temperature i vremena zagrijavanja ( $b_{12}$ ) signifikantan, to se iz modela (3) temperatura neće isključivati. Provjera adekvatnosti pokazuje da se dobijenim modelom ispitivani proces adekvatno opisuje.

Tabela 4. Plan-matrica eksperimenta sa rezultatima

Redni broj eksperimenta		PLAN MATRICA				Eksperimentalni rezultati		Modelski rezultati	$(y-\hat{y})^2$	$(y_0-\hat{y}_0)^2$
		Kodovi faktora				$T$ min	$y=\ln T$	$\hat{y}$		
$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_1x_2$							
1	+1	-1	-1	+1	42	3,73767	3,66815	0,00483		
2	+1	+1	-1	-1	46	3,82864	3,75911	0,00483		
3	+1	-1	+1	-1	38	3,63753	3,56807	0,00483		
4	+1	+1	+1	+1	8	2,07944	2,00991	0,00483		
5	+1	0	0	0	23	3,13549	3,25131	0,01341	0,01341	
6	+1	0	0	0	21	3,04452	3,25131	0,04276	0,04276	
7	+1	0	0	0	27	3,23584	3,25131	0,00198	0,00198	
EFEKTI PLANA $2^k + 0 = 7$		$b_0 = 3,25131$	$b_1 = -0,36680$	$b_2 = -0,46232$	$b_3 = -0,41228$	$\sum$ 0,07747 0,05815				
						$\hat{y} = 3,25131 - 0,3668x_1 - 0,46232x_2 - 0,41228x_1x_2$				
PROVJERA SIGNIFIKANTNOSTI PARAMETARA						PROVJERA ADEKVATNOSTI MOD.				
$s_0^2 = 73,997$		$s_1^2 = 0,538$		$s_2^2 = 0,855$		$s_M^2 = 0,00966$		$F_t = 19,0$		
$\hat{s}_2^2 = 0,679$		$\hat{s}_1^2 = 0,029075$		$F_t = 19,15$		$F_{TLF} = 0,33$		$F_{TLF} < \bar{F}$		
$F_{r0} = 2545$		$F_{r1} = 18,5$								
$F_{r2} = 29,4$		$F_{r12} = 23,38$								
Nesignifikantan parametar $b_1$						Model adekvatan				

Na slici 5 su prikazani dijagrami  $T-\dot{v}$  i  $T-h$ , dobijeni na osnovu modela (3). Jasno je vidljivo da se za veće vrijednosti  $\dot{v}$  i  $h$  postojanost alata  $T$  smanjuje. Neznatno povećanje postojanosti alata je evidentno pri povećanju temperature pri konstantnom vremenu zagrijavanja od 8 sati.



Slika 5.  $T-\dot{v}$  i  $T-h$  dijagrami

### 5. ZAKLJUČCI

Na osnovu provedenog ispitivanja može se zaključiti sljedeće:

a) Dvofaktornim potpunim ortogonalnim planom se s uspjehom može modelirati funkcionalna zavisnost postojanosti alata od temperature i vremena mekog žarenja slobodno kovanih priprema od čelika Č.5432,

b) Respektujući granične vrijednosti temperature i vremena mekog žarenja dobivene su vrijednosti režima ( $\dot{v}=720^\circ\text{C}$  i  $h=8$  sati) pri kojima je, u ispitivanom intervalu, dobivena najveća postojanost alata.

## 6. LITERATURA

- [1] Stanić, J.: Metod inženjerskog mjerenja - osnove matematičke teorije eksperimenta, Mašinski fakultet u Beogradu, Beograd, 1981,
- [2] Ekinović, S. i dr.: Istraživanje uticajnih parametara za podizanje tehnološkog nivoa proizvodnje u uslovima maloserijske proizvodnje, Naučno-istraživački projekat u toku, Mašinski fakultet u Zenici, naručilac RO PREMIZ, RMK ZENICA.

## R E Z I M E

ISTRAŽIVANJE UTICAJA REŽIMA MEDJUFAZNE TERMIČKE OBRADNE SLOBODNO KOVANOG OTKOVKA OD ČELIKA Č.5432 NA REZNE SPOSOBNOSTI ALATA

U radu su dati rezultati ispitivanja uticaja režima medjufazne termičke obrade (meko žarenje) na postojanost alata pri naknadnoj mašinskoj obradi slobodno kovanih otkovaka od čelika Č.5432. Daje se funkcija postojanosti alata, na osnovu čega slijedi i izbor optimalnog režima medjufazne termičke obrade.

## S U M M A R Y

INVESTIGATION THE INFLUENCE HEAT-TREATMENT CONDITIONS OF THE HAMMER-FORGING WORK-PIECE (STEEL Č.5432) ON THE TOOL LIFE

In this paper are given the results of investigation the influence of heat-treatment (soft-nealing) conditions on the tool life at machining hammer-forging workpiece from steel Č.5432. Also, there is given a tool life function, witch is used to choose the optimal soft-nealing conditions.



A. Bunjaku\*

ODREDJIVANJE OBRADLJIVOSTI MATERIJALA Č.3160 POMOČU  
OTPORA REZANJA SA RAZLIČITOM TVRDOĆOM

1. UVOD

U visokomanganske čelike spadaju čelici sa sadržajem mangana od preko 10%. Ovi čelici na sobnoj temperaturi imaju austenitnu strukturu, pa su poznati kao i austenitni manganski čelici ili Hadfield-ovi čelici.

Posle kovanja ovi su čelici obično kruti, sa lošim mehaničkim osobinama. Međutim posle termičke obrade zagrevanjem po posebnom režimu od 1273 - 1473 K i naglim hladjenjem u vodu (gašenjem), postaju relativno meki i žilavi i odlikuju se visokom otpornošću na habanje.

Termička obrada "gašenje" po režimu zagrevanja i hladjenja je identična sa termičkom obradom kalenja, koja se izvodi kod feritnih čelika. Za razliku od kalenja, gde se posle termičke obrade dobija veća tvrdoća (martenzitska struktura), gašenje se vrši u cilju stabilizacije austenita, čime se smanjuje tvrdoća.

Jedno od značajnih svojstava ovih čelika kada se nalaze u austenitnom stanju je, što pod mehaničkim udarima ojačavaju u značajnoj meri, tako da prvobitnu tvrdoću mogu da povećavaju i za više od dva puta.

Austenitni manganski čelici su relativno jeftini i odlikuju se vrlo velikom otpornošću na abrazivno habanje. Danas nalaze primenu uglavnom za izradu delova bagera, drobilica, transportnih uređaja i sl. Njihovo relativno usko područje primene je rezultat i njihove loše obradljivosti rezanjem. Zato svako poboljšanje njihove obradljivosti može da ima i praktički značaj za njihovu širu primenu.

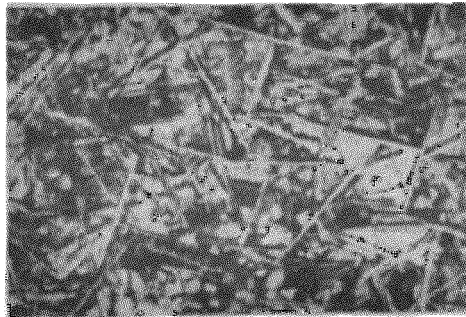
\* Dr Avdyl Bunjaku, dipl. ing., docent Mašinskog fakulteta u Prištini, ul. Sunčani breg b.b.



## 2. MEHANIČKA-FIZIČKA SVOJSTVA MATERIJALA Č.3160

Na sobnoj temperaturi, austenitni manganski čelici sastoje se uglavnom od smese austenitnih zrna i karbida. Količina i oblik karbida u austenitnoj masi uglavnom zavisi od brzine hladjenja i hemijskog sastava čalika, naročito sadržaja ugljenika i silicijuma. U koliko je brzina hladjenja manja, procenat ugljenika i silicijuma veći, veća je i količina izdvojenih karbida i njihova zrna su krupnija. U procesu zagrevanja na temperaturi od 1173 K najveći broj karbida prelazi u čvrsti rastvor. Potpuno rastvaranje karbida nastaje u temperaturnom intervalu od 1323 do 1473 K.

Zagrevanjem na temperaturi od 573 do 1073 K kod austenitnih manganskih čelika dolazi do raspada austenita i formiranja karbidne mase koja se odlikuje niskom žilavošću i velikom tvrdoćom (sl. 1). Pri žarenju ovih čelika od 20 sati na temperaturi od 873 K, u čeliku se raspadne skoro 50% mase austenita, pri čemu tvrdoća poraste za oko 50%. Pri sporom zagrevanju ovih čelika na 673 K do 823 K moguća je i delimična perlitna transformacija.



Sl. 1. Metalografski snimak kovinog manganskog čelika posle termičke obrade žarenjem (x500)

Za razliku od ugljeničnih čelika perlitne klase, austenitni manganski čelici nemaju izraženi period tečenja već napon stalno raste sve do granice razvlačenja. Sposobnost ovih čelika za ojačanje pod mehaničkim udarima u hladnom stanju čini ove čelike jednim od najotpornih na obrazivno habanje, no istovremeno i jednim od najtežih za obradu rezanjem.

Proces ojačanja visokomanganskih čelika je relativno složen, što svedoči i činjenica da danas još nemamo priznatu teoriju za njihovo ojačanje. Prema podacima istraživača [1] i [2] uzorci ojačanja posle hladnog deformisanja su razbijanje austenitnih zrna na vrlo sitne blokove i njihovo blokiranje po ravni smicanja sitnim karbidima.

Kao rezultat plastičnih deformacija u hladnom stanju, kod ovih čelika raste tvrdoća, jačina na kidanje i granica razvlačenja, a opada žilavost i plastičnost.

Od fizičkih svojstava visokomanganskih čelika, koji su od značaja za obradu rezanjem su: toploprovodljivost, specifična i toplotno širenje materijala. Austenitni manganski čelici odlikuju se vrlo slabom toploprovodljivošću, visokom specifičnom toplotom i velikim koeficijentom toplotnog širenja, koji zajedno znatno pogoršavaju obradljivost rezanjem.

### 3. METODE POBOLJŠANJA OBRADLJIVOSTI REZANJEM

Postoje različite metode za poboljšanje obradljivosti visokomanganskih čelika.

- Izborom pogodnih reznih alata,
- promenom hemijskog sastava materijala,
- obrada materijala u zagrejanom stanju i
- pogodnom metodom termičke obrade.

Izborom pogodne geometrije reznog alata i odgovarajućeg kvaliteta tvrdih metala, obradljivost ovih čelika se može znatno povećati. Prema podacima [1] ekonomska obrada ovih materijala može se postići primenom relativno niskih reznih brzina reda veličine od 10-20 m/min. Istraživanja autora [3] primenom tvrdih metala grupe K, kao i obloženih tvrdih metala sa TiC i TiN, ekonomska trajnost alata pri obradi struganjem može se postići i pri reznim brzinama reda veličine od 30-40 m/min.

Znatno povećanje obradljivosti može se postići i predhodnim zagrevanjem radnog komada [3].

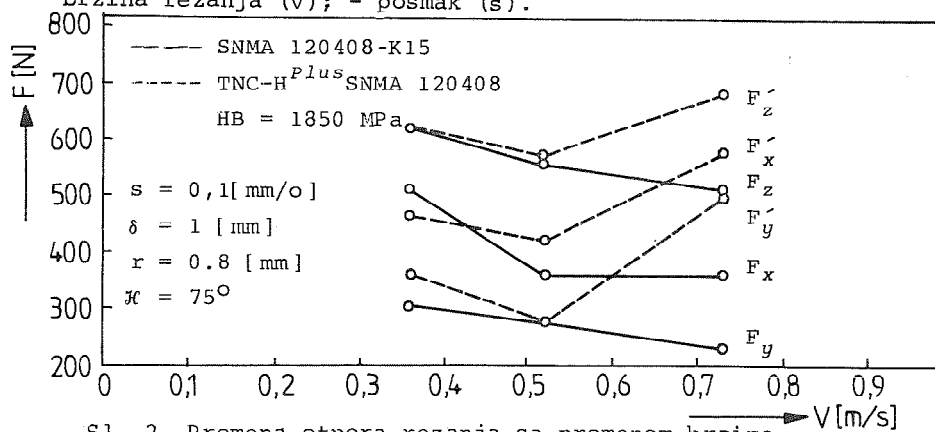
Primenom termičke obrade žarenjem kod austenitnih manganskih čelika može se poboljšati njihova obradljivost rezanjem [4].

### 4. USLOVI I REZULTATI EKSPERIMENTISANJA

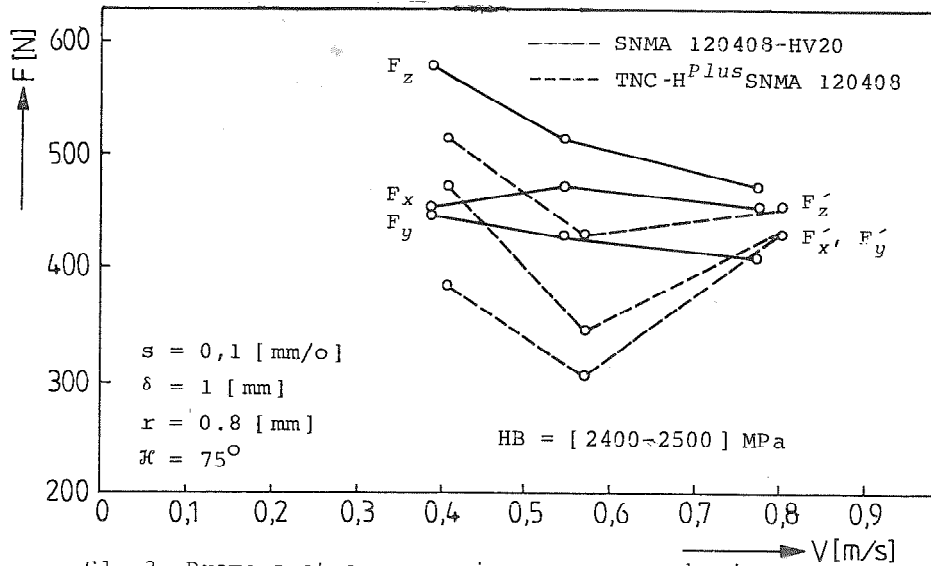
Ispitivanje obradljivosti vršeno je sa materijalom č.3160 sa sledećim hemijskim sastavom: 1.19-1.75% C; 12.47-12.70% Mn; 0.18-0.45% Cr; 0.37-0.48% Si; 0.02-0.04% P; 0.006-0.021% S. Svi eksperimenti vršeni su na univerzalnom strugu "Prvomajska"-Niles-tip TVP-250. Za merenje otpora rezanja korišćen je trokomponentni induktivni merač otpora, sa posebnim dodatkom za preobrazbu izlaznog

signala za pisač. Za obradu korišćene su rezne pločice od tvrdog metala (obložene i neobložene), tip SNMA 120408. Pre obrade rezanjme po posebnom režimu zagrevanja. Tvrdoća materijala posle obrade gašenjem iznosilaje: HB = 1850 MPa.

Da bi se odredili otpori rezanja u zavisnosti od raznih nezavisno promenljivih faktora, izvršena je serija eksperimenata po konvencionalnoj metodi eksperimentisanja, sa gašenim materijalom i materijalom koji je podvrgnut žarenju po posebnom režimu [4], pri čemu su dobivene tvrdoće: HB = [2400-2500] MPa, HB = 3530 MPa i HB = 4000 MPa. Pri ovome, ispitivan je uticaj sledećih faktora: - brzina rezanja ( $v$ ); - posmak ( $s$ ).

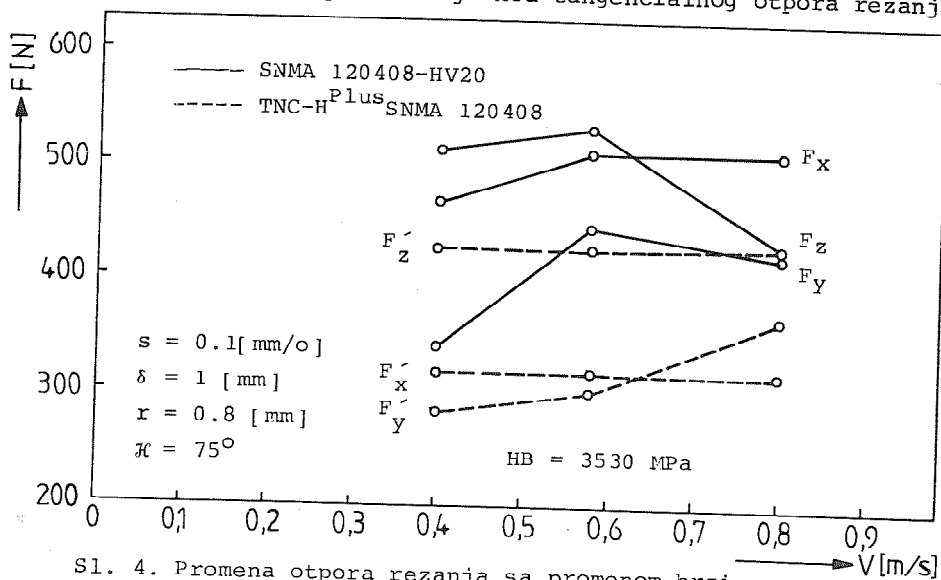


Sl. 2. Promena otpora rezanja sa promenom brzine

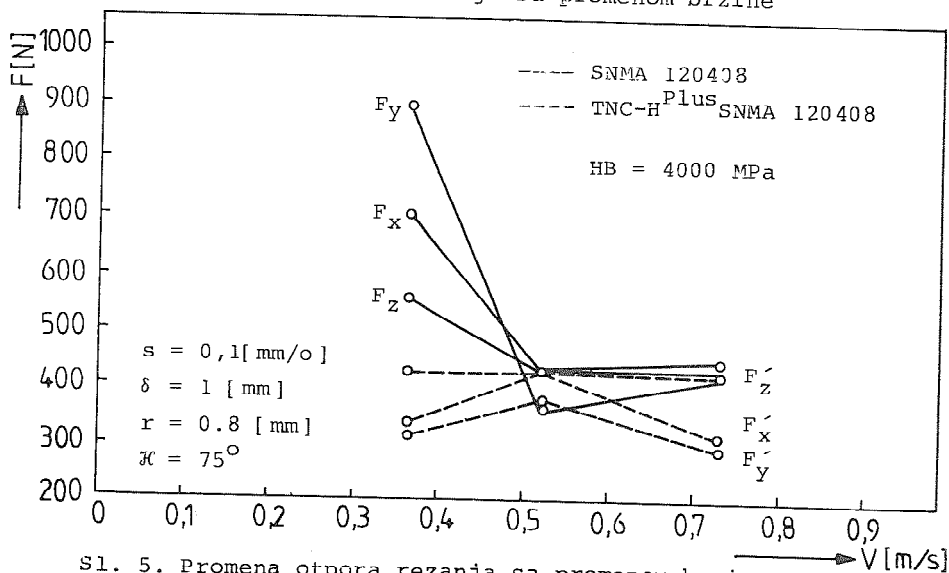


Sl. 3. Promena otpora rezanja sa promenom brzine

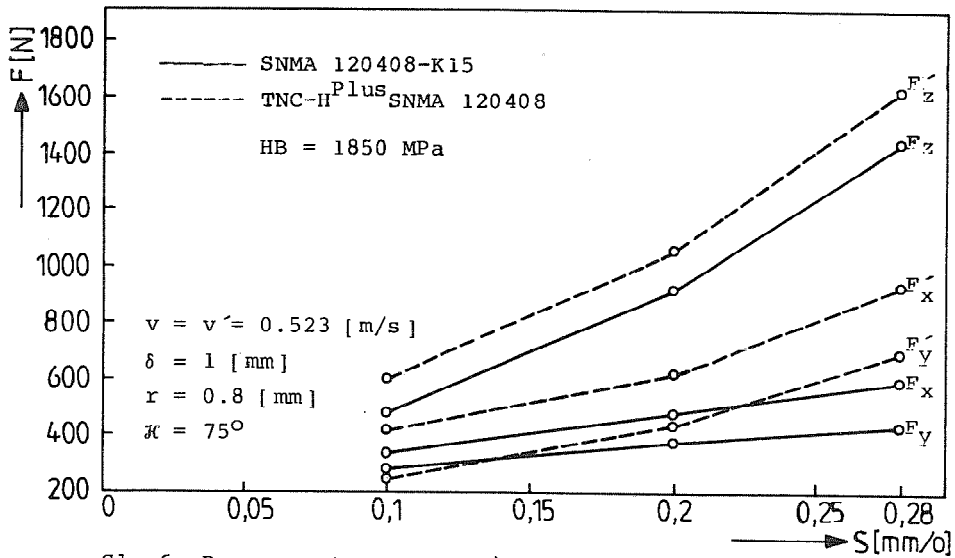
Na sl. 2, sl. 3, sl. 4 i sl. 5 prikazani su dijagrami promene otpora rezanja sa brzinom, a na sl. 6, sl. 7, sl. 8 i sl. 9 prikazana je promena otpora rezanja sa posmakom na bazi eksperimenata. Iz dijagrama na sl. 2 do 5 može se uočiti da sa porastom tvrdoće materijala opada uticaj brzine rezanja. Iz dijagrama na sl. 6 do 9 takodje se može uočiti da sa porastom posmaka rastu i sve komponente otpora rezanja, kao i kod ostalih materijala, pri čemu uticaj posmaka je najizraženiji kod tangencijalnog otpora rezanja.



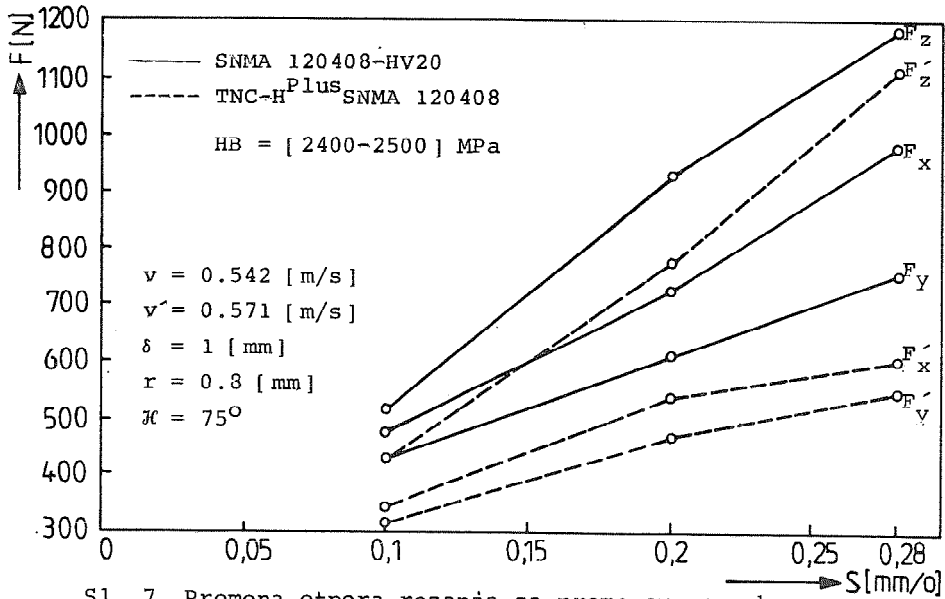
Sl. 4. Promena otpora rezanja sa promenom brzine



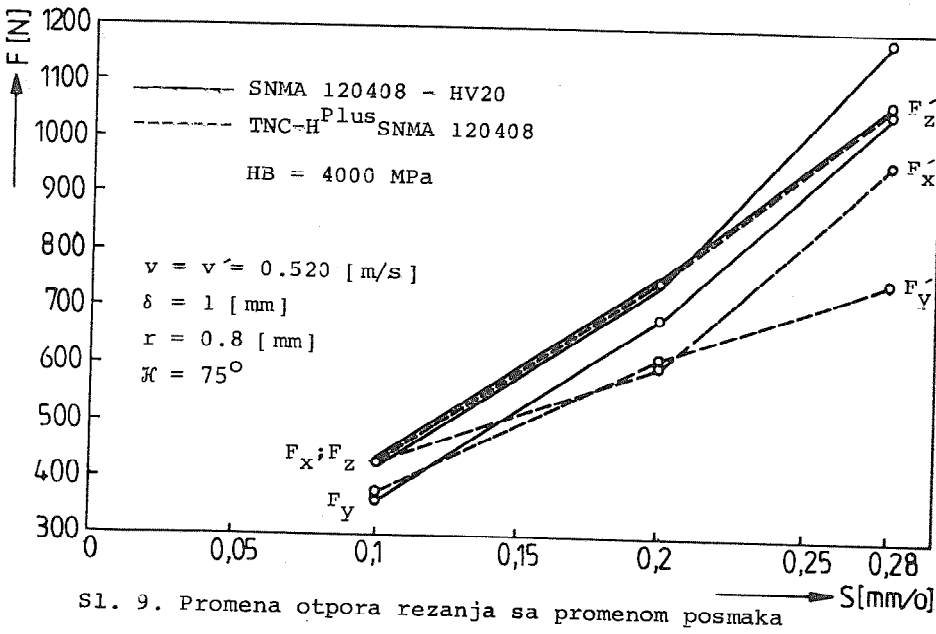
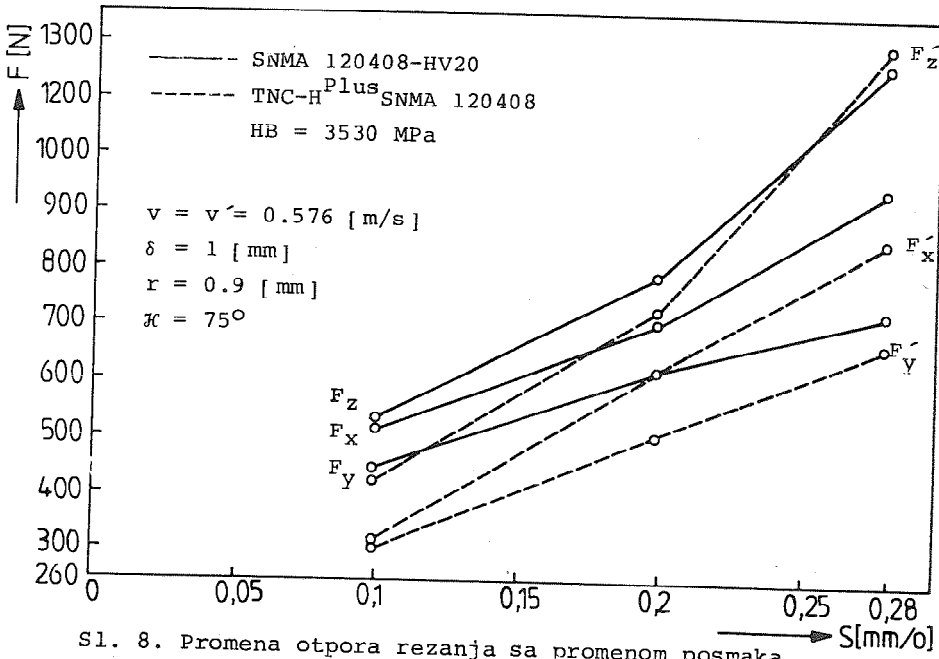
Sl. 5. Promena otpora rezanja sa promenom brzine



Sl. 6. Promena otpora rezanja sa promenom posmaka



Sl. 7. Promena otpora rezanja sa promenom posmaka



## 5. ZAKLJUČAK

Na osnovu napred izloženog može se videti da sa porastom tvrdoće materijala odnosno količine izlučenih karbida, opada uticaj brzine rezanja na promenu otpora rezanja, tako da pri obradi žarenog materijala na tvrdoću od HB = (3530-4000)MPa obradom sa obloženim pločicama od tvrdog metala, praktički rezna brzina nema uticaja na promenu otpora rezanja.

Uticaj rezne brzine na promenu otpora rezanja može se objasniti manjom promenom sile trenja i efekta ojačavanja materijala sa smanjenjem žilavosti i plastičnosti materijala, jer je efekat ojačavanja materijala najizraženije kod austenitne strukture. Ovo navodi na mogućnost postizanja bolje obradljivosti materijala sa izvesnim povećanjem tvrdoće materijala.

## 6. LITERATURA

- [1] Блантер М.Е. (ред): Марганцовистая сталь. Металургия, 1959.
- [2] Давидов И. Г.: Высокомарганцевая сталь. Металургия, Москва, 1973.
- [3] Трајковски С.: Истражување на обработливоста на високоманганските челици на повишени температури, Истраживачки проект. Машински факултет, Скопје, 1983.
- [4] Trajkovski S., Bunjaku A.: Uticaj termičke obrade na obradljivost rezanjem visokomanganskih čelika, Medjunarodno savetovanje o novim proizvodnim sistemima i tehnologija AMST '87. Opatija, Jugoslavija 1987.
- [5] Bunjaku A.: Istraživanje uticaja količine izlučenih karbida na obradljivost visokomanganskih čelika, Doktorska disertacija, Tehnički fakultet, Priština, 1987.

### A. Bunjaku

#### DETERMINATION OF MACHINABILITY OF THE MATERIAL Č.3160 USING THE CUTTING RESISTANCES WITH DIFFERENT HARDNESS

In this paper are presented the investigation results of machinability of wrought high manganese steel with different hardness. The influence of cutting velocity, shift and of cutting tool's type of material on machinability is also presented.

The investigation results obtained on possibility to attain better machinability of material by certain increase of material hardness.

M. Gostimirović, D. Milikić\*

ISTRAŽIVANJE OBRADLJIVOSTI MATERIJALA KORIŠĆENJEM  
SREDNJE TEMPERATURE PRI OBRADI REZANJEM

1. UVOD

Sistematsko ispitivanje obradljivosti različitih vrsta materijala predstavlja jedan od najvažnijih zadataka savremene proizvodnje pri obradi rezanjem. Sigurni podaci o obradljivosti omogućuju klasično ili automatsko projektovanje tehnologije mašinske obrade pri kojoj se ostvaruje optimalna postojanost alata, minimalni troškovi obrade, visoka tačnost i kvalitet obrade, ekonomičan utrošak energetske resursa, stabilno i pouzdano odvijanje procesa obrade i dr.

Potpuna ili dovoljno tačna ocena o obradljivosti nekog materijala može se dati jedino određivanjem skupa osnovnih funkcija obradljivosti kojim je obuhvaćena mehanika, tribologija, kvalimetrija i termodinamika procesa rezanja. Nekada se za ocenu obradljivosti i ne moraju uzeti u obzir sve funkcije. Koliko i koje će se funkcije obradljivosti razmatrati zavisi od proizvodno-tehnoloških tokova obrade materijala i pojedinih izlaznih zahteva poslatih projektovanom tehnologijom obrade.

Za obezbedjenje visoke ekonomičnosti procesa obrade rezanjem od najvećeg značaja je poznavanje veličine i brzine habanja alata, odnosno poznavanje funkcije postojanosti reznog alata. Međutim, odavno se javlja želja da se dugotrajni i skupi, ali široko prihvatljivi programi ispitivanja obradljivosti preko habanja alata, potpuno zamene ili kombinuju sa kratkim optima, štedeći na taj način resurse i omogućavajući direktnije intervencije u specifičnim slučajevima obrade. Usled sve intenzivnijeg razvoja metoda za

---

\*Gostimirović mr Marin, dipl.ing., asistent Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, ul. V. Vlahovića 3.

Milikić dr Dragoje, dipl.ing., vanredni profesor Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, ul. V. Vlahovića 3.



merenje temperatura pri obradi rezanjem i dobijanja veoma pouzdanih temperaturnih signala blisko vezanih sa habanjem - postojanošću alata, javile su se ideje o mogućnosti korišćenja toplotnog signala iz zone rezanja u različite svrhe, uključujući i za utvrđivanje obradljivosti materijala.

## 2. SISTEM ZA MERENJE SREDNJE TEMPERATURE PRI OBRADI REZANJEM

Srednja temperatura rezanja kao značajna karakteristična veličina za označavanje određenog stanja procesa rezanja, interesantna je samo pod uslovom da se merni sistem odlikuje visokom tačnošću, pouzdanošću, brzinom reagovanja i sposobnošću reprodukovanja rezultata. Koristeći saznanja savremenih visokoautomatizovanih mernih sistema i iskustva primenjivanih metoda za merenje srednje temperature rezanja prirodnim termoparom alat-obradak, realizovan je informacioni merni sistem prikazan na slici 1. Tokom postavljanja mernog sistema težište je usmereno u dva pravca, odnosno, rešavanje poteškoća vezanih za prisustvo parazitnih termonapona i povezivanje analognog signala termonapona sa računarskim sistemom.

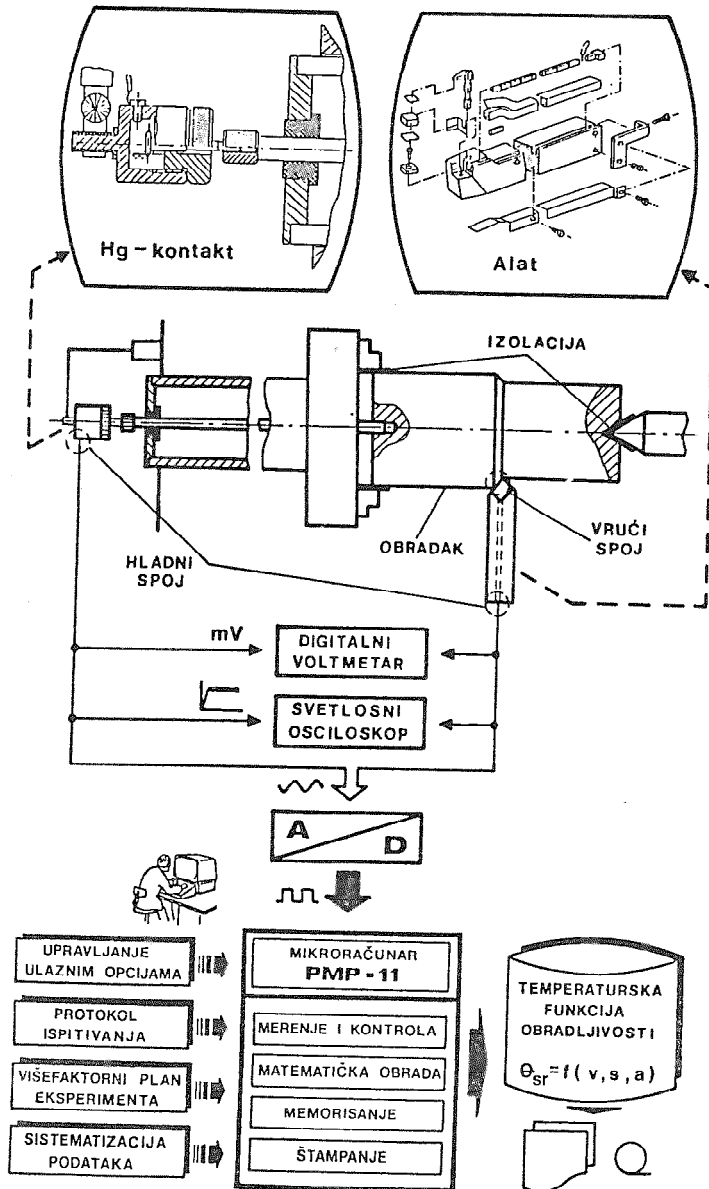
Za ostvarenje kontakta mernih uređaja, tj. računara sa termoparom alat-obradak, korišćen je Hg-kontakt u varijanti spoja kroz kglavno vreteno struga i specijalno izveden alat sa hladnim spojem na kraju tela noža.

Da bi se izbeglo rasipanje TEMS koja nastaje između dva alata i obradka, obradak je u potpunosti izolovan od mašine. S druge strane, kako je TM izolovan od tela noža, posebno izolovanje noža od mašine vrši se samo radi otklanjanja spoljašnjih naponskih smetnji.

Merenje, kontrola i obrada izmerenih veličina temperatura rezanja izvršena je pomoću 16-bitnog mikroracunara PMP-11 sa ugrađenim A/D pretvaračem uz primenu razvijenog programskog sistema.

## 3. DEFINISANJE METODOLOGIJE ISPITIVANJA OBRADLJIVOSTI POMOĆU SREDNJE TEMPERATURE REZANJA

Koristeći saznanja da toplotno opterećenje u značajnoj meri određuje meru habanja alata, pristupilo se razvoju jedne skraćene metode za dobijanje svih potrebnih znanja o obradljivosti iskazane kroz termodinamičke funkcije rezanja. Metoda koja u dosadašnjim istraživanjima nije dovoljno razjašnjena omogućuje da se merenjem srednje temperature rezanja prirodnim termoparom alat-obradak i vrlo malog broja klasičnih opita merenja habanja alata odredjuju konstante i eksponenti u jednačini postojanosti alata oblika:



Sl.1. Merni sistem za određivanje srednje temperature pri obradi rezanjem integrisan sa mikror računarom

$$T = \frac{C_{vv}}{v^z \delta^x s^y} \quad (1)$$

Koncepcija određivanja osnovne funkcije obradljivosti (1) pomoću srednje temperature rezanja zasniva se na prethodno utvrđenoj vezi između temperature i postojanosti pri istim elementima režućeg sloja /2/.

$$\theta_{sr} = \frac{C_{\theta} \cdot C_v^p}{T^{mp}} \quad \text{gde je:} \quad v = C_v / T^m \quad (2)$$

$$\theta_{sr} = C_{\theta} \cdot v^p$$

Pri tome se polazi od funkcionalne zavisnosti srednje temperature rezanja oblika:

$$\theta_{sr} = C_{\theta\theta} \cdot v^{p_1} \cdot s^{p_2} \cdot \delta^{p_3} \quad (3)$$

u koju se uvrsti relacija (2) i potom izrazi postojanost alata

$$T = \left( \frac{C_{\theta} \cdot C_v^p}{C_{\theta\theta}} \right)^{\frac{1}{mp}} \frac{1}{\frac{v^{p_1}}{v^{mp}} \cdot \frac{s^{p_2}}{s^{mp}} \cdot \frac{\delta^{p_3}}{\delta^{mp}}} \quad (4)$$

Za ovaj realizovani temperaturski metod određivanja funkcije postojanosti alata, iskazan jednačinom (4), potrebno je odrediti srednju temperaturu rezanja u funkciji elemenata režima rezanja i malim brojem klasičnih opita merenja habanja alata Tajlorov obrazac postojanosti.

#### 4. REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISPITIVANJA

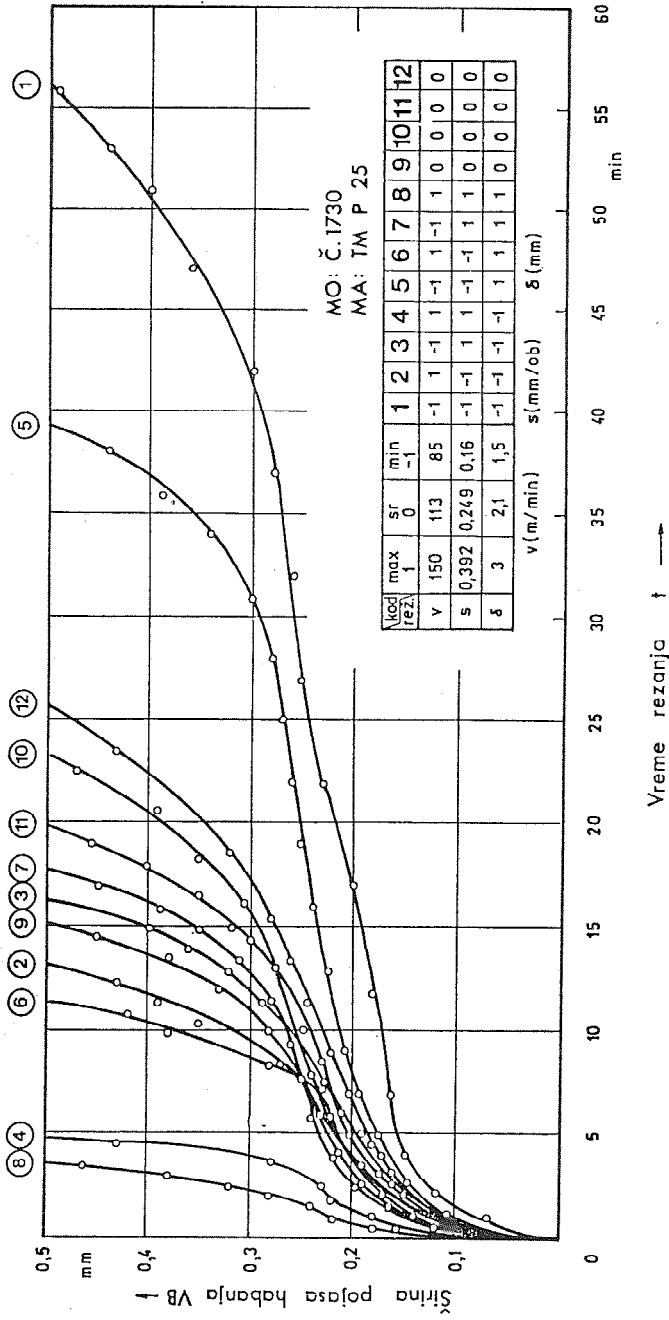
Istraživanja mogućnosti korišćenja srednje temperature za ocenu obradivosti materijala pri obradi rezanje, tj. testiranje postavljenog modela, izvršena su na tri različita materijala obradka. Izabrani konstrukcioni čelici sa ostalim uslovima pri kojima su izvršena eksperimentalna ispitivanja prikazani su u tablici 1.

U istoj tablici prikazani su i rezultati određivanja funkcije postojanosti alata pomoću srednje temperature rezanja. Eksperimentalno su određene funkcije srednje temperature rezanja i Tajlorovi obrasci postojanosti a potom su po obrascu (4) izvedene funkcije postojanosti alata.

Da bi se utvrdila pouzdanost temperaturskog postupka ispitivanja obradljivosti materijala, izvršeno je standardno ispitivanje obradljivosti primenom metode totalnih planova klasičnog ispitivanja habanja. Obzirom da je

Tablica 1. Izvedene funkcije postojanosti i uslovi pri kojima su dobijene

		TEMPERATURNI MODEL ZA ODREĐIVANJE FUNKCIJE POSTOJANOSTI REZNOG ALATA				
USLOVI PRI EKSPERIMENTALNIM ISPITIVANJIMA	MATERIJAL OBRADKA	č.0645	č.1730	č.5432		
	KARAKTERISTIKE	$R_m$ (MPa)	694	760	673	
		$R_p$ (MPa)	392	682	510	
		$A_{50}$ (%)	16,5	11,2	22,3	
		$Z$ (%)	38	19,5	67,6	
		HB	232	216	200	
	STANJE STRUKTURA	Normalizovano perlit + ferit	Normalizovano perlit + ferit	Stanje najbolje obradlj. cementit + ferit		
	A L A T	TM P 25		JUS K.DO.150		
	GEOMETRIJA	$\gamma^o$	-6			
		$\rho^o$	6			
		$\epsilon^o$	90			
		$\kappa^o$	75			
		$\lambda^o$	-6			
		$r$ (mm)	0,8			
	MAŠINA ALATKA	Univerzalni strug "POTISJE - MORANDO" PA - 22				
S P H	Bez sredstva za podmazivanje i hlađenje					
REŽIMI OBRADBE	$v$ (m/min)	85 - 150				
	$s$ (mm/ob)	0,16 - 0,392				
	$\delta$ (mm)	1,5 - 3				
IZVEDENI REZULTATI	FUNKCIJA POSTOJANOSTI ALATA	$T = \frac{438326}{v^{2,317} s^{0,93} \delta^{0,207}}$	$T = \frac{256924}{v^{2,395} s^{1,252} \delta^{0,376}}$	$T = \frac{1979587}{v^{2,632} s^{1,061} \delta^{0,291}}$		
EKSPERIMENTALNI REZULTATI	TAYLOROV OBRAZAC POSTOJANOSTI SREDNJA TEMPERATURA REZANJA	$v = \frac{427}{T^{0,439}}$ $\theta_{sr} = 358 \cdot v^{0,176}$ $\theta_{sr} = 381 \cdot v^{0,179} \delta^{0,072} \delta^{0,016}$	$v = \frac{337}{T^{0,42}}$ $\theta_{sr} = 392 \cdot v^{0,173}$ $\theta_{sr} = 434 \cdot v^{0,174} \delta^{0,091} \delta^{0,027}$	$v = \frac{387,5}{T^{0,382}}$ $\theta_{sr} = 330 \cdot v^{0,18}$ $\theta_{sr} = 356 \cdot v^{0,181} \delta^{0,073} \delta^{0,02}$		



Sl.2. Krive habanja alata po plan matrici eksperimenta

ovakvo određivanje funkcije postojanosti dugotrajno i skupo, verifikacija je sprovedena samo za jedan materijal obradka, čelik Č.1730.

Na osnovu po plan matrici određenih krivih habanja, slika 2, određena je funkcionalna zavisnost postojanosti alata od elemenata režima rezanja oblika:

$$T = \frac{355590}{v^{2,5} s^{1,25} \delta^{0,356}} \quad (5)$$

## 5. ANALIZA DOBIJENIH REZULTATA

Dobijeni rezultati ispitivanja obradljivosti pokazuju da se srednja temperatura pri rezanju može usvojiti za karakterističnu veličinu ocene obradljivosti. Kod izvedenih funkcija postojanosti uočava se znatno smanjenje troškova i vremena njihovog dobijanja.

Uporedbom funkcija postojanosti alata dobijenih brzom temperaturnom metodom (jed. iz tablice 1) i klasičnom metodom habanja (jed. 5) zaključuje se da postoji razlika u vrednostima postojanosti alata koja se kreće od 12-20%. Imajući u vidu da je postupak ispitivanja po temperaturnom metodu mnogo kraći i jeftiniji u odnosu na proceduru klasične metode, tada se navedene razlike u mnogim slučajevima konkretne proizvodnje mogu tolerisati. Pri tome treba imati u vidu da tačno i pouzdano određivanje funkcija postojanosti nije lako ostvarljivo čak ni primenom dugotrajne metode totalnih planova klasičnog habanja alata. I to pre svega zato što treba raspolažati veoma preciznom instrumentacijom i visokim stepenom koncentracije u toku eksperimentisanja koja se vrlo teško zadržava tokom dužeg ispitivanja.

## 6. ZAKLJUČCI

Predloženi skraćeni model određivanja funkcije postojanosti alata pomoću srednje temperature rezanja karakteriše:

- relativno kratko vreme eksperimentalnih ispitivanja,
- značajno smanjenje utrošenih sredstava,
- sa stanovišta eksperimenta visoka pouzdanost rezultata, jer se srednja temperatura rezanja znatno pouzdanije određuje od krivih habanja,
- zadovoljavajuća bliskost funkcije postojanosti određene temperaturnom metodom sa funkcijom postojanosti određenom klasičnom metodom habanja,

- pogodnost primene za konkretna pogonska ispitivanja i to sa stanovišta korekcije normativnih podataka ustanovljenih obično u laboratorijskim uslovima.

#### R E F E R E N C E

- /1/ Gostimirović M.: Mogućnosti korišćenja srednje temperature za ocenu obradljivosti materijala pri obradi rezanjem, Magistarski rad, FTN, Novi Sad, 1989.
- /2/ Milikić D., Gostimirović M., Kovač P.: Identifikacija stanja procesa rezanja pomoću termonapona prirodnog termopara alat-obradak. Zbornik radova IPM, br.4., FTN, Novi Sad, 1987.
- /3/ Richter W.: Ratlonelle Konnwertermittlung der enweiterten Taylor-standzeitfunktion über thermoelektrische Messungen beim Drehen. Int. Konferenz. INFERT, Dresen, 1978, str.378-387.
- /4/ Vukelja D., Šolaja V.: Utvrđivanje obradljivosti materijala pomoću temperaturske metode. Zbornik saopštenja VII savetovanja proizvodnog mašinstva, Novi Sad, 1971.

M.Gostimirović, D.Milikić

#### INVESTIGATIONS OF MATERIAL MACHINABILITY USING MEAN TEMPERATURE DURING CUTTING PROCESS

#### S u m m a r y

In the paper development of shorthed method for determination of tool life function based on the mean temperature which apier during cutting process is presented. This method give possibilities that with measuring mean temepature by natural thermocuple cutting tool-workpiece and very small numbers of cutting tool wear clasical experiments to determine coefficients and exponents in the tool life equation.

J.Kopač, S.Dolinšek \*)

OBDELOVALNOST VZMETNIH JEKEL

1. UVOD

Na obdelavo trdih materialov s struženjem vplivajo faktorji kot je trdota robne plasti orodja, trdota robne plasti obdelovanca, prekinitve rezanja itd. V končni fazi moramo upoštevati tudi specifične vplivne faktorje procesa, kot je natančno in togo vpetje obdelovancev, togost obdelovalnega stroja in velika instalirana pogonska moč, ki je potrebna zaradi velikih specifičnih rezalnih sil.

Pri struženju trdih materialov se pojavijo velike termične emisije, ki vplivajo na rezalni material. Zato je pomembno, da ima izbrani rezalni material veliko trdoto in visoko temperaturno obstojnost. S tem preprečimo, da med rezalnim procesom ne potekajo kemične in difuzijske reakcije med obdelovancem in orodjem /1/.

Rezalni material mora biti dobro odporen proti obrabi in istočasno žilav, da ne pride do poškodb rezalnega robu - okrušitve. Zato smo izbrali orodje iz karbidne trdine kvalitete P15, oblasteno s titanovim karbidom TiC.

Dogajanje v transformacijski coni pri obdelavi površine s trdim klinom orodja je ponazorjeno na sliki 1 /2/. Posledica je hrapava površina zaradi velikega kota klina orodja  $\beta$ , do česar pride zaradi velikega tornega števila  $\mu$ . Skupni vpliv se izraža v modelu poteka obrabe.

Če kot  $\alpha$  - razviden slike 1, povečujemo, se poveča tudi koeficient trenja  $\mu$ . Iz slike 1 desno vidimo nastajanje odrezka pri velikih kotih  $\alpha$ . Sledi torej, da pri majhnem kotu orodje material odrija, s povečanjem kota  $\alpha$  pa pride do formiranja odrezkov. Na sliki 2 je podan diagram vpliva kota  $\alpha$  na nastajanje odrezka.

---

\*) dr.Janez Kopač,dipl.ing., docent, Fakulteta za strojništvo v Ljubljani,  
Murnikova 2  
mag.Slavko Dolinšek,dipl.inž., asistent, Fakulteta za strojništvo v Ljubljani  
Murnikova 2



## 2. PODATKI O OBDELOVANEM MATERIALU IN REZALNEM ORODJU

Legirano konstrukcijsko jeklo se sestoji iz

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Cu	S <sub>max.</sub>	P <sub>max.</sub>	OSTALO
0,42	0,17	0,50	0,80	1,30	0,20	0,10	max.			
0,50	0,37	0,80	1,10	1,80	0,30	0,18	0,25	0,007	0,020	%

Maksimalna vsota vseh legirnih elementov v jeklu je 5,327%, minimalna pa 3,767%, kar ga uvršča ravno na mejo med nizko in močno legiranimi jekli. Vplivi posameznih elementov, prisotnih v jeklu, na lastnost jekel, so prikazani v tabeli.

V tabeli so zbrani vplivi legirnih elementov in primesi na lastnost jekel:

elementi lastnosti	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	Cu	S	P
trdnost $\sigma_M$	++	+	+	++	+	+	+		-	+
trdota H	++	+	+	++	+	+	++		-	+
žilavost $\rho$	-	-	++	+	++	++	-		--	--
elastičnost $\sigma_{el}$	+	++	+	+	-	+	++		-	-
sposobnost rezanja	++	+		+	-	+	++			-
odpornost proti koroz.	-	+	-	++	++	+	-		-	-
magnetičnost	-	-	-	-	-	-	-		-	-

Jeklo je toplotno obdelano - poboljšano in kaljeno. Njegova trdota je 56 HRC.

Uporabljeno orodje: SNUN 12 04 08 P15 315

in držalo:

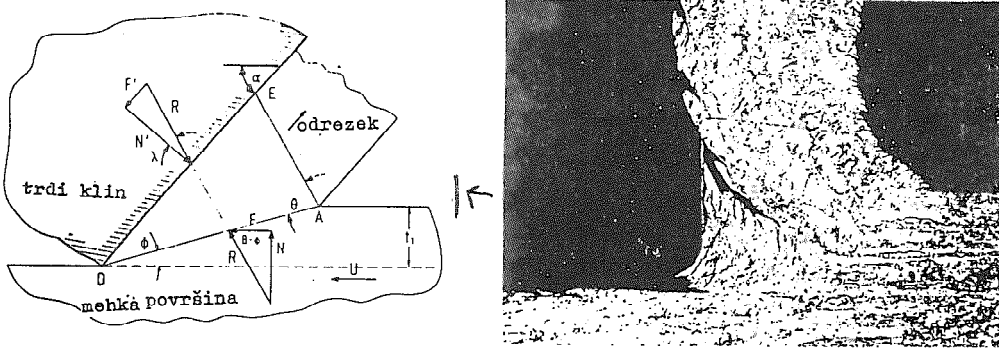
L 174.1 3225 M z lomilno stopničko

skupna geometrija rezanja:

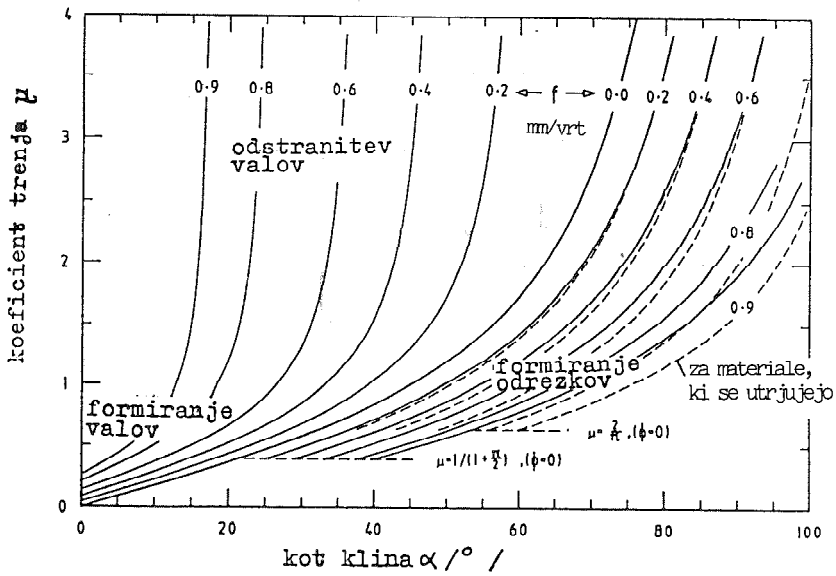
$\alpha$	$\gamma$	$\lambda$	$\delta$	r
6°	-6°	-4°	70°	0,4 mm

## 3. OBRABA IN OBSTOJNOST ORODJA

Potek preizkusov je bil sistematsko planiran na osnovi eksperimentalnega križa. Posamične režime dela smo časovno prekinjali in merili potek obrabe orodja od 5 do 10 krat v terminu od novega rezalnega robu do porušitve oziroma prekoračitve obrabnega kriterija.



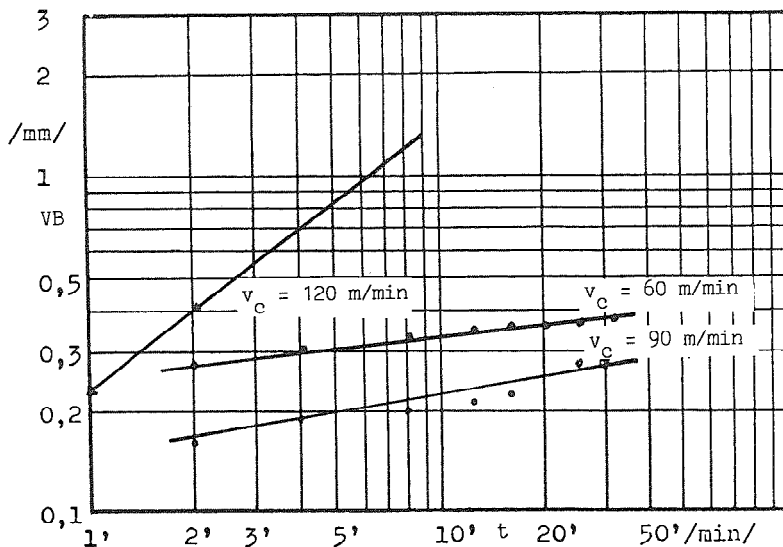
Slika 1: Model formiranja odrezkov in nastajanje odrezka pri velikem kotu  $\alpha$ .



Slika 2: Vpliv kota  $\alpha$  na nastajanje odrezka.

Z uporabo računalniškega programa linearne multiple regresije, kamor interaktivno vnesemo rezultate meritev obrabe dobimo izračunano razširjeno Taylorjevo enačbo v naslednji obliki:  $v_c = 13,5 \cdot f^{-0,92} \cdot a_p^{-0,15} \cdot VB^{0,43} \cdot T^{-0,16}$ . V diagramu obstojnosti orodja je enačba izrisana na sliki 3. Aktualno, ekonomsko uporabno področje je v časovnem razponu obstojnosti od 5 do 200 minut, pri tem pa so rezalne hitrosti v mejah med 60 m/min in 30 m/min pri podajanjih med 0,1 in 0,3 mm/vrt/3/.

Z željo po racionalizaciji obdelave smo raziskali še uporabnost orodij iz mešane keramike, kvalitete SH1, vendar smo zabeležili velik raztros rezultatov pri posameznih parametrih dela. Odstopanja pri ponovitvah so bila prevelika, da bi bili rezultati primerni za uporabo. Kot primer navajamo sliko 4, kjer obrabni diagram glede na različne rezalne hitrosti pokaže nepravilno lego in razporeditev krivulj poteka obrabe /4/.

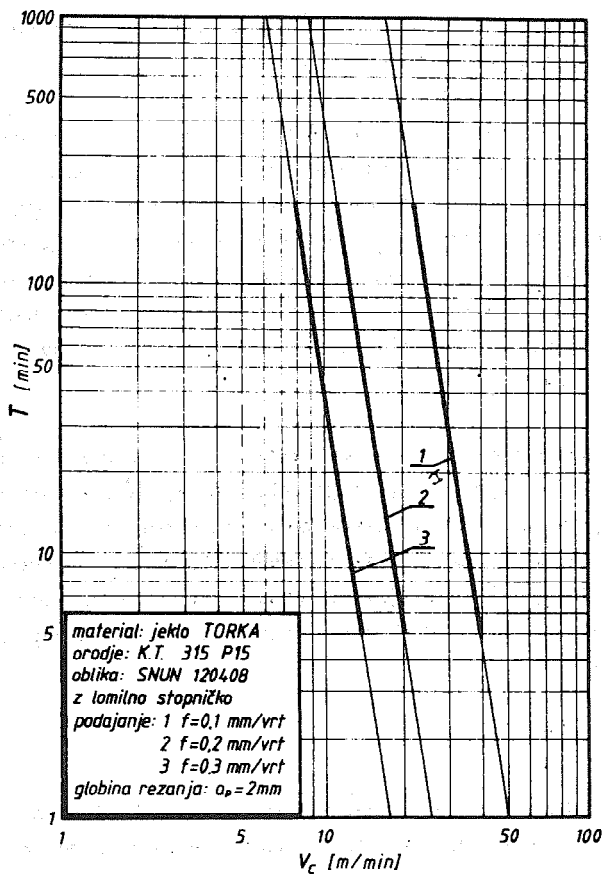


Slika 4: Dvojno logaritemski diagram  $VB-t$ ;

Orodje: SNGN 12 04 08 SH 1

$f = 0,165$  mm/vrt

$a_p = 2$  mm



geometrija rezanja:

VB = 0,2 mm

$\alpha$	$\gamma$	$\lambda$	$\kappa$	$\varepsilon$	$r$
$6^\circ$	$-6^\circ$	$-4^\circ$	$70^\circ$	$90^\circ$	0,8 mm

Slika 3: Obstojnost orodja iz karbidne trdine 315 P 15 pri struženju poboljšane vzmetnega jekla s trdoto 56 HRC.

#### 4. METODA VREDNOTENJA REZULTATOV IN IZBIRA NAJBOLJ ZANESLJIVE OBSTOJNOSTNE ENAČBE

Kljub časovno dolgotrajnemu, dragemu in v določenih primerih relativno nezanesljivemu določanju obstojnosti orodja na osnovi meritev obrabe proste ploskve, se ta princip še vedno skoraj izključno uporablja tudi zato, ker so metode sprotne kontrole še nedodelane in pa ker tudi za takšno kontrolo potrebujemo obširno banko podatkov o obdelovalnosti materialov.

Pri obdelavi materiala, ki ga obravnava prispevek, smo zasledili, da je odstopanje eksperimentalno izmerjenih vrednosti obrabe orodja tolikšno, da je zahtevalo posebno pozornost pri eksperimentalnem delu. Na odstopanje obrabnih rezultatov lahko vplivamo s pazljivostjo pri eksperimentiranju (strogo kontrolo vplivnih parametrov), vendar smo zasledili še vedno takšen raztros obstojnostnih vrednosti, da bi v določenih primerih morali zaradi nesmiselnih rezultatov vnesti v obstojnostno enačbo še določen vplivni faktor, ki bi bil ugotovljen z eksperimentalno analizo rezalnega procesa.

Raztros obstojnostnih vrednosti je opazen iz rezultatov regresijske analize obstojnostne enačbe. Široko območje, ki ga oklepata meji zaupanja obstojnostne enačbe, velika standardna napaka in nizke vrednosti korelacij so matematično izračunani pokazatelji neustreznosti eksperimenta. Na sliki 5 so računalniški izpisi v primeru zadovoljive zanesljivosti obstojnostnih rezultatov. Prikazan je tudi izpis za vnos v banko tehnoloških podatkov v okviru informacijskega centra /5,6,7/.

#### 5. SKLEPNE UGOTOVITEV

Poboljšano vzmetno jeklo s trdoto 56 HRC so neugodna za obdelavo z odrezavanjem. Obraba orodja iz karbidne trdine narašča po znanih mehanizmih do vrednosti  $VB = 0,2$  mm. Od te vrednosti naprej se pogosto pojavlja nepredviden zlom orodja. Z oplastenjem orodja ne dosežemo bistvenih izboljšav. V proizvodnji torzijskih osi moramo dobiti gladko obdelano površino po celotni dolžini, zato ne moremo dopuščati nepredvidenih lomov orodja, ki povzročajo na izdelku zarezni učinek. Predpisali smo tako tehnologijo obdelave, ki zagotavlja nemoteno in zanesljivo proizvodnjo. Rezultati so prikazani v obliki razširjene Taylorjeve enačbe in prirejeni za banko tehnoloških podatkov. Poudarek je na zanesljivosti rezultatov, predpisanih z mejami zaupanja obstojnostne enačbe.

IZMERJENA HITROST	IZMERAJENA HITROST	ABSOLUTNA ODSTUPANJE	PROCENTUALNO ODSTUPANJE	SPLOŠNA REJA TRAJANJA ZA V
23.000	23.000	-0.702	-3.051	23.000
23.000	23.102	0.102	0.443	23.110
23.000	23.093	-0.093	-0.404	23.000
23.000	23.333	0.333	1.448	23.301
23.000	23.512	0.512	2.226	23.525
23.000	23.317	-0.317	-1.383	23.312

## MATEMATIČNI KORELACIJSKI KOEFIČIENTI

## SPRENEVLJIVNA

1.000	-0.572	-0.249	0.115
-0.572	1.000	-0.139	0.306

Fakulteta za strojninstvo  
v Ljubljani

## Priporočila za struženje

Toplotna obdelava: poboljšano  
Natezna trdnost: - ;  
Trdota: -

Werkstoff Nr.: (DIN): 1.XXXX  
Obdelovani material (JUS): vzrn.jek.

Stanje površine: predstruženo  
Oblika plosvice: snun 120408  
Oplastenje: -

Rezalni material: sandvik p15315  
Posebnost: -

Specifična rezalna sila:  $k_{cl.i} = 1968.3 \text{ N/mm}^{**2}$ ;  $1-mc = 0.73$ ;  
Rezalna hitrost:  $vc_{max} = 50 \text{ m/min}$ ;  $vc_{min} = 20 \text{ m/min}$ ;  
Rezalna geometrija:  $\gamma = -6$ ;  $\alpha = 6$ ;  $\lambda = -4$ ;  $\kappa = 70$ ;

Taylorjeva enačba:  $vc = 13.5 * f^{**0.92} * a^{**0.15} * V_B^{**0.43} * T^{**0.16}$

List st. 1

Datum: 25.2.89

		I Globina reza a (mm)						
		2.0	4.0	6.0				
Podajanje f (mm/vrt)	I Rezalna hitrost vc (m/min)							
	I Rezalna sila Fc (N)							
	I Moc na vretenu P (kW)							
	I Odrezani volumen Vodr (cm <sup>3</sup> /min)							
	I	2.0	4.0	6.0	I	2.0	4.0	6.0
	0.125I	34	31	29	0.125I	30	27	26
	I	877	1755	2632	I	877	1755	2632
	I	0.5	0.9	1.3	I	0.4	0.8	1.1
	I	8	15	22	I	8	14	22
	0.160I	27	24	23	0.160I	24	22	21
	I	1051	2101	3152	I	1051	2101	3152
	I	0.5	0.9	1.3	I	0.4	0.8	1.1

Slika 5: Prikaz izpisov regresijske analize obstojnostne enačbe in izpis tabele informacijskega centra.

## 6. LITERATURA

- /1/ Momper F.: Schneidstoffe, Industrie Anzeiger vol 110/88, št.14, str.26-29.
- /2/ Black A.J., Kopalinsky and Oxley P.L.B.: An Investigation of the different regimes of deformation, which can occur when hard edge slides over a soft surface; WEAR vol 123/88, št.1, str. 87-96.
- /3/ Skupina avtorjev: Raziskave obdelovalnosti domačih materialov, poročilo 102.87/196, Ljubljana, 1987
- /4/ Iztok Vaukan: Obdelovalnost vzmetnih jekel, diplomska naloga, Ljubljana 1988.
- /5/ x x x : INFOS, Informatinszentrum für schnittwerte, Zerspanseminar, Aachen, 1982.
- /6/ Z. Šeljčak, S. Dolinšek, J. Kopač: Statistično vrednotenje eksperimentalnih rezultatov pri vrtnanju, KOMEOS - 83, Rijeka 1983.
- /7/ König W., Hoff M.: Prozesmodell beschreibt das Standverhalten beim Bohren, Industrie anzeiger 108(1986), št.12, str. 29 do 33.

J.Kopač, S.Dolinšek

**MACHINABILITY OF SPRING STEEL**

S u m m a r y

Improved spring steels of a hardness of 56 HRC are difficult to machine by cutting. The width of the flank wear land of a tool made of cemented carbide increases as a result of the known mechanisms upto a value of  $VB = 0,2$  mm. Beyond this value unpredictable tool failure often occurs. However no essential improvements can be reached by coating the tool. In the manufacture of rotary shafts a very smooth surface is required along the entire length, therefore no unpredictable failure of the tool can be allowed because it produces a notch effect on the product. The paper prescribes such a technology of machining which would ensure undisturbed production and reliability.

The results are presented in the form of an extended Taylor equation and adapted for the technological data base. The emphasis is laid on the reliability of the results, which is achieved by applying confidence limits.

---

## 22 ЈУГОСЛОВЕНСКО СОВЕТУВАЊЕ ЗА ПРОИЗВОДНО МАШИНСТВО

ОХРИД 24 - 26 мај 1989 г.

---

M. Maslač, A. Mišković\*

### MOGUĆNOSTI OBRADJE KOMPOZITNOG MATERIJALA NA BAZI UGLJENIČNIH I ARAMIDNIH VLAKANA\*\*

#### 1. UVOD

Obzirom na izvanredne mehaničke karakteristike i malu specifičnu težinu, kompozitni materijali sa ugljeničnim i aramidnim vlaknima sve više postaju osnovni materijali u izgradnji savremenih vazduhoplova. Obrada rezanjem ovog materijala, obzirom na strukturu i način formiranja zahtjeva bitno različite uslove od uslova koji se obezbjeđuju pri obradi konvencionalnih materijala. U vazduhoplovnoj industriji poklanja se veliki značaj razvoju tehnologije obrade navedenog materijala, a u cilju postizanja boljih tehnoeкономskih efekata.

U radu su dati rezultati literaturnih i eksperimentalnih istraživanja obradivosti kompozitnih materijala sa ugljeničnim i aramidnim vlaknima pri obradi rezanjem, sa naglaskom na izbor režima obrade, tip i geometriju alata.

#### 2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE KOMPOZITNOG MATERIJALA NA BAZI UGLJENIČNIH I ARAMIDNIH VLAKANA

Kompozitni materijali se formiraju od ugljeničnih, odnosno aramidnih vlakana i smole, tako da vlakna čine armaturu a smola vezivno sredstvo. Vlakna doprinose osnovnim karakteristikama čvrstoće i krutosti materijala, a smola određuje: postojanost materijala na

---

\*| Mr Marko Maslač, dipl. maš. ing., Preduzeće "Vazduhoplovna industrija "SOKO", sektor "IVT", Mostar,

\*| Dr Anto Mišković, dipl. maš. ing., profesor Mašinskog fakulteta u Mostaru.

\*\*| Rad je sastavni dio naučnoistraživačkog projekta "Produktika" kojeg finansira "VI SOKO" i republička zajednica za naučni rad SR BiH.



toploti, uticaj na vlagu, zapaljivost i električne karakteristike. Sama vlakna su vrlo postojana na temperaturne promjene, tako npr. ugljenična vlakna mjenjaju samo neznatno svoje mehaničke karakteristike do 1200°K.

Smola je vrlo važan činilac u strukturi kompozitnog materijala. Za vitalne strukture vazduhoplova koriste se, uglavnom, epoksidne i fenolne smole.

Uporedni pregled mehaničkih osobina nekih vazduhoplovnih materijala

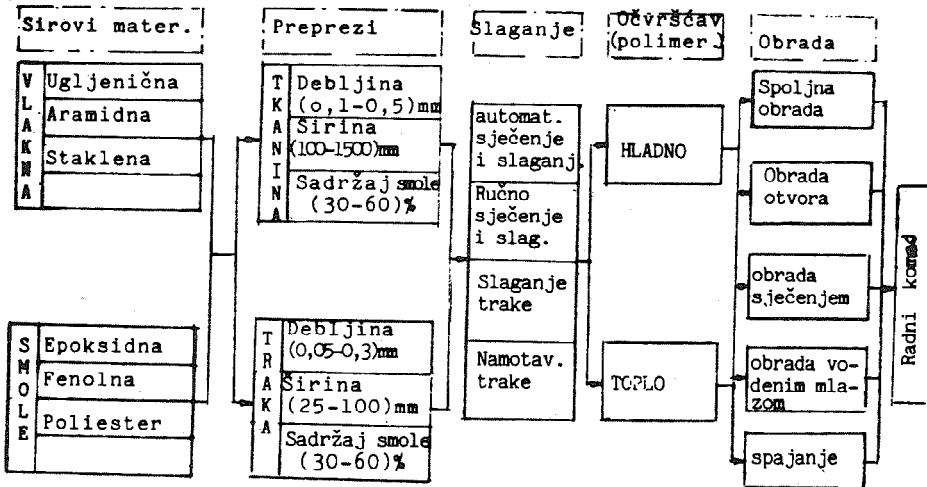
Tabela 1.

M A T E R I J A L		Težinski udio vlakana %	Specifični težina ( $\text{kg}/\text{dm}^3$ ) $\gamma$	Modul elastič. ( $\text{daN}/\text{mm}^2$ ) E	Naprez. na istez. ( $\text{daN}/\text{mm}^2$ ) $\sigma$	$\frac{E}{\gamma}$	$\frac{\sigma}{\gamma}$
Ugljeni- čna vlakna 1)	velike čvrstoće	65	1,58	13500	150	8500	95
	vel.mod. elastič.	65	1,61	40000	100	25000	62
Kevlar 49		65	1,38	8000-13000	140	7500	100
Duraluminij (3.1354.T351)		-	2,80	7000	45	2500	16
Čelik 1.7734.6		-	7,85	20700	125	2600	16
Titan Ti 6Al4V (3.7164.7)		-	4,51	11500	110	2500	24

U tabeli su date zaokružene vrijednosti mehaničkih osobina.

1) Materijal je u obliku ploče, a opterećen je u pravcu vlakana (vlakna u jednom smjeru) impregnirana epoksidnom smolom.

Iz prikazane tabele se vidi da su mehaničke karakteristike ovih vlakana izvanredne, pogotovo kada se svode na jedinicu težine. To i jeste razlog njihove sve veće primjene u savremenim vazduhoplovnim konstrukcijama.



Sl. Šematski prikaz procesa izrade kompozitnih elemenata.

### 3. TEHNOLOŠKE KARAKTERISTIKE PROCESA OBRADJE I ALATA ZA OBRADU KOMPOZITNIH MATERIJALA

Izbor režima obrade je otežan obzirom na strukturu kompozitnog materijala i složene popratne pojave u procesu obrade rezanjem. Dovoljno je, samo, napomenuti da je tačka topljenja smole do  $430^{\circ}\text{K}$ , a jačina vlakana na kidanje oko  $150 \text{ (daN/mm}^2\text{)}$  pa će se zaključiti da se proces rezanja mora odvijati u otežanim uslovima. Pri tome je bitno napomenuti da se takođe radi o materijalu male toplotne provoljivosti, te da pri procesu obrade postoje dosta velike mogućnosti njegovog pregrijavanja, odnosno progorjevanja smole.

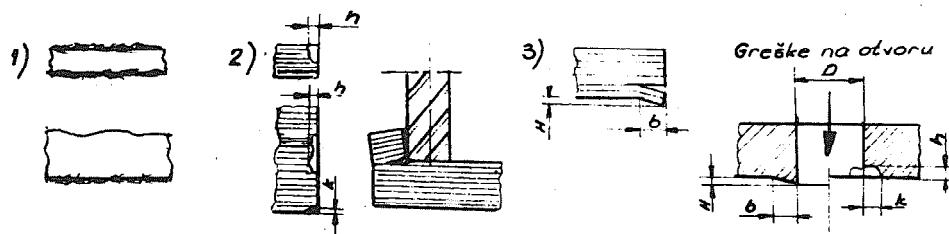
Proces obrade ovih materijala treba da se odvija unutar ograničenog temperaturnog područja. Upotreba rashladnih sredstava u procesu obrade, u klasičnom smislu, se ne primjenjuje. Pri ovakvom odvijanju procesa obrade kao otpadak (strugotina) pri obradi se javlja prašina, što predstavlja poseban problem, kako za okolinu (mašine, uređaje i prostor) tako i za radnika, jer prašina pored abrazivnog ima i toksično dejstvo. Radi toga, prašina mora prak-

tično biti, istovremeno sa nastajanjem i uklonjena. Također, u procesu obrade radnik mora da koristi određena zaštitna sredstva.

Imajući u vidu uslove pod kojima se odvija proces rezanja, nije teško zaključiti da se pred alate, koji učestvuju u procesu obrade kompozitnog materijala, postavljaju izvanredni zahtjevi. Radi loše toplotne provodljivosti kompozitnog materijala, skoro svu toplotu stvorenu u procesu rezanja, odvodi alat. Uslijed niske tačke topljenja smole dolazi do lijepljenja smole i skinutih čestica na rezni alat, a time do promjene njegove geometrije i gubitka rezne sposobnosti. Imajući u vidu da se to odvija u uslovima bez hlađenja, neminovno se nameće potreba za posebnim zahtjevima, kako u pogledu materijala reznog alata, tako i njegove rezne geometrije.

### 3.1. Greške na radnom komadu prouzrokovane procesom obrade

Pri naprijed opisanim uslovima obrade kompozitnog materijala (ugljenična i aramidna vlakna) neminovne su u većoj ili manjoj mjeri greške, odnosno odstupanja u pogledu tačnosti izrade i kvaliteta obradene površine. Obzirom na materijal, odnosno vrstu vlakana i greške se donekle razlikuju. Naime, aramidna vlakna imaju vrlo malu otpornost na pritisak, te se uslijed otpora rezanja lako savijaju na obradenim ivicama radnog komada. Ovakva pojava na ivicama radnog komada je pahuljičenje ili rutanje. Analogno, na ivicama radnog komada od ugljeničnih vlakana, imamo pojavu krzanja i odlamanja. Zajednička greška na djelovima izrađenim od jednog i drugog materijal, a može nastati pri obradi rezanjem, je delaminacija. Delaminacija ili raslojavanje je pojava odvajanja polimeriziranih slojeva platna, koja uglavnom nastaje uslijed otpora što ga priža materijal pri prodiranju reznog klina u procesu obrade. Pojava pregrijavanja pri obradi rezanjem zbog koje dolazi do progorjeva-



Sl.2. Greške pri obradi kompozitnog materijala

- 1) Rutanje - "kevlar", 2) krzanje i odlamanje - ugljenična vlakna, 3) delaminacija - "kevlar" i ugljenična vlakna.

nja materijala (smole) očekuje se pri neadekvatno izabranim parametrima obrade, ili kao posljedica greške formiranja materijala.

Navedene greške treba očekivati pri skoro svim operacijama obrade rezanjem i za njihovo sprečavanje ili otklanjanje potrebno je preduzeti preventivne mjere ili dodatne radne operacije njihovog otklanjanja.

#### 4. IZBOR SREDSTAVA RADA I REŽIMA OBRADE

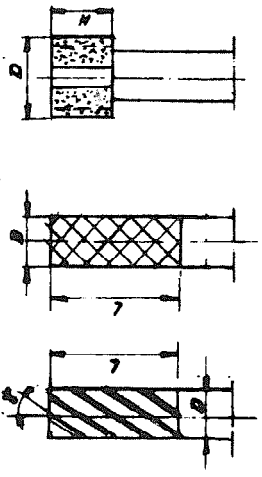
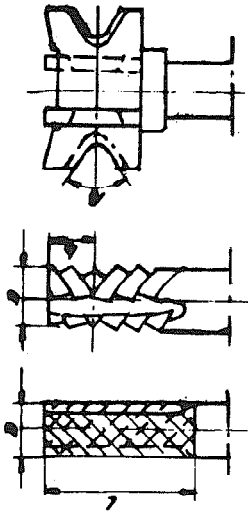
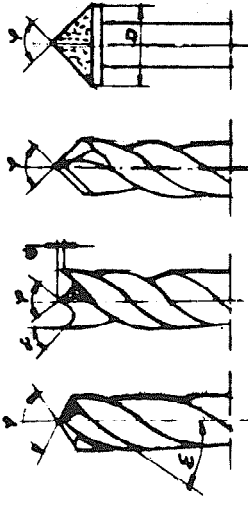
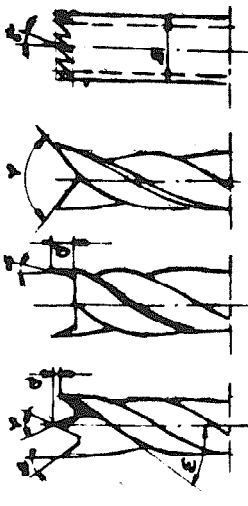
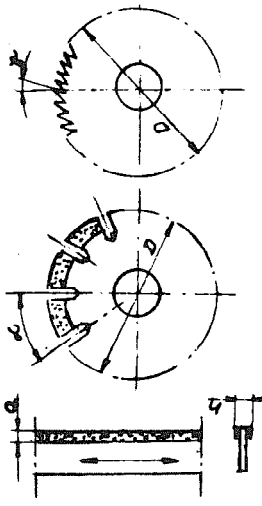
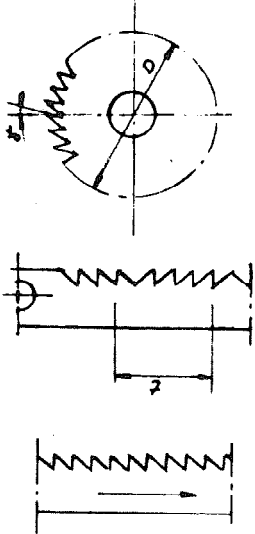
Izbor sredstava rada, odnosno opreme za obradu kompozitnih materijala (ugljenična i aramidna vlakna ("KEVLAR")) zavisi od obradivog materijala i zahtjevanog kvaliteta obradenog dijela. Uglavnom, za sve operacije obrade rezanjem koriste se mašine sa dosta naglašenim radnim karakteristikama, naročito u pogledu brzine rezanja (broja obrtaja radnog vretena), mogućnosti izbora odgovarajućeg posmaka, kao i sa odgovarajućim priključnim uređajem za odvođenje prašine.

Na sadašnjem nivou razvoja vazduhoplovne industrije, za obradu elemenata od kompozitnog materijala, najviše su zastupljene ručne mašine sa pneumatskim pogonom (bušilice, glodalice i brusilice), kao i razne vrste testera. Za konturnu obradu elemenata prostorno zakrivljenih danas se dosta efiksno koristi mašina sa vodenim mlazom.

Rezni alat u procesu obrade mora biti oštar i vrlo čist od naslaga smole, kako ne bi došlo do grešaka na radnom komadu. Ovakve zahtjeve može da zadovolji rezi alat izraden od tvrdog metala, od dijamanta, te alati sa dijamantskim ili karbidnim prevlakama. Takođe se u nekim slučajevima može koristiti i alat od brzoreznog čelika, ali uz odgovarajuće režime obrade i uz malu postojanost sječiva alata.

Geometrija reznog alata, pri obradi ovih materijala ima, takođe, presudan značaj na kvalitet obrade. Dobro definisana geometrija reznog alata podrazumijeva pravilno određivanje uglova sječiva i njihov raspored.

UČELIŠTA NEŽNOSU, SPOLJNA IZ OBLASTI VLAŽNOG KOMPZITNOG MATERIJALA SA UČLJENIČNIM I ARAMIDNIM VLAKNAMA Tabela 2.

VRSTA, OBRABE	KOMPZIT - ugljenična vlakna	KOMPZIT - aramidna vlakna ("KELVAR")
<p>S P O L J N A O B R A D A</p>		
<p>O B R A D A O T V O R A</p>		
<p>O B R A D A S J E Č E N J E M</p>		

ORIJENTACIONE VRIJEDNOSTI REŽIMA OBRADJE (ZA ODREĐENE ALATE) PRI OBRADI  
 KOMPOZITNIH MATERIJALA OD UGLJENIČNIH I ARAMIDNIH VLAKANA ("KEVLAR®")

Tabela 3.

V R S T A O B R A D E	KOMPOZIT - ugljenična vlakna			KOMPOZIT - aramidna vlakna		
	Materijal alata	Brzina rezanja	Brzina pomoćnog kretanja	Materijal alata	Brzina rezanja	Brzina pomoćnog kretanja
S P O L J N A O B R A D A (GLODANJE)	Tvrdi metal (K-10)	80-130 (m/min)	200-700 (mm/min)	Tvrdi metal (K-10)	250-400 (m/min)	400-800 (mm/min)
	Brzorezni čelik (HSS-E)	12-18 (m/min)	0,02-0,05 (mm/o)	Brzorezni čelik (HSS-E)	10-15 (m/min)	0,02-0,05 (mm/o)
	Tvrdi metal (K-10)	40-60 (m/min)	0,03-0,1 (mm/o)	Tvrdi metal (K-10)	50-120 (m/min)	0,05-0,1 (mm/o)
B U Š E N J E	Brzorezni čelik (HSS-E)	5-8 (m/min)	0,02-0,05 (mm/o)	-	-	-
	Tvrdi metal (K-10)	12-20 (m/min)	0,03-0,08 (mm/o)	-	-	-
RAZVRTANJE	Tvrdi metal (K-10)	30-40 (m/min)	0,05-0,1 (mm/o)	Tvrdi metal (K-10)	30-60 (m/min)	0,05-0,1 (mm/o)
	SJEČENJE: (trakasta i kruž- na testera)	Rezna površ. presvučena dijamantom	1200-2000 (m/min)	150-800 (mm/min)	Tvrdi metal (K-10)	1400-2500 (m/min)

- Pri radu alatom od brzoreznog čelika, korišteno je sredstvo za hlađenje.  
 - Do podataka datih u tabeli došlo se laboratorijskim ispitivanjima i provjerom tih i literaturnih podataka u proizvodnim uslovima.

## 5. Z A K L J U Č A K

Na osnovu iznijetog daju se slijedeći zaključci:

- Mehaničke osobine kompozitnog materijala, na bazi ugljeničnih i aramidnih vlakana, svedene na jedinicu njegove težine, su izvanredne, što i jeste razlog njegove sve veće primjene u savremenim konstrukcijama vazduhoplova.

-Primjenom ovih materijala u izgradnji djelova vazduhoplova ograničena je nemogućnošću izrade djelova u određenoj kvaliteti posejćim tehnološkim sredstvima i uobičajenim tehnologijama.

-Za efikasnu izradu djelova od ovih materijala neophodno je vršiti daljna istraživanja procesa obrade rezanjem i taj proces optimirati izborom sredstava rada i režima obrade. Posebnu pažnju treba posvetiti izboru materijala i geometrije alata.

-Obzirom na geometrijsku složenost djelova neophodno je raditi na razvoju novih postupaka za obradu kompozitnih materijala na bazi ugljeničnih i aramidnih vlakana.

## L I T E R A T U R A

- [1] Mel M.Schwartz: Composite materials Handbook, NewYork,1983.
- [2] Časopis: Journal of plastics and composites, No,4,5,8, SAD Pennsylvania, 1987/88.
- [3] Časopis: Fibre Composites; Desing, Manufacture and Performance, Univerzity of Cambridge, England, 1983.
- [4] M. Maslač,A.Mišković: Prilog studiji o obradivosti kompozitnih materijala na bazi ugljeničnih i aramidnih vlakana, Zbornik radova, Vazduhoplovna industrija "Soko" Mostar,1989.

M.Maslač,A.Mišković

TREATMENT FACILITIES OF CARBON AND ARAMID FIBER BASED COMPOSITE MATERIALS AND THEIR APPLICATION IN AIRCRAFT MANUFACTURING

S u m m a r y

Carbon and aramid fiber based composite materials are more often used during manufacturing of essential aircraft parts. Treatment conditions during cutting of mentioned materials are significantly differ conventional materials.

Given results represent theoretic and experimental research survey of cutting treatment of mentioned materials with accent on treatment regime, type and tool geometry.

J. KEVELJ \*

PRILOG STUDIJI ZAVRŠNE OBRADJE OTVORA U  
SENDVIĆ KONSTRUKCIJAMA-DIJELOVIMA VAZDUHOPLOVA  
OD Ti-LEGURA I DURALUMINIJUMA \*\*

1. U V O D

Kod izrade elemenata vazduhoplova često se susrećemo sa posebnim zahtjevima kod izrade preciznih otvora, naročito u onim slučajevima kada je potrebno obezbjediti složeno uzajamno spajanje radnih komada, spajanje čvorova i kao glavno obezbjediti zamjenljivost. Pored koncentričnosti, paralelnosti, ovalnosti, okomitosti i dr. posebni su zahtjevi u pogledu hrapavosti obrađene površine, obično je to  $Ra=0,8$  mm. Problem je veći, ako se radi o sendvić konstrukcijama, kojih ima mnogo na jednom vazduhoplovu, gdje se susrećemo sa istovremenom obradom veznih materijala. U radu su korišteni materijali koji svojim mehaničkim i drugim osobinama zauzimaju visoka mjesta u zastupljenosti u savremenoj avio i raketnoj industriji. Razvoj vazduhoplovnog programa u svijetu, velike zahtjeve polaže u tehnološki progres u svrhu poboljšanja osobina vazduhoplova, poboljšanja izrade vazduhoplovnih struktura imajući u vidu ograničenje težine uz poboljšanu ili zadržanu žilavost i čvrstoću.

\*/ Mr Jusuf Kevelj, dipl. inž. asistent istraživač, Preduzeće VI SOKO Mostar

\*\*/ Rad predstavlja sastavni dio naučno-istraživačkog projekta "Produktika", koji finansira VI SOKO MOSTAR i RZNR SR BiH

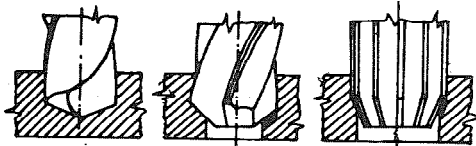


## 2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE RAZVOJA TEHNOLOGIJE ZA OBRADU OTVORA POVIŠENOG KVALITETA

Otvor koji je samo izbušen burgijom nije često dovoljno tačan ni okrugao. Proširivanjem se otvor može tačnije raditi, ali sve to nije dovoljno kada se traže složenije tolerancije i visok kvalitet obrađenog otvora. Problem se, uglavnom može riješiti razvrtanjem, provlačenjem, brušenjem eventualno i lepovanjem.

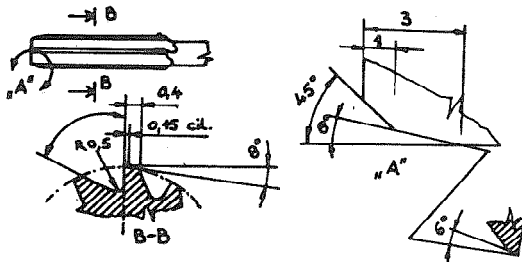
### 2.1 Obrada otvora povišenog kvaliteta po tehnologiji bušenje-proširivanje-razvrtanje.

Razvrtanje ima prednost što se razvrtačem može obraditi veliki broj jednakih otvora istog prečnika i čistoće obrade. Razvrtanje se obavlja poslije obrade bušenjem ili proširivanjem, tako da se razvrtačem postiže željena klasa kvaliteta površine. Obrada se izvodi jednim ili sa više razvrtača. Prvi skida dvije trećine sloja (dodatka za obradu), a posljednji preostalu jednu trećinu dodatka. Dodatak za obradu ne smije biti suviše veliki jer se time otežava rad



sl. 1 Bušenje-proširivanje-razvrtanje

i obrađena površina nije fina. Moguće je da razvrtač stvara talasastu deformisanu površinu. Proces rezanja svakog zuba moguće je posmatrati kao da rezanje vrši jedan širok nož sa malom debljinom strugotine.



Sl. 2 Razvrtač za obradu Ti-legura

## 2.2. Obrada otvora povišenog kvaliteta provlačenjem

Uprkos relativno skupe izrade provlakača, za završnu obradu otvora primjenjuje se provlačenje. To je visoko produktivan i tačan metod obrade. Mada kvalitet obrađene površine zavisi od raznih uticajnih faktora (vrsta materijala provlakača i predmeta obrade, vrste termičke obrade materijala, brzine rezanja, SHP i td), mogu se generalno dati sledeći orjentacioni podaci.

Pri provlačenju čelika ostvaruje se hrapavost obrađene površine  $Ra=0,3-6,3 \mu m$ . Kod provlačenja obojenih i lakih metala postiže se i niža hrapavost. U obradnom sistemu provlačenja posebno je interesantan elat-provlakač. Kod uvođenja obrade provlačenjem, treba razmotriti sledeća pitanja:

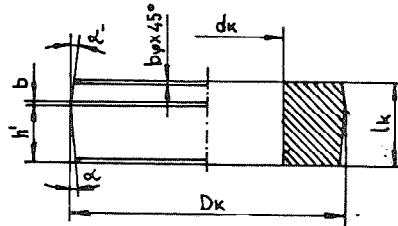
- stvarno povećanje kvaliteta obrade i smanjenja škarta,
- smanjenje vremena obrade uz povećanu produktivnost, što dovodi do snižavanja troškova,
- poboljšanje radnih uslova poslužioca i dr.

U slučaju da je neophodno dobiti posebno kvalitetnu, sjajnu očišćenu površinu radnog predmeta radi zbijanja površinskog sloja metala radi utiskivanja čaura, ležajeva i slično, primjenjuju se provlakači sa zubima-zbijačima. Provlakači za glačanje ne režu metal, već vrše plastičnu deformaciju metala u hladnom stanju. Zbog elastične deformacije materijala prečnik otvora je po pravilu različit od prečnika provlakača. Dimenzije elemenata profila zuba zbijača dati su u [7] .

Važan posao pri razradi tehnološkog procesa provlačenja sa deformacijom i uređaja jeste proračun i projektovanje deformabilnih provlakača od tvrdog metala. Najodgovorniji dio procesa je radni element. Osnovne etape razrade i projektovanja uređaja su:

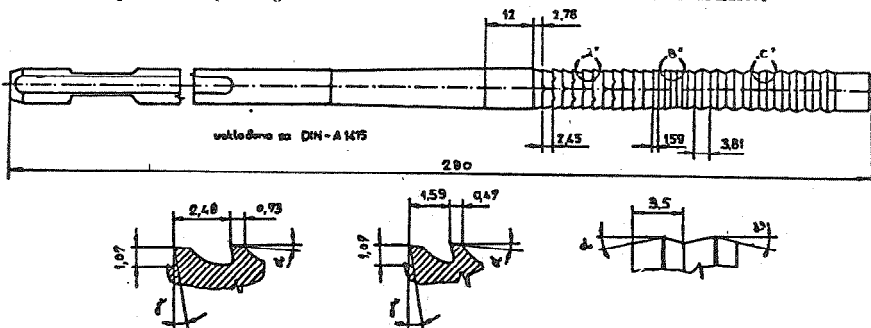
- izbor tipa tvrdog metala za elemente koji deformišu,
- proračun čvrstoće radnih elemenata,
- konstrukcija pomoćnih detalja provlakača.

Izrada elemenata provlakača koji deformišu od tvrdog metala, značajno proširuju tehnološke mogućnosti i oblast primjene provlačenja sa deformisanjem. Deformabilni elementi od tvrdog metala karakterišu se sa



sl. 3 Deformabilni element simetrično opterećenog oblika, bez unutrašnjeg konusa

Stabilnošću koja višestruko prevazilazi stabilnost čeličnih deformabilnih elemenata i značajno manjom sklonošću ka ljepljenju sa obrašivanim materijalom. Najpogodniji za izradu deformabilnih provlakača su tvrdi metali grupe GV [6] koji se karakterišu optimalnim sastavom i takvih osobina kao što su: otpornost na habanje, čvrstoća i sklonost prijanjanja uz obrašivani materijal, što im sve ukupno daje visoku radnu sposobnost u uslovima trenja, temperatura i prisutnih kontaktnih pritisaka karakterističnih za provlačenje sa deformisanjem. Zavisno od tipa obrašivanog otvora, uslova obrade i dr. koriste se razne kombinacije rezanja i deformisanja. U radu je korišten rezo deformabilni provlakač. Konstrukcija provlakača [1] na kojima se radi baziraju se na eksperimentalnim istraživanjima procesa obrade provlačenjem uz primjenu elektronskih računskih mašina.

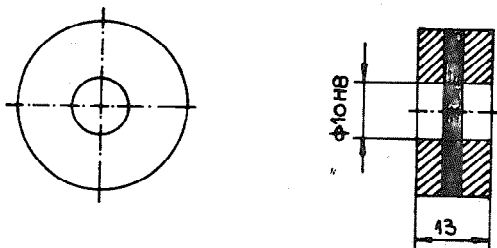


Sl. 4 Rezo-deformabilni provlakač sa pločicama od TM

### 3. REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA DOBIVENIH U PROIZVODNIM USLOVIMA

- 3.1 Vrijednosti parametara za definisanje integriteta obrađene površine, dobivenih pri izradi otvora bušenjem-proširivanjem-razvrtnjem.

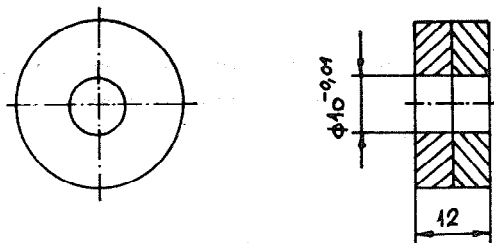
Obzirom na nivo obrade i zahtjeve koji se postavljaju, tehnologija izrade preciznih otvora je sledeće: otvor se buši, proširuje, a zatim razvrće. Često puta je potrebno i lepovanje, zavisno od zahtijeva konstruktivnog crteža komada.



sl. 5 Uzorak sendvić konstrukcije:  
duraluminijum-kevlar-Ti legura

Tabela 1

BROJ UZORKA	OBRAĐIVANI OTVOR Ø10H8				
	Rezultati mjerenja				
	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	RS [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]	tp(0,5) [%]	D [mm]
1	1,1	1,40	13,52	100	10,018
2	0,85	0,89	26,90	86	10,010
3	0,97	0,98	15,30	70	10,015
4	0,920	1,09	18,57	90,3	10,009
5	1,14	0,98	14,70	98	10,012
6	1,22	1,21	9,70	77	10,018
7	1,20	1,25	12,00	70	10,010
8	1,17	1,13	12,13	82,3	10,016



sl. 6 Uzorak sendvič konstrukcije:  
duraluminijum - Ti. legura

Tabela 2

BROJ UZORKA	OBRAĐIVANI OTVOR Ø10H8				
	Rezultati mjerenja				
	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	R <sub>F</sub> [ $\mu\text{m}$ ]	R <sub>t</sub> [ $\mu\text{m}$ ]	tp (0,5) [%]	D [mm]
1	0,71	0,67	7,52	100	10,009
2	0,69	0,63	4,48	100	10,012
3	0,73	0,66	5,49	100	10,018
4	0,73	1,62	5,83	95	10,006
5	0,7	0,66	5,82	98	10,010
6	0,73	0,67	5,82	100	10,015
7	0,8	0,69	7,28	100	10,018
8	0,70	0,68	6,32	97	10,014

3.2 Vrijednost parametara za definisanje integriteta obrađene površine, dobiveni pri izradi otvora provlačenjem.

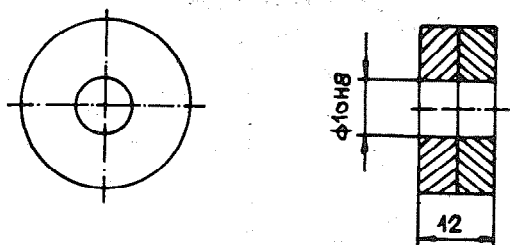
U ovom postupku obrade preciznih otvora predlaže se izrada otvora provlačenjem. Kod provlačenja je neznatno prisutna makro hrapavost, ovalnost, odstupanje prečnika i sl. U radu su korištene legure aluminijuma i titana.

Duraluminijum (W.3.1354.6) zbog svoje relativno male specifične težine i dobrih mehanički osobina ima veoma široku primjenu u vazduhoplovstvu.

Titan i titanove legure (TA6V) su tokom zadnjih godina napravili veoma brz razvoj radi njihovih specifičnih karakteristika:

- mala specifična težina, između aluminijuma i čelika
- velika mehanička otpornost, naročito za legure, udružena sa dobrim osobinama pri zamaranju,
- otpornost na koroziju u velikom broju medija, i td.

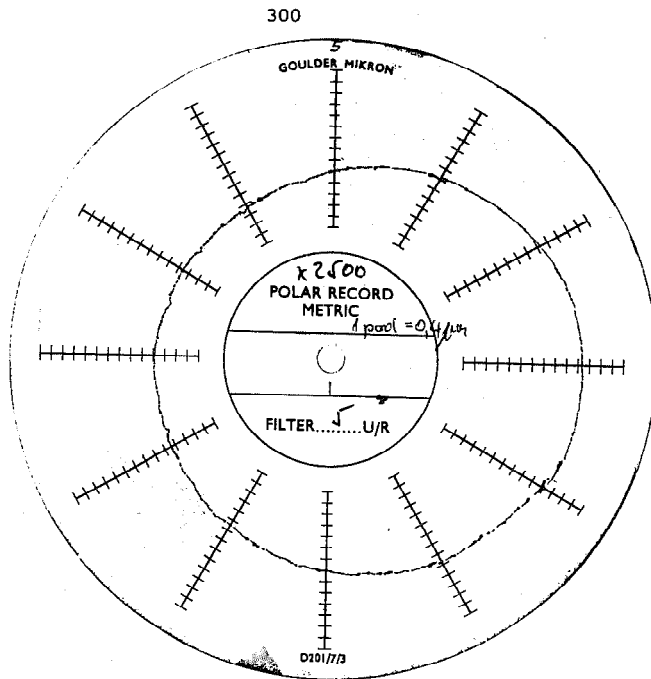
Pri definisanju integriteta obrađene površine pošto se od definisanja parametara Ra, Rs, Rt, tp i D.



sl. 7 Oblik epruvete: sendvić konstrukcija duraluminijum - Ti legura

Tabela 3

Provlakač sa TM P-020		OBRAĐIVANI OTVOR $\phi 10^{-0,010}$				
		Rezultati mjerenja				
Br. eksp.	Materij.	Ra [ $\mu\text{m}$ ]	Rs [ $\mu\text{m}$ ]	Rt [ $\mu\text{m}$ ]	tp (0,5) [%]	D [mm]
1	3.1354.6	0,138	0,096	1,91	100	9,998
	TA 6V	0,136	0,088	2,48	100	
2	3.1354.6	0,130	0,080	3,14	100	9,999
	TA 6V	0,130	0,070	3,80	100	
3	3.1354.6	0,196	0,169	4,15	100	10,000
	TA 6V	1,135	0,060	5,92	100	
4	3.1354.6	0,150	0,113	2,56	100	9,998
	TA 6V	0,125	0,070	4,02	100	
5	3.1354.6	0,220	0,330	7,40	100	10,000
	TA 6V	0,150	0,100	7,08	100	
6	3.1354.6	0,170	0,180	4,25	100	10,000
	TA 6V	0,130	0,060	4,87	100	
7	3.1354.6	0,135	0,158	5,73	100	10,000
	TA 6V	0,110	0,080	6,03	100	
8	3.1354.6	0,175	0,118	5,72	100	10,000
	TA 6V	0,130	0,080	6,02	100	



sl. 8 Polarni dijagram (epruveta 5)

#### 4. ZAKLJUČAK

1. Proces obrade sendić konstrukcija je složen proces, a ta složenost se očituje u prisustvu visokih specifičnih pritisaka u zoni rezanja.
2. Analizirajući integritet obrađene površine i greške koje nastaju u toku procesa obrade, uočljivo je da se na poboljšanje integriteta može uticati izborom adekvatnih sredstava rada i zborom odgovarajuće tehnologije.
3. U poređenju sa postojećim tehnologijama može se konstatovati da je vrijeme obrade kraće za 5-20 puta, a integritet obrađene površine, uzet preko parametra srednjeg aritmetičkog odstupanja profila, bolji i do deset puta, što povećava kvalitet obrade za dvije do tri klase.

## 5. L I T E R A T U R A

- [ 1 ] J.Kevelj : Razvoj postupaka izrade preciznih otvora provlačenjem, magistarski rad, Mostar 1984. godine.
- [ 2 ] A.Mišković.D.Vukelja, J.Kevelj: Neke nove mogućnosti izrade preciznih otvora, XII Savjetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Mostar, 1982. godine
- [ 3 ] A.Mišković, J.Kevelj, D.Vukelja: Mogućnost izrade preciznih otvora provlačenjem, Vidici, Mostar, 1985.godine.
- [ 4 ] A.Mišković, J.Kevelj, D.Vukelja: Izrada preciznih otvora provlačenjem i tehnološke mogućnosti primjene u vazduhoplovstvu, XIX savjetovanje proizvodnog mašinstva Jugoslavije, Kragujevac 1985. godine
- [ 5 ] D.Vukelja, A.Mišković: Konstrukcija alata za obradu rezanjem, Mašinski fakultet, Mostar 1984. godine
- [ 6 ] M.Rozenberg: Rasčot i projektirovanie tvrdošplavnih defomirujuščih protjažek i procesa protjagivanija, Kiev 1978. god.

J.KEVELJ

ANNEXE A L'ETUDE CONCERNANT L'USINAGE FINAL DES TROUS DANS LA  
CONSTRUCION DE SANDWICH DANS LES PIECES D'UN AERONEF EN  
ALLIAGE DE TITANE ET EN DURALUMIN.

## R E S U M E

La technologie de realisation des aeronefs, ainsi que l'autre industrie des metaux, exprime les exigences de realisation des trous de haute qualite y compris en meme temps la fiabilite et la stabilite de leur realisation. La mise en oeuvre de nouvelles matieres impose de nouvelles technologies de fabrication des elements d'aeronef.



...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...

...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...

...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...

...

...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...

...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...  
...the ... of ...

A. Perić \*

SUMARNA ISKUSTVA O NOVIJIM ISTRAŽIVANJIMA  
EKONOMSKE POSTOJANOSTI ALATA

1. UVOD

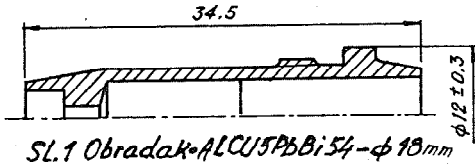
Postojeća teoretska rješenja za proračun ekonomske postojanosti alata bazirana su na kontinualnom rezanju [1-9] i na daju tačne rezultate za razne slučajeve rezanja. Isto važi i za literaturne preporuke [10-16] date po iskustvu u pojedinim slučajevima obrade. U radovima [17,18] u jednoalatnoj obradi rezanjem po prvi put se iskazuje bitan uticaj pomoćnog vremena na ekonomsku postojanost tj. uzima u obzir postojanje periodičnog rezanja. Već duži niz godina kroz brojna istraživanja postupno je vršen sistematski razvoj i verifikacija originalno razvijene teorije i proračuna ekonomske postojanosti alata. [19-27].

Ova novija istraživanja vršena su na nizu obrada i mašina putem proračuna i eksperimentalnog metoda pogonskih opita, koji je razvijen i ispitan na nizu poluautomatskih i automatskih alatnih mašina za obradu rezanjem. Parcijalno su dijelovi tih istraživanja već objavljeni i tako su parcijalno i shvaćeni i prihvaćeni. Međutim, u ovome radu daju se prvi put sumarna iskustva o ovim savremenim istraživanjima ekonomske postojanosti alata upoređena sa literaturnim preporukama. Uraznim obradama na raznim alatnim mašinama izvršen je niz ovih istraživanja i dobijeno je preko 10 rezultata značajnih za teoriju i praksu ekonomije procesa rezanja. Istraživanja su vršena kod jednoalatne i višealatne obrade na strugovima i bušilicama u slučaju obrade različitih obradaka od različitih materijala kao osovina, prirubnica, poluosovina, glavčina zupčanika, čaura, glavčina točkova i sl.

\* Dr Aristid Perić, dipl.ing., redovni profesor Mašinskog fakulteta Univerziteta u Sarajevu, Ul. Omladinsko šetalište bb

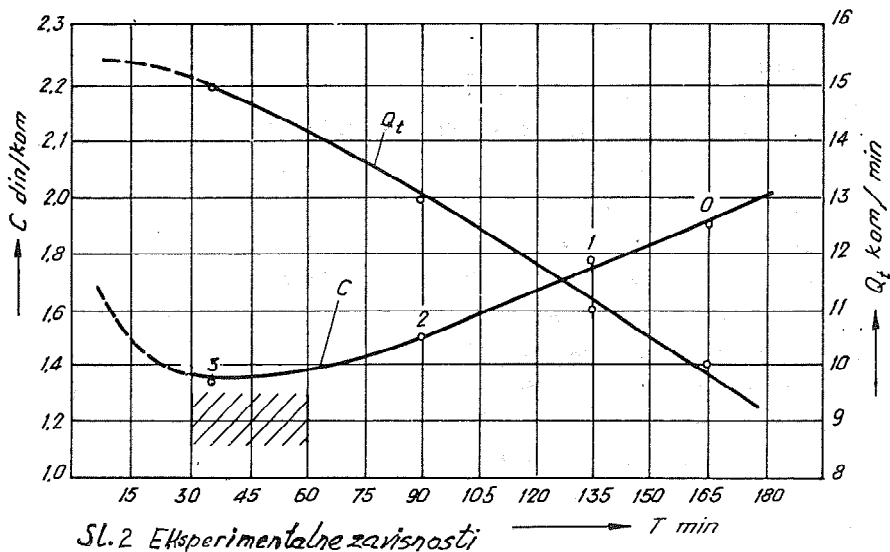
## 2. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

### 2.1. Rezultati istraživanja na 6-vretenom automatu [19,21,23]



SL.1 Obradak ALCU5PB Bi 54 -  $\phi$  19 mm

Mašina:  
Šestovreteni automatski  
strug-Tornos AS14  
 $P=7,4 \text{ kW}$ ,  $n=900-6000 \text{ m}^{-1}$ ,  
rad sa 13 alatima.  
 $Q=1.000.000 \text{ kom/god}$ -2 smjene



SL.2 Eksperimentalne zavisnosti

Tabela 1. Podaci za proračun

$t_r$ (min)	0,01	0,024	0,077	0,023	0,077	0,022	0,071	0,035	0,03	0,0081	0,042	0,021	$t_c$ (min)
$T_{rad}$ (min)	229	2300	180	238	3284	910	7900	8400	13700	22940	22760	15500	0,1

Teoretski proračun ekonomske postojanosti alata

$$T_{kva} = I \cdot \sum_{i=1}^k \left( \frac{1-m_i}{m_i} \right) \left( t_{smi} + \frac{C_{Ai}}{C_M} \frac{F_i}{S_i} \right) = 0,1 \left[ 20 \frac{1}{7} + 60 \frac{2,4}{10} + 35 \frac{7,7}{0,8} + 60 \frac{0,25}{7} + 35 \frac{7,7}{14,3} + 20 \frac{2,2}{4} + 60 \frac{7,1}{3,4} + 60 \frac{3,47}{3,67} + 60 \frac{3}{60} + 60 \frac{0,8}{100} + 60 \frac{4,3}{100} + 35 \frac{2,1}{6,8} \right] = 0,1 \cdot 440 = 44 \text{ min}$$

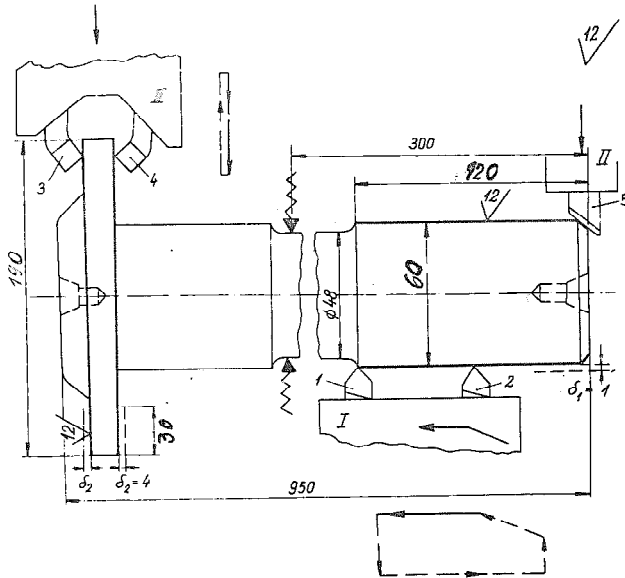
Tabela 2. Upoređivanje vrijednosti ekonomske postojanosti alata

	Teoretski proračun [19]	Eksperimentalne vrijednosti [24]	Programirana na mašini [23]	Preporuka prema literaturi [7,12]	Snimljena na mašini [21,25]
$T_{kva}$ (min)	45	40-48	180	180-200 240-480	165

## 2.2. Rezultati istraživanja na višereznom strugu

Obradak ČA131  
poluosovina-otkivak

Mašina:  
Poluautomatski višerezni strug  
tip 116-SSSR,  $P=10,5 \text{ kW}$ ,  $n=45-1400 \text{ min}^{-1}$   
 $Q=530 \text{ kom/dan}$ , 2 smjene, 5 alata



Sl 3. Plan postavljanja alata na višereznom strugu

Tabela 3. Podaci za proračun

Alat	1	2	3	4	5	$t_p$ (min)	$t_c$ (min)
$t_r$ (min)	0,88	0,88	0,91	0,91	0,14	0,5	1,41
Trac (min)	660	660	190	190	2980		

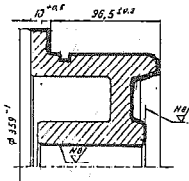
Teoretski proračun ekonomske postojanosti alata

$$T_{ekva} = I_0 \sum_{i=1}^{i=k} \left( \frac{1-m_i}{m_i} \right) \left( t_{smi} \frac{C_{AI}}{C_M} \frac{P_i}{z_i} \right) = 0,66 \left[ 2 \left( \frac{1-0,125}{0,125} \right) \left( 1 + \frac{80}{8,7} \frac{0,88}{0,91} \frac{190}{660} \right) + 2 \left( \frac{1-0,2}{0,2} \right) \right. \\ \left. \left( 1 + \frac{100}{8,7} \right) \frac{0,91}{0,91} \frac{190}{190} + \left( \frac{1-0,125}{0,125} \right) \left( 1 + \frac{80}{8,7} \right) \frac{0,14}{0,91} \frac{110}{2980} \right] = 0,66 \cdot 144 = 95 \text{ min}$$

Tabela 4. Upoređivanje vrijednosti  $T_{ekva}$

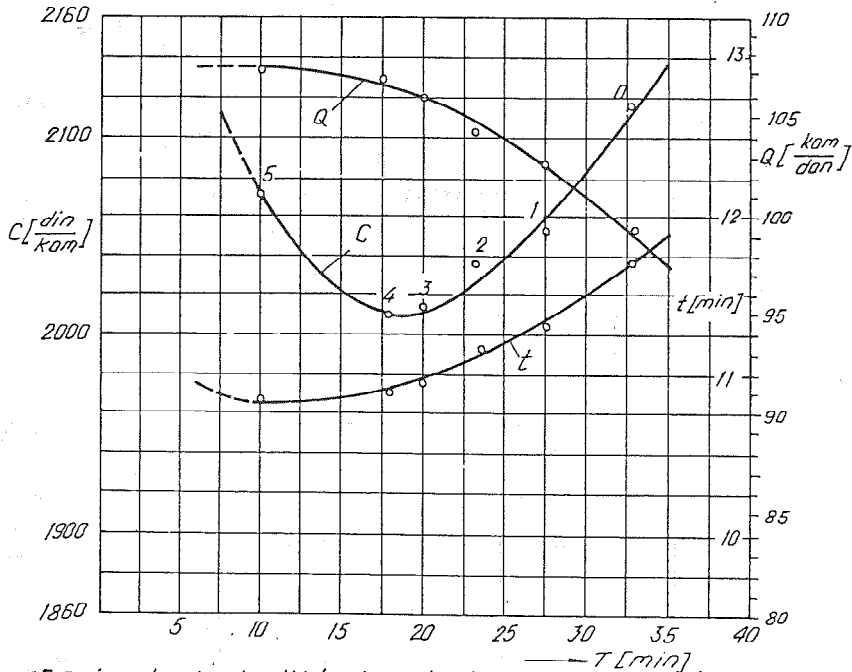
	Teoretski proračun	Preporuka prema literaturi [2,7]
$T_{ekva}$ (min)	95	120-150

2.3. Rezultati istraživanja na NC strugovima [20,22,23] – Primjer 1



Mašina:  
CNC strug MD105, Gildemeister  
Max Miller D=40kW, n=14-2800min<sup>-1</sup> (kont),  
revolverska glava za 14 alata, 5 alata  
Q ≈ 132 kom/dan, 2 smjene

Sl.4 Obradak G4732



Sl.5. Zavisnost proizvodnosti i troškova obrade od postojanosti alata

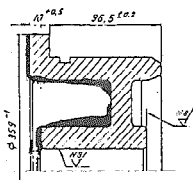
Teoretski proračun ekonomske postojanosti alata –  $q_i = 1$

$$T_{ekva} = T_0 \sum_{i=1}^{i-k} \left( \frac{1-m_i}{m_i} \right) (t_{sm_i} + \frac{C_{ai}}{C_m}) p_i = 0,56 \left[ \left( \frac{1-0,25}{0,25} \right) \left( 1 + \frac{350}{176} \right) \cdot 1 + \left( \frac{1-0,25}{0,25} \right) \left( 1 + \frac{150}{176} \right) \cdot 1,84 + \left( \frac{1-0,25}{0,25} \right) \left( 1 + \frac{350}{176} \right) \cdot 0,206 + \left( \frac{1-0,25}{0,25} \right) \left( 1 + \frac{150}{176} \right) \cdot 0,38 + \left( \frac{1-0,2}{0,2} \right) \left( 1 + \frac{250}{176} \right) \cdot 1,07 \right] = 0,56 \cdot 33,2 = 18 \text{ min}$$

Tabela 5. Upoređivanje vrijednosti ekonomske postojanosti alata

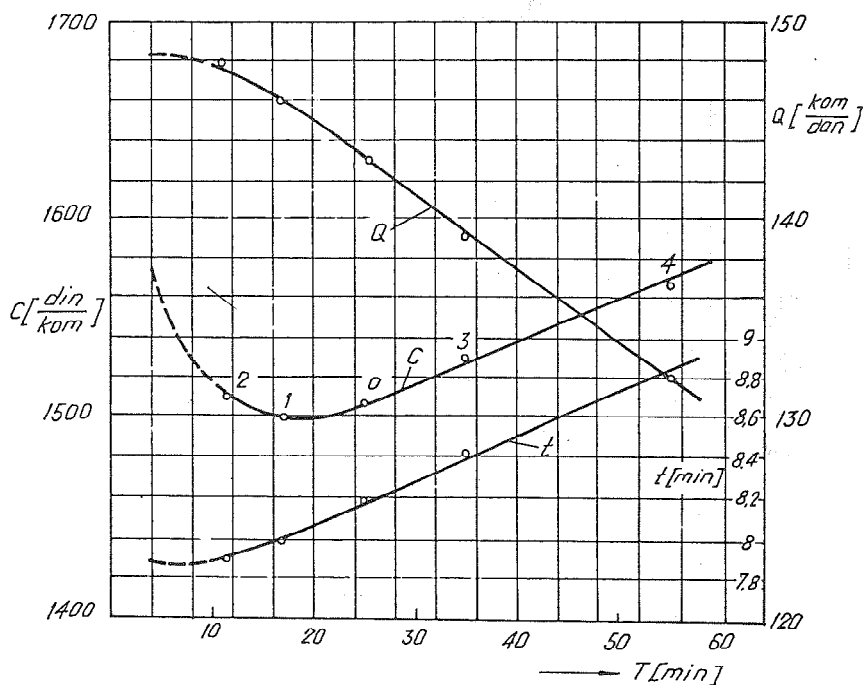
	Teoretski proračun [20]	Ekspерiment, vrijednost [22]	Programirana na mašini [23]	Preporuka prema literaturi [23,14,15]	Snimljena na mašini [22,23]
$T_{ekva}$ (min)	18	17-20	~31	10	34

## 2.4. Rezultati istraživanja na NC strugovima [23] – Primjer 2



Mašina:  
CNC strug MD10S, Gildemeister  
Max Miller, P=40 kW, n=14=2800 min<sup>-1</sup>  
(konl), revolverska glava za 14 alata  
Q ≈ 100 kom/dan – 2 smjene, 4 alata

## Sl. 6 Obradak Č.4732



Sl. 7. Zavisnost proizvodnosti i troškova obrade od postojanosti alata

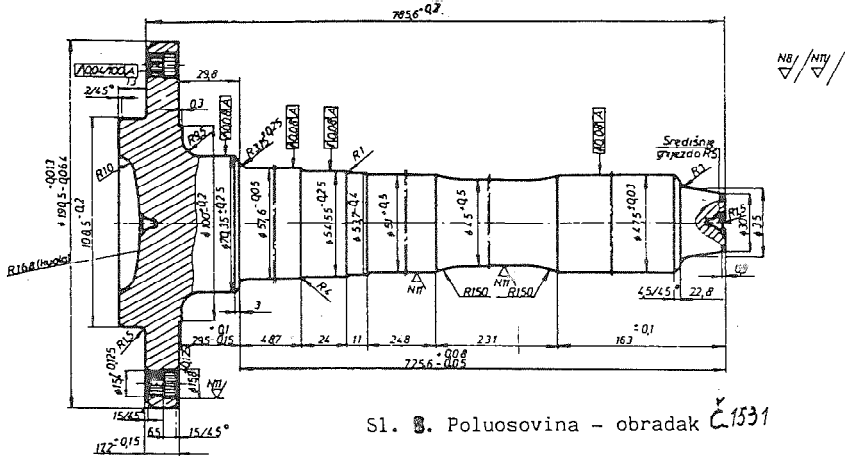
Teoretski proračun ekonomske postojanosti alata –  $q_i = 1$ 

$$T_{ekva} = T_1 \sum_{i=1}^k \left( \frac{1-m_i}{m_i} \right) \left( t_{smi} + \frac{C_{ai}}{C_M} \right) p_i = 0,16 \left[ \left( \frac{1-0,25}{0,25} \right) \left( 1 + \frac{250}{176} \right) 1 + \left( \frac{1-0,25}{0,25} \right) \left( 1 + \frac{360}{176} \right) 6,377 + \left( \frac{1-0,25}{0,25} \right) \left( 1 + \frac{350}{176} \right) 10,2 + \left( \frac{1-0,25}{0,25} \right) \left( 1 + \frac{350}{176} \right) 0,22 \right] = 0,16 \cdot 158 = 25 \text{ min}$$

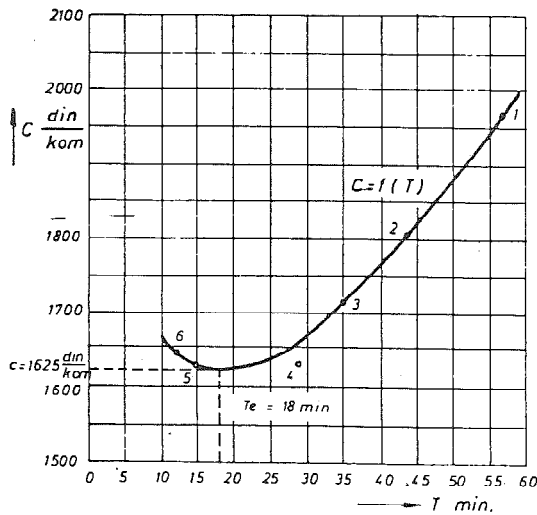
Tabela 6. Upoređivanje vrijednosti ekonomske postojanosti alata

	Teoretski proračun [23]	Eksperimentalna vrijednost [23]	Programirana na mašini [23]	Preporuka prema literaturi [13,14,15]	Snimljena na mašini [23]
Tekva (min)	25	17-23	27	10	25

2.5. Rezultati istraživanja na NC strugovima [24] Primjer 3



Sl. 8. Poluosovina - obradak Č.1531



Mašina:  
CNC revolverski strug  
TH 480 Prvomajska  
P=26 kW, n=12-3150 min<sup>-1</sup>,  
rad sa 4 alata,  
Q=250 kom/lan-2 smjene

Sl. 9 Zavisnost troškova obrade po komadu od postojanosti

Teoretski proračun ekonomske postojanosti alata -  $q_i = 1$   
 $T_{ekva} = T \sum \left( \frac{1-m_i}{m_i} (t_{smi} + \frac{C_{ai}}{C_M}) \right) P_i = 0,48 \left( \frac{1-0,2}{0,2} \right) \left[ \left( 1 + \frac{756}{378} \right) 1 + \left( 1 + \frac{771}{378} \right) 0,337 + \right.$   
 $\left. + \left( 1 + \frac{970}{378} \right) 0,48 + \left( 1 + \frac{771}{278} \right) 0,665 \right] = 17 \text{ min}$

Tabela 7. Upoređivanje vrijednosti ekonomske postojanosti alata

	Teoretski proračun [24]	Eksploziv. vrijednosti [24]	Programirana na mašini [24]	Preporuka prema literaturi [13-15]	Snimljena na mašini [24]
$T_{ekva}$ (min)	17	15-20	~40	10	~57

## 2.6. Rezultati istraživanja na NC strugovima - Primjer 4 - i običnim revolverskim strugovima [25]

Tabela 8. Podaci i primjer proračuna vrijednosti  $I$  i  $p$

Obradak - Zupčanik Č. 1531		NC strug RN 40, Gildemeister, P=20kW Plan postavljanja alata												
<p>Skica</p>														
4-kt. Revolver. glava	Pos. NC	Alat	Materijal	$m$	$L$ mm	$D$ mm	$a$ mm	$s$ mm/ol	$v_{60}$ m/min	$n$ o/min	$t_r$ min	$I$	$p$ (za $t_{11}=0,77$ )	
I	1	Spiralna burgija	BRC	0,2	65	28	-	0,3	25	280	0,77	0,37	1	
	2	Nož za obradu otvora, uzdužno	P20	0,2	~48	~30	1	0,15	132	1400	0,234	0,15	0,3	
Plaćasta revolver-ska glava	V	Nož za poprečnu obradu	P20	0,2	21	70		0,3	123	560	0,125	0,09	0,15	
	VI	Nož za uzdužnu obradu	P20	0,2	24,2	70	5	0,3	~123	560	0,254	0,16	0,33	
					25	60	5	0,3	123	710				
	VII	5	Nož za kopiranje	P10	0,2	9	48	0,3	0,2	111	710	0,32	0,19	0,41
						0,5	50	0,3	~0,1					
18,5						50	0,3	0,2						
~5						29,5	0,3	0,1						
					3,7	67,4	0,3	0,2	66					
					2,3	72	0,5	0,15	150					

Teoretski proračun ekonomske postojanosti alata -  $q_1 = 1$

$$\text{NC strug: } T_{\text{teor}} = I \cdot \sum \frac{1-m_i}{m_i} \cdot (t_{sm} + \frac{C_{ai}}{C_M} p_i) = 0,38 \cdot (0,3 + \frac{133}{8,75}) \cdot 1 + (1 + \frac{105}{8,75}) \cdot 0,3 + (1 + \frac{105}{8,75}) \cdot 0,16 + (1 + \frac{105}{8,75}) \cdot 0,33 + (1 + \frac{105}{8,75}) \cdot 0,41 = 7 \text{ min}$$

Obični revolverski strug:

$$T_{\text{teor}} = I \cdot \sum \frac{1-m_i}{m_i} \cdot (t_{sm} + \frac{C_{ai}}{C_M} p_i) = 0,38 \cdot (0,3 + \frac{133}{8,75}) \cdot 1 + (1 + \frac{105}{8,75}) \cdot 0,3 + (1 + \frac{105}{8,75}) \cdot 0,16 + (1 + \frac{105}{8,75}) \cdot 0,33 + (1 + \frac{105}{8,75}) \cdot 0,41 = 0,38 \cdot 123 = 47 \text{ min}$$

Tabela 9. Upoređivanje vrijednosti ekonomske postojanosti alata

	NC revolverski strug		Obični revolverski strug	
	Teoretski proračun	Preporuka prema liter. [13-15]	Teoretski proračun	Preporuka prema liter. [2,5,7]
$T_{\text{teor}}$ (min)	7	10	47	150-200



## 2.7. Rezultati istraživanja na bušilicama [26]

Obrada se vrši na priрубnicama dijela bušenjem otvora na jednovretenoj, viševretenoj i agregatnoj bušilici sa tri jedinice

Za ovaj slučaj obrade kod rada više jednakih alata u jednakim uslovima je  $p_i=1$ ,  $q_i=1$ ,  $m_i=m$ , pa se iz univerzalnog izraza za ekonomsku postojanost alata dobija da je

$$T_{ekva} = I_1 \sum \left( \frac{1-m_i}{m_i} \right) \left( t_{sm} + \frac{C_{A_i}}{C_M} \right) \frac{p_i}{q_i} = I_1 k \left( \frac{1-m}{m} \right) \left( t_{sm} + \frac{C_A}{C_M} \right) = I_1 k \cdot T_{E_{I=1}}$$

Tabela 10.

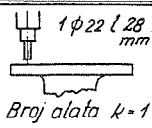
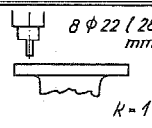
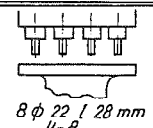
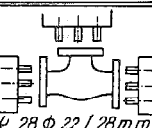
OPERACIJA	A - Jednoolatna obrada otvora	B - Redosljedno bušenje otvora	C - Višoolatno jednostrano bušenje	D - Višoolatno višestrano bušenje
SKICA PLANA ALATA	 1 φ 22 l 28 mm Broj alata k=1	 8 φ 22 l 28 mm k=1	 8 φ 22 l 28 mm k=8	 8 φ 22 l 28 mm k=8
ALAT	Burgija φ 22 - BRC - m=0,2, t <sub>sm</sub> =0,5 min, C <sub>A</sub> =100 dio, C <sub>M</sub> =8,7 $\frac{dio}{min}$			
OBRADAK	ČL. 1330 - G=120 N			
EKONOMSKI PERIOD REZANJA KOD JEDNOLATNE KONTINUALNE OBRADNE	$T_{E_{I=1}} = \frac{1-m}{m} \left( t_{sm} + \frac{C_A}{C_M} \right) = 50 \text{ min}$			
ORIJENTACIONI REŽIM REZANJA KOD KONTINUALNE OBRADNE	S=0,3 mm/o, n=280 o/min (V=25 m/min)			
Glavno vrijeme alata	$t_g - t_r = \frac{L}{s \cdot n} = \frac{30}{0,3 \cdot 280} = 0,36 \text{ min}$			
Međud alata t <sub>ne</sub> (min)	0,62 < t <sub>ne</sub>	0,27	0,62	0,62
$I = \frac{1}{1 + t_{ne}/t_r}$	0,37	0,57	0,37	0,37
$T_{ekva} = T_{E_{I=1}} \cdot I \cdot k$	19,5	28,5	148	518
$T_{kal} = T_{ekva} \frac{t_r + t_{ne}}{t_r}$	50	50	400	1400
$T_{ek,k} = T_{E_{I=1}} \cdot k [C_1, \partial]$	50	50	400	1400
$T_{kal,k} = T_{ek} \frac{t_r + t_{ne,k}}{t_r}$	136	87,5	1088	3808

Tabela 11. Preporuke za postojanost burgije φ22 - Jednoolatna obrada

φ22 Literatura burgija-BRC	[11]	[10]	[5]	[2]
Tekva(min)	~25	50	30-35	~40

## 2.8. Rezultati istraživanja na univerzalnim strugovima [27]

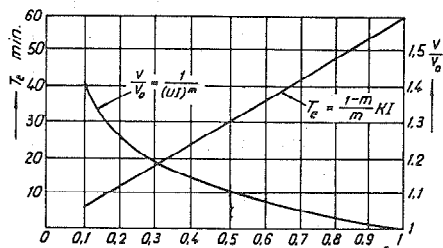
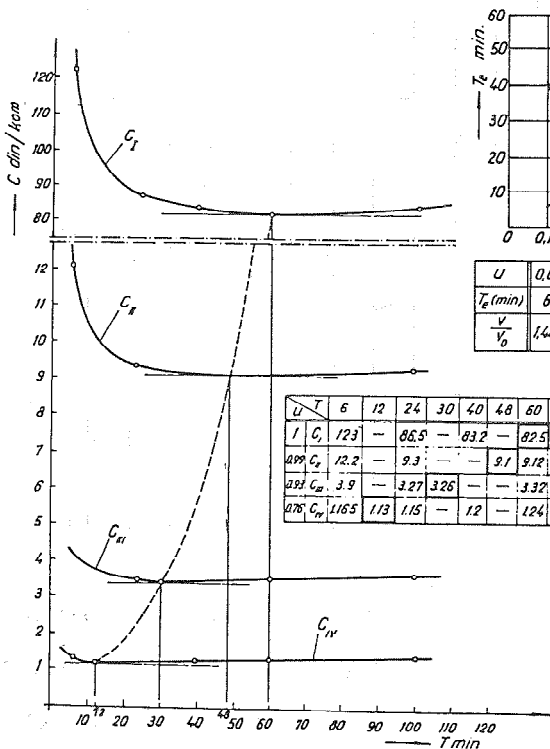
Tabela 2.

Obradak	No	I	II	III	IV	STRUG	D × L = 520 × 2000 mm
	Mat.	C 0545				Alat	Corbide T15 K6 (P10)
D <sub>0</sub> mm	511.62	100.33	106	106.6		b × h = 20 × 20 mm	
D × L mm	× 2000	× 850	× 214	× 40		f	1 -0.8 0.5 0.2
G N	1900	500	193	30		U	1 0.99 0.92 0.76
v <sub>0</sub> m/min	170				C <sub>H</sub> dn/min	1	
s mm/o	0.315				C <sub>0</sub> = $\frac{30 \pm}{1000 \pm}$	10200	850 226 42.5
d mm	1				C <sub>VT</sub>	284	
t <sub>0</sub> = t <sub>p</sub> min	60	5	1.33	0.25	C <sub>1</sub> = C <sub>0</sub> T <sub>0</sub>	36	3 0.8 0.15
t <sub>p</sub> min	15	3.5	1.82	1	m	0.125	
t <sub>NI</sub> min	0	-1.33	-1.33	1	t <sub>sm</sub> min	2	
t <sub>e</sub> min	15	2.17	0.49	0	K min	8.57	

Za  $p_i = q_i = k = 1, m_i = m$   
 dobija se iz univerzalnog  
 izraza da je  

$$T_e = I \left( \frac{1-m}{m} \right) (t_{sm} + \frac{C_A}{C_M}) =$$

$$= \frac{1-m}{m} K I$$



m = 0.125, K = 8.57 min.

Sl.10 Zavisnost C-T i T-I za razne obradke

Tabela 13. Preporuke za poslojnost noža 20x20mm Jednolateralna obrada

Nož 20x20mm P10	Literatura	[11]	[5 10]	[2]	[7]
T <sub>e</sub> (min)		40	60-90	30-40	40-60

## 3. ZAKLJUČAK

Rezultati novijih istraživanja ekonomske postojanosti alata daju mogućnost za slijedeći zaključak. Univerzalni izraz za ekonomsku postojanost alata, izveden u zavisnosti od faktora učestalosti rezanja, koeficijenta vremena rezanja i koeficijenta postojanosti alata, pokazao se tačan i valjan u svim slučajevima višealatne i jednoalatne obrade rezanjem. Tačnost proračuna po ovome izrazu eksperimentalno je verifikovana originalnim metodom u nizu opita kod višealatne obrade, pa se stoga proračun preporučuje za praktičnu primjenu kod alatnih mašina za obradu rezanjem. Ranije korištene literaturne preporuke javno su u neskladu sa rezultatima ovih istraživanja koja daju postojanost alata pri minimalnim troškovima obrade.

## Reference

- [1] Tajlor F.W., On the art of metal cutting, Traus, ASME, 1907,
- [2] Pankin A.V., Obrabotka mettalov rezaniem, Mašgiz, Moskva, 1961.
- [3] Armarego E.J.A., Brown R.H., The machining of metals Prentice-Hall, Inc, New Jersey, 1969.
- [4] Bobrov V.F., Osnovi teorii rezania metallov, Mašinstroenie, Moskva, 1973.
- [5] Stanković P., Mašinska obrada, građevinska knjiga, Beograd, 1967.
- [6] Perić A., Obrada metala rezanjem, Mašinski fakultet Sarajevu, 1977.
- [7] Filonenko S.N., Rezanie metallov, Technika, Kiev, 1975.
- [8] Temčin G.I., Teorija i rasčot mnogoinstrumentalnih naladok. M. Mašgiz, 1957
- [9] Zdenković R. Pregled analiza optimalnih i ekonomskih brzina za razne obrade, I Savjet.proiz.mašin.Jugoslavije, Zbornik saopštenja, Beograd, 1965.
- [10] Stanić J. i saradn., Priručnik za proračun režima rezanja, Pregled, Beograd, 1971.
- [11] , IT priručnik, knj. 4, Rad, Beograd, 1966,
- [12] Schwerd F., Werkzeugmaschinen, Springer Verlag, Berlin, 1956.
- [13] Opitz H., Moderne productionstechnik, Verlag W. Girardet, Essen, 1970.
- [14] Depereaux W.R., Ermittlung optimaler Schmittbedingungen insbesondere in Hinblick auf die Wirtschaftliche Nutzung numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen, Disertation, TH Aachen, 1969.

- [15] Vlach B., Technologie obrabeni, ČVUT, Praha, 1983.
- [16] Sandvik Coromant T-max, Tables of cutting Condition, Palemlads, Göteborg, 1985.
- [17] Stanković P., Specifična proizvodnost tehnološkog procesa i broj prolaza kao funkcija osnovnog vremena pri obradi, Zbornik SANU br. 8, 1958.
- [18] Tašlickii N.I., Rasčeta ekonomičeskoj stoikosti rezušćih instrumentov, Vestn, mašinstroenija 47, 1967.
- [19] Perić A., Optimisation of exploitation of multi-spindle bar automatic lathes, Proc. of AMST-87, Opatija, 1987.
- [20] Perić A., Sistem analysis and optimisation of exploitation of NC machine tool, Proc. of Intern. Symposium on NC-ROBOT-FMS, Beograd, 1986.
- [21] Perić A., Tafro H., Istraživanje postojanosti alata na više-vretenim automatima, Zbornik radova 21 Savjetovanje proizvod. maš. Jugoslavije, Opatija, 1987.
- [22] Perić A., Kulenović M., Kerleta N., Obitna minimizacija funkcije troškova po komadu kod NU revolverskog struga 4 Internac. (16 Jugoslov.) simpozijum Upravljanje proizvodnjom u metaloprerađivačkoj industriji, Beograd, 1986.
- [23] Perić A. i sarad., Istraživanje efikasnosti i ekonomičnosti tehnologije obrade na automatskim strugovima, Maš. fak. u Sarajevu, radjeno za SIZ nauke BiH, Sarajevo, 1987.
- [24] Perić A., Sendić M., Prilog optimizaciji procesa rezanja na NC strugovima, Zbornik saopštenja, 11 Jugoslovenski simpozijum NU-ROBOTI-FMS, Cavtat, 1989.
- [25] Perić A., Jedan način proračuna ekonomskog perioda rezanja za konvencionalne i NC revolverseke strugove. Zbornik radova, 19 Savjetov. proizvod. maš. Jugoslavije, Kragujevac, 1985.
- [26] Perić A., Istraživanje ekonomskog perioda rezanja kod rada više jednakih alata u jednakim uslovima, 17 Savjet proizvod. mašin. Jugoslavije, Titograd, 1983.
- [27] Perić A., Analysis of tool life for minimum cost per component at normal cutting in single-pass machining operations. Proc. of VI ICPR, Novi Sad, Jugoslavia, 1981.

A. Perić

SUMMARY EXPERIENCE OF NEW INVESTIGATION OF TOOL LIFE OF MINIMUM COST PER COMPONENT

S u m m a r y

Summary experience of new investigation of tool life of minimum cost per component are based on origin theory and calculation method and application of origin experimental method for verification of results. Investigation are made on lathe, one and multi-spindle drilling machine, semi-automatic and automatic lathe and NC machine. Validity and assurance of results indicate universal application of developed calculation method.



A. Hriešik \*

PRILOG OPTIMALIZACIJI TEHNOLOŠKIH  
PARAMETARA ZAVRŠNOG TOKARENJA

1. U V O D

U teoriji obrade metala skidanjem strugotine, kao i u svakodnevnoj praksi tehnologa pri određivanju parametara rezanja grube obrade, poznata je metodika iskorištenja snage tokarilice.

Mnogo teži i složeniji problem jeste odabrati optimalne (maksimalne) parametre presjeka strugotine za finu odnosno završnu obradu. Tu se javljaju, pored ostalih, dva značajna zahtjeva: postići propisanu kvalitetu površine, i ostvariti točnost oblika i dimenzija u granicama propisanih tolerancija. Na koji način ostvariti te zahtjeve ako poznata literatura nema adekvatnih smjernica?

Problem je dovoljno složen i teško je propisati smjernice jer se čitav niz utjecajnih i nepoznatih parametara prelama oko toga. Zbog toga se u praksi izbor granice posmaka i dubine rezanja pretežno oslanja na iskustvo. To podrazumjeva minimalne presjeke, velike brzine ali i nisku produktivnost, jer se s više prolaza teži postići tražena tolerancija i propisana kvaliteta površine.

Radi navedenog ova istraživanja usmjerena su na analizu određivanja maksimalnih reznih parametara završne obrade tokarenjem. Metodologija se zasniva na krutosti elastičnog sistema za obradu i samog izratka, kao i poznatih parametara rezanja iz teorije. Uz pomoć elektroničkog računala proračunavaju se nepoznati parametri.

---

\* Dr. Andrej Hriešik, dipl. inž., izv. prof., Tehničkog fakulteta u Rijeci, Narodnog ustanka 58

## 2. PRORACUN OPTIMALNIH PARAMETARA ZAVRSNOG TOKARENJA

Na sl. 1 prikazane su metode stezanja izradaka i elementi rezanja strugotine za uobičajene cilindrične izratke. Prvi slučaj stezanja izratka, sl. 1a, može se poistovjetiti sa slučajem proste grede. Za taj slučaj navodi se poznati obrazac za krutost izratka:

$$C_{iz} = \frac{F_y}{\gamma} = \frac{48 E I}{L^3} \quad (1)$$

Radijalna sila rezanja ( $F_y$ ) usvaja se prema poznatom obrascu iz teorije rezanja [1]:

$$F_y = F_x = (0,3 \text{ do } 0,35) F_z, \quad (2)$$

$$F_y = 0,35 F_z = 0,35 A \cdot f_s. \quad (3)$$

Oznake znače:

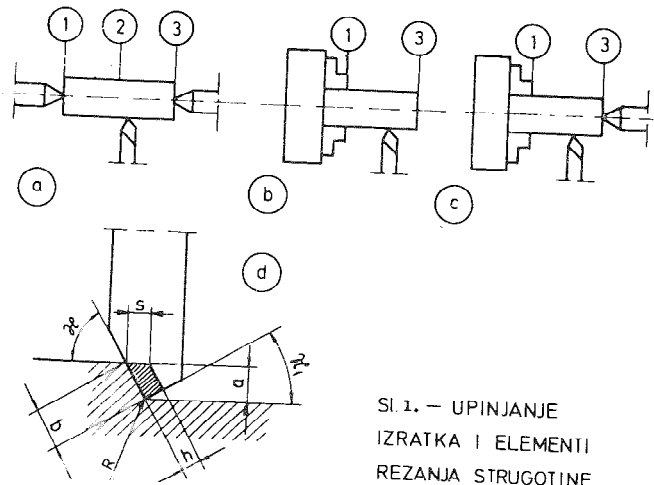
- $i$  - presjek strugotine,  $\text{mm}^2$ ;
- $C_s$  - specifična sila rezanja,  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;
- $E$  - modul elastičnosti izratka,  $\text{N}/\text{mm}^2$ ;
- $I$  - moment inercije izratka,  $\text{mm}^4$ ;
- $\gamma$  - pomak - deformacija,  $\mu\text{m}$ .

S druge strane krutost sustava SANI (stroj-alat-naprava-izradak) može se izraziti poznatim jednadžbama za svaki presjek prema sl. 1. Iz tih jednadžbi navodimo samo relaciju (4) koja izražava ostvarena odstupanja obrade u funkciji radijalne sile ( $F_y$ ) i krutosti elastičnog sustava SANI, a za presjeka dva i jedan, sl. 1a:

$$\Delta_{2-1} = 2F_y \left( \frac{1}{4 C_{ko}} - \frac{3}{4 C_{vr}} + \frac{1}{C_{p2}} + \frac{1}{C_{p1}} + \frac{1}{C_{iz}} \right) \quad (4)$$

Oznake znače:

- $F_y$  - radijalna sila, N;
- $C_{iz}$  - krutost izratka,  $\text{N}/\mu\text{m}$ ;
- $C_k$  - krutost konjića,  $\text{N}/\mu\text{m}$ ;
- $C_{vr}$  - krutost vretena,  $\text{N}/\mu\text{m}$ ;
- $C_{p1}, C_{p2}$  - krutost postelje u presjecima 1, 2,  $\text{N}/\mu\text{m}$ ;
- $\Delta_{2-1}$  - odstupanja promjera izratka između presjeka dva i jedan, sl. 1a,  $\mu\text{m}$ .



Sl. 1. - UPINJANJE  
IZRATKA I ELEMENTI  
REZANJA STRUGOTINE

Supstitucijom jednadžbi (1) i (3) u jednadžbu (4) dobiva se jednadžba (5) za maksimalni presjek strugotine koji se može usvojiti za završnu obradu a da je odstupanje promjera u presjecima (2) i (1), sl. 1a, jednako ili manje od dopuštenog odstupanja ( $\Delta$ ):

$$A = \frac{1000 \Delta}{(H_a + 1,48 \cdot L^3 / d^4) \cdot f_s} \quad (5)$$

Oznake znače:

- $\Delta$  - najveće dopušteno odstupanje promjera (toleranca), mm;
- $H_a, H_{b1}, H_{b2}, H_c$  - koeficijenti krutosti stroja za različite načine stezanja izratka, sl. 1a, b, c, N/mm.
- L - duljina izratka, mm;
- d - promjer izratka, mm.

Najveći presjek strugotine za slučaj upinjanja izratka prema sl. 1b dobiva se na sličan način kao i jednadžba (5), za sl. 1a. Zbog toga se ne navode transformacije jednadžbi, već navodimo direktno jednadžbu (6) koja izražava maksimalni presjek strugotine (A) u eksplicitnom obliku za dani slučaj upinjanja izratka (sl. 1b) i realnih (izmjerenih) ili preporučljivih (manje točnih) krutosti, te za propisano dopušteno odstupanje ( $\Delta$ ) pri završenoj obradi:



$$A = \frac{1000 \Delta}{\left\{ H_{b1} \left[ \left( \frac{L-L_v}{L_v} \right)^2 - 1 \right] + H_{b2} + 22,4 L^3/d^4 \right\} f_s} \quad (6)$$

Po istoj metodologiji dobivamo i relaciju (7) za maksimalni dopušteni presjek strugotine za izradak stegnut prema sl.lc:

$$A = \frac{1000 \Delta}{\left[ H_c + 0,0875 L^3/d^4 \right] f_s} \quad (7)$$

Oznake znače:

$L_v$  - duljina vretena tokarilice od istaka do sredine lijevog ležaja vretena, mm.

Koeficijente krutosti  $H_a$ ,  $H_{b1}$ ,  $H_{b2}$  i  $H_c$  treba identificirati za svaku tokarilicu u eksploataciji i ugraditi ih u jednačbe za presjek ili pomak strugotine (5), (6) i (7). Time se dobivaju najprecizniji rezultati. Nešto manje točni rezultati se dobivaju upotrebom koeficijenata iz tabele 1. za precizne tokarilice. Te numeričke vrijednosti su preuzete iz tabela poznatih autora kao preporučene krutosti ili proračunske krutosti za pojedine sklopove stroja.

Detaljiziranje krutosti s određenim korakom od 10 N/mm omogućuje da se veliko područje tokarilica sa svojim realnim krutostima nađe u tabeli (1). Budući su za realno moguće krutosti proračunati i koeficijenti krutosti (H) istih tokarilica, to je tabela (1) pogodna da se proračunaju maksimalni pomaci završnog tokarenja prema obrascima (12), (13) i (14).

Analiza izvedenih jednačbi (5), (6) i (7) za najveći dopušteni presjek strugotine (A) pokazuje da kod identičnih brojnika nazivnik karakterizira statičku krutost stroja i statičku krutost izratka. Suma tih krutosti zapravo identificira statičku krutost određenog sistema SANI. Iz toga proizlazi važni zaključak da na točnost pri obradi utječe stvarna (izmjerena) a ne usvojena (idealizirana) krutost sustava SANI.

Izvedene jednačbe (5), (6) i (7) nisu pogodne za praktičnu upotrebu, jer tlak rezanja ( $f_s$ ) ovisi o debljini strugotine, odnosno o posmaku prema poznatim jednačbama:

$$f_s = K_{hlxl} h^{-z}; \quad (8)$$

$$f_s = K_{hlxl}^* s^{-z}; \quad (9)$$

a važno je prije usvajanja presjeka strugotine odlučiti se s kakvim ćemo omjerom  $\mathcal{V}$  tokariti:

TABELA 1.

Redni broj	KRUTOST (N/mm)				KOEFIČIJENTI KRUTOSTI N/mm (slika 1a,b,c)		
	Konjić	Vretenište	Postelja		$H_a$	$H_{b1}$	$H_{b2}$
	$C_{ko}$	$C_{vr}$	$C_{pl}$	$C_{p2}$ = $C_{p3}$	$=H_c$		
1	80	100	600	150	0,4375	7	3,5
2	90	110	650	170	0,2124	6,36	3,04
3	100	120	700	190	0,0592	5,83	2,68
4	110	130	750	210	0,0475	5,38	2,4
5	120	140	800	230	0,1231	5	2,16
6	130	150	850	250	0,1773	4,66	1,97
7	140	160	900	270	0,2164	4,37	1,81
8	150	170	950	290	0,2446	4,11	1,67
9	160	180	1000	310	0,2648	3,88	1,55
10	170	190	1050	330	0,2792	3,68	1,45
11	180	200	1100	350	0,2891	3,5	1,36
12	190	210	1150	370	0,2957	3,33	1,28
13	200	220	1200	390	0,2998	3,18	1,21
14	210	230	1250	410	0,3019	3,04	1,14
15	220	240	1300	430	0,3026	2,91	1,08
16	230	250	1350	450	0,3020	2,8	1,03
17	240	260	1400	470	0,3007	2,69	0,989
18	250	270	1450	490	0,2986	2,59	0,94
19	260	280	1500	510	0,2960	2,5	0,905
20	270	290	1550	530	0,2930	2,41	0,854
21	280	300	1600	550	0,2897	2,333	0,835

$$\mathcal{V} = a/s \quad (10)$$

Prema sl. 1d može se presjek strugotine izraziti:

$$A = a \cdot s = b \cdot h$$

Oznake prema jednadžbama i sl. 1d znače:

- a - dubina rezanja, mm;
- s - posmak, mm;
- h - debljina strugotine, mm;
- R - radijus vrha alata, mm;
- z - eksponent Kienzlejeve jednadžbe;
- $\mathcal{V}$  - postavni kut alata, rad;
- b - širina strugotine, mm.

$\nu$  - omjer dubine i posmaka alata;

$K_{hlxl}$  } koeficijenti Kienzlejeve jednadžbe

$K_{hlxl}^*$  } koje literatura [1] daje u tabelama, N/mm .

Uz pomoć jednadžbi (5), (6), (7), (9), (10) i (11) izvedene su relacije za najveći dopušteni posmak pri tokarenju: (12), (13) i (14).

Tokarenje između šiljaka, sl. 1a, omogućuje najveći dopušteni posmak:

$$s_{\max} = \left\{ \frac{1000 \Delta}{[H_a + 1,4L^3/d^4] K_{hlxl}^* \nu} \right\}^{\frac{1}{2-z}} \quad (12)$$

Tokarenje izratka upetog u steznoj glavi, sl. 1b, omogućuje najveći dopušteni posmak:

$$s_{\max} = \left\{ \frac{1000 \Delta}{\left[ H_{b1} \left[ \left( \frac{L-L_v}{L_v} \right)^2 - 1 \right] + H_{b2} + 22,4L^3/d^4 \right] K_{hlxl}^* \nu} \right\}^{\frac{1}{2-z}} \quad (13)$$

Izradak stegnut prema sl. 1c omogućava najveći dopušteni posmak:

$$s_{\max} = \left\{ \frac{1000 \Delta}{[H_c + 0,0875L^3/d^4] K_{hlxl}^* \nu} \right\}^{\frac{1}{2-z}} \quad (14)$$

Izvedene jednadžbe (12), (13) i (14) i verificirane numeričke veličine pokazuju da je za realni presjek i posmak strugotine prijeko potrebno obaviti detaljna ispitivanja tokarilice, odnosno posjedovati krutosti ili podatljivosti za bitne presjeka svakog stroja. Svaki stroj je poseban slučaj bez obzira na istu familiju i njegove realne krutosti se razlikuju od idealiziranih ili preporučljivih. Do ovih tvrdnji došlo se na osnovi eksperimentalnog rada ispitivanja više tokarilica. To je rezultiralo i modificiranim oblikom jednadžbi (12), (13) i (14) za posmak pri završnom tokarenju.

Drugi put koji vodi sniženju sistemskih odstupanja dimenzija izradaka i odstupanja hrapavosti površina uz visoku produktivnost jeste primjena elektroničke opreme. Stalnim snimanjem

(npr. radijalne komponente sile) omogućuje se takvo vođenje procesa da se pravodobno izmjeni izlizani ili oštećeni alat i to automatski, ostvarena je automatska kontrola dimenzija, itd. Automatsko vođenje procesa tokarenja dovelo je do optimalizacije parametara rezanja [2], [3], [7].

### 3. KOMPJUTORSKA IDENTIFIKACIJA KOEFICIJENATA KRUTOSTI I POSMAKA STRUGOTINE

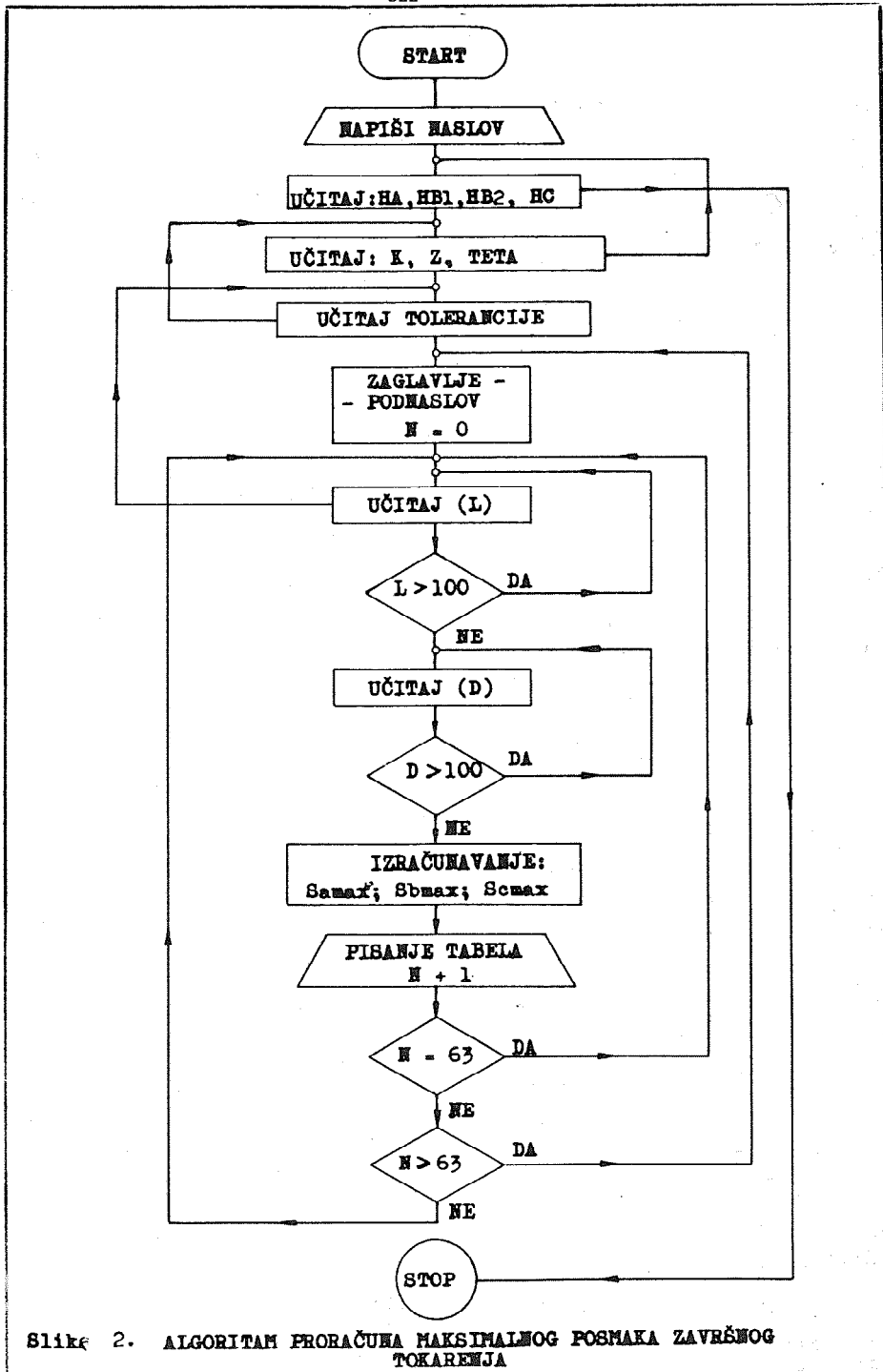
Na osnovi izloženih teoretskih postavki za problematiku završnog tokarenja ističe se činjenica da u literaturi nema tablica koje bi odgovarale tehnološkim potrebama za izbor maksimalnog posmaka. Zbog toga se pristupilo izradi algoritma (sl. 2) za takav proračun, kao i programa u jeziku FORTRAN. **Elektronička** obrada radila se na računalu UNIVAC 1100.

Cilj je programa da se ukaže tehnolozima na mogućnost dobivanja maksimalnog dopuštenog posmaka pri završnom tokarenju uz respektiranje svih značajnih parametara sustava SANI. Pri tome se program razlikuje za tri najčešća načina stezanja izradaka na tokarilicama, prema sl. 1a, 1b i 1c.

Kako su rezultirajuće deformacije tehnološkog sustava SANI promjenljive veličine, a različito na njih utječu pojedini članovi sustava SANI, to su u programu ugrađeni koeficijenti krutosti  $H_a$ ,  $H_{b1}$ ,  $H_{b2}$  i  $H_c$ . Oni zamjenjuju krutosti konjića, vreteništa i postelje u različitim presjecima a izračunati su pomoću posebnog programa koji se zbog limitirana prostora ne navodi. Tako izračunati koeficijenti krutosti dati su u tabeli 1 a učitani su u memoriju za ovaj prikaz. Indeksi za H usvojeni su kao i oznake na sl. 1.

Daljni parametri koji su učitani u memoriju su promjeri i duljine izradaka. Za proračun su usvojene standardne duljinske mjere od 10 do 1000 mm, a prema JUS-u A.O.010-1959. Proračun se radi za promjere izradaka od 10 do 250 mm, što odgovara tokarilicama srednje veličine.

Program je realiziran za 18 karakterističnih materijala za izratke u strojarstvu, a prema [1], tabela 19, str. 138. Za proračun su upotrijebljeni koeficijenti i eksponenti Kienzlejeve jednadžbe ( $K_{hlxl\kappa}$ ), kao i ( $z$ ). Ostali parametri iz tabele 19, [1],



Slika 2. ALGORITAM PRORAČUNA MAKSIMALNOG POSMAKA ZAVRŠNOG TOKARENJA

se podrazumijevaju. Omjer dubine i posmaka strugotine također se varira [1], tabela 30.

Poslednji član koji se učitava u memoriju elektroničkog računala jeste najveće dopušteno odstupanje promjera označeno s ( $\Delta$ ) a za koje se proračunavaju maksimalni posmaci završnog tokarenja ( $s_{\max}$ ) koji se uklapaju u tu dopuštenu toleranciju. Proračun se vrši za deset tolerancijskih polja osovina, i to za red tolerancije IT6 do IT11, a prema JUS-u M.A1.150 ... 158-1968. Rezultat proračuna kompjutora je veliki broj tablica.

#### 4. ZAKLJUČAK I PREPORUKE

Izvedene modificirane matematičke relacije za maksimalni posmak završnog tokarenja, kao i eksperimentalno-numerički rezultati ukazuju na to da za proračune optimalnog tehnološkog postupka treba učiniti slijedeće:

1. Obaviti detaljna ispitivanja podatljivosti stroja na karakterističnim sklopovima i presjecima: istaku vretena, šiljku vretena, šiljku konjića, konjiću, suportu i postelji u presjecima 1, 2, 3, prema sl. 1. Rezultati koriste za duži period.
2. Relevantne krutosti konkretnog stroja dobivene eksperimentalno, koje se razlikuju od preporučljivih, treba da se ugrade u jednačbe (12), (13) i (14).
3. Propisivati režime rada pri završnom tokarenju prema jednadžbama (12), (13) i (14) značilo bi postizavanje maksimalne produktivnosti u granicama dopuštenog odstupanja. Dobivene teoretske veličime posmaka su za idealne uvjete rada. U praksi treba ipak usvajati malo niže vrijednosti jer najčešće nema idealnih uvjeta rada.
4. Proračun maksimalnog posmaka vrši se kompjutorom. Veliki broj rezultata omogućava tehnologu da za različite materijale izratka, različite dimenzije, i različite karakteristike sistema SANI usvoji one najpovoljnije parametre.

#### 5. L I T E R A T U R A

- [1] H.Muren, "Odrezavanje", Tehnička založba Slovenije, Ljubljana 1976.
- [2] R. Zdenković i grupa autora, "Automatizacija alatnih s strojeva", XVI JUREMA 71, Zagreb 1971.
- [3] V.R. Milačić, "Tehnološki sistemi", Monografija IAMA br. 3, 1973.

- [4] R.Zdenković, "Pregled analiza optimalnih i ekonomskih brzina rezanja za razne obrade", Referat na I Savjetovanju proizvodnog strojarstva, Beograd 1965.
- [5] R.Zdenković, "Osnovi projektiranja i konstruiranja alatnih strojeva s aspekta točnosti obrade i izvora grešaka", Referat na III Savjetovanju proizvodnog strojarstva, Ljubljana 1967.
- [6] L.S. Jampolskij, V.A.Taranenko, V.D.Jevdokimov, "Sredstva i metody avtomatičeskogo upravljenja režimami obrabotki metallov rezanijem", Uknrinti, Kyjev 1975.
- [7] A.Hriešik, "Sustavi alata za tehnologiju tokarenja pomoću robota ili manipulatora", Zbornik radova Četrnaestog simpozija Upravljanje proizvodnjom u industriji prerade metala, Beograd 1984.

A. Hriešik

CONTRIBUTION TO THE OPTIMALISATION OF THE TECHNOLOGICAL  
PARAMETERS OF THE FINAL TURNING - WORK

S u m m a r y

The autor giver a survey of the factors affecting working accuracy of the lathe. The working accuracy testing was carried out by the experimental method combined with the numerical one. It has been established that during the final operation the choice of sawdust section and turning feed at the required diameter and working tolerance can be made on the basis of the measured static stiffness. Consequently, each lathe appears as a different system in exploitation. Practical instructions are given for the application of the obtained results.

D.M. Erić, M.D. Mladjenović\*

НЕКИ АСПЕКТИ И РЕЗУЛТАТИ ПРИМЕНЕ ОПТИМИЗАЦИОНИХ  
МЕТОДА У ТЕХНОЛОШКОМ ПРОЦЕСУ

1. UVOD

U stalnom traženju mogućnosti za optimizaciju proizvodnih procesa vršili smo ispitivanja i dobili sasvim zadovoljavajuće rezultate sa posmatranjem tehnološke operacije kao trofaktornog procesa, koji se ispituje na osnovu potpunog ortogonalnog plana sa trostrukim ponavljanjem eksperimenata u svakoj tački plana.

Odredjivanjem regresione funkcije uz pomoć disperzione analize, proverom adekvatnosti matematičkog modela i proverom granica pouzdanosti parametara modela, može se sa velikom merom objektivnosti matematički prikazati dati tehnološki proces. Iz dobijenog matematičkog oblika, korišćenjem zakonitosti diferencijalne matematike, moguće je pronaći veličine promenljivih parametara koje zadovoljavaju optimume samog tehnološkog procesa.

Primenom računara znatno smo skratili put do dobijanja regresione funkcije jer program (koji je dat u radu), daje sve elemente neophodne za definisanje matematičkog oblika.

Kao rezultat primene ove metode dat je dijagramski prikaz odnosa bitnih pokazatelja procesa pre i posle primene optimizacije.

---

\* / Dragan M. Erić, dipl.ing., SOUR "Sloboda", RO - FNP, RZ-I "Razvoj", Čačak

Mihailo D. Mladjenović, dipl.ing., "IKL" - Beograd



## 2. ODREĐJIVANJE REGRESIJSKE FUNKCIJE

U konkretnom slučaju naših ispitivanja radi se o pronalženju maksimalne postojanosti reznog alata u zavisnosti od režima obrade: broja obrtaja  $n$ , posmaka  $s$  i dubine  $a$ . Ovi faktori su uzeti kao promenljive u budućoj regresionoj funkciji, odnosno funkciji matematičkog opisa tehnološkog procesa.

Ekperimentalni rezultati i plan matrica za svih osam tačaka plana prikazani su u tablici 1. Sama regresiona funkcija ima sledeći opšti oblik:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3$$

TABLICA 1

TAČKE PLANA	PLAN - MATRICA										EKSPERIMENTALNI REZULTATI			
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_i$		
1	1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	19,5	23,6	16,2	19,83		
2	1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	12,2	9,7	15,12	12,36		
3	1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	19,25	14,93	18,10	17,42		
4	1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	16,27	23,54	26,47	22,09		
5	1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	18,75	31,7	33,2	27,90		
6	1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	7,8	16,2	9,56	11,18		
7	1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	21,13	16,87	11,5	16,55		
8	1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	11,3	6,9	14,1	10,76		
Osnovni nivo	400	1055	0,75											
Inter varijac	100	1045	0,25											
Gornji nivo	500	01	1											
Donji nivo	300	001	0,5											

Da bi izbegli dugotrajno, naporno računanje svih elemenata koji su potrebni za regresionu funkciju, napisali smo u Fortran 77 program koji nam omogućava da obradom na računaru dobijemo sve elemente regresione funkcije. Na taj način je vreme potrebnih proračuna višestruko smanjeno, a mogućnost eventualne greške je praktično minimalna.

Kao ulazni podaci u program daju se rezultati merenja, a kao izlaz dobijamo faktore  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$  i  $b_{123}$ , kao i izbor signifikantnih i nesignifikantnih faktora.

PROGRAM regresionaFJA

REAL y(8),y1(8),y2(8),y3(8),b(8),SS(8),lr(8),ttr(8)

```

DO I = 1,8
PRINT 10,1
10 FORMAT ('Upisati tri vrednosti',12,' merenja')
READ *, y1(I),y2(I),y3(I)
END DO

DO I=1,8
y(I)=(1./3.)*(y1(I)+y2(I)+y3(I))
END DO

Zy=0
DO I=1,8
Zy=Zy+y(I)
END DO

ZNy=0
DO I=1,7,2
ZNy=ZNy+y(I)
END DO

ZPy=Zy-ZNy
ZPPy=0
DO I=1,2
ZPPy=ZPPy+y(I)
END DO

Z1Py=0
DO I=5,6
Z1Py=Z1Py+y(I)
END DO

ZP4y=0
DO I=1,4
ZP4y=ZP4y+y(I)
END DO

ZD4y=ZY-ZP4y
Z14y=0
DO I=1,4,3
Z14y=Z14y+y(I)
END DO

Z5By=0
DO I=5,8,3
Z5By=Z5By+y(I)
END DO

Z13y=0
DO I=1,3,2
Z13y=Z13y+y(I)
END DO

```

```
Z68y=0
DO I=6,8,2
Z68y=Z68y+y(I)
END DO
```

```
Z36y=0
DO I=3,6
Z36y=Z36y+y(I)
END DO
Z67y=0
DO I=6,7
Z67y=Z67y+y(I)
END DO
```

```
b(1)=Zy/B.
b(2)=(ZPy-ZNy)/B.
b(3)=( (ZPPy+ZTPy) * (-1) + (Zy - (ZFPy+ZHPy)) ) / B.
b(4)=(ZD4y-ZP4y)/B.
b(5)=( (Z14y+Z58y) - (Zy-Z14y-Z58y) ) / B.
b(6)=( (Z13y+Z68y) - (Zy-Z13y-Z68y) ) / B.
b(7)=( (Zy-Z36y) - Z36y ) / B.
b(8)=( (Zy-Z14y-Z67y) + (-Z14y-Z67y) ) / B.
```

```
DO I=1,8
PRINT *,b(I)
SS(I)=(y1(I)-y(I))**2+(y2(I)-y(I))**2+(y3(I)-Y(I))**2)/2.
END DO
```

```
ZSS=0
DO I=1,8
ZSS=ZSS+SS(I)
END DO
```

```
WRITE(7, ("Upisi vrednosti NN,M,N"))
READ (5,*) NN,M,N
```

```
fE=NN*(M-1)
SSy=ZSS/fE
SSBI=SSy/(NN*N)
SBI=SQRT(SSBI)
```

```
DO I=1,8
tr(I)=ABS(b(I))/SBI
END DO
DO I=1,8
IF(tr(I).GT.1.75) THEN
20 WRITE(6,20) I,tr(I)
FORMAT (1x,'tr(',I1,')=',F7.3)
ELSE
ttr(I)=tr(I)
END IF
END DO
DO I=1,8
IF(ttr(I) .NE. 0) THEN
22 WRITE(6,22) I,ttr(I)
FORMAT (1x,'ttr(',I1,')=',F7.3)

END IF
END DO
END
```

Upisati tri vrednosti 1 merenja  
 Upisati tri vrednosti 2 merenja  
 Upisati tri vrednosti 3 merenja  
 Upisati tri vrednosti 4 merenja  
 Upisati tri vrednosti 5 merenja  
 Upisati tri vrednosti 6 merenja  
 Upisati tri vrednosti 7 merenja  
 Upisati tri vrednosti 8 merenja

17.24541664

-3.14875031

-.54875088

-.66124916

2.88208389

-2.45874977

-2.40208435

-.14125061

tr(1) = 25.701

tr(2) = 4.693

tr(5) = 4.295

tr(6) = 3.664

tr(7) = 3.580

ttr(3) = .818

ttr(4) = .985

ttr(8) = .211

Sa dobijenim koeficijentima i uzimanjem u obzir samo signifikantnih faktora regresiona funkcija ima oblik:

$$\hat{Y} = 17,24 - 3,14x_1 + 2,88x_1x_2 - 2,45x_1x_3 - 2,40x_2x_3$$

Pošto je u ovom slučaju reč o sistemu ponavljanja eksperimenata  $n$  puta u svakoj tački hiperkuba, disperzija vezana za adekvatnost modela biće:

$$S_{LF}^2 = \left[ \sum_{u=1}^n (\bar{Y}_u - \hat{Y}_u)^2 \right] / \left[ N_0 - (K+1) - N(m-1) \right] = 4,628$$

$$F_r = S_{LF}^2 / S_E^2 = 0,441$$

Kako je iz tablice za  $f_{LF}=4$ ,  $f_E=16$  i  $\alpha=5\%$  vrednost  $F_t=3,0$ , to je onda  $F_r < F_t$ , pa se dobijenim modelom (jednačinom višestruke regresije), na adekvatan način opisuje dotični trofaktorni proces.

Za granice pouzdanosti parametara modela biće:

$$b_i = \pm t \cdot s(b_i) = \pm 1,75 \cdot 0,6612 = \pm 1,157 \quad \text{gde je:}$$

$$t = t_t = 1,75 \quad \text{za } f_E = 16 \text{ i } \alpha = 5\%.$$

### 3. IZRACUNAVANJE OPTIMUMA REGRESIONE FUNKCIJE

Na osnovu poznatih matematičkih zakona tražimo optimum funkcije Y:

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_1} = -3,14 + 2,88x_2 - 2,45x_3 = 0$$

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_2} = 2,88x_1 - 2,40x_3 = 0$$

$$\frac{\partial \hat{y}}{\partial x_3} = -2,45x_1 - 2,40x_2 = 0$$

Rešavanjem prethodnog sistema jednačina i vraćanjem veličina  $x_1, x_2, x_3$  kao kodiranih vrednosti u realne vrednosti dobićemo:

$$x_1 = 347,2 \dots (n); \quad x_2 = 0,0795 \dots (s); \quad x_3 = 0,59 \dots (a)$$

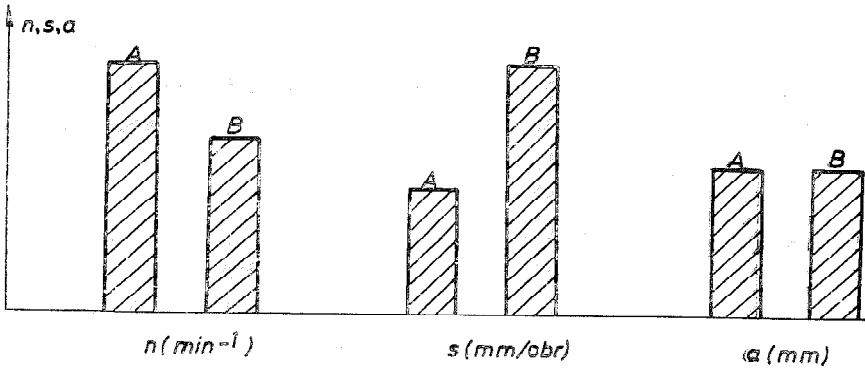
### 4. EKONOMSKI I TEHNOLOŠKI POKAZATELJI PRE I POSLE OPTIMIZACIJE

Pre izvođenja eksperimenata režimi rada bili su sledeći:  $v=500$  min;  $s=0,04$  mm/obr. i  $a=0,6$  mm. Na slici 1 dat je grafički prikaz odnosa veličina režima pre i posle optimizacije.

Izračunavanjem vremena obrade sledi da je ranije to vreme iznosilo 3,5 sec, a sada 2,5 sec, što je skraćenje za oko 40%.

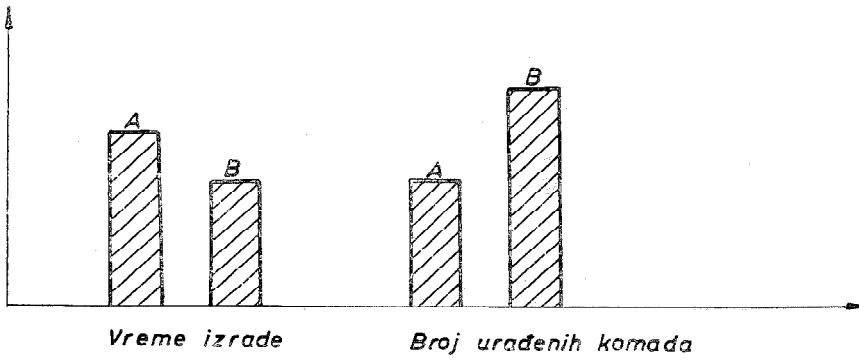
Pri starim režimima prosečna vremenska postojanost alata iznosila je oko 14,5 min, a sada je novodobijena vrednost postojanosti  $y=18,1$  min. Pošto su promenjeni režimi /a to znači vreme obrade/, sledi da je ranije jedan alat mogao uraditi oko 250 komada, a sada oko 430 komada. Grafički prikaz vremena obrade pre /A/ i posle /B/ optimiziranja, kao i broj uradjenih komada sa jednim alatom prikazani su na slici 2.

Uzimajući u obzir cenu alata, koja je naravno ista u oba slučaja, kao i broj uradjenih komada sa jednim alatom / u slučajevima A i B/, može se videti da je linearna raspodela troškova alata, zavisna od veličine serije, znatno povoljnija u slučaju B, odnosno posle optimizacije

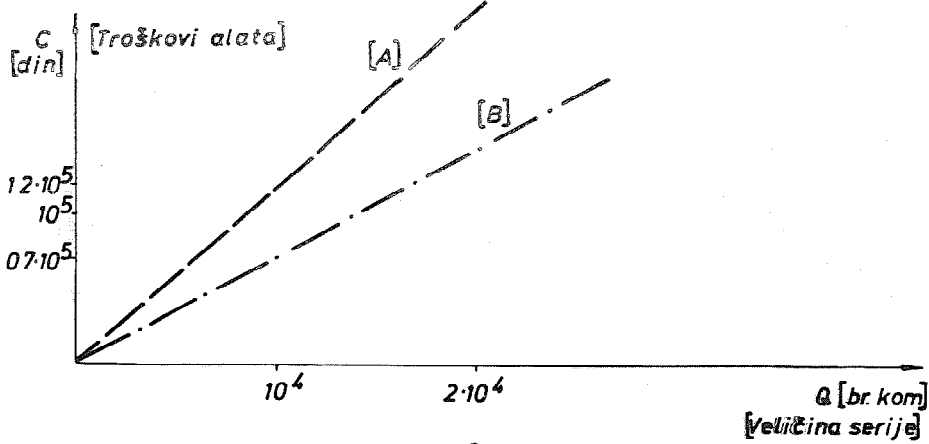


A - pre optimizacije  
 B - posle optimizacije

Sl. 1



Sl. 2



Sl. 3

## 5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je da ukaže na mogućnosti optimizacije pojedinih tehnoloških zahvata korišćenjem teoretskih postavki matematičke teorije eksperimenata.

Jedan od nedostataka ove metode jeste potreba izvođenja eksperimenata i problem njihove realizacije u uslovima serijske proizvodnje. Međutim rezultati dobijeni na ovaj način ukazuju da bi ovakvim rešenjima u praksi trebalo češće pribegavati, jer efekti optimizacije to u potpunosti opravdavaju.

### Reference

- (1.) Stanić, J.: Metod inženjerskih merenja, Mašinski fakultet Beograd, 1986
- (2.) Stanić, J.: Uvod u teoriju tehnoekonomske optimizacije procesa, Mašinski fakultet Beograd, 1983
- (3.) Erić, D., Matić, M.: Optimizacija tehnološkog postupka primenom nove kombinovane tehnologije i uporedni pokazatelji proizvodnosti starog i novog postupka; JUPITER konferencija 1986, Cavtat.

D.M. Erić, M.D. Mladjenović

### SOME ASPECTS AND RESULTS OF APPLICATION OF OPTIMIZING METHODS IN TECHNOLOGIC PROCESS

#### S u m m a r y

This work gives the illustration of possibilities of optimization by application of the basis of mathematical theory of experiments. The full orthogonal plan was used for one three-factored process. After establishing an adequate mathematical model expressed in form of regressive function, the optimal values of the factor are determined. The results achieved in that manner justify such view, and the work also gives comparison presentation of technologic indicators before and after the optimization.

Ž.Knežević, B.Nedeljković, B.Jerđović

OPTIMIZACIJA VREDNOSTI INDEKSA OBRADLJIVOSTI,  
MEHANIČKIH OSOBINA KOČIONIH DOBOŠA IZ SIVOG  
LIVA U FUNKCIJI POSTUPKA TOPLJENJA I  
MODIFICIRANJA

U V O D

U automobilskoj industriji kao polufabrikati koriste se odlivci od visokokvalitetnog sivog liva koji se obradjuju na visokoproduktivnim mašinama i transfer linijama. Novije tehnologije proizvodnje odlivaka omogućuje proizvodnju velikih serija odlivaka pri relativno konstantnim uslovima livenja i hladjenja pa varijacije indeksa obradljivosti uglavnom prouzrokuju različit kvalitet tečnog metala koji je u funkciji načina topljenja i modificiranja.

U uslovima obrade na visokoproduktivnim mašinama, varijacije strukturnih osobina odlivaka prouzrokuju brže habanje alata i veće troškove obrade.

Mr. Živko Knežević, dipl.ing. Direktor OOUR-a "Livnica" u Topoli, Zavodi "Crvena zastava" Kragujevac

Mr. Branislav Nedeljković, dipl.ing. specijalista za istraživanje i proučavanje razvoja tehnike i tehnologije u Zavodima "Crvena zastava" Kragujevac

Dr. Branka Jerđović, dipl.ing. Docent na Tehničkom fakultetu u Čačku



Kao polufabrikat za ispitivanje obradljivosti od visokokvalitetnog modificiranog sivog liva uzet je kočioni doboš jer je kao takav u eksploataciji automobila permanentno izložen statičkim i dinamičkim naprezanjima, pri različitim temperaturnim uslovima, zbog čega se i zahtevaju visoke vrednosti zahtevne čvrstoće, tvrdoće, otpornosti na habanje i otpornosti prema koroziji što u principu uslovljava nizak indeks obradljivosti.

### 1. Proizvodnja eksperimentalnih šarži

Šarže za odlivanje uzoraka za utvrđivanje obradljivosti proizveli smo promenom sledećih parametara:

- postupkom topljenja šarže (dve mogućnosti - kupolna i indukciona peć) i
- količina modifikatora (tri varijacije)

Šarže 1I, 2I i 3I pripremili smo u četvorotenskoj indukcionoj peći u kojoj se u momentu početka eksperimenta nalazilo 1300 kg tečnog metala (sastava: 3,40% C, 2,15% Si, 0,84% Mn, 0,39% Cr, 0,5% P 0,7% S), zagrejanog na 1737°K. Zatim je vršeno dodavanje 84 kg karburita radi naugljeničenja.

Nakon 10 minuta, postepeno je vršeno šaržiranje 2000 kg baliranog lima od karoserije automobila, vodeći računa, da ne dodje do zahladjenja šarže. Na kraju procesa šaržiranja ubačeno je 500 kg povratnog liva. Po završetku topljenja na temperaturi od 1653°K, dodato je 65 kg ferossilicijuma, 24 kg feromangana i 28 kg ferohroma.

Pošto se uložak istopio šarža je pregrevana do temperature belog usijanja nakon čega je pristupljeno kontroli kvaliteta tečnog metala (tabela 1) i izlivanja prve i druge serije probnih uzoraka (1I i 2I), s tom razlikom što je tečni metal za izlivanje prve serije prethodno modificiran sa 0,30% modifikatora na bazi silikokalcijuma. Pre izlivanja treće serije (3I), u peć smo dodali još 175 kg baliranog lima, a zatim je

šarža pregrejana do temperature  $1788^{\circ}\text{K}$ , pa je nakon kontrole sastava i strukture brzom probom (tabela 1) i modificiranja sa 0,20% modifikatora na bazi silikokalcijuma i 0,10 Si, pristupljeno livenju treće serije (3I).

Za pripremanje šarži 1K, 2K i 3K korišćena je kupolna peć na hladan vazduh kapaciteta 400 kg/h tečnog metala.

U peć je naizmenično dodavano 14 kg koksa, 83 kg sivog sirovog gvoždja, 3 kg ferosilicijuma i 1 kg feromangana. Prva serija (1K) izlivena je bez dodatka modifikatora, druga (2K) modificirana je sa 0,20% SiCa, a treća sa 0,20% modifikatora i 0,10% silicijuma (tabela 1).

Livenje uzoraka vršeno je u pešćane kalupe (ručno izradjeni), čija je tvrdoća 3 forme iznosila 85GF jedinica, a temperature livenja za sve šarže date su u tabeli br. 1.

## 2. Laboratorijska ispitivanja odlivaka kočionih doboša

Za odredjivanje osnovnih karakteristika odlivaka kočionih doboša obavljena su ispitivanja, mehaničkih osobina, hemijskog sastava i metalografskih karakteristika.

### 2.1. Mehanička ispitivanja

Za odredjivanje mehaničkih osobina kočionih doboša (tabela 2) iz svake šarže livene su šipke prečnika 30 mm, dužine 350 mm. Iz tih šipki izradjene su epruvete prema standardu JUS C.140-12.

Udarne žilavost po Šarpiju odredjena je na standardnim epruvetama 10 x 10 x 55, koje su izradjene iz šipki za odredjivanje zatezne čvrstoće.

Tvrdoća je merena na površini po metodi Brinela (prečnik kuglice 5 mm), sa opterećenjem  $750 \text{ Kp/mm}^2$ .

### 2.2. Hemijski sastav

Hemijski sastav odredjen je iz strugotine koja je izvadjena na mestima odredjenim za ispitivanje tvrdoće. Rezultati ispitivanja dati su u tabeli 2.

Rezultati ispitivanja kvaliteta tečnog liva pre izlivanja u šupljinu kalupa Tabela 1

Temperatura tečnog metala Veličina odbela										Količina modifikatora	
(%)											
Serija	C	Si	Mn	Cr	P	S	U peći	U loncu	Pre modifikiranja	Posle modifikiranja	%
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1I	3,36	2,20	0,85	0,38	0,051	0,07	1.743	1.573	9	-	0,30% SiCa
2I	3,40	2,15	0,84	0,39	0,051	0,073	1.743	1.578	10	-	0
3I	3,25	1,90	0,86	0,39	0,049	0,80	1.788	1.588	11	1	0,20% SiCa 0,10% Si
1k	3,45	1,65	0,40	0,70	0,11	0,09	1.680	1.578	6	-	0
2k	3,40	2,08	0,44	0,50	0,11	0,09	1.697	1.569	6	-	0,30% CaSi
3k	3,50	2,15	0,40	0,47	0,11	0,10	1.700	1.586	7	-	0,30% CaSi

- Kontrola hemojskog sastava tečnog metala obavljena je pomoću emisionog spektrometra PHILLIPS PV 8300.
- Temperatura u peći merena je potapajućim pirometrom Pt - PtRh 15, tip 1067.
- Kontrola strukture procenjena je klin probom, čija površina poprečnog preseka odgovara ravnokrakom trouglu osnovice 19 mm i visine 40 mm.

Rezultati ispitivanja hemijskog sastava i mehaničkih osobina kočionih doboša izliivenih iz opitnih šarži

Tabela 2

Oznake šarže	Hemijski sastav (%)											Mehaničke osobine			
	Cuk	Cvez	Si	Mn	Cr	P	S	Zatezna čvrstoća (N/mm <sup>2</sup> )	Rad udara (J)	Tvrdoća					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11					
1k	3,40-3,50	0,68-0,71	1,68-1,70	0,40	0,27	0,11	0,09	197-214	2	179-186					
2k	3,48-3,51	0,52-0,57	2,08-2,38	0,43	0,35	0,11	0,09	221-236	3	169-181					
3k	3,40-3,50	0,50-0,53	2,35-2,45	0,40	0,35	0,11	0,10	238-246	3	184-199					
1I	3,36-3,40	0,63-0,67	2,30-2,35	0,81	0,38	0,08	0,068	240-250	2	187-200					
2I	3,35-3,40	0,75-0,85	2,10-2,15	0,81	0,40	0,08	0,070	240-260	2	220-228					
3I	3,15-3,25	0,78-0,75	2,01-2,15	0,82	0,39	0,08	0,070	402-491	4	198-210					

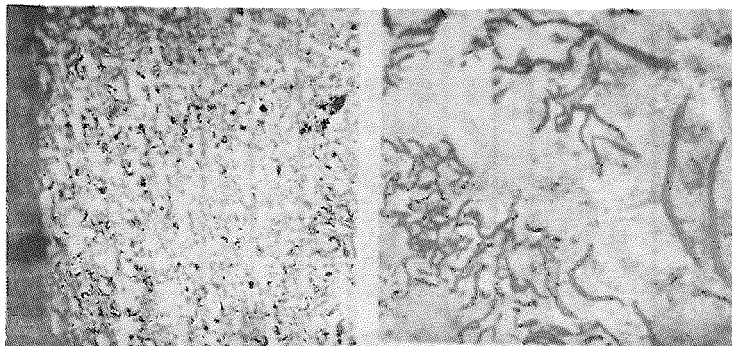
### 2.3. Metalografska ispitivanja

Detaljna metalografska ispitivanja opitnih šarži imala su za cilj da objasne uticaj tehnoloških faktora na obrazovanje struktura visokokvalitetnog sivog liva (iz kog se izlivaju kočioni doboši), od koje zavisi veličina otpora materijala pri obradi rezanjem.

Uzorci za metalografska ispitivanja isečeni su iz venca doboša.

Priprema uzoraka i ispitivanje grafita obavljani su prema standardu ASTM (American Society for Testing Materials). Prvo je doređena veličina i tip grafita, a onda su uzorci nagriženi 2%-nim rastvorom  $\text{HNO}_3$  za određivanje strukture metalne osnove.

Metalografska struktura uzoraka iz šarže 1I prikazana je na slikama 1 i 2, kao primer.



S1.1. x 100

S1.2 x 500  
Nagriženo sa 2%  $\text{HNO}_3$

### 3. Ispitivanje obradivosti radioaktivnom metodom

Obradivost materijala predmeta obrade najčešće se definiše kao lakoća kojom se može obraditi materijal. Ona se danas određuje isključivo preko postojanosti alata jer se smatra da materijal koji omogućava obradu reznim alatom duže vremena ili isto vreme sa većom brzinom rezanja je "lakši" za obradu.

omogućava obradu reznim alatom duže vremena ili isto vreme sa većom brzinom rezanja je i "lakši" za obradu.

Poznato je da se pri rezanju samo jedan deo reznog elementa alata nalazi u direktnom kontaktu sa predmetom obrade.

Ozračivanjem ovog dela mase reznog elementa alata stvorena je mogućnost praćenja razvoja procesa habanja merenjem promena radioaktivnosti alata do koje dolazi usled prelaska radioaktivnih čestica sa alata u okolnu sredinu (preko SHP, strugotine ili predmeta obrade). Površina na kojoj se prate tribo- loški procesi bombarduje se teškim česticama (protoni ili deuteroni), usled čega dolazi do stvaranja radioaktivnih izotopa. Debljina ozračenog sloja zavisi od vrste čestica i energije snopa, a nivo radioaktivnosti istog od jačine snopa i vremena bombardovanja.

Veza između radioaktivnosti reznih elemenata alata i pohabanosti istog najčešće se može aproksimirati regresivnom krivom oblika:

$$A = A_0 \cdot e^{-kh^n}$$

Ako je radioaktivnost pre rezanja iznosila  $A_i$ , a posle rezanja u trajanju  $t_i$  iznosi  $A_{i+1}$ , habanje alata će se povećati od vrednosti  $h_i$  na  $h_{i+1}$ . Na osnovu ranije izračunatih vrednosti konstantni  $k$  i  $n$  može se odrediti parametar habanja  $h_i$ , koji odgovara izmerenoj radioaktivnosti  $A_i$ , tj.

$$h_i = \left( \frac{\ln \frac{A_0}{A_i}}{k} \right)^{1/n}$$

Na isti način može se odrediti veličina pohabanosti reznog elementa alata  $h_{i+1}$ , koja odgovara izmerenoj radioaktivnosti  $A_{i+1}$ . Na osnovu prethodnog, može se odrediti porast

$h_i = h_{i+1} - h_i$  za vreme  $t_i$ , odnosno otpornost na habanje:

$$R_i = \frac{t_i}{\Delta h_i}$$

Na osnovu eksperimentalno dobijenih podataka o veličini radioaktivnosti reznog elementa alata pre i posle rezanja, može se, dakle, odrediti otpornost na habanje. Pri određenim proizvodnim uslovima, otpornost na habanje je funkcija stepena pohabanosti reznog elementa alata koja se sa dovoljnom tačnošću može predstaviti krivama oblika

$$R_I = K_I \cdot h^{u_1-1} \quad \text{za } 0 < h < h_1$$

$$R_{II} = K_{II} \cdot h^{u_2-1} \quad \text{za } h_1 < h < h_k$$

Integraljenjem krivih otpornosti na habanje dolazi se do veličine postojanosti alata: u inicijalnom i periodu ravnomernog habanja alata:

$$T_I = \int_0^{h_1} R_I dh;$$

$$T_{II} = \int_{h_1}^{h_k} R_{II} dh$$

Ukupna postojanost alata predstavlja površinu ispod R-h krive (sl. 11) u intervalu  $(0, h_k)$ . Veličina  $h_1$  se dobija iz uslova jednake otpornosti na habanje za prvi i drugi period habanja reznog elementa alata.

Ovako izračunate postojanosti alata predstavljaju osnov za definisanje obradivosti materijala predmeta obrade. Često se za definisanje obradivosti koristi indeks obradivosti, koji predstavlja odnos između postojanosti alata pri obradi izvesnog materijala predmeta obrade i postojanosti alata pri obradi materijala predmeta obrade uzetog za etalon:

$$I_m = \frac{T_x}{T_{etal.}} \cdot 100\%$$

Opitne operacije su izvedene na univerzalnom strugu proizvodnje "Prvomajska" (Zagreb), po licenci VDF BOEHRINGER, bez upotrebe sredstava za hladjenje i podmazivanje. Instalisan na snaga struga je 11 kW.

Kao alat korišćena je pločica od tvrdog metala GC 1025, kvadratnog oblika, stegnuta u levi, nosač poprečnog preseka  $q_{16}$ .

Režim obrade je u toku izvodjenja opitnih operacija bio nepromenjen ( $v = 140\text{ m/min}$ ,  $s = 0,1\text{ mm/o}$  i  $r = 1\text{ mm}$ ). Praćenje širine pojasa habanja na dva karakteristična mesta (parametri habanja  $h_1$  i  $h_2$ , odnosno srednja širina pojasa habanja  $h_{sr}$ ) i veličine pada radioaktivnosti  $A_1$  došlo se do krive prikazane na sl. 11.

Variranjem uzoraka odlivaka kočionih doboša pri ostalim nepromenjenim proizvodnim uslovima i uz poznavanje veze  $A = f(h)$  došlo se do veličine otpornosti na habanje alata. Na sl. 12 prikazane su krive otpornosti na habanje alata u funkciji stepena pohabanosti istog. Upoređivanjem dobijenih krivih habanja (sl. 12) uočava se da u konkretnom slučaju najbolje rezultate pokazuje alat kod obrade uzoraka iz šarže 3k, dok taj isti alat prilikom obrade šarže 2I ima mnogo lošije rezultate.

Integraljenjem ovih krivih u intervalu  $(0, h_1)$  i  $(h_1, h)$ , dobijene su krive habanja prikazane na sl. 13.

Iz dobijenih rezultata koji su grafički predstavljeni na sl. 12, vidi se da u periodu inicijalnog habanja kod svih ispitivanih uzoraka ne uočava se značajnije odstupanje otpornosti na habanje alata. Kad stepen pohabanosti reznog elementa prekorači veličinu inicijalnog habanja, razlike postaju očigledne. Najizrazitiji pad otpornosti na habanje zabeležen je kod uzoraka iz šarže 2I, a najmanji pad otpornosti na habanje zabeležen je kod uzoraka iz šarže 3k. Ovakav izgled krivulja u periodu inicijalnog habanja uslovljen je kvalitetom reznog elementa i strukturom ispitivanih uzoraka odlivaka kočionih doboša, zbog prisustva ferita u većoj ili manjoj meri na površini odlivka kočionog doboša. Pošto je učešće ferita na površini kod svih ispitivanih šarži mestimično i pošto uglavnom prevladava perlitna struktura i pošto tokom rezanja nije menjana pločica, to je uslovlilo malo rasipanje rezultata



otpornosti na habanje alata u periodu inicijalnog habanja. Nakon inicijalnog habanja, uticaj različitih struktura ispitivanih uzoraka uslovljava nagli pad otpornosti na habanje alata koji je najizraženiji kod rezanja uzoraka iz šarže 2I, što logično proizilazi iz mehaničkih i strukturnih karakteristika.

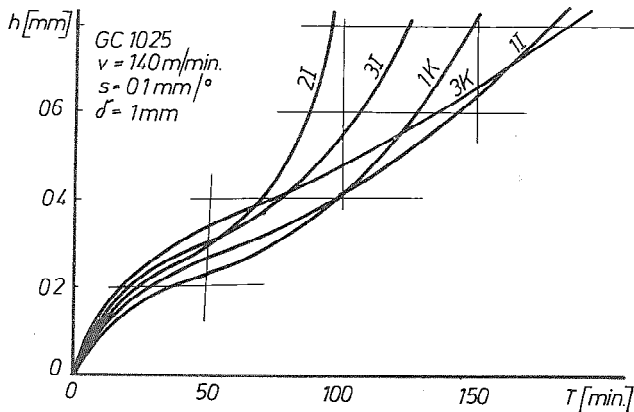
Za kriterijum zatupljenja  $h_k = 0,8$ , određene su postojanosti alata i indeksi obradivosti uz pomoć napred iznetih formula, uzoraka kočionih doboša iz šarži 3k, 1I, 3I, 2I i 1k, koji su grafički i analitički predstavljeni na sl. 14.

Kao etalon uzet je uzorak koji smo obradjivali iz šarže 3k. Sa sl. 14 vidi se da najbolju obradivost ima uzorak iz šarže 3k, a najlošiju obradivost ima uzorak iz šarže 2I.

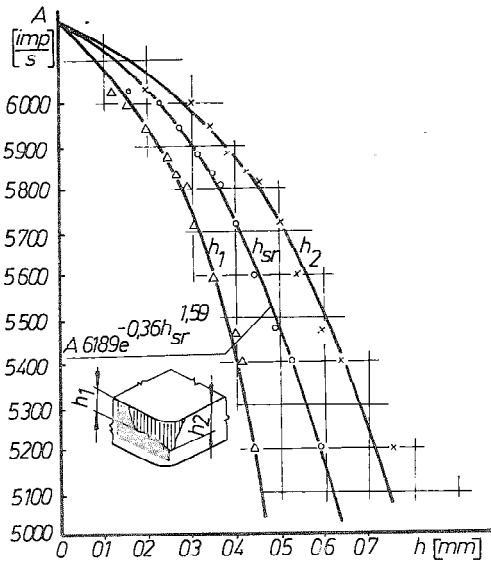
Indeks obradivosti uzoraka iz šarže 2I niži je za 50,6% od rezultata koji je dobijen za uzorak 3k.

Adekvatno variranju vrednosti indeksa obradivosti varira i vreme zatupljenja noža. Za zatupljenost noža  $h_k = 0,8$ , vreme rezanja istog noža kraće je za 93,4 minuta, u slučaju rezanja uzorka iz šarže 2I u odnosu na šaržu 3k.

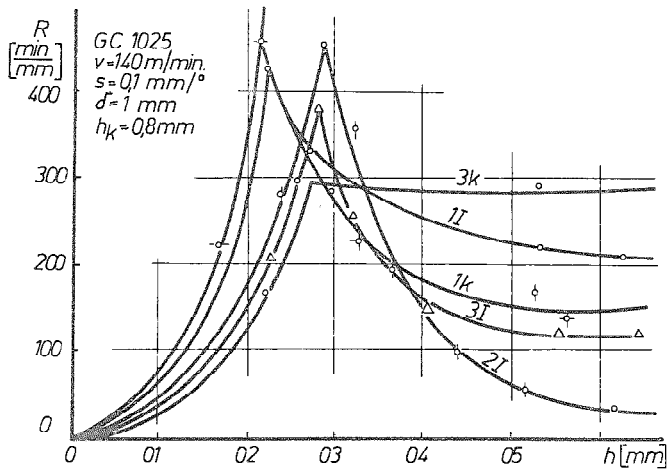
Ako se ima u vidu činjenica da je ekonomičnost obrade u funkciji potrošnje reznog alata, onda je jasno da obradivost dobija još jednu novu dimenziju koja je vrlo značajna kod donošenja odluke o izboru konstrukcijskog materijala.



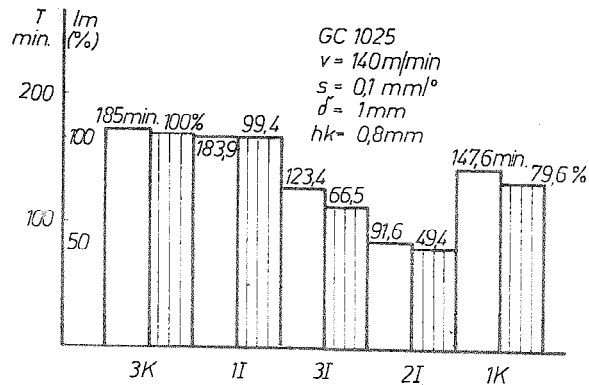
Sl.13 Kriva habanja alata



Slika 11 Veza između radioaktivnosti alata i širine pojasa habanja na ledjnoj površini reznog klina



Slika 12 Krive otpornosti na habanje alata



Slika 14 Postojanost alata i indeksi obradivosti obradljivanih uzoraka iz šarži 3k, 1I, 3I, 2I i 1k

#### 4. Zaključak

Obradivost nije adekvatna osobina materijala sa osobinama kao što su zatezna čvrstoća ili tvrdoća, ona se mora razumeti kao širi pojam koji se odnosi na stanje obradjene površine, brzinu skidanja materijala, lakoću odvajanja strugotine i vreme trajanja alata. Stepem obradivosti zavisi od mnogih metalurških faktora i od postupka mašinske obrade. Obradivost sivog liva menja se sa promenom mikrostrukture, koja je u funkciji kvaliteta tečnog metala. Topljenjem u indukcionim pećima, dopuštena je primena specijalnih tehnoloških metoda obrade tečnog metala kojima se reguliše struktura metalne osnove i raspored oblika i veličina grafita u metalnoj osnovi, čime se optimiziraju svojstva sivog liva.

Ukoliko se tečni liv pre izlivenja ne tretira modifikatorima obradivost takvih odlivaka je daleko lošija, ako se liju iz šarži koje se tope u indukcionim pećima. Ako se tečni liv iz indukcionih peći podvrgne tretmanu modifikatora moguće je proizvesti odlivke vrlo visokih vrednosti mehaničkih osobina a da je obrada takvih odlivaka još ekonomična (šarža 3I).

Na osnovu rezultata ispitivanja utvrđeno je da obradivost sivog liva zavisi od relativne zapremine perlita u osnovnoj metalnoj masi, sadržaja grafita i njegovog rasporeda u metalnoj osnovi, oblika i veličine grafitnih lamela i količine zaostalog cementita.

#### 5. LITERATURA:

- 1 Ž.Knežević: "MAGISTARSKI RAD", Univerzitet u Beogradu, 1981.
2. B.Ivković: "Razvoj radioaktivnih metoda za tribološka istraživanja u obradi metala rezanjem", 10, Savetovanje proizvodnog mašinstva, Beograd 1975.
- 3 J.Hazra, PLD  
E.M. Kennedy, Jr. PLD: "The influence of metallurgical processing on machinability", General Electric Company, 1976.
- 4 C.R.Loper, M.J. Lalich, "Microstructure mechanical property relationship in compacted graphite cast irons", 46 th. International Foundry Congress, 1980.

#### Summary

Main purpose of research in this paper was determination of workability of modified high-quality gray cast iron in dependence of melting procedure and amount of modifiers in state of mechanized mass production and determination of basic technological parameters in production of brakedrums which influence optimal value of tensile strength, hardness, module of elasticity and wear resistance.

After experimentation dependence was determined between index workability, microstructure and quality of liquid metal for brake drum casting (chemical composition, temperature and state in germ for crystalization) which are in function of melting procedure.



M.N.Dumanović<sup>†</sup>

OPTIMIZACIJA REŽIMA REZANJA PRI ZAVRŠNOM STRUGANJU  
SLOŽENE KONTURE PRIMENOM SIMPLEKS METODA

1.0 U V O D

Pod pojmom optimizacije se u najopštijem slučaju podrazumeva delatnost koja se sastoji u definisanju najpovoljnijih rezultata ili rešenja za određene uslove. Odredjeniju i potpuniju definiciju optimizacije, daju tri osnovna pojma, a to su: cilj optimizacije, objekat optimizacije i metod optimizacije. U ovom slučaju, cilj optimizacije jeste postojanost reznog alata, objekat optimizacije su elementi režima rezanja a metod optimizacije, simpleksni metod.

2.0. SIMPLEKSNI METOD OPTIMIZACIJE I USLOVI  
IZVODJENJA EKSPERIMENTA

Simpleksni metod je koncipiran na empirijskoj povratnoj sprezi, matematički strogo formalizovanim pravilima i algoritmu gradijentne teorije po kojoj se sukcesivno pomeraju simpleks planovi na optimalnoj oblasti datog procesa.

U ovom radu, korišćen je pravilan dvodimenzionalni simpleks prikazan na slici Sl-1, a uslovi izvodjenja eksperimenta su sledeći:

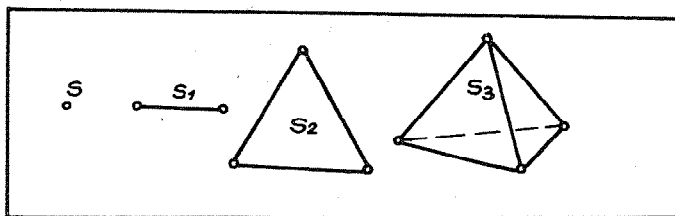
Eksperiment je izveden u pogonskim uslovima industrije "14.OKTOBAR" na numerički upravljanim mašinama tipa RAŠA T200NCR sa upravljačkom jedinicom SYNUMERIK 6T i mogućnošću za kontinualnom promenom brzine rezanja i koraka. Uzorak je tipa osovine, izradjena od čelika Č.4133, i prikazan je na slici sl.-2.

<sup>†</sup>Dumanović N.Mirko, dipl.maš.ing. IMK "14.Oktobar"  
Kruševac, ul.14.Oktobar bb, 37000 Kruševac

Obradak je u poboljšanom stanju, a po poboljšanju obradjen struganjem sa dodatkom za završno struganje  $t=1\text{mm}$ . Na slici sl.2, naglašena je i kontura kretanja alata.

Završno struganje, izvedeno je plbčicom od tvrdog metala u ISO oznaci DNM6 150608 u kvalitetu P-15, proizvođača PP "CORUN". Okretna pločica učvršćena je u nosaču PDJNR 2020K-15.

Sl.1



U toku izvodjenja eksperimenta, postojanost alata je praćena preko habanja ledjne površine oštrice, oblika strugotine i stanja obradjene površine. Prvi parametar utvrđivan je pomoću radioničkog mikroskopa a druga dva vizualno.

Obrada je izvedena uz intenzivno hladjenje i podmazivanje u procesu rezanja. Prilikom promene elemenata režima rezanja ( $V$  i  $s$ ), za svaku tačku simpleksa, uvek je korišćena nova rezna ivica.

### 3.0. PLANIRANJE I IZVODJENJE EKSPERIMENTA

Ovaj se primer odnosi na optimizaciju elemenata režima rezanja sa stanovišta kriterijuma postojanosti reznog alata, pa se stoga može pisati:

$$T = T(V, s)$$

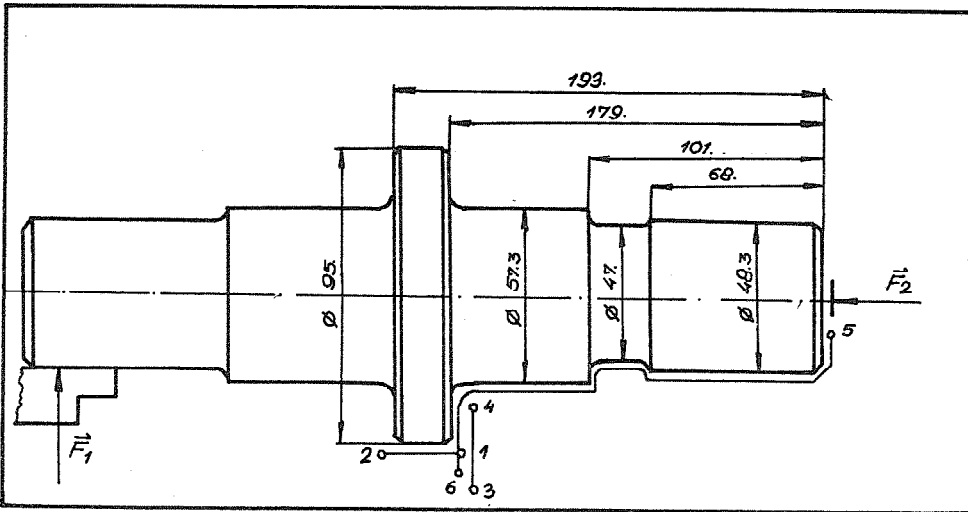
Usvojeni osnovni nivoi i intervali varijacije elemenata režima rezanja navedeni su u tabeli T-2, a tok simpleksne analize, sa rezultatima ispitivanja prikazani su na sl.3 i tabeli T-2.

Dvodimenzionalni, pravilni početni simpleks (sa jediničnom ivicom) postavljen je prema koordinatnom sistemu tako da se vrh A simpleksa, nalazi u samom koordinatnom sistemu simpleksne ravni. Koordinate novog simpleksa, izračunavaju se saglasno sledećoj jednačini:

$$x_{i(k+2)} = 2x_{ic} - x_{it} = \frac{2}{k} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq t}}^{k+1} x_{ij} - x_{it}$$

gde je  $x_{it}$ -koordinata isključene tačke predhodnog simpleksa.

Otuda su kodirane koordinate nove tačke A' u novom simpleksu omeđenom trouglom BCA



Sl.2

$$x_{1,4} = \frac{2}{2} \cdot (0,5 + 1) - 0 = \underline{1,5}$$

$$x_{2,4} = \frac{2}{2} \cdot (0,86 + 0) - 0 = \underline{0,86}$$

dok se odgovarajuće prirodne vrednosti, dobijaju iz sledeće relacije:

$$x_i = \frac{x_i - x_{oi}}{w}, \quad i=1,2$$



T. 1

FAKTOR	OZNAKA	OSNOVNI NIVO	INTERVAL VARIJACIJE w
V(m/min)	X <sub>1</sub>	75	35
s(mm/o)	X <sub>2</sub>	0,08	0,055

T. 2

REDNI BROJ	SIMPLEKS	VRH	FAKTOR				POSTOJANOST T(min)
			X <sub>1</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>2</sub>	
1	ABC	A	0	75	0	0,08	19,0
2	ABC	B	0,5	92,5	0,86	0,127	22,5
3	ABC	C	1	110	0	0,08	27,5
4	BCA	A	1,5	127,5	0,86	0,127	30,0
5	BA'C'	C'	1	110	1,73	0,175	37,3
6	A'C'B'	B'	2	145	1,73	0,175	38,4
7	C'B'A''	A''	1,5	127,5	2,59	0,222	41,2
8	A''B'C''	C''	2,5	162,5	2,59	0,222	48
9	A''B''C''	B''	2	145	3,46	0,27	42,3
10	B''C''A'''	A'''	2,5	180	3,46	0,27	38,2
11	C''A''B'''	B'''	3,5	197,5	2,59	0,222	33,9
12	C''B''A''''	A''''	3	180	1,73	0,175	36,8

odakle sledi da je:

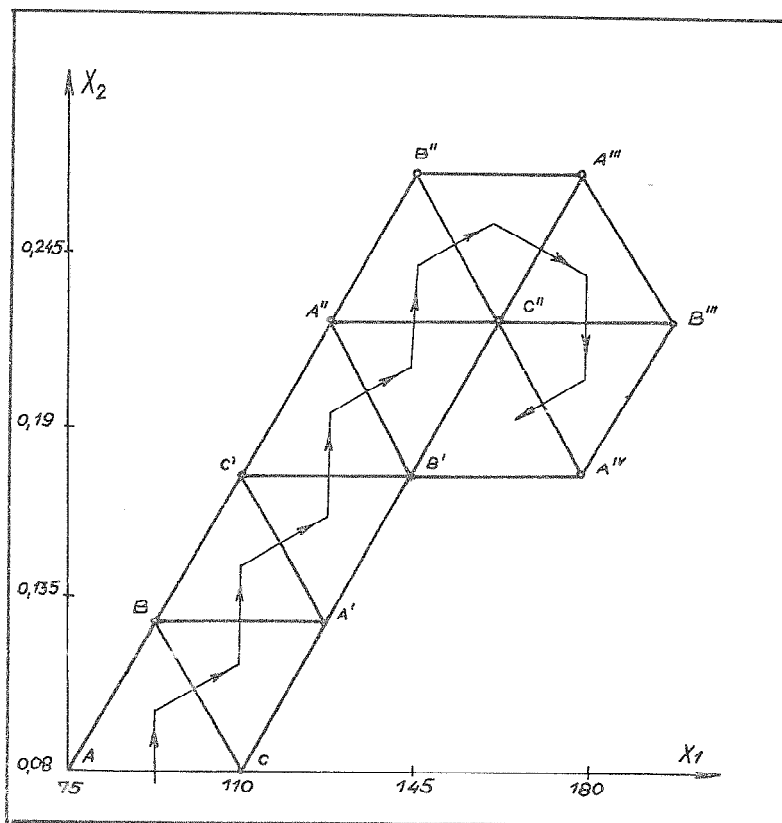
$$1,5 = \frac{X_1 - 75}{35}$$

Odnosno  $0,86 = \frac{X_2 - 0,08}{0,55}$

odakle sledi da je:

$$X_1 = 35 \cdot 1,5 + 75 = \underline{\underline{127,5}}$$

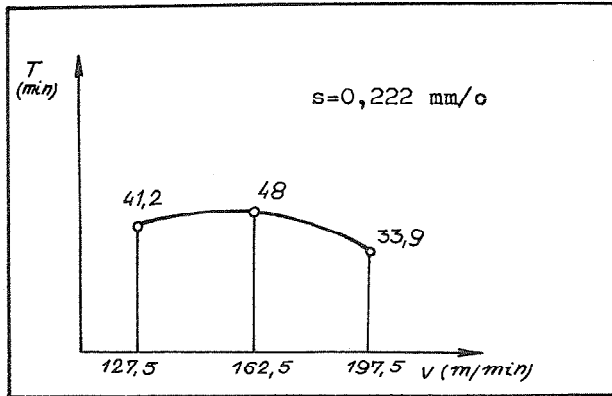
$$X_2 = 0,86 \cdot 0,055 + 0,08 = \underline{\underline{0,127}}$$



Sl. 3

Na isti način, određuju se i položaji novih tačaka u narednim simpleksima.

Jasno se može uočiti, da oko tačke C" počinje cirkulacija simpleksa, pa se ova tačka može smatrati traženim optimumom procesa.



Sl.4

Dakle, može se reći da su za navedeni slučaj, optimalni režimi rezanja:

$$\begin{aligned} V &= 162,5 \text{ m/min.} \\ s &= 0,222 \text{ mm/o} \end{aligned}$$

pri čemu je postojanost reznog alata maksimalna i iznosi 48 min.

Kako je pri  $s=0,222$  o/min izveden najveći broj eksperimenata (tri), moguće je nacrtati dijagram postojanosti reznog alata u zavisnosti od brzine rezanja. Navedena zavisnost je prikazana na slici Sl.6, odakle se vidi da se postojanost reznog alata menja po uobičajenoj krivoj liniji.

#### 4.0. Z A K LJ U Č A K

Simpleksni metod je u odnosu na druge metode optimizacije u znatnoj prednosti, koja se pre svega ogleda u njegovoj većoj adaptivnosti realnom stanju procesa u vremenu i prostoru. Primenom simpleksne metode optimizacije, moguće je optimizirati elemente režima rezanja, čime se omogućuje postizanje niza pozitivnih efekata, kao što su najniža cena obrade,

najmanja opterećenost mašine i drugo.

Simpleksnom metodom optimizacije, moguće je optimizirati ne samo elemente režima rezanja, već i proizvodnost tehnološkog procesa u celini, i slično.

#### Reference

1. Dr. Joko Stanić, METOD INŽENJERSKOG MERENJA, Osnove matematičke teorije eksperimenata, Mašinski Fakultet, Beograd 1981.
2. Dr. Joko Stanić, UVOD U TEORIJU TEHNOEKONOMSKE OPTIMIZACIJE PROCESA, Mašinski Fakultet, Beograd 1983.godine.
3. E. I. Kruglov, O. I. Darimov, OPTIMIZACIJA PROCESA TORCEVOGO FREZEROVANJA, Stanki i instrument, Vol.3/1978, Mašinstroenie, Moskva 1978.godine.
4. Dušan Vukelja, Anto Mišković, INŽENJERSKE METODE OPTIMIZACIJE sa primerima iz prakse, Gradjevinska knjiga, Beograd 1985.

#### S u m m a r y

In the paper the method of optimization elements of the regime cutting on the occasion of final scarping complex surface is given. This experiment is done under working conditions in the factory "Traveling units" of the industry of "14.October" using regular twodimensional simplex. The optimization has been made in consideration of existence cutting tools.

Handwritten text, likely bleed-through from the reverse side of the page. The text is extremely faint and illegible.

F. Roethel\*, J. Grum\*, H. Muren\*, M. Valič\*\*, M. Junkar\*

НАЧРТОВАНJE LASERSKEGA REZANJA

1.0 UVOD

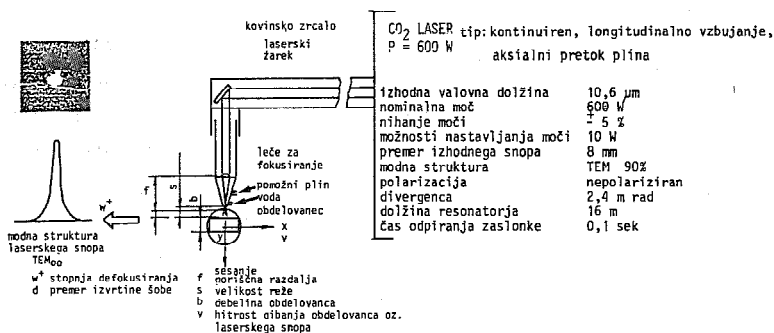
Laser kot obdelovalno orodje se je v zadnjem desetletju močno uveljavilo zaradi tehničnih in gospodarskih prednosti na posameznih področjih obdelave. Obdelava s pomočjo laserske svetlobe odpira najrazličnejše možnosti v smislu različnosti tehnologij, kot tudi uporabo na različnih materialih. Ozko usmerjena laserska svetloba predstavlja izjemno koncentriran izvor energije, ki jo je potrebno prirediti za posamezne obdelovalne procese. Za obdelavo je laser primeren takrat, ko potrebujemo visoko energijsko gostoto za ogrevanje. Taki postopki so toplotna obdelava kovin, rezanje, vrtanje in označevanje, glaziranje (steklenje), oblaganje - oplemenitenje površin z dodajnimi materiali (platiranje, legiranje). Primernost posameznih vrst materialov za obdelavo z laserskim snopom določajo njegove lastnosti kot so: absorbtivnost površine, toplotna prevodnost, temperatura tališča/vrelišča oziroma tališna/uparjalna toplota, gorljivost in temperaturna razteznost.

- 
- \* Franc Roethel, dr.mag., dipl.ing., redni profesor  
Janez Grum, dr.mag., dipl.ing., izr.profesor  
Hinko Muren, dr.mag., dipl.ing., redni profesor  
Miha Junkar, dr.mag., asistent  
Fakulteta za strojništvo, Univerza E. Kardelja v Ljubljani,  
Murnikova 2, 61000 Ljubljana
- \*\* Marko Valič, dr., dipl.ing. ISKRA, Center za elektrooptiko,  
Stegne 7, 61210 Ljubljana - šentvid

## 2.0 EKSPERIMENTALNA ZASNOVA

### Karakteristike laserja

Na mestu interakcije laserske svetlobe z materialom moramo zagotoviti takšne obdelovalne pogoje, ki omogočajo lasersko rezanje. Na sliki 1 imamo prikazan kontinuirni difuzijsko hlajeni CO<sub>2</sub> laser z načinom vodenja laserskega snopa preko zrcala in leč za fokusiranje. Pomembna je izvedba poti snopa ali načina prenosa laserskega snopa od izvora do obdelovalnega mesta.



Sl. 1 Shematični prikaz kontinuirnega CO<sub>2</sub> laserja in struktura moda laserskega snopa na površini obdelovanca

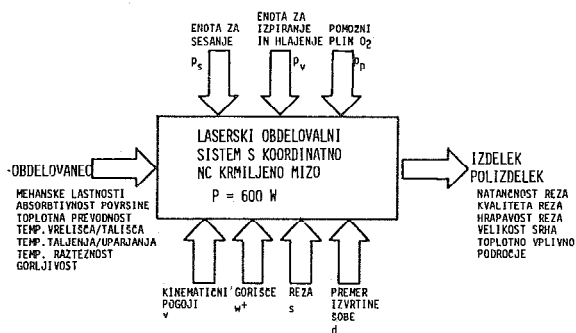
Laserska svetloba mora biti do površine obdelovanca zaščitena, kajte nevidna laserska svetloba z valovno dolžino 10,6 μm lahko predstavlja nevarnost za operaterja in okolico. Pri laserski obdelavi pogosto laserskemu snopu koaksialno dodajamo še ustrezne pline, ki v danih primerih pospešujejo obdelovalni proces ali preprečujejo oksidacijo materialov. Hkrati pa varujejo fokusirano lečo pred poškodbami, zaradi odbite laserske svetlobe v povratni smeri. Karakteristike laserskega obdelovalnega sistema ISKRE CEO z oznako LMP600, na katerem so bile opravljene tudi vse izvedene raziskave rezanja so podane na skrajni desni strani slike 1.

Zelo pomembni del laserskega obdelovalnega sistema je numerično voden koordinatna miza s prigradjeno računalniško enoto BOSCH ALFA. Računalniška enota je vezana z vmesnikom na nadzorni sistem laserja, kar omogoča vžig laserja, odpiranja in zapiranja zaslonke, odpiranje in zapiranje pomožnega plina itd. V splošnem moramo zagotoviti stabilnost naslednjih parametrov:

- izbiro leče z ustrežno goriščno razdaljo;
- izbiro primerne relativne razdalje gorišča od zgornje površine obdelovanca;
- izbiro šobe z ustrežno odprtino in pravilno nastavitev velikosti reže pred šobo in zgornjo površino obdelovanca;

- izbiro ustrezne nastavitve pomika laserskega snopa ali obdelovalca;
- izbiro ustrezne vrste pomožnega plina in pravilne pretočne količine;
- izbiro ustrezne hladilne in sesalne enote laserskega obdelovalnega sistema.

Na sliki 2 imamo v shematični obliki predstavljen laserski obdelovalni sistem, ki ima na vходу material obdelovanca z ustreznimi lastnostmi in na izhodu po obdelavi izdelek ali polizdelek spremenjenih lastnosti. Nastopi vprašanje, kako izbrati dane obdelovalne pogoje označene na spodnjem delu slike, da dobimo izdelek z ustrezno dimenzijsko in oblikovno natančnostjo, ustrezno kvaliteto reza - hrapavost, velikost srha, izgled reza ter neizrazito toplotno vplivno področje.



Sl. 2 Shematični prikaz delovanja laserskega sistema za rezanje

Izbrani materiali za rezanje

Za preskus rezanja z laserskim snopom smo izbrali dinamo pločevino in krom-molibdenovo jeklo za poboljšanje.

Material za prvoserijo preskusov rezanja je bila valjana dinamo pločevina z oznako EN360-65, ki ima obojestransko zaščito s tankim oksidnim slojem oziroma z obojestransko zaščito z lakom. Z izbranimi preskusi laserskega rezanja mehko magnetne pločevine je potrebno razviti ustrezne kriterije za načrtovanje te tehnologije uporabniku ISKRA Železniki. Material je izdelan po licenci tovarne ARMCO in je namenjen za izdelavo statorskih in rotorskih lamel za prototipe elektromotorjev vgrajenih v gospodinjске aparate. Debelina pločevine je 0,65 mm.

Toplotna obdelava mehko magnetne pločevine pred rezanjem je bila naslednja:

- temperatura žarjenja  $790^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$
- čas pregrevanja 2 uri
- hitrost ogrevanja  $\max 200^{\circ}\text{C/h}$
- atmosfera v peči  $20\% \text{H}_2 + 80\% \text{N}_2$
- hitrost ohlajanja  $\max 120^{\circ} \text{C/h}$



Material za drugo serijo preskusov rezanja je bilo krom molibdenovo jeklo za poboljšanje č.4734 (VCMo230). Namenjeno je za izdelavo dinamično obremenjenih delov strojev, motorjev in vozil z visoko trdnostjo in žilavostjo. Debelina pločevine je 2,0 mm.

#### Obdelovalni pogoji

Uvodne meritve laserskega rezanja so nam omogočile opredeliti manj vplivne in močnejše vplivne parametre. Manj vplivne parametre smo vzeli v raziskavi kot konstantne parametre. Ti so naslednji: stopnja defokusiranja  $w^+ = 1,0$  mm, moč laserja  $P_L = 80W$ , tlak pomožnega plina  $p_p = 0,5$  bara, tlak vode  $p_v = 1,8$  bara.

Parametre z močnejšo vplivnostjo na kvaliteto reza pa smo vzeli kot variabilne parametre. Ti so naslednji: velikost izvrtine šobe 3-9-14 in 20 mm, velikost reže 0,5 in 1,5 mm, hitrost pomika laserskega snopa 0,3 in 0,7m/min, tlak sesanja 835 - 870 mbarov oziroma 880-900 mbarov.

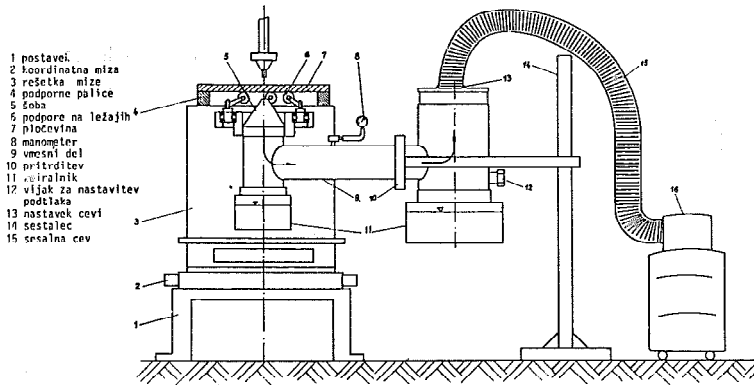
Tlak sesanja  $p_s$  se v dani konstrukcijski izvedbi nastavlja z ustreznim vijakom in je odvisen od nastavitve reže "s" med šobo in pločevino. Odstopanje pri položaju vijaka nam omogoča regulacijo tlaka sesanja v velikostnem rangu 5 % za nižje tlake oziroma 2 % za višje tlake. Tako je možno nastavljati nižje tlakov sesanja v območju 835 - 870 mbarov in višje tlake sesanja v območju 880-900 mbarov.

### 3. EKSPERIMENTALNI REZULTATI IN ANALIZA

Predstavitve izdelanega sistema za odsesavanje

Pri laserskem rezanju se energija laserskega snopa zaradi absorpcije pretvori v lokalizirano toploto. Posledica je dvig temperature, taljenje in uparevanje materiala. Skozi režo prši raztaljeni material, prisoten pa je tudi pomožni plin, ki je za kovinske materiale kisik. Na sliki 3 je prikazan sesalni sistem, ki je bil v sklopu raziskovalne naloge razvit in testiran. Ob vključitvi danega sistema za odsesavanje dosežemo naslednje:

- sesanje žlindre, ki brizga skozi režo. Za uspešno in pravilno sesanje mora biti sesalna šoba postavljena v soosnosti z režo na materialu, ki ga režemo;
- pri intenzivnejšem sesanju dosežemo, da se žlindra zbere v sesalni posodi;
- v primeru sesanja je potrebno izbrati tudi ustrezne obdelovalne pogoje. Pri manjši stopnji sesanja, ali pri manjši velikosti reže med šobo in pločevino, dosežemo pršenje žlindre mimo vstopne odprtine v sesalni sistem. Najpogosteje te težave rešujemo z velikostjo (premerom) šobe;



Sl. 3 Izgled sesalne enote prigradjene k laserskemu obdelovalnemu sistemu

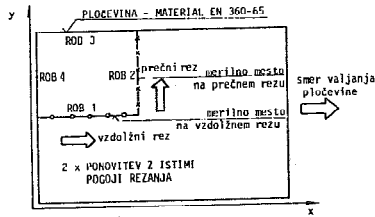
- z vlekom oz. sesanjem ogorine skozi režo dosežemo tudi dodatno hlajenje materiala.

V primeru, ko vključimo še curek hladilne in izpiralne vode, lahko ugotovimo sledeče:

- Del hladilne vode brizga skozi režo in jo sesalni sistem posesa. Tako dosežemo pospešeni pretok vode skozi režo in sledi še močnejše izpihavanje.
- Del vode, ki odteka po pločevini se zbira v ustrezni posodi pod šobo.
- V primeru visokega podtlaka se preprečuje nihanje pločevine in s tem tudi spreminjanje lege goriščne razdalje, kar v končni fazi negativno vpliva na kvaliteto reza. Z ustrezno konstrukcijo ležajne podpore za vodenje pločevine na mestu rezanja zagotavljamo stalnost parametrov rezanja, kar daje stalno kvaliteto reza.

#### Metodologija rezanja

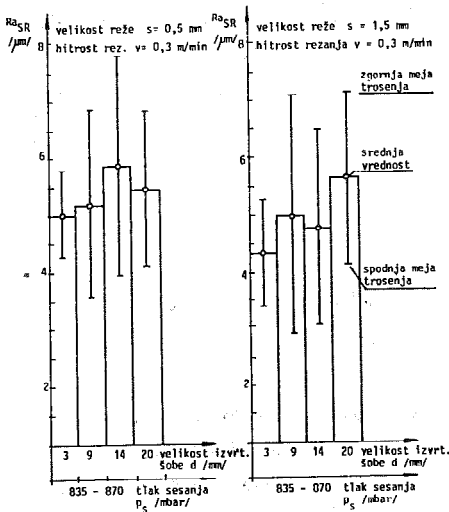
Rezultate merjenja učinkov procesa rezanja pri različnih obdelovalnih pogojih smo zasledovali z merjenjem hrapavosti reza, velikosti srha in z vizualnim ocenjevanjem stanja prerezane površine. Vizualna ocena nam pogosto pove, kako je potrebno izbirati posamezne pogoje rezanja, da dosežemo ustrezno kvaliteto reza. Na sliki 4 imamo prikazano metodologijo rezanja pločevine in izbiro merilnih mest. Smer rezanja na pločevini smo opredelili s smerjo valjanja pločevine. vzdolžna smer rezanja predstavlja isto smer, kot je smer valjanja pločevine, dočim je prečna smer rezanja pravokotna nanj. Tako smo dobili prerezane robove 1, 2, 3 in 4, na katerih smo predpisali po pet merilnih mest. Vsak režim oziroma posamezne obdelovalne pogoje smo testirali na dveh ponovitvah.



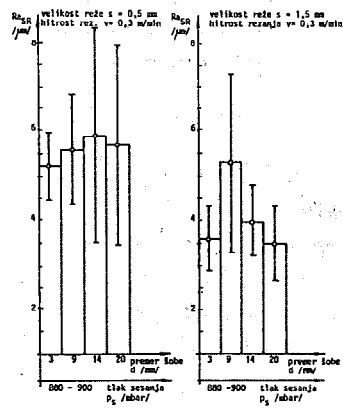
Sl. 4 Način rezanja pločevine in izbira merilnih mest na posameznih prerezanih ploskvah

### Rezultati preskusov na mehki dinamo pločevini

Na sliki 5 imamo prikazano velikost srednje hrapavosti in njeno trosenje omejeno z zgornjo in spodnjo mejo pri nižjem tlaku sesanja med 835 do 870 mbarov - sesanje brez hlajenja/izpiranja z vodo. Prvi diagram velja za velikost reže  $s = 0,5$  mm, a drugi diagram za velikost reže  $s = 1,5$  mm, v obeh primerih pa posamezni stolpci veljajo za različne premere izvrtine šobe. Ugotavljamo, da je najmanjše trosenje izmerjene hrapavosti reza pri najmanjšem premeru izvrtine šobe 3 mm, prav tako pa dosežemo tudi najmanjše vrednosti za srednjo hrapavost  $R_{aSR}$ . Predvidevamo, da se pojavijo tako velika odstopanja v hrapavosti pri posameznih premerih šob predvsem zaradi nestacionarnih razmer fokusne razdalje do zgornje površine obdelovanca pogojene zaradi ukrivljenosti pločevine ali pa tudi zaradi dinamičnih efektov.

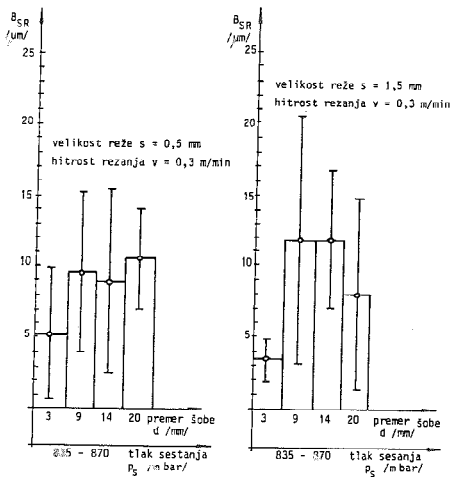


Sl.5 Vpliv velikosti reže in premera šobe na nastanek hrapavosti reza pri nižjem sesalnem tlaku



Sl.6 Vpliv velikosti reže in premera izvrtine šobe na velikost srednje hrapavosti reza pri večjem tlaku sesanja

pomično podajalne enote. Na podoben način smo analizirali velikost hrapavosti  $Ra_{SR}$  in njeno trosenje pri večjem tlaku sesanja med 880 in 900 mbari, kar je prikazano na sliki 6. Ugotovimo lahko, da je ponovno najugodnejši obdelovalni režim z ozirom na hrapavost tisti, ki ima najmanjši premer izvrtine šobe 3 mm oziroma zelo blizu je tudi šoba z največjim premerom izvrtine 20 mm. Da naredimo ustrezno izbiro obdelovalnega režima moramo opraviti še primerjave o velikosti srha na spodnji strani reza in vizuelno oceno kvalitete reza. Opravljene so bile tudi meritve velikosti srha, ki so za nižje tlake sesanja 835 do 870 mbarov prikazane na sliki 7. Stabilnejšo kvaliteto reza z ozirom na velikost srha dobimo pri velikosti reže  $s = 1.5$  mm, hitrosti rezanja  $v = 0,3$  m/min in premeru šobe  $d = 3$  mm. Velikost srednje vrednosti srha je v tem primeru najmanjše in znaša okoli  $3,5 \mu\text{m} \pm 1,5 \mu\text{m}$ . Nekoliko manj ugodne razmere dobimo pri manjši velikosti reže  $s = 0,5$  mm in pri enakih preostalih obdelovalnih pogojih, kot v prejšnjem primeru. Srednja vrednost velikosti srha se je povečala na vrednost  $5,2 \mu\text{m}$  in z bistveno večjim trosenjem velikosti srha  $\pm 4,5 \mu\text{m}$ . Na osnovi poznanih raziskav o rezanju mehkih jekel lahko ugotovimo, da smo v našem primeru dobili izjemno dobro kvaliteto reza.



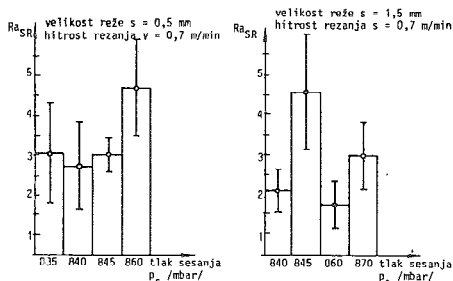
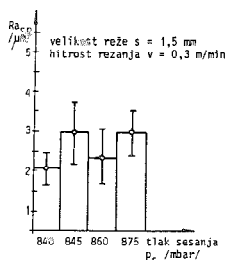
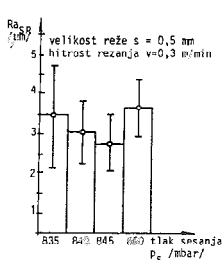
Ne glede na velikost trosenja izmerjene hrapavosti lahko trdimo, da je rez v našem primeru zelo fin in gladek. Dokazano je, da pri mehkejših materialih lahko opravljamo procese rezanja pri večjih rezalnih hitrosti, večji moči in tudi večjemu iznosu tlaka. Postopek rezanja je v tem primeru znatno intenzivnejši, ki pa nam znatno poslabša kvaliteto reza. Tako zbrani obdelovalni pogoji so primerni le taktat, ko želimo dobiti večjo produktivnost, ne polagamo pa posebne pozornosti hrapavosti površine reza. Vzoredna primerjava domačih in tujih raziskovalnih rezultatov o rezanju mehkih jekel nam potrjujejo,

### Sl. 7 Velikost srha po rezanju z danimi obdelovalnimi pogoji in nizkem tlaku sesanja (ses.-brez hlajenja in izpiranja)

da pri istem tlaku rezalnega kisika dobimo pri povečanju velikosti reže tudi povečano širino reza. To pa pomeni, da dobimo povečano velikost hrapavosti in povečano velikost srha oziroma izpada mase. Pridodatnem hlajenju in izpiranju z vodo dosežemo stabilnejši pretok rezalnega plina in s tem finejši

in ožji rez, obstaja pa nevarnost, da zaradi dobrega izpiranja ogorine povečamo tudi hitrost odvoda toplote in s tem povečano velikost srha.

Na sliki 8 je prikazan vpliv tlaka sesanja na kvaliteto reza ob istočasni uporabi hladilne in izpiralne vode pri hitrosti rezanja  $v = 0,3$  m/min, velikosti reže 0,5 in 1,5 mm. Na sliki 9 pa so predstavljeni rezultati raziskav kvalitete reza pri rezalni hitrosti  $v = 0,7$  m/min in pri enakih preostalih rezalnih pogojih. V splošnem lahko ugotovimo, da je velikost srednje hrapavosti in njeno pripadajoče trosenje znatno manjše pri manjši rezalni hitrosti in se giblje med 2 do 4,5  $\mu\text{m}$ . Rezultati hrapavosti reza so za 70 - 100 % manjši kot v primeru, ko ne uporabljamo izpiranja in hlajenja z vodo. Če pa primerjamo še velikosti srha pri rezanju z vodo ali



S1.8 Velikost srednje hrapavosti po rezanju z danimi obdel. pogoji in nižjem tlaku sesanja (sesanje in hlajenje/izpiranje z vodo)

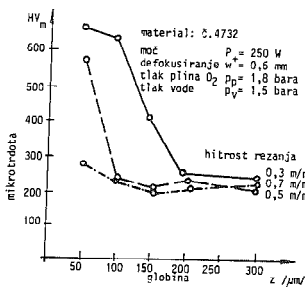
S1.9 Velikost srednje vrednosti hrapavosti po rezanju z danimi obdel. pogoji in nižjem tlaku sesanja (sesanje in hlajenje/izpiranje z vodo)

brez nje pa ugotovimo nasprotno, da se velikost srha poveča za 100 do 200 % v odvisnosti od velikosti premera izvrtine šobe. Izbiro tehnologije rezanja v danem primeru lahko izvedemo v prvem primeru na osnovi kriterija hrapavosti reza oziroma v drugem primeru na osnovi velikosti srha. Izjemo predstavlja le velikost šobe 3 mm, ki jo priporočamo za rezanje dinamo pločevine debeline 0,65 mm. Pri tej šobi dobimo minimalno srednjo hrapavost reza  $2 \mu\text{m} \pm 0,4 \mu\text{m}$  in velikosti srha  $3 \mu\text{m} \pm 2,2 \mu\text{m}$ .

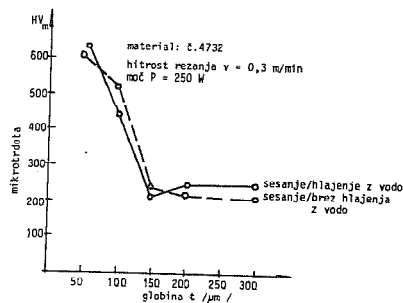
#### Toplotno vplivno področje

Kvaliteto reza poleg hrapavosti reza in velikosti srha pogosto dopolnjujemo z analizo toplotno vplivnega področja. To področje spremljajo različne strukturne spremembe, ki jih lahko identificiramo z mikro oziroma makro analizo površinskega sloja in z merjenjem mikrotredote. Analizirali smo toplotno vplivno področje na dinamo pločevini EN 360-65 in legiranem

krom-molibdenovem jeklu za poboljšanje č.4734. Pri analizi toplotno vplivnega področja na dinamno pločevini lahko ugotovimo povečanje hrapavosti srha z naraščajočo hitrostjo rezanja. Razlike maksimalnih vrednosti srha in hrapavosti niso velike zato se odločimo pri izbiri nastavnih parametrov na značilnostih toplotno vplivnega področja. To področje predstavlja zelo tanek sloj do globine  $50 \mu\text{m}$ , pri čemer so strukturne spremembe omejene le v globino nekaj mikrometrov. Pri danih rezalnih pogojih nismo opazili bistvenih razlik v toplotno vplivnem področju pri rezanju z vodo ali brez nje, saj je odziv vpliva vode v materialu v vseh primerih minimalen. Večje odstopanje smo zasledili v primerih konturnega rezanja pod ostrimi koti, kjer se je toplotni vpliv v obdelovancu znatno povečal. Pri tem smo dobili večje odstopanje v dimenziji in obliki, prihajalo pa je tudi do sežiga materiala. Izrazitejše učinke toplotnih razmer pa smo zasledovali pri rezanju legirnega jekla č.4734. Pločevino debeline 2 mm smo izrezali na ustrezno dimenzijo in obliko lamele za sklopke. Na sliki 10 lahko ugotovimo vpliv hitrosti ohlajanja na nastanek strukturnih sprememb v materialu. Pri zelo podobnih vrednostih srednje hrapavosti in velikosti srha na rezih opravljenih z različnimi rezalnimi hitrostmi govori o pomembnosti toplotnih vplivov pri izbiri tehnologije. V kolikor ne želimo imeti strukturnih sprememb v trdoti potem lahko izberemo največjo rezalno hitrost  $v = 0,7 \text{ m/min}$ , če pa so strukturne spremembe na rezu zaželeno potem lahko rezalno hitrost znižamo na  $v = 0,3 \text{ m/min}$ . Na sliki 11 imamo upoštewane učinke rezanja s sesanjem



Sl.10 Toplotno vplivno področje s strukturnimi spremembami identificiranimi z merjenjem mikrotrdote v globino

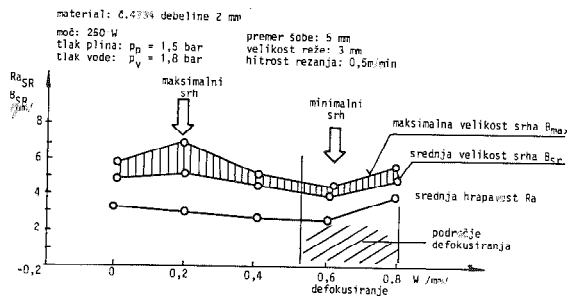


Sl.11 Vpliv sesanja in z ali brez hlajenja/izpiranja z vodo na velikost in značaj toplotno vplivnega področja v globino reza z danim režimom

ogorine/žlindre ter z ali brez hlajenja/izpiranja z vodo. Toplotno vplivno področje je pri najmanjši rezalni hitrosti  $v = 0,3 \text{ m/min}$  v enakih globinah

in z enakimi strukturnimi spremembami oziroma enakim potekom trdote v globino ne glede ali izvedemo proces rezanja s hlajenjem/izpiranjem z vodo ali ne. Pri danem postopku rezanja s sesanjem dobimo minimalne razlike v srednji vrednosti hrapavosti in velikosti srha. Te vrednosti so za rezanje s sesanjem  $R_{aSR}/B_{SR} = 4,29 \mu\text{m}/4,83 \mu\text{m}$ , dočim za rezanje s sesanjem in oz. uporabo vode  $R_{aSR}/B_{SR} = 4,64 \mu\text{m}/4,08 \mu\text{m}$ . Omenjene karakteristike so v danem primeru v nepomembnem odstopanju, kar pomeni, da v danem primeru proces rezanja izvedemo le s pomočjo sesanja.

Na sliki 12 je prikazana odvisnost med stopnjo defokusiranja in kvaliteto reza popisano s srednjo vrednostjo hrapavosti  $R_{aSR}$ , maksimalno vrednostjo srha  $B_{max}$  in srednjo hrapavostjo srha  $B_{SR}$ . Optimalna stopnja defokusiranja po kriteriju minimalnega srha in minimalne hrapavosti sledi iz diagrama v območju od  $+0,55\text{mm}$  do  $+0,8\text{mm}$ , kar predstavlja približno  $1/3$  debeline pločevine. Ta vrednost odgovarja analitičnim spoznanjem drugih avtorjev, ki so te procese študirali na različnih materialih in pri različnih rezalnih pogojih.



Sl. 12 Velikost srednje hrapavosti in srha v odvisnosti od stopnje defokusiranja pri danih pogojih rezanja

#### 4. ZAKLJUČKI

V sklopu načrtovanja laserske tehnologije smo opravili raziskave posameznih rezalnih parametrov na velikost srednje hrapavosti in srednje velikosti srhov s pripadajočim trosenjem. V raziskavo smo vključili tudi analizo toplotno vplivnega področja, ki zajema makro in mikrostrukturno analizo in merjenje trdote v globino in vzdolž reza. Za uspešno načrtovanje laserskega rezanja smo priredili lasersko glavo za hlajenje in izpiranje z vodo, razvili in testirali pa smo tudi sistem za sesanje ogorkov/žlindre s spodnje strani obdelovanca. Rezultati uvodnih meritev so vzpodbudni, saj smo uspeli na številnih testiranih materialih uspešno predpisati tehnološke pogoje rezanja za industrijske razmere.

## L i t e r a t u r a

- /1/ Roethel F.: Toplotno odnašanje z energijskimi žarki, Seminar 13 -LAKOS, Žarki, toplota, površina in obdelava, Ravne na Koroškem 1986, 1 - 12
- /2/ Nuss R., Biermann S., Geiger M.: Precise Cutting of Sheet Metal Metal with CO<sub>2</sub> - Laser, Laser Treatment of Materials, Ed.: B.L. Mordike; DGM Informationsgesellschaft mbH, Oberursel 1987, 279 - 288
- /3/ Han Y.H., Decker I., Ruge J.: Laser Cutting of Selectet steels: Micro-structural Changes and their Efect on the Mechanical Properties, Laser Treatment of Materials, Ed.: B.L. Mordike; DGM Informationsgesellschaft mbH, Oberursel 1987, 289 - 297
- /4/ King T.G., Powell J.: Laser - Cut Mild Steel - Factors Affecting Edge Quality, Wear 109, 1986, 135 - 144
- /5/ Moriyasn M., Hiramoro S., Hoshinouchi S., Ohmine M.: Adaptive Control for High-Speed and High-Quality Laser Cutting, Laser Welding Machining and Materials Processing, Ed.: C. Abright, Proc. of the Int.Conf. on Application and Electro-Optics (CALEO'85, IFS Publications) Ltd, Springer Verlag, Berlin, 1985, 129 - 136
- /6/ Olsen F.O.: Investigations in Optimizing the Laser Cutting Process, Laser in Material Processing, Ed.: Metzbower E.A., American Society for Metals, 1983, 64 - 80

F. Roethel, J. Grum, H. Muren, M. Valič, M. Junkar

## PLANNING OF LASER-BEAM CUTTING

## S u m m a r y

The process of laser-beam cutting is influenced by a number of process parameters, which makes the technology prescription difficult to choose. Laser-beam cutting can be economical only if the adjustment parameters of the process are well planned. The cutting conditions are prescribed not only by the physical values of the beam but also by the characteristics of the feed system of the machine and its accessories and by work material properties. To the existing laser CW 700 W, manufactured by Elektrooptika Ljubljana, the following devices were attached: a suction unit for the burnt-off particles, and a unit for cooling the work place with a jet of water in which exists the laser beam. On several materials cutting was applied first using the usual method and then in a combination with suction and cooling. On the basis of these tests, the workpiece properties and the



quality of cut were defined, and the criteria and selection tables to be used in planning laser beam-cutting were worked out. The table enables the choice of individual requirements concerning the input parameters or their combinations. The required output parameters can be: roughness of cut, knife size, hardness, depth of thermal effect or cutting speed and depth of cut. On these output parameters it was also verified what is the efficiency of the additional suction and cooling units and their effect on the quality of cut and on the planning of the technology of the process.

F. Roethel\*, G. Lakovič, M. Dobovšek, M. Junkar, M. Znidaršič

ОБРАБА РОБОВ ПОД ВПЛИВОМ EDM PARAMETROV

1. UVOD

V zadnjem času raziskujemo elektroerozijski proces odnašanja z grezenjem s ciljem avtomatizacije priprave izdelave z računalnikom in izboljšanja poteka procesa. Končni namen je vključitev sistema elektroerozijske obdelave v CHIM oz. CIM. Vključitev EDM (elektrodischarge machining - elektroerozijska obdelava) sistema za grezenje bo dalj časa ostala problem zaradi značilnosti elektroerozijskih naprav, ki ne omogočajo doslednega krmiljenja procesa. Obstoječe naprave z različnimi sistemi zanesljivo omejujejo negativne vplive v procesu na količino odnešenega materiala in kakovost površine obdelovanca, ne krmilijo pa še procesa pri vseh vplivnih parametrih. Za pripravo tehnologije raziskujemo vpliv zaokrožitev ostrih robov na obrabo elektrod in odnašanje materiala. Za boljšo identifikacijo procesa smo razvili nov analizator, ki omogoča računalniško vrednotenje osnovnih parametrov procesa. Vsak sistem, ki je odvisen od konstrukcijske izvedbe proizvajalca, drugače krmili potek procesa. Zato je potrebno pri raziskavah temeljito zasledovati potek procesa z možnimi identifikacijskimi parametri in z njihovim popisom tudi načrtovati obdelovalne (nastavitvene) parametre.

2. IZHODIŠČA RAZISKAV PROCESA IN OBRABE

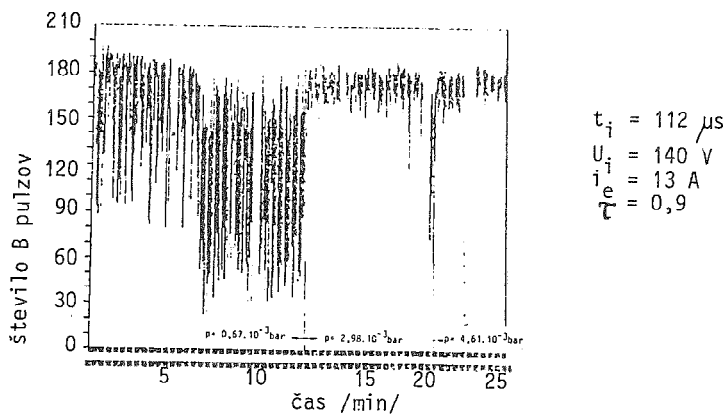
Pri meritvah procesa smo uporabljali napravo Ingersoll 80P z generatorjem CB2200 in s prigradenim krmiljenjem "adaptimat", ki omejuje število nenormalnih (neželenih) razelektritev "C" (kjer je tok v impulzu skoraj konstanten ( $i_{ea}$ )) v zaporedju. Večje zaporedje neželenih razelektritev povzroča poškodbe površin, ker se locira v ozkem polju. Zato je izbira števila dopustnih neželenih razelektritev odvisna od zelene kakovosti oz. razreda

---

\* Franc Roethel, dr.mag.,dipl.ing., redni profesor, Fakulteta za strojništvo, Univerze E.Kardelja v Ljubljani, Murnikova 2, 61000 Ljubljana

hrapavosti površin. Preprečevanje kratkostičnih "D" ( $i_s$ ) in prostih impulzov "A" ( $i=0$ ) izvaja sama naprava s svojim regulacijskim in servosistemom za primično gibanje. Adaptimat pri pojavu serije razelektritev C v prvi stopnji izpušča izbrano število napetostnih impulzov; pri pojavu zgostitve reakcij v drugi stopnji sproži majhen odmik elektrode, da poboljša izpiranje. Če pa se tudi reakcije druge stopnje zgoščujejo, povzroči zgostitev večji odmik. Pri izboljššanju situacije v reži regulacija popušča ukrepe. Tudi druga in tretja stopnja imata nastavljivo občutljivost.

Potek procesa grezenja moramo še ročno optimirati z nastavljanjem reže (Uref.) in pretoka dielektrika med pomikanjem elektrode v obdelovanec. Naš izbrani kriterij kakovosti procesa predstavlja število delovnih B (tok  $i_e$  pri gorilni napetosti  $u_e$ ) razelektritev napram številu vseh impulzov ki ga predstavlja frekvenca  $\lambda_e$ . Proces okarakteriziramo še s potekom frekvenc  $\lambda_s$ ,  $\lambda_i$  in  $\lambda_{ea}$ , ki popisujejo frekvenco impulzov oblike D, A in C. Navedene frekvence je možno opazovati na analognih instrumentih na adaptimatu. Na instrumentu lahko približno odčitamo in ocenimo srednjo vrednost in raztros impulzov B ter nastavljamo pretok dielektrika z ročnim nastavljanjem ventila, ki spreminja tlak v sistemu ali pa spremenimo tudi velikost reže. Posledice ročne optimizacije so vidne na procesu (sl. 1), seveda pa tudi vplivi regulacij. Med zagonom smo nastavili tlak dielektrika. Sčasoma je pričelo povprečje  $\lambda_e$  padati, obenem pa se je večal raztros. Ročno smo povečali tlak, medtem ko se je elektroda pogrezala v obdelovanec in s tem večala pot dielektrika. Tlak smo povečevali do te mere, da se je proces povrnil približno do začetne vrednosti  $\lambda_e$ .

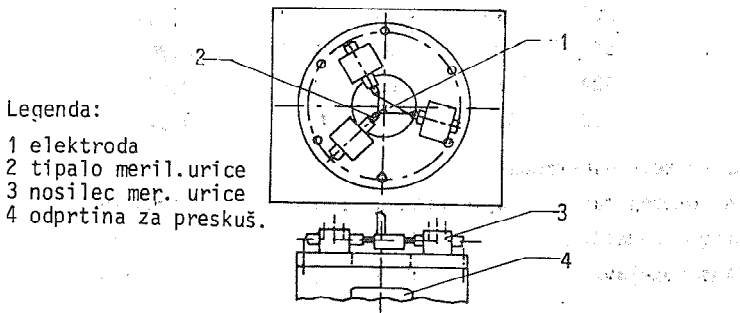


Sl. 1 Potek delovnih impulzov B v časovni enoti merjenja

### 3. MERILNI STAVKI IN PARAMETRI OBDELAVE

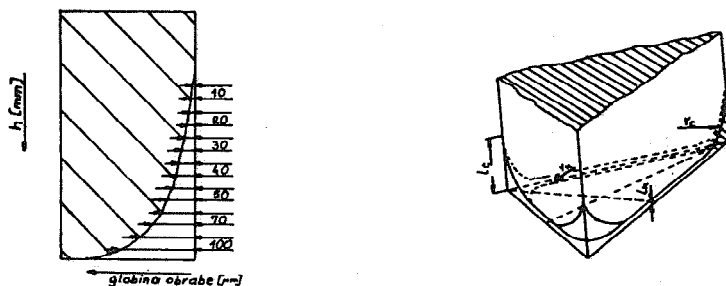
Cilj pričujoče raziskave je vnaprej predvideti obrabo elektrod za tehnološko načrtovanje procesa odnašanja z želeno kakovostjo površin po mikro in makro obliki ter materiala obdelovanca. Predvsem nas zanima relativna linearna obraba robov elektrode ( $V_{lc}$ ), ki je v grobem parameter obdelane oblike obdelovanca. Obraba je funkcija števila razelektritev z značilnim potekom in velikostjo energije impulzov ter gostoto porazdelitev v prostoru obdelave za izbran elektrodni material ter material obdelovanca in dielektrika. Porazdelitev energije po prosotru in času je odvisna od fizikalnih lastnosti procesa. Upoštevati moramo, da električna poljska jakost pred proženjem impulza ni konstantna po vsej površini, saj eksponentno narašča z manjšanjem kota roba elektrode. Pri raziskavi vpliva kota - robov smo izbrali trikotno elektrodo (21 x 12 mm) s koti 30°, 60° in 90°. Glavni razlog za večje obrabe robov je lokalno povečanje števila razelektritev in poteka toka v impulzu.

Za merjenje obrabe robov smo izdelali merilni pripomoček (sestavljen iz vpenjal in merilnih uric) (sl. 2), ki omogoča hkratno merjenje vseh robov brez vmesnega izpenjanja, kar je omajilo napake zaradi nastavitvev. Pripomoček je bil vpet na delovno mizo elektroerozijskega stroja tudi med procesom grezanja. Na posebni vpenjalni napravi, z izvrtino za prehod elektrode



Sl. 2 Merilni pripomoček za merjenje obrabe robov

po preboju, je vpet preskušane pravokotne oblike, da omogoča 6 preskusov. Skozi izvrtino preskušanca vodimo dielektrično tekočino pod tlakom (tlačno izpiranje). Tri standardne merilne ureice so na pripomoček vpete tako, da merijo vsaka svoj rob (popisan s kotom in zaokrožitvijo). Odčitavali smo odstopke na vsakem milimetru višine elektrode (sl.3) s premikom elektrode ob urici pred in po obdelavi. Ker je bil premik izveden v vpetem stanju, je ostal položaj točk na robu elektrode pred in po obdelavi nespremenjen.



Sl. 3 Merilna mesta na elektrodi

Elektroda je bila iz elektrolitskega bakra z  $\rho_E = 8870 \text{ kg/mm}^3$ , material obdelovanca pa č.4150 (oznaka Žel.Ravne OCR12) z  $\rho_W = 7600 \text{ kg/m}^3$  in debelino 10 mm. Že pred obdelavo so bile v obdelovanec izvrtane luknje premera 6 mm za izpiranje, ki so povzročile tudi manjšo dolžinsko obrabo, kot pa če bi erozija potekala v polno. Trikotne elektrode (debeline 10 mm) so bile izdelane na robovih z radiji 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 in 1 mm. Za fino obdelavo smo izdelali elektrode z istimi radiji, le da so bile vse za 0,2 mm večje. S tem smo se želeli približati praksi.

Nastavitveni parametri za preskuse so bili:

št. testa	$t_p$ ( $\mu\text{s}$ )	$t_i$ ( $\mu\text{s}$ )	$t_o$ ( $\mu\text{s}$ )	$f_p$ (kHz)	(-)
1.	510	450	60	1,96	0,90
2.	124	112	12	8	0,90
3.	50	44	6	20	0,87

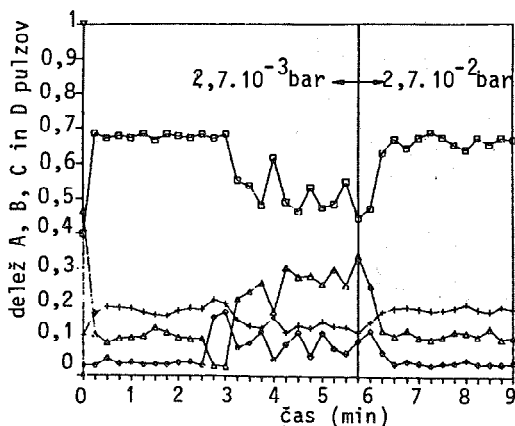
polariteta elektrode (+)

in posebej za:	$u_i$ (prosta napetost)	$i_e$ (impulzni tok)
groba obdelava	140 V	13 A
fina obdelava	180 V	6,5 A

Za identifikacijo procesa smo uporabljali nov analizator impulzov, ki klasificira impulze A, B, C, D in omogoča sočasno analizo drugih parametrov, značilnih za proces. Za primerjavo z drugimi in starimi meritvami je tak sistem najugodnejši, čeprav obstajajo tudi sistemi, ki klasificirajo impulze po obliki bolj podrobno. Klasifikacija impulzov A, B, C, D je izvedena po nivojih napetosti v reži med impulzom. Posamezno vrsto impulzov vodimo z optičnim kablom (vlakni) v računalnik PC. Za vrednotenje in krmljenje lahko vključimo tudi druge procesne računalnike.

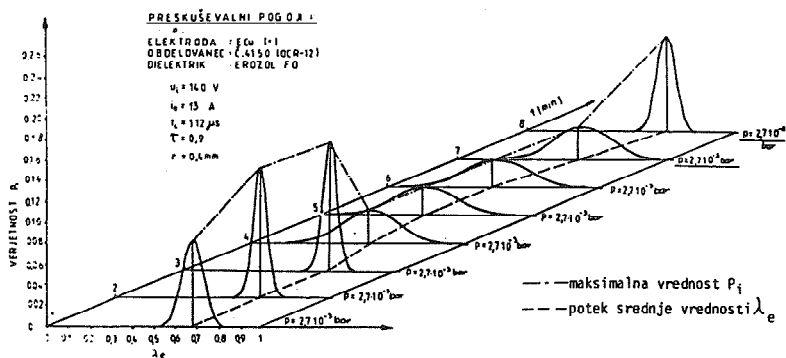
## 4. MERITVE PROCESA IN OBRABE

Pri opisanem programu dela za merjenje obrabe smo med preskusi merili potek vsake vrste impulza ločeno (primer za B sl.1). Očitno je, da se kljub regulacijam število B impulzov napram drugim impulzom zelo naključno spreminja. Začetno stabilizacijo procesa nastavimo ročno z izbiranjem Uref in tlakom dielektrika p. Kriterij optimizacije smo postavili z določevanjem maksimalnega  $\lambda_e$ . Že v začetku ga je težko nastaviti, ker je njegov raztros velik, pa tudi njegov trend ni izrazit. Za boljše spremljanje procesa smo filtrirali (z računalnikom) signal in ugotovili, da je takoj po začet i stabilizaciji sorazmerno stabilen, nakar sorazmerno hitro pade (sl. 4), obenem pa se mu prične povečevati tudi raztros (sl. 5). Meje filtra časovnega poteka  $\lambda_e$  so v odvisnosti od vrste procesa kadar želimo pravočasno ugotoviti karakterističen odklon srednje vrednosti. Očitno je, da operater ne zapazi

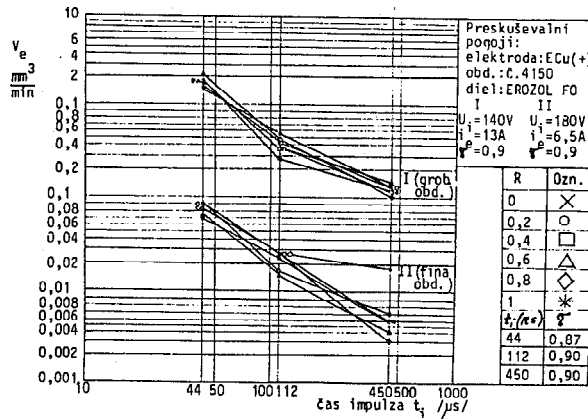


Preskuševalni pogoji:  
 elektroda: ECu  $u_i = 140V$   
 obdelovanec: Č.4150  $i_i = 13A$   
 dielektrik: EROZOL FO  $\epsilon^e = 0,9$

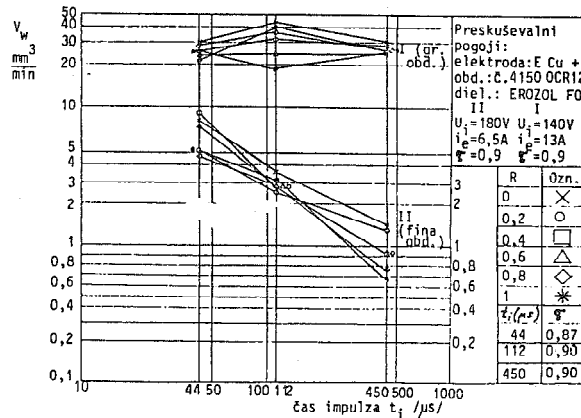
—□— B ( $\lambda_e$ )  
 —+— A ( $\lambda_c$ )  
 —△— C ( $\lambda_{ca}$ )  
 —◇— D ( $\lambda_s$ )

Sl. 4 Potek frekvenc  $\lambda$  v času procesa odnašanjaSl. 5 Poteki distribucij frekvence  $\lambda_e$  v času procesa odnašanja

takoj padca srednje vrednosti (sl. 4) in reagira šele po daljšem času povečanega raztrosa. Na optičnem instrumentu so namreč vzorci za vrednotenje srednjih vrednosti premajhni in instrument opozori operaterja šele z velikimi odkloni. Potek raztrosov  $\lambda_e$  in zakasnela reakcija operaterja s spremembo (povečanjem) tlaka vstopnega dielektrika sta lepo vidni na sliki (sl.5). Zbrani rezultati meritev kažejo trend padanja volumske obrabe elektrode, ki je bil doslej že poznan, pri katerem kažejo radiusi močnejši vpliv pri fini obdelavi in daljšem času  $t_i$  (sl. 6). Pri merjenju odnašanja (odvzema obdelovanca) je vpliv radiusov tudi večji pri fini obdelavi, kjer kažejo povečani  $t_i$  tudi manjše odnašanje, medtem ko ima odnašanje pri grobi obdelavi bolj neizrazit trend (sl. 7). Iz rezultatov meritev vidimo, da obstoječe krmiljenje procesa ne zadošča za dovolj zanesljivo napovedovanje obrabe in odnašanja,



Sl. 6 Odvisnost obrabe elektrode od časa impulza  $t_i$  in radiusov robov



Sl. 7 Odvisnost odnašanja od časa impulza in radiusov robov

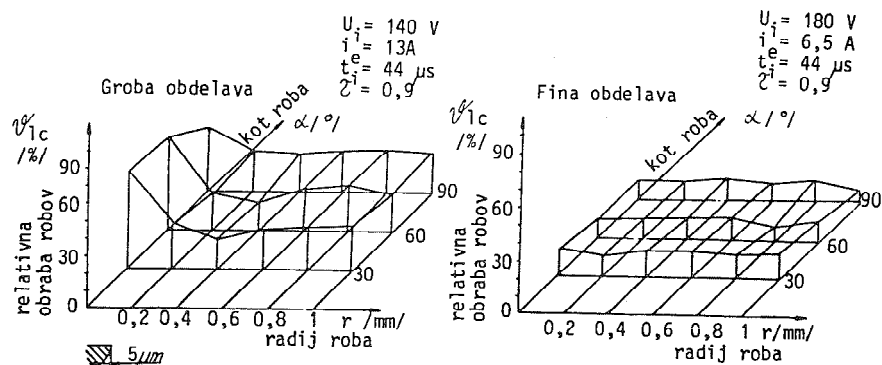
ker so drugi vplivi močnejši od samih radiusov, kar kaže raztros. Sedaj lahko načrtujemo obrabo le z zgornjo mejo raztrosov, da dobimo zanesljiv preračun.

Za načrtovanje v tehnologiji smo izmerili robno obrabo elektrod in izračunali tudi relativno obrabo robov:

$$\mathcal{V}_{1c} = \frac{l_c}{h} \cdot 100 \%$$

kjer je  $l_c$  obraba roba elektrod,  $h$  pa globina erodiranja. Iz številnih diagramov, ki smo jih izdelali za vse načrtovane pogoje dela, je možno analizirati relativne obrabe v odvisnosti od velikosti obrabe in drugih parametrov procesa.

Na osnovi zbranih informacij smo dobili vpogled v dogajanja. Po preverjanju zanesljivosti točk in analizi procesa jih bo mogoče vključevati v izračun tehnologije. Ugotovili smo močan vpliv pretoka dielektrika in mesto izpiranja poleg kota in radija na robu. Značilen primer diagrama je podan na sliki 8.



S1. 8 Odvisnost relativne obrabe robu od kota in radiusa

## 5. SKLEP

Iz opravljenih meritev je razvidno:

- Obstoječe regulacije EDM sistemov ne optimirajo procesa v taki meri, da bi potek procesa ne vplival bolj na robno obrabo, kot pa sami radiusi.
- Za izboljšanje poteka in načrtovanje obdelave je potrebno avtomatično optimirati pretoke dielektrika in pri načrtovanju upoštevati mesto roba v odvisnosti od čelne ploskve obdelovanca in izvora dielektrika.
- Porazdelitev pretoka preko obdelovanca in roba ima bistven vpliv na obrabo.



- Obfabo je zaenkrat možno predvideti le v določeni široki toleranci.
- Obrabo v ožji toleranci je možno določiti le na simetričnih profilih elektrode /3/.
- Z novim merilnim stavkom je mogoče temeljiteje identificirati proces.
- Meritve parametrov obdelave so nezanesljive brez identifikacije poteka procesa z upoštevano regulacijo.

#### L i t e r a t u r a

- /1/ Roethel, F., Dobovšek, M.: Načrtovanje postopkov elektroerozijske obdelave, Strojniški vestnik, l. 1985/7-8, str. 143 - 147.
- /2/ Dobovšek, M., Roethel, F.: Contribution to computer aided process planning of EDM, International conference on advanced manufacturing systems and technology, AMST'87, Opatija 1987, str. 219 - 225.
- /3/ Schumacher, B.: Der Verschleissvorgang und Industrieanzeiger, 1967/89, Nr. 50, s. 127 - 132
- /4/ Berkan, J.: Shape wear of tool electrodes and its influence on technology in EDM, ISEM 7, 1983

F. Roethel, G. Lakovič, M. Dobovšek, M. Junkar, M. Znidaršič

#### INFLUENCE OF EDM PARAMETERS ON ELECTRODE EDGE WEAR

##### S u m m a r y

The shape of the workpiece machined by EDM sinking process depends greatly on the electrode shape, whose edges wear mostly depends on physical characteristics of the process. The evaluation of the edge wear in dependence of the impulse current intensity, the impulse duration time, and the electrode edge radius and angle is needed for appropriate planning of machining technology. The electrode wear is influenced by the process performance which was assessed and detected by the measuring system - "process analyser - optical cable - PC". The computer evaluation of process performance measuring data show, that the existing regulation on EDM machines is not efficient enough in control and exact description of the electrode wear. The investigation results can already be used in process planning.

B. Jeremić, S. Karalazić\*

IZRADA UNUTRAŠNJE TRASE CEVI ELEKTROHEMIJSKIM  
POSTUPKOM SA POKRETNOM KATODOM

1. UVOD

Savremeni razvoj i visoki zahtevi u pogledu veka trajanja i pouzdanosti vitalnih elemenata oružja, usloveli su i primenu novih vrsta materijala sa karakteristikama koje treba da zadovolje veoma stroga ograničenja (velika tvrdoća i žilavost, povišena otpornost na habanje, itd.). Primenu novih materijala najčešće veoma smanjene obradivosti, u svetu prati razvoj novih tehnologija i opreme pomoću kojih se ovaj problem prevazilazi.

Sledeći veoma važan aspekt je vezan za karakteristike defektnog sloja i topografiju obradjene površine. Ove činjenice su značajnije u slučajevima kada se na kontaktne površine elementa nanose slojevi poboljšanih triboloških karakteristika, a što je čest slučaj kod oružja.

U saopštenju se daje pristup definisanju tehnologije i opreme za izradu unutrašnje trase cevi oružja elektrohemijским postupkom sa pokretnom katodom. U odnosu na neke druge načine izrade unutrašnje trase, ova tehnologija ima niz prednosti i predstavlja značajnu oblast istraživanja u svetu.

Saopštenje koje se prezentira je proizašlo kao rezultat razvoja jedne savremene tehnologije i opreme prvenstveno za potrebe naše vojne industrije.

2. RAZMATRANJE PROBLEMA

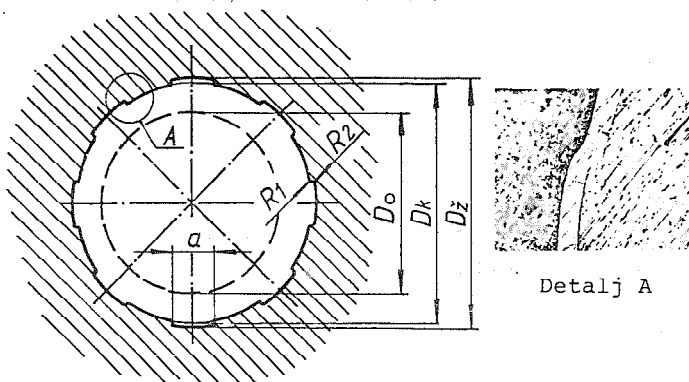
Osnovne specifičnosti primene tehnologije elektrohemijske obrde (ECM) za izradu unutrašnje trase vezane su za odnos dužine

---

\*) Dr Branislav Jeremić, dipl. inž., docent. Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, ul. S. Janjić br. 6.

Mr Stanimir Karalazić, dipl. inž., Glavni tehnolog za istraživanje i razvoj, RO "FNP-ZASTAVA", ul. Španskih boraca br. 4.

cevi i kalibra (koji je skoro uvek veći od pedeset), kao i složenost profila i tačnost mera koje pri tome treba ostvariti, sl. 1.



Sl. 1. Profil unutrašnje trase cevi

- $D_o$  - polazni prečnik predmeta obrade
- $D_k$  - prečnik kalibra
- $D_z$  - prečnik preko žljebova
- $a$  - širina žljebova
- $R_1$  - radijus na kalibru
- $R_2$  - radijus na žljebu

Veoma bitna geometrijska karakteristika unutrašnje trase odnosi se na korak zavojnih žljebova u cevi  $S_c$ , koji može biti konstantan ili progresivan u zavisnosti od veličine kalibra.

Sa tehnološkog aspekta i nezavisno od drugih specifičnosti, unutrašnja trasa cevi se može formirati pomoću ECM sa:

- nepokretnom katodom i
- pokretnom katodom.

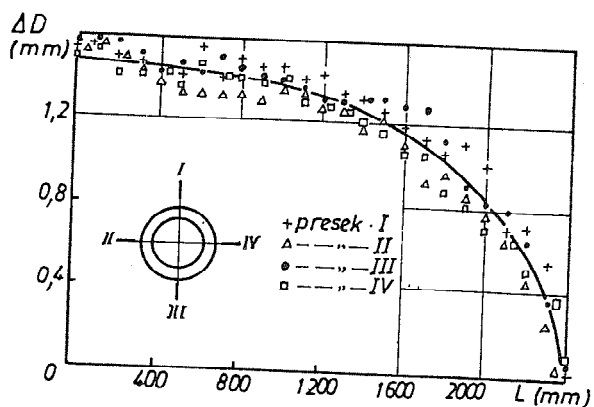
U prednosti obrade sa nepokretnom katodom spada:

- jednostavna kinematika mašine i
- veća proizvodnost

, dok su nedostaci vezani za:

- problem obezbedjenja visokih struja kod dugih otvora (zbog velike radne površine katode i potrebne gustine struje),
- otežanu izradu katoda složene geometrije i velikog odnosa dužine i prečnika,
- ugib i centriranje katode i
- otežano postizanje istog profila unutrašnje trase po celoj dužini cevi.

Od pomenutih nedostataka najteže se prevazilazi poslednji, tj. odstupanje profila po dužini otvora. Ovo je povezano sa promenom brzine skidanja metala po dužini cevi zbog povećanja količine produkata obrade u radnom elektrolitu. Zbog navedenog se kod dugih otvora mogu pojaviti značajna odstupanja prečnika, sl. 2.



Sl. 2. Promena prečnika u zavisnosti od dužine otvora u procesu ECM sa nepokretnom katodom

Kao pouzdana alternativa za prevazilaženje pomenutih nedostataka vezanih za formiranje složenih profila kod dugih otvora je primena tehnologije ECM sa pokretnom katodom.

### 3. MAŠINA I ALATI ZA ECM SA POKRETNOM KATODOM

Mašina za ECM sa pokretnom katodom razvijena je na osnovu tehničko-tehnoloških zahteva koji se odnose na:

- donju i gornju granicu kalibara cevi,
- veličinu koraka zavojnih žljebova u cevi i
- tačnost mera i kvalitet obradjene površine.

Mašina je fleksibilna pa se može upotrebiti i za eksperimentalna istraživanja procesa ECM.

Osnovne eksploatacijske karakteristike mašine definisane su na osnovu ograničenja vezanih za pouzdano odvijanje procesa obrade i postizanje zahtevanih tehničko-tehnoloških zahteva.

Ova ograničenja se prvenstveno odnose na:

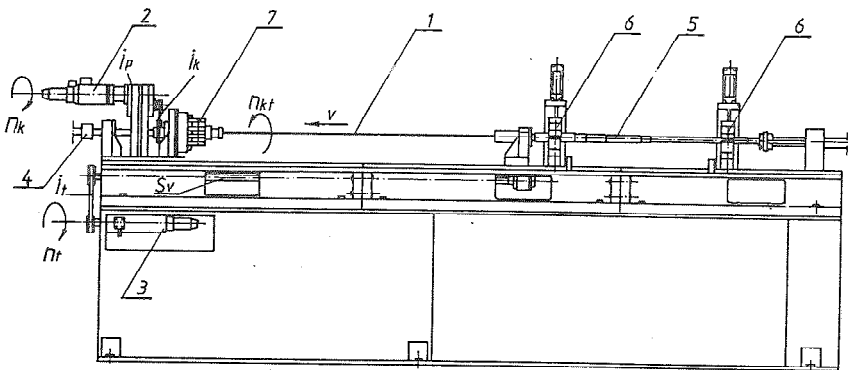
- kinematiku mašine,
- parametre radnog elektrolita i

- obezbeđenje potrebne električne energije za izvođenje procesa obrade.

Po strukturi, mašina za ECM bliska je agregatnim mašinama. Nju čine sledeće funkcionalne celine:

- mašina (u užem smislu),
- izvor napajanja električnom energijom za izvođenje procesa obrade i
- postrojenje za pripremu i distribuciju radnog elektrolita.

Mašina (u užem smislu) za ECM unutrašnje trase cevi sa pokretnom katodom prikazana je na sl. 3.



Sl. 3. Šema mašine

Oznake sa sl. 3 se odnose na:

- 1 - nosač katode (alata),
- 2 - elektromotor za obrtno kretanje katode (REG 2)
- 3 - elektromotor za translatorno kretanje katode (REG 1)
- 4 - merna grupa sa davačima za kontrolu parametara radnog elektrolita (T-temperatura, Q - protok, p-pritisak)
- 5 - predmet obrade (cev)
- 6 - pribori za baziranje, vertikalno stezanje i priključci anode
- 7 - obrtni električni priključak za katodu

Osim navedenih, na sl. 3 se nalaze i neophodne oznake za definisanje kinematike i upravljanja mašinom, a to su:

- $v$  (mm/min) - brzina translatornog kretanja katode,  
 $n_{kt}$  ( $\text{min}^{-1}$ ) - broj obrta katode,  
 $n_t$  ( $\text{min}^{-1}$ ) - broj obrta pogonskog elektromotora za translatorno kretanje katode,

$n_k$  ( $\text{min}^{-1}$ ) - broj obrta pogonskog elektromotora za obrtno kretanje katode,

$i_p$  - prenosni odnos pužnog reduktora,

$i_k, i_t$  - prenosni odnosi zupčastih kaišnih prenosnika i

$S_v$  (mm) - korak zavojnog vretena.

Složeno kretanje katode u procesu ECM obezbedjuje se pomoću dva nezavisna servo motora jednosmerne struje (2 i 3).

Brzina translatornog kretanja katode ostvaruje se preko kinematskog lanca čiji elementi stoje u odnosu:

$$v = \frac{n_t}{i_t} \cdot S_v \quad (1)$$

Složeno kretanje katode, odnosno korak zavojnih žljebova u cevi je:

$$S_c = \frac{n_t}{n_k} \cdot \frac{S_v \cdot i_p \cdot i_k}{i_t} \quad (2)$$

Iz jednačina 1 i 2 dobija se:

$$S_c = \frac{v}{n_k} \cdot i_p \cdot i_k \quad \text{ili} \quad S_c = K \cdot \frac{v}{n_k} \quad (3)$$

Izabrani servomotori imaju širok dijapazon kontinualne promene brojeva obrta  $n_k$  i  $n_t$ . Samim tim dobijena je mašina za ECM čije eksploatacione karakteristike omogućuju širok spektar različitih koraka zavojnih žljebova u cevi i promena parametara režima obrade  $v$ .

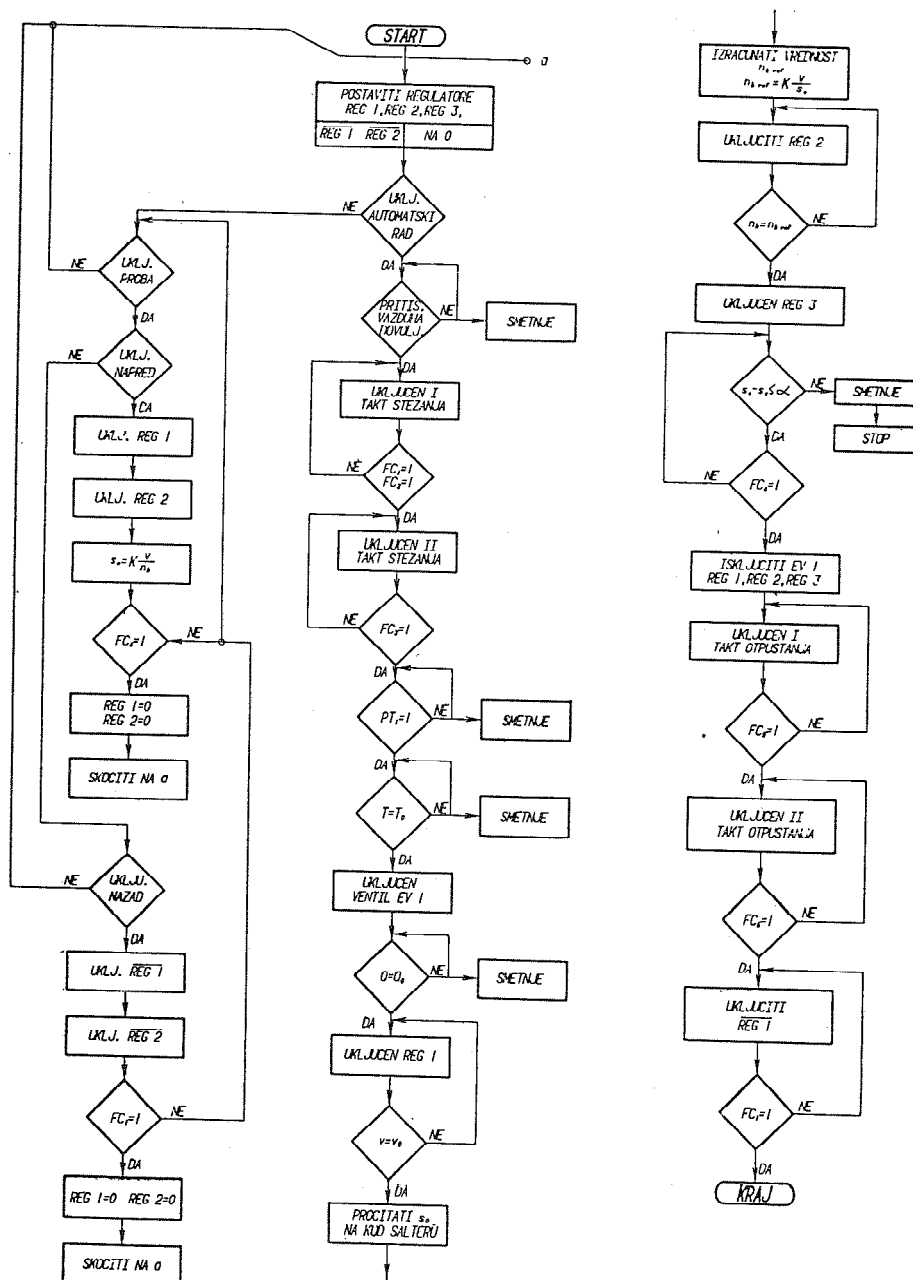
Radni elektrolit se dovodi u zonu obrade kroz mernu grupu (4), šuplje vratilo, nosač katode (1) i delimično katodu.

Električna struja za izvodjenje procesa ECM dovodi se preko obrtnog priključka (7), nosača katode (1) i pribora za stezanje predmeta obrade (6).

Upravljanje mašinom i parametrima procesa izvedeno je pomoću programskog sistema za logičko upravljanje (PLC).

Neophodno je napomenuti da se u procesu ECM zadaje korak zavojnih žljebova  $S_o$ , jer je konstantna veličina za određeni kalibar cevi.

Mašina za ECM ima mogućnost rada na dva karakteristična režima i to: "PROBA" i "AUTOMATSKI RAD", sl. 4.

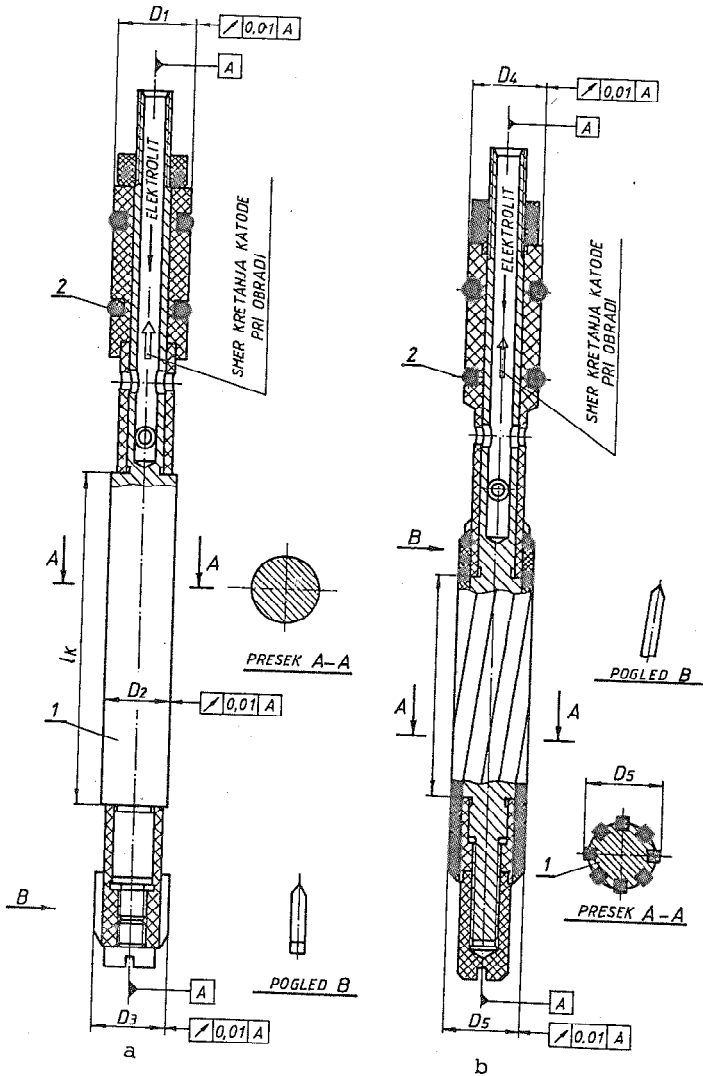


Sl. 4. Algoritam procesa ECM unutrašnje trase cevi sa pokretnom katodom

Izrada unutrašnje trase cevi (sl. 1) pomoću ECM izvodi se kroz dve nezavisne operacije i to:

- obrada u cilju postizanja mere kalibra, kada se povećava prečnik otvora sa  $D_0$  na  $D_k$  uz obezbedjenje zahtevanog kvaliteta i tačnosti i

- formiranje zavojnih žljebova koraka  $S_c$  i geometrijskih karakteristika:  $D_k - D_z$ ,  $a$ ,  $R_1$  i  $R_2$ .



Sl. 5. Alati (katode) za izradu unutrašnje trase cevi  
 a - za ECM na meru kalibra  
 b - za ECM zavojnih žljebova



Alati (katode) za izvođenje navedenih operacija prikazani su na sl. 5.

Ostale oznake prema sl. 5 su:

1 - radni deo katode,

2 - zaptivni prstenovi i

$l_k$  - dužina radnog dela katode.

Osim radnih delova katoda, svi ostali elementi su izrađeni od izolacionog materijala.

Prečnici  $D_1$ ,  $D_2$  i  $D_3$  katode za ECM na meru kalibra definisani su na osnovu mera i tolerancija polaznog prečnika  $D_0$  i kalibra  $D_k$ . Kod katode za izradu zavojnih žljebova prečnici  $D_4$  i  $D_5$  određeni su na osnovu mere i tolerancije kalibra.

Pored složenog kretanja katode kod izrade zavojnih žljebova, ovo kretanje je neophodno i kod obrade na meru kalibra, jer se pri tome u značajnoj meri može uticati na tačnost i kvalitet obrade.

#### 4. ZAKLJUČAK

Izrada unutrašnje trase cevi oružja primenom ECM sa pokretnom katodom predstavlja savremenu tehnologiju kojom se prevazilaze problemi vezani za: tačnost i kvalitet obrade, primenu materijala cevi velike tvrdoće i žilavosti.

Projektovana mašina se zbog eksploatacijskih karakteristika i savremenog sistema upravljanja (PLC) može primeniti za familiju kalibara kao i za istraživanje i optimizaciju procesa ECM kod formiranja otvora složenih geometrijskih oblika na elementima pneumatike, hidraulike, itd.

Zbog prirode i osnovne namene ove tehnologije i opreme (vojna industrija) kroz saopštenje nisu dati i neki konkretni podaci od značaja za izradu mašine i projektovanu tehnologiju, ali to, nadamo se, nije od uticaja na razumevanje suštine ovog rada.

#### Reference

- /1/ J. Meijer, J.C. M. Veringa: Characteristic numbers to describe the detail transfer quality of electro-chemical machining, Precision engineering, April 1984. Vol. 6, No 2, pp 79-82.

- /2/ P. C. Pandey., Ranjit Sing., K. G. Asthana.: Effect of electrode rotation on the accuracy of hole reproduction in electro-chemical drilling, Precision engineering, Jan. 1984, Vol. 6, No 1, pp 17-23.
- /3/ Izveštaji za I i II godinu rada na projektu: "Istraživanje postupka i projektovanje opreme za izradu unutrašnje trase cevi elektrohemijskim postupkom sa pokretnom katodom", Mašinski fakultet, Kragujevac, jun 1987., decembar 1988. god.
- /4/ Б. Артамопов и др.: Размерная электрическая обработка металлов, Москва, "Высшая школа", 1978. г.
- /5/ С. Я. Грилихес, Электрохимическое и химическое полирование, Ленинград "Машиностроение", 1987. г.

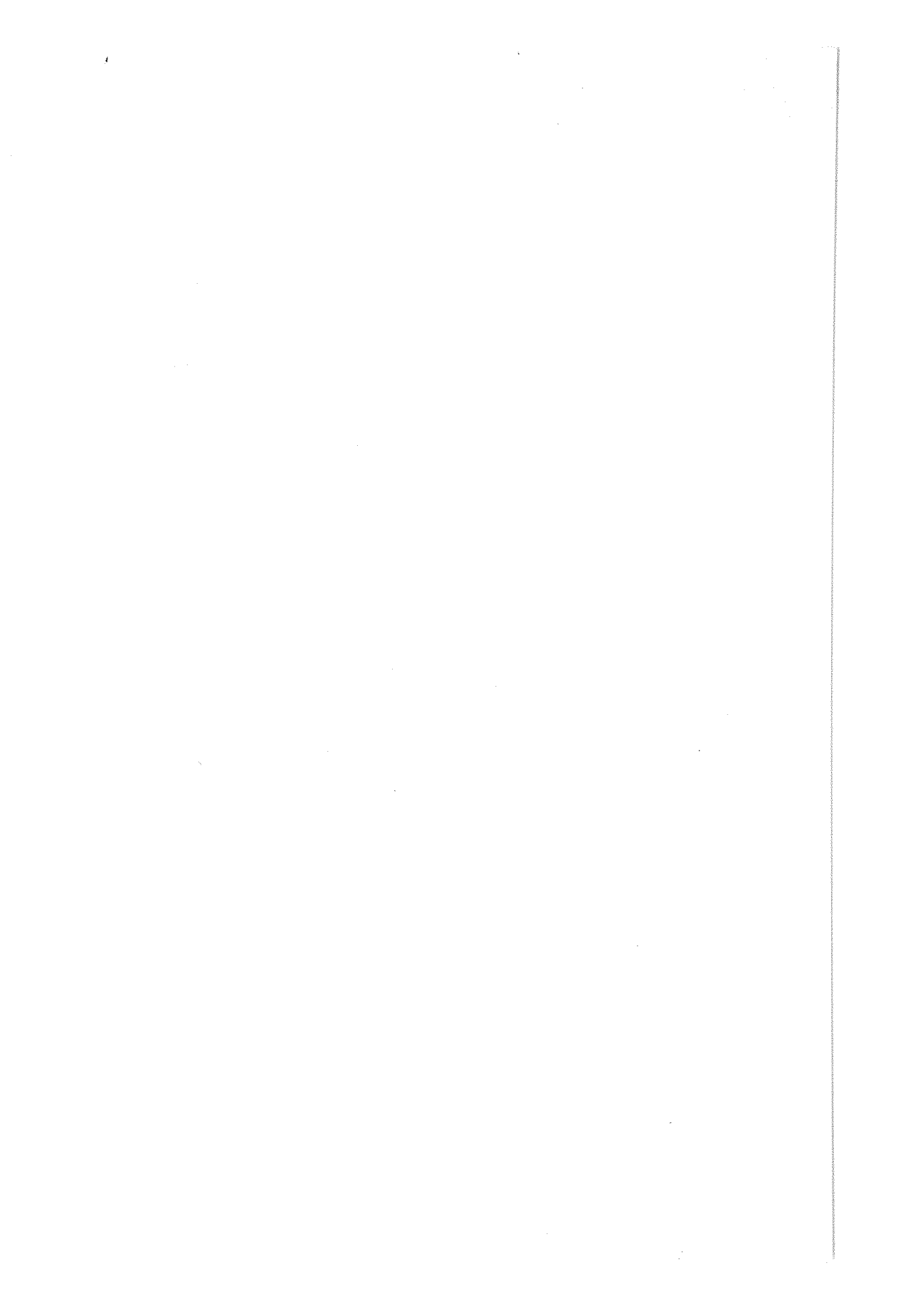
B. Jeremić, S. Karalazić

RIFLING OF BARREL BORE BY ELECTRO-CHEMICAL MACHINING WITH MOVABLE CATHODE

Summary

Modern development of weapons imposes the need to use new material of increased toughness, hardness and resistance to corrosion and wear. New technologies of machining are being developed in the world for these materials.

This paper gives some results of development of equipment and technology for rifling of barrel bore of the weapons by electro-chemical machining with movable cathode.



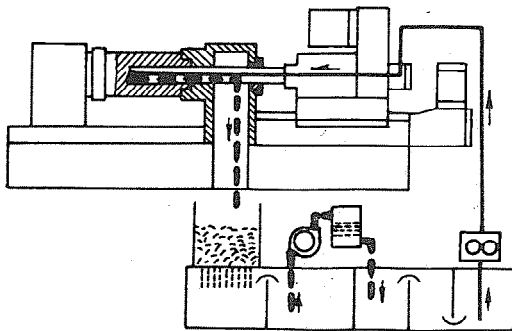
D. Rašković, Lj. Lukić \*

BUŠENJE DUBOKIH OTVORA MALIH PREČNIKA  
U ELEKTROLITNOM BAKRU

1. PREDHODNA RAZMATRANJA

U industrijskoj praksi prerade metala često se susreću konstrukcioni delovi jednostavnog geometrijskog oblika a veoma složeni sa tehnološkog stanovišta. Da bi se pojednostavila tehnologija izrade takvih delova, često se traže mogućnosti konstrukcionih izmena. Kada nije moguće takvu izmenu sprovesti iznalaze se rešenja u specijalnim postupcima obrade.

Bušenje otvora malih prečnika velikih dubina izvodi se metodom dubokog bušenja specijalnim alatom sa dugim ožljebljenjem nosačem na specijalnom obradnom sistemu. To je najstariji metod dubokog bušenja koji se nekada primenjivao isključivo za obradu topovskih i puščanih cevi, pa se u engleskoj terminologiji i danas naziva "Gun Drilling" a u nemačkoj "Kanonenbohrverfahren" (Sl.1).



Sl.1. - Shematski prikaz bušenja otvora malih prečnika

\*) mr Drago Rašković, dipl.ing., viši istraživač, TELEOPTIK, OOUR Istraživanje i razvoj, 11080 Zemun, ul. Cara Dušana 139-141.

Doc.dr Ljubomir Lukić, dipl.ing., naučni saradnik, LOLA Institut, 11030 Beograd, ul. Kneza Višeslava br. 70A.

Alat se sastoji od:

- radnog dela sa sečivom od tvrdog metala, perifernim vodjicama i otvorom za dovod sredstva za hladjenje i podmazivanje u zonu rezanja,
- nosača sa uzdužnim "V" žlebom za odvodjenje strugotine iz zone rezanja u smeši sa rashladnim fluidom i
- drške za stezanje alata.

Dovod sredstva za hladjenje i podmazivanje pod visokim pritiskom u zonu rezanja ostvaruje se kroz unutrašnji otvor drške, nosača i radnog dela alata. Metod jednosečnog alata primenjuje se uglavnom za bušenje otvora prečnika do  $\approx 20$  mm.

Sva značajna iskustva do danas, kako u domenu istraživačkih rezultata tako i u pogledu praktičnih ostvarenja bazirana su na saznanjima pri dubokom bušenju otvora u čelicima i to prečnika iznad  $\approx 5$  mm. Obrada rezanjem dubokih otvora izrazito malih prečnika a velikih dubina u bakru je još uvek neispitana tema, pa se u sledećim poglavljima daju neki rezultati istraživanja ove problematike.

## 2. BAKAR KAO KONSTRUKCIONI MATERIJAL

Bakar kao materijal koji se koristi u tehničke svrhe, sadrži najmanje 99.5% Cu i ima ga nekoliko vrsta:

- katodni bakar dobijen elektrolitskom rafinacijom anodnog bakra,
- elektrolitni bakar sa sadržajem 0.02-0.05%  $O_2$  i ispod 0.01% P,
- dezoksidacioni bakar sa sadržajem 0.03-0.04% P i
- bakar bez kiseonika.

Glavna svojstva bakra su visoka električna i toplotna provodljivost, dobra zavarljivost, dobra plastičnost i visoka otpornost na hemijske uticaje.

Komercijalno čist bakar se uglavnom primenjuje svugde u tehnici za izradu delova visoke električne i toplotne provodljivosti. Takav bakar je jako nepovoljan za obradu rezanjem, pa se javljaju posebne teškoće ako se delovi mogu obraditi jedino skidanjem strugotine. Da bi se poboljšala obradljivost rezanjem bakru se dodaju legirajući elementi: telur, sumpor, olovo i selen, uz visoku toplotnu i električnu provodljivost. Telur-bakar (CuTeP) je bez kiseonika i sadrži min 99.90% bakra i telura od čega 0.4-0.6% telura. Sumpor-bakar (CuSP) je takodje bez kiseonika i sadrži min 99.90% bakra i sumpora od čega 0.25-0.49% sumpora. Elektrolitni dezoksidacioni bakar ED-Cu ima hemijski sastav sa min 99.90 % bakra i 0.003% fosfora koji se lako spaja sa kiseonikom da bi sprečio njegovu reakciju sa bakrom.

Legiranjem se znatno povećava cena bakru, čime se smanjuje ekonomičnost njegove primene u industriji. Osim toga, legirani bakar se teško nalazi na do-

maćem tržištu konstrukcionog materijala, pa je opravdano tražiti rešenja u tehnološkim metodama obrade elektrolitičkog bakra koga ima dovoljno.

Uporedni pregled nekih karakteristika bakra na osnovu podataka od proizvođača, daje se u sledećoj tabeli:

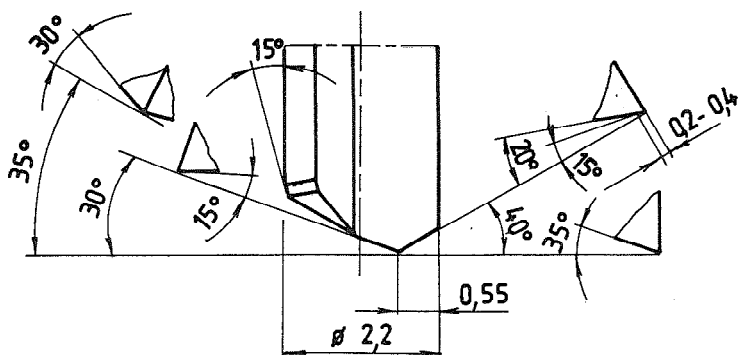
Karakteristike	Jedin. mere	Telur bakar CuTeP	Sumpor bakar CuSP	Bakar
Električna provodljivost na temperaturi 20 °C	%/ACS	90	90	97
Toplotna provodljivost na temperaturi 20 °C	W/mk	356	356	390
Modul elastičnosti	N/mm <sup>2</sup>	120000	120000	120000
Krutost	N/mm <sup>2</sup>	41000	41000	39000
Indeks obradljivosti (indeks 100 za brzorezni mesing)	-	90	80	20
Zatezna čvrstoća	N/mm <sup>2</sup>	270	270	250-310
Granica razvlačenja	N/mm <sup>2</sup>	245	245	160
Tvrdoća	HB 2.5/62,5	120	120	80

### 3. PREDMET ISTRAŽIVANJA

Radi ekonomične serijske proizvodnje delova od elektrolitnog dezoksidacionog bakra potrebno je istražiti i definisati tehnološke parametre za obradu četrnaest otvora  $D = 2.20$  mm na dužini od  $L = 110$  mm ( $L/D = 50$ ), u granicama dozvoljenih odstupanja tačnosti mera i oblika.

### 4. Alat

U ispitivanjima je korišćen alat sa dugim ožlebljenim nosačem  $\phi 2.20$  mm dužine 160 mm, firme TBT-Tiefbohr technik iz Dettingena. Geometrija alata od tvrdog metala H10T data je na slici 2. Koničnost radnog dela alata je 1:900. To je uobičajena geometrijska forma za bušenje dubokih otvora malih prečnika od  $\phi 1.85 - 4.00$  mm.



Sl.2. - Geometrija reznog dela alata

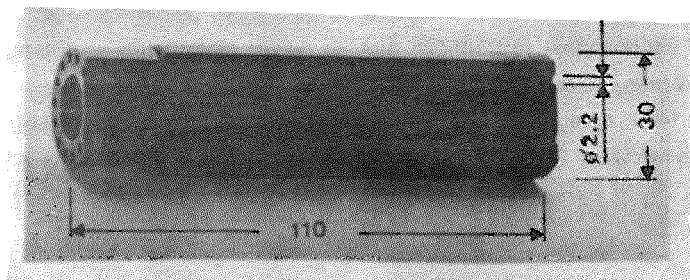
### 5. ELEMENTI REŽIMA OBRADJE

Nakon sistemskog ispitivanja kao optimalni u datim obradnim uslovima, definisani su sledeći parametri režima rezanja:

- brzina rezanja,  $v = 88.467$  m/min,
- broj obrtaja gl.vretena,  $n = 12800$  o/min,
- brzina pomoćnog kretanja,  $s = 0.0023$  mm/o,
- pomak  $u = 30$  mm/min i
- pritisak sredstva za hladjenje i podmazivanje  $p = 100$  bara.

### 6. OSTVARENI REZULTATI

Pri eksperimentalnoj obradi 14 otvora  $\phi 2.20$  mm dužine  $l = 110$  mm sa osamana koncentričnom krugu u elektrolitičkom dezoksidacionom bakru (sl.3), dobijeni su sledeći rezultati u pogledu tačnosti mera i oblika obradjenih otvora buše-



Sl.3. - Eksperimentalni obradak od bakra

njem redno jedan po jedan:

Otvor broj	Prečnik D (mm)	Odstupanje prečnika $\Delta D$ (mm)	Odvodjenje ose $\Delta Z$ (mm)
1.	2.220	0.000	0.050
2	2.225	0.005	0.150
3	2.225	0.005	0.050
4	2.225	0.005	0.150
5	2.225	0.005	0.050
6	2.225	0.005	0.150
7	2.225	0.005	0.020
8	2.225	0.005	0.150
9	2.225	0.005	0.030
10	2.225	0.005	0.040
11	2.220	0.000	0.150
12	2.225	0.005	0.200
13	2.220	0.000	0.020
14	2.220	0.000	0.150

Ostvarena tačnost u potpunosti zadovoljava tehnološke zahteve, tako da se primenjenim obradnim postupkom može realizovati obradni proces u predviđenim uslovima.

## 7. ZAKLJUČAK

Praktična primena teorije o obradi metala rezanjem i savremena saznanja u oblasti dubokog bušenja omogućili su produktivnu i ekonomičnu obradu otvora malih prečnika u elektrolitičkom bakru. Osvojena tehnologija uz uvodjenje modernog pomoćnog pribora na specijalnom obradnom sistemu omogućuje serijsku proizvodnju složenih delova kod kojih je bakar zadržao visoku toplotnu i električnu provodljivost.

## 8. LITERATURA

- /1/ Lukić, Lj., Šolaja, V.: Aspekti optimizacije konstrukcijske forme alata za duboko bušenje sa ožljebljenim dugim nosačem, TEHNIKA-Mašinstvo 32(1983)2, str. 283-287.
- /2/ Lukić, Lj.: Modifikacija rezne geometrije BTA (STS) alata 420.6 SANDVIK-Coromant-a za posebne obradne uslove dubokog bušenja u OCUR-u "Milan Premasunac" SOUR-a UTVA iz Pančeva, Elaborat 715/83, Institut IAMA, Beograd (1983).



- /3/ Tehničke informacije "Kabelmetali" - Export metalle.
- /4/ Rašković, D.: Prilog ispitivanju obradljivosti otkovaka pro-vlačenjem, magistarski rad, Mašinski fakultet, Beograd (1986).

D.Rašković, Lj.Lukić

DEEP HOLES DRILLING SMALL DIAMETER IN  
ELECTROLYTIC COPPER

S u m m a r y

This paper gives an example from industry and refers to deep holes drilling with special small diameter tools in electrolytic copper. It represents a specific processing procedure with cutting process elements achieved accuracy results, processing quality and other techno-economical indicators. It points out the importance of deep drilling procedure in electrolytic copper, the material unsuitable for chips removal.

R. Zdenković, T. Lechpammer \*)

POSEBNI KLIZNI HD-LEŽAJI, IZVEDBE, TE NJIHOVE KARAKTERISTIKE  
U RADU I PRIMJENI KOD PRECIZNIH ALATNIH STROJEVA

1. UVOD

Točnost obrade na alatnim strojevima za obradu skidanjem strugotine presudno određuje točnost položaja i okretanja glavnog vretena koje predaje gibanje alatu ili obratku. Stoga je uvezštenje glavnog vretena alatnog stroja problem o čijem uspješnom i svrsishodnom rješenju ovisi kvaliteta i sposobnost rada cijelog stroja.

Alatnim strojevima ugrađuju se klizni hidrodinamički ležaji (HD-ležaji) za uvezštenja glavnih vretena onih preciznih strojeva, kod kojih je naročito potrebna točnost i mirnoća rada te postojanost istih. U tabeli 1. navedene su uplivne osobine, na temelju kojih se obavlja izbor ležaja glavnih vretena alatnih strojeva. Pozitivni odnosi relativne vrijednosti testa ukazuju da za precizne alatne strojeve izbor pada na HD-ležaje.

Ovim su radom prikazana dugogodišnja nastojanja, suradnika Katedre za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilista u Zagrebu, teorijskim i praktičnim istraživanjima utvrditi specifične i determinantne parametre, te naći njihove međusobne ovisnosti za konstrukciju i proračun jednopovršinskih i visepovršinskih kliznih HD-ležaja glavnih vretena preciznih alatnih strojeva.

Problematika primjene i proračuna posebnih kliznih HD-ležaja za uvezštenja glavnih vretena alatnih strojeva započeta je radom [1.] 1964. godine. Do 1975. godine praktički, za uvezštenja glavnih vretena alatnih strojeva, nema novih objavljenih radova, jer G. NIEMANN u drugom izdanju knjige "Maschinenelemente I", izdanoj te godine, daje jedinu referencu za HD-ležaje primjenjene na alatne strojeve, navedeni rad [1.].

U tom je radu napravljena još nova svrsishodna podjela vretena alatnih strojeva, na učinska i precizna, za koje su dani i zahtjevi točnosti.

---

\*) Dr Rudolf ZDENKOVIĆ, dipl.inž.str., redovni profesor Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilista u Zagrebu, u m. ul. Đure Salaja 5  
Dr Tomislav LECHPAMMER, dipl.inž.str., visi znanstveni suradnik Instituta "Ruđer Bosković", Zagreb, Bijenička c. 54.

LEŽAJI GLAVNIH RADNIH VRETENA ALATNIH STROJEVA			
Prosječne ukupne vrednote i primjena osnovnih vrsta ležaja (HD = hidrodinamički, V = valjni, HS = hidrostatički ležaj)			
I OSNOVNE VREDNOTE ZA REDOVNE MALE I SREDNJE STROJEVE			
Test ili upliva osobina vrednote redovne isvrha, veličine i primjene	Dotična relativna vrijednost testa (istaknuti su samo pozitivni odnosi s 1 i 2)		
	HD-	V-	HS-
l e ž a j			
1 Točnost rada kroz kratost uležištenja ili vođenja	●	●	●
2 Mirnoća rada kroz prigušenje i sposobnost primanja udara	●	○	●
3 Postojanost točnosti i mirnoće kroz fizikalne, konstruktivne i pogonske osobine (trošenje, umornost, grijanje, hladjenje itd.)	●	●	●
4 Mogućnost naknadnog podešavanja zračnosti i krutosti	●	●	○
5 Područje rada u odnosu na promjenljivost brzine i opterećenja	○	●	●
6 Veličina i konstantnost trenja (što manji gubici, grijanje itd.)	○	●	●
7 Jednostavnost proračuna i konstrukcije	●	●	○
8 Ekonomičnost pogona i održavanja	●	●	○
9 Ekonomičnost investicije za male i srednje veličine	●	●	○
10 Neovisnost i sigurnost pogona	●	●	○
Zbroj osnovnih bodova			6 5,5 5,5
II DODATNE VREDNOTE ZA POSEBNE UVJETE KONSTRUKCIJE I STROJEVE			
a Za vertikalnu ugradnju (problem mazanja i stabilnosti)	○	●	●
Zbroj osnovnih i dodatnih bodova			6 7,5 6,5
b Za naročito velike strojeve (karuseli i komb.v.e.) test: konstruktivna isvrha i investicija..... ušteda u pogonskoj energiji (smanj. trenja)	●	○	●
Zbroj osnovnih i dodatnih bodova			7 7 7,5
a Za produkcijske (učinake) strojeve: dodatno pojačani upliv testova 7 i 8	7	8,5	5,5
d Za fine (precizne) strojeve: dodatno pojačani upliv testova 1, 2, 3 i 9	2	8,5	8,5
a Primjedba: Za naročito visoke brzine vrtnje do i preko 10000 1/min te smanjeno mala opterećenja i precizni rad postoje i ležaji hidrostatičke isvrhe odnosno sa zračnim oslonom			

Tabela 1. Izbor ležaja za glavna vretena alatnih strojeva

U radu <1.> prvi put je iznesen proračun jednopovršinskih kliznih <360°> HD-ležaja <JPHD-ležaji> za glavna vretena alatnih strojeva sa slijedećim njihovim specifičnostima:

1 Apsolutna zračnost JPHD-ležaja alatnog stroja, zbog visokih zahtjeva točnosti i kvalitete rada glavnog vretena, mora biti bitno manja nego kod JPHD-ležaja za opću primjenu u strojarstvu, koji s tim minimalnim zračnostima tamo ne bi ni mogli raditi. Ovdje je vidljiva sustina problema JPHD-ležaja glavnih vretena preciznih alatnih strojeva.

Tako apsolutne zračnosti ne smiju preći vrijednosti:

za JPHD-ležaje učinskih vretena:

$$S = D - d = 15 \text{ do } 25 \mu\text{m},$$

(1)

te za JPHD-ležaje preciznih vretena:

$$S = 5 \text{ do } 15 \mu\text{m}.$$

(2)

Ovom zahtjvu moraju biti podređeni svi ostali zahtjevi, o-dakle i slijede dva potpuno različita načina proračunavanja JP-HD-ležaja za nošenje i JPHD-ležaja za vođenje.

2 Relativne zračnosti moraju iznositi:

za JPHD-lezaje učinskih vretena:

$$\gamma = (D - d) / d = S / d = 0,1 \text{ do } 0,25 \% \quad (3)$$

te za JPHD-lezaje preciznih vretena:

$$\gamma = 0,05 \text{ do } 0,2 \% \quad (4)$$

3 Graniczne vrijednosti SOMMERFELDOvih brojeva iznose:

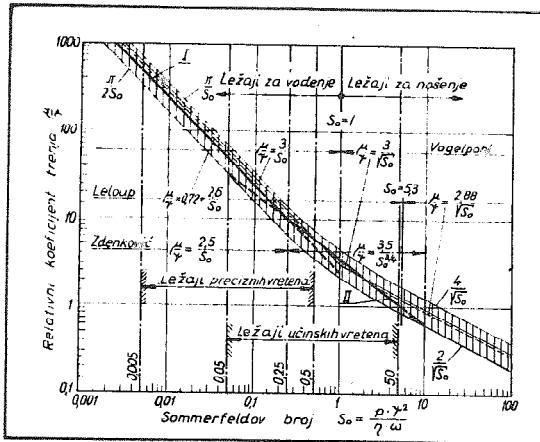
za JPHD-lezaje učinskih vretena:

$$S_0 = 0,05 \text{ do } 2,5 \text{ (ekstremno do } 5), \quad (5)$$

te za JPHD-lezaje preciznih vretena:

$$S_0 = 0,01 \text{ do } 0,5 \text{ (ekstremno od } 0,005). \quad (6)$$

Pretežni dio JPHD-lezaja glavnih vretena alatnih strojeva leže ispod vrijednosti  $S_0 = 1$ .



Slika 1. Ovisnost relativnog koeficijenta trenja o SOMMERFELDOvom broju

4 U slici 1, prikazana su područja JPHD-lezaja učinskih i preciznih vretena na dijagramu ovisnosti relativnog koeficijenta trenja o SOMMERFELDOvom broju. Postavljena je predviđena najpovoljnija zakonitost za alatne strojeve:

$$\mu/\gamma = 2,5 / S_0 \quad \text{za } S_0 < 0,25 \quad (7)$$

$$\mu/\gamma = 3,5 / (S_0^{3/4}) \quad \text{za } S_0 > 0,25. \quad (8)$$

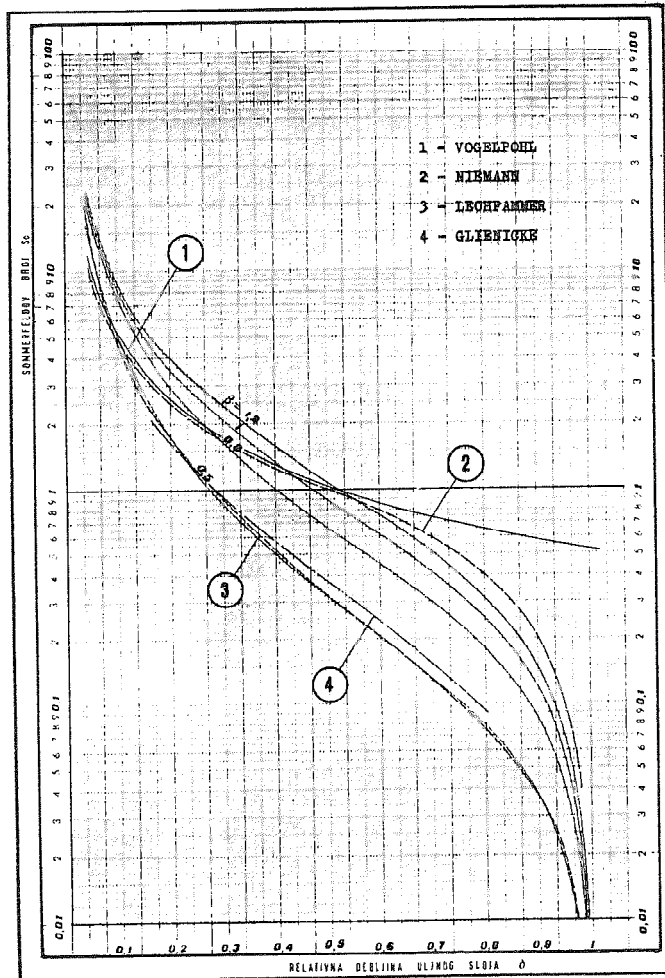
Na osnovu ovog dijagramskog prikaza ustanovljeno je da kod praznog hoda i punog opterećenja (uz konstantni SOMMERFELDOv broj  $S_0 < 0,25$ ) dolazi do istog zagrijavanja JPHD-lezaja. Ova važna konstatacija je za točnost alatnih strojeva izvanredno povoljno svojstvo za primjenu kliznih JPHD-lezaja.

5 Iz uvjeta male apsolutne zračnosti slijedi minimalna debljina uljnog sloja ispod 5 do 1  $\mu\text{m}$ , koja zahtjeva odgovarajuću finu obradu kliznih ploha. U obzir dolaze stoga samo postupci obrade koji daju hrapavosti površine  $R_t < 1 \mu\text{m}$ . Osim navedenog mora se, kod konstrukcije vreteno-JPHD-lezaj, jako paziti da ne dođe do coskanja. Vitkost lezaja  $\beta = B/d$  iznosi kod elastičnih

JPHD-lezaja od 0,8 do 1,2, a za krute JPHD-lezaje 0,5 do 0,8.  
Proračun se izvodi prema navedenim podacima.

## 2. JEDNOPOVRŠINSKI HD-LEŽAJI

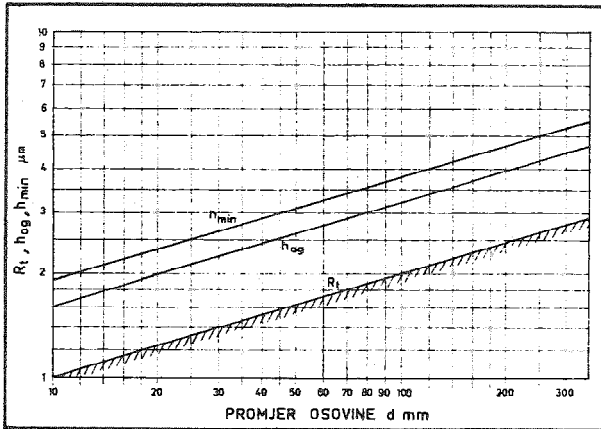
U radu <2.> uspoređivane su krivulje  $S_o = f(\sigma, \beta)$  nekih autora, ali za JPHD-lezaje u općem strojarstvu, jer JPHD-lezaji s vrlo malim zračnostima do tada nisu bili istraživani.



Slika 2. Ovisnost SOMMERFELDOvog broja o relativnoj debljini uljnog sloja i vitkosti ležaja

Iz slike 2. može se vidjeti da su odstupanja dvaju autora, krivulje (1) i (2), od teorijskih krivulja vrlo velika. Zbog toga su izvedene jednadžbe krivulja funkcionalne ovisnosti SOMMERFELDOvog broja o relativnoj debljini uljnog sloja i vitkosti ležaja. Jednadžbe su postavljene tako da vrlo dobro aproksimi-

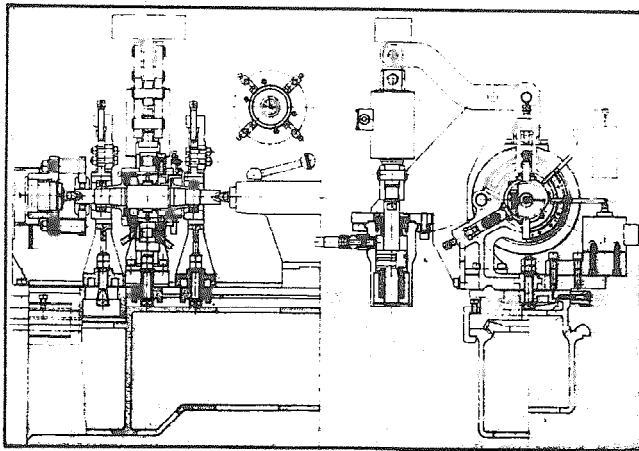
raju krivulje  $S_0 = f(\delta, \beta)$  prema rjesenju REYNOLDSove jednadzbe. Zbog tijeka krivulja svaka se dobije pomoću dvije jednadzbe, od kojih jedna vrijedi za  $\delta \leq 0,5$ , a druga za  $\delta > 0,5$ . Krivulja 3, na slici 2, prikazuje koliko su mala odstupanja u odnosu na teorijsko rjesenje za  $\beta = 0,5$ .



Slika 3. Hrapavosti kliznih ploha, najmanja dopustena i granična debljina uljnog sloja

Zahtjevi, koji se postavljaju u pogledu finocće obrade kliznih ploha JPHD-lezaja glavnih vratena alatnih strojeva, prema ZDENKOVIĆU, izneseni su u dijagramu, slika 3., smjernica za izbor najmanje dopustene debljine uljnog sloja ( $h_{min}$ ) prema graničnoj debljini uljnog sloja ( $h_{og}$ ) i maksimalnim hrapavostima kliznih ploha.

Radovima <2.>, <3.> i <4.> problem je razrađivan teorijski, ali s još nekim praktički nepotvrđenim pretpostavkama iz rada <1.>.



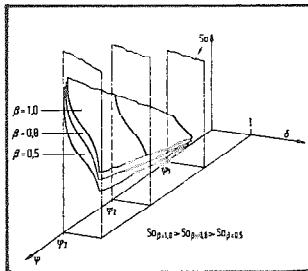
Slika 4. Uređaj za ispitivanje HD-lezaja

Slijedi konstrukcija i izgradnja specijalnog "Uređaja za ispitivanje kliznih HD-ležaja" <5.>, koji je tek omogućio eksperimentalno istraživanje kliznih HD-ležaja s vrlo malim zračnostima za primjenu u preciznim alatnim strojevima. Uređaj je prikazan na slici 4.

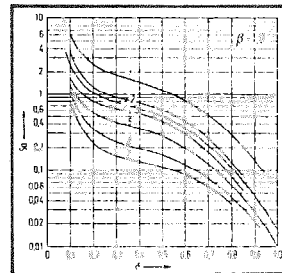
Eksperimentalna istraživanja rezultirala su radovima: <6.>, <7.>, <8.> i <9.> o JPHD-ležajima u kojima su doneseni definitivni zaključci za primjenu JPHD-ležaja u preciznim alatnim strojevima.

1 Eksperimentalnim istraživanjem, rad <6.>, potvrđen je teorijski dobiveni zakon neovisnosti snage trenja o veličini opterećenja za precizne JPHD-ležaje, koji rade sa SOMMERFELDOvim brojevima  $So < 0,22$ .

2 Nadalje je utvrđeno da je SOMMERFELDOV broj i kod preciznih JPHD-ležaja funkcija relativne debljine uljnog sloja i vitkosti ležaja, ali vrlo veliki utjecaj ima relativna zračnost ležaja, te je stoga nacrtan prostorni dijagram u kojem je treća koordinata relativna zračnost.



Slika 5. Ovisnost SOMMERFELDOvog broja o relativnoj debljini uljnog sloja, vitkosti ležaja i relativnoj zračnosti.



Slika 6. Krivulje za proračun JPHD-ležaja: za relativne zračnosti 1-0,675%, 2-0,620%, 3-0,500%, 4-0,450%, 5-0,380%, 6-0,283%, te 7-0,200%.

3 Također je utvrđena velika osjetljivost preciznih JPHD-ležaja na promjenu veličine relativne zračnosti, što zahtjeva posebni postupak u izradi uležistenja. Mjeriti se pri obradi ne može kalibrima, već mjerilima s očitanjem apsolutnih izmjera, a potrebna apsolutna zračnost JPHD-ležaja mora se izvesti u uskim granicama odstupanja, posebno naznačenim na crtežu JPHD-ležaja.

4 Eksperimentalno istraživanje pokazalo je da relativni koeficijent trenja, pri  $So < 1$ , ima tok kakav je prikazan u literaturi, ali ima niže vrijednosti, što praktički znači da su koeficijenti trenja, a time i snaga trenja preciznih JPHD-ležaja manji od JPHD-ležaja prikazanih ranijim radovima. Uz osnovni uvjet primjene vrlo rijetkih ulja ova činjenica je naročito povoljna za eksploataciju preciznih alatnih strojeva s JPHD-ležajima. Ovisnost relativnog koeficijenta trenja o SOMMERFELDOvom broju određena je s dva analitička izraza:

$$\mu/\eta = 0,557523 \exp(2,28684 So - 1,15083 So^2) / So^{1,11773} \quad (9)$$

koji vrijedi za područje SOMMERFELDOvih brojeva  $So=0,005$  do  $1$  i

$$\mu/\gamma = 0,95508/So^{1,01179} \approx 1/So, \quad (10)$$

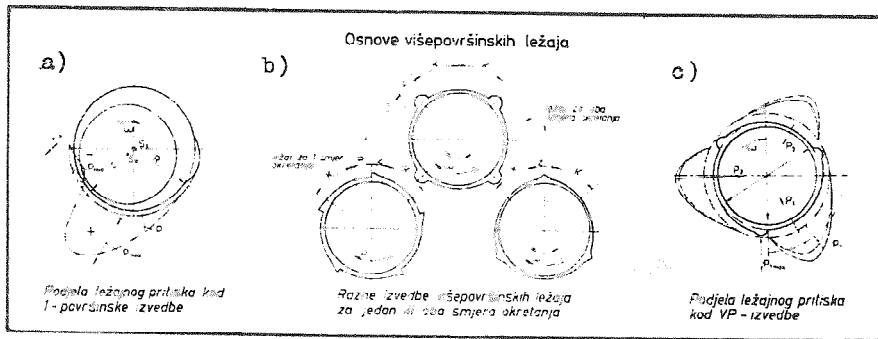
za područje SOMMERFELDOvih brojeva  $So=0,005$  do  $0,25$ .

Manje vrijednosti relativnih koeficijenata trenja tumaa se kvalitetnije obrađenim kliznim ploham i primjenom suvremenih ulja male dinamičke viskoznosti s dodanim aditivima koji povoljno djeluju na smanjenje relativnog koeficijenta trenja.

5.8 obzirom da su sve veličine potrebne za proračun JPHD-lezaja eksponencijalnim funkcijama prilagođene u analitičke izraze, bilo je moguće proračun provesti pomoću računala <9.>

### 3. VISEPOVRŠINSKI HD-LEŽAJI

Ekperimentalna istraživanja tih lezaja rezultirala su radovima: <10.>, <11.>, <12.>, <13.>, <14.> i <15.> o visepovršinskim HD-lezajima (VPHD-lezaji) u kojim radovima su doneseni zaključci za primjenu VPHD-lezaja u preciznim alatnim strojevima.



Slika 7. Višepovršinski hidrodinamički klizni ležaji

Za ulezistenja glavnih vretena preciznih alatnih strojeva, pri različitim opterećenjima i promjenljivim brzinama vrtnje, uz navedeni zahtjev najtočnijeg vođenja upotrebljavaju se pretežno VPHD-lezaji, slika 7. U odnosu na JPHD-lezaje VPHD-lezaji imaju doduse smanjenu nosivost zbog većeg broja kliznih ploha, ali dopustaju veće zračnosti, jer imaju samocentrirajuće djelovanje i stabilniji rad. Ima ih za jedan i obadva smjera okretanja vretena, slika 7b.

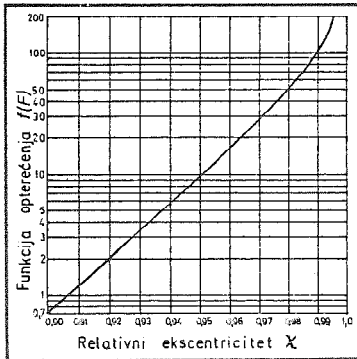
U radu <10.> eksperimentalno su istraživani VPHD-lezaji. Analizirana je opteretivost, trenje u uljnom sloju, usredštenje vretena u lezaju, tolerancije, hrapavosti kliznih ploha, materijali lezaja i odgovarajuća ulja za podmazivanje.

Dobiveni rezultati mogu se sažeti slijedećim spoznajama:

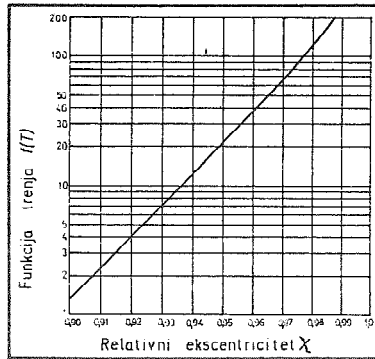
1. Određene su funkcije opterećenja u ovisnosti o relativnom ekscentricitetu, slika 8., na temelju kojih se može izračunati nosivost VPHD-lezaja:

$$F(F) = F_h / [6 \eta v B (rv/s)^2] \quad (11)$$





Slika 8. Funkcija opterećenja u ovisnosti o relativnom ekscentricitetu za 4PHD-ležaj.



Slika 9. Funkcija trenja u ovisnosti o relativnom ekscentricitetu za 4PHD-ležaj.

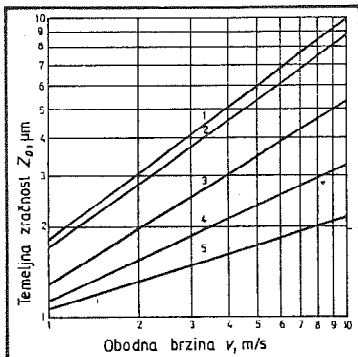
2 Određene su funkcije trenja u uljnom sloju u ovisnosti o relativnom ekscentricitetu, slika 9., na temelju kojih se može izračunati sila trenja mjerodavna za razvijenu toplinu u VPHD-ležaju.

$$f(T) = F_t / [\eta v B (rv/s)] \quad (12)$$

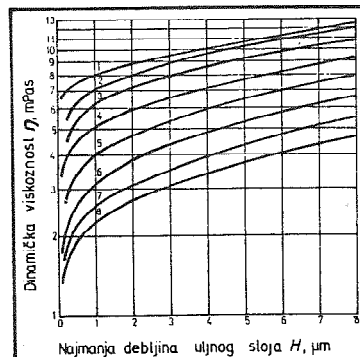
U izrazima (11) i (12) znači:  $F_h$  = hidraulička sila,  $\eta$  = dinamička viskoznost ulja,  $v$  = obodna brzina vretena,  $B$  = sirina ležaja,  $rv$  = polumjer vretena,  $s$  = razlika polumjera zakrivljenosti klizne plohe ležaja i vretena, te  $F_t$  = sila trenja.

3 Dobiven je pregled usrednjenja vretena i porasta temperature uljnog sloja u ovisnosti o opterećenju, brzini vrtnje vretena i korištenom ulju za određene zračnosti u VPHD-ležajima.

4 Konstruirani su dijagrami za određivanje temeljne zračnosti prema određenim uljima za podmazivanje u ovisnosti o brzini vrtnje vretena u VPHD-ležaju, slika 10., za ulja INA-rafinerije Zagreb: 1 - Hidraol HD10, 2 - Cirkol 10, 3 - Hidraol HD5, 4 - Cirkol 3 i 5 - Cirkol 2.



Slika 10. Ovisnost temeljne zračnosti o obodnoj brzini vretena, za ulja: (1-5).



Slika 11. Ovisnost dinamičke viskoznosti ulja o najmanjoj debljini uljnog sloja za brzine vrtnje: (1-8).

5 Preporučene su minimalna zračnosti u odnosu na hrapavosti kliznih ploha VPHD-lezaja, kao slika 3. za JPHD-lezaje.

6 Tabularno su dane preporuke materijala za izradu kliznih ploha VPHD-lezaja.

7 Konstruiran je dijagram za izbor ulja za podmazivanje na temelju minimalne debljine uljnog sloja i brzine vrtnje vretena u VPHD-lezaju, slika 11., pri brzinama vrtnje: 1 - 0 do 1 m/s, 2 - 1 do 2 m/s, 3 - 2 do 3 m/s, 4 - 3 do 4 m/s, 5 - 4 do 5 m/s, 6 - 5 do 6 m/s, 7 - 6 do 7 m/s i 8 - 7 do 8 m/s.

8 Propisan je postupak proračuna VPHD-lezaja za uletistenja glavnih vretena preciznih alatnih strojeva. Činjenica da su sve veličine potrebne za proračun VPHD-lezaja, eksponencijalnim funkcijama prilagođene u analitičke izraze, omogućila je cijeli proračun provesti pomoću računala <14.>. Na taj način otpada crtanje kvantitativnih grafičkih prikaza nekih funkcija odakle bi trebalo očitavati određene veličine, čime je izbjegnuta mogućnost pogresnog očitavanja.

9 VPHD-lezaji imaju, uz sve navedene dobre eksploatacione strane, i jedan krupni nedostatak, a to je njihova izrada i visoka nabavna cijena, budući da se obrađuju na specijalnim strojevima postupkom kopiranja. To je bio povod da se konstrukciono pronađe mogućnost tehnološki jednostavnijeg VPHD-lezaja specijalne izvedbe, koji umjesto kružno ima eliptično zakrivljene klizne plohe (EVPHD-lezaj), što je razrađeno u radovima <6.> i <12.>. EVPHD-lezaji izvedeni su i eksperimentalno ispitani u radu <10.>, a proračun EVPHD-lezaja pomoću računala iznesen je u radu <15.>.

## REFERENCE

<1.> ZDENKOVIĆ, R.: Besonderheiten bei der Anwendung und Berechnung von Gleitlagern in Werkzeugmaschinen, Maschinenmarkt, 70 Jg, 1964, Heft 53, 33-37

<2.> LECHPAMMER, T.: Komparativna analiza i utvrđivanje specifičnih i determinantnih parametara kliznih HD-lezaja alatnih strojeva na osnovu literaturnih podataka i realnih izvedbi, Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilista u Zagrebu, Zagreb, 1976.

<3.> ZDENKOVIĆ, R., LECHPAMMER, T.: Berechnung von Gleitlagern an Werkzeugmaschinen spindeln, Werkstatt u Betrieb, 111 Jg, 1978, Heft 9, 563-571

<4.> ZDENKOVIĆ, R., LECHPAMMER, T.: Specifičnosti proračuna HD-lezaja kod prigona glavnog vretena alatnih strojeva, Zbornik radova IFToMM-JužEKU, Dubrovnik-Kupari, rujan 1978, Vol.B, 417-430

<5.> LECHPAMMER, T., STEFANOVIĆ, P.: Uređaj za ispitivanje kliznih HD-lezaja, Zajednički prilog doktorskim radovima autora, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilista u Zagrebu - Institut "Ruđer Bosković", Zagreb - "Prvomajska", Zagreb, 1984.

<6.> STEFANOVIĆ, P.: Eksperimentalna istraživanja utjecajnih parametara i izvedbenih mogućnosti HD-lezaja za fina vođenja glavnih vretena alatnih strojeva, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilista u Zagrebu, Zagreb, 1986.

<7.> ZDENKOVIĆ, R., STEFANOVIĆ, P.: Posebni VPHD-ležaji u preciznim alatnim strojevima, BIAM '88, Zbornik radova JUREMA 33, (1988), Zagreb 13.-15. lipnja 1988, Svezak 4, 337-340

<8.> ZDENKOVIĆ, R., STEFANOVIĆ, P., LECHPAMMER, T.: Berechnung von EGF-Lagern präziser Werkzeugmaschinen fuer extrem kleine Oelspalte, Konstruktion 40, (1988), H. 9, 352-358

<9.> ZDENKOVIĆ, R., STEFANOVIĆ, P., LECHPAMMER, T., RAOS, D.: Proračun VPHD-uležistenja preciznih alatnih strojeva pomoću računala, Strojarstvo, 31(1989), (u tisku)

<10.> LECHPAMMER, T.: Prilog teoretskim osnovama, s eksperimentalnom provjerom, za proračun i konstrukciju visepovršinskih kliznih ležaja kod alatnih strojeva, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilista u Zagrebu, Zagreb, 1985.

<11.> ZDENKOVIĆ, R., LECHPAMMER, T.: Neuartige Berechnung und Entwurf von MGF-Lagern fuer präzise Werkzeugmaschinen, Konstruktion 39, (1987), H. 11, 439-446

<12.> ZDENKOVIĆ, R., STEFANOVIĆ, P., LECHPAMMER, T.: Konstrukcija i izrada eliptičnih visepovršinskih hidrodinamičkih ležaja za precizne alatne strojeve, Zbornik radova Skupa o konstruiranju '88, Zagreb 8.-10. lipnja 1988, Knjiga II, B-2II-1-12

<13.> ZDENKOVIĆ, R., LECHPAMMER, T.: Posebni VPHD-ležaji u preciznim alatnim strojevima, BIAM '88, Zbornik radova JUREMA 33, (1988), Zagreb 13.-15. lipnja 1988, Svezak 4, 333-336

<14.> ZDENKOVIĆ, R., LECHPAMMER, T., RAOS, D.: Proračun VPHD uležistenja preciznih alatnih strojeva pomoću računala, Strojarstvo, 31(1989), (u tisku)

<15.> ZDENKOVIĆ, R., STEFANOVIĆ, P., LECHPAMMER, T., RAOS, D.: Proračun EYPHD-uležistenja preciznih alatnih strojeva pomoću računala, Strojarstvo, 31(1989), (u tisku)

R. Zdenković, T. Lechpammer

Spezielle Hydrodynamische Gleitlager  
- Ausführungen und ihre Charakteristiken -  
im Betrieb und Anwendung bei Präzisen Werkzeugmaschinen

Zusammenfassung

Im Aufsatz sind langjährige Bemühungen und Arbeiten, der Mitglieder des Lehrstuhls und Labors für Werkzeugmaschinen der Fakultät für Maschinen- und Schiffbau der Universität Zagreb, enthalten, um, durch theoretische und experimentelle Untersuchungen die gegenseitigen Abhängigkeiten der spezifischen und determinanten Parameter für die Konstruktion und Berechnung der Ein- und Mehrgleitflächen hydrodynamischen Gleitlager für Hauptspindeln präziser Werkzeugmaschinen, zu bestimmen.

Љ.Дудески, В.Дуковски \*

ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА АНАЛИЗА НА ФРЕКВЕНТНИОТ СПЕКТАР НА  
САМОПОБУДНИТЕ ОСЦИЛАЦИИ ПРИ ОБРАБОТКА НА СТРУГ

1. УВОД

Зголешените и се построгите барања за остварување квалитетни производи со металорезачките машини, се повеќе ја истакнуваат потребата за идентификација не само на статичкото но и на динамичкото однесување на металорезачките машини. Секако како еден од најбиталните склопови се појавува главното вретено чии карактеристики непосредно влијаат врз оценката за квалитетот на металорезачките машини. Идентификацијата на динамичкото однесување на главното вретено може да се одвива на два начини и тоа аналитички и експериментално. По аналитички пат можат да се определат сопствените фреквенции и фреквентните карактеристики (амплитудно - фазно - фреквентни карактеристики). Експерименталните методи овозможуваат определување на граничната длабочина на режење, односно определување на фреквенцијата на самопобудните осцилации. Идентификацијата на појавата на самопобудните осцилации по експериментален пат во голема мера допринесува за воспоставување корелација со динамичките карактеристики на вретеното.

Во овој труд ќе биде прикажана инструментацијата и постапката за анализа на фреквентниот спектар на самопобудните осцилации. Исто така ќе биде дадена и корелацијата со аналитички добиените динамички карактеристики на вретеното.

\*/ Др. Дудески Љубен, доцент на Машински факултет-Скопје

Др. Дуковски Владимир, ред. проф. на Машински факултет-Скопје

## 2. МЕТОДОЛОГИЈА И ИНСТРУМЕНТАЦИЈА ЗА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ ИСТРАЖУВАЊА

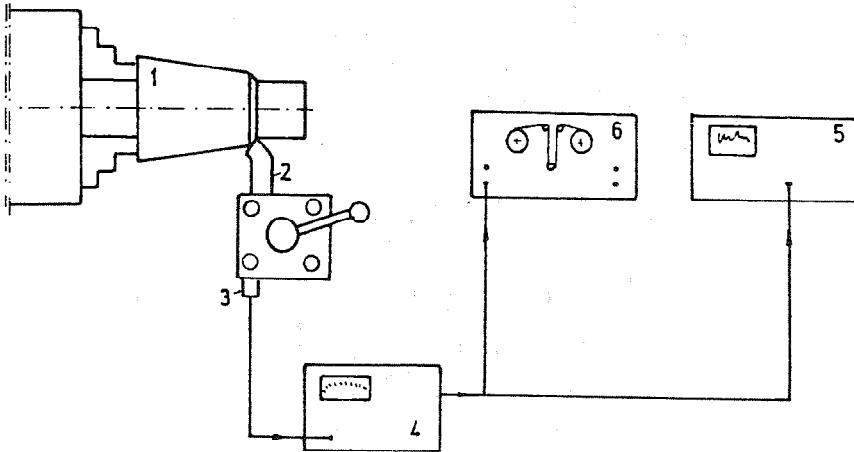
Појавата на самопобудните осцилации во процесот на режење може да се идентификува по експериментален пат и тоа на различни начини. Идентификацијата при обработка со константна длабочина на режење застапена е претежно во СССР [3]. Многу поефикасна и поедноставна е методата со обработка на конусно парче со што се остварува континуирана промена на додатокот за обработка [2].

Обработката на конусно парче овозможува во еден премин да се определи граничната длабочина на режење, односно за одреден режим (број на вртежи и помест) да се определи динамички стабилното подрачје на работа. Тоа подрачје се дефинира со појавата на самопобудните осцилации односно подрхтувањето кое се појавува при сумирање на две осцилаторни движења со многу блиски фреквенции.

Определувањето на фреквенцијата на самопобудните осцилации предизвикани од процесот на режење може да се изведе со фреквентна анализа на одзивот на системот побуден со силата на режењето. Еден од начините за спроведување на оваа постапка е забележување (снимање) на одзивот на системот на магнетофонска лента, а потоа со фреквентна анализа на тој временски сигнал определување на фреквенциите со доминантни амплитуди. За таа цел потребна е инструментација за снимање на одзивот на системот (временски сигнал) и инструментација за обработка на временскиот сигнал во фреквентен домен.

На сл.1 прикажана е мематски инструментацијата за снимање на одзивот на системот. Обработката се изведува на конусно парче (1), а на носачот (2) поставен е давачот, акцелерометарот (3) со кој се регистрира одзивот на системот во текот на времето. Временскиот сигнал кој се регистрира на мерниот инструмент (4) може да се забележи (сними) на магнетна лента од магнетофонот (6). За визуелна контрола временскиот сигнал може да се прати и на осцилоскопот (5).

Понатамошната обработка на временскиот сигнал се изведува со помош на компјутерот IBM Serija 1 инсталиран во сметачкиот центар на Машинскиот факултет во Скопје. Овој систем покрај

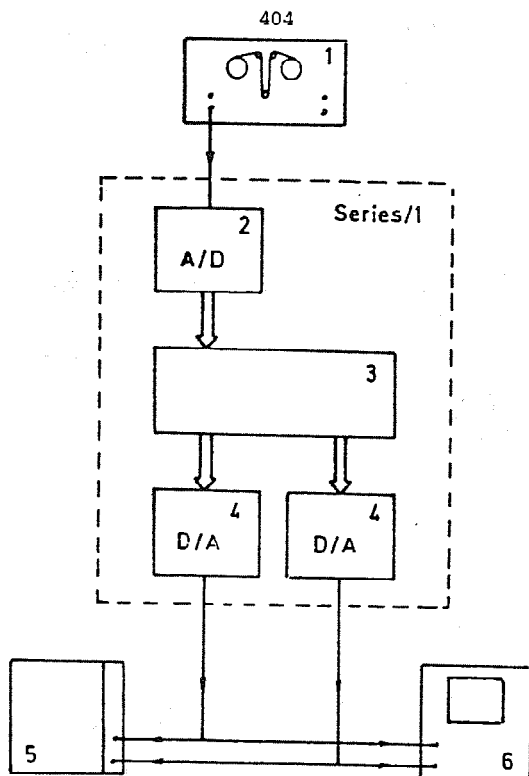


Сл.1 Шематски приказ на инструментацијата за снимање на одзивот на системот во процесот на режење

другото располага и со сензорска влезно - излезна единица. Оваа единица овозможува поврзување на аналогните и дигиталните сензори на некој процес со дигиталниот компјутер. Во овој случај искористен е аналогниот влез за аквизиција и земање на податоци од аналогниот сигнал запишан на магнетофон, поради негова дигитална обработка, и аналогниот излез со кој се генерира аналоген сигнал за прикажување на осцилоскоп или за запишување на пишувач (плотер).

Врската за влезот односно излезот на сигналот од сензорската единица, шематски е прикажан на сл.2.

Аналогниот сигнал снимен на магнетофон (1) преку A/D единицата (2) се претвара во дигитален запис кој се пренесува во микрокомпјутерот (3). На вака дигитализираниот запис можат да се вршат разни обработки, а во овој случај потребна е т.н. брза фреквентна трансформација (FFT) со која сигналот од временски домен се трансформира во фреквентен домен. Овие дигитални вредности, за информација можат да се прикажат на терминалот или штампачот од компјутерот, а при потреба да се прикажат на



Сл.2 Шематски приказ на инсталацијата за обработка на аналоген сигнал

осцилоскопот или плотерот. На сличен начин од микрокомпјутерот дигиталните вредности преку D/A единиците (4) се претвораат во аналогна големина која како напон може да се искористи за приказ на пишувач (5) или осцилоскоп (6).

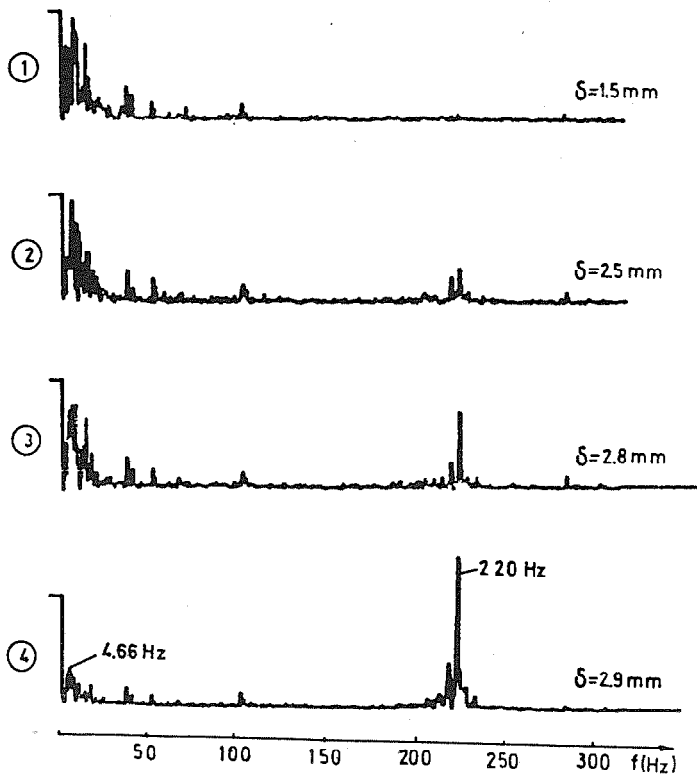
За спроведување на оваа постапка разработен е програмски пакет за сигналпроцесирање кој ги опфаќа сите наведени етапи.

### 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ИДЕНТИФИКАЦИЈА НА ФРЕКВЕНЦИЈАТА НА САМОПУБДНИТЕ ОСЦИЛАЦИИ

На појавата на самопобудните осцилации влијаат голем број фактори на пример: должината и дијаметарот на работното парче, геометријата на резниот алат, а посебно нападниот агол, попречниот пресек на ножот, издаденоста на ножот, бројот на вртежи, поместот и др.

Бидејќи при овие истражувања не е цел да се определи влијанието на одредени фактори врз појавата на самопобудните осцилации, избрани се карактеристични големини потребни за изведување на експериментите.

Експериментите се изведени на универзален струг чие главно вретено е прикажано на сл.4. Обработката е вршена на конусно парче со димензии  $D \times d \times l = 90 \times 60 \times 150$ . Резниот алат е плочка P20 поставена на тело од конструктивен челик со димензии  $b \times h = 25 \times 25\text{mm}$  издаденост на ножот 50mm и нападен агол  $\alpha = 75^\circ$ . Експериментите беа изведени со број на вртежи  $n = 280 \text{ vrt/min}$ . и помест  $s = 0,1 \text{ mm/vrt}$ .



Сл.3 Амплитудно - фреквентна анализа при различна длабочина на реж



На сл.3 прикажани се само неколку карактеристични моменти од процесот на режење, односно од амплитудно - фреквентната анализа на одзивот на системот.

Очигледно е дека некои осцилации со постојана фреквенција и изразена постојана амплитуда се појавуваат во сити моменти. Најизразени се осцилациите со 4,66 Hz што настануваат од вртежното движење на работното парче, односно од неговиот ексцентрицитет ( $280/60 = 4,66$ ). Секако дека овие осцилации не зависат од процесот на режење, но само од параметрите на системот, што најчесто се нарекуваат параметарски осцилации, кои не се причина за нестабилност на системот.

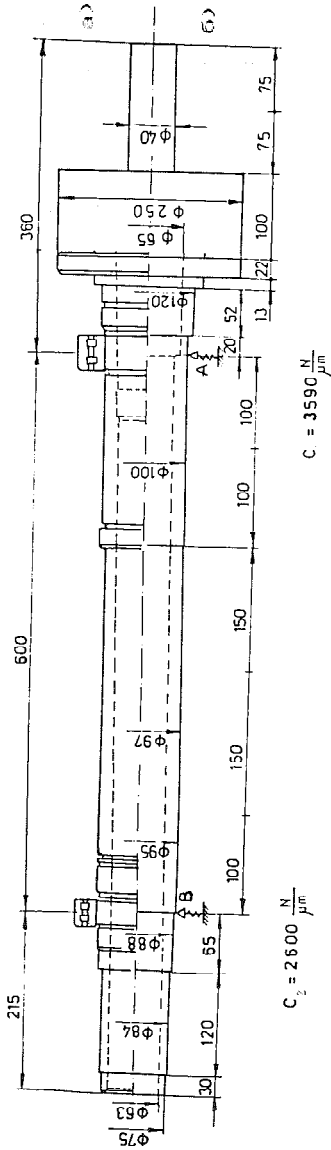
Во почетокот на обработката се појавуваат само параметарските осцилации (момент 1), а со зголемување на длабочината на режење во еден момент (момент 2), почнуваат да се појавуваат и други осцилации со изразени амплитуди и постојана фреквенција, чии амплитуди почнуваат нагло да растат (момент 3 и 4). Тоа се самопобудните осцилации кои во овој случај се појавуваат со фреквенција од 220Hz.

#### 4. АНАЛИТИЧКО ОПРЕДЕЛУВАЊЕ НА ДИНАМИЧКИТЕ КАРАКТЕРИСТИКИ НА ВРЕТЕНОТО

За да се воспостави одредена корелација на појавата на самопобудните осцилации со карактеристиките на вретеното потребно е по аналитички пат да се пресметаат динамичките карактеристики на вретеното. Во овој случај доволно е да се пресметаат сопствените фреквенции на вретеното.

За пресметка на динамичките карактеристики на вретеното во главно се користат методата со трансфер матрици и методата со конечни елементи, кои се доста разработени во литературата.

На сл.4а прикажани се склопот на главното вретено, а на сл.4б пресметковниот модел од кој се определуваат неговите динамички карактеристики. Користејќи ги наведените методи, определени се сопствените фреквенции на вретеното и тоа:  $f_1 = 227,6 \text{ Hz}$ ,  $f_2 = 1096 \text{ Hz}$ ,  $f_3 = 2153 \text{ Hz}$ .



СОРСТВЕНИ FREKVENЦИИ НА VREТЕНТО (HZ)

0.2276E+03	0.1096E+04	0.2153E+04	0.3762E+04	0.4701E+04
0.8442E+04	0.8815E+04	0.9807E+04	0.1489E+05	0.1885E+05
0.2322E+05	0.2829E+05	0.5259E+05	0.1174E+06	0.1915E+06
0.6722E+06				

Сл.4 Главно вретено на кое се извршени анализите

а) Оригинален изглед

б) Пресметковен модел

в) сопствени фреквенции на вретеното

Покрај геометриските големини на вретеното (сл.4) во пресметките земени се во обзир и стезната глава, работното парче и карактеристиките на лежиштата односно крутоста на лежиштата која изнесува:  $C_A = 3590 \text{ N/}\mu\text{m}$  и  $C_B = 2600 \text{ N/}\mu\text{m}$ .

### 5. ЗАКЛУЧОК

Ако се спореди фреквенцијата на самопобудните осцилации (220 Hz) и сопствените фреквенции на главното вретено, може да се заклучи дека оваа фреквенција е многу блиску до првата сопствена фреквенција на вретеното (227 Hz). Тоа може да не доведе до заклучок дека појавата на самопобудните осцилации е тесно поврзана со динамичките карактеристики на вретеното, односно со неговата резонантна фреквенција. Со промена на длабочината на режее се променува и интензитетот и фреквенцијата на силата со која се побудува вретеното. Во моментот кога побудната динамичка сила од процесот на режењето ќе се совпадне со сопствената фреквенција на системот главно вретено, се појавуваат самопобудните осцилации кои се главна причина за нестабилноста на системот.

### Reference

- [1] Дудески Љ.: Влијателни големини врз статичките и динамичките карактеристики на главните вретена кај металорезачките машини. Докторска дисертација, Скопје 1984.
- [2] Milačić V. i dr.: Ispitivanje alatnih mašina(2), Beograd 1971
- [3] Дуковски В.: Одржување и испитување на металорезачките машини, Универзитет "Кирил и Методиј" Скопје, 1980

### EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE SELF EXITED VIBRATIONS FREQUENCY SPECTRUM IN TURNING

Ll.Dudeski, V.Dukovski

In this work the results of a investigation of self exited vibrations frequency spectrum in turning, are presented. The experimental set up consists signal tape recorder for the of line spectrum analyses. The FFT analysis are performed on IBM Series 1 computer equiped with signal processing unit. The natural frequencies of the main spindle are calculated by means of FEM and compared with experimental date.

Šarenac Momir<sup>\*</sup>

EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE STATIČKE KRUTOSTI GLAVNOG  
VRATILA ČEONOG STRUGA

1. OZNAKE

- a mm - dužina istoka  
b mm - rastojanje između ležaja  
 $D_A$  mm - prečnik vretena u osloncu glavnog ležaja  
 $I$  mm<sup>4</sup> - moment inercije  
 $\Delta_{max}$   $\mu$ m - radijalno bacanje vretena  
 $f_a$   $\mu$ m - ugib na kraju istoka  
 $\vartheta_A$  rad - nagib u glavnom ležaju  
 $F$  N - sila rezanja  
 $F_R$  N - sila od remenog pogona  
 $M$  N<sub>m</sub> - momenti uklještenja  
c N/ $\mu$ m - krutost  
 $C_A$  N/ $\mu$ m - krutost glavnog ležaja  
 $k_a = a/D_A$  - faktor istoka  
 $k_b = b/a$  - faktor raspona  
 $k_{CL} = C_A/C_B$  - faktor krutosti ležaja  
 $k_I = I_b/I_a$  - faktor momenata inercije

2. UVOD

Osnovni tehničko-tehnološki zahtjevi koje treba da zadovolji savremena alatna mašina su:

- funkcionalnost
- visoka tačnost obrade
- visoka produktivnost

---

<sup>\*</sup> Dr Momir Šarenac, docent Mašinskog fakulteta u Sarajevu

- mali utrošak snage
- mala masa mašine
- lako opsluživanje
- niska buka
- niske vibracije
- trajnost.

Nabrojane osobine određuju kvalitet mašine i mjesto među poznatim proizvođačima.

Alatna mašina je veoma složen oscilatorni sistem za čije opisivanje procesa obrade treba koristiti kompleksan-mehanički model, savremen matematički aparat i moćne i brze računare. Prilikom obrade na alatnoj mašini ostvaruje se kretanje čitavog niza mašinskih sklopova i elemenata u odnosu na obradak. Svaki od elemenata i sklopova je podložan deformacijama, a i sam obradak je takodje elastičan pa je zbog toga određivanje deformacija pod određenim spoljnim uticajima; bilo statičkim bilo dinamičkim, složen posao. Zadatak konstruktora postaje još ozbiljniji kada se zna da se danas traže, ali i postižu, tačnosti obrade i do  $0,5 \mu\text{m}$  tamo gdje se to stvarno neophodno, a poznato je da je tačnost dimenzija i oblika dobar pokazatelj kvaliteta.

Na tačnost obrade, odnosno tačnost alatne mašine, najviše utiče statička i dinamička krutost mašine, odnosno njenih sklopova ili dijelova.

Kada se još uzme u obzir tolerancija izrade svakog od elemenata mašine dobiće se jasniji odgovor na pitanje zašto se javljaju nekada i značajne razlike u tehničko-tehnološkim karakteristikama "potpuno" istih mašina. Ovo je i jedan od razloga zbog čega još uvijek nema šire prihvaćenih standarda za ispitivanje kvaliteta mašina. Istina, standardi postoje za geometrijska ispitivanja, ali za statička i dinamička još nisu usvojeni. U SSSR-u, koji proizvodi veliki broj mašina istog tipa, postoje standardi za statička i dinamička ispitivanja, ali nam nije potpuno poznata praksa njihove primjene.

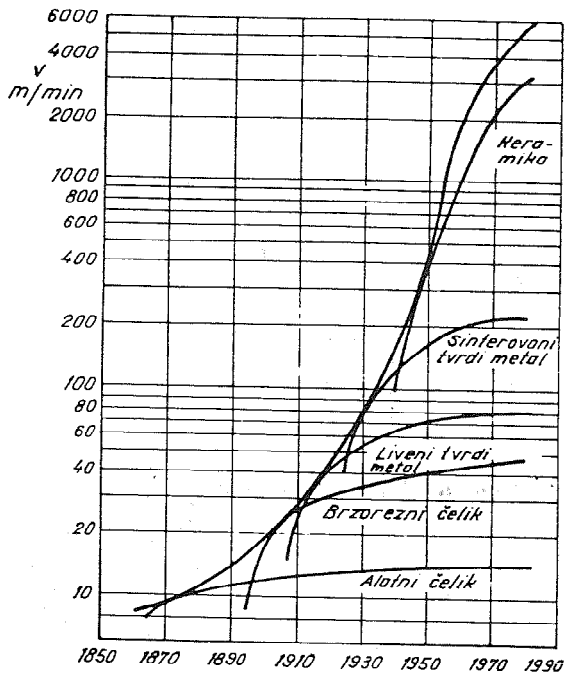
Numerički upravljane alatne mašine, pogotovo kada rade u FTS-ima, gdje je režim obrade promjenjiv bilo zbog promjene izradka ili zbog toga što se jednim stezanjem vrši i gruba i fina obrada, imaju posebne zahtjeve na tačnost.

### 3. KRUTOST

Poračun krutosti mašine, zbog složenosti postupka i nedostatka odgovarajućeg mehaničkog modela, skoro uvijek se svodi na krutost glavnog vretena, ali se i ovdje taj model pojednostavljuje i nije potpuno još uvijek is-



Na sl. 2 prikazan je trend povećanja brzine rezanja /18/



Sl. 2. Očekivani trend povećanja brzine rezanja.

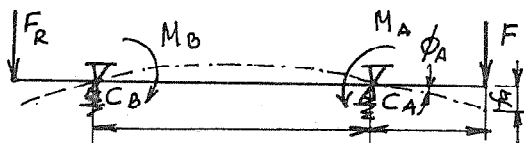
Za ovako visoke brzine rezanja treba uspješno riješiti bar tri tehnološko-konstruktivna problema:

- problem oštice alata
- problem uležištenja
- problem izbora konstrukcionih materijala mašine.

Po sadašnjim saznanjima problem oštice vrha noža rješavaće se na bazi keramičkih materijala. Uležištenja će se razvijati u pravcu primjene kugličnih ležajeva izradjenih, takodje, od keramike sa intenzivnim prisilnim hladjenjem sa glavnim vratilom izradjenim od fibera ili sličnih materijala. Postolje mašina radiće se od polimerbetona ili armiranog betona.

Uz ove navedene pravce daljeg razvoja konstrukcije tražiće se i povećana tačnost koju još dugo neće biti moguće riješiti isključivo elektronikom, odnosno precizno vodjenim vrhom alata na alatnoj mašini klasične koncepcije.

Statički model glavnog vratila čeonog struga prikazan je na sl. 3.



Sl.3. Statički model glavnog vratila čeonog struga

Smanjenje ugiba  $f_a$  postiže se:

- povećanjem poprečnog presjeka vratila
- izborom optimalnih faktora  $k_b$  i  $k_a$
- povećanjem krutosti  $C_A$  i  $C_B$
- izborom najboljeg međusobnog položaja sila  $F$  i  $F_R$
- povećanjem momenata  $M_A$  i  $M_B$

U naučnoj literaturi još uvijek nije dovoljno istražen uticaj momenata uklještenja na deformacije vretena, pa se on najčešće i zanemaruje i tada se deformacije određuju po izrazima:

$$f_a = F \left[ \frac{k_a^3}{10 D_a (1-k_D)^4} (K_I + K_B) + \frac{1}{D_A} \left( 1 + \frac{k_{CL}}{k_b^2} \right) \right] \quad (3)$$

$$\phi_A = F \left[ \frac{k_a^2 k_b}{10^4 \cdot \sqrt{1} D_A^2} + \frac{1 + (1 + k_{CL}/k_b)}{10^3 C_A \cdot k_a \cdot k_b \cdot D_A} \right] \quad (4)$$

a daje se preporuka da se, zbog momenata uklještenja, stvarni ugib smanji za određeni procenat (Napr. 15-20%). Poznati kriterijumi krutosti mogu se podijeliti u dvije osnovne grupe:

- a) konstruktivni
- b) tehnološki

Konstruktivnim kriterijumima obezbjeđuje se normalan rad sparenih zupčani-ka ili ležaja na glavnom vratilu, a tehnološkim se obezbjeđuje kvalitet izradka propisan tolerancijama.

U grupu a) spadaju kriterijumi Ačerkana, Deckera, Angelova, Niemanna, Rešetova, Fromiusa, Mameta i Pittroffa. Ovi kriterijumi pokazuju i neujednačen pristup problemu statičke krutosti glavnog vratila i neujednačene brojčane vrijednosti traženih krutosti.

U grupu b) spadaju:

b<sub>1</sub>. Kriterijum Ačerkana

$$c_{\min} = 200 \text{ N}/\mu\text{m} - \text{ za obične mašine}$$

$$c_{\min} = 400 \text{ N}/\mu\text{m} - \text{ za precizne} \quad (5)$$



b<sub>2</sub>. Kriterijum Zdenkovića

$$c_{\min} = 150 \text{ N}/\mu\text{m} \quad \text{za obične mašine}$$

$$c_{\min} = 300 \text{ N}/\mu\text{m} \quad \text{za precizne mašine.}$$

Po GOST 520-55, sa stanovišta tehnološke krutosti, deformacije na mjestu djelovanja sile treba dovesti sa radijalnim otklonom vratila

$$f_a \max = \frac{\Delta \max}{3} \quad (6)$$

a dozvoljene vrijednosti za  $\Delta \max$  date su tabelom 1.

Prečnik izratka mm	Klasa tačnosti			
	I	II	III	IV
do 200	8	5	3	2
do 400	10	6	4	2,5

Tab. 1. Dozvoljene vrijednosti za  $\Delta \max$

Jedan od daljnjih pravaca razvoja alatnih mašina je i modulna gradnja. Danas u Evropi i u svijetu postoje specijalizirane fabrike koje napr. proizvode glavna vratila i nude ih tržištu kao standardne proizvode. Tako npr. firma FAG daje podatke o krutosti svojih vratila sa kugličnim ležajima.

$$\text{WSTO 5} \quad c = 270 \text{ N}/\mu\text{m}$$

$$\text{WSTO 6} \quad c = 400 \text{ N}/\mu\text{m}$$

$$\text{WSTO 8} \quad c = 500 \text{ N}/\mu\text{m}$$

$$\text{WSTO 11} \quad c = 600 \text{ N}/\mu\text{m}$$

i valjčastim ležajima

$$\text{WZA 3} \quad c = 250 \text{ N}/\mu\text{m}$$

$$\text{WZA 4} \quad c = 300 \text{ N}/\mu\text{m}$$

$$\text{WZA 5} \quad c = 450 \text{ N}/\mu\text{m}$$

$$\text{WZA 6} \quad c = 800 \text{ N}/\mu\text{m}$$

$$\text{WZA 8} \quad c = 1\,100 \text{ N}/\mu\text{m}$$

$$\text{WZA 11} \quad c = 1\,300 \text{ N}/\mu\text{m}$$

Iz ovih podataka se vidi da su krutosti koje se danas postižu daleko iznad onih koje se navode kao minimalne vrijednosti u literaturi, a uzrok je u sve strožijim zahtjevima na tačnost. Ovako visoka krutost postignuta je kod uobičajenih prečnika vratila. Radi ilustracije navodimo da je prečnik vratila ( $\emptyset$  prednjeg ležaja) kod tipova WSTO 6 i WZA 6 samo 120 mm.

Ovaj podatak upućuje na daljnji uspješan razvoj mehaničkog modela glavnog vratila, smanjenje montažnog zazora čime se povećava uklještenje, i uspješno rje-

šavanje podmazivanja kod ležajeva montiranih sa manjim zazorom, koji u posebnim uslovima može biti sveden na nulu.

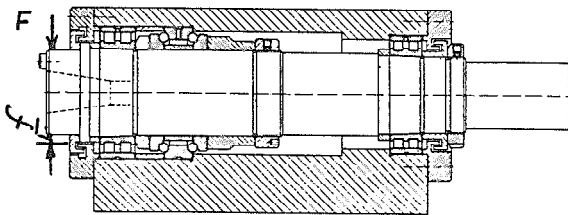
Prednji podaci pokazuju da se kod tačnijeg proračuna deformacija glavnog vratila treba uzeti u obzir i kvalitetna razlika u ukupnim deformacijama kada se na vratilu nalaze valjčasti u odnosu na kuglične ležajeve i ako je kod valjčastih ležaja montažni zazor oko dva puta veći. Krutost vratila tipa WZA veća je jer je veća radijalna krutost ležaja, ali i moment uklještenja.

Obrasci kojima se uzimaju u obzir momenti uklještenja još nisu sasvim pouzdani pa se eksperimentalno određivanje krutosti glavnog vretena pokazalo sasvim opravdanim.

#### 4. EKSPERIMENTALNO ODREĐIVANJE KRUTOSTI

Za eksperimentalno određivanje statičke krutosti odabrano je vratilo čeonog struga UNIS PSH90, čiji je crtež prikazan na sl. 4.

Vratilo je po koncepciji slično FAG vratilu WZA 5, a šematski prikaz položaja sile i mjesta pomjeranja dat je na sl. 5.



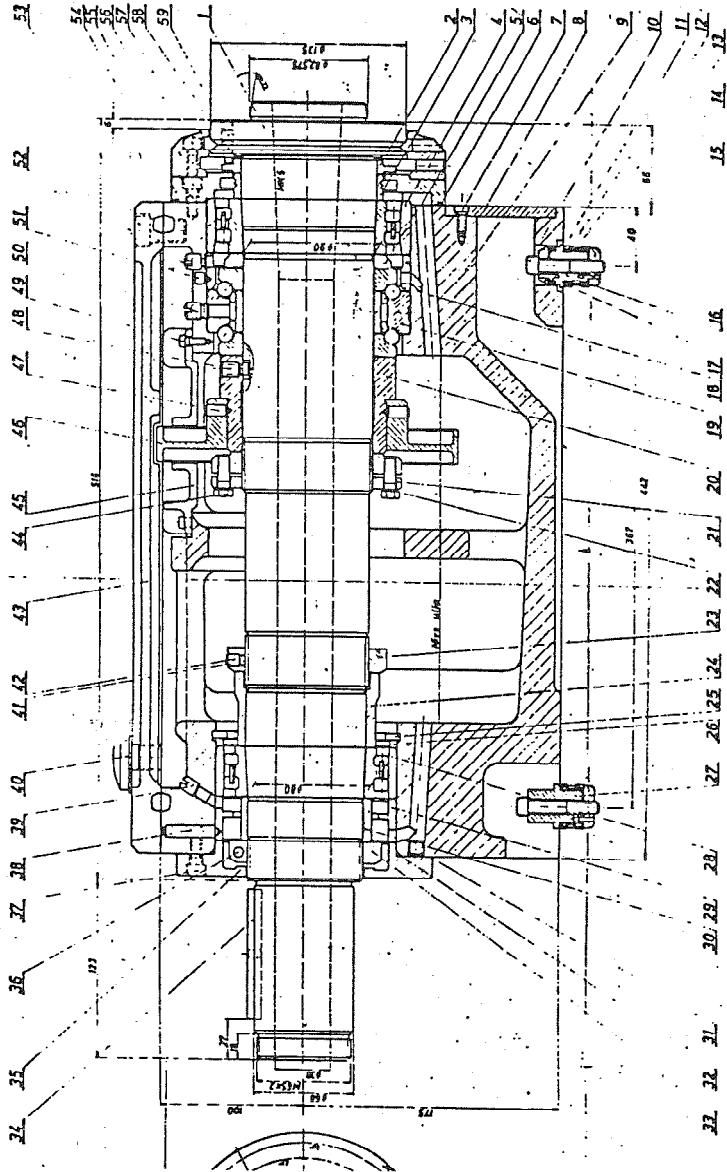
Sl. 5. Način određivanja statičke krutosti

Da bi odredili i elipsu krutosti mijenjan je položaj sile.

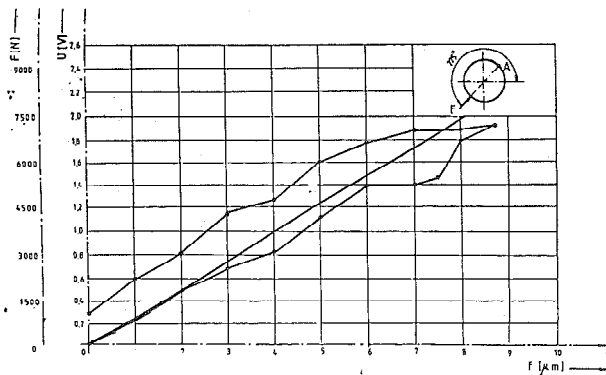
Na sl. 6. dat je dijagram deformacija u periodu opterećenja i rasterećenja za jedan od položaja sile u odnosu na horizontalnu osu.

Na sl. 7. data je elipsa krutosti glavnog vratila.

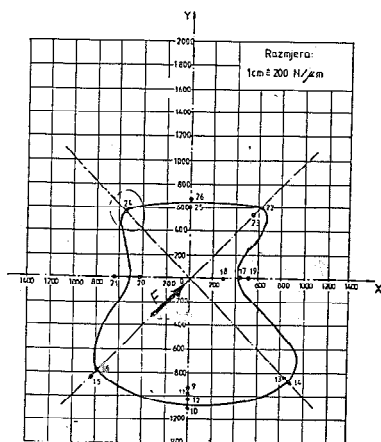
Sa slike se vidi da je krutost ovog čeonog struga različita u zavisnosti od smjera spoljne sile, što je i sasvim razumljivo. Najčešći položaj sile reznja je kada ista djeluje pod uglom od oko  $60^\circ$  u odnosu na horizontalu i tada je krutost iznosila oko  $900 \text{ N}/\mu\text{m}$ , što vratilo ovog struga svrstava u istu kategoriju kao i vratila specijaliziranih svjetskih proizvođača.



Sl.4. Glavno vratilo struga UNIS PSH 90



Sl. 6. Radijalno pomjeranje vratila



Sl. 7. Elipsa krutosti [3]

## 5. REZIME

U radu se daje kraći osvrt na tačnost alatne mašine i uticaj statičke krutosti glavnog vratila. Ukazuje se na tehnološke kriterije krutosti, koji se navode u literaturi i praktično postignute brojčane vrijednosti renomiranih proizvođača sklopova alatnih mašina, te ukazuje na potrebu istraživanja kompleksnijih uticaja na mehanički model glavnog vratila. Dati su rezultati eksperimentalnih istraživanja statičke krutosti čeonog struga domaće proizvodnje i izvršena uporedba sa sličnim strugovima poznatih stranih proizvođača.

## ZUSAMMENFASSUNG:

In der Arbeit wird der Einfluss der statischen Starheit der Hauptspindel der Werkzeugmaschine an die Bearbeitungsgenauigkeit der Werkzeugmaschine gezeigt. Das Problem ist besonders interessant weil grosse Unterschiede zwischen praktischen Resultate und Angaben in der Literatur bestehen. Zum Schluss sind Resultaten der Untersuchung der statischen Starheit einer Drehmaschine (made in Yugoslavia) mit anderen fremden Maschinen verglichen.

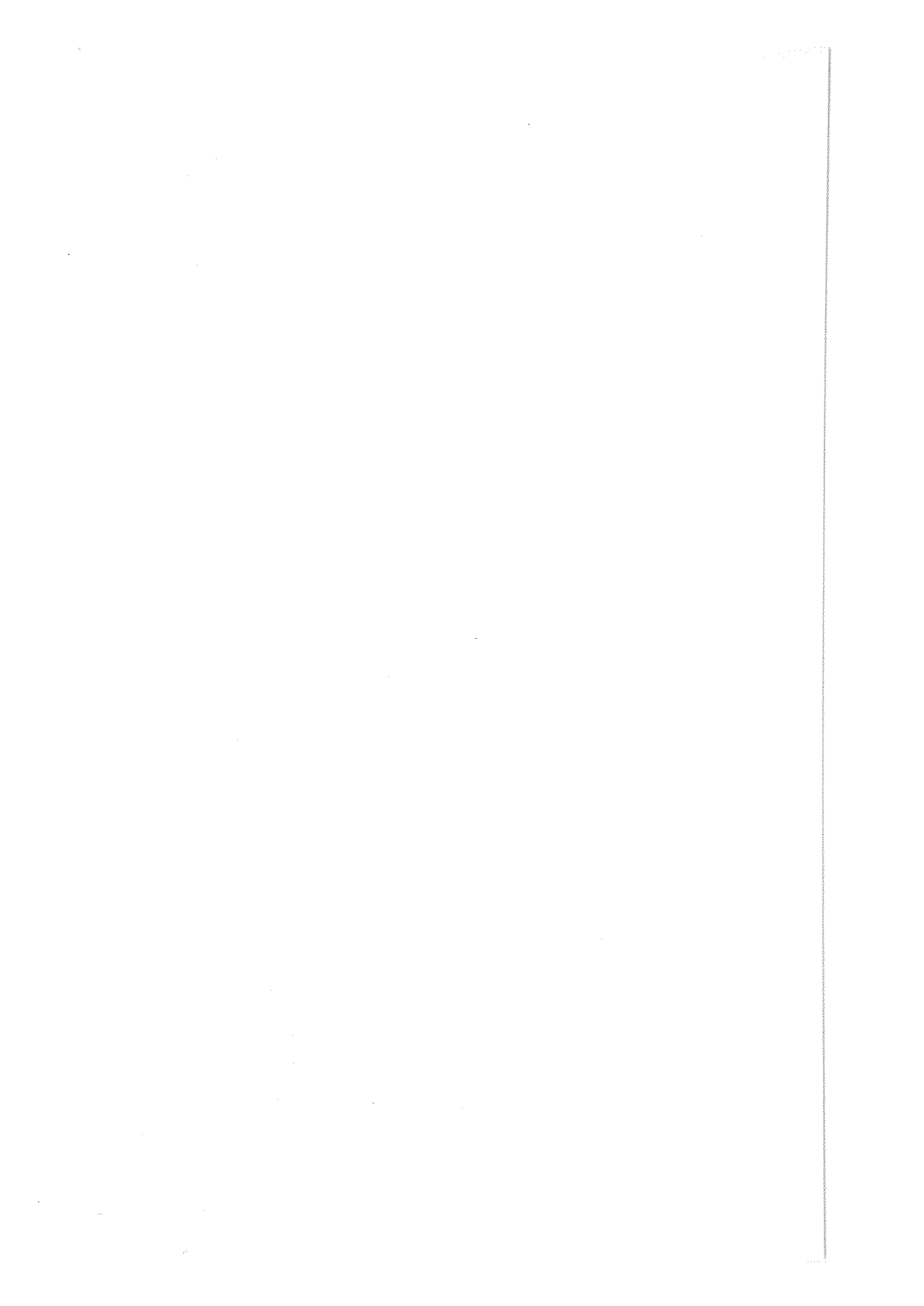
## 6. ZAKLJUČAK

Na osnovu izloženog mogu se izvući bar slijedeći zaključci:

1. Za tačan proračun glavnog vratila treba poći od kompleksnog mehaničkog modela.
2. Vrijednosti za  $c_{min}$  treba povećati na osnovu računskih vrijednosti dobivenih uzimajući u razmatranje kompleksan mehanički model glavnog vretena.
3. Praksa je i ovoga puta pokazala da ne može "čekati" na teoretska rješenja.
4. Domaći proizvođači mašina prate evropska dostignuća u nekim oblastima konstrukcije.

## 6. LITERATURA

- 1 Ačenkan, N.S.: Metalorežućie stanki "Mašinostroenie", Moskva, 1965.
- 2 Brändlein, J., Zwirlein, O.: Plastische Verformung in hochbeanspruchten Kontaktstellen von Wälzlagern "Wälzlagertechnik" Schweinfurt, 1982-1.
- 3 Doleček, V., Šarenac, M., Kovačina, N., Hufnagl, B., Voloder, A. i dr.: Istraživanje uticajnih faktora na dinamičku stabilnost sistema sa aplikacijom na proračun i konstrukciju alatnih mašina, Sarajevo, 1986.
- 4 Dukovski, V.: Analiza i definiranje dodatnih geometrijskih uvjeta na dimenzioniranje glavnih prigonskih vretena alatnih strojeva s uporedbom i vezom uvjeta krutosti, doktorski rad, Zagreb, 1975.
- 5 Honrath, K.: Werkzeugmaschineuspindeln und deren Lagerungen "Industrie-Anzeiger" Nr.80. Essen, 1957.
- 6 Hriešnik, A.: Utjecaj statičke krutosti tokarilice na točnost obrade, doktorska disertacija, Rijeka, 1979.
- 7 Koch, J.: Die Spindelkonstruktion und ihre Steifigkeit. Werkzeugmaschine international Ig... Nr. 1. 1973.
- 8 Pickenbrink, R.: Die Starrheit von Arbeitsspindeln und deren Lagerungen. "Industrie-Anzeiger" Nr.80. Essen, 1956.
- 9 Sokolov, I.U.N., Figanter, A.M.: Vibor osnovnih parametroy špindelnih uzlov preciznih stankov. "Stanki i nstrumenti", No 8. 1963.
- 10 Steni G.: Optimaler Lagerabstand und statische Steifigkeit von Hauptspindel. "Metallarb." 66/4, 1972.
- 11 Šarenac, M.: Analiza i omedjenje dodatnih uvjeta pogonskih elemenata pri dimenzioniranju vretena alatnih strojeva bez radijalne radne sile, magistarski rad, Zagreb, 1977.
- 12 Šarenac, M.: Doprinos odredjivanju kriterija dozvoljenog nagiba vretena alatnog stroja pri valjčastim uložičtenjima, doktorski rad, Zagreb, 1984.
- 13 Šarenac, M., Graf, B. Močić, B., Memišević F.: Odredjivanje i uticaji zazora na ležajima glavnih vretena alatnih mašina. Zbornik radova, BIAM 88. Zagreb, 1988.
- 14 Zdenković, R., Dukovski, V.: Analiza i dimenzioniranje glavnih vretena alatnih strojeva bez prigonske sile u rasponu "Strojarstvo", 2014 Zagreb, 1978.
- 15 Zdenković, R., Dukovski, V.: Bestimmungsgrößen zur Dimensionierung von Hanptspindeln an Werkzeugmaschinen. "Werkstatt und Betrieb" 110/9, München, 1977.
- 16 Yang Shuzi: A study of the stiffness of machine tool spindles. "Int. I. Much. Tool Des. Res". Vol. 21. No 1, pp.23-40, G.Britain, 1981.
- 17 Weck M.: Reaktionsharzbeton - Alternative zum Gusseisen für Maschinen-gestelle. VDI-Z 127 Nr.5. 5165-168, 1985.
- 18 Weck, M.: Werkzeugmaschinen - Stand und Tendenzen "Kugellager-Zeitschrift", No 208.



L. Begenišić, A. Perić\*

PRILOG PROIZVODNIM ISPITIVANJIMA KRUTOSTI  
VRETENA NA DOMAĆIM STRUGOVIMA

1. UVOD

Istraživanje statičke krutosti vretena alatne mašine u uskoj vezi je sa povećanjem tačnosti obrade. Stoga je ovaj problem istraživan u nizu radova, predmet i ovoga rada, koji predstavlja dio iz šireg istraživanja krutosti alatnih mašina za obradu rezanjem. U ovome radu daće se izvjesna saopštenja o radu na razvoju metoda istraživanja i odgovarajuće opreme kao i neki rezultati. Eksperimentalni statički metod ispitivanja krutosti alatne mašine razvijen je upotrebom dinamometrijske opreme za mjerenje sile uz dodatnu izradu posebnih elemenata na davaču za radijalnu i rezultujuću silu rezanja.

S obzirom da statički metod ne može obuhvatiti sve uticaje na krutost mašine koji se realno pojavljuju na alatnim mašinama, paralelno su razvijeni tzv. proizvodni metodi ispitivanja krutosti alatnih mašina za obradu rezanjem. Ovim proizvodnim metodama određuje se krutost vretena alatne mašine za obradu rezanjem u realnim uslovima rezanja kada se vrši obrada obradaka na alatnoj mašini. Razvoj ovih metoda baziran je na dosadašnjem iskustvu sa posebnim identificiranjem greške obrade uz istovremeno kontinualno mjerenje sila rezanja pomenutom dinamometrijskom opremom. U radu će se dati i neki rezultati ovih ispitivanja na strugovima domaće proizvodnje, izvršeni u Zavodu za alatne mašine Mašinskog fakulteta u Sarajevu sa ciljem verifikacije ovih metoda i kompletiranja eksperimentalne opreme.

---

\*/ Lazar Begenišić, dipl.ing., asistent Mašinskog fakulteta u Sarajevu, ul. Omladinsko šetalište b.b.

Dr Aristid Perić, dipl.ing., redovni profesor Mašinskog fakulteta u Sarajevu, ul. Omladinsko šetalište b.b.



## 2. EKSPERIMENTALNE METODE ISPITIVANJA KRUTOSTI VRETENA NA ALATNIM MAŠINAMA

### 2.1. Statička metoda ispitivanja krutosti vretena alatnih mašina

Pod krutošću tijela ili sistema tijela podrazumijevamo njihovu sposobnost da se opiru elastičnim deformacijama pri opterećivanjima koja na njih djeluju.

Čim je manja veličina deformacije, pri istim ostalim uslovima, krutost je veća. Koeficijent krutosti ili krutost je odnos djelujuće sile i njom izazvane deformacije (u pravcu djelovanja sile)

$$C = \frac{F}{Y} \quad (1)$$

gdje su: P - djelujuća sila [N]

Y - elastična deformacija u pravcu djelovanja sile [ $\mu\text{m}$ ]

C - krutost [N/ $\mu\text{m}$ ]

Za određivanje statičke krutosti elastičnog sistema primjenjuje se proračunski, eksperimentalni, ili proračunsko eksperimentalni metod. Značajnu rasprostranjenost su postigli eksperimentalni metodi određivanja statičke krutosti [1,2,3,4].

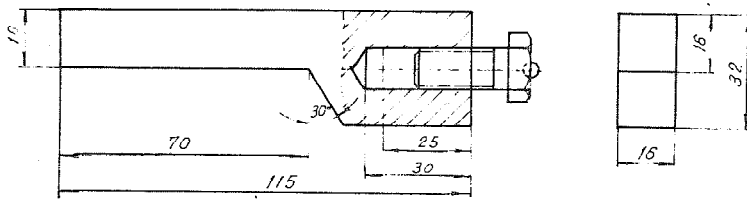
Opterećenje koje imitira silu rezanja postiže se različitim sredstvima (Zavojnim ili hidrauličnim stegama, teretom i dr.).

Ispitivanja su vršena na domaćim strugovima "POTISJE" ADA univerzalno-produkcionim tipa PA 25/1000 istih tehničkih karakteristika: visina šiljaka 250 [mm], raspon šiljaka 1000 [mm], prečnik otvora vretena 62 [mm], broj brzina 24, opseg 20-2000 [o/min], broj uzdužnih posmaka 48, opseg 004-9,16 [mm], broj poprečnih posmaka 48, opseg 0,02-4,58 [mm] snaga motora 7,5 [kW].

U konkretnom slučaju kod ispitivanja statičke krutosti vretena kao osnovni pribor korišteni su:

- Davač sile sa zavrtnjem i kuglicom,
- Trokomponentni dinamometar br. M 123,
- Trostruka mjerna kutija br. M 12,
- Komparator sa skalom, vrijednosti podioka 0,01 [mm].

U tu svrhu posebno su projektovani i napravljeni davači sile za mjerenje radijalne sile  $F_y$  dat na (sl.1) i davač za mjerenje rezultujuće sile  $F_r$ . Ovim je omogućeno kompletiranje laboratorijske opreme.



Sl. 1. Davač sile sa zavrtnjom i kuglicom

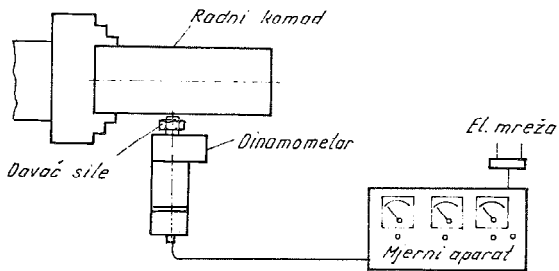
Davač sile je postavljen u pravougli otvor na prednjoj strani dinamometra i pritegnut sa dva zavrtnja.

Prenos sile na vreteno vršen je pomoću medjuelemta, ugradjenog u glavu zavrtnja sa loptastom površinom (kuglica  $\varnothing$  6mm).

Dinamometar se postavlja u stegu (specijalno izradjenu za smještaj dinamometra) na poprečnim saonicama struga umjesto poprečnog suporta i pričvršćen je sa četiri zavrtnja.

Trostruka mjerna kutija postavlja se pored struga (sl.2).

Spajanje dinamometra i mjerne kutije vrši se priključnim kablom. Mjerna kutija se pojedinačno napaja iz mreže naizmjenične struje



Sl. 2. Šema uređaja za statički metod ispitivanja krutosti vretena

Ispitivanja su vršena po sledećim fazama:

1. Na udaljenosti 10 mm od završetka vratila na steznoj glavi (VG) bez trna u steznoj glavi
2. Na cilindričnom trnu stegnutom u steznoj glavi (VGCT)
3. Na konusnom stepenastom trnu stegnutom u steznoj glavi (VGKT)
4. Na konusnom stepenastom trnu postavljenom u konus vretena bez stezne glave (VKT)

Pod tačkom 2, 3 i 4 ispitivanja su vršena na udaljenosti od završetka vretena: 90, 110, 160, 230 [mm] i na dužini 70 i 90 [mm] od mjesta stezanja paknama.

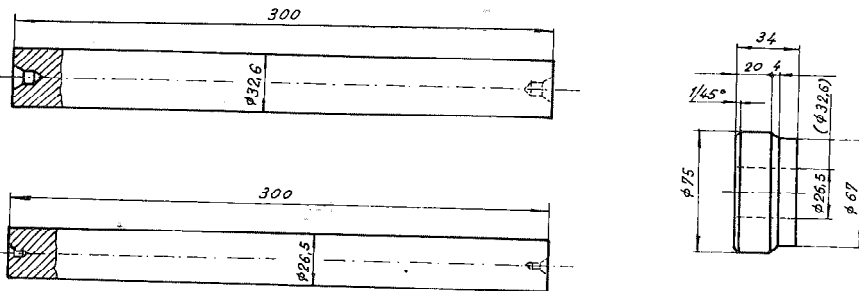
Veličina opterećujuće sile kretala se od nule do 5000 [N], kod mjerenja radijalne sile  $F_y$ , a kod mjerenja rezultujuće sile  $F_R = \sqrt{F_v^2 + F_y^2}$  do 7800 [N]. Vrijednosti opterećujuće sile limitirane su osnovnim dimenzijama alatne mašine. Na pr. za strugove iznosi [2]

$$F = 0,75 D^{1,5} \quad (2)$$

gdje je: D - maksimalni prečnik obrade u [mm], što za ispitivanu mašinu iznosi 8385 [N]. Prvo je vršeno opterećenje strukture kontinuiranim povećanjem sile prema odabranom stupnju sila, a zatim rasterećenje prema istim stupnjevima sila.

## 2.2. Proizvodni metod sa dva trna

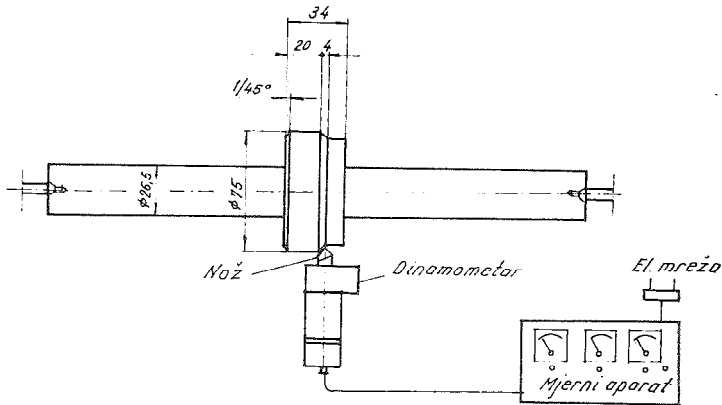
U osnovi korištena metoda je obrada stepenastog obradka u jednom prolazu [5,6]. Pri obradi dubina rezanja oštro se mijenja izazivajući momentalno povećanje sila rezanja i pomjeranje alata zajedno sa suportom. Rezultat toga je pojava greške geometrijskog oblika obradka na osnovu koje se ocjenjuje krutost. Dva jednaka stepenasta prstena tijesno se navlače na dva trna različite krutosti (sl. 3),  $C_1=9200$  [N/mm] i  $C_2=21000$  [N/mm]



Sl. 3. Opitni trnovi sa stepenastim prstenom za proizvodni metod

Obrada se vrši među šiljcima, jednog iza drugog uzorka. Uslovi obrade ostaju isti (izlaz pinole, stezanje matice konjića, isturanje noža i td.). Tako je posebno kompletiran pribor labora-

torijskom opremom za izvodjenje ovih opita na mašini pri rezanju (sl. 4).



Sl. 4. Proizvodni metod sa dva trna

Poslije obrade izmjere se  $y_1$  i  $y_2$  odgovarajuće veličine kaskade (stepenastog pada) radijusa na stepenastim cilindrima i izračuna krutost iz uslova jednakosti sila rezanja koristeći obrasce:

$$k = \frac{1}{C}, \quad k = \frac{Y}{F}, \quad F = \frac{Y}{k} = \frac{Y}{\frac{1}{C}} \quad \text{pa je} \quad F = \frac{y_1}{\frac{1}{C} + \frac{1}{C_1}} = \frac{y_2}{\frac{1}{C} + \frac{1}{C_2}},$$

$$\frac{y_1}{C} + \frac{y_1}{C_2} = \frac{y_2}{C} + \frac{y_2}{C_1}, \quad \frac{y_1 - y_2}{C} = \frac{y_2}{C_1} - \frac{y_1}{C_2} = \frac{C_2 y_2 - C_1 y_1}{C_1 C_2} \Rightarrow$$

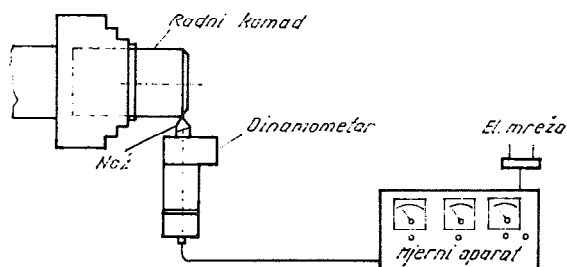
$$C = \frac{C_1 C_2 (y_1 - y_2)}{C_2 y_2 - C_1 y_1} \quad (3)$$

### 2.3. Proizvodni metod na bazi uzorka obradka

Za ovu metodu potrebno je pripremiti seriju do 10 komada (uzoraka). Komade treba isjeći iz iste osovine poznatoga kvaliteta.

Uzorke uraditi na predmjeru stim da radni dio i dio koji

se steže u stezač trebaju da budu u plusu. Potrebno je izvršiti obilježavanje uzoraka u dva upravna položaja po cijeloj dužini i potom prići obradi dijela koji se steže u stezač. Izvršiti obilježavanje na stezaču i uzorku, mjesto po kome će se vršiti stezanje kod obrade radnog dijela uzorka. Podešavanje na mašini izvršiti na strogo traženu i jedinstvenu mjeru (vodeći računa o mjestu stezanja). Podešavanje dubine rezanja vršiti preko noniusa i kontrolisati komparatorom. Instalacija za mjerenje po ovome metodu koji je u toku razvoja data je na (sl.5).



Sl. 5. Proizvodni metod na bazi uzorka obradka

Metod je baziran na praćenju veličine greške koja nastaje pri obradi serije obradaka usljed popustljivosti vretena mašine [7].

### 3. REZULTATI

Kod statičkog metoda ispitivanja krutosti korištena je oprema data na (sl. 1 i 2). Kod svih mjerenja ciklus se ponavljao tri puta i tako se došlo do histerezis dijagrama datoga na (sl.6), za jedno od mjerenja krutosti struga. Za ovaj slučaj cilindrični trn je stegnut u paknama stezne glave i mjerenje je vršeno na dužini 70 [mm] od mjesta stezanja u paknama, što odgovara mjerenjima krutosti vretena prema normama GOST-a. Dobivena je krutost približno  $88 [N/\mu m]$

Kod proizvodnog metoda sa dva trna, u konkretnom opitu dobivena je sledeća vrijednost  $y_1 = 0,03 [mm]$ ;  $y_2 = 0,015 [mm]$  pri

izabranim režimima obrade  $n = 400$  [o/min];  $s = 0,249$  [mm/o],  $f = 2,5$  [mm], pa je dobivena vrijednost krutosti iznosila:

$$C = \frac{(y_1 - y_2) C_1 C_2}{y_2 C_2 - y_1 C_1} = \frac{0,015 \cdot 9200 \cdot 21000}{315 - 276} = \frac{2898000}{39} = 74,3 \text{ [N/}\mu\text{m]}$$

Izmjerene veličine sila rezanja prije kaskade i na kaskadi iznosile su:  $F_x = 100(900)$ ;  $F_y = 350(1600)$  i  $F_z = 700(2900)$  [N]. Proračun ekvivalentne sile vršen je

$$F_e = \frac{1}{l_2} F_z + F_y + \frac{1}{l_2} F_x \quad (4) \text{ gdje su}$$

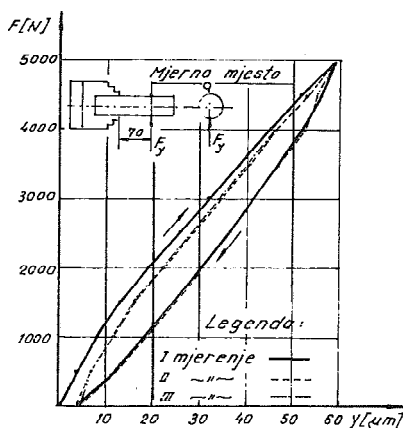
$$l_1 = \sqrt{F_y^2 + F_z^2}, \quad l_2 = \sqrt{F_z^2 + F_x^2}, \quad l_3 = \sqrt{F_z^2 + F_y^2}$$

Na osnovu izračunatih ekvivalentnih sila i krutosti vretena moguće je bilo odrediti pomjeranja

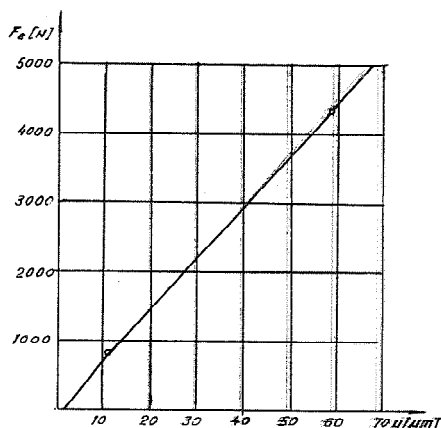
$$y_{1f} = \frac{F_e}{C} = \frac{821}{74,307} = 11,048 \text{ [}\mu\text{m]}, \quad y_{2f} = \frac{4335}{74,307} = 58,339 \text{ [}\mu\text{m]}$$

Sa dobivenim podacima nacrtan je dijagram  $F$ - $y$ , dat na (sl.7).

Rezultati mjerenja proizvodnim metodom na bazi uzorka obradka biće saopšteni u narednim radovima.



Sl. 6. Histerezis dijagram za strug kod statičkog ispitivanja



Sl.7. Dijagram krutosti za strug odredjen proizvodnim metodom sa dva trna

#### 4. ZAKLJUČAK

Na osnovu dobijenih rezultata može se dati odredjeni zaključak. Mjerenja po odgovarajućim GOST normama statičkim metodom, dovoljno su podudarna sa mjerenjima dva trna po proizvodnom metodu. U radu je razvijena i osvojena metodologija istraživanja statičke krutosti alatnih mašina za obradu rezanjem sa potrebnom eksperimentalnom opremom za ispitivanje pri mirovanju i rezanju mašine.

Dalja istraživanja treba usmjeriti na razvoj novih proizvodnih metoda kod strugova i drugih alatnih mašina za obradu rezanjem i to naročito na bazi greške uzorka.

#### Reference

- [1] Milačić V., Mašine alatke I i II, Mašinski fakultet, Beograd, 1986, 1988
- [2] Ačerkan N., Metallorežusćie stanki, Tom 2, Mašinostroenije, Moskva 1965
- [3] R.Zdenković, V. Dukovski: Analiza i dimenzioniranje glavnih vretena alatnih strojeva bez prigonske sile u rasponu, Strojarstvo 20 (1978) 4, str. 205-212, Zagreb
- [4] R.Zdenković, V. Dukovski, Uticaj prigonske sile na projekt i dimenzioniranje glavnih vretena alatnih strojeva, Strojarstvo 21 (1979) 3/4, str. 129-136 Zagreb
- [5] Skragan V.A. Proizvodstvenij metod opredelenija žestkosti metallorežusćiego oborudovanija, M-L, Mašgiz, 1950
- [6] Jakimov A.V., Kazimirčik Ju.A., Mokrou M.F. Ocenka proizvodstvenih metodov opredelenija žestkosti metallorežusćih stankov, Izvestija vuzov, Mašinostroenie, 1962
- [7] Balaškin B.S. Adaptirnoe upravlenie stankami, Mašinostroenie Moskva, 1973

L. Begenišić, A. Perić

#### CONTRIBUTION TO A PRODUCTIONS INVESTIGATION OF SPINDLE RIGIDITY ON DOMESTIK LATHES

#### S u m m a r y

In this article is given a part of productions investigation of machine tool spindle rigidity. Experimental static metod of investigation of machine tool spindle iz developed using equipment for measuring of cutting force. Further are developed productions method of machine tool spindle rigidity for measuring in cutting proces. In conclusion is given remark of spindle rigidity and validity of developed method.

P. Nikšić\*

PODLOGE ZA PRORAČUN ZAVOJNIH VRETENA SA KUGLIČNIM  
VODJENJEM - KAO POGONSKIH SISTEMA POMOĆNOG KRETANJA  
MAŠINA ALATKI VIŠEG TEHNOLOŠKOG NIVOA

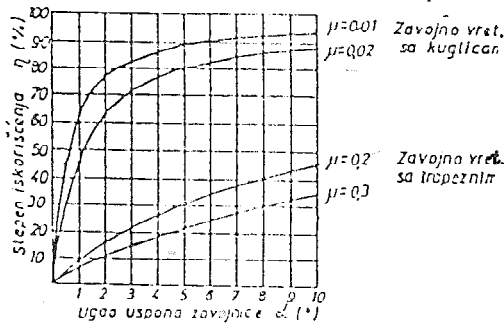
## 1. UVOD

U mašingradnji su za pretvaranje kružnog kretanja u pravolinijsko i obrnuto, široko rasprostranjeni sklopovi navrtke i vretena sa trapeznim navojem. Nedostaci ovakvih kliznih pogonskih mehanizama ogledaju se u pojavi neizbežno velikog trenja kontaktnih površina (bokova navoja) što prouzrokuje zagrevanje i habanje navojnog para. Posledice toga su velike deformacije vretena, pojava relativno velikog aksijalnog zazoru i mali stepen iskorišćenja. Usavršavanje kliznih pogonskih mehanizama su se svodila na optimizaciju oblika navoja, vrsta i karakteristika materijala a rezultat svega toga su mala smanjenja trenja, habanja i zagrevanja navojnog para. Kvalitativno viši nivo u razvoju ovakvih pogonskih mehanizama dobijen je prelaskom na navojna vretena sa kuglicama.

Prednosti navojnih vretena sa kuglicama su sledeće:

- vrlo mali koeficijent trenja kotrljanja dovodi do smanjenja energetske gubitaka što rezultira visok stepen iskorišćenja (Sl.1);
- mali stepen habanja čime se dobija trajna tačnost i duži vek trajanja;
- velike brzine kretanja;
- smanjeno zagrevanje utiče na smanjenje dilatacija čime se postiže velika tačnost pozicioniranja;
- mogućnošću prednapreznja navrtke eliminiše se zazor;
- velika krutost prenosnog para itd.

Mogućnost primene navojnih vretena sa kuglicama je znatno veća u odnosu na klasična vretena sa trapeznim navojem, tako da se ona sve više primenjuju u proizvodnji alatnih mašina sa numeričkim upravljanjem kao i mašina sa visokim zahtevima tačnosti pozicioniranja, u manipulacionoj tehnici (robotici), u avio industriji, u automobilskoj industriji, brodogradnji i ostalim granama opšte mašingradnje.



Sl.1 Krive stepena iskorišćenja za date vrednosti koeficijenata trenja

\* Nikšić Mr. Petar, dipl.inž., Rukovodilac odseka za tehnologiju TPSP  
Tehničkog Remontnog Zavoda u Čačku, ul. Dr. Dragiše Mišovića 167,  
32000 ČAČAK



Sagledavajući eksploatacione i ostale kvalitativne prednosti zavojnih vretena sa kugličnim vodjenjem nad klasičnim zavojnim vretenima, jasno se uočava njihov značaj i u području domaće mašingradnje. Ovaj rad ima cilj da korisnicima zavojnih vretena sa kugličnim vodjenjem prezentira njihove relevantne karakteristike, kao i metodologiju izbora odgovarajućeg vretena za specifične zahteve proizvodnog zadatka korisnika.

## 2. PODLOGE ZA PRORAČUN (IZBOR) RELEVANTNIH KARAKTERISTIKA NAVOJNIH VRETENA SA KUGLIČNIM VODJENJEM

Pregled relevantnih konstruktivno-tehnoloških i eksploatacionih karakteristika navojnih vretena sa kugličnim vodjenjem prikazan je u tablici 1.

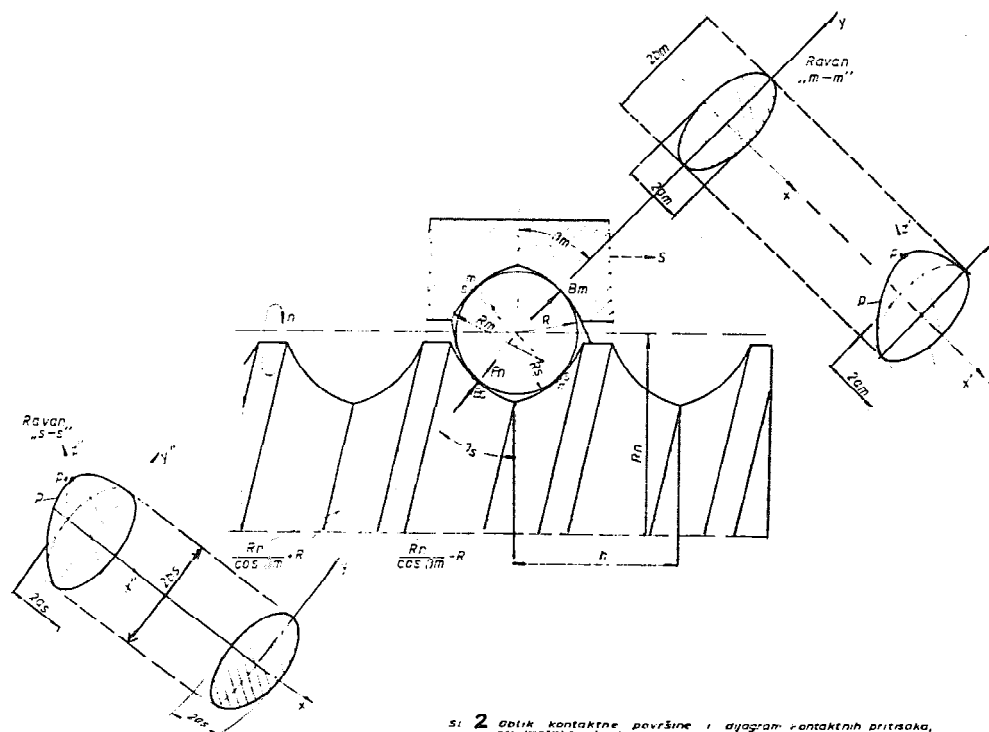
### T.1 KONSTRUKTIVNO TEHNOLOŠKE I EKSPLOATACIONE KARAKTERISTIKE NAVOJNIH VRETENA SA KUGLIČNIM VODJENJEM

Red. br.	Konstruktivno-tehnološke karakt.			Eksploatacione karakteristike		
	Oznaka	Jed. mere	Značenje	Oznaka	Jed. mere	Značenje
1.	$d_n \times d \times l$	[mm]	Nominalni prečnik $x$ korak $x$ $x$ dužina	$\eta$	[-]	Stepen iskorišćenja
2.	$R_{v,n}$	[mm]	Radijus profila navoja vretena, navrtke	$F_v$	[N]	Sila prednapreznja
3.	$d$	[mm]	Prečnik kuglice	$P_a$	[kW]	Predajna snaga
4.	$L$ $B_{v,n}$	[°]	Ugao nagiba profila navoja Ugao kontakta	$F_a$	[N]	Ukupno radno opterećenje
5.	$S_{a,n}$	[mm]	Zazor aksijalni, radijalni	$C_{st}$	[N]	Statička nosivost
6.	$d_{k,n}$	[mm]	Prečnik kinematskog dodirnog kruga	$C_d$	[N]	Dinamička nosivost
7.	$R_{i,k,n}$	[mm]	Poluprečnik krivine u dodirnim tačkama	$F_{KR}$	[N]	Kritična sila izvijanja
8.	$A_{v,n}$ (mm <sup>2</sup> )	[mm <sup>2</sup> ]	Veličina kontaktne površine	$n_d$	[min <sup>-1</sup> ]	Dozvoljeni broj obrtaja
9.	$P_{v,n}$ (mm <sup>2</sup> )	[N/mm <sup>2</sup> ]	Pritisak na kontaktnoj površini	$n_{KR}$	[min <sup>-1</sup> ]	Kritični broj obrtaja
10.	$F_{a,max}$	[N]	Maksimalno dozvoljena aksijalna sila	$T$	[h]	Vek trajanja
11.	$M_o$	[Nm]	Ukupni obrtni moment	$F_m$	[N]	Srednje radno opterećenje
12.	$\Delta P_{300}$	[mm]	Klasa tačnosti	$n_m$	[min <sup>-1</sup> ]	Srednji radni broj obrtaja

Prikaz, značenje i proračun konstruktivno-tehnoloških karakteristika na rednom broju 1; 2; 3; 4; 5; 6; 10 i 11 dat je u radu [2] iz spiska korišćenih referenci. U daljem tekstu ovog poglavlja daće se prikaz i proračun ostalih relevantnih karakteristika iz tablice 1.

2.1 PRORAČUN VELIČINE KONTAKTNE POVRŠINE I  
RASPODELE PRITISAKA; PRI KONTAKTU KUGLICE  
SA NAVOJNIM VRETENOM I NAVRTKOM

Pri radu navojnih vretena sa kugličnim vodjenjem u kontaktu se nalazi kuglica (kuglice) sa bočnom površinom (profilom) navoja vretena sa jedne strane, kao i kuglica sa profilom navoja navrtke sa druge strane, istovremeno. Radijusi glavnih krivina koji učestvuju u proračunu kontaktne površine, određuju se u ravnima ekstremnih vrednosti: radijusa profila navoja vretena i navrtke tj. u njihovim dodirnim tačkama sa kuglicom. Jedna takva ravan je vertikalna aksijalna ravan prenosnika; a druga pod uglom  $\beta_{V(s)}$  u odnosu na osu prenosnika normalna na nju ravan  $s - s$ , za dodir kuglice i vretena; odnosno pod uglom  $\beta_{N(m)}$  normalna na nju ravan  $m - m$ , za dodir kuglice i navrtke. Prikaz radijusa krivina u dodirnim tačkama kuglice sa vretenom i navrtkom; kao i oblika i kontaktne površine i rasporeda pritisaaka na njoj, dat je na Sl. 2.



Sl. 2 Oblik kontaktne površine i diagram kontaktnih pritisaaka, pri kontaktu kuglice sa navojnim vretenom i navrtkom

Shodno označavanjima na Sl.2 kinematski Pol-dodirna tačka kuglice sa navojnim vretenom je  $B_s$ , a sa navrtkom  $B_m$ . Neka radijusi krivina imaju oznaku (po Hertz)  $R_{ij}$ , gde se indeks  $i$  - odnosi na telo u kontaktu, a indeks  $j$  - odnosi na ravan glavne krivine. Usvojimo da se indeks  $i=1$  odnosi na kuglicu, a  $j=2$  na aksijalnu vertikalnu ravan prenosnika.

Radijusi krivina pri kontaktu kuglice sa navojnim vretenom (tačka Bs) iznose:

$$\begin{aligned} R_{11} &= R_{12} = R \\ R_{21} &= R_5 \quad (1) \\ R_{22} &= \frac{R_n}{\cos \beta_5} - R \end{aligned}$$

Uvodjenjem u proračun recipročnih radijusa krivina u tački Bs, spoljašnjeg opterećenja i karakteristika čeličnih materijala u kontaktu dobijaju se sledeći izrazi za proračun veličina poluosa kontaktne površine:

$$a_5 = 0,064 \cdot K_{a5} \left( \frac{F_n}{\sum \frac{1}{R_{i5}}} \right)^{1/3} \quad [\text{mm}] \quad (2)$$

$$b_5 = 0,064 \cdot K_{b5} \left( \frac{F_n}{\sum \frac{1}{R_{i5}}} \right)^{1/3} \quad , \text{ gde je}$$

$$0,064 \left[ \frac{\text{mm}^{2/3}}{dN} \right]^{1/3}, F_n [dN] - \text{nominalno spoljašnje opterećenje i } R_{i5} [\text{mm}].$$

Veličina kontaktne površine pri kontaktu kuglice sa vretenom data je izrazom  $A_v = A_s = \pi \cdot a_5 \cdot b_5 [\text{mm}^2]$  (3) i zavisna je od spoljašnjeg opterećenja ( $F_n$ ), karakteristika profila navoja ( $d, d_n, R_s, z_n, h, \beta_5$ ) i karakteristika materijala elemenata u kontaktu ( $K_s, \mu, E, \nu$ ).

Analognim proračunom dobija se izraz za veličinu kontaktne površine pri kontaktu kuglice sa navrtkom

$$A_N = A_{nv} = 4,096 \cdot 10^{-3} \pi K_{a_n} K_{b_n}$$

Sa Sl. 2 se uočava da se veća poluosa ( $b$ ) formira poprečno prema smeru kotrljanja kuglice, a manja poluosa ( $a$ ) se formira u smeru kotrljanja kuglice.

Raspored pritiska po kontaktnoj površini kuglice sa vretenom ( $p_{v(s)}$ ) i raspored pritiska po kontaktnoj površini kuglice sa navrtkom ( $p_{N(m)}$ ), biće u slučaju kada je koordinatni početak u centru površine kontakta, u obliku prostornog elipsoida; definisan izrazima

$$p_{v(s)} = \frac{3 F_n}{2 \pi a_5 b_5} \left( 1 - \frac{x^2}{a_5^2} - \frac{y^2}{b_5^2} \right)^{1/3} \cdot 10^{-3} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4),$$

$$p_{N(m)} = \frac{3 F_n}{2 \pi a_m b_m} \left( 1 - \frac{x^2}{a_m^2} - \frac{y^2}{b_m^2} \right)^{1/3} \cdot 10^{-3}$$

gde su  $x$  i  $y$  - koordinate položaja tačke na površini.

Na ivicama kontaktne površine je pritisak nula, a maksimalni je u centru kontaktne površine.

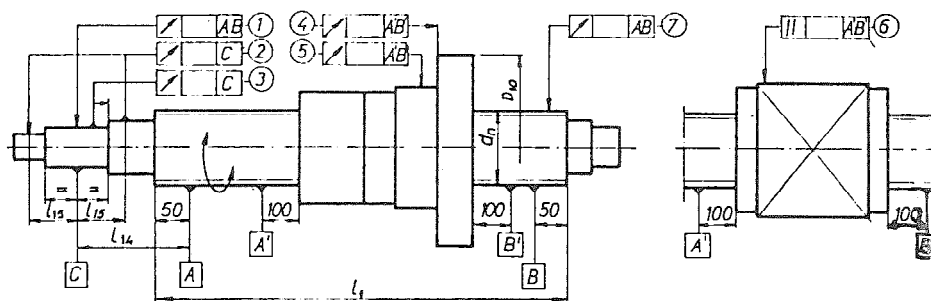
Pod uticajem dejstva sile  $F_n$  dolazi u njenom pravcu do elastične deformacije tela u kontaktu tako da se centri profila navoja vretena (navrtke) i kuglice približuju za veličinu  $\delta_{Nv,N}$  koja iznosi za čelične materijale

$$\delta_{Nv,N(s,m)} = 0,00162 \left( F_n^2 \cdot \sum \frac{1}{R_{iN,N}} \right)^{1/3} \quad [\text{mm}] \quad (5)$$

## 2.2 DEFINISANJE KLASA TAČNOSTI SKLOPA NAVOJNOG VRETENA SA KUGLIČNIM VODJENJEM

U zavisnosti od dobijenog odstupanja,  $u$  [ $\mu\text{m}$ ], koraka na referentnoj dužini navoja od 300 mm, svaka navojna vretena sa kugličnim vodjenjem se delo na šest klasa tačnosti: klasa 5, 10; 25; 50; 100 i 200.

Obzirom da ne postoje domaći standardi za ispitivanje kvaliteta navojnih vretena sa kugličnim vodjenjem, preporučuje se kontrola kvaliteta po DIN-u 69051; koji predviđa kontrolnu shemu kao na Sl. 3 sa objašnjenjem iste datom u tablici 2.



Sl. 3 Kontrolna shema sklopa navojnog vretena sa kugličnim vodjenjem

#### T.2 PRIKAZ KONTROLNIH MESTA, OBJAŠNENJE I TOLERANCIJE

Merno mesto	Simbol ( )	Objašnjenje	Klasa tačnosti [μm]					
			5	10	25	50	100	200
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$\Delta P_{300}$	Odstupanje koraka/ 300	0,005	0,010	0,025	0,050	0,100	0,200
	$\Delta P_{ink}$	Toler.koraka na vret.	1,8xh	1,8xh	1,8xh	1,8xh	-	-
	$\Delta P_{2\pi}$	Odstup.koraka za 1 obrt	0,004	0,005	0,006	0,010	-	-
1	↗	$l_{14}$ do 300 (mm)	0,012	0,02	0,025	0,040	0,070	0,08
		300-500	0,015	0,020	0,030	0,050	0,080	0,12
		500-1000	0,020	0,025	0,040	0,080	0,100	0,150
2	↗	1000-2000	0,030	0,035	0,050	0,100	0,150	0,200
		$l_{15}$ (mm) do 100	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,020
		100-300	0,007	0,008	0,008	0,008	0,008	0,040
3	↗	300-i više	0,004	0,004	0,005	0,005	0,005	0,010
			0,005	0,005	0,010	0,010	0,010	0,030
4	↗	$D_{10}$ (mm) 1-80	0,015	0,020	0,030	0,040	0,050	0,060
		80-160	0,020	0,025	0,035	0,045	0,060	0,090
		preko 160	0,025	0,035	0,040	0,050	0,080	0,120
5	↗		0,015	0,025	0,035	0,040	0,060	0,100
6	↗	za 100 nm	0,020	0,025	0,030	0,040	0,060	-
7	↗	$l_1$ (mm) do 500	0,015	0,020	0,030	0,050	0,060	0,100
		500-1000	0,020	0,025	0,040	0,080	0,090	0,150
		1000-2000	0,030	0,035	0,050	0,100	0,120	0,200
		preko 2000	0,040	0,050	0,060	0,150	0,180	0,250

## 2.3 PRIKAZ I OBJAŠNENJE EKSPLOATACIONIH KARAKTERISTIKA NAVOJNIH VRETENA SA KUGLIČNIM VODJENJEM

Prikaz i objašnjenje pojedinih eksploatacionih karakteristika bio bi sledeći:

### 2.3.1 Stepen iskorišćenja $\eta$

Stepen iskorišćenja računa se za dva karakteristična slučaja funkcije pogonskog sistema.

Ako je vreteno (navrtka) aksijalno uležišteno, pa na njega deluje pogonski obrtni moment  $M_o$ , onda se na navrtki (vretenu) čije je obrtanje sprečeno generiše aksijalna sila  $F_a$  koja iznosi

$$F_a = \frac{M_o 2\pi^2 M}{h} [dN], \text{ PRI ČEMU JE } \eta = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg}(\alpha + S)} \quad (6)$$

Ako je vreteno (navrtka) aksijalno uležišteno, pa na njega deluje aksijalna sila  $F_a$ , tada se na vretenu čije je obrtanje sprečeno stvara obrtni moment  $M_o$  koji iznosi

$$M_o = \frac{F_a h M^2}{2\pi^2} [dN_m], \text{ PRI ČEMU JE } \eta' = \frac{\operatorname{tg}(\alpha - S)}{\operatorname{tg} \alpha} \quad (7)$$

### 2.3.2 Sila prednaprezanja (predstezanja) $F_v$

Prednaprezanje navojnog prenosnika podrazumeva delovanje aksijalne sile  $F_v$  kojom se ostvaruje kontakt kuglice i bokova navoja bez zazora. Kod prednaprene dvodelne navrtke sila  $F_v$  treba da bude tolika da pri dejstvu spoljašnje maksimalne zadate aksijalne sile ( $F_a \max$ ) nijedna od ove dve navrtke ne izgubi svoju prednapregnutost. Da bi se sa sigurnošću zagarantovalo odsustvo zazora treba da bude

$$F_v = 0,4 \cdot F_a \max \quad (8)$$

### 2.3.3 Predajna snaga prenosnika $P_a$

$$\text{Snaga koju prenosnik prenosi iznosi } P_a = \frac{M_o n}{9550} [kW] \quad (9)$$

gde je  $M_o$  [Nm],  $n$  [min<sup>-1</sup>] broj obrtaja vretena.

### 2.3.4 Statička nosivost - $C_s$ [N]

Statička nosivost predstavlja onu vrednost aksijalnog centralno delujućeg opterećenja koje izaziva ukupnu trajnu deformaciju staze kotrljanja u kuglice jednaku  $0,001 d$ .

$$C_s = \frac{2,746}{\sqrt{(R_{11} + R_{12})(R_{21} + R_{22})}} \cdot Z \cdot i \cdot \sin \beta \cdot d [N] \quad (10), \text{ gde je}$$

$Z$  - broj nosećih kuglica po hodu;  $i$  - broj nosećih hodova navrtki.

### 2.3.5 Dinamička nosivost - $C_d$ [N]

Dinamička nosivost predstavlja onu vrednost aksijalnog centralno delujućeg opterećenja nepromenljive veličine i smera, pri kome navojno vreteno postiže nominalni vek trajanja od  $1 \cdot 10^6$  obrtaja.

$$C_d = C_{S_k} \left[ \frac{1}{K_1^{2,353}} + \left( \frac{C_{S_1}}{C_M} \right)^{10^{4,35}} \right] \cdot i^{0,7} [N] \quad (11), \text{ GDE JE}$$

$$C_{S_k} = 9,32 \cdot 10 \left( 1 - \frac{\sin \beta}{3} \right) \cdot \frac{\delta^{0,3} (1 - \delta^2)^{1,39}}{(1 + \delta^2)^{1,13}} \left[ \frac{1}{1 - \frac{d}{2R_s}} \right]^{0,41};$$

$$K_1 = \frac{d_n \sqrt{h}}{i} - 1; \quad \frac{C_{S_1}}{C_M} = K_1^{1,13} \cdot \left( \frac{1 - \delta^2}{1 + \delta^2} \right)^{1,723} \left[ \frac{2 - \frac{d}{R_m}}{2 - \frac{d}{R_s}} \right]^{0,41}; \quad \delta = \frac{d}{d_n} \cos \beta$$

### 2.3.6 Kritična sila izvijanja - Fkr [N]

Pri opterećenju vretena aksijalnom silom može doći do izvijanja vretena i pre nego što sila dostigne vrednost statičke nosivosti. Ako je Fkr vrednost aksijalne sile pri kojoj počinje izvijanje vretena onda je dozvoljena sila spoljašnjeg opterećenja

$$F_{\text{doz}} = \frac{F_{kr}}{\gamma} = 0,2 F_{kr} \quad (12)$$

Kritična sila izvijanja se računa prema poznatim izrazima iz izvijanja, a u zavisnosti od načina uležištenja navojnog vretena.

### 2.3.7 Vek trajanja - Th [h]

Nomilani vek trajanja je onaj vek rada koji postiže navojno vreteno sa kugličnim vretenom bez oštećenja od 90%.

Definiše se prvo vek trajanja u obrtanjima kao

$T = \left( \frac{C_d}{F_m} \right)^3 \cdot 10^6$  [obrtaja] (13), gde je  $F_m$  - srednje radno opterećenje koje pri promenljivom opterećenju i broju obrtaja iznosi

$$F_m = \left( F_1^3 \frac{M_1}{M_m} \frac{z_1}{100} + F_2^3 \frac{M_2}{M_m} \frac{z_2}{100} + F_3^3 \frac{M_3}{M_m} \frac{z_3}{100} + \dots \right)^{1/3}$$

Vek trajanja u časovima iznosi

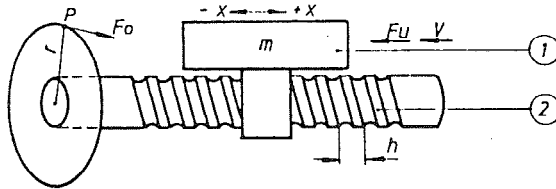
$$T_h = \frac{T}{n_m \cdot 60} [h] \quad (14), \text{ GDE JE } n_m - \text{Srednji radni broj obrtaja navojnog vretena.}$$

## 3. DIMENZIONISANJE POGONSKOG MOTORA ZA NAVOJNO VREteno SA KUGLIČNIM VODJENJEM

Neka se za pokretanje radnog stola i mašine alatke po x-osi koristi navojno vreteno sa kugličnim vodjenjem 2, kao što je prikazano na Sl. 4; onda je za zaokretanje vretena za jedan obrt ( $360^\circ$  ili  $2\pi$  [rad]) potrebno da, na primer, na obimu kruga radijusa  $M$  deluje obimna sila  $F_0$  pa je onda

$$F_0 \cdot 2\pi M = \frac{F_u l}{\eta}$$

gde je:  $\eta$  - stepen iskorišćenja prenosnika ( $\eta \approx 0,9$ )



Sl. 4 Skica pogona pomoćnog kretanja kod mašina alatki

Kako je  $F_0 \cdot l = M$  - potrebnom obrtnom momentu, onda je

$$M = \frac{F_u \cdot h}{2\pi \eta}$$

Obzirom da je ukupna aksijalna sila jednaka zbiru sile trenja  $F_t$  (koja se suprotstavlja kretanju radnog stola) i odgovarajućeg otpora rezanja (najčešće  $F_3$  - otpor pomoćnog kretanja) to je

$$F_u = F_t + F_3 = mg\mu_u + F_3 \quad ; \quad \text{gde je}$$

$m$  [kg] - masa svih linearno pokretnih delova;  $g$  - ubrzanje zemljine teže;  $\mu_u$  - ekvivalentni ukupni koeficijent trenja ( $\mu_u \approx 0,15$ ). Tako konačni izraz za proračun potrebnog momenta na navojnom momentu (vratilu motora) GLASI

$$M = \frac{(F_t + F_3) \cdot l}{2\pi \eta} = \frac{mg\mu_u + F_3}{2\pi \eta} \quad (14)$$

Kako je pogonski motor spojen najčešće direktno (spojnicom) sa navojnim vretenom, uzima se da je potreban obrtni moment pogonskog motora  $M_m \geq M$  (15).

Potreban broj obrtaja pogonskog motora iznosi

$$n_m = \frac{V}{l} \quad [\text{min}^{-1}] \quad (16) \quad \text{gde je}$$

$V$  [mm/min] - željena brzina kretanja suporta (navrtke).

#### 4. ZAKLJUČAK

Obzirom na nedostatak domaće literature iz ove oblasti, nadam se da će ovaj rad pomoći čitaocima da delimično sagledaju problematike primene i izbora zavoynih vretena sa kugličnim vodjenjem.

## REFERENCE

- [1] Nikšić P. : Preliminarna ispitivanja triboloških karakteristika navojnih vretena sa kugličnim vodjenjem, Magistarski rad, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1987.god.
- [2] Ječmenica R. Nikšić P. : Zavojna vretena sa kugličnim vodjenjem - elementi savremenih obradnih sistema, Zbornik radova Jurema 33, svezak 4, Zagreb, 1988.god.
- [3] Urošević S. : Proizvodno mašinstvo - II deo, numeričko upravljanje mašinama, alatkama, Naučna knjiga, Beograd, 1988.god.
- [4] Ivković B. : Osnovi tribologije u industriji prerade metala, Građevinska knjiga, Beograd, 1983.god.
- [5] Ječmenica R. : Mašine alatke, Tehnički fakultet, Čačak, 1976.god.
- [6] Prospektni materijal proizvođača navojnih vretena sa kugličnim vodjenjem: ALME; MANNESMANN; ITI; CAMFIOR; JCS; WARNER ELECTRIC; FRA; UNIS.

P. Nikšić

"Bases for calculation of ball driven spiral spindles as drive system of a uxillary novement of machine tools at the higher technological level".

## S u m m a r y

The study contains the summary of relevant constructional and operational data on ball driven spiral spindles, and the metodologu of the calculation, in order to develop the bases for selection of optimal drive system for the assigned production task.





М. Калајџић\*

### НЕЛИНЕАРНА АНАЛИЗА АКСИЈАЛНИХ СТРУКТУРА

#### 1. У в о д

Аксијалне структуре су елементи и компоненте носећих структура инжењерских конструкција код којих је мера у једном координатном правцу виеструко већа у односу на друга два. Као типичан представник аксијалних структура код машинских конструкција се, поред осталих, појављују и главна вретена машина алатки, а у основи сва вретена и осовине. Главна вретена машина алатки посебан су објекат истраживања због пресудног утицаја на укупан квалитет машине.

За аксијалне структуре, посебно за главна вретена машина алатки, раније је развијен software под називом VRETENO за идентификацију статичког и динамичког понашања [1]. Касније је овај software усавршен [2], а у основи базира на коришћењу метода коначних елемената (МКЕ) и модалној анализи. Притом је за разлику од класичних, познатих прорачуна узета у обзир еластичност ослонаца, односно лежајева.

Крутост лежајева представља посебан проблем у усвајању система модела за прорачун и анализу аксијалних структура коришћењем МКЕ (на пример: реална конструкција, симплифициран модел конструкције, дискретизован модел, математички модел, итд [8]). Усвајање и прорачун варијантних крутости, коришћење појединих експерименталних резултата, једва да у том погледу, историјски посматрано, представља значајно побољшање у односу на круте ослонаце. Једино, врло значајно побољшање односи се на примену МКЕ и модалне анализе, што је довело, уз коришћење рачунара са развијеним software-ом, до добијања поузданијих резултата, па чак и одређене оптимизације конструкционих параметара. С друге стране, експериментални резултатан показују да на понашање главних вретена машина алатки пресудан утицај има улежиштење и квалитет котрљајних лежајева.

Сваки механички систем је у одређеној мери нелинеаран, тј. постоји нелинеарна зависност између сила и помераја при статичком деформисању, односно између сила и помераја и/или сила и брзина у динамичким условима. У већини случајева ове нелинеарности се могу занемарити, па се идентификација понашања система врши линеарним теоријама уз коришћење МКЕ и модалне анализе. Међутим, крутост котрљајних лежајева је у знатној мери нелинеарна, па се без већих апроксимација не може занемарити.

\* Др Милисав Калајџић, ред. професор Машинског факултета Универзитета у Београду, Београд, 27. марта 80

За анализу неллинеарних система постоји читав низ аналитичких метода (метод пертурбације, Ritz-Галеркинов метод, метод осредњавања и др.). Међутим, све аналитичке методе могу се применити на системе са једним или два степена слободe. Ди скретизовани модели носећих структура машинских конструкција имају релативно велики број степени слободe. Број степени слободe модела за аксијалне структуре је реда неколико десетина, а значајну неллинеарност имају само ослонци. На Токијском универзитету је развијен пакет ВВА (The Building Block Approach) за анализу и прорачун линеарних система. ВВА са унетим неллинеарним елементима прераста у пакет NLBBA (The Nonlinear Building Block Approach), чија је примена описана на примеру динамичке анализе једног вретена на два ослонца са двоструко линеарном крутошћу [5]. Користећи ову идеју, у VRE-TENO су унети неллинеарни ослонци, тако да је формиран пакет NELINA за идентификацију статичког и динамичког понашања аксијалних структура са неллинеарном крутошћу ослонца. Могућа је анализа и структура које су статички неодређене (број ослонаца већи од два), са произвољним карактером неллинеарности, који се за сваки ослонац унапред задаје.

## 2. Неллинеарност котрљајних лежајева

Зависност између радијалне силе и радијалног помераја код котрљајних лежајева је неллинеарна. Ова неллинеарност се може одредити експериментално за сваки конкретан тип лежаја, или у фази прорачуна узети препоруке произвођача. Тако се према DIN стандарду крутост лежајева може одредити према

- за куглицне лежајеве

$$C_y = 1190(i.n)^{2/3} D_k^{1/3} F_y^{1/3} \quad [N/mm]$$

- за ваљчaste лежајеве

$$C_y = 3401(i.n)^{0,9} L_a^{0,8} F_y^{0,1} \quad [N/mm]$$

где су  $i$ -број редова котрљајних тела,  $n$ -број котрљајних тела у реду,  $F$  [N]-радијална сила,  $D_k$  [mm]-пречник куглице и  $L_a$  [mm]-активна дужина ваљчића.

У опытем случају се се за крутост ослонца аксијалних структура може писати

$$C_y = C_0 F_y^{1/q} \quad (1)$$

док се коришћењем релације  $C_y = \partial F_y / \partial y$  интегралeњем лако добија

$$F_y = C_1 y^p; C_1 = (C_0 / p)^p; p = q / (q - 1) \quad (2)$$

Ако се зависност силе и помераја представи у облику

$$F_y(y) = a_1 y + a_2 y^3 \quad (3)$$

тада је крутост

$$C_y(y) = a_1 y + 3a_2 y^2 \quad (4)$$

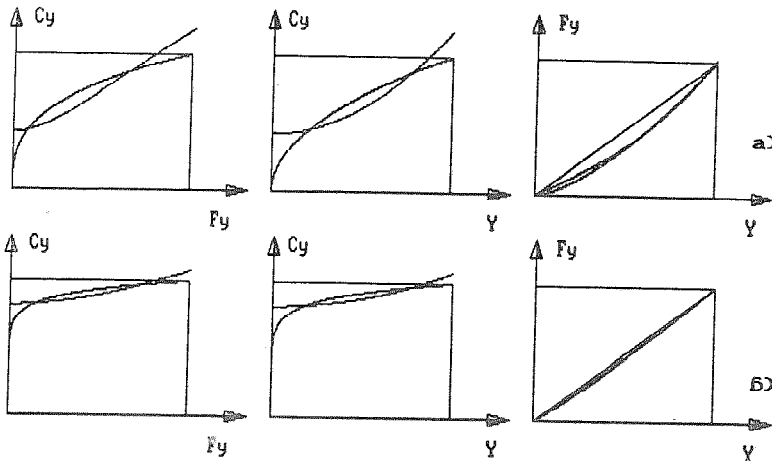
Коефицијенти  $a_1$  и  $a_2$  одређују се из система једначина

$$\partial I(y)/\partial a_1 = 0; \quad \partial I(y)/\partial a_2 = 0,$$

а функција  $I(y)$  одређује се слично као за метод директене линеаризације [3], односно

$$I(y) = \int_0^a 2fC_1 y^{\mu} - a_1 y - a_2 y^3 dy \quad (5)$$

где је  $a$  - померај, односно амплитуда помераја.



Сл.1-Карактеристике котрлајних лежајева  
а) кугличних и б) ваљчастих

На сл.1 дате су карактеристике кугличних и ваљчастих лежајева. Јасно се види да је нелинеарност кугличних лежајева већа од нелинеарности ваљчастих. Криве  $F_y$ - $y$  одређене преко једначина (2) и (3) за оба случаја се практично поклапају, док се криве  $C_y$ - $F_y$  и  $C_y$ - $y$  добијене преко једначина (1) и (2) - (сплазе из координатних почетака) и одговарајуће криве добијене помоћу једначине (4), на први поглед знатно разликују. Међутим, савремене машине алатке се пре свега израђују са одређеним преднапрезањем лежајева (значи без зазора), тако да силе  $F = 0 \mp \epsilon$  немају практичног смисла. Овде треба још напоменути да једначине  $C_y$  дају и карактер промене сопствене кружне фреквенце система. Ово је посебно значајно зато што се показује да са нелинеарношћу (1) сопствене кружне фреквенце система расту са повећањем оптерећења.

### 3. NELINA поступак

Основна статичка једначина за дискретизован модел коначним елементима са ослонцима који имају линеарну или нелинеарну крутост гласи



$$[N] = [K]^{-1}[M] \quad (10)$$

за коју се у пакету NELINA одређују сопствене вредности и сопствени вектори

$$\lambda_i = 1/\omega_{0i}^2; \mu(i,j); i,j = 1,2,\dots,n \quad (11)$$

где је  $n$  - број степени слободе система.

Користећи и резултате статичког прорачуна утврђује се зависност

$$\omega_{0i}^2 = b_0 + b_1 y_j^2 \quad (12)$$

где је потребно одржити ову зависност за  $i = 1, 2, \dots$  најмање 4 - 5 сопствених вредности, а  $j$  - представља карактеристичну тачку структуре.

Полазећи од развијеног поступка за одређивање фреквентних карактеристика линеарних система коришћењем главних нормалних координата система [6], то се за овај случај добија

$$[W(s,\omega)]_p^s = \sum_{r=1}^n \frac{\mu(s,r)\mu(p,r)}{[\omega_{0r}(y)]^2 - \omega^2 + 2j\zeta\omega_{0r}(y)\omega} \quad (13)$$

где су  $s, p$  - број координате одзива и побуде,  $j$  - имагинарна јединица,  $\zeta$  - модально пригушење и  $\omega$  - текућа кружна фреквенца.

Напомиње се да амплитудно-фреквентна карактеристика система, представља динамичку попустљивост, односно

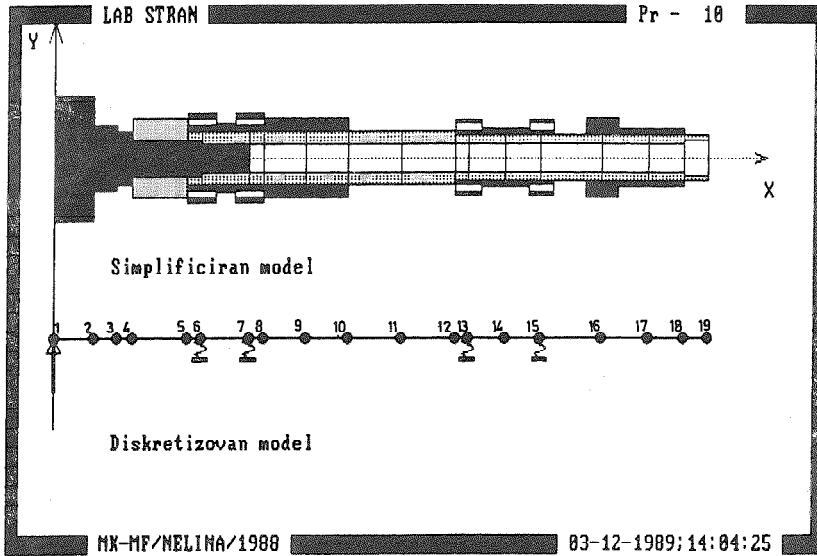
$$\frac{1}{C_d} = \left| \frac{V^s(j\omega)}{F^p(j\omega)} \right| = \sqrt{(\operatorname{Re}W)^2 + (\operatorname{Im}W)^2} \quad (14)$$

Помоћу пакета NELINA одређују се фреквентне карактеристике за жељени фреквентни опсег, а у једном итерацијском поступку због нелинеарности сопствених кружних фреквенци. Поред тога, издвајају се још резонантне фреквенце и одговарајуће попустљивости.

### 3. ПРИМЕР ПРИМЕНЕ

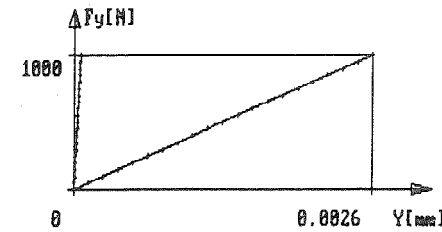
Ради илустрације нелинеарне анализе узето је једно главно вретено јединице за глодање које има четири котрлајна валчаста лежаја. На сл.2 су приказани симплифициран и дискретизован модел овог вретена са алатом. Дискретизација је извршена са 18 КЕ, односно 19 чворних тачака. У чворне тачке 6, 7 и 13, 15 постављени су нелинеарни ослоњци. Сагласно једн. (1), добијено је за ослоњце 6 и 7, односно ослоњце 13 и 15

$$C_{0(6,7)} = 2,96 \cdot 10^5; \quad C_{0(13,15)} = 2,28 \cdot 10^5; \quad q = 10.$$



Сл.2-Симплифициран и дискретизован модел вретена

Укупна дужина вретена без алата износи  $L = 360$  mm, пречник чеоног дела износи 80 mm, пречници улежишта су 55 mm, односно 45 mm, док је унутрашњи пречник 30 mm. Као алат је узета чеона глодачка глава пречника 120 mm.



Сл.3-Статичка карактеристика

Статички прорачун је извршен за оптерећење вретена попречном силом која делује у чворној тачки 1. у опсегу  $F=50-1000$  N, а статичка карактеристика за чворну тачку 1. и 31. приказана је на сл.3, где се јасно види да вретено поседује врло велику статичку крутост, док је нелинеарност незнатна, јер је коначно за чворну тачку 1. добијено

$$F_y = 387680 \cdot Y_1 + 117214 \cdot Y_1^3 \quad (15)$$

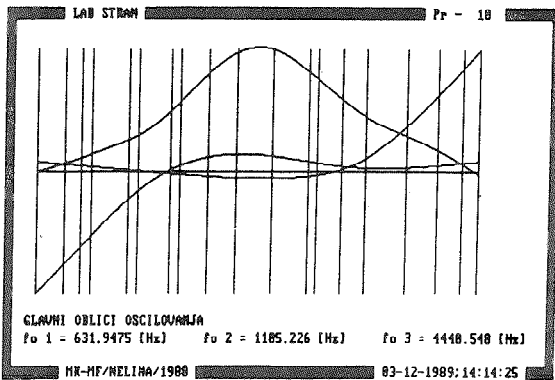
Динамички прорачун се изводи у две етапе. Прво се одређују сопствене фреквенце и главни облици осциловања, а потом фреквентне карактеристике. Тако је за прве две сопствене кружне фреквенце добијено

$$\begin{aligned} \omega_{01}^2 &= 1,549 \cdot 10^7 + 2,379 \cdot 10^{11} Y_1^2 \\ \omega_{02}^2 &= 4,786 \cdot 10^7 + 1,083 \cdot 10^{12} Y_1^2 \end{aligned} \quad (16)$$

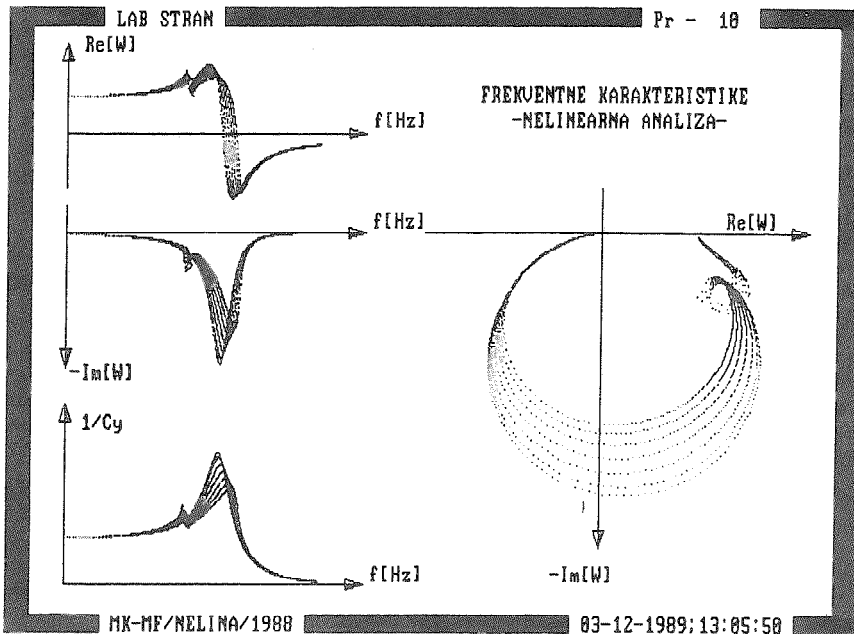
На сл.4 су дат прва три главна облика осциловања за  $F = 1000$  N, а на сл.5 фреквентне карактеристике за фреквентни опсег од 0-4250 Hz, и то за одзив и побуду у чворној тачки 1

система. Са порастом побудне силе резонантна фреквенца (2-ог главног облика осциловања - мода) расте, а попустљивост система опада.

У таблица 1. дати су упоредни карактеристични резултати извршене нелинеарне анализе (сопствена и резонантна фреквенца и попустљивост) у компарацији са линеаризованом анализом, где су сопствене фреквенце константне, тј. узети су само први чланови из једначина облика (15).



Сл. 4-Главни облици осциловања вретена



Сл. 5-Фреквентне карактеристике главног вретена



Таблица 1.

FEM)	50	200	500	1000
Линеаризована анализа				
$f_{oz}$ [Hz]	1092	1092	1092	1092
$f_{r2}$ [Hz]	1060	1060	1080	1130
$(1/C_d) \cdot 10^{-6}$ [mm/N]	7,344	7,343	7,342	7,339
Нелинеарна анализа				
$f_{oz}$ [Hz]	1092	1095	1110	1169
$f_{r2}$ [Hz]	1060	1080	1160	1135
$(1/C_d) \cdot 10^{-6}$ [mm/N]	7,326	7,083	6,283	5,337

#### 4. Закључци

На основу наведеног и добијених резултата следе кратки закључци:

1. Нелинеарност котлајних лежајева има знатног утицаја, у основи на динамичко понашање аксијалних структура;
2. NELINA омогућује релну анализу понашања аксијалних структура уз упоређење кугличних и ваљчастих лежајева;
3. Сигурно да се поузданији резултати могу добити уношењем у анализу експерименталних резултата за стварне крутости одређених типова лежајева, што предложени метод и развијен пакет омогућује.

#### Р е ф е р е н ц е

- [1] М. Калајџић, Метод коначних елемената у прорачуну аксијалних структура, Техника (Машинство), Београд, 23(1974), ст. 667
- [2] М. Калајџић, Т. Манески, Software за идентификацију понашања вретена ем., Машински факултет, ППК 10-61, Београд (1988)
- [3] --- Математически методи анализа нелинеарних колебатељних систем., Гл. II, Вибрации у техници, том 2, Мистр., Москва, 1969
- [4] R. Snoeys, i dr., Nonlinear Dynamic Behaviour of Typical Mechanical Structures, Ann CIRP, Vol. 34, No 1, 1985, pp 309
- [5] K. Watanabe, H. Sato, Development of Nonlinear Building Block Approach, Journal of Vibration, Acoustics, Stress, & Reliab. in Design, Jan. (1988), Vol. 110, pp 36
- [6] М. Калајџић, Метод коначних елемената, ИАМА, Београд (1978)
- [7] М. Калајџић, МЕКЕЛБА, Грађ. књига, Београд (1988)

M. Kalajdzic

#### NONLINEAR ANALYSIS OF AXIAL STRUCTURES

#### S u m m a r y

The procedure for static and dynamic behaviour analysis is given for main spindles of machine tools as typical representatives of axial structures. Developed programme package - NELINA - is based on FEM with the supports (spindle bearings) characterized by nonlinear stiffness. Static nonlinear analysis gives an estimate of static elastic line for different transversal loads. Dynamic nonlinear analysis include complete modal analysis with determining of frequency response.

R. Ječmenica, D. Petković \*

ANALIZA UTICAJA ZAVOJINIH VRETENA SA KUGLIČNIM  
VOĐENJEM NA EFEKTIVNOST OBRADNOG SISTEMA

1. UVOD

Proizvodnja i razvoj mašina alatki nove generacije neza-  
misliivi su bez vitalnih komponenti-zavojna vretena sa kugličnim  
vodjenjem. Opšte je poznata činjenica da za pretvaranje kružnog u  
pravolinijsko kretanje, i obrnuto, bar kada se radi o mašinama al-  
atkama, sklop navrtka-vreteno sa trapeznim navojem bio je nezame-  
nljiv. Nedostaci ovih kliznih mehanizama, pored ostalog, su i poja-  
ve neizbežno velikog trenja na kontaktnim površinama što ima za  
posledicu veliko zagrevanje a samim tim i habanje kontaktnih po-  
vršina. Posledice ovih pojava su velike deformacije vretena, pove-  
ćanje aksijalnog zazora i smanjenje stepena iskorišćenja, o čemu  
je i namera autora da u ovom radu izlože rezultate svojih istra-  
živanja. Usavršavanja koja su išla u pravcu eliminisanja navede-  
nih negativnih pojava svodila su se na konstruktivno-tehnološke  
izmene oblika kontaktnih površina, povećanju kvaliteta obrade, pr-  
imeni specijalnih vrsta materijala za navrtku i vreteno, primeni  
specijalnih sredstava za hladjenje i podmazivanje, primeni speci-  
jalnih postupaka površinskog otvrdnjavanja itd., nisu dala zadovo-  
ljavajuće rezultate. Posebno se ovo odnosilo na povećanje efekti-  
vnosti obradnog sistema posmatrano preko povećanje stepena isko-  
rišćenja tribo para kao i neveliku inertnost sklopa navrtka vr-  
eteno respektujući zahteve koji se postavljaju pred mašine ala-  
tke nove generacije. Objektivno posmatrajući, kvalitativno viši

---

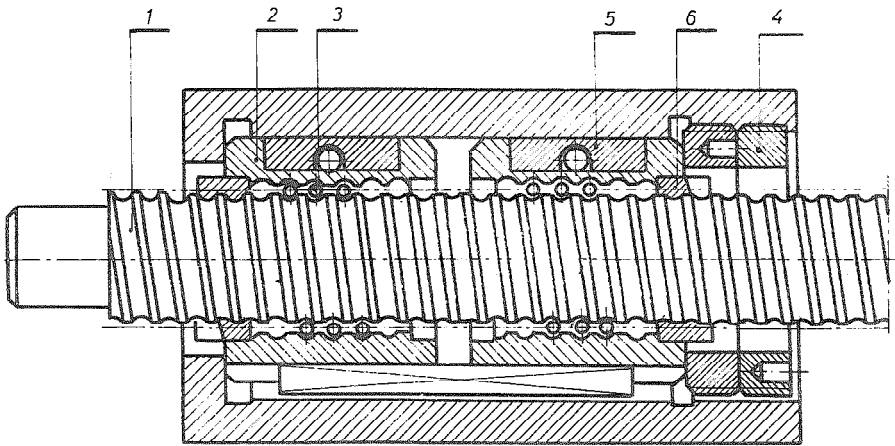
+/ dr Ratomir M. Ječmenica, dipl. maš. ing., docent, Tehnički  
fakultet Čačak, ul. Borisa Kidriča 65,

Dragoje Petković, dipl. ing., konstruktor, Fabrika reznog  
alata, Čačak, Hajduk Veljkova 80

nivo u razvoju ove vrste komponenata mašina alatki nove generacije postignut je uvođenjem primenu zavojnih vretena sa kugličnim vođenjem, o čemu će u ovom radu biti reči.

## 2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE PREOSNIKA

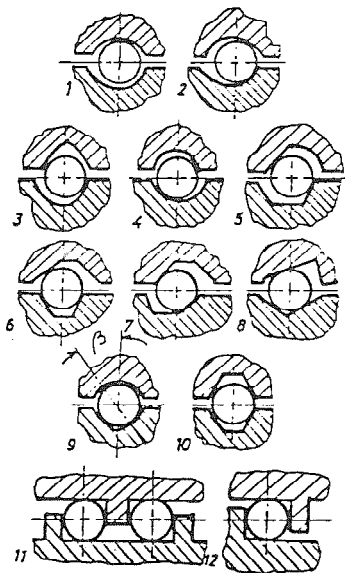
Prenosnik, zavojno vreteno sa kugličnim vođenjem, prikazan na slici 1, sačinjavaju sledeći elementi:



Sl.1 Detalj sklopa navojno vreteno sa kugličnim vođenjem  
1-Zavojno vreteno 2-Dvodielna navrtka 3-Kuglice 4-Mehanizam za regulaciju zazora 5-Mehanizam za recirkulaciju kuglica 6-Zaptivka

Osnovnu funkciju prenosa kretanja ostvaruje zavojno vreteno i navrtka sa kuglicama kao medjuelementima. Na ovaj način se, obrtno kretanje zavojnog vretena pretvara u pravolinijsko-aksijalno kretanje navrtke pod dejstvom uvedenog obrtnog momenta na zavojnom vretenu ili pak aksijalno kretanje navrtke pretvara se u rotaciono kretanje vretena pod dejstvom uvedene aksijalne sile na navrtku. U svakom prenosniku ovakve konstrukcije neophodno je projektovati i mehanizme za regulisanje zazora. Ovaj mehanizam omogućava ostvarivanje nultog zazora pri postavljanju prenosnika kao i smanjenje ili regulaciju zazora koji je nastao kao posledica neizbežnog trenja i habanja na kontaktnim površinama. Takođe je neophodan i mehanizam koji će omogućiti efikasnu recirkulaciju kuglica (povratno kretanje) pri kretanju navrtke po zavojnom vretenu. Na kraju potreban je i mehanizam

za zaptivanje, odnosno za zaštitu od upliva mehaničkih nečistoća, prašine itd. Funkcionalnost odnosno kvalitet prenosnika zavojno vreteno sa kugličnim vodjenjem vezana je za kvalitet i tačnost izrade profila navoja, kotrljajnih staza, na zavojnom vretenu i navrtki kao i za toleranciju koraka navoja na radnoj dužini vretena. Na slici br.2 prikazani su neki mogući profili navoja na vretenu i navrtki:



Sl.2 Konstrukтивne izvedbe profila navoja na zavojnim vretenima i navrtkama

Funkcionalnost, odnosno efektivnost, prenosnika sa kugličnim vodjenjem je pored ranije navedenih ograničenja i u strogoj korelaciji sa konstruktivnom izvedbom profila navoja čiji su profili prikazani na slici 2. Optimiranje navedenih profila, predstavlja posebnu problematiku u projektovanju i eksploataciji ove vrste prenosnika pa se ovde zbog ograničenog prostora ne može detaljnije analizirati. Od dvanaest, dosada najčešće zastupljenih profila oblika navoja, profili pod brojevima 1 i 9 pokazali su najbolje osobine odnosno postigli najbolji stepen iskorišćenja, što je i predmet analize u ovom radu.

Na povećanje stepena iskorišćenja prenosnika a time i efektivnosti obradnog sistema, pored izbora najoptimalnijeg profila navoja navrtke i vretena, veoma bitno je i konstruktivno rešenje mehanizma za povraćanje kuglice odnosno recirkulacionog sistema. Kako prenosnik treba da radi u oba smera obrtanja to i mehanizam za recirkulaciju mora da omogući ravnomeran "protok" kuglica u oba smera, u protivnom stepen iskorišćenja prenosnika je nizak a efektivnost obradnog sistema mala. Bez detaljnije analize, ovde treba napomenuti da se u savremenim konstrukcijama danas uglavnom koriste četiri mehanizma za recirkulaciju:

-preko umetnute cevi za odvodjenje, koja premošćuje više koraka navoja,

-preko kanala izradjenog u navrtki čija je osa paralelna sa osom vretena. Ovaj kanal takodje premošćuje više koraka,

-preko spojnice koja se nalazi izmedju svakog koraka. Ove spojnice su umetnute u navrtku i postavljaju se pod uglom od  $120^\circ$  a broj istih je u funkciji broja nosećih koraka navoja u navrtki, i

-preko kanala zavojnog oblika koji je izradjen u spoljnom zidu tela navrtke na koji se sa čela nadovezuju umetnuti cevni elementi.

Navedena četiri konstruktivna tipa prenosnika sa sistemom za recirkulaciju, sistematizovani su preko faktora  $k$  u tabeli 1:

Tabela: 1

$d_n$ (mm)	Vrednost faktora „k“			
	Konstruktivni oblik			
	I	II	III	IV
20	2,10	1,75	1,67	1,70
30	1,66	1,60	1,40	1,47
40	1,65	1,50	1,33	1,37
50	1,54	1,50	1,25	1,30
60	1,51	1,40	1,23	1,30

Faktorom "k" označen je odnos nominalnog prečnika vretena  $d_n$  i spoljašnjeg prečnika navrtke. Analizoma tabele 1 uočavaju se

sledeće karakteristike prenosnika:

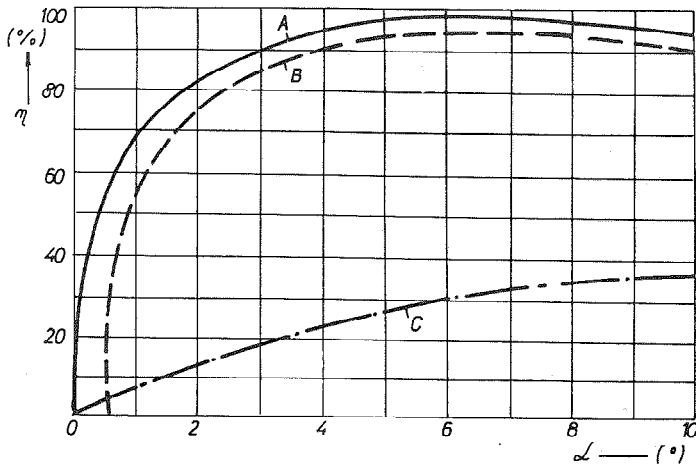
-u pogledu radijalnih dimenzija navrtki konstrukcija pod brojem III je najoptimalnija, zbog direktnog odvodjenja kuglica,

-u pogledu dužina, aksijalnih dimenzija, konstrukcije I, II i IV su slične. Broj nosećih kuglica je veći nego u prethodnom slučaju,

-što se tiče sposobnosti prenosa opterećenja za isti broj kuglica u prenosniku najpovoljniji je konstruktivni oblik pod brojem III što predpostavlja da ako su kvalitetno uradjene skretnice čime je obezbedjeno ravnomerno povraćanje kuglica u prenosni odnos, i optimalno rešenje prenosnika odnosno prenosnik sa najvećim stepenom iskorišćenja.

### 3. REZULTATI ISPTIVANJA

Upoređivanjem karakteristika kliznih pogonskih prenosnika, trapezno mavojno vreteno, i i kotrljajnih, navojno vreteno sa kugličnim vodjenjem uočavaju se i posebno naglašavaju sledeće prednosti kotrljajnih prenosnika:



Sl.3 Odnosi stepena iskorišćenja za prenosnike različitih konstruktivnih rešenja

-nizak koeficijent trenja kotrljanja dovodi do smanjenja energetske gubitaka što opet rezultira veoma visokim

stepenom iskorišćenja ovih prenosnika,

-mogućnost potpunog eliminisanja zazora u prenosniku i ostvarivanje zadora-negativnog zazora, koji obezbeđuje preciznost pomeranja navrtke duž navojnog vretena, čime se obezbeđuje povećana tačnost pozicioniranja i aksijalna krutost sistema a sve ovo direktno utiče na povećanu ukupnu efektivnost obradnog sistema,

-usled potpune nezavisnosti sile trenja u prenosniku od brzine kretanja postiže se daleko veći dijapazon brzina kretanja brzih hodova, što proširuje polje primene i povećava proizvodnost čime direktno povećava i efektivnost sistema,

-smanjeno zagrevanje prenosnika, usled smanjenog trenja, utiče na smanjenje dilatacija navojnog vretena, ravnomernost kretanja (bez stick slip pojava) i povećan vek trajanja prenosnika i

-eliminirani zazori, smanjene dilatacije i ravnomernost kretanja uticali su i na povećanje mehaničke krutosti celog pogonskog sistema a time i na njegovu efikasnost.

Na slici br.3 krive A, B i C imaju sledeća značenja:

Kriva A: stepen iskorišćenja navojnih vretena sa kugličnim vodjenjem, kod kojih se rotaciono kretanje pretvara u aksijalno,

Kriva B: stepen iskorišćenja navojnih vretena sa kugličnim vodjenjem kod kojih se aksijalno pogonsko kretanje pretvara u rotaciono i

Kriva C: stepen iskorišćenja trapezних navojnih vretena.

#### 4. ZAKLJUČAK

Pogonski mehanizmi sa zavrtnjima za pretvaranje obrnog u pravolinijsko kretanje i obrnuto pripadaju prošlosti, bar kada se radi o mašinama alatkama. Visoke temperature, velika habanja i veliki gubici svih vidova energije uticali su na smanjenje stepena iskorišćenja prenosnika čime su direktno uticali i na snižavanje efektivnosti obradnog sistema, što je ovim radom i trebalo dokazati. Zbog ograničenog prostora autori nisu prezentirali rezultate kompletnih istraživanja na ovom planu pa se zainteresovani pozivaju na direktne kontakte sa autorima.

## References

1. R. Jašmenica: Mašine i letke, Tehnički fakultet, Čačak, 1976. god.
2. D. Mikšić: Preliminarna ispitivanja zavojskih vretena sa kugličnim vođenjem, Magistarski rad, Mašinski fakultet, Kragujevac '83.
3. R. Jašmenica, D. Mikšić: Zvojska vretena sa kugličnim vođenjem - ispitivanja kvalitativnih karakteristika, ZNAM, 1986.,
4. D. Petković: Eksperimentalno merenje kvalitativnih karakteristika zavojskih vretena sa kuglicama, ZNAM 32, 1987.

R. Jašmenica, D. Petković

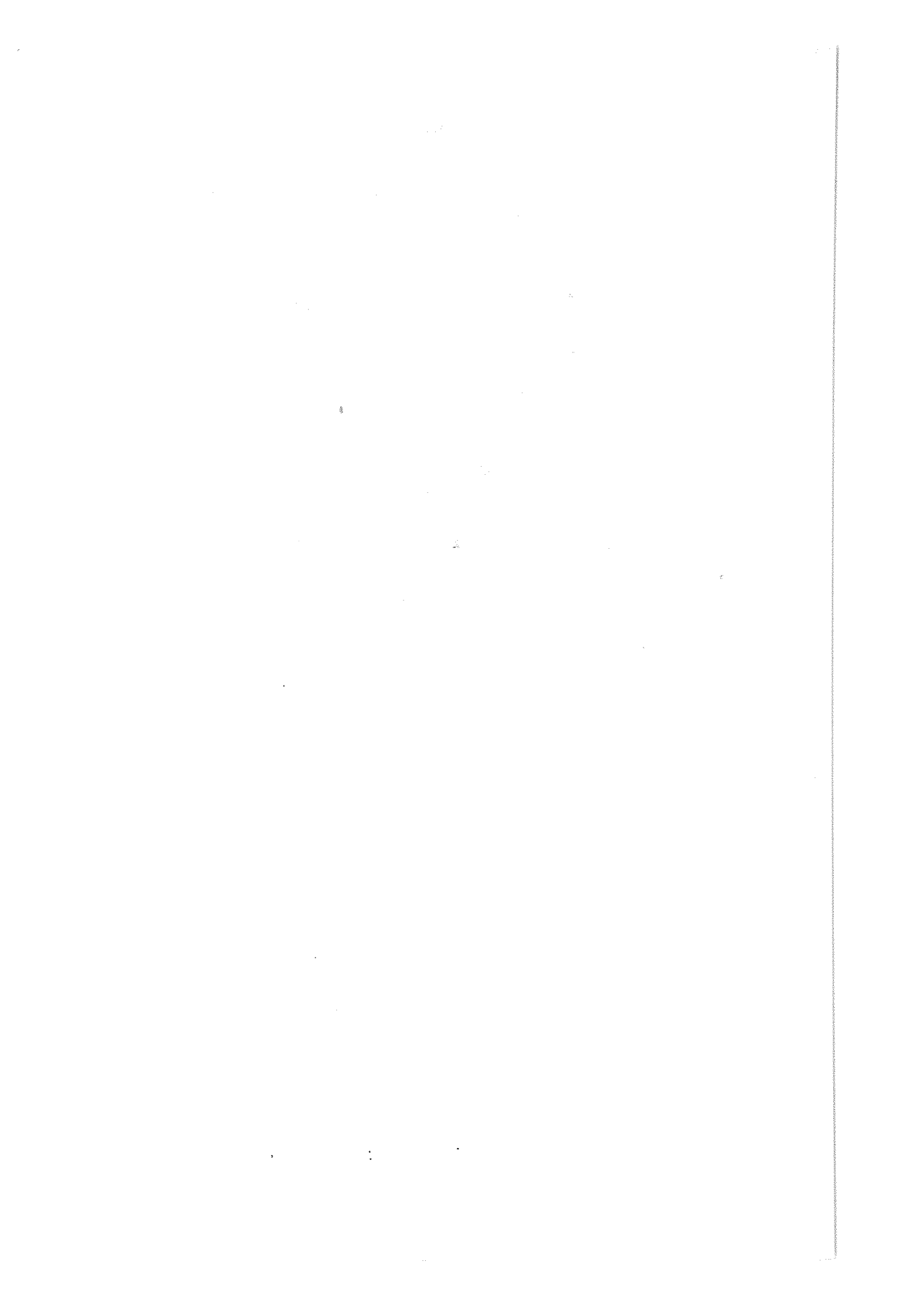
SPIRAL SPINDLES EFFECT ANALYSIS WITH ROLLING  
CONTROL ON EFFECTIVITY OF MACHINING SYSTEM

S u m m a r y

Spiral spindles with rolling control are becoming more common elements of modern machining systems. One spiral spindles effect analysis with rolling control on effectivity of machining system is given in this paper, as well as a technological of machining system.

This paper is based on investigations in real systems.





E. Detiček, E. Kiker, D. Lovrec, M. Kastrevc\*

NAČRTOVANJE REGULATORJA STANJ ELEKTRO-HIDRAVLIČNEGA SERVO  
SISTEMA Z UPORABO OPAZOVALNIKA REDUCIRANEGA REDA

1. UVOD

Elektrohidravlični servo sistemi imajo, zaradi dobrih dinamičnih lastnosti in visoke gostote energije, velik pomen pri gradnji sodobnih avtomatiziranih strežnih naprav, še posebej industrijskih robotov za večje nosilnosti in ekstremne pogoje obratovanja. Krmilno-regulacijski sistemi omenjenih naprav, ki temeljijo na konceptih sodobne teorije in uporabi mikro-elektronike, zagotavljajo visoko natančnost pozicioniranja in premostitev slabosti hidravlike kot so stisljivost fluidov, občutljivost na spremembe delovne temperature in druge.

V nalogi je podrobneje prikazan postopek načrtovanja regulacijskega sistema elektrohidravličnega servo mehanizma na osnovi tako imenovane regulacije po stanju z opazovalnikom. Tovrstna regulacija omogoča ob uporabi dodatnih povratnih zvez v obliki signalov stanja kot so pospeški, hitrosti, padci tlaka in podobno, bistveno izboljšanje dinamičnih lastnosti hidravličnih naprav. Zajemanje dodatnih veličin (spremenljivk stanj), ki opisujejo stanje sistema je merilno-tehnično zahtevno in drago ter pogosto tudi neizvedljivo. Novi koncepti regulacije temeljijo zato na uporabi opazovalnika. Opazovalnik, ki služi za rekonstrukcijo stanja sistema in deluje vzporedno z realnim sistemom, predstavlja sestavni del krmilno-regulacijskega vezja. Signali stanja so tako lahko dostopni in v vsakem trenutku na razpolago. Opazovalniki so v osnovi grajeni tako, da generirajo kompletno število signalov oziroma spremenljivk, ki opisujejo stanje sistema. Še pogosteje pa v praksi uporabljamo tako imenovane

---

\*/ Edvard Detiček, dipl. ing., dr. Edvard Kiker, izredni prof.,  
Darko Lovrec, dipl.ing., Mitja Kastrevc, dipl. ing., Tehniška fakulteta Maribor, VTO strojništvo, Smetanova 17, 62000 Maribor.

opazovalnike reduciranega reda, ki generirajo le tiste signale, ki so nemarljivi ali neugodni za odjemanje. Slednji omogočajo minimizacijo krmilno regulacijskega vezja in s tem zmanjšanje vpliva motenj, hkrati pa z zmanjšanjem števila elektronskih komponent prispevajo k pocenitvi naprave.

## 2. MATEMATIČNO OPIS SISTEMA

Na sliki 2.1. je shematično prikazan obravnavani elektrohidravlični servo sistem za pozicioniranje premočrtnih pomikov.

Dinamično obnašanje sistema v Lapalce-ovi obliki opisujejo naslednje enačbe:

$$y(s) = \frac{K_S U_{\dot{z}}(s) - \frac{B+R_L}{A^2} (1 + T_H s) F_D}{s (T^2 s^2 + 2DTs + 1)} \quad 2.1$$

$$C = \frac{4BA^2}{V_{TOT}} \quad 2.2 \quad T_H = \frac{V_{TOT}}{4B(R_L + B)} \quad 2.3$$

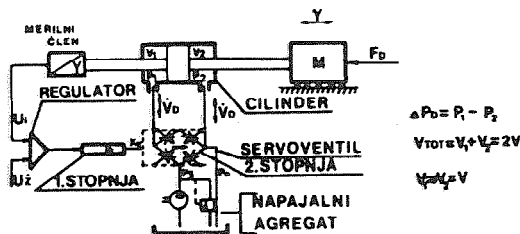
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{M}} = \frac{1}{T} \quad 2.4$$

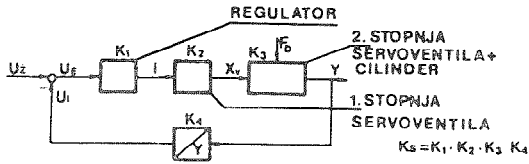
$$D = \frac{\sqrt{CM}}{2} \left[ \frac{1}{A^2} (R_L + B) + \frac{1}{CM} \left( R_V + \frac{4R_C}{\pi \beta} \right) \right] \quad 2.5$$

$$K_S = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \quad 2.6$$

Simboli in oznake v enačbah pomenijo:

y	- pomik batnice cil.	B	- koef. stisljiv. olja
M	- skupna masa	X <sub>V</sub>	- pomik bat. drsnika vent.
A	- presek bata	k <sub>1</sub>	- koef. izgub na cilindru
V <sub>TOT</sub>	- skupni volumen	$\bar{b}$	- koef. izgub na ventilu
R <sub>C</sub>	- koeficient suhega trenja	k <sub>1</sub>	- ojačanje P-regulatorja
R <sub>V</sub>	- koeficient viskoznega trenja	k <sub>2</sub>	- ojačanje I. stop. ven.
C	- hidravlična togost	k <sub>3</sub>	- hitrostno ojačanje
$\omega_0$	- lastna krož. frekvenca	k <sub>4</sub>	- ojačanje mer. člena
T <sub>H</sub>	- hidrav. časov. konstr.	k <sub>S</sub>	- skupno ojačanje
F <sub>D</sub>	- zunanja sila		





Slika 2.1.

V nadaljnji analizi zanemarimo vpliv zunanjih sil ( $F_D=0$ ). Prenosna funkcije odprte regulacijske zanke dobi obliko:

$$F(s) = \frac{K_s}{s \left( \frac{1}{\omega_o^2} s^2 + \frac{2D}{\omega_o} s + 1 \right)} \quad 2.7$$

Njej pripadajoča diferencialna enačba se glasi:

$$\ddot{y} + 2D\omega_o \dot{y} + \omega_o^2 y = K_s \omega_o^2 u \quad 2.8$$

Enačbi 2.7 in 2.8 služita kot osnova za razvoj matematičnega modela sistema v prostoru stanj, ki ga v splošnem zapišemo z naslednjima matričnima enačbama:

$$\dot{\underline{x}} = \underline{A} \underline{x} + \underline{B} u \quad 2.9$$

$$\underline{y} = \underline{C} \underline{x} \quad 2.10$$

$\underline{u}$  - vektor vhodnih veličin

$\underline{A}$  - sistem. matrika

$\underline{x}$  - vektor stanj

$\underline{B}$  - vhodna matrika

$\underline{y}$  - vektor izhodnih veličin

$\underline{C}$  - izhodna matrika

Spremenljivke stanj izberemo na osnovi enačbe 2.8:

$$x_1 = y; \quad x_2 = \dot{x}_1 = \dot{y}; \quad x_3 = \dot{x}_2 = \ddot{y} \quad 2.11$$

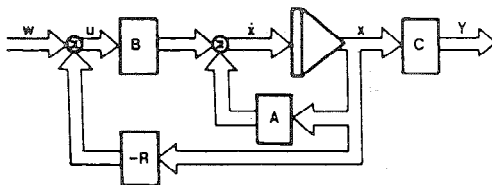
S tem dobimo matrike iz enačb 2.9 in 2.10 naslednjo obliko:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{2}{\omega_o} & -\frac{1}{\omega_o^2} \end{bmatrix} \quad 2.12 \quad \underline{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_s}{\omega_o^2} \end{bmatrix} \quad 2.13$$

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 2.14$$

### 3. REGULATOR STANJ

Regulator stanj predstavlja skupek faktorjev ojačanj signalov stanj v povratnih zvezah, kot je shematično prikazano na sl. 3.1.



Slika 3.1.

S sklenitvijo regulacijske zanke, ob upoštevanju vodilnih veličin  $\underline{w}(t)$ , prejeme vhodni vektor sistema naslednjo obliko:

$$\underline{u} = \underline{w} - R \underline{x} \quad 3.1$$

Enačba zaprte regulacijske zanke se sedaj glasi:

$$\dot{\underline{x}} = (A - BR) \underline{x} + B \underline{w} \quad 3.2$$

$$\underline{y} = C \underline{x} \quad 3.3$$

Dinamično obnašanje gornjega sistema določajo lastne vrednosti matrice  $|A - BR|$ . Ker sta matrici A in B pogojeni s fizikalnimi lastnostmi sistema, smemo poljubno izbrati le matrico R. Člene matrice R, ki predstavljajo faktorje ojačanj signalov stanj v povratnih zvezah, določimo v skladu z željenim dinamičnim obnašanjem. V ta namen izračunamo najprej karakteristično enačbo matrice  $|A - BR|$ . Ker obravnavamo sistem z enim vhom in enim izhodom lahko pišemo:

$$\det [sI - A + br^T] = s^3 + (2D\omega_0 + K_s \omega_0^2 r_3 + 1) + (\omega_0^2 + K_s \omega_0^2 r_2 + 1) + K_s \omega_0^2 r_1 = 0 \quad 3.4$$

Željeno karakteristično enačbo pa zapišemo v obliki:

$$s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 = 0 \quad 3.5$$

S primerjavo polinomskih koeficientov izračunamo člene matrice R:

$$r_1 = \frac{1}{K_s \omega_0^2} a_1 \quad 3.6$$

$$r_2 = \frac{1}{K_s \omega_0^2} (a_2 - \omega_0^2 - 1) \quad 3.7$$

$$r_3 = \frac{1}{K_s \omega_0^2} (a_3 - 1 - 2D\omega_0) \quad 3.8$$

Pri izbiri željene karakteristične enačbe upoštevamo zahtevo, da naj ima pozicionirni sistem, v pogledu dinamičnega obnašanja, apreiodičen karakter. Na obravnavanem praktičnem sistemu s parametroma  $\omega_0 = 229 \text{ S}^{-1}$  in  $D = 0,12$  smo z uvedbo dodatnih povratnih zvez povečali faktor dušenja na  $D = 0,6127$ . V primerjavi s P-regulatorjem smo pri tem 3-kratno povečali skupno ojačanje regula-



## 5. OPAZOVALNIK REDUCIRANEGA REDA

Po dosedaj prikazanem postopku načrtovanja opazovalnika je njegov red enak redu originalnega sistema. Izkaže se, da je mogoče red opazovalnika znižati v kolikor obstaja na sistemu določeno število neodvisno merljivih izhodov.

## 5.1. Opazovalnik reduciranega reda brez primerjave izhodov

Predpostavljamo, da na sistemu eksistira določeno število merljivih spremenljivk, ki jih ločimo od ostalih. Vektor stanj razpade tako na dva dela:

$$\underline{x} = \begin{bmatrix} \underline{x}_1 \\ \underline{x}_2 \end{bmatrix} \quad 5.1$$

Diferencialna enačba dela sistema z merljivimi spremenljivkami se sedaj glasi:

$$\dot{\underline{x}}_1 = A_{11} \underline{x}_1 + A_{12} \underline{x}_2 + B_1 \underline{u} \quad 5.2$$

Za nemerljivi del sistema pa dobimo:

$$\dot{\underline{x}}_2 = A_{21} \underline{x}_1 + A_{22} \underline{x}_2 + B_2 \underline{u} \quad 5.3$$

Izhodna enačba merljivega dela je:

$$\underline{y} = C_1 \underline{x}_1 \quad 5.4$$

Podobno kot prej izpeljemo enačbi opazovalnika za oba dela sistema:

$$\dot{\hat{\underline{x}}}_1 = A_{11} \hat{\underline{x}}_1 + A_{12} \hat{\underline{x}}_2 + B_1 \underline{u} + K_1 (y - C_1 \hat{\underline{x}}_1) \quad 5.5$$

$$\dot{\hat{\underline{x}}}_2 = A_{21} \hat{\underline{x}}_1 + A_{22} \hat{\underline{x}}_2 + B_2 \underline{u} + K_2 (y - C_1 \hat{\underline{x}}_1) \quad 5.6$$

Enačbo opazovalnika za  $\hat{\underline{x}}_1$  lahko rešimo direktno:

$$\underline{x}_1 = \hat{\underline{x}}_1 = C_1^{-1} \underline{y} \quad 5.7$$

Enačba opazovalnika za nemerljive spremenljivke pa se glasi:

$$\dot{\hat{\underline{x}}}_2 = A_{21} C_1^{-1} \underline{y} + A_{22} \hat{\underline{x}}_2 + B_2 \underline{u} \quad 5.8$$

Red enačbe 5.8 je enak številu nemerljivih spremenljivk, torej nižji od reda originalnega sistema. Dinamično obnašanje tako dobljenega opazovalnika določajo lastne vrednosti matrike  $A_{22}$ , ki predstavlja podmatriko systemske matrike  $A$ . Na slednjo načrtovalec nima vpliva saj je pogojena s fizikalnimi lastnostmi sistema. Opazovalnik je zadovoljiv v kolikor so systemsko pogojene lastne vrednosti matrike  $A_{22}$  primerne.

Za obravnavani EHS-sistem opisan z enačbami 2.12 2.13 2.14, pri katerem





men definiramo dinamični sistem za rekonstrukcijo nemerljivega dela  $\underline{x}_2$ , bolj splošno:

$$\dot{\hat{x}}_2 = L \underline{y} + z \quad 5.15$$

V gornji enačbi predstavlja  $z$  vektor stanja nekega dinamičnega sistema, katerega red se ujema s številom nemerljivih spremenljivk:

$$\dot{z} = F z + G \underline{y} + H \underline{u} \quad 5.16$$

Podobno kot prej razvijemo diferencialno enačbo napake nemerljivega dela:

$$\dot{\hat{e}}_2 = \dot{\hat{x}}_2 - \dot{x}_2 = F \hat{e}_2 + (A_{21} - LC_1 A_{11} - GC_1 + FLC_1) \underline{x}_1 + (A_{22} - LC_1 A_{12} - F) \hat{e}_2 + (B_2 - LC_1 B_1 - H) \underline{u} \quad 5.17$$

Iz pogoja naj se napaka asimptotično približuje k nič, neodvisno od  $\underline{x}_1$ ,  $\underline{x}_2$  in  $\underline{u}$ , izračunamo preostale neznane matrike:

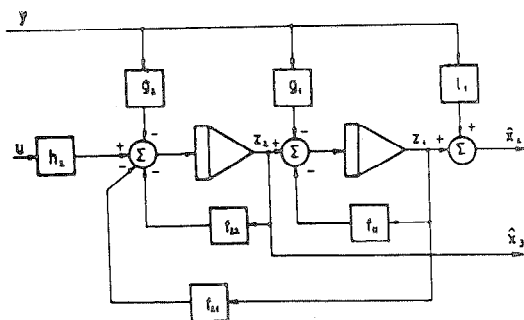
$$F = A_{22} - LC_1 A_{12} \quad 5.18$$

$$H = B_2 - LC_1 B_1 \quad 5.19$$

$$G = (A_{21} - LC_1 A_{11}) C_1^{-1} + FL \quad 5.20$$

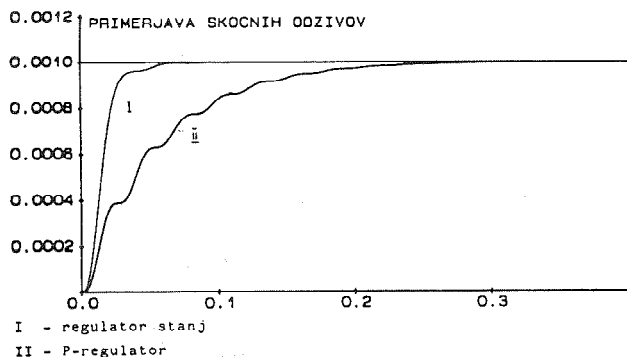
Izbira matrike  $L$  tako, da dobi  $F$  željene lastne vrednosti, predstavlja podoben problem kot izbira matrik  $K$  in  $A$  iz točke 4.

Pri tem ima  $A_{22}$  enako vlogo kot  $A$  in produkt  $C_1 A_{12}$  enako vlogo kot  $C_1$ . Blokovno shemo konstruiranega opazovalnika za obravnavani EHS-sistem prikazuje sl. 5.2.



Slika 5.2.

Vključevanje gornjega opazovalnika in regulatorja stanj v regulacijsko zanko EHS-sistema smo ponazorili z računalniško simulacijo dinamičnega obnašanja celotnega sistema. Rezultati so podani na sliki 5.3., v obliki časovnega odziva sistema na skočno spremembo vhodne veličine amplitude 0,001 m. Na sliki 5.3 je prikazano tudi izboljšanje dinamičnega obnašanja v primerjavi z P-regulatorjem.



Slika 5.3.

## 6. ZAKLJUČEK

Rezultati naloge kažejo, da je mogoče s pomočjo sodobno koncipiranih regulatorjev, bistveno izboljšati dinamično obnašanje elektro hidravličnih pogonov. Hidravlika, v kombinaciji z mikroelektroniko, postaja tako nepogrešljiva pri gradnji sodobnih strojev ter še posebej avtomatiziranih strežnih naprav za večje nosilnosti in težje pogoje obratovanja.

## Reference

- [1] Herbert E. Merrit: Hydraulic control systems John Wiley & Sons, Inc. New York, 1967.
- [2] Bernard Friedland: Control System Design McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, 1986.
- [3] David G. Luenbergere: An Introduction to Observers, IEEE Transaction on automatic control. Vol. AC-16 No 6. December 1971.

E. Detiček, E. Kiker, D. Lovrec, M. Kastrevc

THE DESIGN OF STATE SPACE CONTROLER FOR ELECTROHYDRAULIC SERVO SYSTEM USING REDUCED ORDER OBSERVER

## Summary

Our contribution presents the methods to design state variable feed back control with observer for electrohydraulic positioning servo drives. Special attention was paid to the design of reduced order observer. The results obtained through computer simulation, are presented in the form of diagrams and show the step response of the control loop.



M. Traboniača, M. Klieštan, M. Lekić, S. Matic<sup>1</sup>

MODERNIZACIJA MASINE ZA OBRADU DIJELOVA ARMATURA

U radu je prikazana modernizacija stare agregatne jedinice za bušenje putem ugradnje CNC upravljanja, glave za poprečno tokarenje, "UTRONIC 200/B", taktnog okretnog stola i drugih savremenih elemenata mašingradnje. Ovom modernizacijom dobila se masina sa boljim konstrukcionim i tehnološkim karakteristikama, osposobljena za operacije poprečnog i uzdužnog struganja, a po potrebi i bušenja viševretenom glavom koja se može instalirati umjesto glave "UTRONIC 200/B".

1. UVOD

Veoma dinamičan razvoj proizvodne opreme, zahtjevi tržišta za promjenama proizvoda, a u našim uslovima i nedostatak finansijskih sredstava za investicije razlog su velikom zaostajaniu u opremljenosti savremenim i produktivnim sredstvima rada. Ovakvo stanje stavlja inženjerski kadar pred veoma složen i važan zadatak - modernizaciju postojeće opreme u cilju veće produktivnosti proizvodnih sistema i brzog razvoja.

---

<sup>1</sup> ENERGOINVEST-Tvornica armatura Alipašićin Most

Biro za razvoj tehnologije

-Miroslav Traboniača, dipl.inž.maš, rukovodilac Biroa

-Mladen Klieštan, dipl.inž.maš, projektant

-Mario Lekić, dipl.inž.maš, projektant

-Sanimir Matic, dipl.inž.elekt, projektant

Tehnološki napredak na području novih materijala, alata, pneumatskih i hidrauličnih komponenti, elektronike računarske tehnike itd. i podjela rada u mašinsogradnji doveli su do pojave sve više elemenata i sklopova alatnih mašina na tržištu što omogućuje da se kroz održavanje mašina uvodi veći stepen automatizacije proizvodne opreme. Koncept kompjuterskog numeričkog upravljanja (CNC), uvodi sasvim novi pristup projektovanju koji podrazumijeva interdisciplinarnost, pa se u našim okvirima elektronika, računarska tehnika i informatika prvi put nalaze u ravnopravnom položaju sa klasičnim disciplinama mašinsogradnje.

Sve gore navedeno zahtijeva drukčiji pristup organizaciji održavanja, a posebno obučavanju timova inženjera u poledinim oblastima. Ovakav pristup modernizaciji opreme pruža niz pogodnosti kao što su:

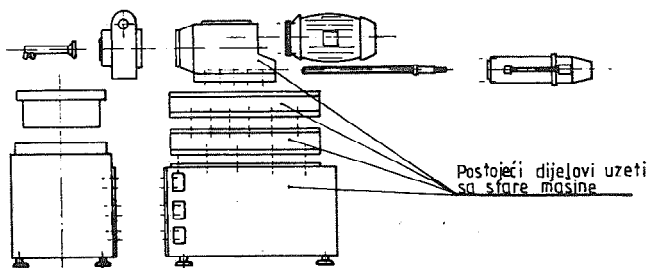
- Finansijski prihvatljiva modernizacija proizvodne opreme
- Postepena realizacija prilagođena proizvodnim potrebama i finansijskim mogućnostima
- Uvođenje savremene tehnologije u relativno kratkom vremenu
- Podizanje nivoa ovladavanja savremenom opremom
- Razvoj i iznaženje sopstvenih tehnoloških rješenja u proizvodnji
- Veće upošljavanje kapaciteta alatnice i održavanja, a ujedno i prestrukturiranje ljudskih potencijala.

## 2. REKONSTRUKCIJA MASINE

U projektu smo odlučili zadržati još upotrebljive dijelove mašine, jer njihova zamjena ne bi podigla kvalitet rekonstrukcije u odnosu na finansijska ulaganja. Tako smo gotovo u potpunosti zadržali postolje, međupostolje i kućište vretena za glavno kretanje. Za ostatak rekonstrukcije koristili smo pored klasičnih metoda i savremena rješenja mašinsogradnje.

Radi tačnosti i ponovljivosti hodova mašine izvršili smo rekonstrukciju kliznih površina suporta nanošenjem plastične mase, te prebrusili kaljene čelične staze. Sljedeći

konstruktivni zahvat je prelazak sa mehanički pogonjenog suporta (trapezno vreteno, reduktor sa ručnim izborom brzina i dvo brzinski motor), na kuglično navojno vreteno i istosmierni motor sa regulacijom brzine. Glavni pogon je standardni trofazni asinhroni motor, snage 5,5 kW, za koji je ugrađena trekventna regulacija broja obrtaja, a sa glavnim vretenom mašine spojen je preko postolećih zupčastih parova u kućistu mašine. Na glavnom vretenu postavlja se programski upravljana glava za poprečno tokarenje "UTRONIC 200/B", proizvod firme D'Andrea iz Italije. Pored toga, instaliran je namenski konstruisan taktni hidraulični radni sto sa ugrađenom napravom za automatsko stezanje radnog komada, koji izrađuje Tvornica alata - Trebinje, a redizajnirani su i sistemi za podmazivanje i hlađenje.



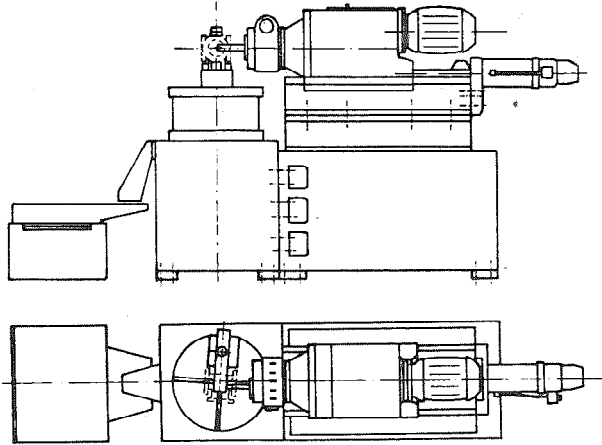
Slika 1: Sastavne komponente mašine

Mašina je pripremljena za dogradnju automatskog posluživanja i uključivanja u automatsku liniju.

### 3. TEHNOLOŠKI ASPEKTI REKONSTRUKCIJE AGREGATNE MAŠINE

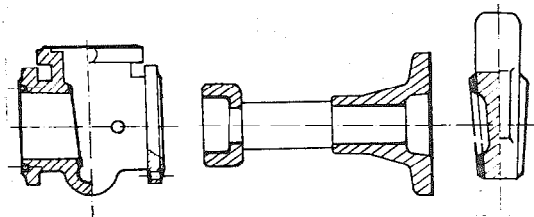
Namjena rekonstruisane agregatne mašine proizašla je iz rješavanja određenih tehnoloških problema stalno prisutnih u procesu obrade. U prilog tome treba dati nekoliko napomena. Kao prvo, Tvornica armatura Alipašin most proizvodi industrijsku armaturu u velikim serijama. U takvoj situaciji svaka ušteda u vremenu obrade, smanjenju škarta i potrošnje alata daje velike finansijske efekte. Najveće serije proizvoda su zasuni nominalnih otvora 50-150 mm, a velicina

areatne jedinke upravo je odgovarala tom dijapazonu proizvoda.



Slika 2: CNC mašina za obradu armature

Tri glavna dijela zasuna su kućište, poklopac i zatvarač (slika 3.)



Slika 3: Glavni dijelovi zasuna

Prilikom sagledavanja tehnoloških mogućnosti CNC mašine za obradu dijelova armature, nametnuo se zaključak da uz odgovarajuće alate možemo obuhvatiti većinu tehnoloških operacija mašinske obrade na ova 3 dijela zasuna. Nakon analize postojeće proizvodne linije za mašinsku obradu, odabrali smo operaciju obrade zaptivnih površina na kućištu zasuna (pasovanje). To je najodgovornija i najkompliciranija operacija i po pravilu je usko grlo u proizvodnji armature. Od njeine tačnosti i ponovljivosti zavisi i sama funkcija zaptivanja zasuna. (slika 4).



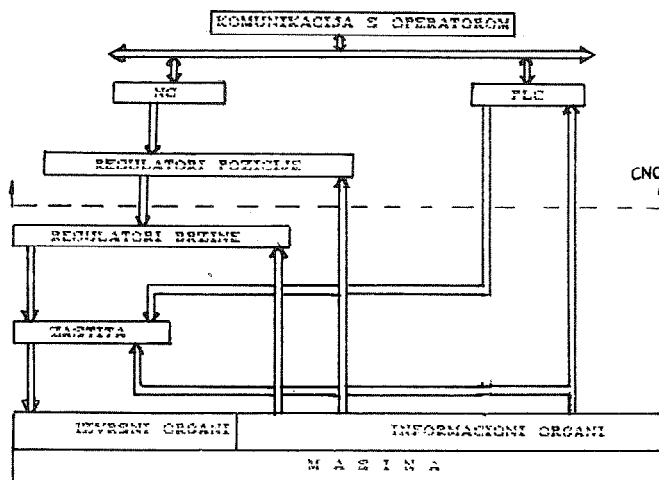


alata za oslanjanje, jer je to u ovom slučaju (velikoserijska proizvodnja), racionalnije rješenje.

Konstrukcija nosača alata, okretni sto, automatsko stezanje radnog komada, te proces obrade vođen numeričkim upravljanjem, daje veliko smanjenje pomoćnih vremena obrade, i bolju kvalitet obradene površine.

#### 4. ELEKTROUPRAVLJACKI SISTEM

Zbog potpuno nove koncepcije mašine električni sistem je morao biti projektovan iz osnova.



Slika 6: Blok-shema električnog sistema

Sa funkcionalne blok-sheme (slika 6) mogu se vidjeti sljedeći blokovi:

- Izvršni organi su istosmierni servomotori za posmačne pogone, asinhroni motor za glavno kretanje te hidraulični cilindri na okretnom stolu, elektromagneti i reletii.

- Informacioni organi su enkoderni (davači pozicije), tahogeneratori (davači brzine) i prekidači.

- Blok zaštite svoju funkciju obavlja u slučaju otkaza upravljačkog sistema. Izveden je na bazi prekidačke logike.

- Regulatori drže brzinu okretanja i poziciju rotora na

zadanoj vrijednosti.

-NC (Numerical Control) služi za upravljanje pogonima na osnovu tehnoloških programa ili ručnih komandi.

-PLC (Programmable Logic Controller) nadzire rad cijele mašine.

-Komunikacioni blok omogućuje čovjeku upravljanje i nadzor nad mašinom u formi koja je niemu prihvatljiva jer upravljački sistem radi sa oko sto ulaznih i pedeset izlaznih veličina.

Ova mašina sa stanovišta upravljanja može da se posmatra kao struga pa je zato i primijenjena odgovarajuća upravljačka jedinica ISKRA CNC-2T. Specifičnost je hidraulični taktni okretni sto sa automatskom stegom čiji rad u potpunosti nadzire PLC. U tu svrhu je sto opremljen elektromagnetnim razvodnicima kao izvršnim organima, te induktivnim i natritisnim prekidačima koji služe kao informacioni elementi za PLC.

Za rad sa stolom operatoru su na raspolaganju 4 komande: pozicioniranje u  $-4^{\circ}46'$ , 0 i  $+4^{\circ}46'$  te taktno zakretanje za  $90^{\circ}$  koje su ostvarene pomoćnim (M) funkcijama ili ručnom komandom.

Odlučili smo da razvijemo aplikativni PLC-program koji predstavlja prilagođenje CNC jedinice konkretnoj mašini. Pored upravljanja okretnim stolom, njegova zadaća je da komunicira sa NC dijelom koji mu je podređen, nadzire stanje pogona, kontrolise sisteme za podmazivanje i hlađenje, otkriva neregularna stanja u mašini obezbjeđujući odgovarajuću dijagnostiku itd. Veličina i kompleksnost tog programa nam ne dozvoljavaju da ovdje ulazimo u njegove detalje.

Posto će kapacitet memorije CNC-a biti sasvim dovoljan da primi više tehnoloških programa, za neku konkretnu obradu će biti dovoljno izabrati odgovarajući program iz memorije i postaviti pripadni alat da bi se zatim prešlo na automatski rad gdje je potrebno samo mienjati radne komade na mašini nakon završene obrade.

Tehnolozi-programeri će imati na raspolaganju program za simulaciju i optimizaciju NC-programa na IBM PC-kompatibilnom

računaru uz vizuelni prikaz na ekranu. Time se stedi skupo radno vrijeme mašine, a ujedno i drastično smanjuje mogućnost greški u programu koje mogu dovesti do neželjenih situacija. Nakon testiranja, tehnološki program se može bilo direktno, bilo preko posrednika prebaciti u memoriju CNC jedinice.

#### 5. ZAKLJUČAK

Rad daje prikaz jednog od savremenih pristupa proizvodnji i približavanje tehnološki razvijenom svijetu. U Tvornici armatura postoji velika potreba za mašinama ovog tipa zbog stalnih zahtjeva za povećanjem kvaliteta proizvoda. Ograničena finansijska sredstva onemogućavaju kupovinu novih CNC mašina. Stoga je osavremenjavanje proizvodnog procesa u relativno kratkom vremenskom periodu i uz manja finansijska ulaganja moguće ostvariti i modernizacijom starih mašina uz uslov da se posjeduje stručni kadar.

M. Trabonjača, M. Kiještan, M. Lekić, S. Matic

#### MODERNIZATION OF MACHINE TOOL FOR VALVE'S PARTS MACHINING

#### SUMMARY

This paper contains description of modernization of the old aggregate boring machine implementing computer numeric control, electronic facing and boring head "UTRONIC 200/B", turntable and other up-to-date elements of machine tools. This modernization provides better constructional and technological characteristics in operations of turning and, if needed, in boring with multi-spindle head instead of "UTRONIC 200/B" head.

Lj. Borojev\*

PRILOG ISTRAŽIVANJU PROBLEMATIKE HIDROSTATIČKOG  
ULEŽIŠTENJA

1. UVOD

Na radnu tačnost mašina alatki za obradu skidanjem strugotine donihan-tan uticaj ima sistem glavnog vretena sa svojim uležištenjem. Eksploataci-o-ni uslovi koje savremena proizvodnja nameće mašinama alatkama diktiraju i za-hteve sklopu glavnog vretena u vidu tačnosti pozicije, krutosti, nosivosti, dinamičke stabilnosti i dr.

Ovi zahtevi trebaju biti ostvareni uz maksimalnu sigurnost u radu i dug vek, sa održanjem visokog nivoa karakteristika ponašanja. Jednu vrstu ležišta, koja u velikoj meri zadovoljavaju ovim zahtevima predsta-vljaju hidrostatička, i ona su tokom dužeg perioda predmet istraživanja na Institutu za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu. U ovom radu je izložen jedan segment tih istraživanja vezan za projektovanje eksperimentalnog modela hidrostatički uležištenog vretena brusilice, njegovu izradu i ispitivanje.

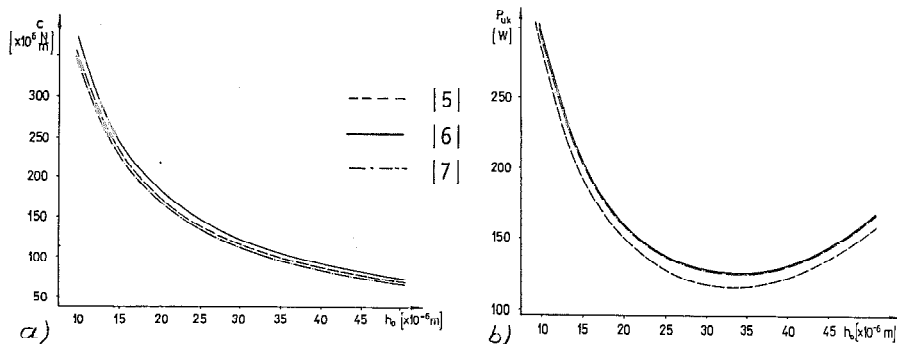
2. PARAMETRI KONSTRUKCIJE

Poľazeći od detaljnog razmatranja proračuna radijalnih hidrostatičkih ležišta [5], [6], [7], izvršena je analiza uticaja pojedinih parametara na karakteristike ponašanja - performanse. Za slućaj posmatranja krutosti npr. (sl. 1.a) uoćljiva je potreba primene malih radijalnih zazora, no ovo mođe dovesti do porasta ukupne potrebne snage (sl. 1.b) zbog povećanja gubitaka usled trenja, iako je protok, odnosno pumpna snaga, smanjena.

Slićna je situacija i sa širinom kružnog praga, jedino se povećanje sna-ge u oblasti malih širina sada javlja zbog povećanja protoka, iako uz smanje-nje gubitka usled trenja.

---

\*) Borojev mr Ljubomir, dipl.ing., asistent, Institut za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, V.Perića-Valtera 2.



Sl. 1. Zavisnost krutosti (a) i ukupne snage (b) od zazora

Oba razmatrana parametra imaju i druga ograničenja. Tako je minimalni zazor limitiran mogućnošću izrade u vrlo uskom polju tolerancija, vrstom obrade i odgovarajućom cenom. Promena zazora u odnosu na projektovani nastaje kao posledica zadanih tolerancija prečnika rukavca i ležišta. Tolerancija zazora može da se izrazi u funkciji veličine samog zazora |5|, |6|:

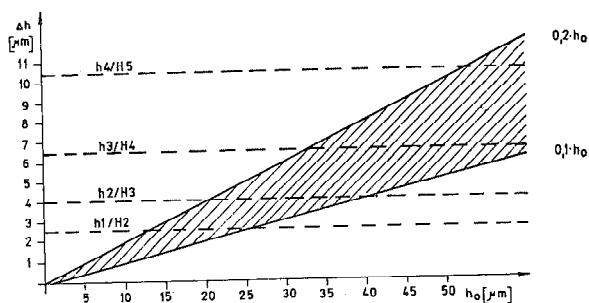
$$\Delta h_0 = (0,1 \div 0,2) h_0$$

Ova zavisnost definiše šrafiranu oblast dijagrama na slici 2. Na njoj su prikazane i vrednosti najvećeg tolerancijskog polja zazora za slučaj da se prečnik rukavca  $\phi 56$  mm izrađuje za jednu klasu tačnije od otvora ležišta, a obe mere u položaju tolerancijskog polja  $h(H)$ .

Zahtev za potrebnom tolerancijom izrade rukavca i ležišta ukazuje slikovito na proizvodne probleme, odnosno cenu izrade ovakvih elemenata.

Što se širine kružnog praga tiče, njegova minimalna veličina je ograničena dozvoljenim pritiskom za slučaj metalnog kontakta sa rukavcem tj. pri isključenom pogonu i napajanju ležišta. Ovo je uradjeno za jednu veličinu brusilica prema |4|. Za moguća opterećenja takve brusilice u eksploataciji određeni su i zahtevi pojedinih performansi radijalnih ležišta. To je izvedeno definisanjem opterećenja na vretenu i proračunom potrebne moći nošenja i krutosti ležišta, koja uz prisutnu elastičnost vretena obezbedjuje limitiran ukupan ugib tocila, i na taj način omogućuje odgovarajuću tačnost obradka.

Na takav način definisani su neki parametri konstrukcije ležišta i zahtevi pojedinih performansi. Pomoću razvijenog programskog paketa RADHIL |2| izveden je niz varijantnih proračuna prema čemu su definisani ostali parametri, kako geometrijski, tako i radni, respektujući postavljena ograničenja i težeći najmanjoj mogućoj ukupnoj snazi. Na osnovu tih podataka projektovana su i izradjena dva para radijalnih ležišta različitog zazora (i dubine



Sl. 2. Zavisnost tolerancije zazora od njegove dimenzije

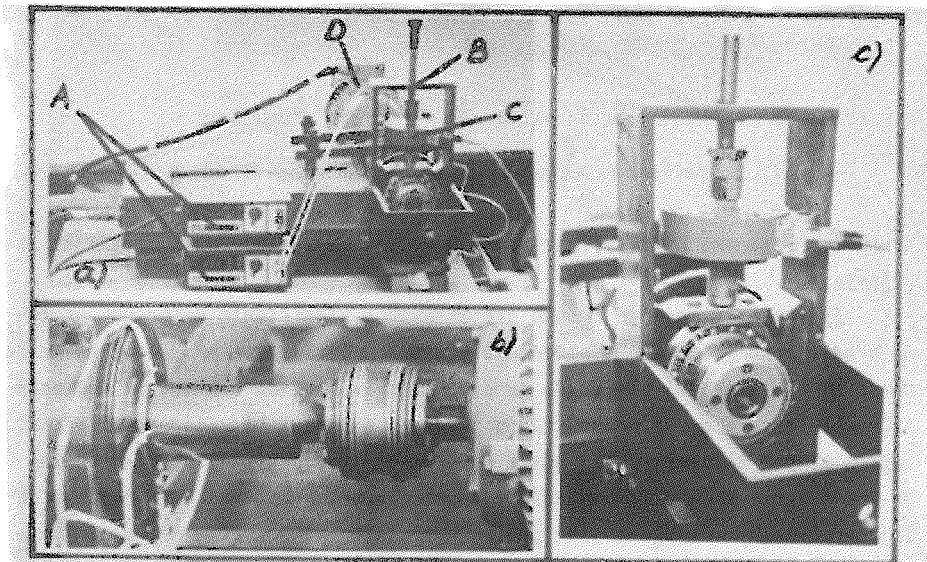
džepova), izabrano nekoliko viskoziteta ulja i definisan opseg pritiska napajanja.

Ispitivanje ponašanja tako projektovanog uležištenja odabranog vretena predvidjeno je merenjem pomeranja vretena pri različitim opterećenjima na mestu tocila. Imajući u vidu da je proračunskim modelom obuhvaćena hidrostatička krutost, a da se pri obrtanju javlja obavezno i hidrodinamički efekat, koji u manjoj ili većoj meri utiče na stvarnu krutost ležišta, predvidjeno je ispitivanje kako pri mirovanju, tako i obrtanju vretena. Uz merenje položaja vretena, predvidjeno je i praćenje protoka, te priraštaja temperature ulja, u cilju poredjenja sa proračunatim performansama i provere primenjenog sistema napajanja ležišta i vrste ulja.

### 3. EKSPERIMENTALNI MODEL HIDROSTATIČKI ULEZISTENOG VRETENA

Vreteno jedne od brusilica proizvodnje LZT "K" iz Kikinde uležišteno je sa dva radijalna i jednim dvostrukim aksijalnim hidrostatičkim ležištem. Radijalna ležišta izvedena su sa kapilarnim prigušnicima oblika zavojnice, trouglastog poprečnog preseka. Dimenzija preseka odredjena je na osnovu projektovanog prigušenja pritiska uz uslov laminarnog strujanja, a izradjena je na brusilici za navoje. Četiri džepa svakog ležišta izradjena su na obradnom centru finim struganjem, uz ekscentričnost osa alata i ležišta. Projektovane dimenzije aksijalnih pragova i dubine džepova obezbedjene su podešavanjem radijusa alata i veličine ekscentriciteta. Respektujući preporuke pojedinih autora po pitanju dubine džepa, kao i uslov laminarnosti strujanja ulja u džepovima pri obrtanju, odredjena je i izvedena odgovarajuća dubina džepova. Ležišta sa vretenom postavljena su u čauru, kroz koju je obezbedjeno snabdevanje svakog ležišta uljem, kao i odvod ulja. Čaura je postavljena u vreteništa brusilice. Poklopac vreteništa nije tokom ispitivanja stavljan na posto-

Ije zbog lakšeg pristupa pojedinih davača . Obzirom na to, ukrućenje čaure sa ležištima i vretenom izvedeno je posebno, sa dva poprečna rama. Izgled vretena (sa instrumentima za merenje temperature (A), generisanje (B) i merenje sile (C), i pogonskim elektromotorom (D)) prikazan je na sl. 3a.



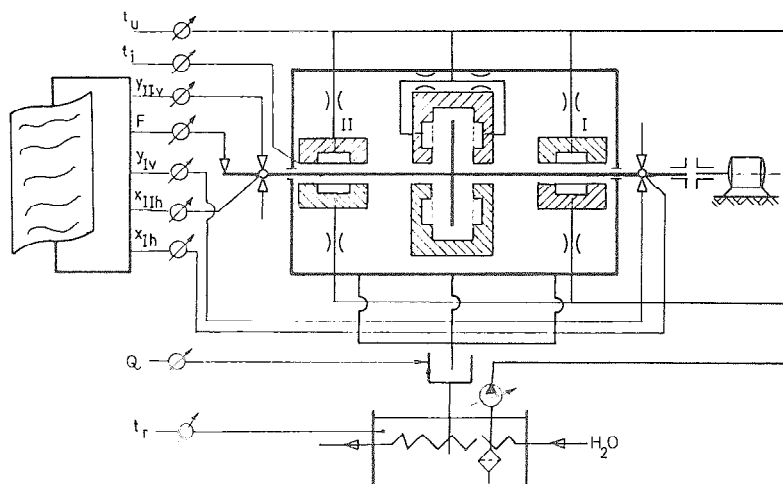
Sl. 3. Izgled eksperimentalnog modela

Napajanje ležišta uljem obezbedjeno je hidrauličnim agregatom sa pumpom promenljivog kapaciteta REXROTH 1PV2V3-42/25RA01MC63A1 i rezervoarom zapremine 50 l. Radi hladjenja ulja postavljena je u rezervoar spiralna bakarna cev kroz koju je obezbedjen stalni protok hladne vode tokom ispitivanja. Takodje je ugradjena okretna lopatica za mešanje ulja.

Pogon vretena izveden je dvobrzinskim elektromotorom ZK 90 L 4/2. Radi ispitivanja vretena pod dejstvom samo poznate generisane sile, elektromotor je priključen preko torzione spojnice JAKOB KSS 8AA (sl. 3b).

#### 4. ISPITIVANJE HIDROSTATIČKI ULEŽIŠTENOG VRETENA

U okviru ispitivanja hidrostatički uležištenog vretena izvedeno je merenje njegovog položaja pri raznim opterećenjima, uz variranje pritiska napajanja ležišta i broja obrtaja vretena, merenje protoka i merenje temperature ulja ispred i iza jednog radijalnog ležišta radi odredjivanja priraštaja temperature. Šematski prikaz ispitivanog vretena, sa položajem i oznakama merenih veličina, dat je na slici 4.



Sl. 4. Šema merenja uležištenog vretena

Opterećivanje vretena vršeno je na mestu predviđenom za postavljanje točila, pomoću zavrtnja pribora projektovanog za generisanje sile. Prenos opterećenja izveden je preko induktivnog dinamometra HOTTINGER Q3/1000-5 i radialnog kugličnog ležišta postavljenog na vreteno. Ovaj detalj prikazan je na sl. 3c.

Merenje pomeranja vretena izvedeno je na dva mesta sa spoljne strane radialnih ležišta van čaure vreteništa. Ono je izvršeno u vertikalnoj i horizontalnoj ravni sa po dva para induktivnih bezkontaktnih davača HOTTINGER TR2, pričvršćenih na poklopce čaure. Ovaj detalj vidi se na sl. 3b. Registrovanje veličine opterećenja i pomeranja izvedeno je na traci svetlosnog pisarča A.FISCHER AF 8 UV-G.

Protok ulja je registrovan u povratnom vodu, merenjem vremena punjena posebne posude određene zapremine.

Temperature ulja praćene su termoparovima i digitalnim termometrima TAKEDA RIKEN TR 2112. Temperatura je merena u dovodu jednog radialnog ležišta sa termoparom postavljenim u bakarnu cevčicu potpoljenu u uljnu struju napajanja. Drugi termopar ugradjen je na unutrašnju stranu poklopca čaure u neposrednu blizinu spoljne strane radialnog ležišta II. Osim toga, merena je i temperatura ulja u samom rezervoaru.

## 5. REZULTATI ISPITIVANJA

Ispitivanje hidrostatički uležištenog vretena izvedeno je za sada sa jednim parom radialnih ležišta zazora  $40\ \mu\text{m}$  i jednim uljem viskoziteta 26,4

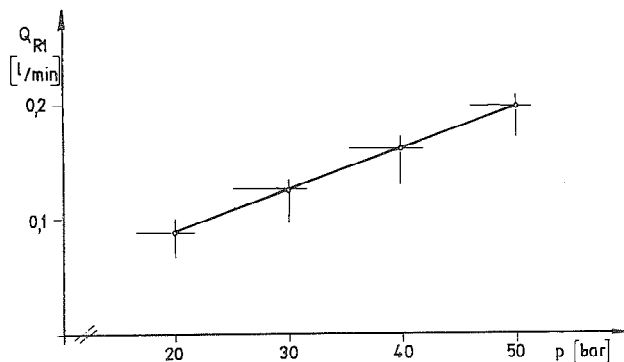


mPas (na 40°C). Ispitivanja su vršena uz variranje pritiska napajanja u dijapazonu (20 ± 50) bar, a pri mirovanju vretena i njegovim obrtanjem sa 1430 i 2820 o/min.

Merenje protoka ulja izvedeno je više puta za sva ležišta zajedno, zbog poteškoće razdvajanja pojedinačnih protoka kroz ležišta. Konstatovana je mala razlika u funkciji broja obrtaja, koja se može objasniti prisustvom različitog viskoziteta ulja zbog temperatura koje se javljaju pri pojedinim režimima rada.

Nakon toga su, pri mirovanju vretena, napajana samo pojedina ležišta i meren njihov protok. Mala razlika sume pojedinačnih protoka i merenog ukupnog, pokazala je na mogućnost ovakvog određivanja protoka ležišta.

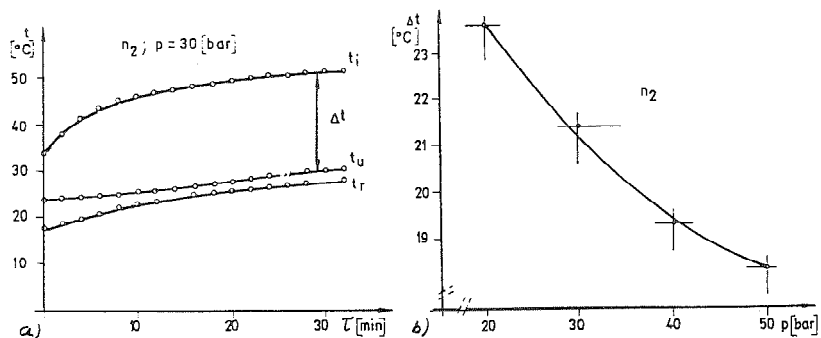
Na slici 5 prikazan je protok radijalnog hidrostatičkog ležišta za razne pritiske napajanja uljem, i on je u potpunosti u skladu sa proračunskim vrednostima.



Sl. 5. Protok radijalnog hidrostatičkog ležišta

Ispitivanje priraštaja temperature ulja pri strujanju kroz radijalno ležište izvedeno je merenjem temperature ispred i iza ležišta. Pokušaj merenja neposredno ispred ležišta pokazao se nepouzdanim zbog uticaja temperature relativno velike mase čaure ležišta i postolja koje zagreva izlazna struja ulja. Nakon odmicanja ove merne tačke, dobiveni su rezultati čiji je delimičan prikaz dat na slici 6. Priraštaj temperature određivan je kao razlika stabilizovanih funkcija temperatura na izlazu i ulazu prema sl. 6a.

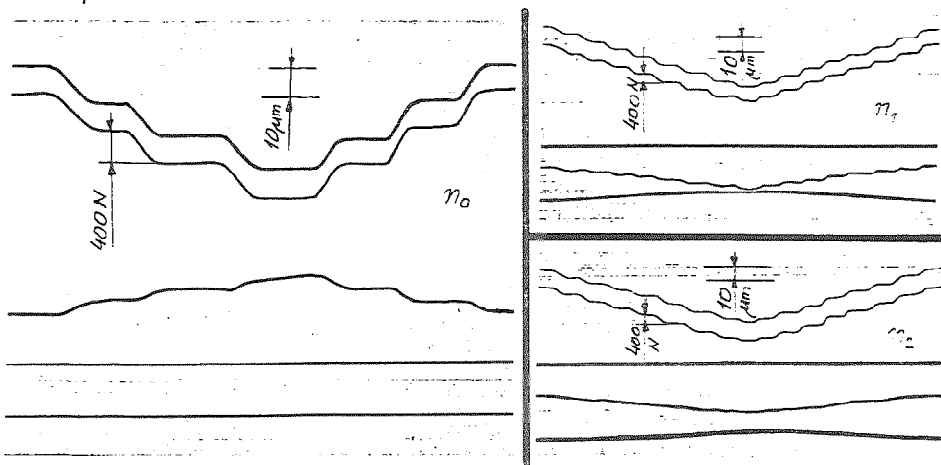
Na slici 6b prikazan je ovako određen priraštaj temperature u zavisnosti od pritiska napajanja. Ova funkcija je u potpunosti oblika određenog proračunski, jedino su sve vrednosti niže. Ovo je sasvim razumljivo ako se ima u vidu da proračun bazira na pretpostavci zadržavanja celokupne toplote u ulju, tj. da nema gubitaka ni provodjenjem ni prenošenjem ni zračenjem.



Sl. 6. Zavisnost temperature od vremena (a) i pritiska (b)

Ispitivanje krutosti radijalnog ležišta izvedeno je redukovanjem registrovanih pomeranja rukavaca vretena na sredinu ležišta, i određivanjem sila na istom mestu, tj. otpora oslonaca. Pri tome je vreteno posmatrano kao elastično kao i u [1]. Na slici 7 prikazani su zapisi snimljenih pomeranja i spoljnog opterećenja za pritisak 20 bar i brojeve obrtaja  $n_0=0$ ,  $n_1=1430$  o/min i  $n_2=2820$  o/min. Raspored snimljenih veličina je prema šemi na slici 4.

Za razliku od  $n_0$ , pri  $n_1$  i  $n_2$  prisutan je i hidrodinamički efekat koji dovodi do pomeranja vretena u horizontalnoj ravni (donje dve linije). Krutosti radijalnog ležišta izračunate prema izmerenim vrednostima veće su od proračunskih, što se objašnjava primenom modela vretena sa dva koncentrisana oslonca iako su ležišta dosta široka. Drugi razlog je prisustvo hidrodinamičke komponente krutosti, koja nije uzeta u obzir pri proračunu. Ona se, naime, može odrediti, ali je pitanje njenog udela u ukupnoj krutosti uz hidrostatičku komponentu.



Sl. 7. Registrovana pomeranja i opterećenja vretena

## 6. ZAKLJUČAK

Rezultati do sada izvedenih ispitivanja ukazuju na mogućnost vrlo preciznog određivanja performansi hidrostatičkih ležišta, odnosno ponašanja realizovane konstrukcije. Odstupanje pojedinih izmerenih vrednosti od proračunskih potvrđuje prisustvo određenih aproksimacija primenjenih na proračunskom modelu i ukazuje na velik značaj eksperimentalnog ispitivanja i primenjene metodologije merenja. Ova faza istraživanja takodje je doprinela postavljanju tehnologije izrade elemenata hidrostatičkog uležištenja kao vrlo važnog činioca za mogućnost industrijske proizvodnje što predstavlja konačan cilj ovog celog istraživanja.

## REFERENCE

- [1] Borojev, Lj.: Hidrostatičko oslanjanje elemenata mašina alatki za završnu obradu, magistarski rad, FTN, Novi Sad, 1980.
- [2] Borojev, Lj., Gatalo, R., Reckecki, J.: Modeliranje proračuna hidrostatičkog uležištenja sa aspekta mogućnosti njegove automatizacije, IX internacionalni simpozijum BIAM '88, Zagreb, 1988.
- [3] Borojev, Lj.: Prilog razvoju metodologije projektovanja savremenih mašina alatki na bazi eksperimentalnog i računarskog modeliranja hidrostatičkog uležištenja visokopreciznih glavnih vretena, radni materijal doktorske disertacije, FTN, Novi Sad, 1989.
- [4] Reckecki, J., Zeljković, M., Siraki, B., Francuski, M., Borojev, Lj., Gatalo, R., Kosić, D., Čabarkapa, S., Hodolič, J., Romček, A., Petrović, Z.: Razvoj koncepcije modularnog projektovanja brusilica za spoljašnje i unutrašnje okruglo brušenje, istraživačko-razvojni projekat, Institut za proizvodno mašinstvo FTN, Novi Sad, 1987.
- [5] Rowe, W.B., O'Donoghue, J.P.: Design procedures for hydrostatic bearings, The Machinery Publishing Co., Brighton, 1971.
- [6] Stansfield, F.M.: Hydrostatic bearings for machine tools and similar applications, the Machinery Publishing Co., Brighton, 1970.
- [7] Voskresenskij, V.A., Dljakov, V.I., Zile, A.Z.: Rasčet i proektirovanie opor židkostnogo trenija, Mašinostroenie, Moskva, 1983.

Lj. Borojev

THE CONTRIBUTION TO RESEARCH CONCERNING  
HYDROSTATIC BEARINGS-SPINDLE SYSTEM

S u m m a r y

The paper presents one part of the researches considering the hydrostatic bearings for machine tools spindles related to experimental model realization and testing. The basis for experimental model design is the analysis of parameters significant for radial bearings calculation. After the realized model presentation, performed investigation and some of results obtained are shown. Finally, the brief consideration about performed research phase in the context of complete problem is given.