

# tribologija u industriji

## sadržaj contents содержание

|   |   |    |
|---|---|----|
| UVODNIK<br>INTRODUCTION<br>ПЕРЕДОВИЦА   | B. IVKOVIĆ: Povodom desetogodišnjice - On the occasion of the centenary - По поводу десятилетия . . . . .   | 67 |
| ISTRAŽIVANJA<br>RESEARCH<br>ИССЛЕДОВАНИЯ  | B. NAVINŠEK, A. ŽABKAR: Uticaj parametara pripreme podloge na kvalitet tvari prevlake TiN (PVD) - The effects of the parameters of substrate preparation upon the TiN (PVD) coating quality - Воздействие параметров подготовки основы на качество твердого покрытия TiN (PVD) . . . . .  | 69 |
|   | B. TADIĆ, M. BABIĆ: Pojam i metode definisanja obradivosti metala rezanjem - Metal machinability: the idea and the defining methods - Понятие и методы определения обрабатываемости металлов резанием . . . . .   | 75 |
|   | M. LAZIĆ, D. RANKOVIĆ: Poboljšanje uslova rada kroz izbor sredstava za hladjenje i podmazivanje u obradi odvalnim glocanjem - Improvement of working conditions in hob milling through proper selection of cutting fluids - Улучшение условий работы соответствующим выбором смазочно-охлаждающих средств при обработке червячной фрезой. . . . . | 81 |
| ZA NEPOSREDNU PRAKSU<br>FOR DIRECT PRACTICE<br>ДЛЯ НЕПОСРЕДСТВЕННОЮ<br>ПРАКТИКУ | M. BABIĆ, Univerzalni tribometar TR-3 . . . . .   | 88 |
| KNIGE I ČASOPISI<br>BOOKS AND JOURNALS<br>КНИГИ И ЖУРНАЛЫ                       | REZIMEA<br>ABSTRACTS<br>РЕЗЮМЕ . . . . .  | 93 |
|   | 95  |    |

## Povodom desetogodišnjice

Prvi broj časopisa "TRIBOLOGIJA U INDUSTRIJI" izšao je iz Štampe 1978. godine u izdanju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu. U Redakciji su bili zastupljeni naučno nastavni radnici sa Mašinskih fakulteta iz Zagreba, Beograda, Novog Sada, Niša i Kragujevcu. Osnovni cilj časopisa bio je informisanje domaće naučne i stručne javnosti o svim aspektima tribologije kao nauke i tehnologije koja je u to vreme već u industrijskom svetu bila veoma prisutna, a u domaćim naučnim institucijama ročela sve više da se razvija.

Časopisu je prethodila jedna publikacija, takođe, Mašinskog fakulteta u Kragujevcu pod nazivom "SAOPŠTE - NJA LABORATORIJE ZA OBRAĐU METALA I TRIBOLOGIJA" koja se pojavila prvi put 1973. godine nepunih sedam godina posle promocije tribologije kao pojma u Velikoj Britaniji i pojava poznatog JOST-ovog izveštaja. U Saopštenjima Laboratorijske za obradu metala i tribologiju objavljivani su uglavnom rezultati istraživanja u ovoj oblasti saradnika (stalnih i povremenih) Laboratorijske za obradu metala i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu. Ova publikacija izlazila je novremeno sve do 1977. god. i doživela ukupno 10 brojeva.

U poslednjim sedamdesetim godinama ekonomska kriza se još uvek nije osetila u većoj meri u našoj zemlji. Uz pomoć Republičke zajednice nauke i Osnovne zajednice nauke regiona Šumadije i Pomoravlja bilo je moguće u prvoj godini izdavanja časopisa koristiti dубоку štampu i koriće u više boja. Ubrzo, Redakcija je konstatovala da je mogući tiraž ovog specijalizovanog časopisa oko 500 i da u skladu sa ovim tiražom treba koristiti i odgovarajuću vrstu štampe. Sa porastom privrednih i drugih teškoća u našem društvu rasli su i problemi oko izdavanja časopisa "TRIBOLOGIJA U INDUSTRIJI". Do sada, međutim, Redakcija je uspevala da obezbedi njegovo redovno izlaženje a nada se da će tako biti i u будуćem.

Časopis "TRIBOLOGIJA U INDUSTRIJI" i po svojim redakcijama i po naučno stručnim radovima koji su u njemu objavljivani je svo vreme bio jugoslovenska publikacija. Skoro da ne postoji naučna ili obrazovna institucija u našoj zemlji u kojoj se realizuju tribološka istraživa - nja bilo koje vrste a da u časopisu nije prikazan bar deo dobijenih rezultata. Poslednjih godina u časopisu go - stuju i poznati stručnjaci iz oblasti tribologije iz sva - ta radovima koji su ili posebno pripremljeni za časopis "TRIBOLOGIJA U INDUSTRIJI" ili sa radovima saopštenim na nekim od brojnih internacionalnih konferencija iz oblasti tribologije.

Tematski časopis je u proteklom periodu u prvo vre - me bio usmeren na ronašanje tribomehaničkih sistema u ob - radi metala rezanjem odnosno na tribologiju rezanjem. U ovoj oblasti najviše pažnje posvećivano je tribološkim karakteristikama sredstava za hladjenje i podmazivanje i ekonomskom aspektu tribologije rezanjem. U jednom broju radova razmatrane su i tribološke karakteristike reznih alata kao drugog elementa tribomehaničkih sistema u kojima se odvijaju procesi rezanjem i to onih koji su presvu - ţeni savremenim prevlakama (jednostruka, dvostruka, tro - struka).

Posledicama koje tribološki procesi u zoni rezanja ostavljaju na predmetima obrade kao prvom elementu tribomehaničkih sistema ove vrste nije do sada posvećivana veća pažnja u časopisu. U godinama koje dolaze problematici rezanja između intenziteta razvoja triboloških procesa i triboloških karakteristika površinskoj sloja predmeta obrade biće posvećena veoma velika pažnja.

Druga oblast kojoj je časopis bio posvećen u značaj - nijoj meri je oblast tribometrije. Prikazane su u protek - lom periodu brojne savremene metode za merenje više vrsta izlaznih veličina iz tribomehaničkih sistema kao što su: sila trenja, koeficijent trenja, parametri habanja, tem -

erature u zoni kontakta, itd.

Kompjuterizacija procesa ispitivanja ponašanja elemenata tribomehaničkih sistema svih vrsta u različitim uslovima eksploatacije je sve prisutnija u savremenim istraživačkim programima i kod nas i u svetu. Ovoj problematice takođe počinje da se posvećuje sve veća pažnja u časopisu.

Tribomehaničkim sistemima svih vrsta sadržanim u alatnim mašinama bilo je posvećeno više radova u proteklim godinama, naročito zupčastim parovima, kardanskim vratilima i vodjicama alatnih mašina.

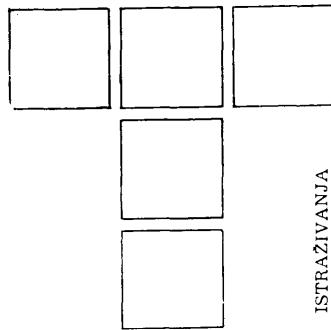
Prevlake kojima su presvućene kontaktne površine sve većeg broja tribomehaničkih sistema razmatrane su, pre svega, u radovima tzv. preglednog karaktera u kojima su pružane informacije o tome šta se u ovoj oblasti radi u svetu i kakve sve vrste prevlaka postoje. Tek u poslednje vreme vrše se intenzivna istraživanja triboloških karakteristika savremenih prevlaka i to na posebno konstruisanim i izgradjenim tribometrima na Mašinskim fakultetima u Kragujevcu i Mostaru. U drugim istraživačkim centrima ovim problemima se posvećuje značajna pažnja a

istraživanja se vrše na standardnim tribometrima i mašinama za ispitivanje trenja. Rezultati ovih istraživanja treba da omoguće uvid u problematiku primene savremenih prevlaka na kontaktnim površinama elemenata tribomehaničkih sistema i nalaženje optimalnih rešenja u savremenim proizvodnim uslovima u domaćoj industriji pre svega.

Časopis "TRIBOLOGIJA U INDUSTRILJI" već duže vremena se prikazuje u odgovarajućim publikacijama Sovjetske akademije nauka i časopisu TRIBOLOGIJA u Poljskoj uporedno sa časopisima kao što su WEAR, TRIBOLOGY INTERNATIONAL i dr.

Redakcija časopisa očekuje u sledećoj deceniji pojave novih brojnijih autora radova iz ove sve univerzalnije naučne discipline koja se bez široke interdisciplinarnosti ne može dalje i više razvijati.

B. NAVINŠEK, A. ŽABKAR



# Uticaj parametara pripreme podloge na kvalitet tvrde prevlake TiN (PVD)

## UVOD

Problem habanja alata i mašinskih delova poznat je korisnicima skoro koliko i sami alati. On je u istoriji rešavan na različite načine, uglavnom tako da se tražilo materijala sa pogodnijim osobinama za datu namenu ili optimiziralo radne uslove. Često potražnja za boljim alatom bila je uzrokovana nemogućnošću primene dotad poznatih alata a gotovo uvek glavni su motivi bili ekonomičnost i produktivnost. U prošlom veku najčešće je primenjivan ugljenični čelik. Sa otkrićem odličnih osobina legura (1) u ovom je veku došlo do vanrednog razvoja hrzoreznih čelika koji je kulminirao u proizvodnji sinterovanih čelika. Ogroman je napredak postignut sa izradom tvrdih metala posle 1920 godine. Primena alata od tvrdog metala još uvek ima tendenciju porasta. Keramički i diamantni alati predstavljaju sledeći stepen međutim nijehova je primena (za sada i verovatno ubuduće) vrlo ograničena na specijalne obracije. Prema nekim procedurama (2) u automobilskoj industriji primenjuje se oko 50% reznih alata od hrzoreznih čelika, 49% tvrdog metala a ostalo su keramički i diamantni alati.

U zadnjih dvadesetak godina u razvoju alata veoma značajno mesto zauzimaju tvrde prevlake. Nitridi, karbidi i boridi prelaznih metala imaju naime vrlo pogodne karakteristike u mnogim primenama a pogotovo su zanimljive njihove mehaničke i termodinamičke oschine. Nekoliko kombinacija dolazi u obzir kad je reč o zaštitnim prevlakama za alate (3), na primer  $TiC$ ,  $TiN$ ,  $ZrN$ ,  $HfN$ ,  $VC$ ,  $WC$ ,  $TiB_2$ ,  $BN$ , i još neki drugi. Daleko najširu primenu našao je titan nitrid, koji ima najpogodniju kombinaciju pre svega žilavost, mikrotvrdoće, koeficijenta trenja i hemijske postojanosti.

Upotreba  $TiN$  na podlozi od tvrdog metala poznata je već iz sedamdesetih godina i u Jugoslaviji. Radi se o prevlakama koje su dobivene hemijskom depozicijom (CVD) Boris Novinšek i Anton Žabkar, Institut "J. Stefan", Janova

na visokim temperaturama podloge - oko  $1000^{\circ}\text{C}$ . Ove visoke temperature depozicije, međutim nisu pogodne za čelike zbog strukturnih i dimensijskih deformacija podloge, do kojih dolazi kod ovih temperatura. Iz ovih razloga traženi su novi postupci u oblasti fizičke depozicije (PVD). Krajem sedamdesetih razvijene su tehnike na bazi naparavanja i naprašivanja između kojih je najbolje rezultate dalo reaktivno jonsko prekrivanje (RIP - reactive ion plating) kod temperatura oko  $500^{\circ}\text{C}$  (4). Sa ovom tehnikom može se dakle prekriti i klasu hrzoreznih čelika, koji imaju više temperature napuštanja (5). Tako - dje, PVD prevlake uvide se poslednjih godina i na okretnim pločicama, naročito za primenu u glodanju gde su potrebne manje debljine prevlake (ispod 5  $\mu\text{m}$ ) i velika pouzdanošć alata. Na Institutu "J. Stefan" razvijena je vlastita tehnologija nanošenja prevlaka  $TiN$  (6) a postoje već i mnoga iskustva u domaćoj industriji (7) sa slojevima  $TiN$  koje nudi Centar za tvrde prevlake u Domžalamama (8, 9).

## IZPOR MATERIJALA ZA ALAT

Saznanje, da je od presudnog značaja za dobro ponašanje alata u primeni kompletan tribološki sistem stavlja interpretaciju testnih rezultata u novi položaj. Površinske osobine alata koje ispravljamo sa tvrdom prevlakom samo su jedan deo tog sistema. On uključuje pored toga i osnovni alat i obradak i sredstvo za hladjenje i podmazivanje. U širem smislu mogli bismo uključiti i uređaj odnosno mašinu pa čak i radnika koji poslužuje mašinu. Kod starijih mašina ljudski faktor nije zanemariv. Tek moderne NC i CNC mašine pružaju mogućnost njegove eliminacije. U mnogim organizacijama već smo prevazišli prvu fazu primene titan-nitrida u kojoj su tehnolozi tražili rešenje svojih najtežih problema sa postojećim alatima i sada već radimo na optimizaciji pojedinih operacija. U toj prvoj 39, Ljubljana.

fazi često se dešavalo da materijal alata nije bio pogodan.

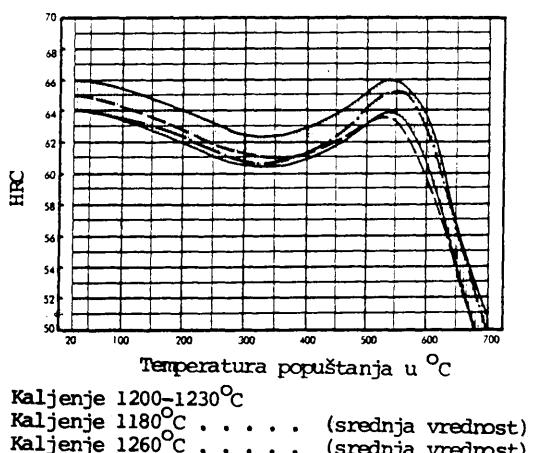
Izbor materijala alata je dakle jedan od bitnih koraka u postizanju optimalnih rezultata. Kvalitetna podloga sa pogodnim integritetom površine i mehaničkim osobinama, ove osobine mora zadržati i u procesu depozicije sloja da bi dobili vrhunski alat. Osnovni zahtevi za depoziciju su dobra električna provodnost i otpornost na povišenu temperaturu ( $500^{\circ}\text{C}$ ). Kod čelika pored hemijskog sastava termička obrada najviše utiče na mehaničke osobine dok tvrdi metali nisu osetljivi na temperaturu. Njihove mehaničke osobine zavise o kemijskom i mikrostrukturnom sastavu.

Kao kriterij u izboru čelika možemo dakle uzeti dva parametra: tvrdoću materijala koja mora odgovarati nameni alata i postojanost na napuštanje koja će obezbediti traženu tvrdoću i posle depozicije i u toku upotrebe.

U klasi alatnih čelika dolaze u obzir neki kromovi čelici za rad u hladnom, npr. Č.4756 i Č.4850 ako je završna termička obrada na temperaturi preko  $500^{\circ}\text{C}$ .

Alatni čelici za rad u vrućem mogu se deponirati (npr. Č.4758) ali njihove mehaničke osobine (tvrdoća 60-63 HRC) nisu najpogodnije za primenu TiN pa se prekriveni upotrebljavaju u veoma ograničenom opsegu.

Brzorezni čelici namenjeni su pre svega za primenu kod velikih brzina rezanja ali je njihova upotreba danas mnogo šira. Odlikuju se velikom čvrstinom, otpornošću na habanje i mogućnošću hemotermijske obrade površine. Glavni legirni elementi su molibden, volfram, krom, vanadij, kobalt i ugljenik. Od velikog je značaja za prevlačenje sa TiN njihova termička obrada. Temperature kaljenja iznose oko 1200 do  $1300^{\circ}\text{C}$  a otpuštaju se na temperaturama oko 530 do  $600^{\circ}\text{C}$  da bi se postigla visoko sekundarna tvrdoća. Karakteristična zavisnost tvrdoće od termičke obrade je prikazana na sl. 1.



Sl. 1: - Diagram otpuštanja za čelik Č.7680

Tvrdoće koje se postiže kod brzoreznih alata iznose oko 64 do 65 HRC, kod većih udela ugljenika čak i 69 do 70 HRC. Ovde treba istaći da je izbor materijala za alat presudan po što prevlaka TiN ne može nadoknaditi nedostatke podloge - ona samo smanjuje habanje površine i delimično smanjuje opterećenje alata. Sa tim u vezi moramo podvući da se postiže najbolji rezultati sa čelicima koji su i inače namenjeni za primenu u najtežim uslovima na radu (veliki procenat kobalta). Svi prioritetno tipizirani jugoslovenski brzorezni čelici Č.6880 (S 18-0-1), Č.6980 (S 18-1-2-5), Č.7680 (S 6-5-2), Č.9682 (S 18-1-2-10) i Č.9683 (S 10-4-3-10) kao i Č.9780 (S 6-5-2-5) primerni su za depoziciju TiN na alate. Dobre rezultate postigli smo i sa mnogim uvoznim materijalima mada u ovim slučajevima tačne specifikacije često nisu poznate pa lako može doći do greške u izboru alata za konkretnu primenu.

Alatni čelici sa poboljšanim osobinama izradjuju se postupcima metalurgije praha npr. ASP 23, ASP 30, ASP 60, CPMM 4 i CPM 10 V. U ovakvim čelicima nema makroskopske segregacije, veoma sitna karbidična zrna ravnomerno su rasporedjena po materijalu, najugodniji su karbidi vrste MC. Adhezija TiN sloja je na ovim čelicima vrlo povoljna.

Medju tvrdim metalima najviše se upotrebljava volfram karbid sa kobaltnim vezivom koje obezbeđuje žilavost. Osobine osnovnog materijala takođe zavise o sastavu (upotrebljavaju se i drugi karbidi: TiC, TaC, NbC,...), krupnoći zrna i udelu vezne faze. U kompleksnim tvrdim metalima značajan je i oblik zrna. Volfram karbidična zrna imaju oštре ivice dok su TiC i TaC okruglasti. Tvrdi metali sa čeličnim vezivom (ferotic) na sličan su način osetljivi kao čelik - termička obrada veoma je važna. U tabeli 1 navedeni su neki tipovi okretnih pločica koji se najviše prekrivaju zaštitnim slojem. Mnogi proizvodnjači sami nude okrette pločice sa CVD prevlakama neki (npr. Kennametal, Plansee, Steliram, Valeron, Sandvik) i PVD prevlakama koje su aktualne naročito na brušenim pločicama. Na ovakvim pločicama inače jeftinije CVD prevlake zbog tehnoloških problema nisu neuobičajene.

PVD tehnologija je pogodna i za depoziciju tvrdih metala sa vrlo finim zrnom (0,6 do 0,8 μm) koji se proizvode po HIP (vruće izostatsko presovanje) metodi. Zbog vrlo sitnih zrna u sloju TiN (0,05 do 0,07 μm) obezbeđene su dovoljna žilavost i mikrotvrdoća sloja već kod malih debljin 1 do 2,5 μm. Tako se PVD prevlakama mogu postići optimalni rezultati i sa pločicama od najsitnijeg zrna odnosno najmanje hraptavosti površine.

TABELA 1 - KVALITET TVRDIH METALA ZA CVD I PVD PREVLAKE

| ISO | Sastav (at. %) |             |     | Tvrdoča | Spec. gustina (g/cm <sup>3</sup> ) |
|-----|----------------|-------------|-----|---------|------------------------------------|
|     | Co             | (Ta,Ti,Nb)C | WC  |         |                                    |
| P15 | 6,0            | 7,7         | bal | 92,0    | 14,2                               |
| P25 | 10,5           | 17,0        | bal | 91,4    | 12,45                              |
| P30 | 9,1            | 17,9        | bal | 91,5    | 12,45                              |
| P35 | 8,5            | 18,3        | bal | 91,3    | 12,75                              |
| P45 | 10,3           | 13,5        | bal | 91,0    | 12,9                               |
| K10 | 5,4            | 2,7         | bal | 92,1    | 14,85                              |
| K20 | 11,5           | 2,9         | bal | 90,0    | 14,20                              |
| M10 | 6,0            | 10,5        | bal | 92,0    | 12,85                              |
| M15 | 6,0            | 8,0         | bal | 91,5    | 14,10                              |
| M30 | 6,1            | 8,7         | bal | 91,5    | 14,10                              |

## IZRADA ALATA

Brzorezni čelici isporučuju se u mekožarnom stanju, pa zbog toga kod potrošača čelika odnosno proizvodjača alata dolazi u obzir samo žarenje za otklanjanje unutrašnjih naprezanja 1 do 2 sata na 600°C. Neprecizna termička obrada ne može dati zadovoljavajuće osobine alata. Pogotovo to može biti problem kod čelika za rad u hladnom. Nekorektna termička obrada uzrok je za formiranje karbidnih linija i naročito štetnu poroznost. Poroznost materijala ima za posledicu degazaciju alata u toku procesa depozicije (faza zagrijavanja) pa to može uticati na adheziju sloja. U tom slučaju sloj mestimično odskače već u toku depozicije pa možemo naći mesta na kojima je zbog toga debljina sloja vrlo mala. Habanje alata je neočekivano veliko na slobodnim površinama. Metalografska analiza takvog materijala otkriva otvorenu poroznost i laminarnu strukturu posle završenog valjanja surovog materijala. Nekorektna termička obrada može uzrokovati i promene u obliku odnosno dimenzijama posle zagrevanja u toku depozicije.

Kod okretnih pločica od tvrdog metala poroznost takođe može biti uzrok za lošu adheziju sloja. Pored toga mikropukotine mogu biti direktni razlog za otkaz alata ako dolazi do oštećenja rezne ivice pa na taj način zaštitna prevlaka gubi svoju funkciju. Prekrivanje okretnih pločica PVD postupkom omogućuje baš smanjenje otkaza alata uzrokovanih lomom. Oštra rezna ivica koju dozvoljavaju PVD prevlake poželjna je zbog manjih sila rezanja pa prema tome i nižih reznih temperatura. U poređenju sa CVD tehnikom gde dolazi do stvaranja eta faze u graničnom sloju, PVD postupak ne smanjuje žilavost rezne ivice koju ima osnovni materijal. Žilavost rezne ivice od posebnog je značaja kod pločica za glodače glave. Širenje mikropu-

kotina kao posledica temperaturnih fluktuacija kod prekidanog rezanja znatno se smanjuje u prisustvu PVD prevlake TiN. Time se povećava pouzdanost alata iako otpornost na habanje kod PVD TiN prevlaka ostaje uporediva sa višeslojnom CVD prevlakom.

Priprema površine alata od presuđnog je značaja za performanse prekrivenog alata. Uslov za dobru adheziju sloja je potpuno čista površina bez ikakvih slojeva oksida, nitrida,..., i bez nekih drugih prevlaka.

Brušena radna površina alata je reakciona površina u procesu nanošenja prevlake a to znači da mora biti njezina topografija kao i fizičke i kemijske karakteristike optimalno usaglašene sa prevlakom odnosno procesom nanošenja. Plastične deformacije kod brušenja - radi se o mikropodručjima koja se deformišu pošto zrna točila odrivaju materijal - mogu biti uzrok za promene u termičkim karakteristikama površinskog sloja pa i za strukturne promene u takvom sloju sa debljinom 1 do 2 μm. Posledica je loša adhezija prevlake i otkaz alata. Točila sa zrnom od silicijum karbida odgovarajuće gradacije za gore navedene hrapavosti daju povoljne osobine površine, dok korundna točila pružaju više problema. Naravno, skidanje materijala kod brušenja mora biti veoma pažljivo i što manje, da bi izbegli pregrevanje i oksidaciju. Pored finog brušenja specijalna priprema alata za depoziciju obuhvata i mikropeskiranje. Tako pripremljena površina ne sadrži mikropukotine koja može biti prisutna na tragovima zrna kod brušenja korundom. Kod brušenja pregrevana površina uzrok je za lošu adheziju zbog degazacije materijala u toku depozicije. Posledica je opet habanje na slobodnoj površini. Zbog velikih unutrašnjih naprezanja u samoj prevlaci TiN može čak doći do prekida kohezivnih veza u površinskom, pregrenom sloju materijala pa će prevlaka da odskače zajedno sa slojem podloge. Isto tako površine obradjene elektroerozijom često sadrže tanak sloj sa martenzitnom strukturom loše kohezije. Sa takve površine prevlaka se ljušti zajedno sa delom podloge. U toku brušenja i poliranja može doći do stvaranja (10) tankog kvazioamorfognog područja (visoke lokalne temperature potpuno uništavaju zrna, uključuju se oksidni ostaci i ugljeni) zvanog Beilby-jev sloj. Beilby-jev sloj može biti praćen i poroznošću. Uzrok je za lošu adheziju i ljuštenje prevlake posle vrlo kratkog vremena upotrebe. Pored Beilby-jevih slojeva kod poliranih alata često nailazimo i na ostatak sredstava za poliranje koji su ugradjeni u površinu pa se ne skidaju kod standardnog postupka čišćenja. Obično se deponiraju mehaničko polirani alati, elektropoliranje ne daje dobru podlogu za prevlačenje. Zrna karbida koja ostaju na površini uzrokuju smanjenju adheziju i zbog toga prevlaka TiN nema traženi

efekat.

Hrapavost površine kritična je za performanse prekrivenih alata. Pošto je sloj  $TiN$  debljine 2 do 5  $\mu m$  (zavisno o nameni alata) hrapavost podloge mora biti ispod 4  $\mu m$  CLA. Optimalni rezultati postižu se sa boljom podlogom. Profilni noževi (Iskra - ERO, Kranj) postigli su faktor poboljšanja oko 4 sa standardnom hrapavošću 3 do 5  $\mu m$  CLA. Kod hrapavosti 1,5 do 2  $\mu m$  faktor poboljšanja se počeo na 6, a kod hrapavosti 0,5  $\mu m$  čak na 9. U tabeli 2 navedeni su neki rezultati odnosno prosečne vrednosti faktora poboljšanja za različite vrste alata i njihova hrapavost. Za razliku od nekih drugih PVD postupaka TiN prevlak proizvedene u aparaturi BAI 730 imaju vrlo sitno zrno veličine 0,05 do 0,07  $\mu m$  i praktično ne povećavaju hrapavosti alata. Za ilustraciju izmerili smo hrapavost poliranog uzorka Č.7680 pre i posle prevlačenja sa TiN slojem. Originalna hrapavost 0,05  $\mu m$  posle prevlačenja sa slojem debljine 3  $\mu m$  u standardnoj sadrži povećala se na 0,023  $\mu m$  CLA. Ovakav rezultat pokazuje da prevlaka ne kvari hrapavosti alata ni u slučaju poliranih alata.

TABELA 2.

| Vrsta alata        | Hrapavost alata površine $R_a$ ( $\mu m$ CLA) | Povećanje veka života (%) |
|--------------------|---|---------------------------|
| Burgije            | 2 - 5   | 300 - 500                 |
| Odvajna glodala    | 0,5 - 1,5                                     | 500 - 900                 |
| Rezna kola         | 0,5 - 1,5                                     | 600 - 900                 |
| Profilni noževi    | 0,1 - 0,5                                     | 500 - 1000                |
| Hladno kovanje     | 0,03 - 0,05                                   | 800 - 2000                |
| Hladno utiskivanje | 0,02 - 0,05                                   | 1000 - 5000               |

#### PRIPREMA ALATA ZA PREVLAČENJE

Po pravilu alati koji dolaze na prevlačenje nisu začovjavajućeg kvaliteta. (To može biti razumljivo no što proizvodjači u standardnom postupku ne vode računa o depoziciji). Prema tome neophodno je da se proces završne obrade alata a naročito brušenje prilagodi zahtevima depozicije.

Sam proces depozicije iako nije jedini odlučujući, veoma je značajan za kvalitet prevučenog alata. U nešto širem smislu proces zahvata kompletan postupak od prijema alata preko ulazne kontrole, čišćenja, predgrevanja i prevlačenja do izlazne kontrole. Na kraju krajeva značajno je i određivanje parametara u primeni besprekornog alata. Prijem alata i ulazna kontrola obuhvataju evidenciju, preliminarno čišćenje alata i pregled. Time se može

utvrditi većina grubih nedostataka na alatu, npr. pucnja, zaraljenje površine od brušenja, mehanička oštećenja i sl. Vizuelnim pregledom na stereolupi kontroliramo praktički sve alate. Jedino kod najjeftinijih tipova (npr. burgije) uzimaju se uzorci, a u slučaju negativnog rezultata opet se kontrolira čitava količina. Nažalost svi nedostaci nisu uočljivi kod ovakve kontrole pogotovo ako se radi o osobinama osnovnog materijala ili kod poliranih alata. Moguće su i sitne popravke alata. Neposredno pred depoziciju su alati podvrgnuti čišćenju. Standardni postupak obuhvata mokro hemijsko čišćenje sa ultrazvučnim probudjivanjem i otklanjanjem vode u freonu. Po potrebi upotrebljavaju se i mehaničke metode, npr. mikropeskiranje. Završno čišćenje je uvek zagrevanje u visokom vakuumu i jonsko nagrizanje neposredno pred depoziciju.

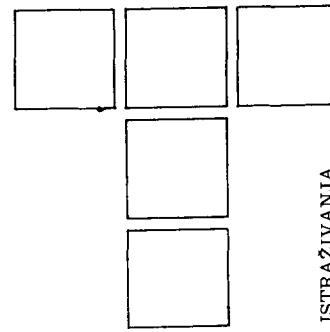
Različiti PVD postupci karakteristični su po načinu šaržiranja kao i po brzini depozicije  $TiN$ . Velike brzine depozicije mogu biti uzrok za defekte u sloju, koje bi mogli izbeći samo većom jonskom strujom na podlozi (alatima). Međutim, prevlakte struje mogu biti uzrok za prekomerno zagrevanje alata. Postoji i ozbiljan problem osobine prevlakte dakle određuju karakteristike postupka a time i njegovu ekonomiju.

Posle depozicije vrši se kontrola prevlakte koja obuhvata merenje debljine, mikrotvrdoće i adhezije sloja. Merenje unutrašnjih naprezanja moguće je ali nije standardno. U toku završne inspekcije mogu se uočiti nedostaci kao ljuštenje, promena boje, tragovi jonskih probaja i gubitak tvrdoće. Međutim, jedino nam destruktivno testiranje alata daje pravu sliku karakteristika prevučenog alata. Standardni postupak je testiranje burgija na forsiranom testu ali time dobijamo samo informaciju o korektnosti prevlače - nja ili ne i o tome da li su svi alati u šarži besprekorни.

U tabeli 3 navedeni su neki karakteristični rezultati za obične i prekrivene (JOSTIN<sup>R</sup> PVD prevlaka) alate.

#### PERSPEKTTVE

Pored razvoja novih materijala i novih prevlaka velike mogućnosti za optimizaciju primene alata u našoj industriji sigurno su još u usavršavanju hrušenja materijala. U mnogobrojnim kontaktima sa industrijom ustanovili smo da je kvalitetna obrada više izuzetak nego pravilo. Šire uvođenje točila sa sitnim zrnom za sporo oduzimanje materijala kod brušenja, hladjenje materijala, zaštita od korozije i mehaničkih ozleta samo su neki najvažniji aspekti u rukovanju sa alatima. Potrebno je bolje definisanje uslova brušenja i bolja ponovljivost parametara kod završne mehaničke obrade. Time bi se moglo postići konstantni-



# Pojam i metode definisanja obradivosti metala rezanjem

## UVOD

Obradivost materijala rezanjem najčešće se definiše kao "lakoća" odvijanja procesa obrade. Razlike u pristupu definisanju obradivosti nastaju kao posledica razlika u shvatanju pojma "lakoća" obrade.

Obradivost materijala treba shvatiti kao direktno nemjerljivu veličinu zavisnu od niza poznatih i slučajnih uticaja. Ovi uticaji vezani u prvom redu za strukturalna i mehanička svojstva obradjivanog materijala manifestuju se kroz izlazne parametre (habanje alata, otpori rezanja i temperature rezanja, kvalitet obradjene površine i druge) procesa rezanja.

Uporedjivanjem veličina izlaznih parametara moguće je preko indeksa obradivosti vršiti poređenje različitih materijala.

opravdanost ovakvog prilaza poređenju materijala po obradivosti leži u zavisnosti lakoće obrade od veličine ovih parametara. Lakoća obrade shvaćena u smislu postizanja kvalitetne obradjene površine uz minimalne troškove obrade daje nam pravo ovakvog zaključivanja.

Prema tome obradivost materijala rezanjem može se definisati preko:

- postojanosti alata,
- otpornosti alata na habanje,
- ekonomične brzine rezanja,
- otpora rezanja,
- temperatura rezanja,
- troškova obrade,
- hrapavosti obradjene površine,
- stanja materijala u površinskim slojevima predmeta obrade.

Indeks obradivosti dva materijala daje se kao odnos njihovih parametara usvojenih za meru obradivosti što se može prikazati relacijom:

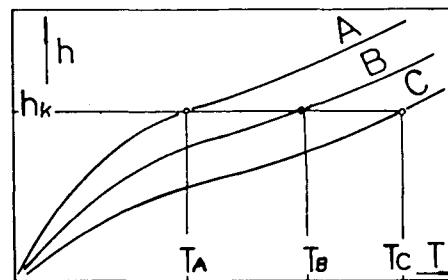
$$I_i = (P_i/P_o) \cdot 100 (\%) \text{ gde su:}$$

- $I_i$  - indeks obradivosti i-tog materijala
- $P_i$  - parametar obradivosti (postojanost alata, otpori rezanja itd.) i-tog materijala, pri određenom stepenu zatupljenosti alata
- $P_o$  - parametar obradivosti referentnog materijala.

## Obradivost i postojanost alata

Za najpotpunije definisanje obradivosti koristi se postojanost alata do koje se dolazi eksperimentalnim putem - bilo praćenjem razvoja procesa habanja reznog klina preko izabranog parametra habanja (kriva habanja), bilo merenjem otpornosti na habanje pri različitim stepenima pohabanosti alata.

Na osnovu dobijenih krivih habanja različitih materijala pri konstantnim uslovima obrade indeks obradivosti se može odrediti preko postojanosti alata za odgovarajuću vrednost kritične pohabanosti alata (sl. 1).



Slika - 1

$$I_{OA} = T_{KA}/T_{KC} \quad i \quad I_{OB} = T_{KB}/T_{KC}$$

Očigledno je da indeks obradivosti formiran na ovaj način zavisi od kriterijuma pohabanosti alata.

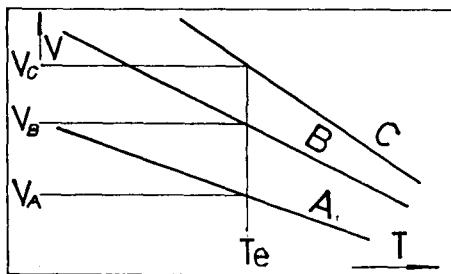
## Obradivost i ekonomična brzina rezanja

Do indeksa obradivosti različitih materijala može se doći uporedjivanjem odgovarajućih ekonomičnih grzina rezanja. Naime na osnovu eksperimentalnih krivih habanja za različite brzine rezanja i različite materijale mogu se dobiti zavisnosti  $v = f(T)$  za usvojeni kriterijum zatupljenja  $h_k$ . Na primer, na sl. 2. date su pomenute zavisnosti u duplom logaritamskom koordinatnom sistemu za tri materijala A, B i C:

$$v = C_A/T^m \text{ - za materijal A}$$

$$v = C_B/T^m \text{ - za materijal B}$$

$$v = C_C/T^m \text{ - za materijal C}$$



Slika - 2

Na osnovu proračunate vrednosti ekonomične postojanosti  $Te$  i ovih izraza može se doći do vrednosti ekonomične postojanosti za sve tri vrednosti obradjivanih materijala i definisati indeks obradivosti:

$$I_A = v_{eA}/v_{eC}$$

$$I_B = v_{eB}/v_{eC}$$

$$I_C = 1$$

pri čemu je materijal C usvojen kao referentni.

## Obradivost i troškovi obrade

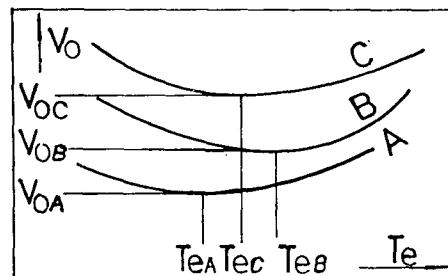
U ovom slučaju obradivost različitih materijala se upoređuje uporedjivanjem troškova obrade jednog komada koji se proizvodi u Z komada godišnje.

Vrednost obrade proizvodne operacije predstavlja sumu troškova alata ( $A$ ), troškova mašine ( $M$ ), vrednosti rada ( $R$ ) i troškova sredstava za hladjenje i podmazivanje ( $V_{shp}$ ):

$$V_o = A + M + R + V_{shp}$$

Vrednost obrade predstavlja složenu funkciju čiji minimum odgovara ekonomičnoj postojanosti alata  $Te$  (sl. 3). Međutim, minimum funkcije  $V_o$  može imati različite

nivo, što između ostalog zavisi od obradivosti materijala predmeta obrade. Ukoliko su poznate funkcije  $V_o = f(T)$



Slika - 3

za različite materijale pri konstantnim ostalim uslovima obrade, onda se može doći do odgovarajućih indeksa obradivosti:

$$I_A = F_{eA}/F_{eC}$$

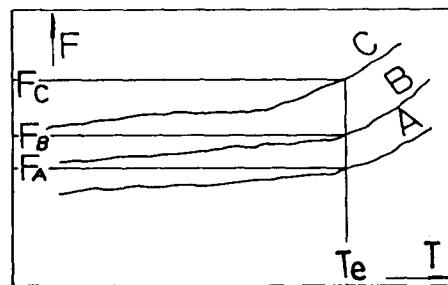
$$I_B = F_{eB}/F_{eC}$$

$$I_C = 1$$

## Obradivost i otpori rezanja

Merenjem komponenti otpora rezanja moguće je formirati dijagramske zavisnosti otpora rezanja  $F_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) od vremena rezanja (odnosno, stepena pohabanosti alata). Pri tome treba istaći da ne postoji tačno definisana veza između povećanja otpora rezanja i razvoja procesa habanja na reznom elementu alata.

Ideja o određivanju obradivosti materijala merenjem odgovarajućih otpora rezanja zasniva se na razlikama koje postoje u zavisnostima  $F_i = f(T)$  za različite materijale obradjivane pri nepromjenjenim ostalim uslovima obrade (sl. 4).



Slika - 4

Za određeni stepen pohabanosti alata, ili nov alat, moguće je iskazati indeks obradivosti materijala:

$$I_A = F_{eA}/F_{eC}$$

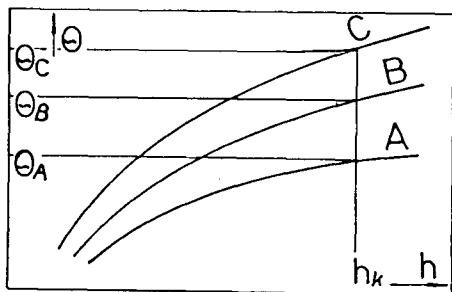
$$I_B = F_i_B / F_i_C$$

$$I_C = 1$$

Za korišćenje ovog prilaza potrebno je poznavati i vezu  $F_i = f(h)$ .

#### Obradivost i temperatura rezanja

Eksperimentalna istraživanja nedvosmisleno pokazuju da porast pohabanosti alata prati povećanje temperaturne rezanja (sl. 5). Pri tome količina toplosti koja se generiše u zoni rezanja i nivo temperaturne rezanja (srednjih i kontaktnih) zavise od fizičko-mehaničkih karakteristika obradjivanog materijala. Zbog toga se u istraživačkoj



Slika - 5

praksi za uporedjivanje obradivosti materijala koristi i metod uporedjivanja temperaturna rezanja za određeni stepen pohabanosti alata:

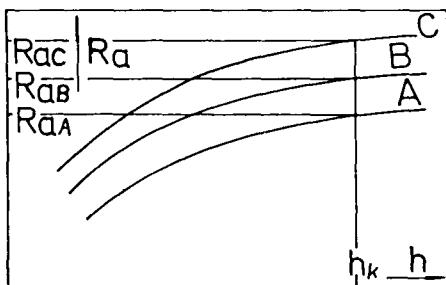
$$Ii = \theta_i / \theta_0$$

$\theta_i$  - temperatura rezanja  $i$ -og materijala

$\theta_0$  - temperatura rezanja referentnog materijala

#### Obradivost i hrapavost obradjenih površina

Posledice koje proces rezanja ostavlja na predmetu obrade često se takođe uzimaju kao mera obradivosti materijala, mada u mnogo manje slučajeva nego što se to



Slika - 6

čini sa parametrima habanja alata.

Sa porastom pohabanosti alata rastu i visinski parametri hrapavosti površine. Dok se, pri obradi oštrim alatom, ili pri bilo kom stepenu zatupljenja alata hrapavost obradjene površine biće različita za različite materijale predmeta obrade. Prema tome, ukoliko se kao parametar hrapavosti usvoji Ra, kao na sl. 6, onda se indeks obradivosti može izraziti relacijom:

$$Ii = Ra_A / Ra_C$$

$$i = A, B$$

#### STATISTIČKI PRISTUP DEFINISANJU OBRADIVOSTI

Način definisanja obradivosti dat u prethodnom razmatranju ima principski karakter.

Praktično iznalaženje indeksa obradivosti podrazumeva niz prethodnih koraka u organizaciji eksperimenta i obradi rezultata, kojima se uzima u obzir stohastička priroda obradivosti. Oni se odnose na izbor uzoraka upoređivanih materijala, ostvarivanje istovetnih uslova ispitivanja, utvrđivanje karaktera dobijenih razlika izlaznih parametara i pokazatelja granica njihovog rasturanja.

Pošto uzorci predstavljaju reprezentante osnovnih populacija materijala iz kojih su uzeti, njihovom izboru mora se posvetiti pažnja u smislu davanja podjednake šanse svakom elementu uzorka da bude izabran.

Ispitivanje svih elemenata uzorka mora se obaviti sa istom instrumentacijom pri nepromjenjenosti parametra uslova obrade. Ovo je važan preuslov za pouzdanu ocenu karaktera nastalih razlika izlaznih parametara, nalaženje pokazatelja obradivosti i određivanje granica njegovog rasturanja procenom iz uzorka. Nakon iznalaženja ovih pokazatelja može je po indeksima poređiti različite materijale.

#### Karakter i mera rasturanja pokazatelja obradivosti

U obradi rezultata eksperimenta dobijenih ispitivanjem r elemenata uzorka istog materijala sa stanovišta usvojenog kriterijuma postavljaju se sledeća osnovna pitanja:

- možu li se nastale razlike izlaznih parametara smatrati bitnim ili iste imaju slučajan karakter,
- kako pojedine elemente uzorka poređiti po obradivosti,
- kako na osnovu uzorka oceniti obradivost osnovne populacije iz koje je uzorak uzet.

Deo matematičke statistike (disperziona analiza) može naći primenu u obradi rezultata eksperimenta i oceni

obradivostimaterijala. Kako je naglašeno obradivost zavisi od niza uticajnih faktora koji se ne mogu iskazati u funkcionalnom obliku. Iz ovog razloga sve izlazne parametre pri obradi možemo smatrati slučajnim veličinama sa svojim matematičkim očekivanjem i disperzijom. Logično je pretpostaviti da ove veličine imaju normalnu raspodelu verovatnoća.

Disperzionom analizom možemo uzeti u obzir uticaj jednog ili dva parametra - reč je o jednostrukoj ili dvostrukoj klasifikaciji. U slučaju jednostrukih klasifikacija razmatraće se disperziona analiza otpora rezanja na uzorku od  $r$  elemenata. Problem se svodi na testiranje hipoteze ( $H_0$ ) što se matematički može prikazati u obliku:  $H_0 (\mu F_{11} = \mu F_{12} = \dots = \mu F_{ij} = \dots = \mu F_{rn})$ , gde je:

$\mu$  - matematičko očekivanje sile

$F$  - jedan od komponentnih otpora rezanja

Rezultate eksperimenta pogodno je prikazati u obliku  $r$  vrsta.

$j$  - broj ponavljanja eksperimenta

| element uzorka | $A_1$ | $F_{11} F_{12} F_{13} \dots F_{1j} \dots F_{1(n_1-1)} F_{1n_1}$ |  |  |  |  |  |  |  |
|----------------|-------|---|--|--|--|--|--|--|--|
|                |       | $F_{21} F_{22} F_{23} \dots F_{2j} \dots F_{2(n_2-1)} F_{2n_2}$ |  |  |  |  |  |  |  |
| $i$            | $A_i$ | $F_{i1} F_{i2} F_{i3} \dots F_{ij} \dots F_{i(n_i-1)} F_{in_i}$ |  |  |  |  |  |  |  |
|                | $A_r$ | $F_{r1} F_{r2} F_{r3} \dots F_{rj} \dots F_{r(n_r-1)} F_{rn_r}$ |  |  |  |  |  |  |  |

Radi testiranja hipoteze potrebno je prethodno izračunati srednje vrednosti:

$$\bar{F}_i = 1/n_i \left( \sum_{j=1}^{n_i} F_{ij} \right) \text{ i } \bar{F} = 1/n \left( \sum_{i=1}^r \bar{F}_i \right) \text{ a potom dekonponovanje zbirove:}$$

$$Q_1 = \sum_{i=1}^r n_i (\bar{F}_i - \bar{F})^2 \text{ i } Q_2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^{n_i} (F_{ij} - \bar{F}_i)^2$$

Na osnovu ovih veličina izračunavamo disperzije  $S_1^2 = Q_1/(r-1)$  i  $S_2^2 = Q_2/(n-r)$  gde je  $n = n_1 + n_2 + n_3 + \dots + n_r$ . Veličina  $\phi = S_1^2/S_2^2$  ima Fišerovu raspodelu (sl. 7) sa  $k_1 = r-1$  i  $k_2 = n-r$  stepeni slobode. Iz podataka datih prethodnom šemom izračunavamo veličinu  $\phi_0 = S_1^2/S_2^2$ . Ako je hipoteza  $H_0$  tačna, onda je verovatnoća da  $\phi$  uzme vrednost  $\phi_0 > C = \phi_{\alpha}^{k_1, k_2}$  jednaka  $\alpha$ . Ovdje ( $C$ ) kritičnu vrednost za koju je verovatnoća  $P(\phi > \phi_0) = \alpha$ .

Pošto je verovatnoća  $\alpha$  (verovatnoća rizika) mala, najčešće 0,05 ili 0,01 nemamo osnova da prihvati hipotezu  $H_0$ . Veličina  $\phi_1, \phi_2$  nalazi se iz statističkih tabela za Fišerovu raspodelu. Ovaj test nam omogućava da se 95% ili 99% sigurnosti utvrdimo karakter nastalih razlika izlaznih parametara. U slučaju dvostrukih klasifikacija moguće je istovremeno pratiti dva bilo koja parametra. Razmatraće se

promena otpora pri različitim vrednostima pohabanosti alata. Ispitivani uzorak uredjuje se u tabeli sa  $r$  vrsta i  $s$  kolona.

| $i \backslash j$ | $h_1$    | $h_2$    | $h_3$    | $h_4$    | $\dots$  | $h_j$    | $\dots$  | $h_{s-1}$    | $h_s$    |
|------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|----------|
| $A_1$            | $F_{11}$ | $F_{12}$ | $F_{13}$ | $F_{14}$ | $\dots$  | $F_{1j}$ | $\dots$  | $F_{1(s-1)}$ | $F_{1s}$ |
| $A_2$            | $F_{21}$ | $F_{22}$ | $F_{23}$ | $F_{24}$ | $\dots$  | $F_{2j}$ | $\dots$  | $F_{2(s-1)}$ | $F_{2s}$ |
| $\vdots$         | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$     | $\vdots$ |
| $A_i$            | $F_{i1}$ | $F_{i2}$ | $F_{i3}$ | $F_{i4}$ | $\dots$  | $F_{ij}$ | $\dots$  | $F_{i(s-1)}$ | $F_{is}$ |
| $\vdots$         | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$ | $\vdots$     | $\vdots$ |
| $A_r$            | $F_{r1}$ | $F_{r2}$ | $F_{r3}$ | $F_{r4}$ | $\dots$  | $F_{rj}$ | $\dots$  | $F_{r(s-1)}$ | $F_{rs}$ |

Testiraćemo hipotezu o jednakosti otpora rezanja za različite vrednosti pohabanosti alata na uzorku od  $n=r s$  elemenata. Za testiranje ove hipoteze potrebno je izračunati srednje vrednosti

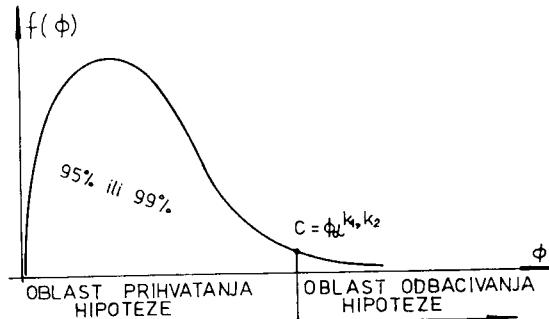
$$\bar{F}_{io} = 1/s \sum_{j=1}^s F_{ij}, \bar{F}_{oj} = 1/r \sum_{i=1}^r F_{ij} \text{ i } \bar{F} = 1/n \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s F_{ij}$$

a zatim odrediti dekonponovane zbirove

$$Q_1 = \sum_{i=1}^r (\bar{F}_{io} - \bar{F})^2, Q_2 = \sum_{j=1}^s (\bar{F}_{oj} - \bar{F})^2$$

$$Q_3 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^s (F_{ij} - \bar{F}_{io} - \bar{F}_{oj} + \bar{F})^2. \text{ Veličina } C_1 \text{ naziva}$$

se zbirom kvadrata odstupanja izmedju vrsta, dok veličina  $C_2$  predstavlja zbir kvadrata odstupanja izmedju kolona. Veličina  $C_3$  naziva se greškom kvadrata odstupanja, ona predstavlja varijaciju koja ostaje posle izdvajanja varijacije od uticaja oba faktora (tipa uzorka i habanja alata u ovom slučaju).



Slika - 7

Vrednosti disperzija date su izrazima:

$$S_1^2 = Q_1/(r-1), S_2^2 = Q_2/(s-1) \text{ i } S_3^2 = Q_3/(r-1)(s-1).$$

Veličine  $\phi_1$  i  $\phi_2$  imaju Fišerovu raspodelu sa  $s-1, (r-1)(s-1)$

stepleni slobode, a odredjene su izrazima:  $\phi_1 = S_1^2/S_3^2$  i  $\phi_2 = S_2^2/S_3^2$ . Za unapred izabranu vrednost kritičnog koeficijenta (0,05 ili 0,01) iz statističkih tabela za Fišerovu raspodelu načizimo kritične vrednosti:

$c_1 = \phi^{r-1, (r-1)(s-1)}$  i  $c_2 = \phi^{s-1, (r-1)(s-1)}$ . U slučaju da je  $\phi_1 \leq c_1$  znači da nema značajnih razlika između vrsta, dok u suprotnom razlika između vrsta postoji.

Ako je  $\phi_2 \leq c_2$  znači da nema značajnih razlika između kolona, dok u suprotnom razlika postoji. Pojedine grupe podataka mogu se izuzeti iz razmatranja pa na ostale primeniti test. Ovakvim razmatranjem može se doći do saznanja o razlici u obradivosti pojedinih elemenata u uzorku. Test se ponavlja  $r$  puta sa izbacivanjem jednog elementa iz razmatranja, što se može prikazati u obliku šeme.

|        |                           |                            |                                |
|--------|---------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| $\phi$ | $a_2$                     | $a_3 \dots a_i \dots a_r$  | $\longrightarrow \phi_1^-$     |
| $a_1$  | $\phi$                    | $a_3 \dots a_i \dots a_r$  | $\longrightarrow \phi_2^-$     |
| $a_1$  | $a_2$                     | $\phi \dots a_i \dots a_r$ | $\longrightarrow \phi_3^-$     |
| .      | .                         | .                          | .                              |
| .      | .                         | .                          | .                              |
| $a_1$  | $a_2 \dots \dots \phi$    | $a_r$                      | $\longrightarrow \phi_{r-1}^-$ |
| $a_1$  | $a_2 \dots \dots a_{r-1}$ | $\phi$                     | $\longrightarrow \phi_r^-$     |

Indeksi ( $\bar{I}_1, \bar{I}_2 \dots$ ) pokazuju koji je element uzorka izuzet iz razmatranja. Izračunate veličine ( $\phi_1^-, \phi_2^-, \dots, \phi_r^-$ ) treba poredjati po rastućim vrednostima.

Najveća vrednost  $\phi_{\bar{I}}$ , znači da test te kombinacije elemenata uzorka sa najvećom verovatnoćom odbacuje hipotezu o jednakosti elemenata uzorka sa aspektom obradivosti. Ovaj zaključak povlači sledeću tvrdnju:

Od svih elemenata uzorka najpogodniji je sa aspektom obradivosti izuzeti  $k$ -ti element.

Indeks obradivosti može se dati i kao odnos  $(\bar{x}/\bar{x}_i) \cdot 100\%$  u slučaju jednostrukе klasifikacije ili kao  $(\bar{x}/\bar{x}_{io}) \cdot 100\%$  u slučaju dvostrukе klasifikacije. Oznake u izrazima imaju sledeće značenje:

$\bar{x}_i, \bar{x}_{io}$  - srednja vrednost merenog parametra određenog elementa uzorka (otpor rezanja u prethodnom razmatranju).

$\bar{x}$  - srednja vrednost merenog parametra svih elemenata uzorka.

U slučaju da je  $\bar{x}_i < \bar{x}$  ili  $\bar{x}_{io} < \bar{x}$  dati uzorak će imati indeks obradivosti veći od 100%.

Ovim pokazateljem takođe je moguće poređiti elemente uzorka po obradivosti.

Ovako definisani indeks obradivosti predstavlja matematičko očekivanje indeksa obradivosti osnovne populacije i u njoj ima normalnu raspodelu verovatnoća.

Na osnovu ovog zaključka možemo sa velikom pouzdanom vrednosti proceniti indeks obradivosti osnovne populacije serije. Naime, odredujemo sa velikom verovatnoćom interval u kome se rasturaju indeksi obradivosti u seriji. Interval pouzdanosti u slučaju da broj elemenata u uzorku bude manji od 30 odredujemo preko Studentove slučajne promenljive (sl. 8), date izrazom:

$$T = (\bar{I} - \mu)/(S/\sqrt{r}) \quad \text{gde je:}$$

$\bar{I}$  - srednja vrednost indeksa obradivosti uzorka

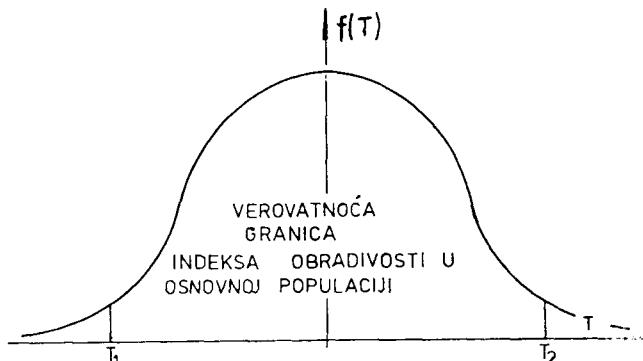
$\mu$  - srednja vrednost indeksa obradivosti osnovne populacije (serije)

$S$  - empirijska disperzija indeksa obradivosti definisana izrazom:

$$S^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{i=1}^r (\bar{I}_i - \bar{I})^2$$

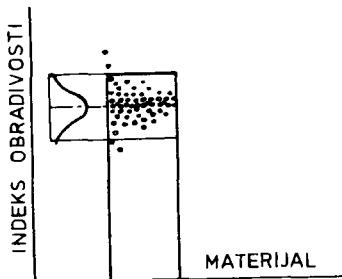
Iz datog uzorka dobijamo veličine  $\bar{I}$  i  $S$  pa su granice intervala pouzdanosti  $\bar{I} - t\alpha \cdot \frac{S}{\sqrt{r}}$  i  $\bar{I} + t\alpha \cdot \frac{S}{\sqrt{r}}$  gde se ( $t\alpha$ ) bira iz statističkih tabela za Studentovu raspodelu sa  $(r-1)$  stepenom slobode. Interval pouzdanosti se najčešće određuje sa koeficijentom pouzdanosti od 95% ili 99%.

Ako je broj ispitivanih elemenata u uzorku veći od 30, interval pouzdanosti odredujemo preko normalne slučajne promenljive, tako da su granice u intervalu  $\bar{I} - k \frac{S}{\sqrt{r}}$  i  $\bar{I} + k \frac{S}{\sqrt{r}}$ . Za željeni koeficijent pouzdanosti biramo vrednosti za  $k$  iz statističkih tabela za normalnu raspodelu. U ovom slučaju prilikom izračunavanja disperzije treba umesto  $(r-1)$  uzeti  $r$ .

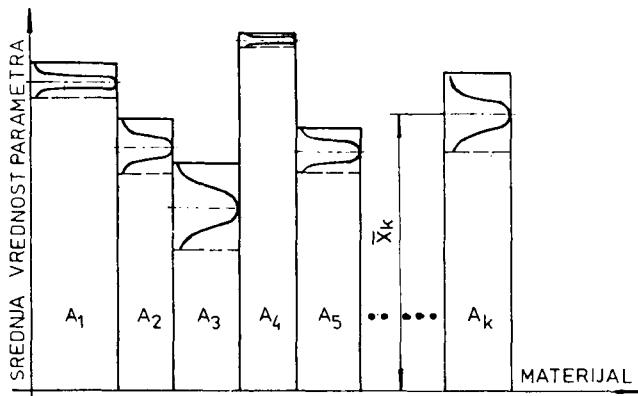


Slika ~ 8

Grafički prikaz indeksa obradivosti jednog materijala sa granicama rasturanja dat je na sl. 9 a rasturanje oko srednje vrednosti jednog izlaznog parametra za različite materijale prikazano je na sl. 10.



Slika - 9



Slika - 10

#### POREDJENJE PO OBRADIVOSTI RAZLIČITIH MATERIJALA

Indeks obradivosti definisan kao odnos  $(\bar{X}/\bar{X}_i)$  ili  $(\bar{X}/\bar{X}_{i_0})$  u prethodnom razmatranju, ne bi mogao poslužiti kao veličina za poređenje materijala po obradivosti.

Njegova svrha bila je određivanje granica rasturanja i poređenje uzorka po obradivosti.

Dalje izlaganje odnosiće se na jedan od mogućih načina ocene obradivosti različitih materijala po bilo kom parametru. Razmatraće se poređenje preko indeksa obradivosti, materijala označenih sa  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_k$ .

Jedan od k poređenih materijala treba usvojiti kao referentni tako da je njegova srednja vrednost indeksa obradivosti 100%. Srednje vrednosti indeksa obradivosti ostalih materijala mogu se računati po izrazima:

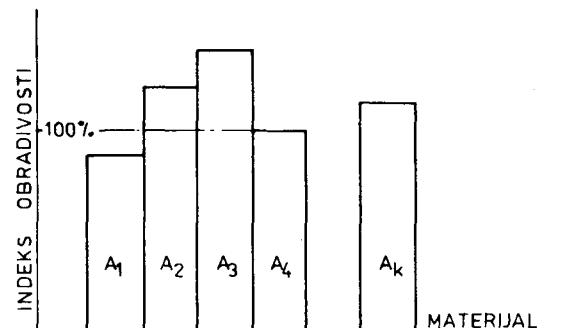
$$\bar{I}_{A1} = (\bar{X}_{ref}/\bar{X}_{11}) \cdot 100\%, \bar{I}_{A2} = (\bar{X}_{ref}/\bar{X}_{A2}) \cdot 100\%, \dots, \\ \bar{X}_{Ak} = (\bar{X}_{ref}/\bar{X}_{Ak}) \cdot 100\% \text{ gde oznake u izrazima imaju značenje:}$$

$\bar{I}_{Ak}$  - srednja vrednost indeksa obradivosti  $k$ -tog materijala,

$\bar{I}_{ref}$  - srednja vrednost praćenog parametra referentnog materijala

$\bar{X}_{Ak}$  - srednja vrednost praćenog parametra  $k$ -tog materijala.

Histogramski prikaz indeksa obradivosti različitih materijala dat je na sl. 11.



Slika - 11

#### ZAKLJUČAK

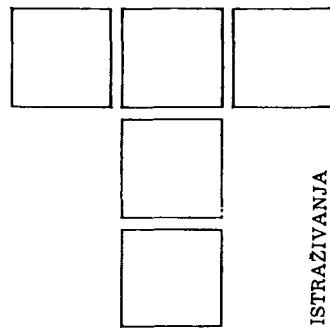
Metodologija definisanja obradivosti izložena u ovom radu pruža mogućnost procene odstupanja različitih parametara pri obradi jednog materijala kao i poređenje po obradivosti različitih materijala preko usvojenog parametra obrade.

Poznavanje granica rasturanja praćenih parametara kod serija materijala poput sivog liva može biti i ključni pokazatelj za analizu troškova obrade date serije. Procena obradivosti osnovne populacije na osnovu malog uzorka pruža mogućnost brzog ispitivanja i obrade rezultata potrebnih za poređenje materijala po obradivosti. Naime, za određivanje pokazatelja obradivosti ovom metodom nije potrebno formirati analitičke zavisnosti pojedinih veličina.

Praćenje obradivosti preko dva izlazna parametra (disperziona analiza u slučaju dvostrukе klasifikacije) takođe ne zahteva poznavanje analitičkih zavisnosti parametara a daje potpuniju integralnu ocenu o karakteru razlika parametara kao i mogućnost poređenja materijala po obradivosti.

#### LITERATURA

- [1] B. IVKOVIĆ, Obrada metala rezanjem, izbor ekonomičnih režima rezanja, V izdanje, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1985.
- [2] S. VUKADINović, Elementi teorije verovatnoće i matematičke statistike, Privredni pregled, Beograd, 1973.



ISTRAŽIVANJA

# Poboljšanje uslova rada kroz izbor sredstava za hladjenje i podmazivanje u obradi odvalnim glodanjem \*

## 1. UVOD

Pri većim brzinama rezanja (iznad 50 m/min) posebno u uslovima primene savremenih reznih alata (presvučenih ili na drugi način opremljenih odvalnih glodala) razvija se značajna količina toplice, koju čista ulja za rezanje ne mogu odvesti. Usled toga dolazi do sagorevanja pojedinih komponenti čistih ulja za rezanje ("pušenja" ulja), stvaranja otrovnih para, pojave neprijatnog mirisa i drugih vidova zagadjenja mikroklima na radnim mestima. Istovremeno sa povećanjem koncentracije hemijskih štetnosti dolazi i do promene viskoznosti i triboloških karakteristika čistih ulja za rezanje. Sve ove pojave i promene koje prate primenu čistih ulja za rezanje, u savremenim proizvodnim uslovima, dovode i do smanjenja postojanosti reznog alata.

Polazeći od navedenih činjenica, u Laboratoriji za obradu metala i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, razvijen je program laboratorijskih i proizvodnih - eksploracionih ispitivanja mogućnosti zamene čistih ulja za rezanje emulzijama mineralnih i polusintetičkih emulzirajućih ulja. Rezultati preliminarnih laboratorijskih ispitivanja primene emulzija polusintetičkih emulzirajućih ulja [2] su pokazali da je njihova primena u procesu odvalnog glodanja moguća. Pored toga, rezultati pokazuju i da je intenzitet habanja reznih elemenata alata i kvalitet obradjene površine približno isti kao i kod primene čistih ulja za rezanje.

Proizvodna-eksploatacijska ispitivanja izvode se u uslovima karakterističnim za proces izrade zupčanika u OOUR-u Mehanička obrada - RO Zastava Jugo automobili Zavoda "Crvena zastava" u Kragujevcu. Te uslove karaktere-

rišu tehnologijom utvrđena rešenja, što znači da se ispitivanja izvode u toku realizacije proizvodnog programa, bez njegovog narušavanja. Prikaz dela dobijenih rezultata sa neophodnim razjašnjenjima i analizama je osnova rada.

## 2. PROGRAM I USLOVI ISPITIVANJA

Ispitivanja mogućnosti zamene čistih ulja za rezanje emulzijama, u procesu odvalnog glodanja, izvedena su i izvode se sa ciljem analize i ocene uticaja vrste i koncentracije sredstava za hladjenje i podmazivanje na:

- nivo koncentracije hemijskih štetnosti na radnim mestima (nivo zagadjenja mikroklima),
- tačnost izrade i kvalitet obrade bočnih površina zuba zupčanika,
- intenzitet habanja reznih elemenata i postojanost alata,
- nivo troškova poslovanja sa sredstvima za hladjenje i podmazivanje,
- produktivnost živog i minulog rada i sl.,

na radnim mestima na kojima se izvodi obrada odvalnim glodanjem (izrada zupčanika).

Osnovu ispitivanja, u prvoj fazi, čini ocena mogućnosti primene emulzija u procesu izrade zupčanika sa aspekta nivoa zagadjenja mikroklima. U tom cilju ostvareno je sistematsko praćenje procesa izrade zupčanika kroz:

- snimanje parametara zagadjenja mikroklima,
- merenje veličine radijalnog bacanja zuba zupčanika,
- identifikovanje odstupanja profila evolvente i pravca zuba zupčanika,

\*) Saopštenje je proizašlo iz rada na naučno-istraživačkom projektu "Istraživanje mogućnosti zamene čistih ulja za rezanje emulzijama" - deo NTP-a "Razvoj produktivnosti i ekonomičnosti u funkciji triboloških procesa na sredstvima rada u čijem finansiranju učestvuju OOUR Mehanička obrada - RO ZJA, OOUR Mehanička obrada - RO FPV, Osnovna zadržavajuća jedinica nauke regiona Šumadije i Pomoravlja i Republička zajednica nauke SR Srbije.

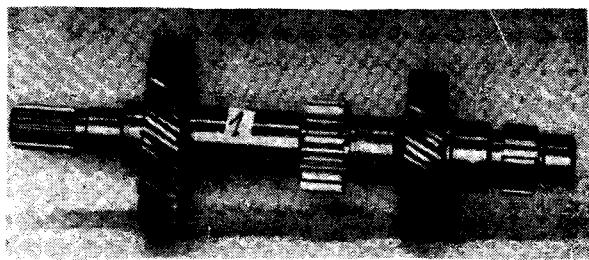
- marenje parametara hravosti obradjenih bočnih površina zuba zupčanika,
- snimanje profila i identifikovanje parametara profila bočnih površina zuba zupčanika,
- formiranje krivih habanja karakterističnih (najopterećenijih) reznih elemenata pojedinih česljeva alata i
- identifikovanje vrednosti parametara habanja svih reznih elemenata alata, nakon obrade odgovarajuće serije zupčanika.

Uslovi izrade zupčanika definisani su sledećim parametrima:

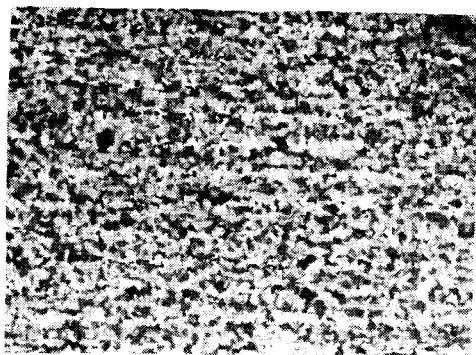
- sredstvo za hladjenje i podmazivanje: čisto ulje za rezanje (propisano tehnologijom) i 6%-tina emulzija mineralnog emulgirajućeg ulja,
- predmet obrade: zupčanik putničkog automobila (sl. 1) modula  $m = 2$  mm sa  $z = 24$  zuba,

- mašina: odvalna glodalica visoke krutosti i stabilitetu tipa PFAUTER RA-180 (sl. 2),
- rezni alat: odvalno glodalo prečnika 90 mm sa 12 česljeva i brojem reznih elemenata česlja od 20-21,
- materijal alata: Č.9780,
- režim obrade: brzina rezanja 62 m/min i aksijalni korak 3,15 mm/o i sl.

Ispitivani zupčanik je izradjen od čelika Č.7422. Tehnološko metalurška ispitivanja materijala zupčanika izvedena u Zavodima "Crvena zastava" su pokazala da materijal odgovara tehničkim uslovima i standardima u pogledu hemijskog sastava (tabela 1), tvrdoće, mikrostrukture i usmerenosti (izdiferencirana struktura ferita i laminarnog perlita neznatno trakava, stepen 1 - sl. 3), kao i u pogledu mikročistoće (odredjene po JK skali, UNI-3244, tablica 2) i veličine austenitnog zrna - 9ASTM (određene metodom trustitne mreže saglasno ASTM 112-63).



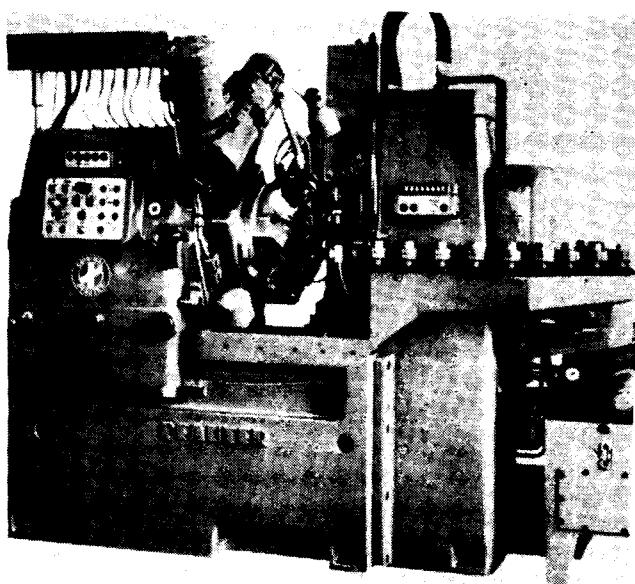
Sl. 1. - Izgled predmeta obrade



Sl. 3. - Mikrostruktura matrijala zupčanika  
(uvećanje x 100)

TABELA 1: Uporedni pregled hemijskog sastava materijala prema tehničkim uslovima i identifikovanog na uzorku

|                          | Sadržaj (%) |           |           |           |
|--------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|
|                          | C           | Mn        | Si        | Ni        |
| Prema tehničkim uslovima | 0,18-0,23   | 0,70-0,90 | 0,35      | 0,40-0,70 |
| Uzorak                   | 0,18        | 0,78      | 0,30      | 0,62      |
| Sadržaj (%)              |             |           |           |           |
|                          | Cr          | Mo        | S         | P         |
| Prema tehničkim uslovima | 0,40-0,60   | 0,15-0,25 | 0,02-0,04 | ≤ 0,035   |
| Uzorak                   | 0,60        | 0,21      | 0,02      | 0,022     |



Sl. 2. - Izgled mašine na kojoj su izvedena ispitivanja

TABELA 2: Pregled vrste i veličine uključaka

| Vrsta         | Veličina |
|---------------|----------|
| A - sulfidi   | 1        |
| B - oksidi    | -        |
| C - silikati  | -        |
| D - aluminati | 3        |

i - u uslovima primene čistih ulja za rezanje sadržaj ugljen-monoksida i ugljen-dioksida je u granicama

### 3. REZULTATI I ANALIZA REZULTATA ISPITIVANJA

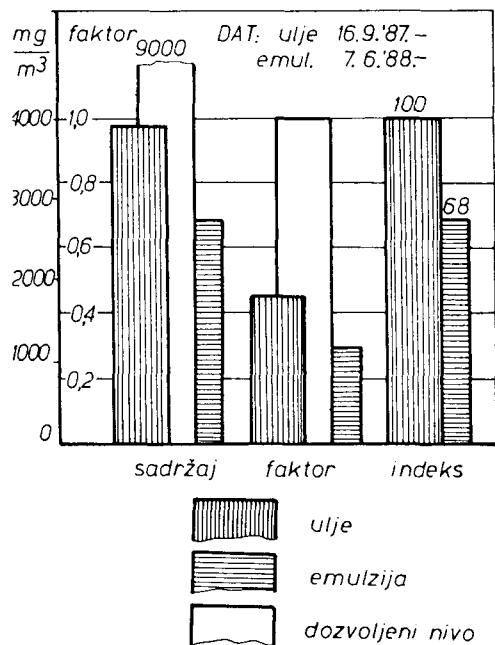
#### 3.1. Nivo zagađenja mikroklima

Merenja koncentracije hemijskih štetnosti, na i u okolini radnih mesta na kojima se izvodi izrada zupčanika, izvedena su od strane Zavoda za medicinu rada SOUR-a Zavodi "Crvena zastava" iz Kragujevca. Merenjima izvedenim prema svim pravilima, propisima i standardima zaštite na radu, identifikovan je sadržaj:

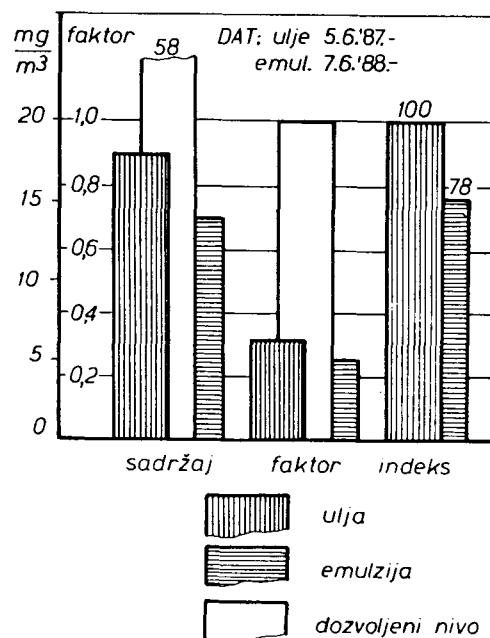
- minearnih ulja,
- akroleina,
- uljen-monoksida i
- ugljen-dioksida

u uslovima primene kako čistih ulja za rezanje tako i emulzija mineralnih emulgirajućih ulja.

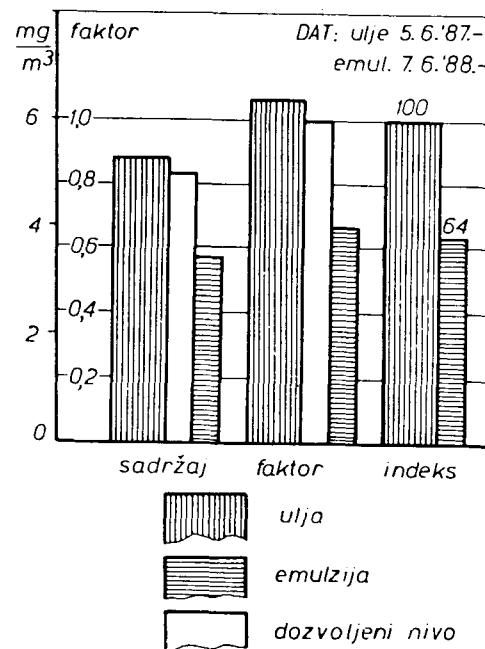
Rezultati praćenja koncentracije hemijskih štetnosti prikazani na sl. 4, 5, 6 i 7, ukazuju na nekoliko evidentnih činjenica:



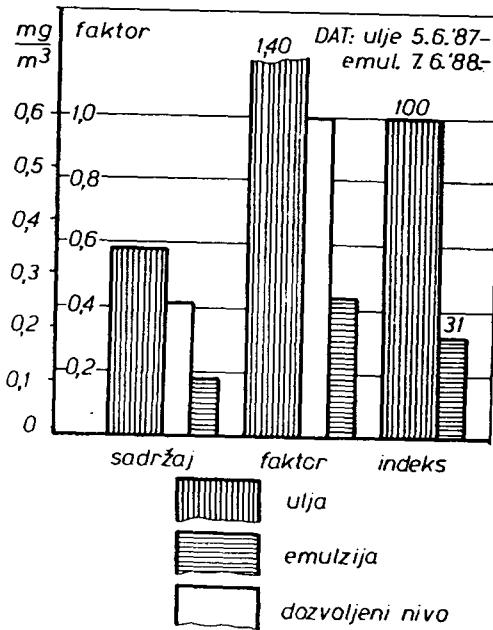
Sl. 4. - Uporedni prikaz sadržaja ugljen - dioksida



Sl. 5. - Uporedni prikaz sadržaja ugljen-monoksida



Sl. 6. - Uporedni prikaz sadržaja mineralnog ulja



Sl. 7. - Uporedni prikaz sadržaja akroleina

dozvoljenog nivoa (stvarni faktor sadržaja 0,31 za CO odnosno 0,44 za CO<sub>2</sub>), dok sadržaj mineralnog ulja (faktor 1,06) i akroleina (faktor 1,4) značajno prevaziđa granice dozvoljenog nivoa (faktor 1),

ii - u uslovima primene emulzija koncentracija hemijskih štetnosti je znatno ispod dozvoljenog nivoa i iznosi za:

- uljen-dioksid, faktor 0,30,
- uljen-monoksid, faktor 0,24,
- mineralna ulja, faktor 0,68 i
- akrolein, faktor 0,44,

iii - primena emulzija obezbeđuje smanjenje koncentracije hemijskih štetnosti u odnosu na primenu reznih ulja. To je očigledno na osnovu 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.

Očigledno je da se primenom emulzije mineralnog emulgirajućeg ulja obezbeđuje poboljšanje uslova rada i smanjenje nivoa zagadjenja mikroklima u procesu izrade zupčanika.

### 3.2. Kvalitet izrade zupčanika

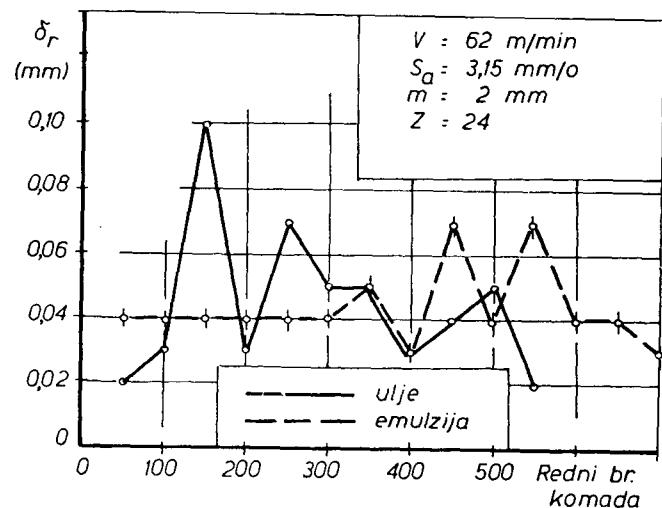
Kvalitet izrade zupčanika kao jedan od parametara ocene mogućnosti primene emulzija u procesu odvalnog gledanja praćen je preko:

- veličine radijalnog bacanja,

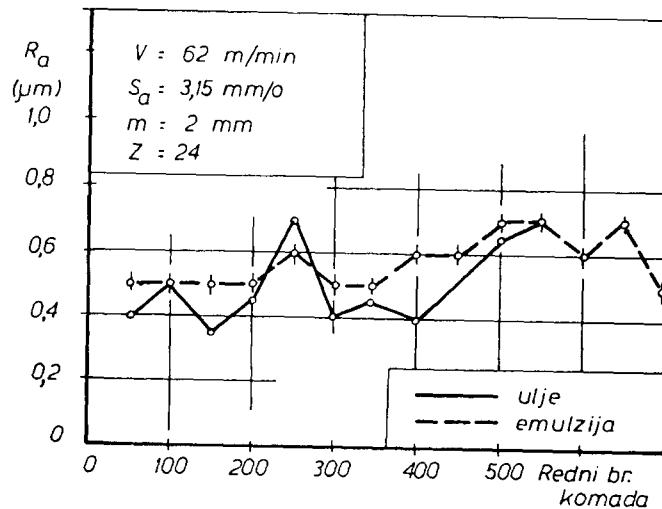
- odstupanja profila evolvente i pravca zuba zupčanika i

- parametara kvaliteta obradjene površine zuba zupčanika (bočnih površina zuba zupčanika), kao što su srednje aritmetičko odstupanje od srednje linije profila  $R_a$ , kriva nošenja profila i sl.

Deo rezultata prikazan na sl. 8, 9, 10 i 11 pokazuje da su parametri kvaliteta obradjenih površina i tačnosti

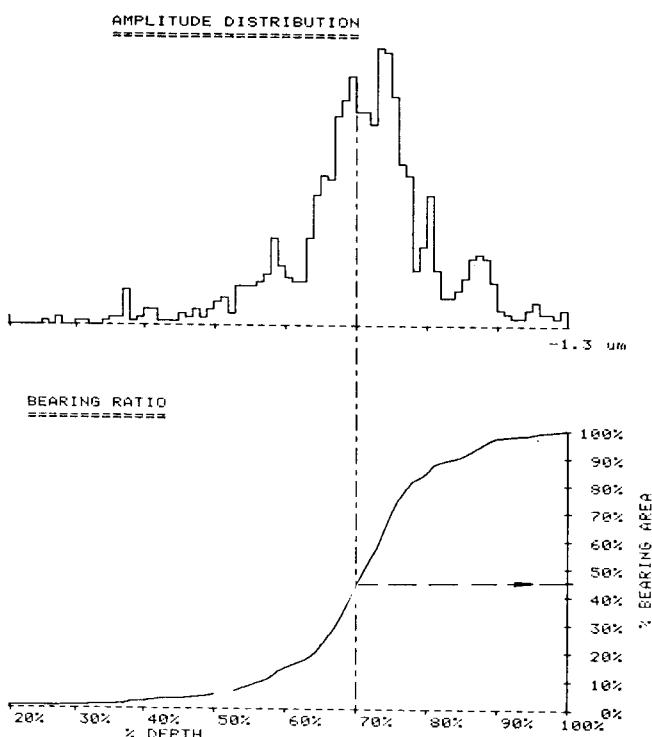


Sl. 8. - Vrednost radijalnog bacanja zuba zupčanika

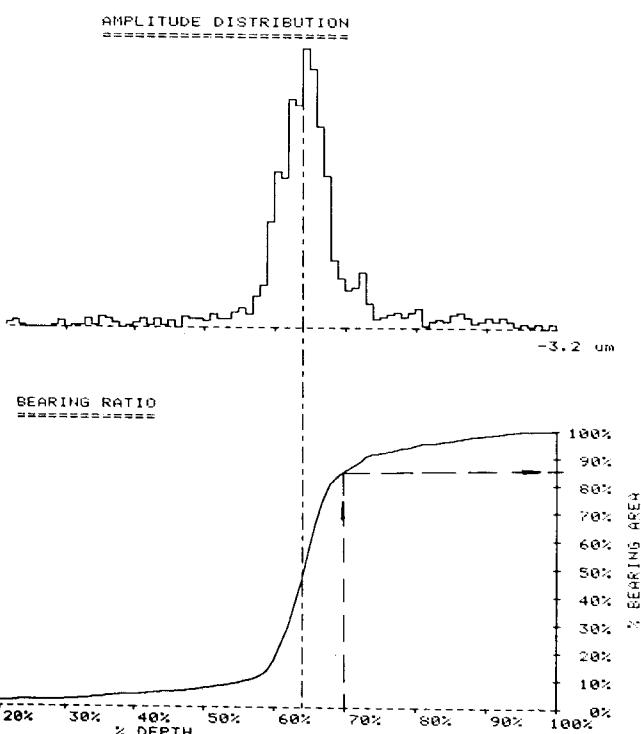


Sl. 9. - Srednje aritmetičko odstupanje od srednje linije profila bočnih površina zuba zupčanika

izrade u granicama dozvoljenih odstupanja i približno isti bez obzira na vrstu primjenjenog sredstva za hlađenje i podmazivanje. Treba naglasiti i da je kvalitet obradjene površine sa aspekta krive nošenja profila (iden-



Sl. 10. - Raspodela amplituda odstupanja i krive nošenja profila bočnih površina zuba zupčanika izradjenih pri primeni čistih ulja za rezanje (red. br. izradj. zupč. 100)



Sl. 11. - Raspodela amplituda odstupanja i krive nošenja profila bočnih površina zuba zupčanika izradjenih pri primeni emulzija (red. br. izradjenog zupčanika 100)

tifikovane na profilometru - profilografu tipa TALYSURF-6 proizvodnje TAYLOR-HOBSON), bolji pri korišćenju emulzije kao sredstva za hladjenje i podmazivanje.

### 3.3. Habanje reznih elemenata alata

Drugi značajan parametar za ocenu mogućnosti zamene čistih ulja za rezanje emulzijama je intenzitet habanja reznih elemenata alata, odnosno njegova postojanost. Merenjem širine pojasa habanja na ledjnoj površini rezogn elementa i to na:

- ulaznom boku (parametar  $h_u$ ),
- temenu zuba (parametar  $h_t$ ) i
- izlaznom boku (parametar  $h_i$ ).

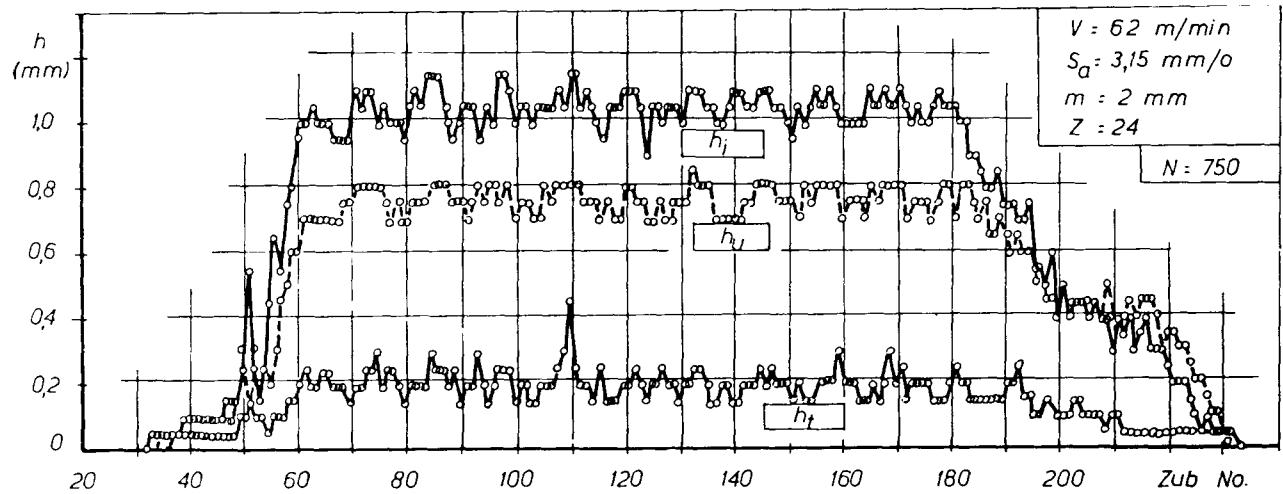
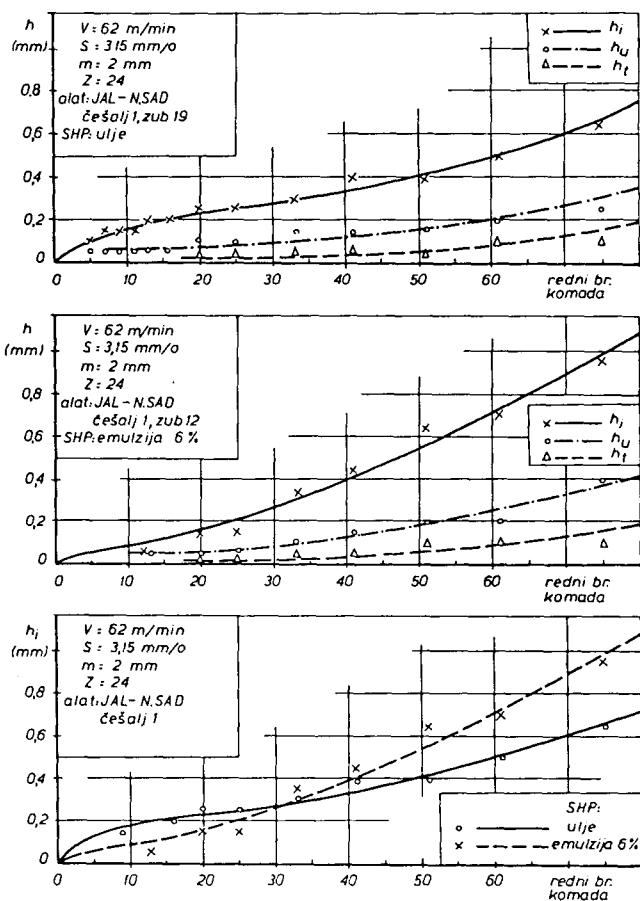
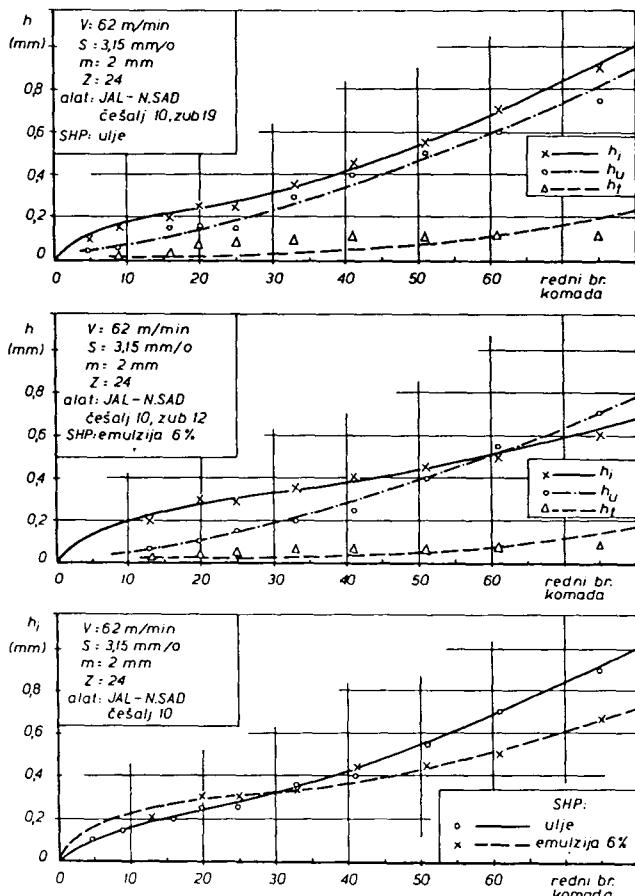
u uslovima rada bez "siftinga", formirane su krive habanja reznih elemenata sa maksimalnom širinom pojasa habanja (sl. 12 i 13). Rezultati praćenja promene širine pojasa habanja sa vremenom odnosno brojem uradjenih komada ukazuju na raznolik, relativno mali, uticaj vrste primjenjenog sredstva za hladjenje i podmazivanje. Razjašnjenje ove pojave zahteva dalja kompleksna, celovita i sistematska praćenja procesa habanja reznih elemenata odvalnih glodala u uslovima primene i reznih ulja i emulzija kao sredstva za hladjenje i podmazivanje.

Merenje parametara habanja pojedinih reznih elemenata odvalnih glodala, nakon izrade odgovarajuće serije zupčanika, dovelo je do rezultata prikazanih na sl. 14 i 15. Rezultati ukazuju na sledeće činjenice:

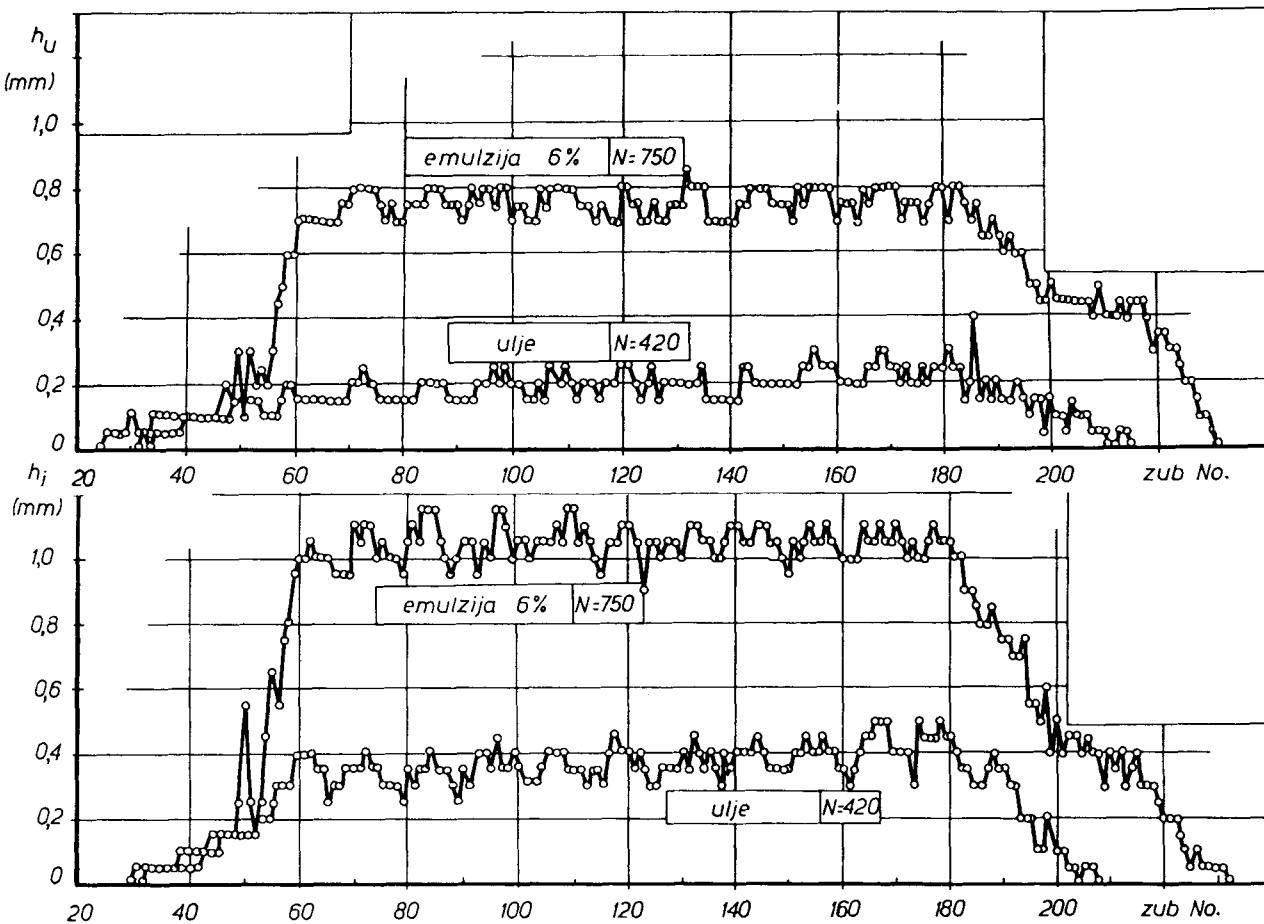
i - Habanje reznih elemenata odvalnih glodala u uslovima primene emulzije, nakon izrade serije od 750 zupčanika je prilično ravnomerno u zoni punog rezanja. Time je obezbedjeno maksimalno iskorišćenje reznih sposobnosti alata, kao i alatnog materijala. Maksimalna širina pojasa habanja je na izlaznom boku i iznosi 1,1 mm.

ii - U uslovima primene čistog ulja za rezanje, nakon izrade serije od 420 zupčanika, habanje reznih elemenata odvalnih glodala karakteriše manji stepen ravnomernosti u zoni punog rezanja. Maksimalna širina pojasa habanja je na izlaznom boku i iznosi 0,5 mm.

Očigledno je da je širina pojasa habanja reznih elemenata glodala u uslovima primene čistih ulja za rezanje manja nego kod primene emulzija. Međutim, različita veličina serije izradjenih zupčanika ne obezbeđuje odgovarajući i pouzdan zaključak o nivou uticaja vrste sredstva za hladjenje i podmazivanje na intenzitet habanja reznih elemenata alata.



Sl. 14. - Vrednost parametra habanja pojedinih reznih elemenata odvalnog glodala pri primeni emulzija:  
 $h_i$  - izlazni bok,  $h_u$  - ulazni bok i  $h_t$  - teme zuba



Sl. 15. - Uporedni prikaz vrednosti parametra habanja reznih elemenata odvalnog glodala  
 $h_i$  - izlazni bok i  $h_u$  - ulazni bok

#### 4. ZAKLJUČCI

Rezultati ispitivanja izvedenih u proizvodnim uslovima obrade odvalnim glodanjem, su pokazali da primena emulzije mineralnih emulgirajućih ulja obezbeđuje:

i - značajno sniženje koncentracije hemijskih štetnosti odnosno nivoa zagadjenja mikroklimi i poboljšanje uslova rada na radnim mestima,

ii - očuvanje kvaliteta obradljene površine i tačnosti izrade zupčanika u granicama dozvoljenih odstupanja,

iii - približno isti intenzitet habanja reznih elemenata alata (postojanost alata) kao i u uslovima primeњene čistih ulja za rezanje,

iv - odgovarajuće smanjenje troškova poslovanja sa sredstvima za hladjenje i podmazivanje (primena 6%-tne emulzije), koje treba pouzdano kvantificirati u narednom periodu itd.

Dalja ispitivanja usmerena ka obezbedjenju optimalnih uslova poslovanja sa sredstvima za hladjenje i podmazivanje, optimizaciju procesa izrade zupčanika, identifikovanje troškova izrade i produktivnosti živog i minalog rada, sniženju troškova izrade, podizanju produktivnosti na viši nivo i sl., treba da upotpune navedene zaključke. Time će se stvoriti potpunija slika o tehnoekonomskim efektima zamene čistih ulja za rezanje emulzijama.

#### 5. LITERATURA

- [1] LAZIĆ M., sa grupom autora, Mogućnost zamene čistih ulja za rezanje emulzijama, elaborat № 6/1988, LOMT, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1988.
- [2] MILOŠEVIĆ M., Izveštaj o ispitivanju triboloških karakteristika polusintetičkog sredstva za hladjenje i podmazivanje pri odvalnom glodanju, LOMT, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1981.