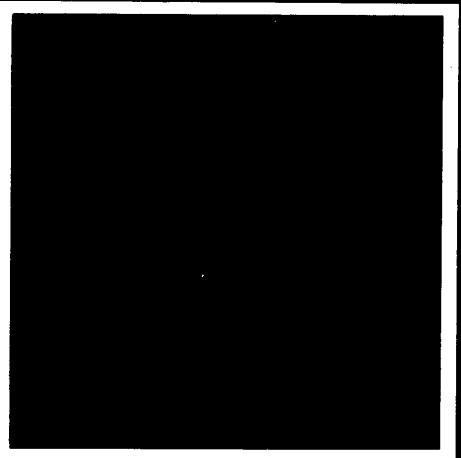
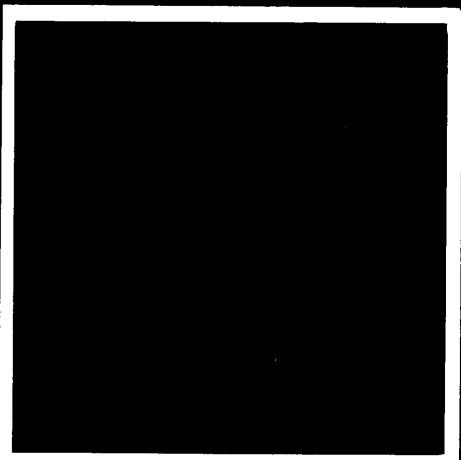
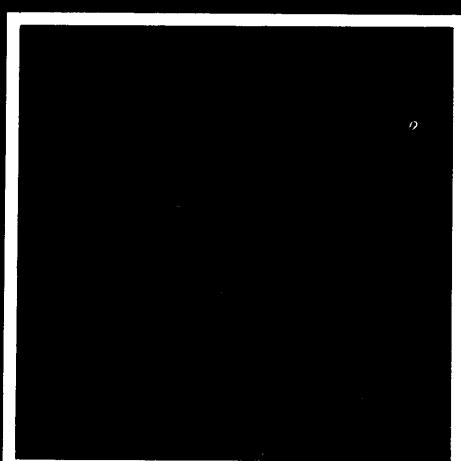
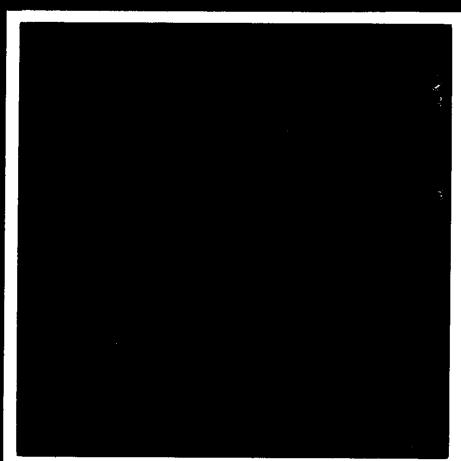
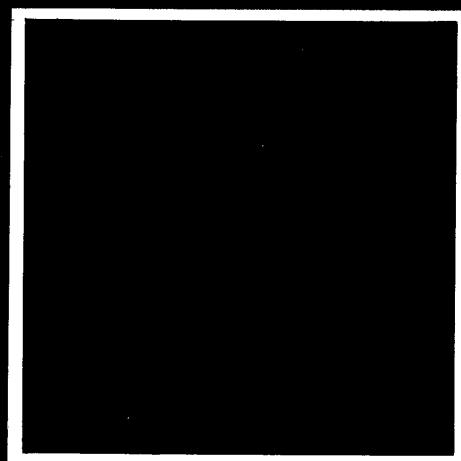


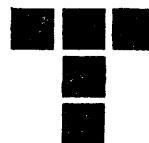
tribologija u industriji

YU ISSN O351-1642
GODINA III
mart 1981.

1



Nauka i tehnologija o prenosu i rasipanju masa i energije u mehaničkim sistemima



GODINA III
BROJ 1.
MART 1981.

sadržaj contents содержание

UVODNIK INTRODUCTION ПЕРЕДОВИЦА	S. ST. SEKULIĆ: Aktuelnosti triboloških istraživanja — Importance of Tribological Research Today — Актуальности трибологических исследований	3
ISTRAŽIVANJA RESEARCH ИССЛЕДОВАНИЯ	B. IVKOVIĆ: Tribološke karakteristike elemenata tribo-mehaničkog sistema u obradi metala rezanjem — Characteristics of the Tribomechanical Systems in Metal Cutting — Характеристики трибомеханических систем в обработке металлов резанием	5
ZA NEPOSREDNU PRAKSU FOR DIRECT PRACTICE ДЛЯ НЕПОСРЕДСТВЕННУЮ ПРАКТИКУ	R. MITROVIĆ, D. NEŠIĆ, M. BOGDANOVIĆ: Tribološke pojave na domaćim alatima za duboko bušenje — Tribological Phenomena on the Domestic Tools for Deep Boring — Трибологические явления на инструменте для глубокого бурения отечественного производства	13
NOVOSTI NEWS ИЗВЕСТИЯ	V. STANOJEVIĆ: Aktuelni problemi pri elektroerozivnoj obradi — Current Problema in Electroerosion Mashining — Актуальные вопросы электроэрозвивной обработки	19
KNJIGE I ČASOPISI BOOKS AND JOURNALS КНИГИ И ЖУРНАЛЫ	25	
NAUČNI SKUPOVI SCIENTIFIC MEETINGS НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ	27	
REZIMEA ABSTRAKTS РЕЗЮМЕ	28	
	30	
	31	

Aktuelnosti triboloških istraživanja

Danas, u bližoj i daljoj budućnosti, dominiraju i biće aktuelni problemi vezani za deficit:

- hrane,
- energije i
- sirovina.

Rešavanje pitanja energije i sirovina usko je povezano sa tribološkim istraživanjima.

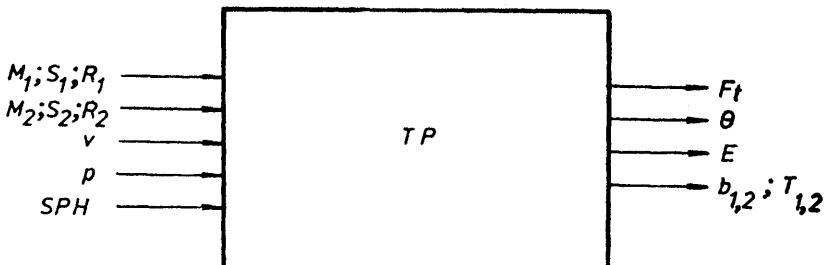
Ako se ograničimo na posmatranje pojave između dva elementa koji su u kontaktu i između kojih postoji relativno kretanje uočićemo čitav niz pojava koje je neophodno kompleksno proučiti.

Osnovni tribološki problem predstavlja pravilan izbor para materijala između kojih se javljaju tribološke pojave. Međutim, odmah se namaće pitanje zamene jedne ili obe vrste materijala, koje je najčešće uslovljeno deficitarnošću izabranih materijala, ili pak ekonomski ili strateške prirode.

Da bi se zadovoljili uslovi postizanja optimalnih karakteristika elemenata u radu neophodno je poznavanje režima i uslova rada na površinama kontakta. Režim rada, najčešće je definisan brzinom relativnog kretanja između posmatranih elemenata i specifičnim opterećenjem na površinama kontakta, a uslovi rada hraptavošću površina u kontaktu i njihovim stanjem, kao i prisustvom sredstava za podmazivanje i hlađenje na površinama dodira.

Predstavimo li tribološke pojave kibernetiskim modelom, na osnovu ulaznih i izlaznih veličina procesa, sledi da su ranije navedene veličine, ulazne veličine procesa (vrste para materijala u kontaktu M_1 i M_2 , režim rada — relativna brzina između elemenata u kontaktu v , specifično opterećenje p , hraptavost površina u kontaktu R_1 i R_2 i njihovo stanje S_1 i S_2 , vrsta sredstava za podmazivanje i hlađenje SPH , ..., a izlazne veličine, uslovljene ulaznim, bi bile:

sile trenja na kontaktnim površinama F_t , temperaturre na površinama dodira i u njihovoj neposrednoj okolini O , količina energije koja se troši na mestu kontakta E , uslovno usvojena veličina koja karakteriše habanje elemenata u kontaktu b_1 i b_2 , odnosno vek trajanja elemenata u paru T_1 i T_2 (sl. 1).



Sl. 1.

Na osnovu slike 1 sledi da se mogu potražiti zavisnosti oblika

$$\begin{aligned} F_t &= f_1(M_1, M_2, R_1, R_2, S_1, S_2, v, p, \\ &\quad SPH) \\ \Theta &= f_2(M_1, M_2, R_1, R_2, S_1, S_2, v, p, \\ &\quad SPH) \\ E &= f_3(M_1, M_2, R_1, R_2, S_1, S_2, v, p, \\ &\quad SPH) \\ b_i &= f_4(M_1, M_2, R_1, R_2, S_1, S_2, v, p, \\ &\quad SPH) \end{aligned}$$

odnosno za određeni kriterijum habanja $b_i = B_i = \text{const.}$

$$T_i = \psi_4(M_1, M_2, R_1, R_2, S_1, S_2, v, p, SPH)$$

Svaka od gore nabrojanih funkcija sadrži značajno veliki broj ulaznih veličina procesa, pri čemu se optimum može potražiti variranjem svih ulaznih veličina, poštujući ranije navedena ograničenja vezana za raspoložive materijale i stanje njihovih površina, veličine specifičnih opterećenja itd., vodeći računa da se često neke od ulaznih veličina ne mogu menjati. Podrazumeava se da svaka od nabrojanih funkcija

ima ili lokalni ekstrem ili se rešenje nalazi na rubu nekog od ulaznih parametara. Optimum optimorum može se odrediti samo uvođenjem dopunskih kriterijuma vezanih za ekonomski ili neke druge efekte koji se žele postići.

Iz prethodnih izlaganja sledi čitava gama istraživanja vezana za proučavanje procesa trenja i habanja, utrošak energije i vek trajanja elemenata, na kojima se prate tribološki procesi. Navedimo neke od njih:

- Istraživanje uticaja elemenata režima obrade na kvalitet obrađene površine i stanje u površinskom sloju, pri raznim vrstama obrade za razne materijale,
- Uticaj veličine opterećenja na kontaktnim površinama, pri različitim brzinama relativnog kretanja između elemenata, na silu trenja, temperature na kontaktnim površinama, ener-

giju koja se troši na proces trenja, kao i vek trajanja elemenata obzirom na njihovu namenu i cenu.

Iz ovih osnovnih istraživanja vezanih za posmatrani par elemenata koji su u kontaktu proizilaze i istraživanja u vezi sa uslovima obrade kontaktnih površina i njihova optimizacija po raznim kriterijumima, a koji su, takođe, tribološke prirode (vrste materijala i alat — po vrsti materijala i reznoj geometriji). Navedena, i druga, ispitivanja neophodno je obaviti u dva pravca i to:

- u cilju rasvetljavanja fizičke suštine procesa i
- sistematska ispitivanja, u cilju uspostavljanja matematičkih modela, koji na pogodan način opisuju relevantnu izlaznu veličinu triboloških procesa u funkciji ulaznih, promenljivih, veličina procesa.

S obzirom na složenost fizičkih pojava koji prate tribološke procese predstoje značajna istraživanja, ko-

ja su do skoro bila ograničena nepostojanjem odgovarajućih instrumenata. Pojavom elektronske mikroskopije postignuti su značajni početni rezultati, a u budućnosti oni će biti i veći.

Sistematska istraživanja za neposrednu primenu, takođe, imaju određeni značaj i omogućuju tehnički pristup rešavanju konkretnih praktičnih problema, pri čemu treba istaći potrebu istraživanja i sa verovatnosnim pozicijama.

Cilj gornjeg izlaganja je da se na specifičan način ukaže na kompleksnost i potrebu interdisciplinarnih proučavanja triboloških pojava, koja su obzirom na krizu energije i sirovina vrlo aktuelna, obzirom na rasprostranjenost triboloških pojava. Na osnovu napred izloženog može se zaključiti da:

- uvođenjem adekvatnih zamena materijala u tribološke procese na određeni način se doprinosi rešavanju problema sirovina,

- smanjenje utrošene energije na kontaltnim površinama, na kojima se javljaju tribološki procesi, obzirom na njihovu rasprostranjenost, predstavlja značajnu uštedu.

Navedeni zaključci opravdavaju značajna sredstva koja su utrošena i koja će se uložiti, u tribološka istraživanja. Skroman prilog širenju tribologije kao nauke i njenih dostignuća u neposrednoj praksi, ostvaruje i naš časopis Tribologija u industriji.

Laboratorija za obradu metala i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu u mogućnosti je da u 1981. godini definiše obradivost većeg broja konstrukcijskih materijala i za njih predloži ekonomične režime rezanja.

Obradivost se definiše savremenom metodom, zasnovanom na ozračivanju male mase reznih elemenata alata.

Ekonomični režimi rezanja

U 1981. godini obradivost konstrukcijskih materijala moguće je definisati:

- pri obradi struganjem alatima od tvrdog metala,
- pri obradi bušenjem,
- pri obradi glodanjem,
- pri urezivanju navoja i
- pri odvalnom glodanju.

Rezultati ispitivanja obradivosti mogu biti dostavljeni korisnicima (naručiocima) u roku od najviše mesec dana od dana podnošenja zahteva.

Informacije o obradivosti materijala sadrže:

- vezu između brzine rezanja i postojanosti alata za različite kriterijume zatupljenja alata,
- otpornost alata na habanje u funkciji stepena pohabanosti alata,
- ekonomičnu postojanost i ekonomičan režim rezanja,
- troškove alata u funkciji brzine rezanja i
- optimalnu vrstu i koncentraciju sredstva za hlađenje i podmazivanje.

Cena koštanja definisanja obradivosti jednog konstrukcijskog materijala pri obradi jednom vrstom obrade metala rezanjem u 1981. godini iznosi 30.000 dinara.

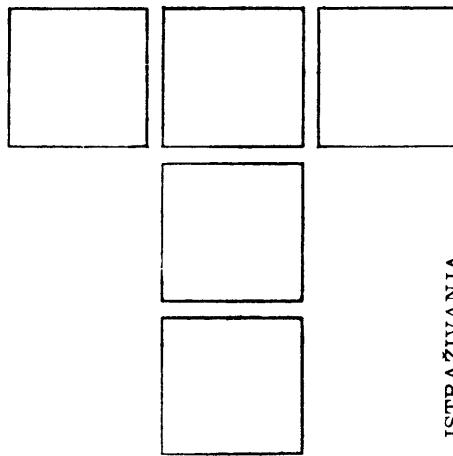
Najmanji broj uzoraka za ispitivanje iznosi 2.

Maksimalna ekonomičnost
obrade uz optimalnu
produktivnost rada

Zahtev za definisanje obradivosti uputiti na adresu:

Univerzitet »Svetozar Marković« MAŠINSKI FAKULTET Laboratorija za obradu metala i tribologiju; 34.000 KRAGUJEVAC, Ul. Sestre Janjić br. 6;

Bliže informacije možete dobiti na tel: 034/67-500



Tribološke karakteristike elemenata tribo-mehaničkog sistema u obradi metala rezanjem

UVOD

Razvoj tribologije kao naučne discipline koja se bavi problemima prenosa i rasipanja masa i energije u mehaničkim sistemima sa posebnim naglaskom na pojave trenja, habanja i podmazivanja kontaktnih parova pruža mogućnost razmatranja procesa rezanja na nešto drugačiji način od dosadašnjeg.

Proces rezanja ostvaruje se u jednom tribo-mehaničkom sistemu koji se sastoji od tri elementa i to: predmeta obrade, reznog alata i sredine u kojoj se kontakt između ova dva elementa ostvaruje ispunjene, najčešće, sredstvom za hlađenje i podmazivanje (SHP).

U toku ostvarivanja procesa rezanja dolazi do pretvaranja jedne vrste energije u drugu, do rasipanja energije, do prenosa mase sa reznog alata na materijal predmeta obrade i u SHP i obrnuto, do pojave trenja u zoni kontakta i habanja reznog alata, do promene fizičko-hemijskih karakteristika kontaktnih slojeva predmeta obrade, do promene fizičko-hemijskih karakteristika SHP, itd. Tribološki procesi koji se razvijaju u zoni kontakta uslovjavaju pojavu smanjenja mase reznog klinu alata, njegovu deformisanost i konačno smanjenje sposobnosti reznog alata da vrši svoju funkciju. Intenzitet razvoja ovih procesa zavisi od velikog broja faktora koji definišu uslove pod kojima tribo-mehanički sistem ove vrste funkcioniše. Ovim faktorima definisane su priroda materijala sva tri elementa tribo-mehaničkog sistema ove vrste, geomterija obrade i mehanika procesa rezanja.

Razvoj tribološkog procesa u kontaktnim slojevima alata i predmeta obrade direktno utiče na promenu oblika vrha reznog klinu alata, što se posredno odražava na mikro-geometriju obradene površine predmeta obrade i fizičko-hemijske karakteristike sloja materijala ispod nje (defektne sloj). U toku ostvarivanja kontakta između alata i materijala predmeta obrade dolazi do hemijskih reakcija između SHP i ova dva elementa tribo-mehaničkog sistema što dovodi do promene fizičko-hemijskih karakteristika SHP. Očigledno je da tokom vremena trajanja kontakta sva tri elementa tribo-mehaničkog sistema menjaju svoje osobine. U jednom trenutku ove promene su tako velike da funkcionisanje tribo-mehaničkih sistema prestaje da bude celisno i tada dolazi do njegovog prekida. Ponovo uspostavljanje rada tribo-mehaničkih sistema vrši se promenom reznog alata i promenom SHP. Predmet obrade ostaje isti jer je on cilj obrade.

Osnovni zadatak pri svakoj vrsti obrade metala rezanjem je da se stvore uslovi za funkcionisanje tribo-mehaničkog sistema ove vrste u kome bi vreme trajanja kontakta do pojave kritične deformisanosti reznog klinu alata i do kritične veličine promene fizičko-hemijskih karakteristika SHP bilo što duže uz istovremeno uklanjanje što veće količine materijala sa predmeta obrade u jedinici vremena.

Karakteristike elemenata tribo-mehaničkih sistema kojima se definiše njihova sposobnost da zadržavaju svoje prvo bitne osobine u toku trajanja kontakta između alata i predmeta obrade nazivaju se tribološkim karakteristikama

jer do promene njihovih osobina dolazi isključivo zbog postojanja i razvoja triboloških procesa u kontaktnim slojevima.

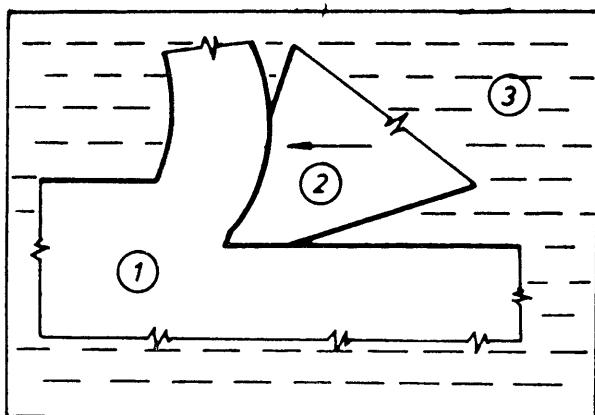
Problem definisanja triboloških karakteristika sva tri elementa tribo-mehaničkog sistema ove vrste rešavan je u oblasti nauke o rezanju na više načina. Međutim, sve dosadašnje metode imaju značajne nedostatke koji se odnose kako na vreme trajanja eksperimenta, utrošak materijala i alata, tako i na pouzdanost dobijenih rezultata.

Razvoj postupka ozračivanja tankih slojeva metalnih materijala na akceleratorima sa spoljašnjim snopom, bombardovanjem odgovarajućih površina teškim česticama (protoni, deuteroni i sl.) stvorio je mogućnost i razvoja metoda za definisanje triboloških karakteristika materijala predmeta obrade, alata i SHP.

Razvoju ovih metoda posvećena je u prošloj deceniji značajna pažnja u Laboratoriji za obradu metala i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu. U proteklom periodu obavljeni su brojni eksperimentalni istraživanja kojima je definisan razvoj procesa habanja raznih vrsta alata u veoma različitim proizvodnim uslovima a preko toga i definisanje triboloških karakteristika sva tri elementa tribo-mehaničkih sistema ove vrste.

OSNOVNE KARAKTERISTIKE TRIBO-MEHANIČKIH SISTEMA U OBRADI METALA REZANJEM

Proces rezanja ostvaruje se u svim vrstama obrade metala rezanjem (struganje, bušenje, glodanje, provlačenje, itd.) prodiranjem reznog dela alata u obliku klinu u materijal predmeta obrade. Sredina u kojoj se proces rezanja ostvaruje ispunjena je vazduhom ili, češće, sredstvom za hlađenje i podmazivanje. Kontakt između alata i materijala predmeta obrade vrši se po grudnoj površini (strugotina) i lednoj površini reznog klinu (obradena površina). U zoni rezanja javljaju se dva kontaktna para i to jedan u kome strugotina klizi po grudnoj površini alata i drugi u kome ledna površina alata klizi po obradenoj površini predmeta



Slika 1.

obrade. Trenje između kontaktnih površina oba para je trenje klizanja a priroda triboloških procesa je vrlo složena jer se kontakt ostvaruje pri visokim pritiscima i temperaturama.

Tribomehanički sistem u kome se proces rezanja odvija sastoji se iz tri elementa i to predmeta obrade, alata i SHP (sl. 1).

Tribološki procesi na kontaktnim površinama u zoni rezanja odvijaju se u uslovima koji se znatno razlikuju od uslova pod kojima se kontakt između dva tela ostvaruje u drugim tribomehaničkim sistemima (ležišta, klizni parovi, zupčasti prenosnici i sl.).

Osnovne specifičnosti tribomehaničkih sistema u obradi metala rezanjem su:

- fizičko-hemijske karakteristike materijala predmeta obrade i materijala alata se znatno razlikuju. U kontaktu su, naprimjer, tvrdi metal i konstruktivni čelici. Razlike u prirodi oba materijala su ogromne.
- Mikro-geometrija kontaktnih površina u oba kontaktna para se znatno razlikuje. Neravnine na površini strugotine nekoliko desetina puta su veće od neravnina na grudnoj površini alata. Nešto manje razlike, ali još uvek velike, su između neravnina na leđnoj površini reznog klini alata i obrađenoj površini predmeta obrade.
- Temperature na kontaktnim površinama oba para kreću se i do 1.300 K, ponekad i više, što znatno utiče na ponašanje kontaktnih slojeva u toku trajanja kontakta.
- Jedna ista površina alata (grudna ili leđna) koja se u procesu ostvarivanja kontakta menja (raste) u do diru je stalno sa novim površinama materijala predmeta obrade. Jedna ista površina strugotine ili obrađene površine predmeta obrade nikad dva puta ne dolazi u kontakt sa grudnjom ili leđnom površinom reznog klini alata. Ovo stvara uslove za intenzivno kretanje čestica mase alata u materijal predmeta obrade.
- Visoke temperature na kontaktnim površinama stvaraju izuzetno povoljne uslove za hemijske reakcije između metalnih površina alata i materijala predmeta obrade i pojedinih komponenti sredstava za hlađenje i podmazivanje. Kao posledica ovih reakcija javljaju se raznovrsne prevlake i na obrađenoj površini predmeta obrade i na obe površine reznog klini alata, što ima značajnog uticaja na razvoj triboloških procesa u kontaktnim slojevima i procesa habanja alata.

Posledice razvoja triboloških procesa u kontaktnim slojevima oba kontaktna para (strugotina — grudna površina alata, obrađena površina — leđna površina alata) najviše se osećaju na alatu jer on ostvaruje kontakt u tribomehaničkim sistemima ove vrste uvek sa istim površinama, odnosno sa uvek istom masom koja je još i relativno mala. Sa razvojem procesa habanja vrh reznog alata se deformiše, što izaziva neželjene posledice na obrađenoj površini predmeta obrade kako u pogledu veličine neravnina (one rastu) tako i u pogledu veličine defektnog sloja ispod obrađene površine. U jednom trenutku deformisanost vrha reznog klini alata dostiže kritičnu veličinu posle koje dalje rezanje nije celishodno bilo sa gledišta trošenja alata, bilo sa gledišta osobina obrađene površine predmeta obrade. Vreme trajanja kontakta između alata i predmeta obrade do pojave kritične deformisanosti vrha reznog klini naziva se postojanost alata.

Postojanost alata predstavlja osnovnu veličinu preko koje se definisu tribološke karakteristike sva tri elementa tribomehaničkog sistema ove vrste tj. predmeta obrade, alata i SHP.

U oblasti nauke o rezanju poznat je pojam obradivosti materijala predmeta obrade. Obradivost kao osobina materijala predmeta obrade definise se, najčešće, kao lakoća sa kojom materijal može da bude obrađen. Ranije su činjeni pokušaji da se ta »lakoća obrade« definise preko otpora koji se javljaju pri rezanju, zatim preko temperaturu ili toplosti koja se generiše u zoni rezanja itd. Međutim, obradivost se danas isključivo definise preko postojanosti alata jer se smatra da materijal koji omogućava obradu sa reznim alatom duže vremena ili isto vreme sa većom brzinom rezanja je i »lakši« za obradu. Očigledno je da

obradivost kao funkcija postojanosti alata nije ništa drugo do tribološka karakteristika materijala predmeta obrade jer je postojanost alata funkcija intenziteta razvoja triboloških procesa u kontaktnim slojevima oba kontaktna para u zoni rezanja.

Eksploracijske karakteristike alata govore o sposobnosti alata da neprekidno vrši rezanje pod određenim uslovima u određenom vremenskom periodu. Alat koji u određenom vremenskom periodu može da vrši rezanje većim brzinama rezanja ili da skida veću količinu strugotine ima i bolja eksploracijska svojstva. Prema tome, postojanost alata je veličina sa kojom se definise i eksploracijska odnosno tribološka karakteristika alata.

Sredstva za hlađenje i podmazivanje uvođe se u zonu rezanja (predstavlja treći element tribomehaničkog sistema ove vrste) da bi usporilo tribološke procese u kontaktnim slojevima oba kontaktna para i tako omogućilo da se vreme kontakta između alata i materijala predmeta obrade do pojave kritične deformisanosti vrha reznog klini produži. Ovo znači da je osnovna uloga SHP kao trećeg elementa tribomehaničkih sistema povećanje postojanosti alata u procesu rezanja. Prema tome, ostvarena postojanost alata je i osnovna tribološka karakteristika sredstava za hlađenje i podmazivanje.

Postojanost alata zavisi od intenziteta razvoja triboloških procesa čiji je mehanizam veoma složen. Na razvoj triboloških procesa pa prema tome i na veličinu postojanosti alata, ima uticaj veliki broj faktora kojima su definisani uslovi pod kojima se proces rezanja izvodi. Može se napisati da je:

$$T = f(h, \gamma_M, HRC, SHP, v, \delta, v_p, \gamma, \alpha, \dots). \quad (1)$$

h — parametar habanja kojim se meri deformisanost vrha reznog klini alata

σ — jačina na kidanje materijala predmeta obrade

HRC — tvrdota materijala alata

SHP — vrsta sredstva za hlađenje i podmazivanje

v — brzina rezanja u m/min.

δ — dubina rezanja

v_p — brzina pomoćnog kretanja u procesu rezanja

γ — grudni ugao reznog klini alata

α — ledni ugao reznog klini alata

Pored navedenih faktora na postojanost alata utiču vrsta materijala predmeta obrade i njihova struktura, vrsta materijala alata, vrsta obrade itd.

U određenim uslovima ostvarivanja procesa rezanja postojanost alata je funkcija parametra h kojim se definise kritična pohabanost (deformisanost reznog dela alata).

$$T=f(h) \quad (2)$$

Diferenciranjem funkcija $T=f(h)$ po parametru h dobija se nova veličina koja predstavlja otpornost alata na habanje.

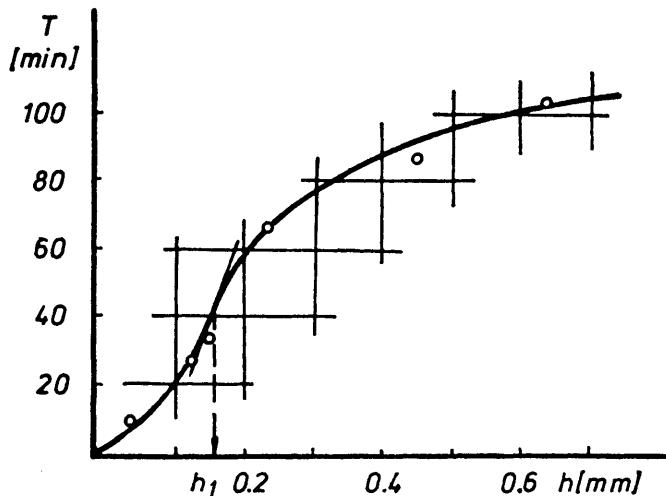
$$\frac{dT}{dh} = R = R(h) \text{ (min/mm)} \quad (3)$$

Otpornost alata na habanje predstavlja vreme neprekidnog kontakta između alata i materijala predmeta obrade (vreme efektivnog rezanja) do pojave deformisanosti reznog klini alata definisane sa $h=1$ mm. Neophodno je, međutim, napomenuti da otpornost alata na habanje predstavlja nagib tangente u svakoj tački funkcije $T=f(h)$. Na slici 2. prikazan je tipičan oblik ovih funkcija za tribomehaničke sisteme u obradi metala rezanjem.

Funkcija $R=R(h)$ ima dve grane koje se sekut u tački sa koordinatama R_1, h_1 . Površina ispod prve grane funkcije $R=R(h)$ predstavlja postojanost alata T koja odgovara prvoj fazi razvoja procesa habanja odnosno tački sa koordinatama T_1, h_1 na krivoj $T=f(h)$. Do ukupne postojanosti alata dolazi sa integraljenjem funkcije $R=R(h)$ jer je:

$$T = T_I + T_{II} = \int_{h=h_0}^{h=h_1} R_1(h)dh + \int_{h=h_1}^{h=h_K} R_2(h)dh \quad (4)$$

Da bi se do postojanosti alata došlo preko otpornosti alata na habanje neophodno je poznavati funkciju $R=R(h)$ do kojoj se dolazi eksperimentalnim putem.



Slika 2.

MOGUĆI PRILAZI MERENJU POSTOJANOSTI ALATA I OTPORNOSTI ALATA NA HABANJE

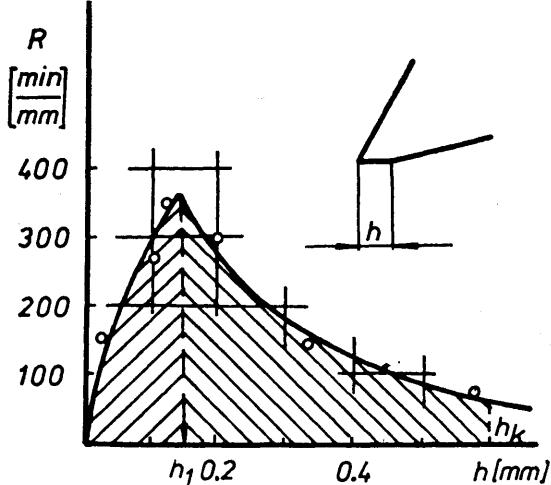
Problem merenja postojanosti alata kao veličine sa kojom se definiše obradivost materijala predmeta obrade, eksploatacijska karakteristika alata i kvalitet sredstava za hlađenje i podmazivanje (tribološke karakteristike elemenata tribomehaničkih sistema ove vrste) prisutan je od početka razvoja nauke o rezanju. Kako je postojanost alata funkcija veličine deformisanosti vrha reznog kline alata (kritična pohabanost), to su činjeni mnogobrojni pokušaji da se uočavanjem kritične deformisanosti vrha reznog kline definije i postojanost alata. Poznati su kriterijumi pohabnosti alata (kritična veličina deformisanosti reznog kline) i metode za određivanje kritične deformisanosti vrha reznog kline zasnovani na praćenju pojave na obrađenoj površini predmeta obrade, na promeni dimenzija predmeta obrade, na promeni otpora rezanja, na promeni temperature, u funkciji pohabnosti reznog kline alata. Takođe su poznati i pokušaji definisanja triboloških karakteristika sva tri elementa tribomehaničkog sistema ove vrste preko merenja radioaktivnosti strugotine nastale obradom sa alatom ozračenim u nuklearnom reaktoru bombardovanjem brzim neutronima. Činjeni su i pokušaji da se merenjem temperature rezanja u toku procesa rezanja uspostavi veza između nje i habanja alata i onda merenjem samo temperature utvrdi kritična veličina deformisanosti vrha reznog kline. Međutim, sve ove metode nisu dale zadovoljavajuće rezultate tako da se najveći deo istraživanja ove vrste obavljalo do sada primenom tzv. mikroskopske metode kojom se merila širina pojasa habanja na leđnoj površini reznog kline alata u toku rezanja (prekida se proces) ili veličina, dubina i položaj kratera na grudnoj površini reznog kline. Primenom mikroskopske metode dobija se niz eksperimentalnih podataka o veličini merenog parametra habanja koje odgovaraju određenim vremenskim periodima rezanja. Eksperimentalni podaci o veličinama h_1 i h_k omogućavaju definisanje funkcije $h=f(T)$ ili $T=f(h)$ (sl. 2. a).

Postoji više predloga u literaturi za matematičku interpretaciju ove funkcije. Autoru se, međutim, čini da je najzgodnija aproksimacija eksperimentalne funkcije $T=f(h)$ sa dve parabole oblika

$$T_I = K_1 h^{u_1} \quad T_{II} = K_2 h^{u_2} + K_3 \quad \begin{cases} h = h_1 \\ h = h_k \end{cases} \quad (5)$$

Tačka sa koordinatama T_1 , h_1 , predstavlja prevojnu tačku funkcije $T=f(h)$ u kojoj se završava prva faza habanja i nastaje druga faza.

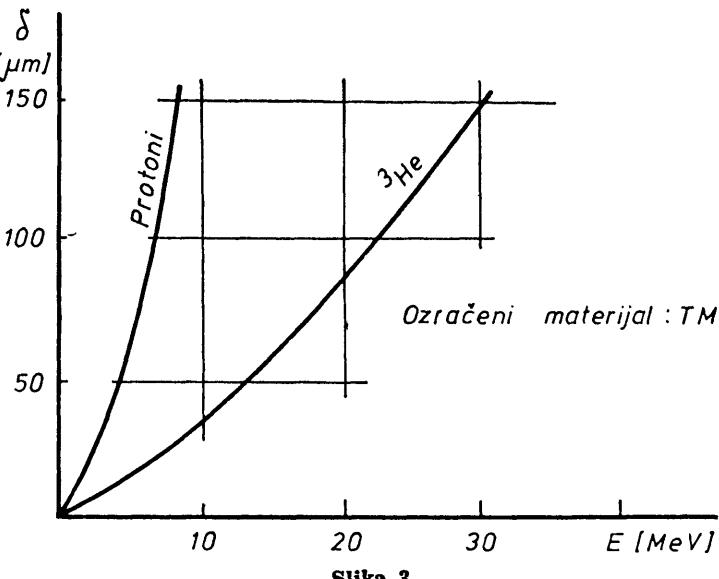
Određivanje postojanosti alata mikroskopskom metodom pretpostavlja funkcionisanje tribomehaničkih sistema ove vrste sve do pojave kritične deformisanosti reznog kline, do koje dolazi zbog njegovog habanja odnosno zbog prelaska čestica njegove mase u materijal predmeta obrade i u SHP za vreme trajanja kontakta između alata i predmeta obrade. Vreme trajanja kontakta između alata i materijala pred-



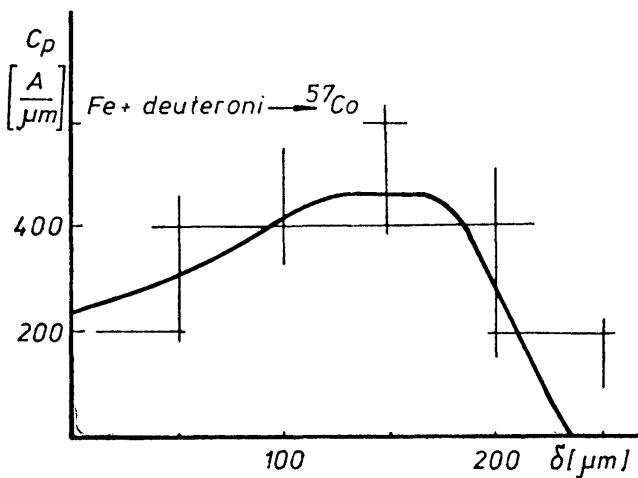
meta obrade do pojave kritične deformisanosti vrha reznog kline alata može da traje i veoma dugo (i po nekoliko sati) pri čemu se sa predmeta obrade uklanja ogromna količina materijala (pretvara se u strugotinu). Kako se tribomehanički sistemi ove vrste izvode na mašinama alatkama uz prisustvo radnika i istraživača (zbog merenja deformisanosti vrha reznog kline na mikroskopu), to cena koštanja ovih eksperimenata nikad nije mala. Poznato je, takođe, da rezultati istraživanja dobijenih primenom mikroskopske metode nisu ni dovoljno pouzdani ako se ne obavi veći broj ponavljanja eksperimenata, što se po pravilu izbegava zbog njihove visoke cene koštanja.

Razvoj postupka ozračivanja tankih slojeva metalnih materijala na akceleratorima sa spoljašnjim snopom bombardovanja odgovarajućih površina teškim česticama (prottoni, deutroni itd.) koji je u protekloj deceniji usavršen do nivoa praktične upotrebe omogućio je i razvoj nove metode za definisanje postojanosti alata preko merenja otpornosti alata na habanje. Eksperimentalna istraživanja alatima ozračenim po ovom postupku vršena su proteklih 10 godina u Laboratoriji za obradu metala i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, pri skoro svim vrstama obrade metala rezanjem, u velikom obimu, sa ciljem da se definisu tribološke karakteristike sredstava za hlađenje i podmazivanje, alata i predmeta obrade, merenjem samo otpornosti alata na habanje.

Postupak ozračivanja tankog sloja metalnih materijala na akceleratorima sa spoljašnjom stopom razvijen je u SSSR-u, Engleskoj, SR Nemačkoj i ČSSR prema saznanjima



Slika 3.



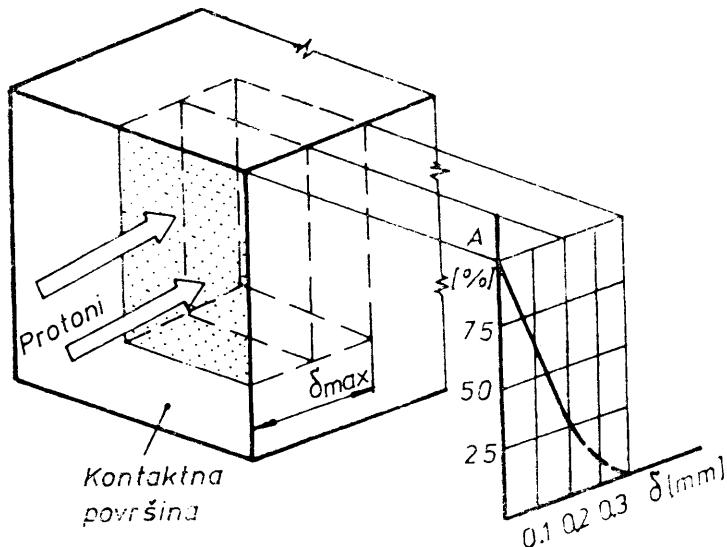
Slika 4.

autora. Metalna površina ispod koje treba stvoriti tanak sloj radioaktivnog materijala izložena je bombardovanju snopom teških čestica određeno vreme. Debljina ozračenog sloja zavisi od vrste čestica i energije snopa, a nivo radioaktivnosti od jačine snopa i vremena bombardovanja. Veza između debljine ozračenog sloja materijala i energije snopa protona prikazana je na sl. 3.

Da bi se preko radioaktivnosti ozračenog sloja materijala pratio razvoj procesa habanja koji nastaje na kontaktnim površinama u toku ostvarivanja kontakta neophodno je da specifična radioaktivnost ozračenog sloja bude jednaka po celoj ili jednom delu njegove debljine.

Raspored specifične aktivnosti merene u jedinicama radioaktivnosti po jednom mikrometru debljine ozračenog sloja prikazana je na sl. 4. za slučaj ozračivanja gvožđa deuteronomi i protonima.

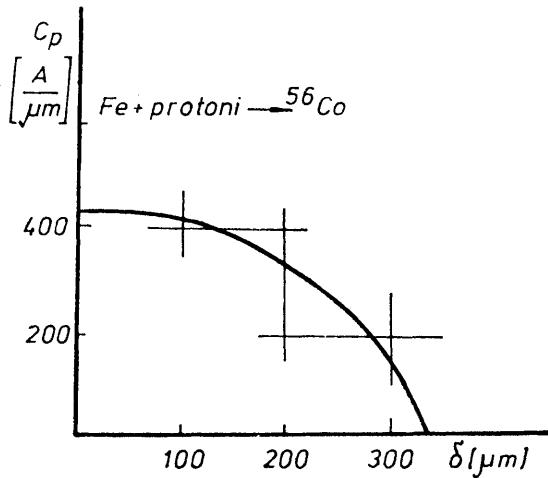
Veza između debljine ozračenog sloja i energije snopa teških čestica kao i raspored specifične radioaktivnosti po debljini ozračenog sloja zavise od vrste čestica i od vrste materijala koji je izložen bombardovanju (gvožđe, bakar, minijum, i sl.).



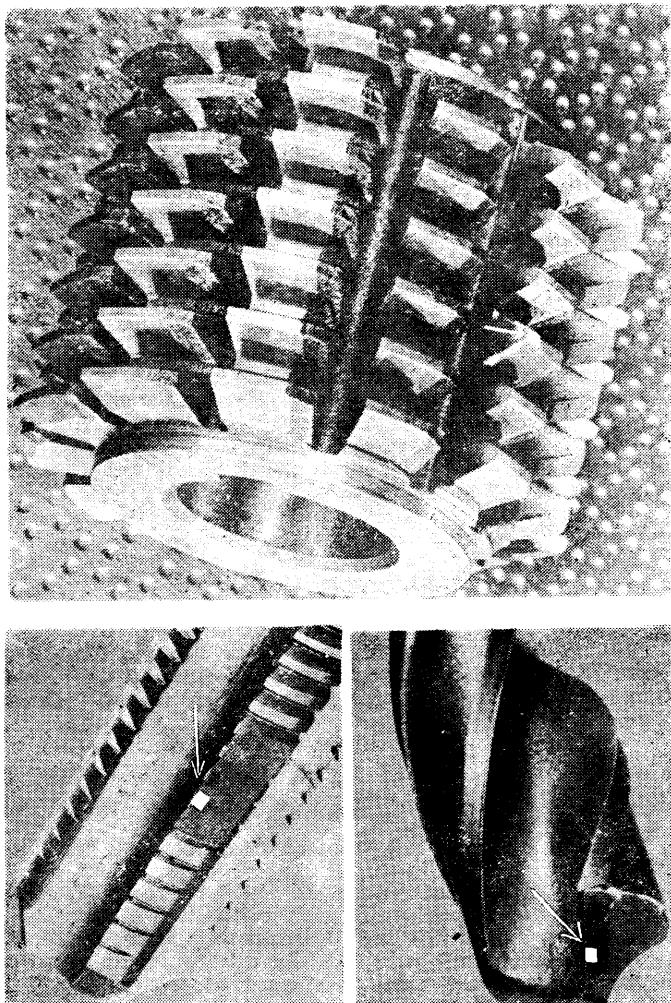
Slika 5.

Da bi se radioaktivnost ozračenog sloja materijala koristila za praćenje habanja neophodno je postići konstantnu specifičnu radioaktivnost do debljine do koje se sloj materijala haba u procesu ostvarivanja kontakta (sl. 5).

U tribomehaničkim sistemima u kojima se vrši proces rezanja, rezni alat predstavlja element koji se haba i čija se postojanost utvrđuje. Kako se rezni deo alata najčešće

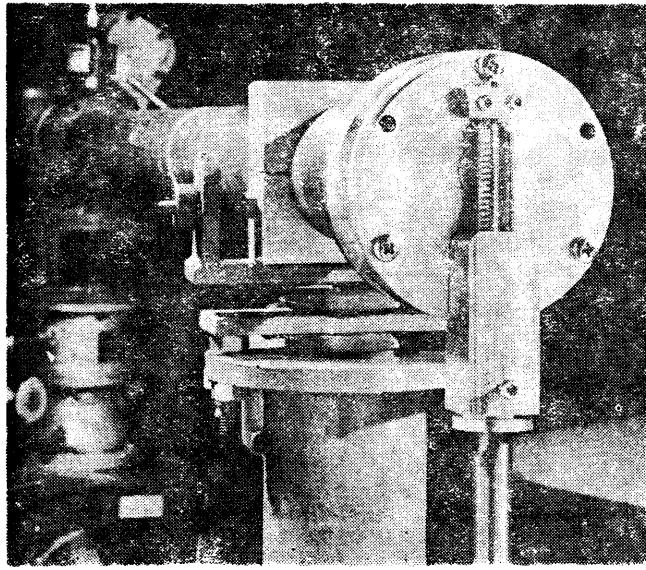


haba po lednoj površini reznog klina to je ova površina i izabrana za bombardovanje teškim česticama. Sloj materijala ispod ledne površine reznog klini učestvuje u tribološkim procesima pri rezanju i u toku ostvarivanja kontakta između alata i materijala predmeta obrade, njegova masa se smanjuje što i prouzrokuje habanje. Na sl. 6. prikazano je nekoliko vrsta alata sa ozračenim površinama koje su bile bombardovane snopom protona. Debljina sloja materijala ispod bombardovane površine, koja je postala radioaktivna sa konstantnom specifičnom radioaktivnošću, kretala se između 0,1 i 0,15 mm.



Slika 6.

Na sl. 7. prikazan je pribor sa alatom postavljenim na izlaznoj cevi akceleratora u položaju u kome se vrši bombardovanje protonima.



Slika 7.

Za sve rezne alate izrađene od brzoreznog čelika ozračivanje mase reznog klina alata, koja učestvuje u tribološkim procesima za vreme trajanja kontakta između alata i materijala predmeta obrade, vrši se bombardovanje protonima. Reakcija koja se pri tome javlja u masi gvožđa proizvodi pojавu radioaktivnog izotopa ^{56}Co .



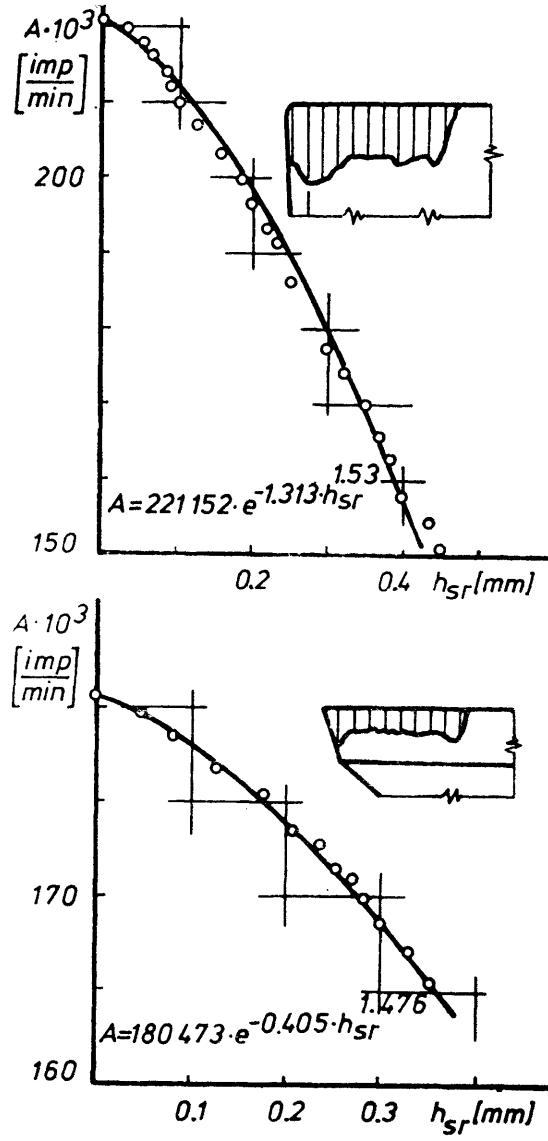
Izotop ${}^{56}\text{Co}$ raspoređen je po ozračenom sloju sa konstantnom specifičnom radioaktivnošću do dubine oko 0,15 mm koliko iznosi i maksimalno radikalno habanje reznog klina skoro svih vrsta alata. Poluživot ovog izotopa od 74 dana omogućava praćenje razvoja procesa habanja na alatu merenjem opadanja njegove radioaktivnosti u dugom vremenskom intervalu. Radioaktivnost izotopa ${}^{56}\text{Co}$ potiče od gama zračenja sa energijama od 0,85 MeV i 1,24 MeV.

Veza između radioaktivnosti reznih elemenata raznih vrsta alata i deformisanosti vrha reznog klina definisane sa parametrom h koji predstavlja širinu pojasa habanja na leđnoj površini reznog klina prikazana je na sl. 8.

$$A = A_0 e^{-kh^n} \quad (6)$$

Kroz eksperimentalne tačke sa koordinatama A_i, h_i moguće je provući parabole oblika

Početna radioaktivnost A_0 i konstanta n zavise od uslova pod kojima je izvršeno ozračivanje i ukupne mase alata koji se u toku procesa rezanja haba i koja je bila podvrgnuta ozračivanju. Aproximacija eksperimentalne funk-



Slika 8.

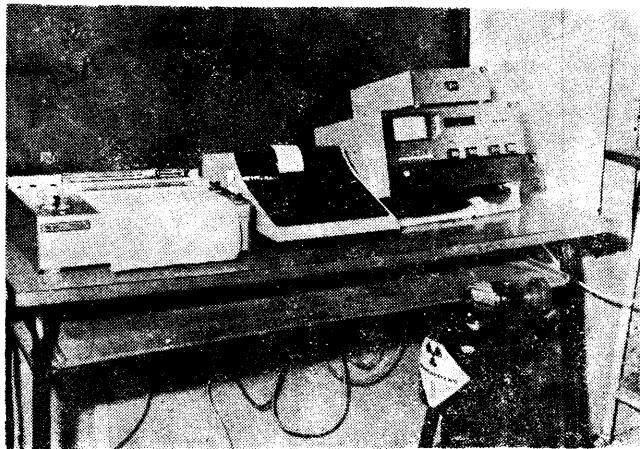
cije A (h) sa eksponencijalnom funkcijom navedenog oblika je tako dobra da je koeficijent korelacijske najčešće $K=0,999$. Ova veza između radioaktivnosti alata i stepena njegove pohabanosti koja je definisana širinom pojasa habanja na lednoj površini reznog klina predstavlja osnov radioaktivne metode za praćenje razvoja procesa habanja alata, merenje otpornosti alata na habanje i proračun postojanosti alata.

Otpornost alata na habanje je funkcija stepena njegove pohabanosti. Kako je po definiciji otpornost alata na habanje prvi izvod vremena rezanja po veličini širine koja se haba h to je neophodno, za eksperimentalno merenje ove veličine, obezbediti merenje porasta habanja Δh koje nastaje pri rezanju u kratkom vremenskom intervalu ΔT , tako da je

$$\frac{\Delta T}{\Delta h} \approx \frac{dT}{dh} \quad (7)$$

Eksperimentalna veza između radioaktivnosti alata i veličine pojasa habanja na lednoj površini reznog klina alata $A=f(h)$ ukazuje na mogućnost dobijanja Δh merenjem opadanja radioaktivnosti alata koja nastaje pri rezanju u vremenskom intervalu ΔT .

Merenje radioaktivnosti alata u toku izvođenja eksperimenta vrši se standardnom instrumentacijom za merenje radioaktivnosti koja pored brojačkog kompleta sadrži i scintilacionu sondu, (sl. 9). Pri merenju radioaktivnosti alata neophodno je obezbediti konstantnu geometriju merenja postavljanjem odgovarajućeg pribora na nosač sonde.



Slika 9.

Merenjem opadanja radioaktivnosti alata pri rezanju u kratkom vremenskom intervalu ($0,1 - 1$ min) dolazi se preko funkcija $A=f(h)$ do veličine h odnosno do porasta pohabanosti alata koja nastaje u ovom periodu rezanja. Izvođenjem tri opitne operacije u kojima se vrši rezanje u vremenskom intervalu ΔT pri tri stepena pohabanosti alata definisanoj sa tri veličine h (h_1, h_2, h_3) koje pripadaju prvoj fazi razvoja procesa habanja i merenjem opadanja radioaktivnosti alata posle svake opitne operacije dolazi se do tri veličine otpornosti alata na habanje.

$$R_1 = \frac{\Delta T_1}{h_1} \quad \text{pri } h = h_1$$

$$R_2 = \frac{\Delta T_2}{h_2} \quad \text{pri } h = h_2 \quad (8)$$

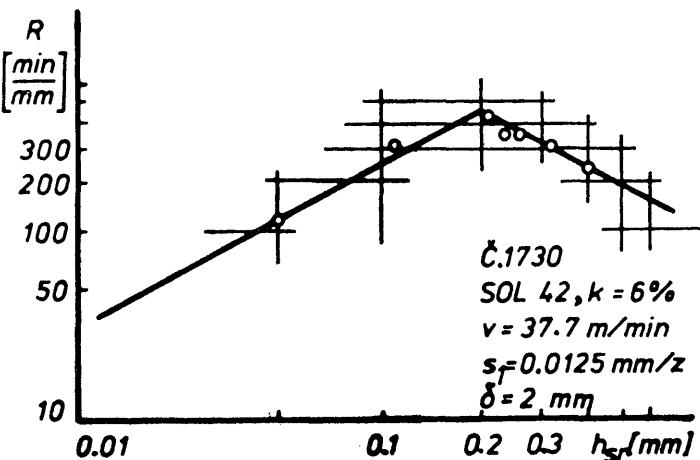
$$R_3 = \frac{\Delta T_3}{h_3} \quad \text{pri } h = h_3$$

Pri izvođenju eksperimenta obično se rezanje vrši u istim vremenskim intervalima tako da je $\Delta T_1 = \Delta T_2 = \Delta T_3$.

Unošenjem tačaka sa koordinatama $\log R_i$, $\log h_i$ u koordinatni sistem $\log R$, $\log h$ dobija se prva grana funkcije $R = R_1(h)$ u obliku prave linije koja pokazuje kako se menjaju otpornost alata na habanje u prvoj fazi razvoja procesa habanja. Da bi se dobila druga grana funkcije $R = R_2(h)$

neophodno je izvesti još tri opitne operacije pri stepenima pohabanosti alata definisanim sa veličinama h_4, h_5 i h_6 koji pripadaju drugoj fazi razvoja procesa habanja.

Na slici 10. prikazane su obe grane funkcije $R = R(h)$ u log-log koordinatnom sistemu za jedan određeni tribomehanički sistem ove vrste.



Slika 10.

Primenom metode najmanjih kvadrata ili nekog drugog postupka moguće je doći do matematičkih izraza za obe grane funkcije $R = R(h)$ u obliku:

$$R_I = K_I h^{n_{I-1}} \left[\begin{array}{l} h = h \\ h = h_0 \end{array} \right] \quad (9)$$

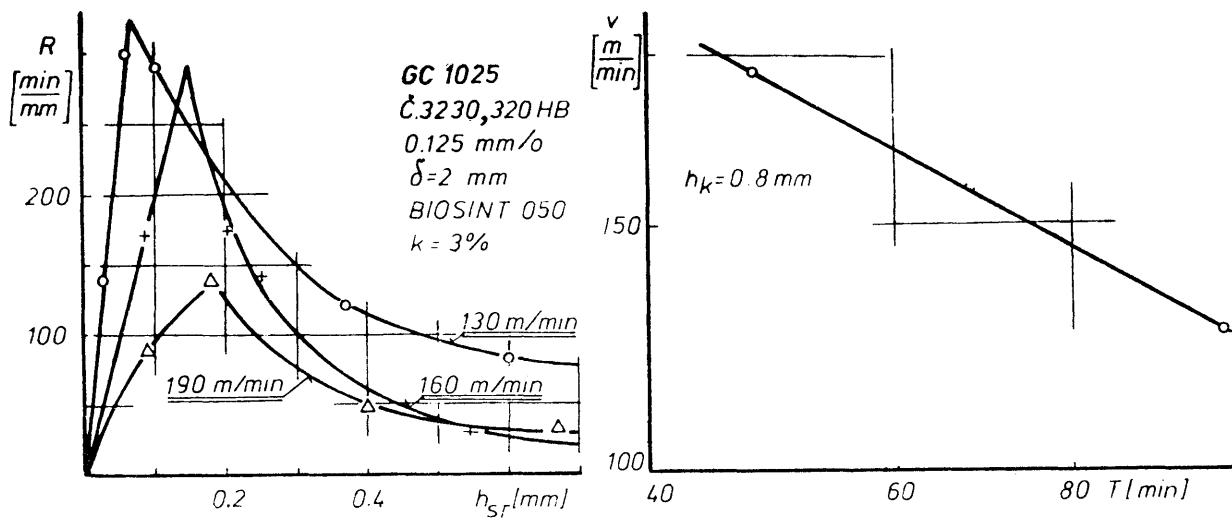
$$R_{II} = K_{II} h^{n_{II-1}} \left[\begin{array}{l} h = h_k \\ h = h_l \end{array} \right]$$

Do postojanosti alata za određeni kriterijum zatupljenja (određenu vrednost h) dolazi se integraljenjem obe funkcije kao što je to ranije pokazano.

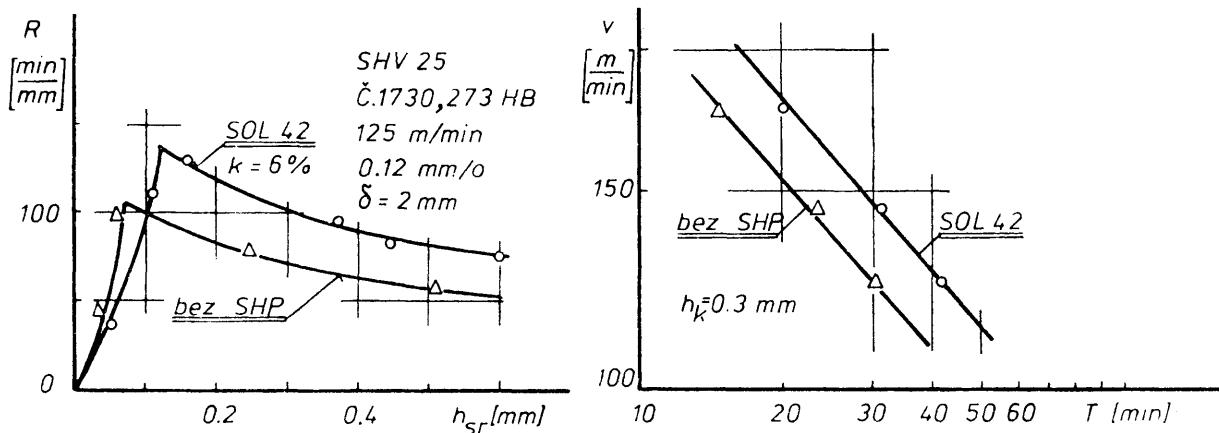
NEKI REZULTATI EKSPERIMENTALNIH ISTRAŽIVANJA TRIBOLOŠKIH KARAKTERISTIKA ELEMENATA TRIBO-MEHANIČKOG SISTEMA U OBRADI REZANJEM

U proteklih 10 godina eksperimentalna istraživanja ove vrste vršena su u Laboratoriji za obradu metala i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, u velikom obimu. Istraživanja su vršena sa ciljem definisanja triboloških karakteristika materijala predmeta obrade, alata i SHP. Izvedeno je nekoliko hiljada eksperimenta u kojima je vršeno merenje otpornosti alata na habanje za razne tribomehaničke sisteme u obradi metala rezanjem (struganje, bušenje, glodanje, odvalno glodanje, i sl.). Pri tome su korišćeni razni materijali predmeta obrade i alata a u znacaju obimu menjane su vrste sredstava za hlađenje i podmazivanje i njihova koncentracija. Istraživanja su vršena za potrebe proizvođača sredstava za hlađenje i podmazivanje i metaloprerađivačku industriju tako da se svi rezultati do kojih se došlo nalaze kod krajnjih korisnika. Delimični rezultati istraživanja objavljivani su povremeno u naučnim i stručnim publikacijama u zemlji inostranstvu. Ovog puta prikazuje se deo rezultata istraživanja radi informisanja o mogućnosti definisanja triboloških karakteristika sva tri elementa tribomehaničkih sistema ove vrste razvijenom radioaktivnom metodom koja u ovom trenutku više nije u eksperimentalnoj fazi već je spremna za rutinska eksperimentalna istraživanja u laboratorijskim i proizvodnim uslovima.

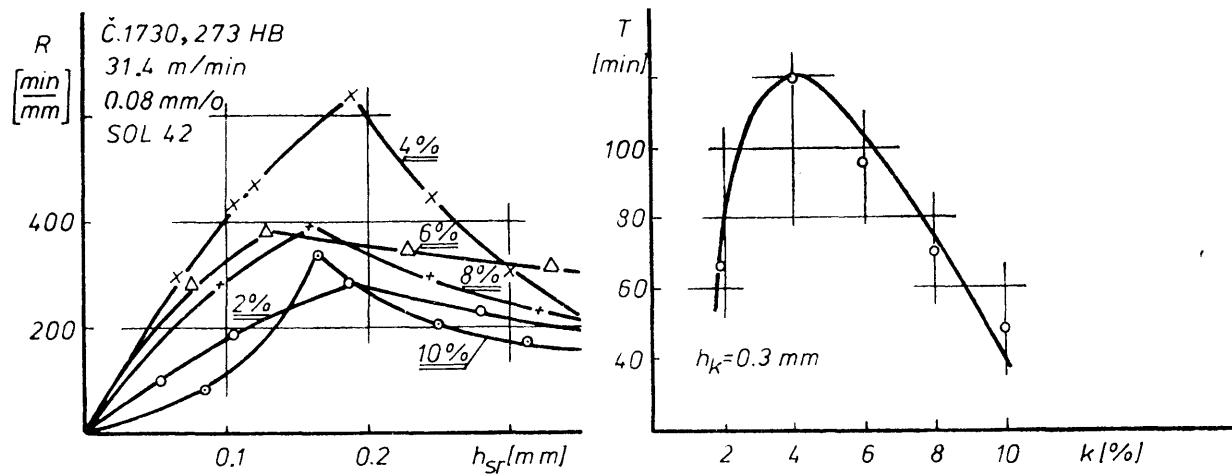
Na sl. 11. prikazani su rezultati ispitivanja obradivosti čelika pri obradi struganjem alatom od tvrdog metala. Obradivost se definije najčešće preko postojanosti alata za odgovarajući kriterijum zatupljenja definisan sa h_k i preko poznate Tejlorove krive u koordinatnom sistemu $\log v, \log T$.



Slika 11.



Slika 12.



Slika 13.

Na sl. 12. prikazani su rezultati ispitivanja eksplorativnih karakteristika alata od tvrdog metala pri obradi struganjem čelika uz prisustvo SHP i bez njega.

Na sl. 13. prikazane su tribološke karakteristike SHP u funkciji koncentracije mineralnih emulzirajućih ulja u vodi.

Tribološke karakteristike materijala predmeta obrade, alata i SHP prikazane na sl. 11., 12. i 13. zasnivaju se na merenju otpornosti alata na habanje koju je moguće, za sada, meriti samo preko merenja opadanja radioaktivnosti alata u toku procesa rezanja.

ZAKLJUČAK

Količina materijala koja se ukloni sa predmeta obrade u jedinici vremena velika je u svim vrstama obrade metala rezanjem. Intenzitet razvoja triboloških procesa u kontaktnim slojevima oba kontaktne para u zoni rezanja utiče na karakteristiku materijala predmeta obrade (obradivost), alata. Dalje povećanje brzine rezanja i produktivnosti rada na direktnim poslovima u oblasti prerade metala (i drugih vrsta materijala) zavisiće od poboljšanja triboloških karakteristika.

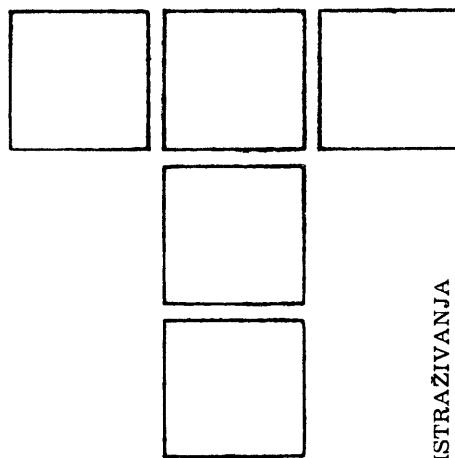
teristika materijala predmeta obrade (obradljivost), alata (otpornost na habanje) i sredstva za hlađenje i podmazivanje. Do poboljšanja triboloških karakteristika sva tri elementa tribomehaničkih sistema ove vrste može doći samo kroz bolje upoznavanje prirode triboloških procesa u kontaktnim stojevima alata i materijala predmeta obrade i mehanizma habanja. Razvoj postupka ozraćivanja tankih slojeva metalnih materijala na akseleratorima sa spoljašnjim snopom omogućuje i razvoj metoda za praćenje procesa habanja reznih elemenata alata merenjem promene njihove radioaktivnosti u toku procesa rezanjem i uvođenje nove veličine nazivane »otpornost alata na habanje« kojom se mogu definisati tribološke karakteristike sva tri elementa tribomehaničkog sistema ove vrste.

Merenjem otpornosti alata na habanje a ne postojanosti alata otklonjeni su svi osnovni nedostaci klasične mikroskopske metode koji se odnose na pouzdanost dobijenih rezultata, vreme trajanja eksperimenta i njihovu cenu koštanj. Sva tri osnovna nedostatka klasične mikroskopske metode za merenje postojanosti alata posledica su potrebe za utroškom velike količine materijala, velikog broja alata i dugog vremena trajanja eksperimenta. Prelaskom na merenja otpornosti alata na habanje moguće je sa jednim alatom, npr. definisati obradivost četiri do šest vrsta materijala predmeta obrade pri utrošku vremena rezanja od najviše jednog časa. Klasičnim postupkom ovo vreme rezanja iznosi preko 50 časova, a broj alata i preko 20 u zavisnosti od broja ponavljanja eksperimenta.

Metoda ozraćivanja tankih slojeva metalnih materijala pruža mnogo veće mogućnosti u oblasti fundamentalnih istraživanja prirode triboloških procesa koja u ovom trenutku još nisu korišćena od svih dosadašnjih metoda zasnovanih na termodynamici i mehanici procesa rezanja. Pri obradi sa ozraćenim reznim alatima moguće je, npr. pratiti kretanje ne samo ukupne mase alata u zoni kontakta već i kretanje pojedinih elemenata strukture ove mase. U naредnoj deceniji jedan od programa rada Laboratorije za obradu metala i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu odnosi se na razvoj istraživanja u ovoj oblasti.

LITERATURA

1. V. I. POSTNIKOV, Metod poverinostnoj aktivacii v pro-mišlennosti, Moskva, Atomizdat, 1975, SSSR.
2. T. W. COLON, Thin hayer Activation by Accelerated long — Application to Measurement of Industrial Wear, Wear 29, 1974, pp 69—80.
3. B. IVKOVIĆ, Tribology research in metod cutting, The 2 nd I. C. P. R, Copenhanen, avgust 1973.
4. B. IVKOVIĆ, A. MIŠKOVIĆ, Measurement of spiral drill wear recistence with nem radioactive method., The 3 nd I. C. P. R., Améerst, 1975, USA.
5. B. IVKOVIĆ, Cutting Fluid quality, Industrial Lubrication and Tribology, septembar—oktobar 1976, pp. 170—174.
6. B. IVKOVIĆ, More about Cutting Fluid, Industrial lubrication and Tribology, Januar 1977, pp. 13—17.
7. B. IVKOVIĆ, Experimental investigation in Production Engineering by Radioactive Method, The 4 th I. C. P. R, Tokyo, 1977, pp. 885—898.
8. B. IVKOVIĆ, The Tribological Characteristic of Cutting Fluid and Mechining Cost., The 2 nd International Conference Lubrication Challenges In Metalworking and Processing, Shicago, 1979, USA.
9. S. ZAHAR, Application of new radioactive method for comparative tests of exploitation characteristic of coolants and lubricants, Konferencija »Tribology for the eighties«, Paisley College of technology, Scotland, 1975. god.
10. B. JEREMIĆ, R. MILIĆ, Optimum concentration of mineral oil in cutting fluid. Second International Conference on lubrication challenges in Metal working and processing Chicago (jun 27—29, '79).
11. R. MITROVIĆ, An Extra Accelerated Method for the Optimization of Hobbing Process. Fifth World Congress on Theory of Machines and Mechanisms, Montreal, July, 1979.
12. S. ZAHAR, Tribološke pojave na reznim elementima odvalnog glodala. Jugoslovenski simpozijum o tribologiji i primeni goriva i maziva, Ohrid, 1973. go.
13. M. MILOŠEVIĆ, L. TOPALOVSKI, Lj. IRIČANIN, Tribološke karakteristike čistih ulja za rezanje pri odvalnom glodanju, Goriva i maziva 18 (1979), 1.
14. M. MILOŠEVIĆ, Uticaj sredstava za hlađenje i podmazivanje na povećanje proizvodnosti procesa odvalnog glodanja, Tribologija u industriji, № 4/1980, Mašinski fakultet u Kragujevcu.
15. M. LAZIĆ, B. SREĆKOVIĆ, Obradivost niskolegiranog Cr-Ni-Mo čelika za cementaciju pri obradi bušnjem, Jugoslovensko savetovanje o procesima, sredstvima i opremi za termičku obradu, Herceg Novi — Titograd, novembar 1975. god.
16. Z. PALUNČIĆ, D. LUKIĆ, Rezultati ispitivanja sredstava za hlađenje i podmazivanje pri obradi vretenastim glodalima, Goriva i maziva 16 (1977), 4, Zagreb.
17. Z. PALUNČIĆ, Uticaj sredstava za hlađenje i podmazivanje na vrednost obrade, Tribologija u industriji, № 2/1980. Mašinski fakultet Kragujevac.
18. S. ARSOVSKI, Ispitivanje obradivosti grupe domaćih čelika za obradu zupčanika pri obradi struganjem, Obrada metala i tribologija, br. 9, Kragujevac, 1977.
19. S. ARSOVSKI, Tribološke karakteristike sredstava za hlađenje i podmazivanje pri obradi glodanjem, Obrada metala i tribologija, br. 10, Kragujevac, 1977.
20. S. ARSOVSKI, Analiza mogućnosti adaptiranog upravljanja alatnim mašinama na osnovu merenja intenziteta habanja reznih elemenata alata, Tribologija u industriji, br. 3, Kragujevac, 1979.
21. B. IVKOVIĆ, Wear Resistance as Basic Function for Definition of Tribological Processes on Machine and Tool Elements, and Conference on Tribology, Budapest, 1979.
22. B. JEREMIĆ, Uticaj vrste termičke obrade na obradivost čelika pri čeonom glodanju, X Savetovanje proizvodnog mašinstva, Beograd, oktobar 1975.
23. B. JEREMIĆ, Tribološke karakteristike sredstava za hlađenje i podmazivanje pri obradi bušnjem. Obrada metala i tribologija br. 10, Kragujevac, decembar 1977.
24. B. JEREMIĆ, R. MILIĆ, D. RADOVANOVIĆ, Izbor optimalnog sredstva za hlađenje i podmazivanje sa tribološkog i ekonomskog aspekta. Jugoslovenski simpozijum o tribologiji, primena goriva i maziva JUGOMA '80, Split.
25. B. VASILJEVIĆ, Producitvnost i ekonomičnost u funkciji vrste i kvaliteta savremenih tvrdih metala, Tribologija u industriji No 1/1980, Mašinski fakultet, Kragujevac.
26. M. BABIĆ, Tribološke karakteristike SHP u obradi struganjem alatima od tvrdog metala, Tribologija u industriji No 4/1979., Mašinski fakultet, Kragujevac.
27. S. ARSOVSKI, B. SREĆKOVIĆ, Uticaj termičke obrade ugljeničnih čelika za poboljšanje na obradivost rezanjem, Zbornik referata sa savetovanja »Savremeni postupci termičke obrade i ocene metalnih materijala«, Kragujevac, 1980. god.



Tribološke pojave na domaćim alatima za duboko bušenje**

U V O D

Busenje dubokih otvora je specifična tehnološka operacija, široko primenjena, najčešće u opštij i specijalnoj mašinogradnji, brodogradnji, aviogradnji, naftnoj, hemijskoj i automobilskoj industriji. Sa razvojem tehnike proširuje se oblast primene i assortiman alata, tako da je danas u svetu razvijeno više tipova alata za duboko bušenje u puni materijal.

Za potrebe jugoslovenskog tržišta ovi specijalni alati su do sada u potpunosti obezbeđivani iz uvoza, pri čemu je vršen veliki odliv deviznih sredstava.

Imajući u vidu izraženu tendenciju široke primene, teškoće oko obezbeđenja i aktuelizaciju supstitucije uvoza, OOVR »ALATNICA« — ZAVODI »Crvena Zastava« iz Kragujevca, odlučila je da sopstvenim snagama i u saradnji sa Laboratorijom za obradu metala i tribologiju Mašinskog fakulteta iz Kragujevca razvija i proizvodi jednosečne burgije za duboko bušenje sa spoljašnjim i unutrašnjim odvodom strugotine.

Cilj ovog rada je da upozna stručnu javnost sa početnim rezultatima proizvodnje i da rasvetli neke tribološke pojave na reznim elementima jednosečnih burgija za duboko bušenje.

OSNOVI PROCESA DUBOKOG BUŠENJA

Opravданost zamene klasičnog bušenja spiralnim burgijama, ne samo dubokih otvora, manifestuje se kroz:

- izraženu visoku produktivnost,
- ostvarenje uskih tolerancija mera,
- postizanje visoke tačnosti geometrije i upravnosti otvora,
- ostvarenje visokog kvaliteta obrađene površine.

pri čemu je povećanje brzina rezanja omogućeno kontinualnim i obilnim hlađenjem i podmazivanjem reznih elemenata alata. U odnosu na bušenje spiralnim burgijama, pomoćna vremena za vađenje alata, radi uklanjanja nastale strugotine, su eliminisana.

Karakteristična su tri sistema za obradu dubokih otvora:

- bušenje jednosečnim alatima,
- bušenje po »BTA« postupku,
- bušenje sa »EYECTOR« glavama.

U okviru ovih sistema, razvijeno je više tipova alata, pri čemu je moguća obrada bušenjem u puni materijal, bušenjem prstenastog oblika i proširivanjem. Pri tome se obrada može izvoditi po različitim kinematskim shemama i sa različitim načinima dovodenja i odvođenja sredstva za hlađenje i podmazivanje (SHP) i stvorene strugotine.

Otvori kod kojih je odnos dužina i prečnika $l/d > 5$, nazivaju se dubokim otvorima. Za bušenje takvih otvora projektuju se specijalni alati i oprema tako da zadovoljavaju kompleksne uslove procesa rezanja, koje karakterišu nepovoljnost obrazovanja i odvodenja strugotine, mala kružnost alata i nemogućnost nadzora rada. Ove okolnosti i objašnjavaju činjenicu da se pitanju temeljitijih izučavanja u ovoj oblasti pridaje veliki značaj.

Posmatrajući uopšteno, težnja konstruktora alata za duboko bušenje svodi se na rešavanje:

- mogućnosti dovodenja dovoljne količine SHP,
- dobijanja željenog oblika strugotine,
- ostvarenja minimalnih odstupanja upravnosti otvora,
- obezbeđenja visoke proizvodnosti i ekonomičnosti procesa,
- postizanja visokog kvaliteta obrađene površine i
- jednostavnosti i pouzdanosti u radu.

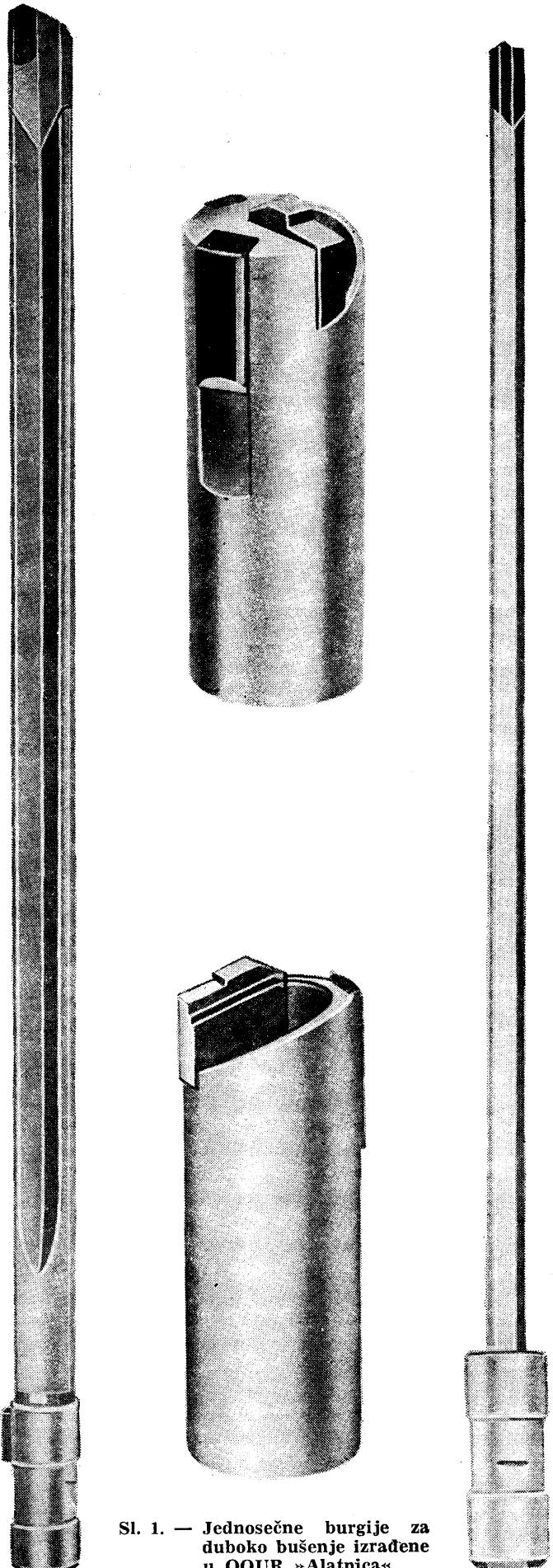
KONSTRUKTIVNE KARAKTERISTIKE I REZNA GEOMETRIJA DOMAČIH ALATA ZA DUBOKO BUŠENJE

Jednosečne burgije sa spoljašnjim odvodom strugotine koriste se za bušenje dubokih otvora, prečnika 3—30 mm, sa primenom kod bušenja i kratkih otvora. Ovo se obrazlaze činjenicom da se njima može brže i ekonomičnije raditi nego sa spiralnim burgijama i postizati takva tačnost i kvalitet obrađene površine da u većini slučajeva nije potrebna naknadna obrada. Ovaj alat, sa shematskim prikazom rada na sl. 2, sastoji se iz tri dela: glave, drške i klipa za privršćivanje.

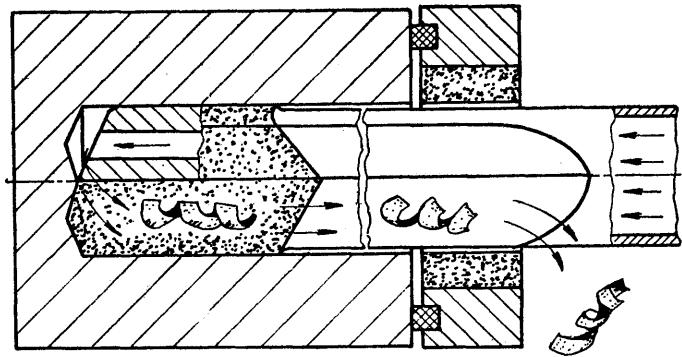
Glava burgije, koja se tvrdim lemljenjem spaja sa drškom, može biti integralna od tvrdog metal-a i višedelna (kombinovana sa brzoreznim čelikom i tvrdim metalom). Prva varijanta izrade je najčešće zastupljena u opsegu prečnika 3—10 mm. Oblik otvora glave je prilagođen dršci, a dimenzionisan je tako da omogućava obilan dovod SHP pod pritiskom. Usitnjena strugotina se odvodi kroz žljeb glave oblika V sa uglom od 110—120°, koji je, sa aspekta zadovoljenja krutosti, efikasnog odvoda strugotine i jednostavnosti izrade, eksperimentalno određen. Parametri rezne geometrije glave prikazani su na sl. 4.

* Biografija autora data u časopisu »Tribologija u industriji«, 4, (1979).

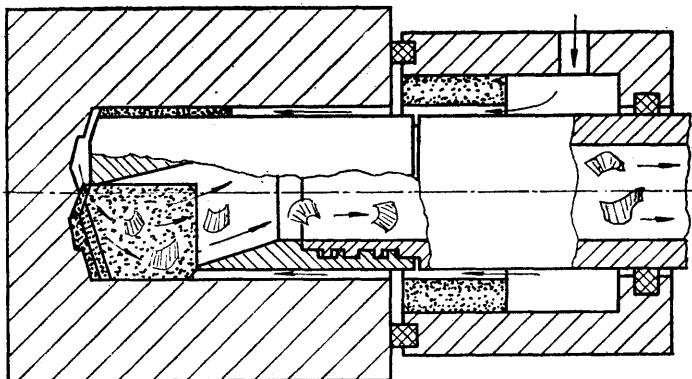
** Rad predstavlja deo rezultata istraživanja na naučno-istraživačkom projektu »RAZVOJ I USAVRŠAVANJE REZNIH, PRESERSKIH I DRUGIH SPECIJALNIH ALATA«, koji je finansirala OOVR »ALATNICA« ZZZ iz Kragujevca i OZ Nauke regiona Šumadije i Pomoravlja.



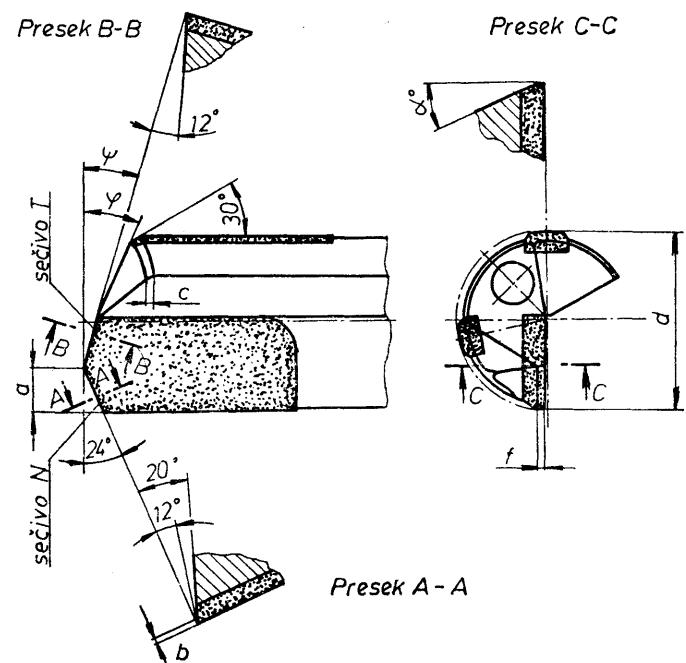
Sl. 1. — Jednosečne burgije za duboko bušenje izrađene u OOUR »Alatnica«



Sl. 2. — Shematski prikaz rada jednosečnih burgija sa spoljašnjim odvodom strugotine



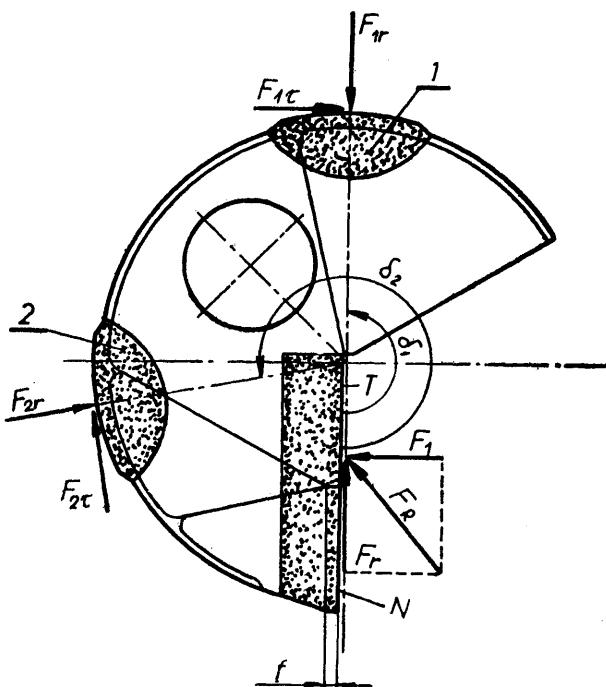
Sl. 3. — Shematski prikaz rada jednosečnih burgija sa unutrašnjim odvodom strugotine



Sl. 4. — Rezna geometrija jednosečnih burgija sa spoljašnjim odvodom strugotine

Uočava se postojanje dva sečiva na reznom elementu (N -spoljašnje, T -unutrašnje), čiji presek obrazuje vrh burgije sa funkcijom deljenja strugotine na dva dela. Položaj vrha burgije, određen veličinom » a «, ima veliki uticaj na pravac i smer otpora rezanja, stabilnost i postojanost alata

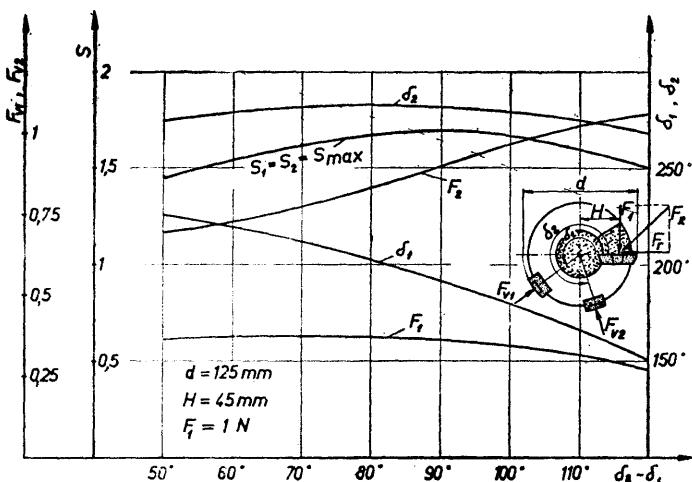
i kvalitet obrađene površine, a određuje se u funkciji prečnika glave i materijala predmeta obrade. Obično se kreće u granicama $a = (0,25 - 0,3)$ d.



Sl. 5. — Prikaz dejstva sile rezanja i rasporeda vodica

Vodenje burgije se obezbeđuje dvema vodicama. Vodica (1) se nalazi pod približnim uglom od 180° u odnosu na grudnu površinu reznog elementa i prima radikalnu komponentu sile rezanja (F_r).

Vodica (2) se, u odnosu na vodicu (1), nalazi pod uglom od približno 100° i prima glavnu komponentu sile rezanja (F_1), prema prikazu na sl. 5. Veličine uglova koji definišu uzajamni položaj vodica u odnosu na grudnu površinu reznog elementa, su funkcionalno vezane za uslove rada i mogu se odrediti na osnovu eksperimentalnih istraživanja i teorijskih postavki [1], a shematski prikaz određivanja dat je na sl. 6.



Sl. 6. — Zavisnost otpora vodica (F_{v1}, F_{v2}) i stepena stabilnosti (S) u funkciji uglova (δ_1, δ_2) na jednom primeru

Fazeta (f) nema funkciju vođenja burgije, već služi za kalibriranje otvora, čišćenje površine, zaštitu burgije od habanja i sprečavanje stvaranja naslaga na vodicama, čime se stvaraju povoljni uslovi rada burgije. Eksperimentalno je utvrđeno da veličina (f) ima veliki uticaj na postojanost

alata na način što se manjim veličinama obezbeđuje veća postojanost. Veličina (f) proporcionalno raste sa porastom prečnika. Za područje prečnika $d = 3 - 30 \text{ mm}$, ona se kreće u granicama $f = 0,15 - 0,7 \text{ mm}$, a preporučena veličina se u toku eksploatacije mora održavati.

Dužine sečiva (N i T) u velikoj meri utiču na zadovoljenje granične upravnosti otvora, što znači da radikalna komponenta sile rezanja na sečivu (N), treba da bude veća od radikalne komponente na sečivu (T), odnosno $F_{Nr} > F_{Tr}$. Tako se veličina sile koju prima vodica (1) dobija iz razlike:

$$F_r = F_{Nr} - F_{Tr} \quad (1)$$

Samo sa takvim vektorom sile F_r vrši se rasterećenje fazete i elimišiće »bežanje« od ose otvora, čime se stvaraju predušlovi za postizanje visokog kvaliteta obrađene površine i proizvodnosti.

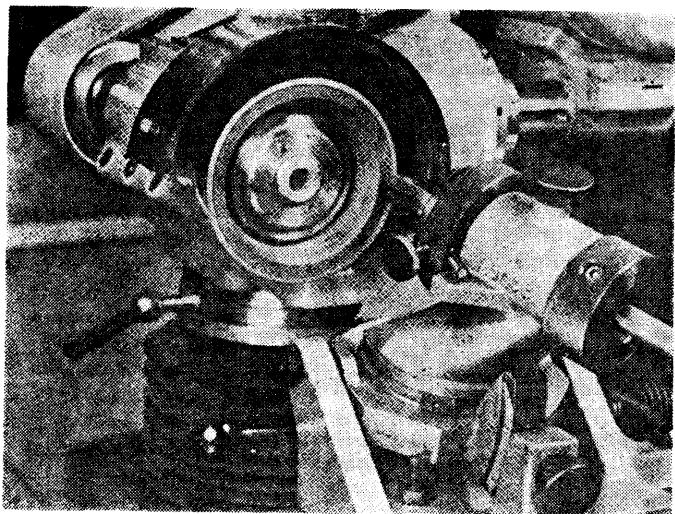
To se postiže zadovoljavanjem uslova $N > T$, $\Psi < 24^\circ$ i relacije $a = (0,25 - 0,3) d$. U protivnom, dolazi do povećanja habanja fazete i pojave pratećih negativnih efekata.

Grudna površina sa uglom od 0° ne sme prelaziti iznad ose alata. Ostali naznačeni parametri rezne geometrije su funkcija prečnika alata.

Pored rezne geometrije, dominantan uticaj na postojanost alata ima kvalitet tvrdog metala. Zbog istrošenja tvrdog metala, koje može prouzrokovati zaglavljivanje u toku rada, vodicama i fazetama se obezbeđuje koničnost od glave prema dršci u veličini 1:600.

Za početno vođenje burgije služe vodeće čaure, izrađene od brzoreznog čelika ili tvrdog metala, čiji je otvor veći od nazivnog prečnika alata za $0,005 \text{ mm}$. Čaure treba zamjenjivati pri istrošenju većem od $0,01 - 0,02 \text{ mm}$. Ako je bušna čaura u okviru propisane tolerancije i zajedno sa predmetom obrade dobro pričvršćena i ako je bušilica u dobrom stanju koje podrazumeva i dobro hlađenje, dobija se obrađena površina visokog kvaliteta. Na kvalitet obrade, pored korektnog zadovoljavanja svih uslova, utiče i izbor režima obrade (manji posmak daje bolji kvalitet) i efikasnost filtriranja krupnijih čestica od $0,005 - 0,01 \text{ mm}$.

Održavanje rezne geometrije alata vrši se preoštrevanjem pomoću specijalnih pribora (sl. 7) i predstavlja važan faktor u postizanju kvaliteta obrade i proizvodnosti. Pohabano sečivo ne sme biti prevelika, jer može izazvati krzanje ili lom alata. Postoje orientacione preporuke veličina pojasa habanja na lednoj površini ($h = 0,2 - 0,4 \text{ mm}$ i $h = 0,4 - 0,6 \text{ mm}$ za veće prečnike). U praksi se obično za kriterijum zatupljenja uzima opadanje kvaliteta obrađene površine, povećanje otpora rezanja i pojava karakterističnog zvuka i podrhtavanje alata. Broj oštrenja obično iznosi 15–20, a postojanost, determinisana mnogobrojnim faktorima, kreće se u širokom intervalu od 5–30 metara.



Sl. 7. — Izgled pribora za oštrenje burgija

Drška burgije se izvodi profilisanjem bešavnih svetložarenih cevi od čelika za poboljšanje, sa profilom od $110 - 120^\circ$, koji je identičan sa žlebom glave. Ima funkciju odvodjenja SHP sa strugotinom i povećanja otpornosti na torziju. Zadnji deo drške je cilindričan — neprofilisan i

spaja se tvrdim lemljenjem sa klipom za pričvršćivanje na vreteno, najčešće horizontalne bušilice. S obzirom da se otpori rezanja prenose preko drške, dimenzionisanju i izradi iste se posvećuje posebna pažnja.

Klip za pričvršćivanje se vezuje za vreteno maštine pomoću priteznog vijka. U njemu se obrazuje cilindričan otvor za prolaz SHP do glave alata. Izrađuje se u više standardnih oblika i dimenzija.

Jednosečne burgije za duboko bušenje sa unutrašnjim odvodom strugotine (po tzv. BTA sistemu), koriste se najčešće za obradu bušenjem ili proširivanjem, prečnika 20—65 mm. Ovi alati, (shematski prikaz rada dat na sl. 3), sastoje se iz dva razdvojiva elementa: krune za bušenje i bušne cevi (drške alata).

Kruna alata se izrađuje u kombinaciji od konstruktivnog čelika i tvrdog metala. U svojstvu reznog elementa koristi se pločica od tvrdog metala, tvrdo zaledljena sa telom krune.

Vodice alata od tvrdog metala imaju identičnu ulogu kao kod prethodno analiziranih alata. Kako je prikazano, SHP dolazi u zonu rezanja pod pritiskom kroz prstenasti zazor između bušne cevi i zida otvora, i pored hlađenja i podmazivanja odnosi strugotinu kroz otvor krune u bušnu cev. Analizom procesa rezanja, došlo se do zaključka da će odvođenje strugotine biti efikasno, samo ako je brzina SHP jednaka, ili veća od brzine formiranja strugotine. Tako protok SHP, kao funkcija prečnika alata, često iznosi i neko-

liko stotina litara po času, sa potrebnim pritiskom od $(50—70) \cdot 10^3$ Pa. Efikasnom odvođenju strugotine doprinosi usitnjenošć iste, što se postiže formiranjem stepenastog sečiva (N). Bušne krune prečnika do 40 mm imaju jednu, a preko 40 mm dve stepenice (videti prikaz rezne geometrije na sl. 8).

Razlika nivoa stepenica iznosi $t = 0,5 — 1,3$ mm, a prelaz sa jedne na drugu je izведен tako da se obezbeđuje deoba strugotine i kada je kraj stepenice zatupljen. Osim toga, radi dobijanja transportibilne strugotine, na grudnoj površini reznog elementa se izvodi specijalni lomač, čije su dimenzije funkcija materijala predmeta obrade i prečnika otvora, a utvrđuju se eksperimentalno.

Na bočnoj strani reznog elementa, formira se fazeta širine (f) za vršenje već poznate funkcije.

Na zadnjem delu bušne krune izvodi se najčešće unutrašnji trapezni navoj za vezu sa bušnom cevi sa korektno obezbeđenim centriranjem.

Na kruni se izvodi konus tako, da prečnik izbušenog otvora bude u propisanoj toleranciji i pri zadnjem predviđenom preoštravanju, koje vrši specijalno obučen radnik sa specijalnim priborom.

Bušna cev na oba kraja ima spoljašnji trapezni navoj za vezu sa krunom, odnosno vretenom maštine. Dimenzionisanim iste treba obezbediti primenu predviđenih režima obrade, obilan dovod SHP i ispiranje stvorene strugotine.

U odnosu na prethodne, ovi alati nemaju toliko široku primenu usled niza nedostataka, koji se manifestuju kroz relativno nisku proizvodnost, izražene probleme letovanja pločica i vodica od tvrdog metala. Eliminacija navedenih nedostataka se predviđa ugradnjom reznih elemenata sa mehaničkim pričvršćivanjem.

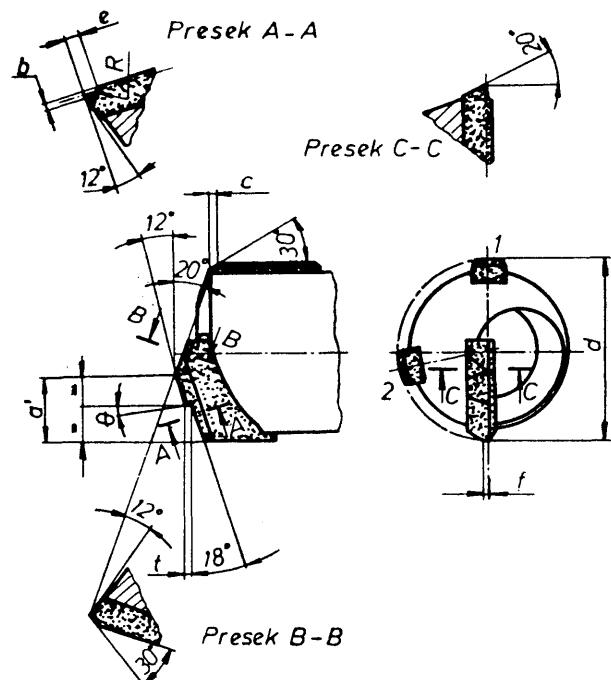
NEKI REZULTATI ISPITIVANJA EKSPLOATACIJSKIH KARAKTERISTIKA DOMAČIH ALATA ZA DUBOKO BUŠENJE

U okviru planskih zadataka programskog razvoja, OOVR »ALATNICA« je inicirala i dala prioritet osvajanju napred opisanih alata za duboko bušenje, kako zbog iskazanog interesa domaćeg tržišta alata, tako i iz strateških razloga. Rezultati ove aktivnosti se ogledaju u početku redovne proizvodnje alata određenih intervala prečnika i reparaturi (zameni istrošenih bušnih glava) alata svih prečnika.

Problematiku industrijalizacije proizvodnje sačinjava obezbeđenje manjeg broja specijalnih pribora i kvalitetnog repromaterijala (tvrdog metala i cevi) za koje su potrebna znatna devizna i dinarska sredstva.

Kroz ovaj rad će biti prezentirani rezultati ispitivanja postojanosti i kvaliteta bušenja otvora nekim alatima, kompletno uređenim u OOVR »ALATNICA«, pri čemu su rezultati upoređivani: kod jednosečnih burgija, koje imaju spoljašnji odvod, strugotine sa rezultatima renomirane firme TBT, a kod jednosečnih burgija, koje imaju unutrašnji odvod, sa rezultatima firme HELLER. **Napomena:** Uporedna ispitivanja performansi domaćih alata (u koje je kompletno ugrađen domaći repromaterijal) i uvoznih, vršena su na istoj mašini, sa identičnim režimom i materijalom predmeta obrade.

Tabelom 1. su obuhvaćeni zastupljeni parametri ispitivanja i iskazana postojanost domaćih alata.

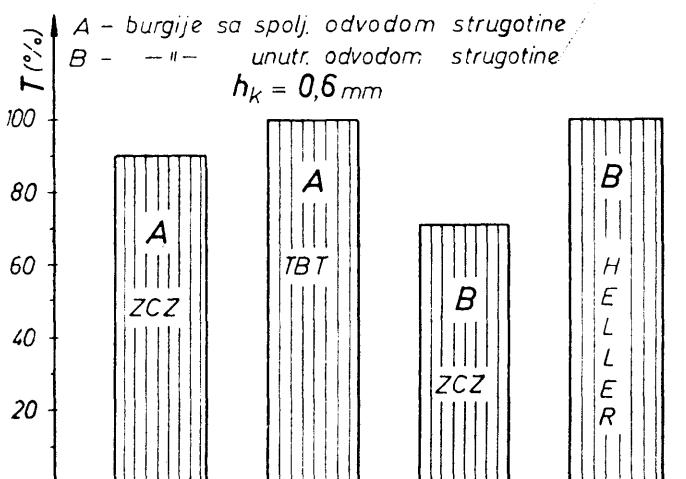


Sl. 8. — Prikaz rezne geometrije jednosečnih burgija sa unutrašnjim odvodom strugotine

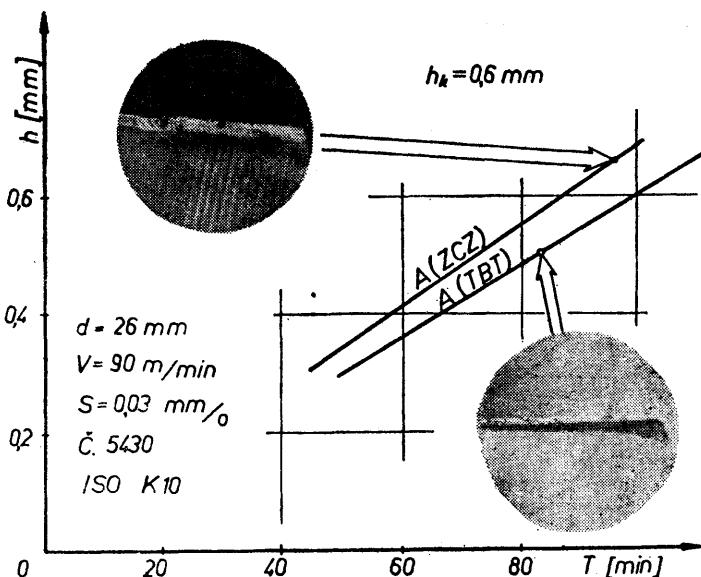
TABELA 1.

Tip alata	Domaće jednosečne burgije	
	tip A	tip B
Dimenzije alata $d \times l$ (mm)	$\emptyset 26 \text{ h } 5 \times 600$	$\emptyset 19,6 \text{ h } 5$
Izvođenje glave alata	višedelna	višedelna
Broj ispitanih alata (kom.)	3	
Materijal predmeta obrade	Č.5430, pob.	$\sigma_m = 100 \text{ KN/cm}^2$
Vrsta SHP	Rezol — 20	Rezol — 20
Tip maštine	TBT, horizontalna dvopr.	HARBEK B-2B
Broj obrtaja alata (o/min)	1100	550
Broj obrtaja predm. obrade (o/min)	0	450
Aksijalni korak (mm/o)	0,036	0,43
Pritisak SHP (Pa)	28 · 105	40 · 105
Dužina bušenja (m/kom.)	0,160	1,8
Postojanost alata (min)	90	126

Ako se za postojanost uvoznih alata usvoji indeks 100, a za kriterijum zatupljenja $h_k = 0,6 \text{ mm}$ (habanje po lednoj površini sečiva N), na sl. 9. se može sagledati procentualno upoređenje postojanosti domaćih i uvoznih jednosečnih burgija oba tipa, a na sl. 10. i 11. krive habanja jednosečnih domaćih i uvoznih burgija oba tipa.



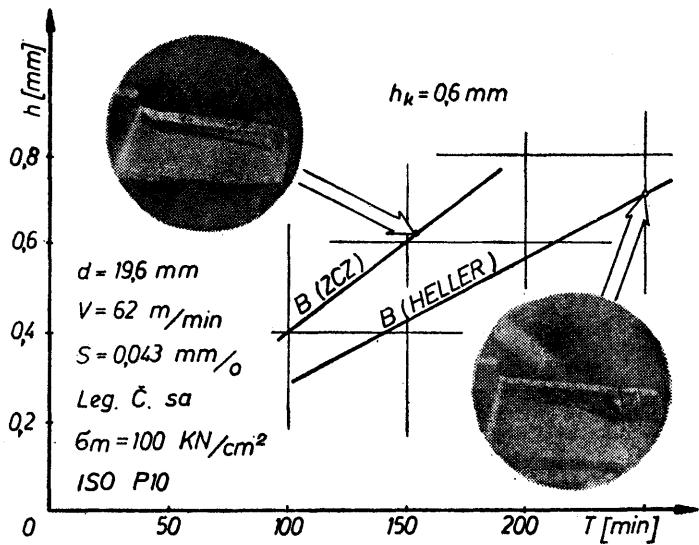
Sl. 9. — Uporedni prikaz postojanosti domaćih i uvoznih alata oba tipa



Sl. 10. — Krive habanja domaćih i uvoznih alata tipa A

Analizirajući ostale uporedne pokazatelje rada domaćih alata u oba slučaja se mogao konstatovati miran rad i normalno zagrevanje sa ostvarenjem transportibilne strugotine. Habanje reznih elemenata je postepeno, pri čemu nije dolazio do pojave krzanja. Ostvarena tačnosti geometrije oblike, upravnosti otvora i stepena površinske hrapavosti (N_5 — N_7), nisu se bitnije razlikovala od uporednih.

Kod jednosečne burgije sa spoljašnjim odvodom strugotine, habanje je (prema sl. 12) izraženo na lednoj površini sečiva N i ima porast idući prema obimu burgije. Habanje ledne površine sečiva T i grudne površine oba sečiva je zanemarljivo, te se kao kriterijum za ocenu potpune zatupljenosti usvaja širina pojasa habanja (h) po lednoj površini sečiva N . U nekim slučajevima, javlja se pojave mikrokrzanja reznog elementa, što je karakteristično za obradu materijala sa neujednačenom strukturu i nestabilnost obradnog sistema.



Sl. 11. — Krive habanja domaćih i uvoznih alata tipa B

Oblik habanja jednosečne burgije sa unutrašnjim odvodom strugotine (prikazano na sl. 13) je u velikoj meri sličan prethodnom slučaju. To znači da je habanje stepenice sečiva (N) bliže obimu, više izraženo, a habanje ledne površine druge stepenice istog sečiva i sečiva (T) je linearno i opada prema centru alata, pa se može zanemarivati.

Napred navedeno upućuje na zaključak da se analizom pojasa habanja reznog elementa i vodica alata može kvalitetno oceniti ispravnost projektovane i izvedene rezne geometrije alata.

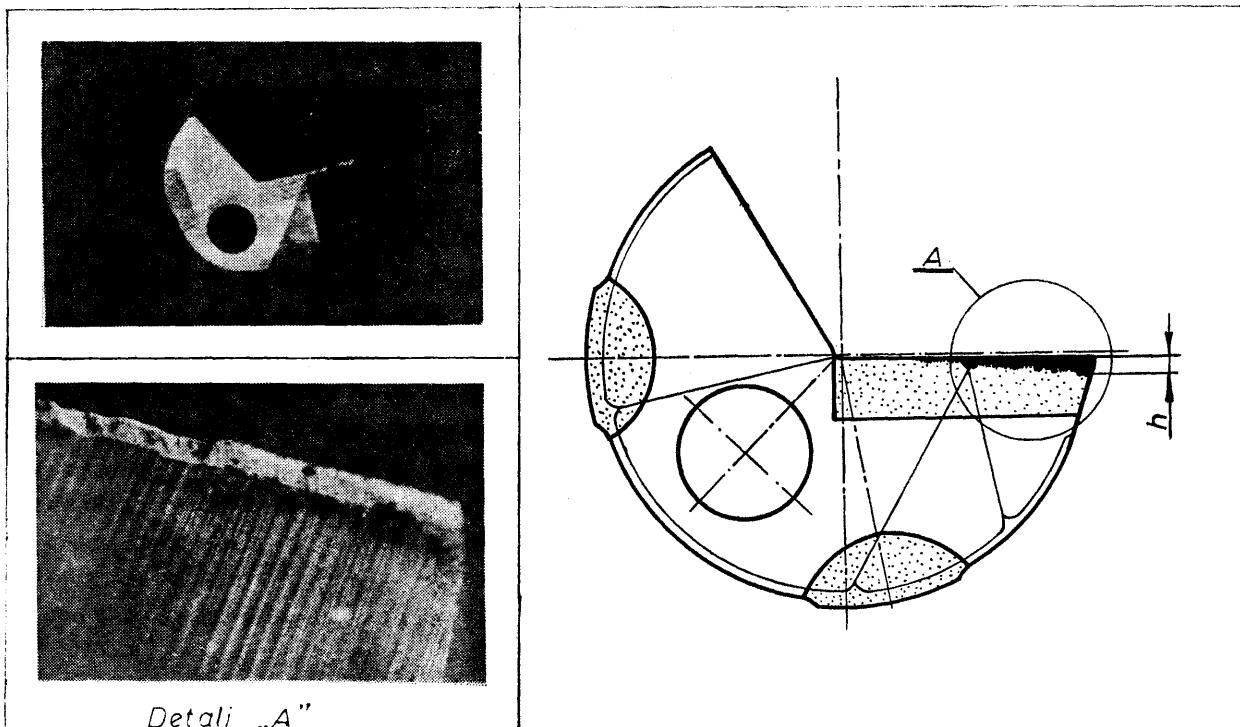
ZAKLJUČAK

Sve obuhvatnom analizom dosadašnjeg rada u delu osvajanja alata za duboko bušenje u puni materijal mogu se konstatovati ohrabrujući rezultati. Istina, zapaža se relativno niža postojanost u poređenju sa uvoznim alatima, što se opravdava nižim kvalitetom ugrađenog domaćeg tvrdog metal. Postoje indicije boljih rezultata, koji nisu temeljni analizirani, što na neki način i potvrđuje povećanje potražnje ispitanih domaćih alata. Stručnoj javnosti će blagovremeno biti prezentirani rezultati planiranih istraživanja u ovoj oblasti.

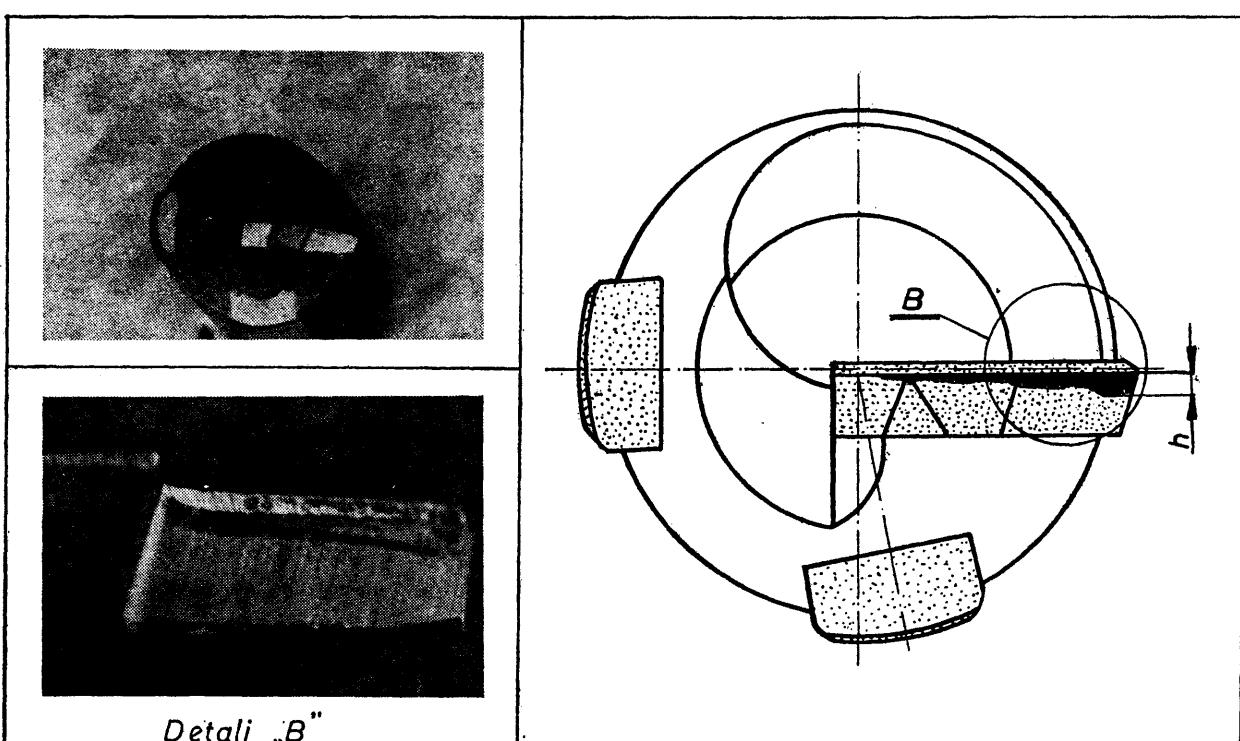
OOUR »ALATNICA« je stvorila kapacite i tehnološke uslove za industrijalizovanu proizvodnju, pa će sa OOUR »MAŠINE« ZCZ — proizvođačem horizontalnih bušilica, činiti spregu proizvođača alata i mašina, što se može smatrati velikim doprinosom šire primene tehnologije obrade metala dubokim bušenjem u našim uslovima.

LITERATURA

1. F. PFLEGHAR, Aspekte zur Konstruktiven Gestaltung von Tiefbohrwerkzeugen. Werkstatutechnik, 67 № 4 (1977).
2. M. A. МИНКОВ, Технология изготовления глубоких точных отверстий, Москва (1965).
3. Н. Д. ТРОИЦКИЙ, Глубокое сверление, Ленинград (1971).
4. V. LATINOVIĆ, R. BLAKELY, Optimal Design of Multi-Edge Cutting Tools for BTA Deep Hole Machining, Конструирование и технология машиностроения (№ 2 — 1979).
5. Prospekti proizvođača alata: SIG, TBT, HELLER, Sandvik Coromant.
6. M. MIJAČIĆ, Diplomski rad na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu, (1978).



Sl. 12. — Oblik habanja jednosečne burgije tipa A



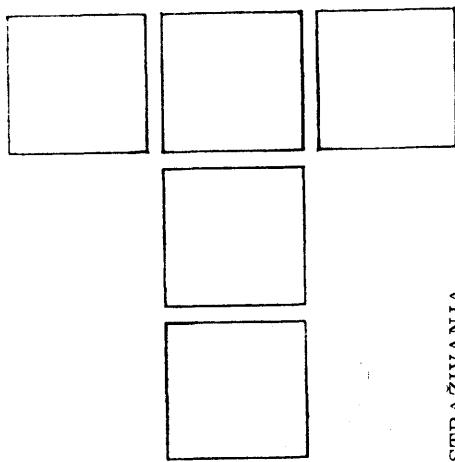
Sl. 13. — Oblik habanja jednosečne burgije tipa B



MILORAD BOGDANOVIĆ, dipl. inž.

Glavni konstruktor — tehnik za razvoj reznog alata u
Službi razvoja proizvoda OOUR »ALATNICA« ZCZ
— Kragujevac

Roden 1952. godine. Diplomirao
na Mašinskom fakultetu u Kra-
gujevcu, 1978. godine.
Bavi se problematikom osvajanja
alata za obradu dubokih otvora.

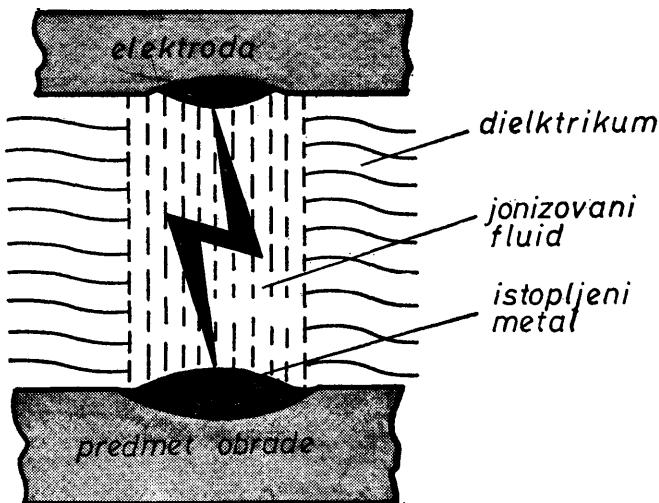


Aktuelni problemi pri elektroerozivnoj obradi

UVOD

Elektroeroziona obrada (nem. »Funkenerosion«; engl. »Electrical discharge machining-EDM«) je proces kojim se uklanja višak materijala pomoću kratkotrajnog pražnjenja velike gustine struje između alata i predmeta obrade.

Princip uklanjanja materijala električnom varnicom bio je poznat još u prošlom veku, ali praktičnu primenu je dobio tek u poslednjih 25 godina, pa se sa razlogom može reći da je ovo jedna od novijih vrsta obrade. Elektroerozioni procesi se može uporediti sa minijsaturnom verzijom svetleće munje (sl. 1) koja napada površinu, stvarajući lokalizovanu povišenu temperaturu na tom mestu topeći materijal predmeta obrade.



Sl. 1. — Kontrolisana varnica uklanja višak materijala

Elektroeroziona obrada pripada grupi nekonvencionalnih postupaka. Ovde ne dolazi do direktnog kontakta između alata i predmeta obrade, a uklanjanje viška materijala i oblikovanje predmeta obrade zavisi samo od oblika alata i jačine električne struje koja se utroši u procesu varničenja.

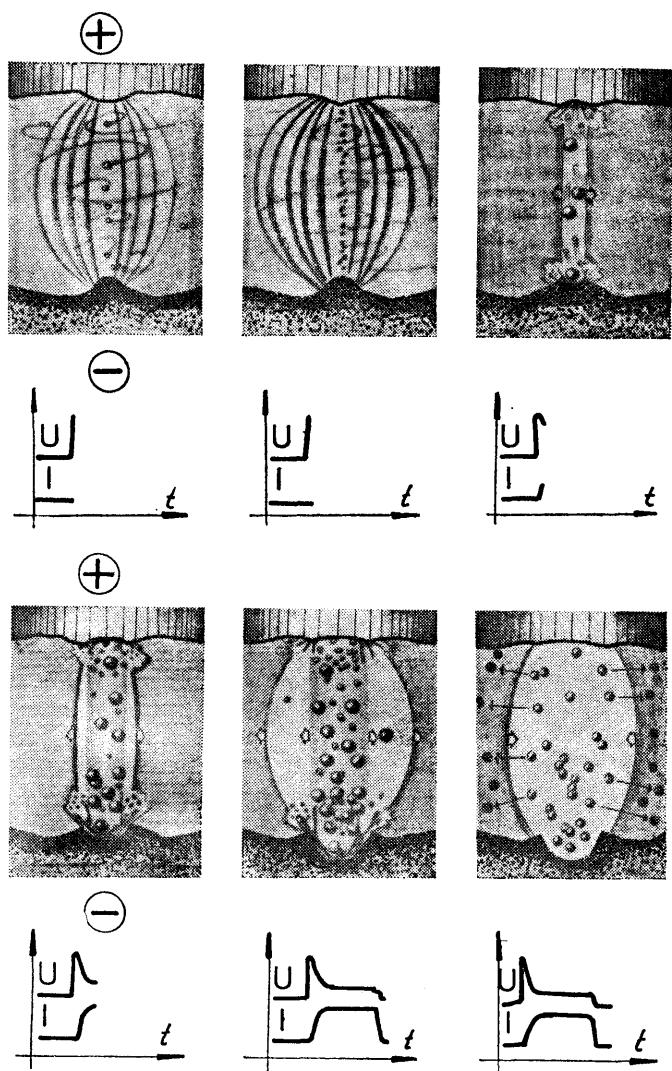
FIZIČKI OSNOVI ELEKTROEROZIONE OBRADE

Fizički proces uklanjanja viška materijala električnim pražnjenjem (varnicom) je kompleksna pojava izvodi se uvek sa dve elektrode (alat i predmet obrade) tako što se one potope u odgovarajući medijum — dielektrikum, tj. tečnost sa velikim električnim otporom.

Da bi došlo do stvaranja varnice između elektroda, normalno, mora da postoji napon. Visina napona zavisi od nekoliko faktora:

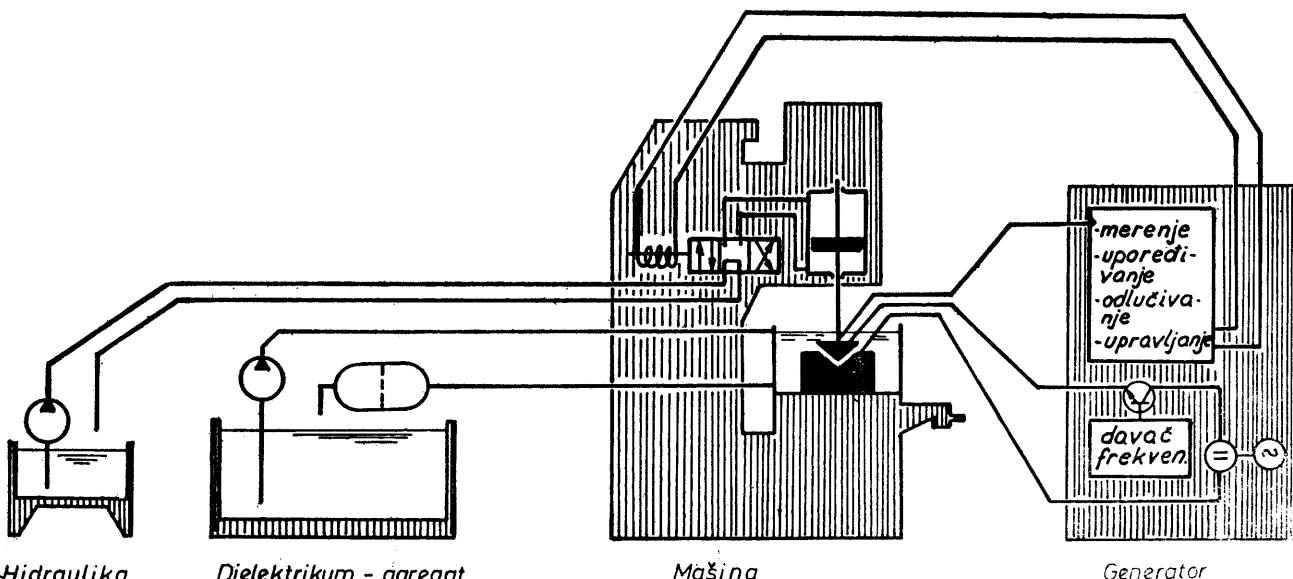
- rastojanja između elektroda,
- provodljivosti dielektrične tečnosti i
- zaprljanosti erozionog zazora.

Napon u celom međuprostoru pravi električno polje. Pomoću dejstva sile električnog polja i geometrijskih osobnosti površina elektroda koncentrišu se u tečnosti lebdeće, provodne čestice na mestu najveće jačine polja (sl. 2).



Sl. 2. — Fizički prikaz procesa elektroerozije

Ovo dovodi do stvaranja jonizovanog, a prema tome i provodljivog, kanala. Istovremeno dolazi do izbacivanja negativnih čestica iz negativno opterećene elektrode. One se sudebruju sa neutralnim delićima u međuprostoru i dolazi



Sl. 3. — Shematski prikaz uobičajenog elektroerozivnog postrojenja

do njihovog cepanja. Na ovaj način nastaju negativno i pozitivno opterećeni delići. Ovaj proces se širi velikom brzinom.

U ovom momentu teče struja između elektroda, što znači da pozitivni delići idu ka negativnoj, a negativni ka pozitivnoj elektrodi. Usled prolaska struje dolazi do naglog povećanja temperature koja dostiže 8000—12000 K. Visoka temperatura prouzrokuje topljenje izvesne količine materijala na obe elektrode, a istovremeno dolazi i do isparjenja dielektrikuma na mestu prolaza struje, stvarajući gasni mehur sa visokim unutrašnjim pritiskom. Pri prekidanju struje temperatura naglo opada prouzrokujući naglo smanjenje broja nanelektrisanih čestica, a dolazi i do eksplodiranja mehura. Istopljene čestice metala se stvaraju i pod pritiskom izbacuju napolje. Uobičajena učestalost električnih pražnjenja između elektroda je 20000-30000 Hz. Svako pražnjenje uklanja malu količinu materijala. Pošto je napon za vreme pražnjenja konstantan, količina uklonjenog materijala će biti proporcionalna veličini opterećenja elektrode i predmeta obrade. U cilju povećanja proizvodnosti procesa obrade potrebno je na elektrode dovesti veću jačinu struje koja će istopiti veću količinu viška materijala. Ovo, međutim, prouzrokuje velike kratere na predmetu obrade, rezultujući grubo obrađenu površinu. Da bi se dobili manji krateri, a prema tome i bolje obrađena površina, potrebno je angažovati slabije struje. To će se odraziti kroz manju proizvodnost. Ako jačinu struje zadržavamo konstantnom, a menjamo frekvenciju, primetićemo da se sa povećanjem frekvencije poboljšava i kvalitet obrade.

OPREMA

Postrojenje za elektroerozionu obradu sastoji se od nekoliko jedinica (sl. 3). Najvažniji elemenat u celom sistemu je generator. Uloga generatora je da naizmeničnu struju iz mreže pretvori u jednosmernu struju niskog napona i velike jačine, prekidajući je sa frekvencijom od optimalne 20000 Hz. Ovi električni energetski impulsi postaju varnice koje skaču u međuprostoru između alata i predmeta obrade.

Kod novijih generatora napon je uvek konstantan, a veličinu impulsa određujemo podešavajući jačinu struje i dužinu impulsa. Kombinujući ove dve veličine dobijaju se različiti režimi obrade. Svi proizvođači mašina za elektroerozionu obradu daju, tabelarno ili dijagramski, priručna sredstva za brzo određivanje ovih parametara u zavisnosti od željene obrade.

Sama mašina sastoji se iz radnog stola, koji je vrlo precisan s ciljem tačnog pozicioniranja predmeta obrade, i glave mašine koja u sebi sadrži hidraulični cilindar za pomeranje elektrode.

Veoma je važno, pri obradi da ne dođe do fizičkog kontakta između elektrode i radnog komada, inače bi došlo do varničenja koje bi prouzrokovalo oštećenje i na elektrodi, i na predmetu obrade. Elektroerozione mašine su iz tih razloga opremljene servo mehanizmom koji automatski održava konstantran zazor od približno 0,02 mm između elektrode i predmeta obrade. Mehanizam, takođe, dovodi alat u radni položaj i ako dođe do nekih neželenih grešaka automatski vraća alat nazad. Precizna kontrola zazora je veoma bitna za uspešno izvršenje operacije. Ako je zazor suviše veliki neće se ostvariti ionizacija dielektrikuma i obrada se zaustavlja. U suprotnom slučaju, kada je zazor suviše mali, alat i predmet obrade se mogu zavariti jedan za drugi. Precizna kontrola zazora je ostvarena u kolu za napajanje energijom — generatoru, gde se upoređuje napon prosečnog zazora sa prethodno izabranim referentnim naponom. Razlika između dva napona je ulazni signal, koji kazuje servo-mehanizmu koliko daleko i koliko brzo da pokreće alat i kada da ga vrati nazad.

Metalni opiljci u varničkom prostoru mogu da redukuju napon ispod kritičnog nivoa, i u tom slučaju servo-mehanizam vraća alat nazad, sve dotle dok se opiljci ne uklone.

ALAT (ELEKTRODE)

Alat kod elektroeroziona obrade je urađen na oblik identičan onome koji želimo da postignemo na predmetu obrade. Materijal alata je u direktnoj zavisnosti od vrste materijala predmeta obrade. Poslednjih godina dosta se ispitivalo koji materijali su najpogodniji za određene vrste materijala obrade. Odabrani materijal alata bi trebalo da ima sledeće karakteristike:

- da bude dobar provodnik elektriciteta i toplotne,
- da se lako obraduje na željeni oblik,
- da relativno brzo uklanja materijal sa predmeta obrade,
- da bude otporan na deformacije za vreme procesa obrade, i
- da je otporan na habanje.

Za obradu čelika i tvrdog metala najčešće se koriste sledeći materijali: bakar, volfram-bakar i grafit. Nijedan od ovih materijala nije našao univerzalnu primenu, i slobodno se može reći da svaka operacija diktira selekciju materijala elektrode. Zbog dobrih rezultata grafit je danas najviše primenjivan materijal. Sa njime se postiže dobra proizvodnost, a i kvalitet obrade je na zadovoljavajućoj visini. U inostranstvu se može nabaviti u različitim oblicima i veličinama i

veoma se dobro obrađuje. U domaćoj industriji se najčešće koristi bakar, jer se može nabaviti u zemlji, a karakteristike u procesu obrade su zadovoljavajuće.

DIELEKTRIKUM

Dielektrikum je fluid upotrebљen u procesu električnog pražnjenja a njegov zadatak bi mogao da se sagleda u nekoliko tačaka:

- da pomogne stvaranje varnice između alata i predmeta obrade,
- da što više suzi kanal varnice,
- da služi kao izolator između alata i predmeta obrade,
- da izbacuje čestice metala u cilju izbegavanja kratkog spoja,
- da hlađi elektrodu i radni komad.

Mnoge vrste fluida mogu da se upotrebe kao dielektrikum, ali pri izboru treba voditi računa da se odabere fluid koji ostvaruje najbolju proizvodnost i minimalno habanje alata. Ova tečnost mora da bude sposobna da se brzo joniže i po prestanku struje dejonizuje. Viskoznost primenjenog fluida je takođe važan podatak. Fluid sa većom viskoznošću je nepogodan za fine obrade, jer su zazori eroziranja pri ovim hodovima vrlo mali, i protok tečnosti između elektrode i predmeta obrade je tada vrlo otežan. Kod grublje obrade mogu se upotrebiti gušća ulja prouzrakujući na taj način veću proizvodnost.

Najviše upotrebљavani fluidi su razne prerađevine petroleuma, kao što su svetla ulja za podmazivanje. Danas se mnogo radi na iznalaženju fluida sa optimalnim karakteristikama za elektroerozionu obradu. Vrlo je verovatno da će u skoroj budućnosti nova ulja biti razvijena i da će ovaj proces dobiti nove dimenzije.

Dielektrikum u procesu obrade mora da cirkuliše pod konstantnim pritiskom da bi što efikasnije uklonio metalne opiljke i da bi pomogao sam proces obrade. Suvise veliki pritisak će dobro uklanjati metalne opiljke, ali će usporiti proces odnošenja čestica, dok mali pritisak neće najbolje uklanjati čestice, što može dovesti do neželjenih kratkih spojeva.

HABANJE ALATA

Za vreme procesa električnog pražnjenja erozija se javlja kako na predmetu tako i na alatu. Eroziranje alata se naziva obično kao habanje elektrode, dok se ova pojava na predmetu obrade obično naziva proizvodnošću samog procesa. Ova pojava je jedan od glavnih nedostataka elektroerozionog obrada, jer prilikom rada dolazi do smanjivanja alata, a samim tim i do nemogućnosti dobijanja željenih oblika u zadatim tolerancijama. Ponekad je potrebno upotrebiti čak i 5 elektroda da bi dobili neko udubljenje u željenom toleransijskom polju. Za polazne otvore problem habanja elektrode je manje bitan, jer se u ovom slučaju elektrode prave duže, nadoknađujući na taj način pohabane delove elektrode.

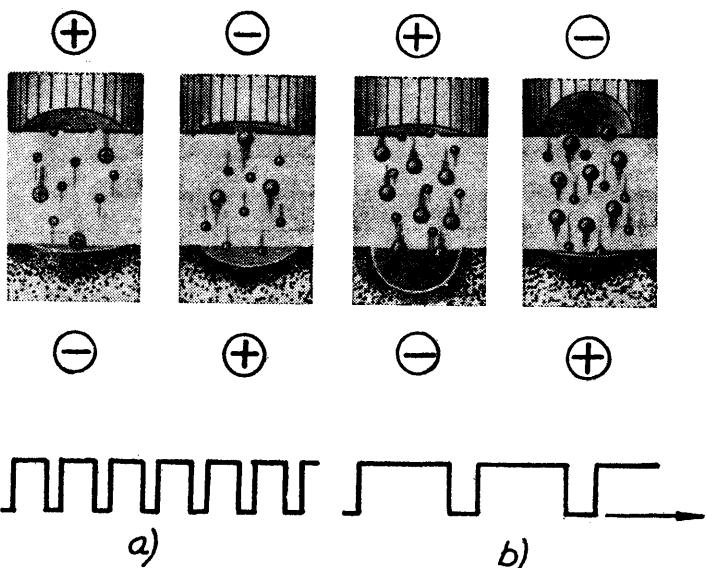
Brzina habanja elektrode je znatno niža od brzine uklanjanja materijala sa predmeta obrade. Na veličinu habanja najviše utiču sledeći parametri:

- vrste materijala obe elektrode (predmet obrade i alat)
- trajanje električnog pražnjenja, jačina električne struje i polaritet.

Pri pravilnom izboru podešavanja radne struje može se, naprimjer, postići uklanjanje materijala predmeta obrade od 99,5%, sa habanjem elektrode od 0,5%.

Od gore nabrojanih parametara, može se reći, da svi imaju podjednako važan uticaj na veličinu habanja elektrode. Međutim, u poslednje vreme se velika pažnja poklanja izmenjivanju polariteta, pa bi o tome nešto trebalo više reći.

Kao što je ranije bilo rečeno u zazoru između elektroda dolazi do kretanja pozitivno i negativno nanelektrisanih čestica, ostvarujući na ovaj način protok struje. Treba napomenuti da kretanje i sudaranje ovih čestica dovodi do povećanja temperaturu, a samim tim i topljenja metala. Na sl. 4 prikazana su dva slučaja: prvi, gde je frekvencija impulsa velika, i drugi, gde je frekvencija impulsa mala.



Sl. 4. — Habanje elektrode u zavisnosti od polariteta i trajanja impulsa

- a) velika učestalost impulsa
- b) mala učestalost impulsa

U prvom slučaju, gde je frekvencija impulsa visoka, primećuje se da su znatno pokretniji negativni delići, jer su oni znatno manji od pozitivnih. U suprotnom slučaju, kada bi promenili polaritet, veća toplota bi se opet generisala na pozitivnoj elektrodi, u ovom slučaju na predmetu obrade. Potrebno je još reći, da pozitivni delići, pošto su znatno veće mase, pri istoj brzini sudaranja proizvode veću toplotu. U drugom slučaju, gde je frekvencija impulsa mala, dolazi do obrnutog slučaja, odnosno do znatno veće pokretljivosti pozitivno nanelektrisanih čestica. Posledica ovoga je, da pri niskoj frekvenciji, dolazi do velikog generisanja toplote na negativnoj elektrodi bilo da je to alat ili predmet obrade.

Iz ovoga bi mogao da se izvede zaključak da se gruba obrada, koju karakterišu niska frekvencija, velika proizvodnost, loš kvalitet obrade i malo habanje alata, ostvaruje na taj način što se alat vezuje na pozitivan pol. Međutim, fina obrada, kod koje je kvalitet obrade primaran, izvodi se sa visokim frekvencijama i veoma malom proizvodnošću, a alat se vezuje na negativan pol da bi se smanjilo njegovo habanje. Trajanje impulsa, pri kome se polaritet menja, zavisi od nekoliko faktora koji se uglavnom odnose na fizičke parametre sistema: predmet obrade elektrode. Pri obradi čelika sa bakarnom elektrodom trajanja impulsa je oko 5 µs.

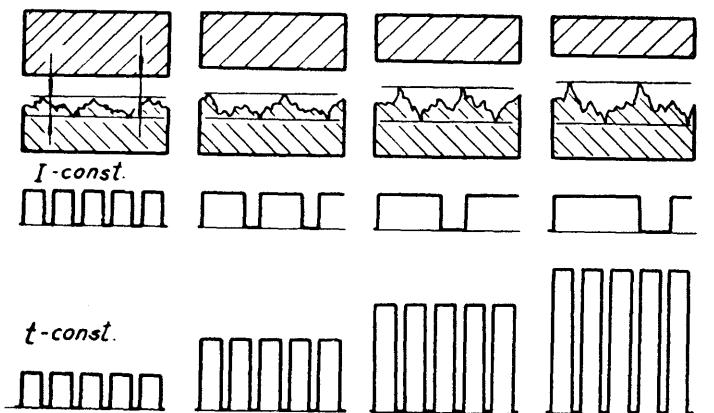
KVALITET OBRADE

Pri elektroerozionoj obradi, slično kao i kod konvencionalnih postupaka, postižu se različiti kvaliteti obrade.

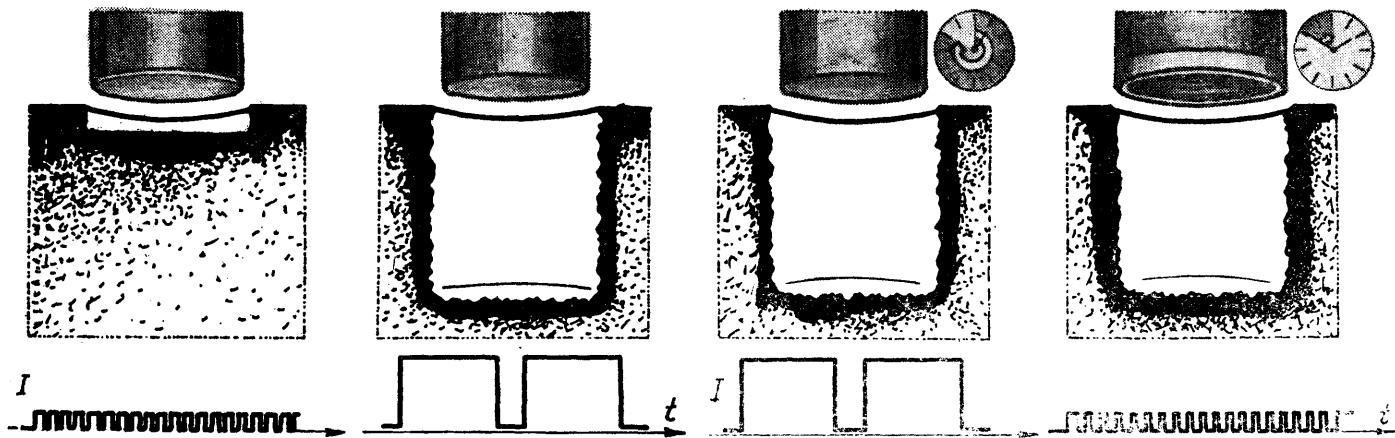
Odlučujući uticaj na hrapavost obradene površine ima jačina energetskih pražnjenja. Manje uložena energija daje bolji kvalitet obrade i obrnuto, Na sl. 5 je prikazana zavisnost hrapavosti od jačine angažovanih impulsa.

Energetska vrednost jednog impulsa se može posmatrati kao površina prikazanih pravougaonika, tako da jedan impuls ima istu energetsku vrednost ako je duži sa manjom jačinom struje, ili ako je kraći, ali sa većom jačinom struje.

Analogno ovome, postizanje boljih kvaliteta dobija se smanjivanjem energije pražnjenja, odnosno povećanjem broja impulsa. Na sl. 6 dat je uporedni prikaz obrade istog predmeta obrade u istom vremenkom periodu. Primećuje se da fini hod u odnosu na grubi ima znatno manju proizvodnost, a habanje elektrode je znatno veće. U radioničkoj praksi se



Sl. 5 Kvalitet obrade u zavisnosti od veličine angažovanih strujnih impulsa

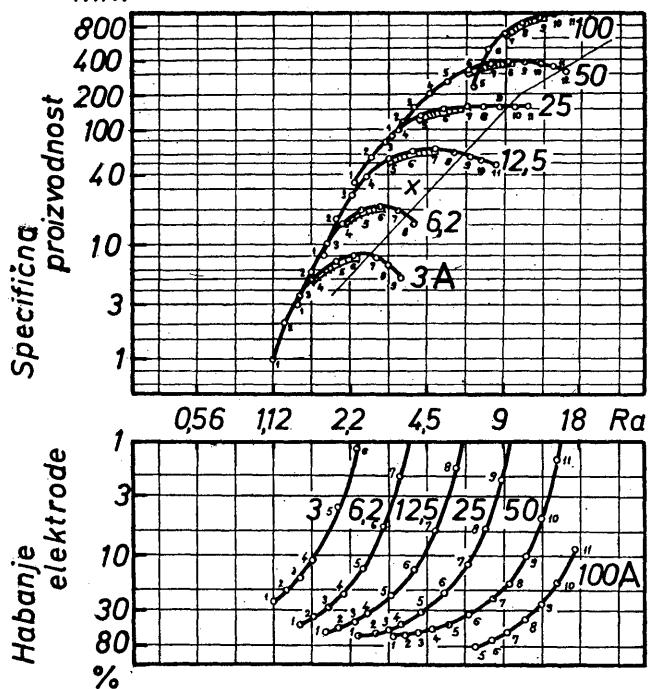


Sl. 6. — Odnos proizvodnosti grube i fine obrade

Elektroda : bakar

Polaritet : +

mm³/min Predmet obrade : čelik (65 Rc)

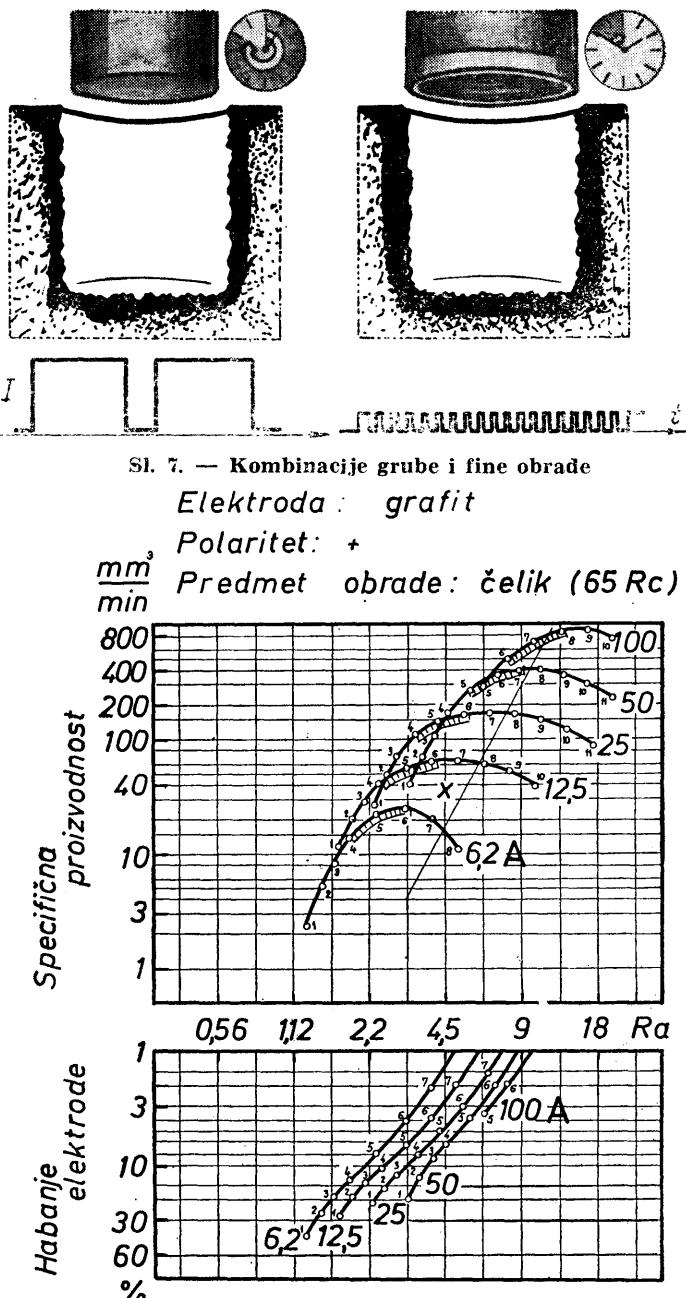


Sl. 8. — Specifična proizvodnost, habanje elektrode i kvalitet obrade u zavisnosti od podešljivih parametara obrade

ova dva hoda uglavnom primenjuju kombinovano. Ukoliko je potrebno postići dobar kvalitet obradene površine, potrebno je prvo grubom obradom ukloniti najveći deo materijala, a zatim finim hodom ukloniti samo neravnine ostale od grube obrade. Na sl. 7 je prikazana najoptimalnija tehnologija obrade jednog otvora, gde se traži bolji kvalitet obrade. Angažovanjem više različitih hodova obrade postiže se smanjenje mašinskog vremena na minimum.

Efektivnost elektroerozije obrade može se analizirati kroz specifičnu proizvodnost, habanje elektrode i postignuti kvalitet obrade. Međusoban odnos ovih veličina dat je na sl. 8, gde se nalaze u zavisnosti od parametara obrade: jačine struje, trajanja impulsa, polaritet i materijala alata. Posmatraće se dva slučaja: kada je u pitanju bakarna elektroda, i drugi slučaj kad će se raditi sa grafitom.

Na krivama za različite jačine struje nalaze se i brojčane oznake trajanja impulsa. Brojevi 1, 2, 3 ... podrazumevaju sledeće veličine trajanja impulsa:



1	..... 2	μs	7	..... 50	μs
2	..... 3	μs	8	..... 100	μs
3	..... 4	μs	9	..... 200	μs
4	..... 6	μs	10	..... 400	μs
5	..... 12	μs	11	..... 800	μs
6	..... 25	μs	12	..... 1600	μs

Primenjena jačina struje zavisi od veličine erozirane površine. Manja struja se dozvoljava na manjim površinama, i obrnuto. Ukoliko je pri obradi primaran uslov brzo uklanjanje materijala (velika specifična proizvodnost), potrebno je odabratи veličine trajanja impulsa u šrafiranom području. Međutim, u ovim slučajevima dolazi do intenzivnog habanja elektroda, što je mnogo više izraženo kod bakarnih elektroda.

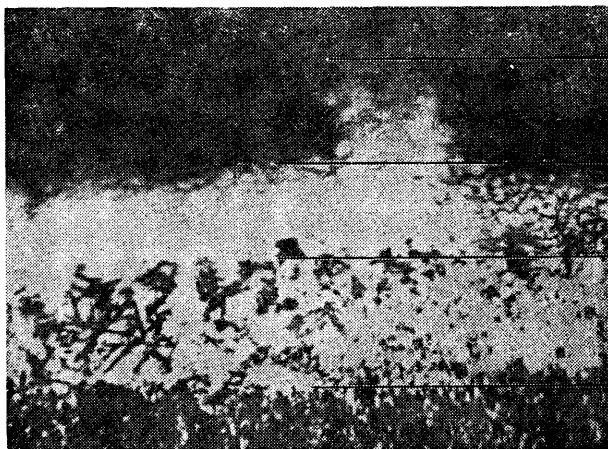
U praksi su najčešći zahtevi da se, kod obrade čelika sa bakrom i grafitom, uzimaju vrednosti trajanja impulsa one koje će omogućiti dobru proizvodnost i minimalno habanje elektroda (vrednosti desno od X linije).

STRUKTURA I KARAKTERISTIKE EROZIRANIH POVRŠINA

Za elektroerozionu obradu je karakteristično da se prilikom električnih pražnjenja javljaju veoma visoke temperature (8000—12000 K). Ove visoke temperature neminovno dovode do strukturalnih promena na površinskom sloju predmeta obrade. Strukturalne promene na površinskom sloju su neizbežne, negativne pojave ovog procesa. Koliki će uticaj ovih promena biti, prvensvjetno zavisi od vrste materijala predmeta obrade. Postoje materijali kod kojih su strukturalne promene izražene u veoma maloj meri.

U velikom broju slučajeva strukturalne promene se mogu zanemariti. Međutim, postoje i delovi čija funkcija dolazi u pitanje usled i najmanjih ovakvih promena. Iz ovih razloga proizvođači mašina za eroziranje su dobro izanalizirali ovaj problem, predviđajući mere za minimiziranje ovog efekta.

Na metalografskom preseku jednog okaljenog čeličnog predmeta obrade mogu se razlikovati tri karakteristična sloja (sl. 9).



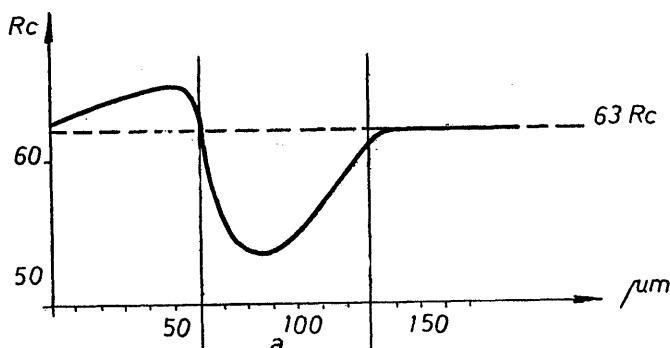
Sl. 9 — Metalografski presek predmeta obrade

Kod metalografskih snimaka eroziranih kaljenih čelika uočljiva su tri karakteristična sloja:

1. istopljeni metalni sloj prekriva radnu površinu sa slojem taloga koji se nalazi u obliku malih nalepljenih kapljica,
2. stvrđnuti metalni sloj, tzv. »beli sloj«, se razlikuje od slučaja do slučaja i za njega je karakteristično da je vrlo tvrd.
3. poboljšani sloj je najveći i u njemu su najviše izražene strukturalne promene.

Debljina promenjenog sloja, pored materijala predmeta obrade, najviše zavisi od angažovane električne energije pri pražnjenju. Proizvođač mašina »CHARMILLES« je na osnovu svojih ispitivanja došao do rezultata za debljinu defektnog sloja u zavisnosti od dužine impulsa i veličine radne struje prikazanih u tabeli 1. Eksperiment je vršen za obradu čelika sa bakrom.

Pri istoj angažovanoj energiji na debljinu trećeg sloja utiče još i oblik pražnjenja.



Sl. 10. — Promena tvrdoće u zavisnosti od dubine defektnog sloja

Na sl. 9 dat je grafički prikaz promene tvrdoće u zavisnosti od debljine sloja. Prikazani slučaj je urađen sa sledećim radnim podacima:

- predmet obrade: čelik (63 Rc),
- materijal elektrode: bakar,
- polaritet elektrode: +,
- jačina struje: 25 A,
- dužina impulsa: 400 μs

Dubina defektnog sloja je znatno manja pri finoj obradi. Na primer, za kvalitet obrade sa hraptavošću $R_a = 0,4 \mu\text{m}$, dubina defektnog sloja iznosiće samo $0,5 \mu\text{m}$.

U slučajevima kada je promena strukture veoma bitna za funkciju dela potrebno je predviđeti dodatne operacije, kao što su: peskanje, brušenje ili poliranje.

ZAKLJUČAK

Metoda elektroerozione obrade je, usled svojih mnogobrojnih prednosti, našla široku primenu u metaloprerađivačkoj industriji. U nizu slučajeva ona se pokazala boljom u odnosu na konvencionalne, postupke obrade. U narednom tekstu biće navedene samo neke prednosti primene ove obrade:

- Najvažnija oblast primene je obrada super tvrdih materijala. Jedini uslov je da materijal bude provodljiv. Ovo je naročito važno, jer tvrde materijale je veoma teško, ili skoro nemoguće obradivati konvencionalnim postupcima. Tu se prvenstveno misli na obradu tvrdog metala i, u poslednje vreme, sve više zastupljenih tvrdih legura.
- Predmet obrade može da se obrađuje u otvrdnutom stanju, gde se eliminisu deformacije nastale u procesu otvrdnjavanja.
- Izlomljeni ureznici ili burgije lako se mogu ukloniti iz predmeta obrade. Takođe se mogu popraviti neke greške koje nisu primećene pre termičke obrade, ili se može izvršiti neka naknadna obrada, koja je ispuštena pre termičke obrade.

Dužina trajanja impulsa [μs]	Debljina sloja [μm]	
	12,5 A	25 A
400	35	70
25	12	25
4	6	10

- Ne stvaraju se naponi u materijalu predmeta obrade, pošto alat (elektroda) ni u jednom momentu ne doćiće radni komad.
- Proces se odvija bez stvaranja pucni.
- Tanki, lomljivi delovi mogu da se obrađuju bez deformacija.
- Elektroeroziona obrada je u većini slučajeva finalna operacija, tako da su izbegnuti troškovi nekih dodatnih operacija.
- Proces se odvija automatski, jer servo mehanizam pomiće elektrodu tek onda kada je uklonjena izvesna količina materijala.
- Jedna osoba može da kontroliše nekoliko erozimata u isto vreme. Prisustvo radnika je nužno samo pri podešavanju mašine.
- Veoma komplikovani oblici, koji se ne mogu obraditi konvencionalnim metodama, elektroerozionom obradom se obrađuju relativno lako.
- Eroziranje je našlo veliku primenu pri izradi kovačkih i alata za obradu lima. Ovako proizvedeni alati su znatno kvalitetniji, a sama izrada im je jeftinija. Probojac (prosekac) može da se iskoristi kao elektroda reproducirajući svoj oblik u reznoj ploči, stvarajući idealan zazor po celom profilu.

Međutim, i pored velike primene, eroziranje, zbog svoje fizičke prirode, ima i dosta ograničenja:

- a) Proizvodnost je veoma niska, što dovodi do ekonomiske neopravdanosti primene metode. Mašine za elektroerozionu obradu su u fazi razvijanja, pa su veoma skupe i za male proizvodne pogone su nerentabilne.
- b) Materijal koji se obrađuje mora da bude električno provodljiv.
- c) Prilikom obrade otvara sa paralelnim zidovima doći će do izvesnih zakošenja. Međutim, povoljnim odabiranjem elemenata obrade, zakošenje može da se svede na najmanju meru, ali ne može nikada da se izbegne.

- d) Habanje alata (elektrode) je problem koji ne može da se izbegne, a izrada više elektroda dosta poskupljuje operaciju.
- e) Obradena površina predmeta obrade je do izvesne dubine strukturno promenjena.

LITERATURA

1. S. F. KRAR, J. W. OSWALD, J. E. ST. AMAND, »Technology of machine tools«, 1977
2. G. SEMON, »Einführung in die Praxis der Funkenerosion«
3. V. STANOJEVIĆ: »Eroziranje« (interni priručnik), 1980
4. B. IVKOVIĆ »Nekonvencionalni postupci obrade metala«, 1975
5. P. FORSTER, M. MARIOTTA, »Was ist Funkenerosion?«, 1975
6. AGIE »Tehnologisches zum Senkerodieren«, 1974

VUKAŠIN STANOJEVIĆ, dipl. inž. radi u službi Tehnologije OOUR-a »Alatnica« ZCZ u Kragujevcu



Roden 1951. godine. Diplomirao 1975. godine na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu. Po diplomiranju radi u OOUR-u »Alatnica« ZCZ na tehnološkim poslovima, a poslednjih nekoliko meseci radi na poslovima studije rada i vremena.

Poziv na pretplatu

Osnovne organizacije udruženog rada, zainteresovane za tribološka istraživanja, obradu metala i optimizaciju proizvodnje pretplatom na časopis

Tribologija u industriji

obezbeđuju adekvatnu stručnu informaciju, koja u primeni utiče na uvećanje obima proizvodnje, smanjenje troškova i povećanje produktivnosti rada, odnosno uvećanje dohotka. Ističemo mogućnost uticaja na uređivačku politiku i sugerisanje tema za koje su pojedine osnovne organizacije udruženog rada zainteresovane. Na ovaj način ostvaruje se puna sprega između udruženog rada i časopisa.

Za sve bliže informacije obratiti se uredništvu časopisa.

REDAKCIJA