



GODINA I
BROJ 1.
APRIL 1979.

tribologija u industriji

sadržaj contents содержание

UVODNIK
INTRODUCTION
ПЕРЕДОВИЦА

B. IVKOVIĆ: Tribologija u industriji — Tribology in industry — Трибология в промышленности 3

ISTRAŽIVANJA
RESEARCH
ИССЛЕДОВАНИЯ

M. NEDELJKOVIĆ i D. ĐOKIĆ: Faktori habanja bokova zubaca analizom naponskog stanja u procesu habanja — Tooth flanks wearing factors with analyses of tensional conditions in wear processes — Факторы влияющие на износ зубьев и анализ напряженного состояния в процессе изнашивания 5

M. BABIĆ: Tribološke karakteristike sredstava za hlađenje i podmazivanje u obradi struganjem alatima od tvrdog metala — Tribological characteristics of cutting fluids at turning by tungsten carbide tools — Трибологические характеристики смазочно-охлаждающих средств при точении твердосплавными инструментами 11

S. ST. SEKULIĆ: Troškovi alata i ukupni troškovi obrade u funkciji pouzdanosti alata kod protočnih automatskih linija — Tool costs and total machining costs in the function of tool reliability on feeding automatic lines — Затраты на инструмент и суммарные затраты на обработку как функция надежности инструментов на проточных автоматических линиях 16

Z. PALUNČIĆ: Razvoj metode praćenja triboloških procesa kod kotrljajućih ležajeva alatnih mašina — Development of technique for the following of tribological processes on rolling bearings of machine tools — Развитие метода для исследования трибологических процессов в подшипниках качения металообрабатывающих станков 24

V. IVUŠIĆ: Ferografija — Ferrography — Ферография 32

KNJIGE I ČASOPISI
BOOKS AND JOURNALS
КНИГИ И ЖУРНАЛЫ

NAUČNI SKUPOVI
SCIENTIFIC MEETINGS
НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ 40

REZIMEA
ABSTRAKTS
РЕЗЮМЕ

NAUČNI SKUPOVI
SCIENTIFIC MEETINGS
НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ 38

REZIMEA
ABSTRAKTS
РЕЗЮМЕ 41

Tribologija u industriji

Materijalna proizvodnja u organizacijama udruženog rada obavlja se proizvodnjom opremom uz korišćenje raznovrsnih pribora i alata i uz učešće čoveka, koji upravlja procesom proizvodnje. Da bi proces proizvodnje mogao nesmetano da se odvija neophodno je raspolagati i koristiti se i drugom opremom, na kojoj se ne stvara direktno materijalna proizvodnja, ali se pomoću nje proizvodna oprema, alati i pribori održavaju u ispravnom stanju.

Dohodak organizacija udruženog rada, u kojima se stvara materijalna proizvodnja, funkcija je velikog broja faktora kojima su definisani, pored ostalog i društveni uslovi u kojima organizacija udruženog rada egzistira. U određenim društvenim uslovima dohodak je funkcija produktivnosti rada, utroška sredstava rada (proizvodne i druge opreme, alata i pribora), energije i tzv. pomoćnih materijala.

Trošenje sredstava rada, energije i pomoćnih materijala (sredstva za hlađenje i podmazivanje uglavnom) posledica je postojanja triboloških procesa u kontaktnim slojevima mnogobrojnih elemenata proizvodne opreme alata i pribora koji su u međusobnom dodiru u toku njihovog funkcionisanja. Razvoj triboloških procesa u kontaktним slojevima elemenata u dodiru uslovljava pojavu njihovog habanja i utiče na smanjenje njihove sposobnosti da više funkciju zbg koje se i nalaze u proizvodnom sistemu. Pri dostizanju kritičnog stepena pohabnosti, elementi proizvodne i druge opreme, alata i pribora, gube sposobnost da vrše svoju funkciju i moraju biti zamenjeni novim. Vek trajanja sredstava rada, pa prema tome i opterećenje jedinice proizvoda njihovom vrednošću, zavisi direktno od intenziteta razvoja triboloških procesa na odgovarajućim ključnim elementima obradnog sistema.

Funkcionisanje proizvodne i druge opreme, alata i pribora zasnovano je na relativnom kretanju odgovarajućeg broja njihovih elemenata jednog u od-

nosu na drugi. Da bi se ova kretanja ostvarila potrebno je utrošiti odgovarajuću energiju. Količina utrošene energije zavisi u značajnoj meri od veličine otpora koji se javljaju zbog postojanja trenja u zoni kontakta. Opterećenje jedinice proizvoda vrednošću utrošene energije u direktnoj je сразмерi sa veličinom trenja u zoni kontakta.

Da bi se povećao vek trajanja sredstava rada i smanjio utrošak energije za obavljanje procesa proizvodnje kroz smanjenje trenja, uvođe se u zone kontakta sredstva za hlađenje i podmazivanje, kojima se smanjuju otpori trenja i intenzitet razvoja triboloških procesa. U zavisnosti od dejstva ovih sredstava zavisiće i veličina odgovarajućeg dela troškova proizvodnje.

Tribologija kao termin definisan je prvi put 1966. godine u Engleskoj pri čemu je korišćena kao osnova grčka reč »tribos«, koja označava trenje. Pod tribologijom se danas podrazumeva generalni pristup problemima prenosa i rasipanja mase i energije u mehaničkim sistemima, koji obuhvata posebno trenje, habanje i podmazivanje sa odgovarajućim oblastima nauke i tehnologije.

Kada se govori o značaju tribologije obično se ističu tri aspekta ove naučne i tehnološke discipline.

Ekonomski aspekt

Deo energije koji se utroši na savladavanje trenja u proizvodnim i drugim procesima u industriji iznosi oko 30% od ukupno utrošene energije. Procenjuje se, takođe, da se u jednoj industrijski razvijenoj zemlji, kakva je Engleska ili Zapadna Nemačka, izgubi godišnje oko dve milijarde dolara zbog zamene pohabanih ključnih elemenata obradnih i drugih sistema. Istraživanja, koja su vršena u oblasti optimalizacije tehnoloških procesa u industriji prerađe metala na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu — Laboratorija za

obradu metala i tribologiju, pokazuju da od intenzitet razvoja procesa habanja na elementima mašina i alata u metaloprerađivačkoj industriji zavisi oko 70% veličine vrednosti ostvarene proizvodnje.

Naučni aspekt

Makro procesi u prirodi su po pravilu nepovratni. Međutim, nauka ovu nepovratnost procesa vrlo često izostavlja pri postavljanju osnovnih teoretskih zakona. Tribologija treba da istraži nepovratne procese u mehanizmima i elementima proizvodne i druge opreme i da objasni prirodu trenja i rasipanja mase i energije. Nobelovac Richard P. Feynman napisao je u svojim predavanjima iz 1963. godine da su zakoni trenja, na primer, još nedovoljno dobro analizirani uprkos ogromnom značaju ovog procesa u industrijskim sistemima. I preduzeta tada što su problemi trenja i habanja veoma stari oni su još uvek nedovoljno razrešeni i to sa mnogim aspektima. Izgleda, međutim, da su za savremeniju tehnologiju, a posebno za buduću, oni mnogo važniji nego što je to bio slučaj ranije.

Multidisciplinarni aspekt

Tribologija se definiše i kao nauka i kao tehnologija. U oblasti nauke tribologija treba da definiše fizičko-hemijske procese koji se javljaju u kontaktnim slojevima predmeta u dodiru pri relativnom kretanju jednog u odnosu na drugi. U oblasti tehnologije, međutim, tribologija treba da nađe optimalna rešenja sa aspekta habanja za čitav niz mehanizama i elemenata koji su sadržani u proizvodnoj i drugoj opremi, alatima i priborima u industriji. Ovo znači da tribološki problemi zahtevaju paralelno angažovanje fizičara, hemičara i inženjera svih struka, a posebno onih koji se bave projektovanjem i eksploracijom proizvodne i druge opreme (mašinski inženjeri, metalurzi, tehnolozi i sl.) i razvojem proizvodnje i primene sred-

stava za hlađenje i podmazivanje (tehnolozi i mašinski inženjeri). Značaj koji tribologija ima u savremenom jugoslovenskom društvu posebno dolazi do izražaja pri stvaralačkom prilazu primeni Zakona o udruženom radu u organizacijama udruženog rada, koje se bave stvaranjem materijalne proizvodnje. Obaveza koju je Zakon o udruženom radu stvorio organizacijama udruženog rada je i definisanje tzv. standardnih troškova, koji se odnose na trošenje svih vrsta sredstava rada i materijala. Da bi se ova obaveza ispunila i stvorili uslovi za formiranje realne strukture vrednosti ostvarene proizvodnje, neophodno je poznavati razvoj triboloških procesa na odgovarajućim elementima mašina, uređaja, alata i pribora u realnim uslovima i imati dovoljno informacija za upravljanje procesom trošenja sredstava rada.

Tribološka istraživanja koja se vrše u laboratorijskim i proizvodnim uslovima obuhvataju, po pravilu, proučavanje:

- prirode materijala kontaktnih parova,
- topografije kontaktnih površina,
- opterećenja u zoni kontakta,
- toplotnih pojava u zoni kontakta,
- prirode fizičko-hemijskih procesa u zoni kontakta,
- mehanizma prenosa mase materijala sa jednog na drugi kontaktne par i okolinu i
- uticaja sredstava za hlađenje i podmazivanje na razvoj procesa habanja elemenata u dodiru.

Savremene metode i instrumentacija omogućavaju istraživanja u skoro svim oblastima tribologije, ali je još uvek neophodno ulagati značajne napore za razvoj novih prilaza ovoj problematici i razvoj nove instrumentacije.

Tribologiji i kao nauci i kao tehnologiji posvećuje se sve veća pažnja kroz razvoj naučnoistraživačkih projekata u organizacijama udruženog rada i naučnim i visokoškolskim institucijama kod nas i u svetu. Osnovni cilj časopisa »Tribologija u industriji« je da domaću stručnu i naučnu javnost informiše u što je moguće većoj meri sa rezultatima ovih istraživanja i na taj način doprinese stvaranju uslova za povećanje dohotka u organizacijama udruženog rada i društву u celini.

M. NEDELJKOVIĆ, V. ĐOKIĆ

Faktori trošenja bokova zubaca sa analizom naponskog stanja u procesu habanja

Pri sprezanju para zubaca zupčanika u uslovima građičnog podmazivanja trošenje bokova je neizbežna posledica relativne brzine klizanja bokova zubaca jednog zupčanika po bokovima zubaca drugog zupčanika i opterećenja duž trenutne linije dodira. Neravnometnost trošenja bokova duž aktivnog dela boka zuba je rezultat promene smera i intenziteta relativne brzine klizanja i promene pritiska u toku sprezanja. Duž aktivnog dela boka zuba istovremeno se vrši kotrljanje i klizanje, te se kao posledica ovih kretanja javljaju otpori kretanju kotrljanja i sila trenja klizanja. U procesu habanja menja se teorijski evolventni oblik profila zuba, a time i uslovi sprezanja.

U cilju povećanja otpornosti na habanje visokocpterećenih i sporohodnih zupčastih parova i radi sprečavanja havarijnih lomova zubaca zupčanika ugradenih u reduktore rudarske opreme izučavani su uticajni faktori kinematskog i geometrijskog karaktera na proces trošenja sa analizom naponskog stanja na istrošenim zubcima koristeći metod fotoelastičnog ispitivanja u Laboratoriji za analizu napona i deformacija Mašinskog fakulteta u Beogradu.

KOEFICIJENT RELATIVNOG KLIZANJA SNAGA TRENJA

Opšti kriterijumi valjanosti konstrukcije zupčastog para su:

- stepen sprezanja bokova
- koeficijent relativnog klizanja kao prvi i značajan faktor trošenja spregnutih bokova
- koeficijent pritiska koji kao drugi značajan faktor opterećenja utiče na trošenje zuba
- koeficijent oblika koji utiče na napon savijanja u kritičnom preseku podnožja zuba.

Za različite radne uslove zupčastih parova navedeni kvalitativni pokazatelji imaju različit značaj, te se dominirajući kriterijum pri konstruisanju bira s obzirom na radne uslove. Kada trajnost i pouzdanost zupčastog para diktiraju uslovi trošenja, onda je moguće pomeranjem profila izjednačiti koeficijente relativnog klizanja jednog i drugog zuba.

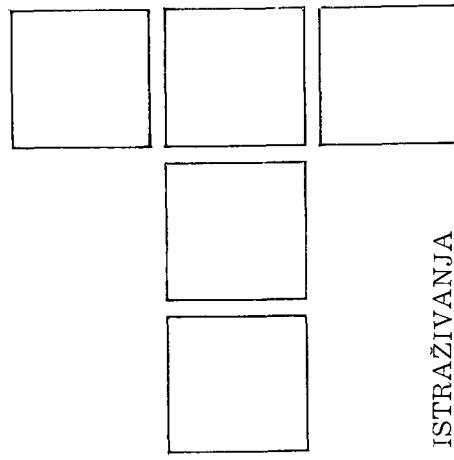
Na sl. 1. prikazan je dijagram koeficijenata relativnih brzina i dijagrama pritiska presudnih za trošenje bokova.

Iz datih dijagrama se za svaku tačku sprezanja može odrediti koeficijent klizanja i pritisak u oblasti dvostrukog i jednostrukog sprezanja.

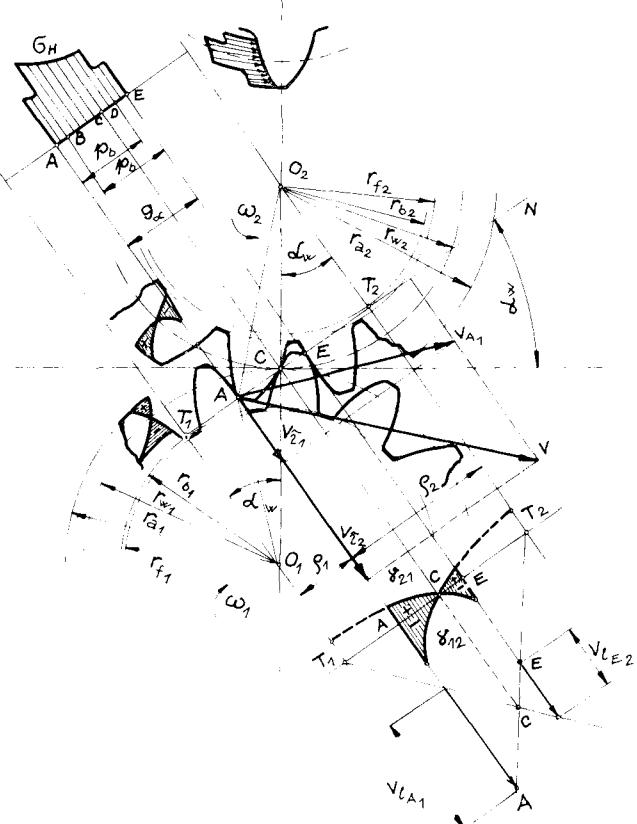
Relativna brzina klizanja v_{t_1} i v_{t_2} predstavlja razliku komponenata v_{τ_1} i v_{τ_2} absolutnih brzina v_{A_1} i v_{A_2} na pravac tangente spregnutih bokova, odnosno profila.

$$v_{t_1} = v_{\tau_1} - v_{\tau_2} \quad v_{t_2} = v_{\tau_2} - v_{\tau_1} \quad (1)$$

Na slici je tačka A zajednička tačka spregnutih profila koja se poklapa sa tačkom A_1 profila zuba z_1 i tačkom A_2 profila zuba z_2 .



ISTRAŽIVANJA



Sl. 1. Dijagram koeficijenta specifičnog klizanja i pritiska po bokovima spregnutih zuba

Odnos relativnih brzina klizanja i odgovarajućih komponenata na pravac tangente definiše koeficijent specifičnog klizanja γ_{12} i γ_{21} te je:

$$\gamma_{12} = \frac{v_{t_1} - v_{\tau_2}}{v_{\tau_1}} \quad \gamma_{21} = \frac{v_{t_2} - v_{\tau_1}}{v_{\tau_2}} \quad (2)$$

Pošto je

$$v_{\tau_1} = \omega_1 \cdot \rho_1 \quad v_{\tau_2} = \omega_2 \cdot \rho_2 \quad (3)$$

zamenom u (2) dobija se:

$$\gamma_{12} = \frac{\omega_1 \rho_1 - \omega_2 \rho_2}{\omega_1 \rho_1} = 1 - \frac{\omega_2 \rho_2}{\omega_1 \rho_1} = 1 - \frac{1}{j} \frac{\rho_2}{\rho_1} = 1 - \frac{z_1 \rho_2}{z_2 \rho_1}$$

$$\gamma_{21} = \frac{\omega_2 \rho_2 - \omega_1 \rho_1}{\omega_2 \rho_2} = 1 - \frac{\omega_1 \rho_1}{\omega_2 \rho_2} = 1 - j \frac{\rho_1}{\rho_2} = 1 - \frac{z_2 \rho_1}{z_1 \rho_2}$$

U krajnjim tačkama A i E vrednosti koeficijenata specifičnog klizanja biće:

$$\gamma_{12} \alpha_1 = 1 - \frac{\rho_{2\max}}{i \cdot \rho_{1\min}}$$

$$\gamma_{12} \alpha_1 = 1 - \frac{\rho_{2\min}}{i \cdot \rho_{1\max}}$$

$$\gamma_{2t} \alpha_2 = 1 - i \frac{\rho_{1\min}}{\rho_{2\max}}$$

$$\gamma_{2t} \alpha_2 = 1 - i \frac{\rho_{1\max}}{\rho_{2\min}}$$

Iz slike sledi:

$$\rho_{2\max} = \overline{T_2 A} = r_{b_2} \operatorname{tg} \alpha_{a_2} \quad \rho_{2\min} = \overline{T_2 E} = \overline{T_2 C} - \overline{CE} = \\ = (r_{b_1} + r_{o_2}) \operatorname{tg} \alpha_w - r_{b_1} \operatorname{tg} \alpha_{a_1}$$

$$\rho_{1\max} = \overline{T_1 E} = r_{b_1} \operatorname{tg} \alpha_{a_1} \quad \rho_{1\min} = \overline{T_1 A} = (r_{b_1} + r_{b_2}) \operatorname{tg} \alpha_w - \\ - r_{b_2} \operatorname{tg} \alpha_{a_2}$$

Na slici duž AE predstavlja aktivnu dužinu dodirnice, tačka C trenutni pol, tačke B i D početak i kraj jednostrukog sprege, ρ_1 i ρ_2 radijuse krivine u trenutnoj tački sprezanja evolventnih profila.

Pošto je relativna brzina klizanja proporcionalna razdijelu tačke sprezanja od trenutnog pola C, u trenutnom polu brzina klizanja ravna nuli i menja smjer, pa se tu javljaju promjenljivi naponi smicanja sa pojmom zamornog razaranja bokova zubača. U tačkama sprezanja profila spoljašnjeg zupčastog pasa koje su najudaljenije od trenutnog pola brzine klizanja su najveće, te je i istrošenje najveće u podnožju i na temenu zubača. To znači da je najintenzivnije trošenje zubača pri sprezanju u blizini krajnjih tačaka aktivnog dela dodirnice A i E.

Trošenje zubača je proporcionalno radu sile trenja duž aktivnog dela boka zubača. Put relativnog klizanja zubača jednak je razlici sume dužina profila glave spregnutih zubača i sume dužina profila nogu tih zubača. To znači da je put klizanja:

$$s_1 = (s_{a_1} + s_{a_2}) - (s_{f_1} + s_{f_2})$$

Poznato je da se dužina glave zubača može odrediti na osnovu izraza:

$$s_{a_1} = \frac{r_{a_1}^2 - r_{w_1}^2}{d_{b_1}}$$

$$s_{a_2} = \frac{r_{a_2}^2 - r_{w_2}^2}{d_{b_2}}$$

a dužina profila nogu zubača:

$$s_{f_1} = \frac{r_{w_1}^2 - r_{x_1}^2}{d_{b_1}}$$

$$s_{f_2} = \frac{r_{w_2}^2 - r_{x_2}^2}{d_{b_2}}$$

gde su r_{x_1} i r_{x_2} poluprečnici početne tačke aktivnog dela profila zubača zupčanika z_1 i z_2 .

Rad sile trenja na putu klizanja biće:

$$\lambda_\mu = \mu \cdot F_n \cdot s_1$$

Vreme sprezanja para zubača je:

$$t = \frac{\varphi_1}{\omega_1}$$

Gde je φ_1 ugao koji odgovara oštiranju zupčanika z_1 za vreme sprezanja sa odgovarajućim zupcem zupčanika z_2 . Pošto je aktivna dužina dodirnice g_α jednaka luku osnovnog kruga, odnosno luku ugla φ_1 , sledi da je:

$$t = \frac{g_\alpha}{r_{b_1} \omega_1} = \frac{\sqrt{r_{a_1}^2 - r_{b_1}^2} + \sqrt{r_{a_2}^2 - r_{b_2}^2} - a \sin \alpha}{r_{b_1} \omega_1}$$

Snaga trenja na jednom paru zubača biće:

$$P_\mu^1 = \frac{\lambda_\mu}{t} = \frac{\mu \cdot F_n \cdot \Delta l}{t}$$

a ukupna snaga trenja

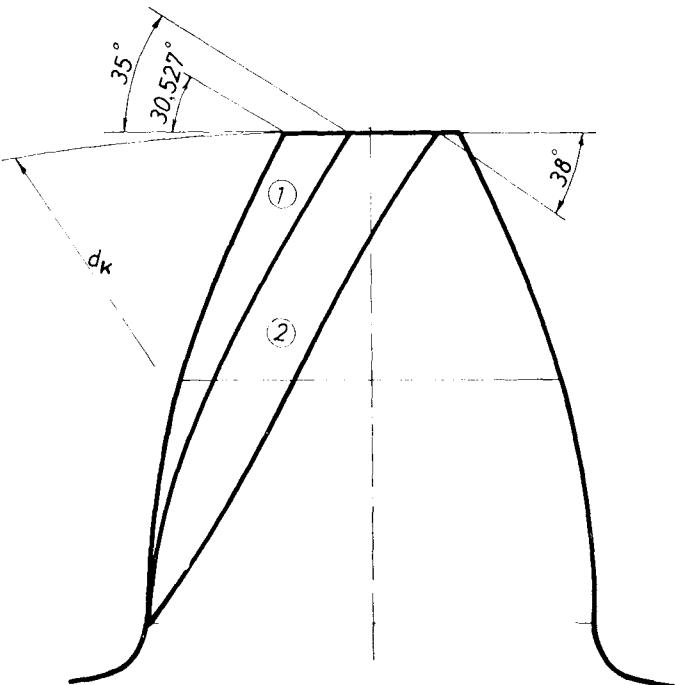
$$P_\mu = z_1 P_\mu^1$$

Na osnovu iznetog sledi da kinematski i geometrijski odnosi projektovanog para zupčanika, brzina klizanja, koeficijent specifičnog klizanja, veličina i raspored pritiska duž aktivnog dela boka zubača bitno utiču na proces trošenja bokova zubača i na energetske gubitke, da se pogonski zupčanik znatno više troši u odnosu na gonjeni, da su istrošenja najveća u podnožju i na temenu zubača i da se prema ovim kriterijumima mogu upoređivati dva konstrukcijska rešenja.

Naredna eksperimentalna ispitivanja ukazuju na program naponskog stanja na istrošenim zubačima.

ISPITIVANJA NAPONSKOG STANJA ISTROŠENIH ZUBACA

Za utvrđivanje naponskog stanja na istrošenim bokovima zubača korišćena je naponsko-optička analiza. Ispitivanja su vršena u Laboratoriji za analizu napona i deformacija katedre za otpornosti konstrukcija Mašinskog fakulteta u Beogradu. Za izradu modela korišćen je materijal »ARALDIT R«.



Slika 2.

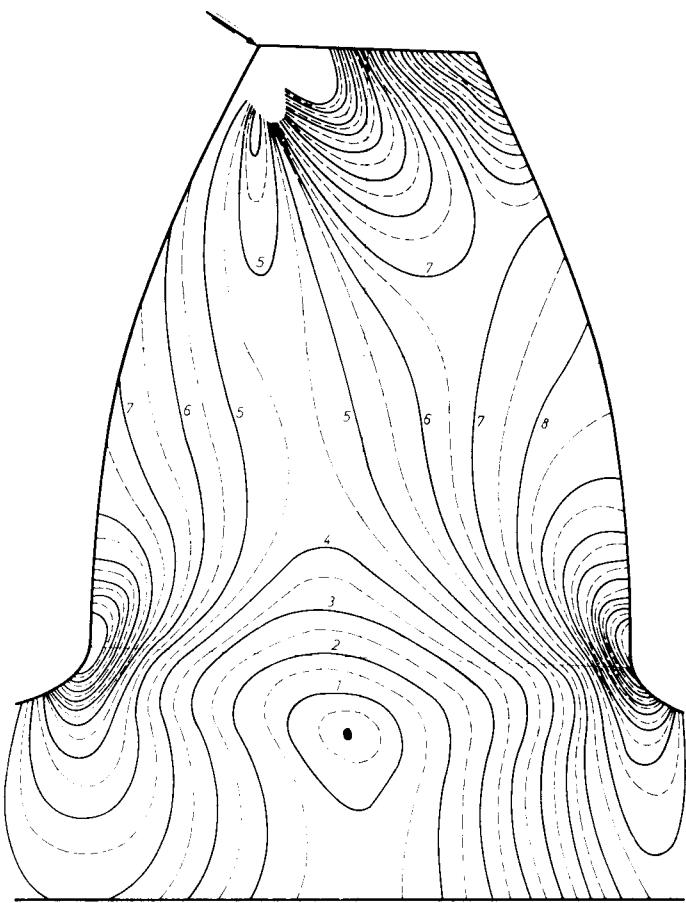
Ispitivanja su vršena na modelu zubača zupčanika moga $m = 40$ mm i broja zubača $z = 22$. Posmatrana su dva slučaja i to: napredni u neistrošenom zubaču i naponi u delimično istrošenom zubaču. Podaci o veličini pojedinih faz trošenja kao i napadni uglovi na bok zubača dati su na sl. 2 i u tabeli 1.

TABELA 1.

d_k mm	Faze habanja		Napadni ugao	
	$m = 40$ mm, $z = 22,$ $\alpha = 20^\circ$		1	2
960	$h = f(m)$	h	$h = f(m)$	h
	$0,275$ m	11	$0,625$ m	25
				α_k
			35°	38°

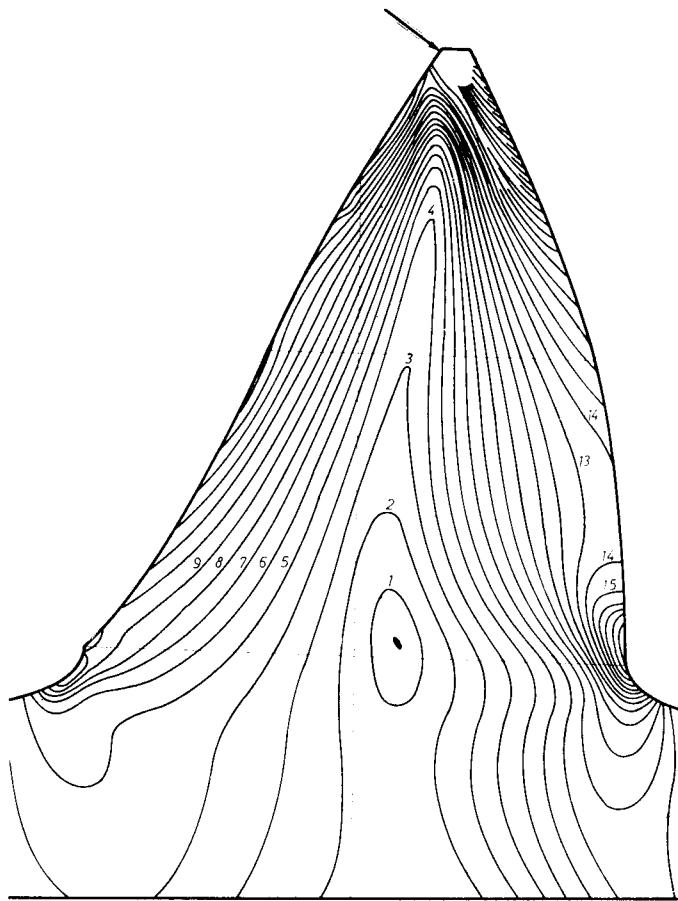
Opterećivanje zubača vršeno je uređajem koji je bio konstruisan za ova ispitivanja. Uređaj je obezbeđivao odgovarajuće opterećenje kao i široki dijapazon regulisanja vrednosti napadnog ugla na bok zubača. Time se moglo obezbediti da sila upravno deluje na bok zubača u svim slučajevima.

Opterećenje je bilo konstantno u toku ispitivanja i ono je u trenutnom polu u tangentni pravac na kinematski krug bilo jednako $F_0 = 1,47 \text{ kN}$.



Sl. 3. Izohrome za nepohabani zubac

Na sl. 3 i sl. 4 dat je crtež izohroma — linija jednake razlike glavnih napona. Sl. 3 daje slučaj naponskog stanja u zubcu za neistrošen zubac, a sl. 4 daje raspored naponskog stanja u zubcu za slučaj druge faze delimično istrošenog zubača.

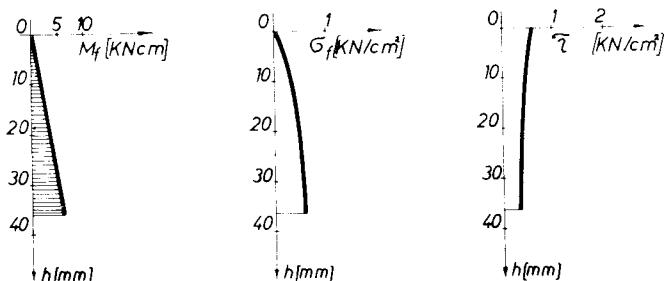
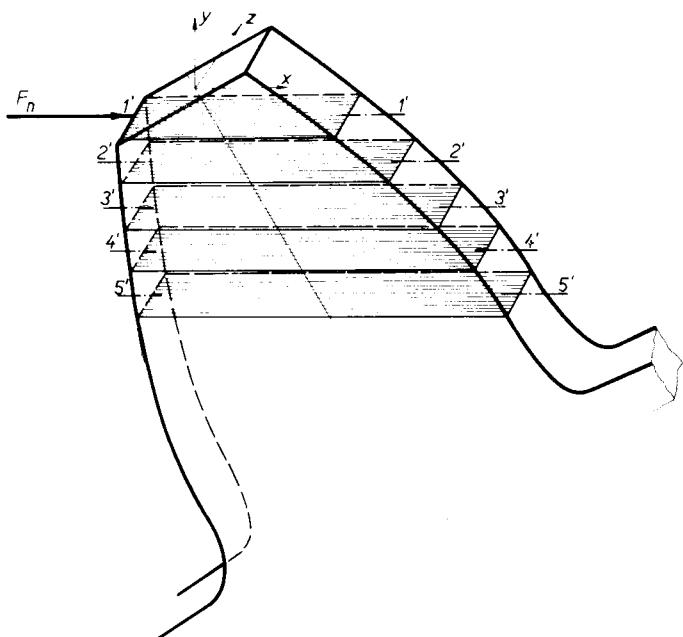


Sl. 4. Izohrome za drugu fazu habanja zubača

Sa slike se vidi da se nakon trošenja kritične veličine napona pomeraju od podnožja prema vrhu zubača. Što je veće trošenje boka zubača to su i veće vrednosti napona u gornjem delu zubača, pa se samim tim i kritični presek, koji je bio u podnožju za neistrošen zubac, pomera prema vrhu za istrošeni zubac.

Sračunati rezultati na osnovu zakona iz otpornosti za neistrošen i delimično istrošen zubac dati su u tabeli 2.

Dijagрамски prikaz dobijenih rezultata dat je na sl. 5, sl. 6 i sl. 7.



RAZMERA:

$$1 \text{ cm} = 1 \text{ cm}$$

$$1 \text{ KNcm} = 0,1 \text{ cm}$$

$$1 \text{ KN/cm}^2 = 1 \text{ cm}$$

Sl. 5. Naponi u određenim preseccima nepohabanog zubača

TABELA 2.

NAPONI U ODREĐENIM PRESECIMA NEPOHABANOZUBCA

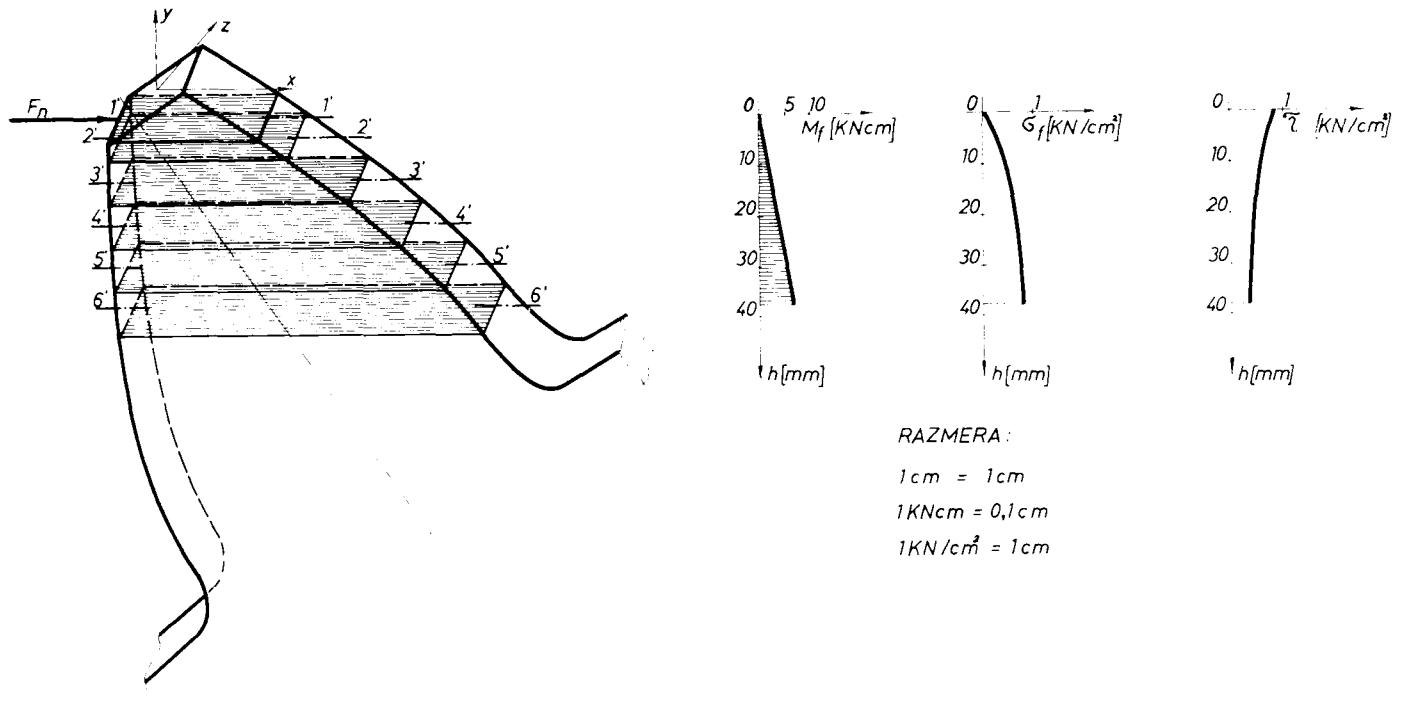
	h mm	b mm	s mm	F_n kN	A cm^2	W cm^3	M_f kNm	S_z cm^3	I_z cm^4	τ_1 kN/cm^2	$\bar{\tau}$ kN/cm^2	$\bar{\tau}_s$ kN/cm^2
1	0	0,93	48	1,706	4,70	3,76	0,00	2,82	9,03	0,00	0,57	0,38
2	9	0,93	58	1,706	5,68	5,94	1,53	4,12	15,93	0,26	0,45	0,30
3	18	0,98	65	1,706	6,37	6,90	3,07	5,17	22,43	0,44	0,40	0,26
4	27	0,98	71	1,706	6,96	8,23	4,60	6,17	29,23	0,56	0,36	0,24
5	36	0,98	75	1,706	7,40	9,31	6,14	6,98	35,15	0,66	0,34	0,22

NAPONI U ODREĐENIM PRESECIMA PRVE FAZE HABANJA ZUBCA

1	0	0,98	33	1,794	3,23	1,77	0,00	1,33	2,93	0,00	0,83	0,55
2	4	0,98	39	1,794	3,87	2,54	0,71	1,91	5,03	0,28	0,69	0,46
3	12	0,98	52	1,794	5,09	4,41	2,24	3,31	11,48	0,50	0,52	0,34
4	21	0,98	60	1,794	5,88	5,88	3,76	4,41	17,64	0,64	0,45	0,30
5	29	0,98	66	1,794	6,51	7,22	5,29	5,41	24,01	0,73	0,41	0,27
6	38	0,98	72	1,794	7,05	8,46	6,81	6,35	30,48	0,80	0,38	0,25

NAPONI U ODREĐENIM PRESECIMA DRUGE FAZE HABANJA ZUBCA

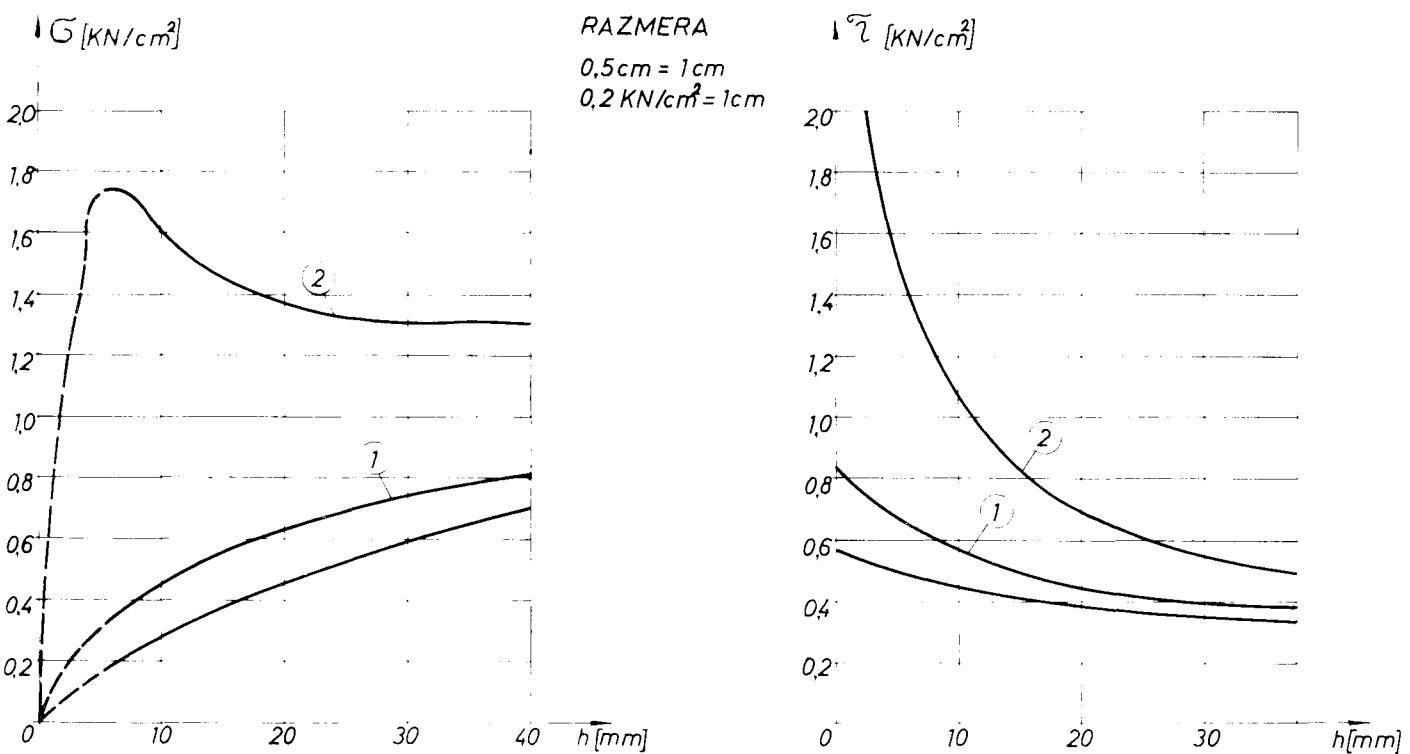
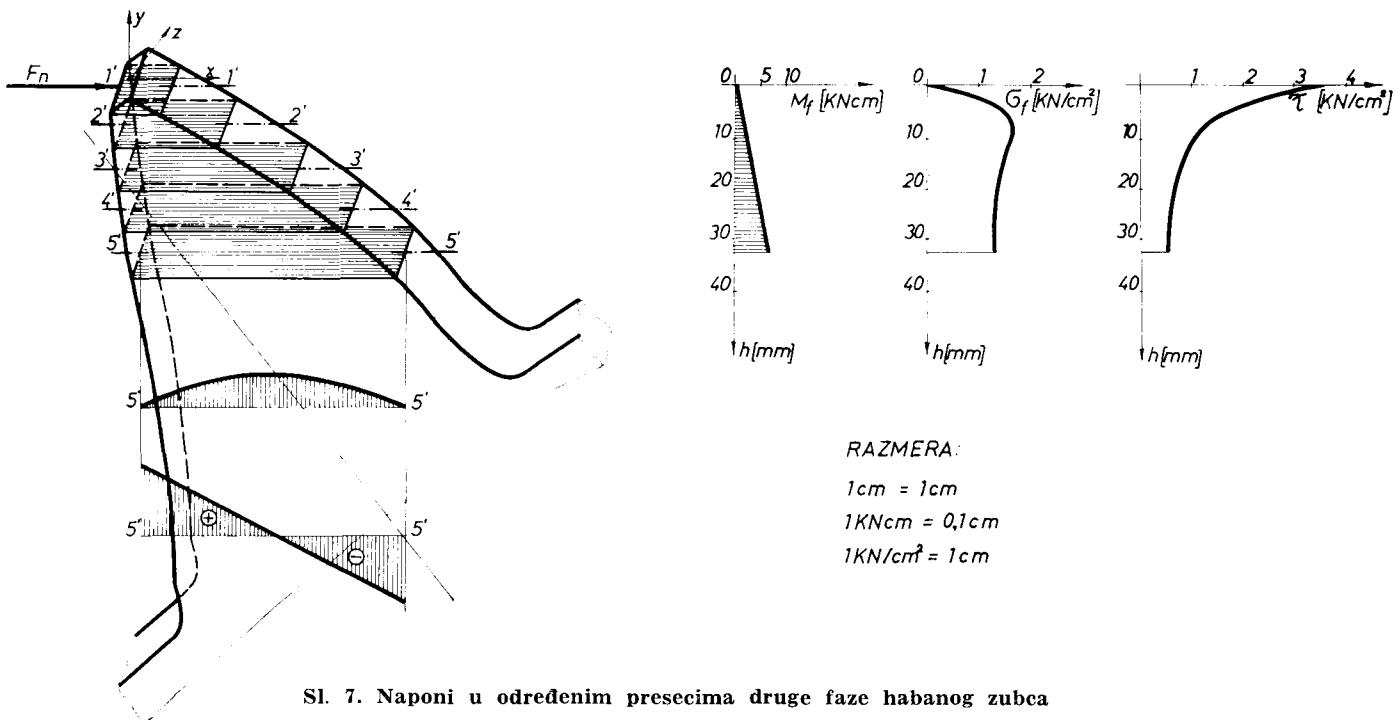
1	0	0,98	8	1,865	0,78	0,10	0,00	2,07	0,04	0,00	3,55	2,36
2	7	0,98	22	1,865	2,15	0,78	1,39	0,59	0,87	1,76	1,29	0,86
3	16	0,98	36	1,865	3,53	2,11	2,98	1,58	3,81	1,41	0,79	0,52
4	24	0,98	46	1,865	4,50	3,45	4,57	2,59	7,95	1,32	0,62	0,41
5	33	0,98	53	1,865	5,19	4,58	6,15	3,44	12,15	1,31	0,53	0,35



Sl. 6. Naponi u određenim presecima prve faze habanog zuba

Na osnovu rezultata u tabeli 2 i dijagrama uočava se da normalni napon koji je bio mali u gornjoj zoni neistrošenog zuba, naglo raste u drugoj fazi istrošenja iz čega proističe da tangentni napon takođe raste i ugrožava taj presek.

Uporedne vrednosti normalnih i tangentnih napona za neistrošeni i za prvu i drugu fazu istrošenog zuba date su na dijagramu prikazanom na sl. 8.



Sl. 8. Dijagrami normalnog i tangentnog napona

- 1 Prva faza habanja
2 Druga faza habanja

ZAKLJUČAK

Na osnovu napred navedenog može se dati sledeći zaključak:

1. Izborom pomeranja profila može se upravljati na ujednačenost koeficijenata specifičnog klizanja radi ravnomernog trošenja zuba pogonskog i gonjenog zupčanika.

2. Dijagrami koeficijenata specifičnog klizanja omogućuju kvalitativno upoređenje dva konstrukcijska rešenja za zupčasti prenosnik iz kriterijuma otpornosti na trošenje.

3. Kritične vrednosti normalnih i tangentnih napona pri trošenju zubača pomeraju se od podnožja prema vrhu zubača.

4. Lom istrošenog zubača nastaje u zoni glave tj. na delu iznad kinematskog kruga.

5. Ispitivanja omogućuju utvrđivanje kritične vrednosti trošenja bokova zubača u funkciji od modula sa ciljem blagovremene zamene istrošenih zubača radi sprečavanja pojave havarijnog loma.

LITERATURA

1. BANIĆ M., NEDELJKOVIĆ M., ĐOKIĆ V., IFToMM — JuDEKO. Svetski simpozijum o zupčanicima i zupčastim prenosnicima, Dubrovnik — Kupari 13 — 16. septembar 1978.
2. ĐOKIĆ V., Modelsко utvrđivanje kritične vrednosti istrošenja zubaca sa tačke gledišta čvrstoće podnožja, Magistarski rad Beograd 1978.

Dr MILAN NEDELJKOVIĆ, dipl. ing.
vanredni profesor Mašinskog fakulteta u Nišu



Rођен 1923. године. Дипломирао
и докторирао на Машињском
факултету Универзитета у Београ-
ду. Радио је у IMT, ЗТР и IAMА.
Сада ради као ванредни професор
и шеф кatedре за машињске кон-
струкције Машињског факултета
Универзитета у Нишу.

M. BABIĆ

Tribološke karakteristike sredstava za hlađenje i podmazivanje u obradi struganjem alatima od tvrdog metala

ISTRAŽIVANJA

UVOD

Zahtev savremene metaloprerađivačke industrije da se obezbedi neprekidno povećanje produktivnosti proizvodnje doveo je do uvođenja znatno oštrijih režima u obradi rezanjem. To podrazumeva primenu takvih alatnih materijala, koji mogu uspešno podnosići velika i promenljiva mehanička i toplotna opterećenja.

Tvrdi metal, dobijen tehnologijom sinterovanja praha karbida volframa (W), titana (T_i), tantala (T_a) i niobijuma (N_b) sa kobaltom (C_o) kao vezivnim sredstvom, odlikuje povećana otpornost na habanje i tvrdoća, koja sporo opada sa porastom temperature. Ove osobine ga čine pogodnim za izradu reznih elemenata alata u obradi rezanjem.

Za obradu struganjem rezni elementi od tvrdog metala ranije su izrađivani isključivo u obliku pločica, koje se pričvršćuju za čelični držać postupkom tvrdog lemljenja. Poznato je da ovaj način konstrukcije i izrade alata sadrži velike nedostatke. Savremene konstrukcije reznih alata se zasnivaju na sistemu sa mehaničkim pričvršćenjem pločica od tvrdog metala. U zavisnosti od konstrukcije pločice od tvrdog metala imaju unapred određeni broj reznih ivica.

Jedan od najperspektivnijih pravaca usavršavanja pločica od tvrdog metala, koje se primenjuju u obradi metala rezanjem, je povećanje postojanosti pomoću prevlaka u obliku tankog postojanog površinskog sloja. U toku nekoliko poslednjih godina neprekidno se povećava izrada reznih pločica sa jednostrukom i višestrukom prevlakom. Niz poznatih svetskih proizvođača iz ove oblasti proizvodi pločice sa jednostrukom prevlakom titan nitrida ($T_i N_i$) i titan karbida ($T_i C$). Najnovija istraživanja u ovoj oblasti uvela su u proizvodnju pločice sa višeslojnim prevlakama, kombinacije $T_i C$, $T_i N$ i aluminijum oksida (Al_2O_3).

Obrada metala rezanjem se odvija u uslovima koje karakterišu visoke temperature rezanja i visoki pritisci na kontaktne površine alata i materijala. To neminovalno dovodi do razvoja triboloških procesa na grudnoj i lednoj površini reznog klinja, izraženih u trošenju alata i pogoršanju kvaliteta obrađene površine predmeta obrade. U određenom trenutku pohabanost alata dostiže kritičan stepen, pri kome je dalje rezanje nemoguće.

S ciljem da se poboljšaju uslovi obrade primenjuju se sredstva za hlađenje i podmazivanje. I pored nedovoljno ispitanoj mehanizma njihovog dejstva, osnovna uloga sredstava za hlađenje i podmazivanje ogleda se u odvođenju toplote nastale u zoni rezanja i smanjenju trenja na kontaktne površine.

Proizvođači alata od tvrdog metala, u svojim preporukama za izbor režima rezanja, ne pominju sredstva za hlađenje i podmazivanje, jer je uvek moguće sa ovom vrstom alata vršiti obradu i bez njihovog korišćenja. Međutim, ispitivanja u Laboratoriji za obradu metala i tribilogiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, po programu razvoja proizvodnje i primene sredstava za hlađenje

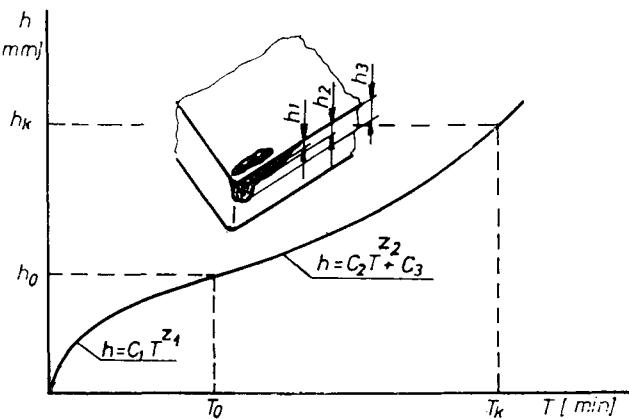
i podmazivanje (SHP) u metaloprerađivačkoj industriji, ukazuju da se njihovom primenom u obradi struganjem pločicama od tvrdog metala postiže povećanje postojanosti alata, a time i smanjenje troškova obrade.

Povećanje postojanosti alata zavisi od triboloških karakteristika SHP, koje su pored ostalog funkcija i primejene koncentracije. Otuda proističe potreba poklanjanja posebne pažnje izboru i načinu upotrebe sredstava za hlađenje i podmazivanje.

TRIBIOLOŠKE KARAKTERISTIKE SHP

Kao osnovni način vrednovanja tribološke karakteristike sredstva za hlađenje i podmazivanje koristi se kriva habanja dobijena uz njegovo korišćenje u nepromenjenim uslovima obrade (1) i (2).

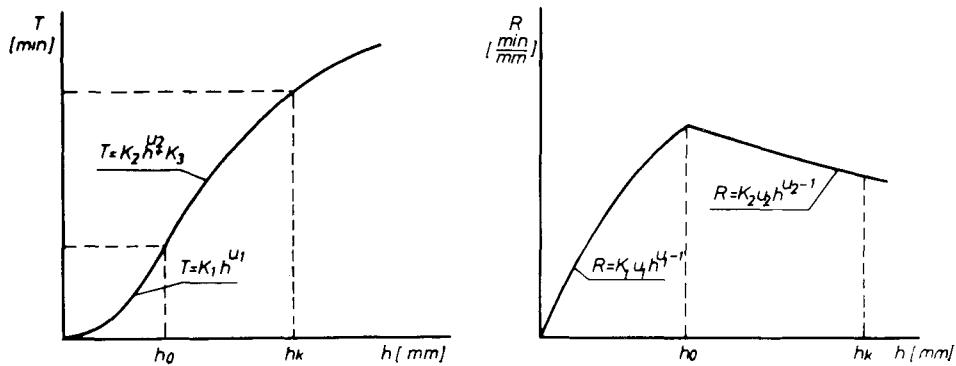
Promene koje nastaju usled habanja, na obe površine reznog klinja (grudna i ledna) mogu se registrovati sa više parametara kojima se meri, na primer, širina pojasa habanja na određenom mestu ledne površine (h_i) ili dubina kratera na grudnoj površini (Sl. 1). Merenjem ovih veličina u različitim vremenskim periodima rezanja dolazi se do niza tačaka, koje se aproksimiraju parabolama i dobijaju krive habanja.



Sl. 1. Kriva habanja

Sposobnost da vrši rezanje alat gubi najviše zbog habanja na lednoj površini reznog klinja. To je razlog da se kao kriterijum zatupljenja najčešće koristi određena veličina širine pojasa habanja na lednoj površini reznog klinja.

Za određeni stepen pohabanosti iz krive habanja određuje se postojanost alata (T) kao kvantitativni pokazatelj triboloških karakteristika sredstava za hlađenje i podmazivanje. Radi upoređenja nekoliko sredstava za hlađenje i podmazivanje sa tribološkog aspekta, potrebno je za svako od njih dobiti po krivu habanja — zavisnost $h = f(T)$. Dobijanje jedne krive habanja na klasičan način je skopčano sa zatupljenjem reznog alata do kritične pohabanosti (h_k).



Sl. 2. Definisanje otpornosti na habanje

Zato se za iznalaženje svake sledeće (koja odgovara novom sredstvu) mora koristiti nov ili isti, ali naošten alat. Osim toga, ovakvo ispitivanje zahteva velike količine materijala i dugo vreme izvođenja ispitivanja. Sve to dovodi u pitanje nepromjenljivost uticaja alata i materijala, a time i pouzdanost dobijenih rezultata.

Izvođenje programa ispitivanja više SHP (kao i drugih činilaca obrade), uz korišćenje samo jednog alata, uz smanjenu potrošnju materijala i vremena, omogućeno je primenom metode razvijene u Laboratoriji za obradu metala i tribiologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu.

Njena primena zasnovana je na iznalaženju otpornosti alata na habanje (R) kao tribiološke karakteristike SHP. Otpornost alata se definije na sledeći način:

$$R = \frac{dT}{dh} = f(h) \quad (1)$$

R — otpornost na habanje

Ilustracija gornje zavisnosti data je na slici 2.

Upoređenje tribioloških karakteristika više SHP preko otpornosti na habanje zahteva definisanje obe funkcije $R = f(h)$. Do njih se dolazi merenjem otpornosti alata pri tri stepena pohabanosti u obe faze habanja. Dobijene vrednosti se unose u duplogaritamski koordinatni sistem log R , log h , i metodom najmanjih kvadrata određuju konstante K_1 i K_2 kao i eksponenti u_1 i u_2 .

Na osnovu poznatih zavisnosti $R = f(h)$ jednostavnim integraljenjem, u odgovarajućim granicama, dobija se postojanost alata.

$$T_1 = K_1 u_1 \int_0^{h_0} h^{u_1-1} dh \quad T_2 = K_2 u_2 \int_{h_0}^{h_k} h^{u_2-1} dh \quad (2)$$

$$T = T_1 + T_2 \quad (3)$$

Veza između postojanosti i troškova alata ima oblik

$$A = \left(n k_1 t_1 + k_2 t_2 + \frac{C_a}{i+1} \right) \frac{\operatorname{tg}}{T} \quad (4)$$

pri čemu su:

n — faktor koji uzima u obzir lični dohodak stručnog radnika

k_1 — bruto lični dohodak proizvodnog radnika (din/min)

t_1 — vreme promene pohabanog alata (vreme okretanja nepohabane strane pločice) (min.)

k_2 — bruto lični dohodak oštrelja (din/min.)

t_2 — vreme oštrelja alata (min.)

C_a — nabavna cena alata (din)

i — broj oštrelja alata (kod promenljive pločice $i+1 =$ broj reznih ivica)

tg — vreme efektivnog rezanja (min)

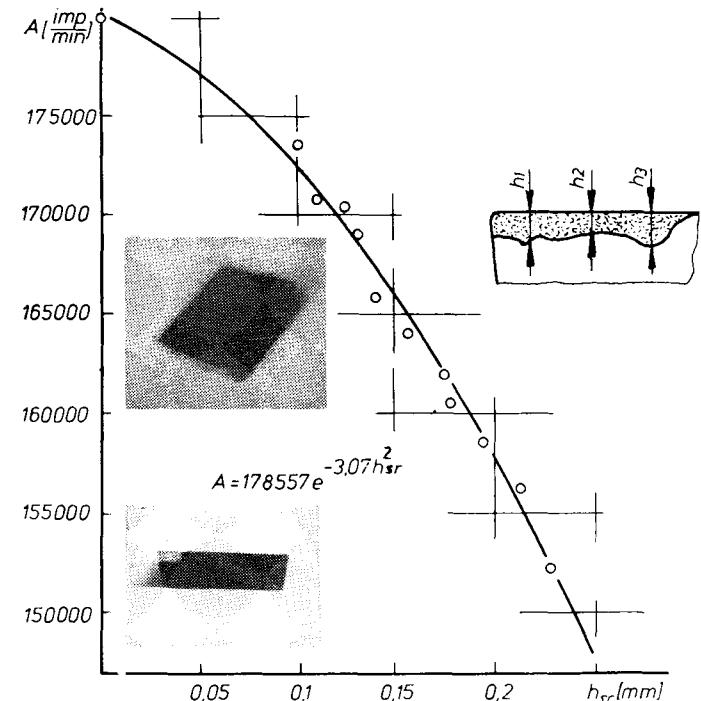
T — postojanost alata za određeni kriterijum zatopljenja (min).

Uticajem na povećanje postojanosti alata, sredstva za hlađenje i podmazivanje doprinose osnovnom cilju izraženom u smanjenju troškova proizvodnje.

PRIMENA RADIOAKTIVNE METODE ZA IZNALAŽENJE TRIBOLOŠKIH KARAKTERISTIKA SHP

U procesu obrade metala rezanjem (u tribiološkim procesima) učestvuje mali deo mase alata što dovodi do promene oblika vrha reznog klina. Upravo na toj činjenici se i zasniva primena radioaktivne metode. Taj deo se ozračuje na ciklotronu, bombardovanjem željene (tačno određene po položaju i razmerama) površine reznog alata teškim česticama (protoni, deuteroni i sl.). Na slici 3. prikazan je radiografski snimak ozračene ledne površine pločice od tvrdog metala.

U toku izvođenja svake opitne operacije rezanja (obično u trajanju 1 — 2 min), u određenim uslovima obrade, dolazi do gubitka ozračene mase alata usled habanja, a samim tim dolazi i do promene radioaktivnosti. Praćenjem pada radioaktivnosti (posle svake opitne operacije rezanja) i povremenim merenjem širine pojasa habanja na lednoj površini pločice, izražene srednjom vrednošću pohabanosti (h_{sr}), dolazi se do zakonitosti promene radioaktivnosti sa porastom pohabanosti (sl. 3).



Sl. 3. Funkcionalna veza između radioaktivnosti i srednje širine pojasa habanja na lednoj površini alata

Dosadašnja ispitivanja su pokazala da funkcija koja najpogodnije aproksimira eksperimentalno dobijenu zavisnost ima oblik:

$$A = A_0 e^{-kh^n} \quad (5)$$

Logaritmovanjem gornji izraz se linearizuje,

$$\ln \left(\frac{A_0}{A} \right) = \ln k + n \ln h \quad (6)$$

pa se metodom najmanjih kvadrata određuju eksponenti k i n . Na osnovu zavisnosti (5) za svaku vrednost radioaktivnosti (A_i) moguće je odrediti vrednost srednje širine pojasa pohabanosti (h_{sr}):

$$h_{sr_i} = \left(\frac{A_0}{A_i} \right)^{1/n} \quad (7)$$

Rezanje se vrši u kratkim vremenskim intervalima, te se na osnovu elementarnog porasta širine pojasa pohabanosti dobija otpornost na habanje alata:

$$R = \frac{dT}{dh} \approx \frac{\Delta T}{\Delta h} = \frac{t_{rez}}{\Delta h} \quad (8)$$

$$\Delta h_i = h_i - h_{i-1} \quad (9)$$

Obradom dobijenih vrednosti otpornosti na habanje, na način koji je već objašnjen, može se izvršiti upoređenje triboloških karakteristika ispitivanih SHP.

PROGRAM I REZULTATI ISPITIVANJA TRIBOLOŠKIH KARAKTERISTIKA SREDSTAVA ZA HLAĐENJE I PODMAZIVANJE

Program ispitivanja triboloških karakteristika sredstava za hlađenje i podmazivanje u obradi struganjem alatima od tvrdog metala imao je za cilj da utvrdi razliku u postojanosti alata pri primeni SHP i bez njihove primene, kao i uticaj koncentracije mineralnih, polusintetičkih mineralnih emulgirajućih ulja i sintetičkih vodorastvornih koncentrata u emulzijama i rastvorima na veličinu postojanosti alata i troškova alata.

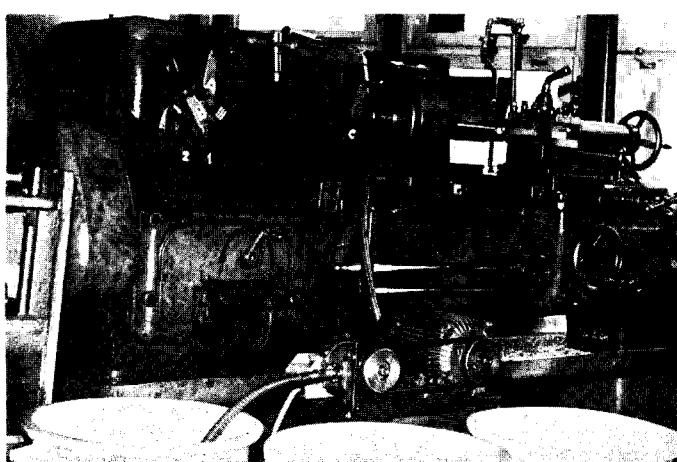
Ispitivanja su izvedena na univerzalnom strugu uz primenu alata od tvrdog metala P30 i GC015. Poslednja vrsta tvrdog metala imala je dvostruku prevlaku od TiC i Al₂O₃. Predmet obrade bio je izrađen od čelika Č. 1730 koji je poboljšan na 270 HB.

Izabrani režimi rezanja su bili:

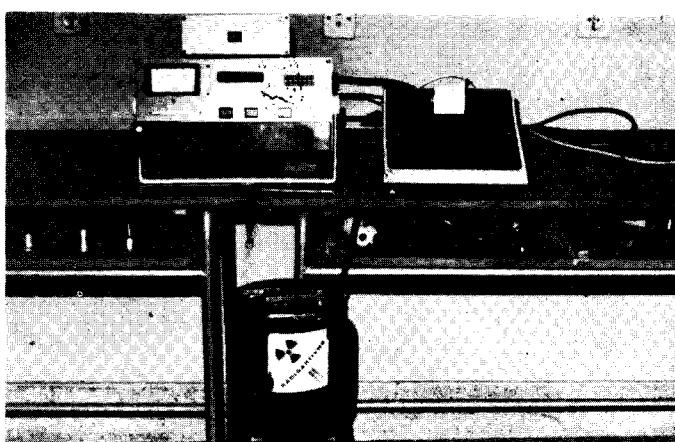
- Brzina rezanja: $v = 145$ m/min i $v = 180$ m/min
- Korak: $s = 0,125$ mm/o
- Dubina: $\delta = 2$ mm
- Protok SHP: $Q = 4,5 - 5$ l/min.

Opitne operacije u okviru prvog dela programa ispitivanja izvedene su bez korišćenja SHP i sa korišćenjem tri sredstva sa koncentracijama od 6%.

Na slikama 4. i 5. prikazana su radna mesta za izvođenje opitnih operacija i za merenje radioaktivnosti korišćenih alata.

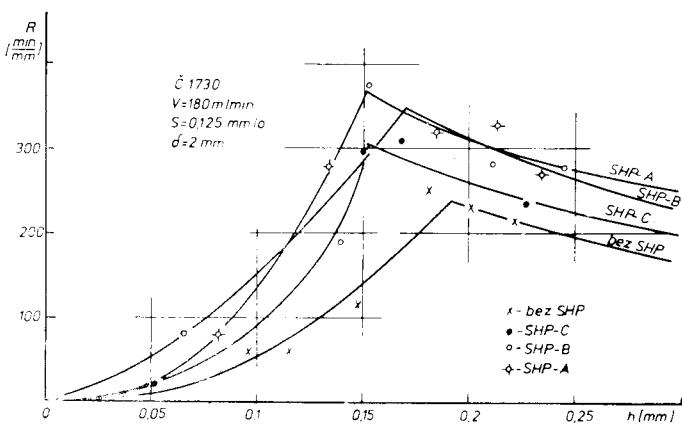


Sl. 4. Radno mesto



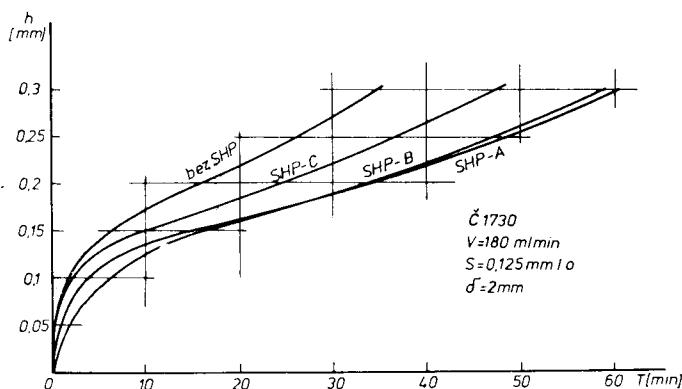
Sl. 5. Trojački komplet sa sondom

Na slici 6. prikazane su funkcije $R = f(h)$, dobivene eksperimentalnim putem izvođenjem prvog dela programa ispitivanja.



Sl. 6. Otpornost na habanje

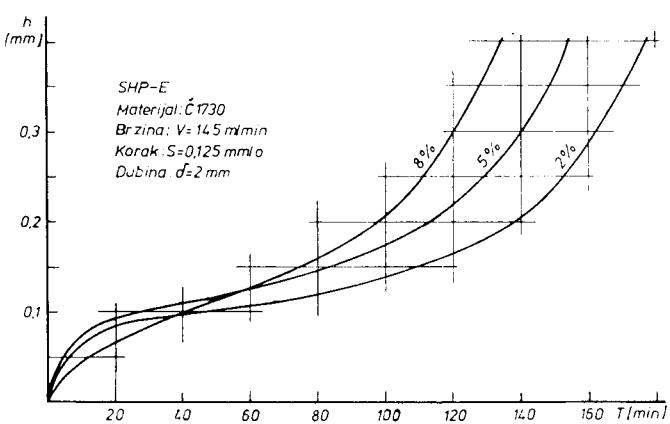
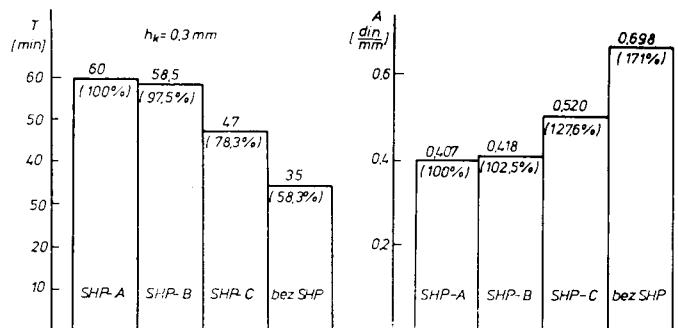
Integraljenjem ovih funkcija dobijene su postojanosti alata za različite kriterijume zatupljenja na osnovu kojih su konstruisane krive habanja prikazane na slici 7.



Sl. 7. Krive habanja

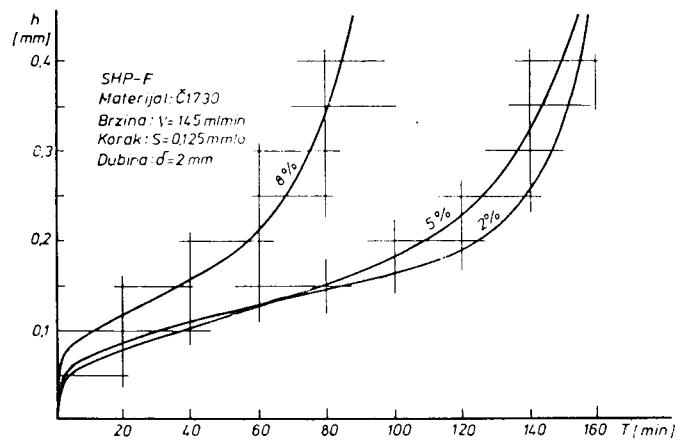
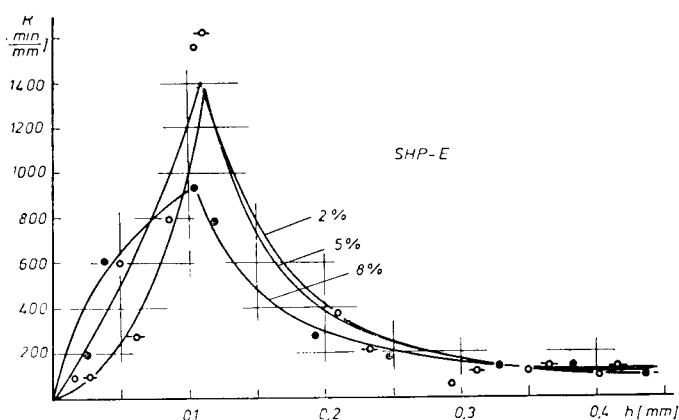
Odnos ostvarenih postojanosti alata kao i troškova alata, za kriterijum pohabanosti definisan sa $h = 0,3$ mm, prikazan je na slici 8.

Rezultati istraživanja prikazani na slikama 6, 7 i 8. jasno ukazuju na veliki uticaj kvaliteta sredstava za hlađenje i podmazivanje na postojanost i troškove alata, a posebno na neekonomičnost obrade kada se sredstvo za hlađenje i podmazivanje ne koristi.

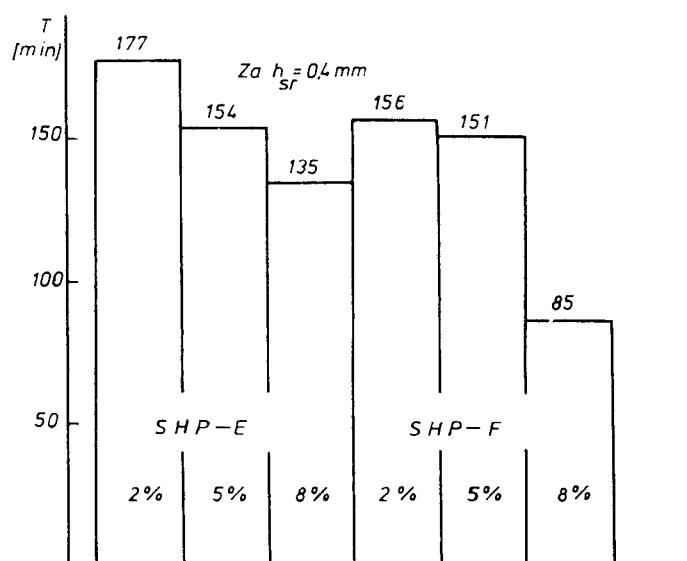
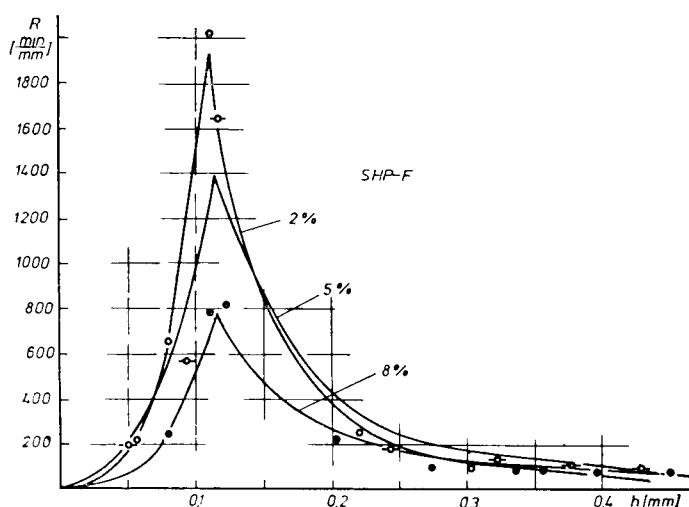


Realizacijom drugog dela programa istraživanja utvrđena je optimalna koncentracija više vrsta koncentrata s obzirom na tribološke karakteristike SHP, odnosno na postojanost i troškove alata.

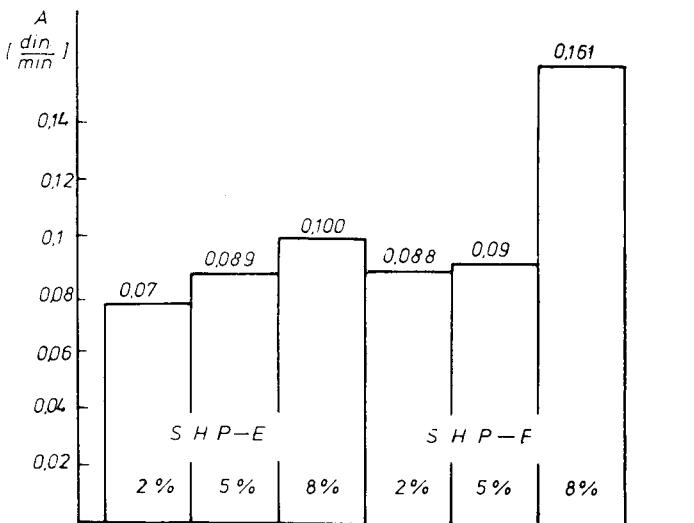
Osnovne funkcije, koje su dobijene eksperimentalnim istraživanjem, prikazane su na slikama 9. i 10.



Uporedni pregled postojanosti alata i troškova alata za različite koncentracije prikazan je na slikama 13. i 14.



Integraljenjem ovih funkcija [$R = f(h)$] dobijeni su elementi za konstrukciju odgovarajućih krivih habanja [$h = f_1(T)$], koje su prikazane na slikama 11. i 12.

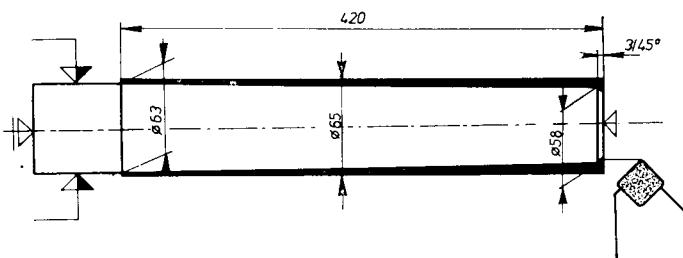


Sl. 14. Uporedni prikaz troškova alata

Već na prvi pogled može se zaključiti da je optimalna koncentracija koncentrata u sredstvima za hlađenje i podmazivanje u slučaju obrade struganjem alatima od tvrdog metala oko 2%.

STRUKTURA VREDNOSTI PROIZVODNE OPERACIJE

Struktura vrednosti jedne proizvodne operacije, koja se izvodi obradom struganjem alatom od tvrdog metala, zavisi od velikog broja faktora, među kojima geometrija obrade i vrsta materijala predmeta obrade imaju najveći značaj. U daljem tekstu daje se primer strukture vrednosti jedne proizvodne operacije koja se izvodi u uslovima serijske proizvodnje u savremenim jugoslovenskim proizvodnim uslovima. Na sl. 15. data je skica proizvodne operacije sa elementima geometrije obrade.



Sl. 15. Skica operacije

LITERATURA

- IVKOVIĆ B., Tribologija rezanja — sredstva za hlađenje i podmazivanje, Građ. knjiga, 1979.
- IVKOVIĆ B., Tribološke karakteristike sredstava za hlađenje i podmazivanje, Obrada metala i tribologija, br. 10, Kragujevac, 1977.
- IVKOVIĆ B., Definisanje habanja višesločnih alata pomoću radioaktivnih izotopa, Monografija, Kragujevac, 1970.
- IVKOVIĆ B., LUKIĆ D., Analiza razvoja proizvodnje i primene sredstava za hlađenje i podmazivanje pri obradi metala rezanjem, Kragujevac, 1973.
- JEREMIĆ B., Tribološke karakteristike sredstava za hlađenje i podmazivanje u obradi bušenjem, Obrada metala i tribologija br. 10, Kragujevac, 1977.
- ARSOVSKI S., Tribološke karakteristike sredstava za hlađenje i podmazivanje u obradi glodanjem, Obrada metala i tribologija, br. 10, Kragujevac, 1977.

Uslovi pod kojima se operacija izvodi su:

- Mašina: kopir strug »Fisher« KDM 11
- Vremenski stepen iskoršćenja: $\eta = 0,6$
- Rezni alat: pločica od tvrdog metala kvaliteta P30, proizvođač »Coromant«.
- Sredstvo za hlađenje i podmazivanje: mineralno emulgirajuće ulje »A« sa koncentracijom $K = 6\%$ i protokom $Q = 10 \text{ l/min}$.
- Ekonomična poстојанost alata: $T = 50 \text{ (min)}$
- Brzina rezanja: $v = 196 \text{ (m/min)}$
- Korak: $s = 0,2 \text{ (mm/o)}$
- Efektivno vreme rezanja: $t_g = 2,02 \text{ (min)}$
- Komadno vreme: $t_k = 3,76 \text{ (min)}$

Struktura vrednosti operacije, izvedena pod ovim uslovima, je:

<input type="checkbox"/> Vrednost rada	$R = 2,16 \text{ (din)}$
<input type="checkbox"/> Troškovi alata	$A = 0,98 \text{ (din)}$
<input type="checkbox"/> Amortizacija maštine	$M = 6,96 \text{ (din)}$
<input type="checkbox"/> Troškovi SHP	$S = 0,074 \text{ (din)}$

Vrednost obrade proizvodne operacije pri korišćenju SHP iznosi $V_0 = 10,17 \text{ din}$.

Vrednost obrade proizvodne operacije bez korišćenja SHP iznosila bi $V_{01} = 10,8 \text{ din}$. ili 6% više. Ako bi se primenila optimalna koncentracija sredstava za hlađenje i podmazivanje, razlika u vrednostima obrade sa i bez korišćenja SHP bi bila još veća.

ZAKLJUČCI

Na osnovu rezultata izvedenih ispitivanja mogu da se izvuku mnogobrojni zaključci, koji bi se odnosili kako na izbor optimalne vrste SHP, tako i na izbor optimalne koncentracije. U ovom trenutku navodi se samo nekoliko osnovnih zaključaka:

1) Obrada struganjem sa alatima od tvrdog metala treba da se vrši uz primenu SHP, jer su u tom slučaju troškovi alata i maštine manji, a takođe se smanjuje i opterećenje proizvodne operacije ličnim dohocima proizvodnih radnika.

2) Na jugoslovenskom tržištu postoji veliki broj različitih sredstava za hlađenje i podmazivanje čije su tribološke karakteristike različite. Izborom odgovarajućeg sredstva za hlađenje i podmazivanje takođe se smanjuju svi elementi strukture vrednosti proizvodne operacije.

3) Posle izbora odgovarajućeg sredstva za hlađenje i podmazivanje neophodno je izvršiti i pravilan izbor koncentracije koncentrata u SHP.

Prikazani rezultati istraživanja predstavljaju deo rezultata, koji se dobijaju istraživanjem u okviru naučno istraživačkog projekta »Optimizacija proizvodnih uslova u metaloprerađivačkoj industriji sa aspekta minimizacije troškova obrade« — deo »Razvoj proizvodnje i primene SHP« u čijem finansiranju učestvuje Republička zajednica nauke Srbije i FAM — Kruševac.

MIROSLAV BABIĆ, dipl. ing.

asistent pripravnik na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu



Završio je Mašinski fakultet marta 1978. godine. Rođen 1954. godine. Bavi se problematikom sredstava za hlađenje i podmazivanje u obradi metala rezanjem.

S. ST. SEKULIĆ

Troškovi alata i ukupni troškovi obrade u funkciji pouzdanosti alata kod protočnih automatskih linija

ISTRAŽIVANJA

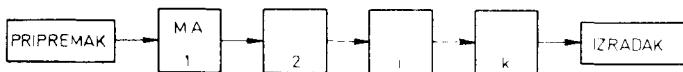
UVOD

Liniju obrade čine grupe mašina alatki raspoređenih prema proizvodno-tehnološkim zahtevima.

Medusobna veza između pojedinih mašina alatki (radnih mesta) u liniji može biti [6,9]:

- redna,
- paralelna i
- kombinovana (redno-paralelna).

Kod automatskih linija obrade veza između pojedinih operacija ostvaruje se najčešće rednim vezama između mašina alatki (sl. 1).

**Slika 1.**

Transport obradaka od operacije na operaciju izvodi se mehanizovano transporterima različite konstrukcije.

Kod redno povezanih mašina alatki u liniji obrade teži se da zbir glavnog (mašinskog) vremena t_g , pomoćnog vremena t_p i vremena zamene alata svedenog na jedan obradak t_a , bude približno isti na svim operacijama, tj.

$$(t_g + t_p + t_a)_i = C = \text{const}; \quad i = 1, 2, 3, \dots, k$$

Vremenski interval koji određuje sukcesivno izlaženje izradaka sa linije obrade predstavlja vreme takta linije t_t . Za sve operacije takt linije obrade je zajednički i iznosi

$$\begin{aligned} t_t &= t_g + t_p + t_a + t_m = \\ &= \left(t_g + t_p + \sum_{i=1}^n t_{zi} + \frac{t_{gi}}{T_i} \right); \quad i = 1, 2, 3, \dots, k \end{aligned} \quad (1)$$

gde je vreme zamene alata svedeno na jedan obradak

$$t_a = \sum_{i=1}^n t_{zi} + \frac{t_{gi}}{T_i} \quad (2)$$

pri čemu je t_z vreme zamene alata, T postojanost alata i n broj zahvata na jednom radnom mestu (operaciji). Vremenska veličina takta određena je prema najdužoj operaciji, kod koje je

$$t_t = (t_g + t_p + t_m)_{\max} \quad (1.1)$$

i za nju je međuvreme $t_m = 0$.

Kako su najčešće na pojedinim operacijama (mašinama) u liniji obrade funkcije verovatnoće pojave otkaza alata date prema Weibull-ovom rasporedu u obliku [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]

$$F(t)_i = 1 - \exp [(-c_i t)^m_i] \quad (3)$$

onda pouzdanost alata koja im odgovara iznosi

$$p(t)_i = 1 - F(t)_i = \exp [(-c_i t)^m_i] \quad (4)$$

Za slučaj Weibull-ovog rasporeda prosečno vreme bezotkaznog rada određuje se pomoću gama funkcije

$$T_{sr} = t_0^{1/m} \Gamma \left(\frac{1}{m} + 1 \right) = \frac{1}{c} \left(\frac{1}{m} + 1 \right)$$

Za linije obrade sa redno povezanim mašinama alatkama u liniji ukupna pouzdanost linije iznosi [10]

$$p(t) = \prod_{i=1}^k p(t)_i; \quad i = 1, 2, 3, \dots, k \quad (5)$$

Troškove alata možemo predstaviti zbirom [1, 2, 6, 9]

$$\Lambda = \Lambda_1 + \Lambda_2 + \Lambda_3 \quad (6)$$

pri čemu troškovi zamene istrošenog alata iznose

$$\Lambda_1 = k_1 t_1 \frac{t_g}{T}$$

troškovi oštrenja

$$\Lambda_2 = k_2 t_2 \frac{t_g}{T}$$

i troškovi amortizacije alata

$$\Lambda_3 = \frac{C_a}{t_0 + 1} \frac{t_g}{T}$$

(k_1 minutni bruto lični dohodak operacijskog radnika, t_1 vieme zamene alata, k_2 minutni bruto lični dohodak oštrenca, t_2 vreme oštrenja alata, C_a vrednost novog alata i t_0 broj oštrenja alata)

pa je

$$\Lambda = \left(k_1 t_1 + k_2 t_2 + \frac{C_a}{t_0 + 1} \right) \frac{t_g}{T} \quad (6.1)$$

Troškovi alata za neku operaciju na liniji obrade mogu se predstaviti u obliku

$$A_i = \sum_{i=1}^k \left[\left(n k_1 t_1 + k_2 t_2 + \frac{C_a}{i_0 + 1} \right) \frac{t_g}{T} \right]_i \quad (7)$$

gde je i broj alata u posmatranoj operaciji.

Ukupni troškovi alata za liniju obrade sa redno povezanim mašinama alatkama iznose

$$A_o = \sum_{i=1}^k A_i = \sum_{i=1}^k \sum_{i=1}^l \left[\left(n k_1 t_1 + k_2 t_2 + \frac{C_a}{i_0 + 1} \right) \frac{t_g}{T} \right]_i \quad (8)$$

(pri uslovu da se nakon otkaza bilo kojeg alata na nekoj operaciji zamene svih alata na njoj).

Vrednost obrade za jednu operaciju na liniji obrade može se predstaviti zbirom [1, 2, 6, 9]

$$U_{oi} = (R + M + A)_i \quad (9)$$

gde je

□ vrednost rada radnika

$$R = n k_1 (t_g + t_p + t_a + t_m) \quad (10)$$

□ mašine alatke

$$U_{oi} = \frac{C_m p}{F_t 100 \cdot 60} (t_g + t_p + t_a + t_m) \quad (11)$$

($n k_1$ minutni bruto lični dohodak operacijskog radnika i reglera, C_m cena maštine alatke sa priborom i cena pribora za stezanje obradka i alata, p amortizaciona stopa, F godišnji raspoloživi fond vremena u časovima i Δt koeficijent vremenskog iskorišćenja).

Zamenom (10), (11) i (7) u (9) dobijamo za vrednost obrade za jednu operaciju na liniji obrade

$$U_{oi} = \left\{ n k_1 (t_g + t_p + t_a + t_m) + \frac{C_m p}{F_t 100 \cdot 60} (t_g + t_p + t_a + t_m) + \sum_{i=1}^l \left[\left(n k_1 t_1 + k_2 t_2 + \frac{C_a}{i_0 + 1} \right) \frac{t_g}{T} \right]_i \right\} \quad (9.1)$$

Zamenom jednačine (2) u izraz za ukupnu vrednost obrade za operaciju (9.1), posle sređivanja dobijamo

$$U_{oi} = \left[\left(n k_1 + \frac{C_m p}{F_t 100 \cdot 60} \right) (t_g + t_p + t_m + \sum_{i=1}^n t_{zi} \frac{t_g}{T_i}) \right]_i + A_i \quad (9.2)$$

Ukupna vrednost obrade za celu liniju daje se kao suma

$$U_o = \sum_{i=1}^k U_{oi} \quad (12)$$

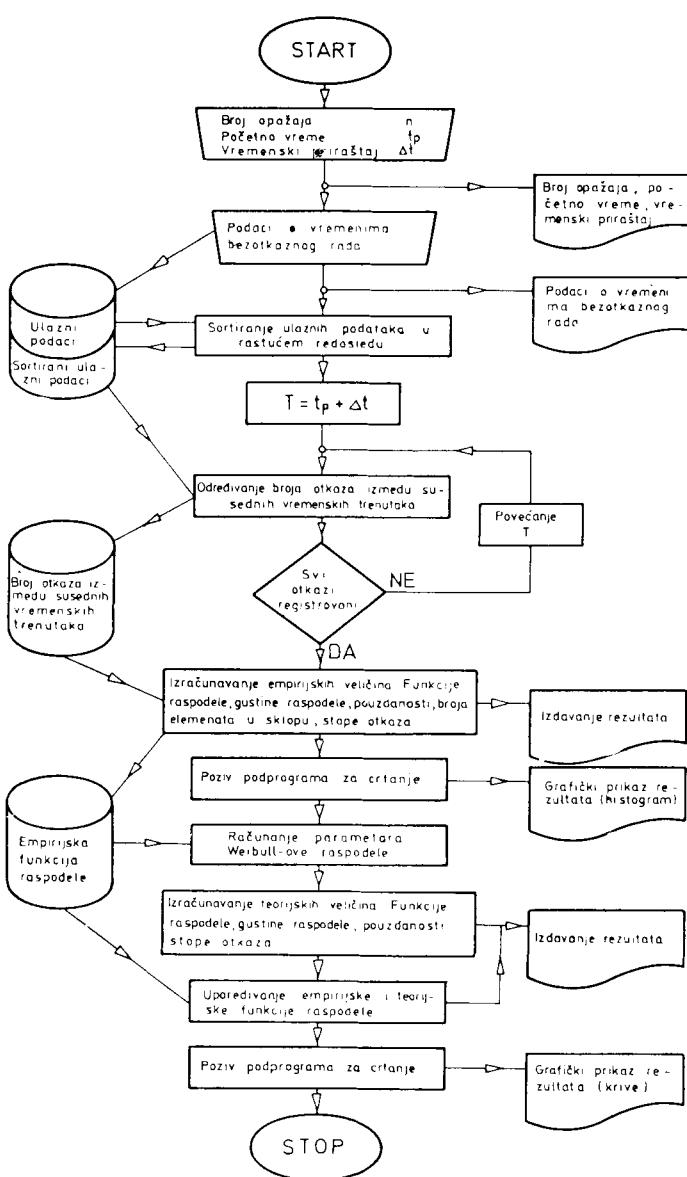
gde se vrednost obrade na pojedinim operacijama određuje izrazom (9.1).

POUZDANOST REZNOG ALATA, TROŠKOVI ALATA I UKUPNI TROŠKOVI OBRADE U FUNKCIJI VREMENA

Pouzdanost reznog alata u funkciji vremena

Da bismo odredili pojedinačne i ukupnu pouzdanost alata, vršena su opažanja otkaza na automatskoj blok-liniji za obradu klipova motora sa unutrašnjim sagorevanjem.

Linija se sastoji iz šest automata povezanih koračnim



Slika 2.

transporterima. Posmatranje je vršeno u vremenskom intervalu od šest meseci, pri čemu su izvršene redukcije vremena usled ostalih zastoja.

S ciljem da se ubrza obrada podataka razvijen je program za elektronski računar VARIAN 73 (32 k byte), pomoću kojeg, na osnovu niza opažanja otkaza alata, usvajajući početno vreme manje od minimalnog vremena otkaza iz niza i izborom pogodne veličine intervala, daje: histograme empirijskih vrednosti pouzdanosti, verovatnoće otkaza, frekvence i intenziteta otkaza, zatim jednačinu teorijske funkcije verovatnoće i srednje vreme bezotkaznog rada i konačno crta tačke odgovarajućih krivih ekvivalentne nabojanim histogramima (sl. 2).

PODACI

Operacija 1 (KS-1) Struganje

Vremena do otkaza alata u časovima:

62,5 127,7 79,7 71,5 79 95 79,7 71,5 56 98 79 70,5 79,7
99,5 96,7 91,2 77 79,5 72,3 54 107 95 97 99 81 62,6 105,7
78 71,5 79,7 96 77,8 71,5 60 98 79 70,5 79,7 94.

Za ovu operaciju usvaja se početno vreme 50 časova i interval od 5 časova.

Na osnovu gornjih podataka dobiven je parametar $c = 0,01131$ i eksponent $m = 5,85312$ pa je Weibull-ova raspodela data izrazom

$$F(t) = 1 - \exp [(-0,01131 t)^{5,85312}]$$

Srednje vreme bezotkaznog rada iznosi

$$T_{sr} = \frac{1}{0,01131} \Gamma \left(\frac{1}{5,85312} + 1 \right) = 81,94 \text{ časova}$$

Operacija 2 (KS-2) Bušenje

Vreme do otkaza:

128 160 88 104 56 80 32 81 84 79 118 154 160 148 90
88 104 100 92 46 49 84 79 120 128 158 88 86 90 78 127
130 110 148 89 90 106 78 80 42

Početno vreme 30, interval 10,

$$c = 0,00960, \quad m = 3,15536$$

pa je

$$F(t) = 1 - \exp [(-0,00960 t)^{3,15536}]$$

i

$$T_{sr} = \frac{1}{0,0096 t} \Gamma \left(\frac{1}{3,15536} + 1 \right) = 93,23.$$

Operacija 3 (KS-3) Bušenje

Vreme do otkaza:

40 136 40 48 56 48 56 55 64 48 104 40 40 48 46 56 53
48 56 64 64 48 40 120 38 36 48 48 56 48 42 40 40 40
42 46 40 142 48 50 56 56 55 60 64 64

Početno vreme 30, interval 10

$$c = 0,01935, \quad m = 1,56976$$

pa je

$$F(t) = 1 - \exp [(-0,01935 t)^{1,56976}]$$

i

$$T_{sr} = \frac{1}{0,01935} \Gamma \left(\frac{1}{1,56976} + 1 \right) = 46,42.$$

Operacija 4 (KS-4) Struganje

Vreme do otkaza:

32 32 80 72 24 88 56 48 72 72 88 72 72 86 88 72 72 48
56 88 26 30 72 80 32 32 36 36 32 32 50 72 24 88 56 48
72 72 77 72 72 86 88

Početno vreme 20, interval 5

$$c = 0,01410, \quad m = 2,33621$$

pa je

$$F(t) = 1 - \exp [(-0,01410 t)^{2,33621}]$$

i

$$T_{sr} = \frac{1}{0,0141} \Gamma \left(\frac{1}{2,33621} + 1 \right) = 62,84.$$

Operacija 5 (KS-5) Struganje

Vreme do otkaza:

23,5 22,6 63,5 31,8 31,3 39,6 39,75 31,7 71 31 23,5
48 40 32 54,8 55 24,2 28 36 39,75 31,0 64 21,5 26,5
52 48,3 54,3 56 27 30 29,2 39,75 39,6 56 54 21,2 19,0
29 43 54

Početno vreme 15, interval 5

$$c = 0,02403, \quad m = 3,27036$$

$$F(t) = 1 - \exp [(-0,02403 t)^{3,27036}]$$

$$T_{sr} = \frac{1}{0,02403} \Gamma \left(\frac{1}{3,27036} + 1 \right) = 37,29.$$

Operacija 6 (KS-6) Glodanje

Vreme do otkaza:

48 43 80 40 64 80 56 32 56 56 40 80 48 48 40 64 80 32
56 56 60 40 80 48 80 64 34 56 56 56 43 48 40 40 38 36
36 40 40 64 64 80 53 36

Početno vreme 30, interval 5.

$$c = 0,02792, \quad m = 3,64719$$

pa je

$$F(t) = 1 - \exp [(-0,02792 t)^{3,64719}]$$

i

$$T_{sr} = \frac{1}{0,02792} \Gamma \left(\frac{1}{3,64719} + 1 \right) = 50,31.$$

S obzirom da su parametri Weibull-ove raspodele c i m poznati, to se na osnovu jednačine (3), variranjem vremena zamene t u širokim granicama, mogu dobiti odgovarajuće numeričke vrednosti verovatnoće pojave otkaza na pojedinim operacijama. Vrednost verovatnoće otkaza alata dobijene simulacijom na računaru date su u tabeli T-1.

TABELA T-1

t	$F(t) = 1 - \exp(-c_i t)^{m_i}$					
	KS-1	KS-2	KS-3	KS-4	KS-5	KS-6
10	0,00000288	0,00061456	0,07309411	0,01023680	0,00939278	0,04382188
20	0,00013662	0,00546221	0,20174151	0,05063286	0,08703529	0,02341854
30	0,00178675	0,01949488	0,34676617	0,12539586	0,29030914	0,09875320
40	0,00953611	0,04762794	0,48771941	0,23078367	0,58463902	0,25688108
50	0,03493490	0,09326163	0,61304903	0,35719518	0,83841808	0,48827836
60	0,09821130	0,16088449	0,71749301	0,49164960	0,96344168	0,72820540
70	0,22495754	0,24820447	0,80013872	0,62087627	0,99582204	0,89829487
80	0,42695858	0,35259540	0,86270373	0,73418825	0,99979129	0,97576181
90	0,67025234	0,46766895	0,90326648	0,82529371	0,99999613	0,99670686
100	0,87197457	0,58486133	0,94030546	0,89263842	0,99999998	0,99977379
120	0,99745988	0,79045246	0,97654000	0,96717540	1,00000000	0,99999992
140	0,99999960	0,92127752	0,99160200	0,99253634	1,00000000	1,00000000
160	1,00000000	0,97921967	0,99724518	0,99875764	1,00000000	1,00000000
180	1,00000000	0,99636595	0,99916784	0,99985077	1,00000000	1,00000000
200	1,00000000	0,99960349	0,99976557	0,99998724	1,00000000	1,00000000

TABELA T-2

t	$p(t)_i = 1 - F(t)_i$						p(t)
	KS-1	KS-2	KS-3	KS-4	KS-5	KS-6	
10	0,99999712	0,99938544	0,92690589	0,98976320	0,99060722	0,95617812	0,96843837
20	0,99983338	0,99453779	0,79825849	0,94936714	0,91296471	0,97658146	0,67187600
30	0,99821325	0,98050512	0,65323383	0,87460414	0,70969086	0,90124680	0,35765668
40	0,99041389	0,95237206	0,51228053	0,76921633	0,41536098	0,74311892	0,11472651
50	0,96506510	0,90603832	0,38695094	0,64280482	0,16158192	0,51172164	0,01798311
60	0,90178870	0,83911551	0,28250199	0,50835040	0,03655832	0,27179460	0,01079790
70	0,77504246	0,75179553	0,19986128	0,37912373	0,00417796	0,10170513	0,00001876
80	0,56304142	0,64740460	0,13729627	0,26581175	0,00020808	0,02423819	0,00000001
90	0,32974766	0,53233105	0,19173352	0,17470629	0,00000387	0,00329314	0,00000000
100	0,12802543	0,41513867	0,05969454	0,10736158	0,00000002	0,00022621	0,00000000
120	0,00254012	0,20954754	0,02346000	0,03282460	0,00000000	0,00000008	0,00000000
140	0,00000060	0,07872248	0,00839800	0,00746366	0,00000000	0,00000000	0,00000000
160	0,00000000	0,02078033	0,00275482				
180	0,00000000	0,00363405	0,00083216	0,00014923	0,00000000	0,00000000	0,00000000
200	0,00000000	0,00039651	0,00023443	0,00001276	0,00000000	0,00000000	0,00000000

Kako je u pitanju linija obrade sa redno povezanim mašinama alatkama, to će se ukupna pouzdanost reznog alata za celu liniju odrediti na osnovu izraza (5), pri čemu se pouzdanost na pojedinim operacijama određuje prema jednačini (4). Numeričke vrednosti pouzdanosti alata na pojedinim operacijama i ukupna pouzdanost alata za celu liniju određene simulacijom, za varirane vrednosti zamene alata, svrstane su u tabeli T-2.

Grafički prikaz promene ukupne pouzdanosti alata za celu liniju obrade data je dijagramom na slici 3.

Troškovi alata u funkciji vremena zamene

Zamena alata nakon otkaza

Zamena alata na pojedinim operacijama može se vršiti

nakon otkaza ili ranije, na svim operacijama jednovremeno, nakon isteka određenog vremena.

Za slučaj zamene alata nakon otkaza, za širi interval vremena opažanja, u izraz (8) za ukupne troškove alata za liniju obrade, treba vrednost T zameniti srednjim vremenom bezotkaznog rada T_{sr} , koju vrednost takođe dobijamo sa listinga nakon obrade podataka na računaru.

Veza između tekućeg vremena rada automatske linije obrade t_i i efektivnog vremena rezanja pojedinih alata T_i dobija se iz razmatranja vremena po jedinici proizvoda.

$$t_k = t_g + t_p + t_m$$

Troškovi alata i troškovi obrade u funkciji ukupne pouzdanosti alata

Troškovi alata u funkciji ukupne pouzdanosti

Kada su poznate zavisnosti ukupne pouzdanosti alata u funkciji vremena i troškovi alata u funkciji vremena, tj.

$$p = f(t) \quad i \quad A = \varphi(t)$$

onda se zavisnost

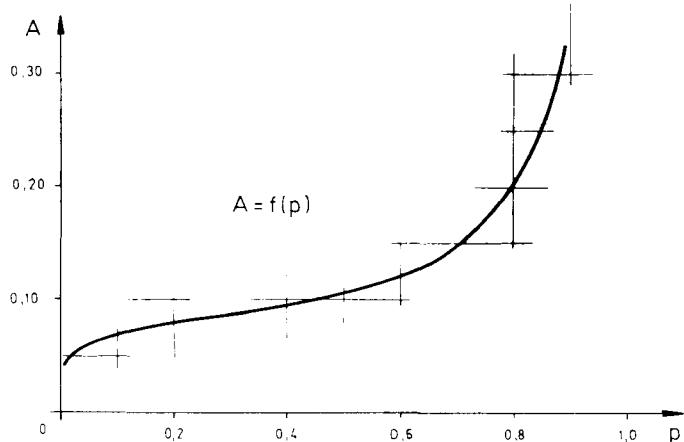
$$\lambda = F(p)$$

dobija eliminacijom vremena t iz gornje dve zavisnosti. Obzirom da su obe zavisnosti dobivene simulacijom i predstavljene tabelarno, to se tražena zavisnost najlakše može dobiti tako da se poslednje kolone iz tabela T-2 i T-4 postave jedna porед druge i dobije nova tabela T-7 (ovo je moguće obzirom da je prva kolona u kojoj je varirano vreme zamene u obe tabele identična).

TABELA T-7

A (t)	0,2745	0,1373	0,0915	0,0688	0,0549	0,0458	0,0393
p (t)	0,8681	0,6719	0,3577	0,1147	0,0180	0,0108	0,0000

Na osnovu tabele T-7 grafički je prikazana zavisnost $A = F(p)$ na dijagramu sl. 6.



Slika 6.

Ukupni troškovi obrade u funkciji ukupne pouzdanosti

Iz zavisnosti:

$$p = f(t) \quad i \quad U_0 = \Phi(t)$$

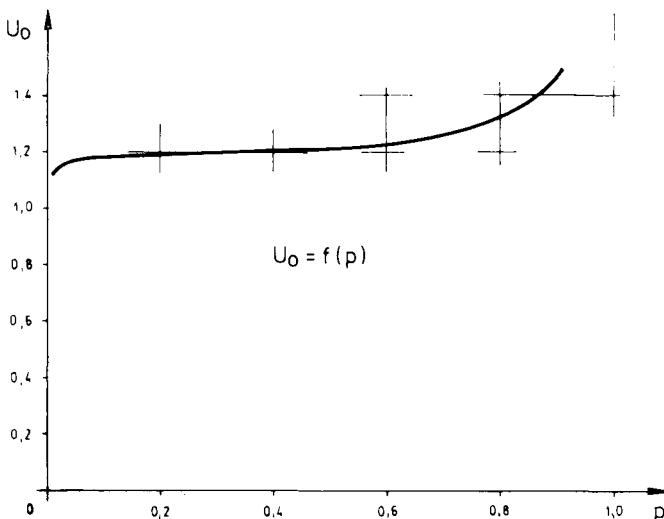
eliminacijom vremena t dobija se

$$U_0 = \Phi(p)$$

TABELA T-8

p (t)	0,8634	0,6719	0,3577	0,1147	0,0180	0,0108	0,0000
U_0 (t)	1,4005	1,2523	1,2036	1,1793	1,1643	1,1544	1,1474

Tabela T-3 nastala je iz poslednje kolone tabela T-2 i T-6, na osnovu koje je grafički predstavljena tražena zavisnost ukupnih troškova obrade u funkciji ukupne pouzdanosti alata (sl. 7).



Slika 7.

ANALIZA DOBIVENIH ZAVISNOSTI

Dijagrami predstavljeni na sl. 4. i sl. 5. ukazuju da ukupni troškovi alata i obrade monotono opadaju sa porastom vrednosti vremena jednovremene zamene alata, pri čemu se uočava neznatno smanjenje troškova sa njegovim daljim povećavanjem.

Ukupni troškovi alata i obrade monotono rastu pri većim vrednostima ukupne pouzdanosti alata (koja zavisi od usvojenog vremena zamene alata), ali na dijagramu $U_0 = \Phi(p)$ je uočljiv dovoljno širok dijapazon ukupne pouzdanosti alata u kojem se troškovi neznatno povećavaju sa povećanjem pouzdanosti, pa se usvajanjem tačke na krivoj, koja leži sa desne strane intervala može očitati ekonomična vrednost pouzdanosti (sl. 7), odn. ekonomično vreme jednovremene zamene alata na liniji obrade koje joj odgovara (sl. 3).

ZAKLJUČCI

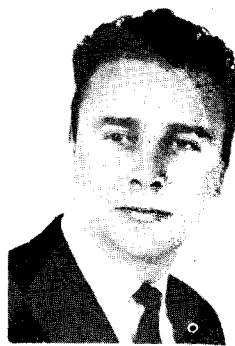
Na osnovu napred izloženog mogu se doneti sledeći zaključci:

- za određeni, usvojeni, režim obrade ukupni troškovi na liniji obrade zavise od vremena zamene alata,
- od veličine vrednosti vremena zamene pri jednovremenoj zameni svih alata zavisi ukupna pouzdanost rezogn alata i ovu vrednost treba odabrati tako da se postigne ekonomično vreme zamene, koje odgovara visokoj vrednosti ukupne pouzdanosti uz neznatno povećanje ukupnih troškova obrade.

LITERATURA

1. IVKOVIĆ, B., Struktura troškova proizvodnje u obradi metala, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1974.
2. IVKOVIĆ, B., Obrada metala rezanjem, III izdanje, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1975.
3. POPOVIĆ, B., Pouzdanost reznog alata, Tehnika — Mašinstvo, Beograd, 1974, 1.
4. POPOVIĆ, B., Određivanje pouzdanosti reznog alata, Naučni skup »EFTES 75«, Institut za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad, 1975.
5. SEKULIĆ, S., Određivanje pouzdanosti reznog alata u radioničkim uslovima, Naučni skup »EFTES 75«, Institut za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad, 1975.
6. SEKULIĆ, S., Rezni alat kao limitirajući faktor kod protočnih automatskih linija, Prvi naučno-stručni skup PPS 77, Institut za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad, 1977.
7. SEKULIĆ, S., Statistical formulation of a cutting tool reliability in a working conditions, Reports of the 21st EOQC Conference Varna 77, Stream C, Varna, 1977.
8. SEKULIĆ, S., Statističko određivanje pouzdanosti reznog alata u eksploatacijskim uslovima, Kvalitet i pouzdanost, Beograd, 1977., Vol. 20, 5.
9. SEKULIĆ, S., Ukupna pouzdanost reznog alata kao ograničavajući faktor za njegovu zamenu kod protočnih automatskih linija, Drugi naučni skup »EFTES 78«, Institut za proizvodno mašinstvo Fakulteta tehničkih nauka, Novi Sad, 1978.
10. TODOROVIĆ, J., ZELENOVIĆ, D., Efektivnost sistema u mašinstvu, Mašinski fakulteta u Beogradu, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu, Novi Sad, 1978.

Dr SAVA ST. SEKULIĆ, dipl. ing.
redovni profesor Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu



Mašinski fakultet u Beogradu završio je 1956. godine. Bio je zaposlen od 1956. do 1959. godine u »27. martu«, Industrija motornih delova, Novi Sad, od 1959. do 1962. godine u »Jugosalatu«, Industrija alata i pribora za mašine, Novi Sad. Od 1962. godine je na Fakultetu tehničkih nauka u zvanju asistenta, docenta, vanrednog i redovnog profesora. Objavio je 40 naučnih radova u zemlji i inostranstvu.

Z. PALUNČIĆ

Razvoj metode za praćenje triboloških procesa kod kotrljajnih ležajeva alatnih mašina

UVOD

Producenje veka trajanja i pouzdanosti rada mašina predstavlja jedan od osnovnih problema savremenog mašinstva. Ekonomski značaj ovoga problema je očigledan, ako se imaju u vidu troškovi vezani za potrebu remontovanja mašina. Pouzdanost i trajnost alatnih mašina u velikoj meri zavise od rada pojedinih sklopova i kontaktirajućih delcova, kao što su zupčasti parovi, klizni i kotrljajni ležajevi, vodeća i vučna vretena i dr. Veoma rasprostranjena primena kotrljajnih ležajeva u savremenim mašinama stavlja pitanja trajnosti i pouzdanosti elemenata kotrljajnih ležajeva na jedno od p.vih mesta u opštoj problematičnosti habanja, podmazivanja i habanja mašina. Osnovni pokazatelj radne sposobnosti alatnih mašina predstavlja tačnost obrade na njima. S druge strane tačnost obrade kod većine alatnih mašina uslovljena je tačnošću obrtanja glavnih vretena. Smanjenje tačnosti obrtanja glavnih vretena alatnih mašina u toku njihove eksploatacije vezano je za habanje ležajeva. Tribiloški procesi koji se javljaju na radnim površinama elemenata kotrljajnih ležajeva neuporedivo su manje proučeni u poređenju sa ovim procesima, koji se javljaju na zupčanicima, kliznim ležajevima ili vodicama. Do danas je neizvesno kakav oblik habanja je prevladajući u kotrljajnim ležajevima, kakva je brzina habanja, kako habanje utiče na tačnost obrde, kako konstruktivni, tehnološki i eksploatacionali faktori utiču na habanje i gubitak tačnosti obrtanja vratila.

Kotrljajni ležajevi rade u veoma složenim uslovima eksploatacije, kao što su promenljivi režimi opterećenja i brzina, različiti temperaturni uslovi, prisustvo mazive sredine, koja sa svoje strane ima takođe složen mehanizam dejstva na radne površine elemenata kotrljanja. Kakav uticaj imaju ovakvi uslovi rada kotrljajnih ležajeva na intenzitet razvoja procesa habanja njegovih elemenata predstavlja, sa aspekta trajnosti i pouzdanosti mašina, značajno pitanje.

Radicaktivna metoda praćenja habanja, zasnovana na površinskoj aktivaciji, omogućuje ispitivanja u eksploatacijskim uslovima, s obzirom na male nivoje radioaktivnosti, pri čemu se proces habanja može pratiti neprekidno u toku rada mašine, što predstavlja veliku prednost u odnosu na neke druge metode praćenja habanja.

Da bi se što više približilo eksploatacijskim uslovima rada ležajeva, razvijen je eksperimentalni uredaj, čiju osnovu sačinjava obradna jedinica za glavno kretanje pri struganju, proizvedena u Fabriči alatnih mašina i zupčanika »Potisje« iz Ade.

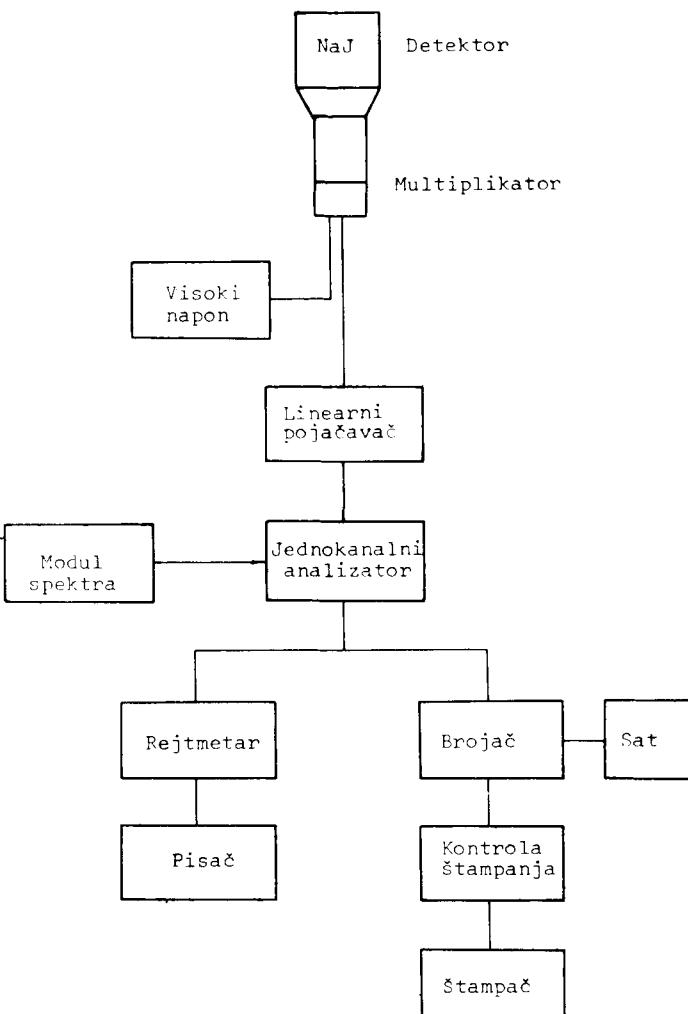
OSNOVI METODOLOGIJE ISPITIVANJA

Praćenje razvoja procesa habanja na kotrljajnim elementima ležajeva primenom metode površinske aktivacije moguće je utvrđivanje uticaja režima rada i vrste sredstava za podmazivanje na intenzitet razvoja habanja radnih površina elemenata ležajeva.

Merenje procesa habanja metodom površinske aktivacije, zasnovano je na registraciji γ — zračenja, koje potiče od prethodno ozračene površine. Ova površina se u toku

eksploatacije haba, čime se usled odlaska sa produktima habanja i dela radioaktivnih izotopa, smanjuje radioaktivnost površine i povećava radioaktivnost ulja za podmazivanje. Merenjem radioaktivnosti ulja u toku određenog perioda eksploatacije ležaja, moguće je ustanoviti karakter procesa habanja na radnim površinama ispitivanog ležaja.

Izvor γ -zračenja u ispitivanoj površini dobija se aktivacijom, putem bombardovanja površine ubrzanim nadeletrisanim česticama. Ove čestice su delovi jazgra atoma i to: protoni, deuteroni ili α -čestice (jezgra helijuma). Ubrzanje čestica izvodi se na ciklotronu putem magnetnog polja veoma velike učestanosti. Dobivši potrebnu energiju, čestice se izvode iz ciklotrona u vidu snopa, kojim se bombarduje



Sl. 1. Blok shema instrumentacije za merenje γ -zračenja

željeno mesto na ispitivanoj površini. Prodirući u metal ubrzani protoni, deuteroni ili α -čestice sadejstvuju sa jezgrima atoma metala čineći ih nestabilnim. Ovakva nestabilna jezgra počinju da se raspadaju po zakonima, koji odgovaraju prirodi samog jezgra, pri čemu dolazi do emitovanja γ -kvanta.

Merenje γ -zračenja vrši se pomoću scintilacionog detektora i odgovarajuće elektronske instrumentacije za registrovanje. Blok-sHEMA instrumentacije za merenje γ -zračenja predstavljena je na sl. 1.

Pri ozračivanju elemenata kotrlajnih ležajeva pošlo se od pretpostavke da će se najintenzivnije odvijati tribološki procesi na valjcima ležaja [5]. Stoga je izvršeno ozračivanje omotača valjaka bombardovanjem protonima, ubrzanim na ciklotronu. U ovu svrhu korišćen je ciklotron Univerziteta u Birminghamu, Velika Britanija. Uslovi ozračivanja bili su sledeći:

<input type="checkbox"/> energija snopa	10 MeV
<input type="checkbox"/> vrsta čestica	protoni
<input type="checkbox"/> struja ozračivanja	5 μ A
<input type="checkbox"/> vreme ozračivanja	10 min
<input type="checkbox"/> ugao snopa	90°

Da bi se valjčići ozračili po celom omotaču, konstruišan je i izrađen uređaj prikazan na sl. 2.

Snop protona prolazi kroz uzani procep i pada na izvodnice valjka. Zahvaljujući obrtnom kretanju oko sopstvene ose, koje se dobija od elektromotora, celokupna površina omotača biva izložena snopu teških čestica.

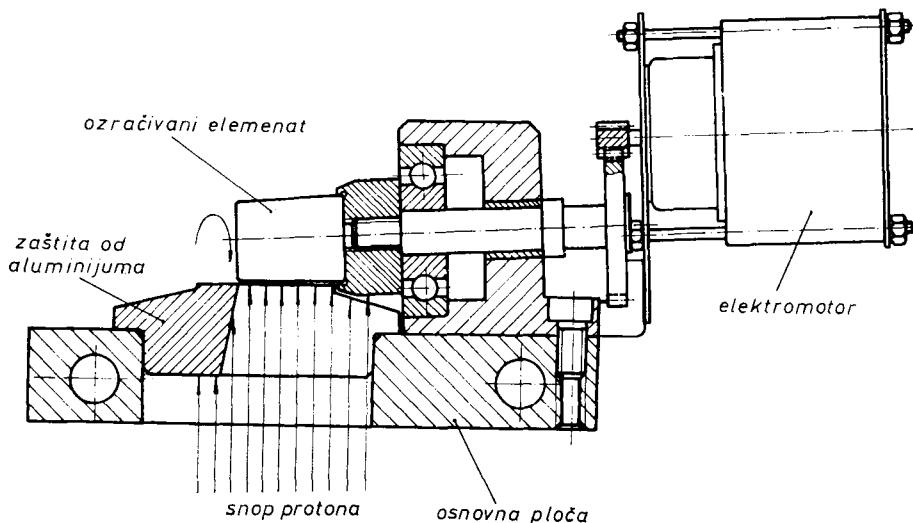
U osnovnoj ploči uređaja izbušeni su otvori, kroz koje cirkuliše voda s ciljem da se obezbedi hlađenje snopa.

Položaj ozračenog sloja na aktiviranom elementu ležaja prikazan je na sl. 3.

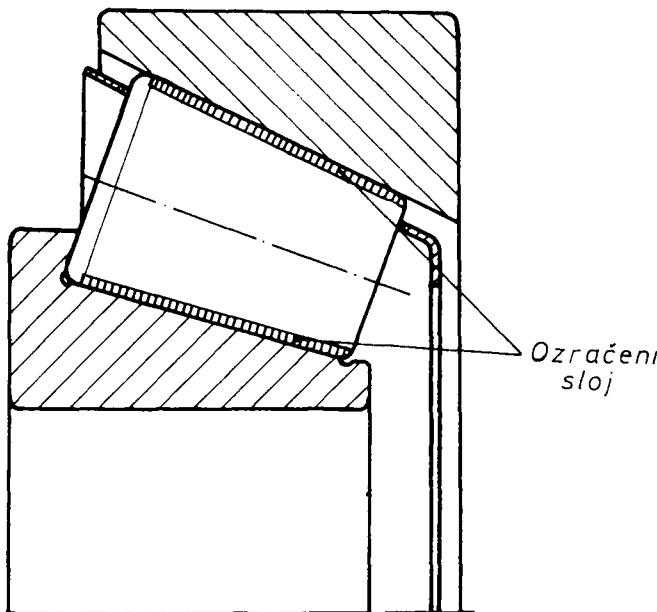
Pri bombardovanju površine valjka snopom ubrzanih čestica u ozračenom sloju se javlja smesa izotopa, koji se međusobno razlikuju po energijama γ -zračenja i periodom poluraspada. Da bi se utvrdio sastav ove smese snimljen je energijski spektrar γ -zračenja. Na sl. 4. dati su rezultati snimanja spektra γ -zračenja ozračenih valjaka šest meseci nakon ozračivanja.

Spektrar je sniman u energijskom intervalu od 0—2 MeV. Prethodno je izvršeno baždarenje instrumentacije pomoću standardnog radioaktivnog izvora Co^{60} i dobijena baždarna linija.

Kao što se vidi iz snimljenog spektra obrazovano je nekoliko osnovnih pikova. Pik sa energijom od 0,511 MeV



Sl. 2. Pomoći uređaj za ozračivanje valjaka po omotaču



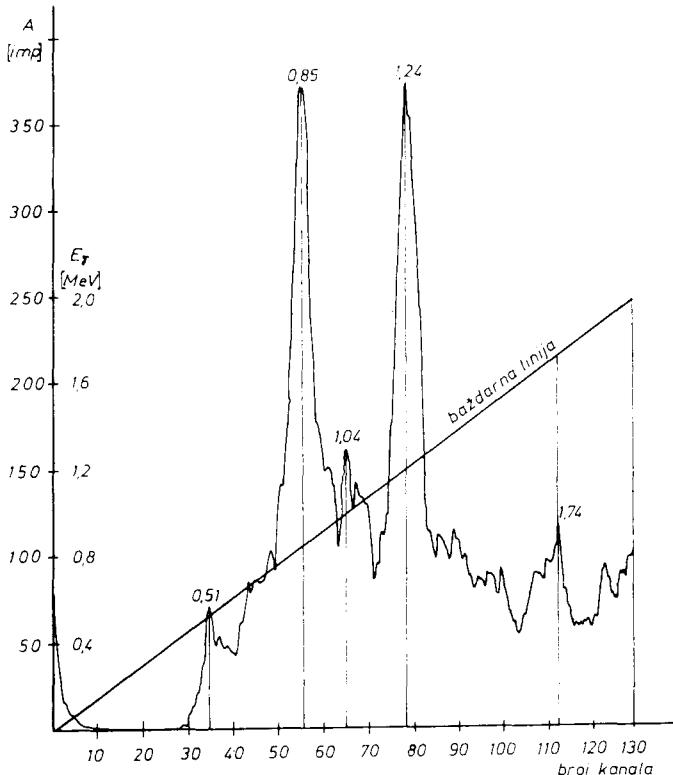
Sl. 3. Položaj ozračenog sloja na aktiviranom elementu ležaja

može odgovarati β^+ — raspodu Co^{56} . Intenzivno γ -zračenje sa energijom od 0,840 MeV imaju Co^{56} i Mn^{54} , a Co^{58} sa energijom od 0,8 MeV, što predstavlja neznatnu razliku. Pik sa energijom 1,24 MeV odgovara Co^{56} , koji ima pri ovoj energiji dosta intenzivno zračenje (66%). Pikovi sa energijama 1,04 MeV i 1,74 MeV takođe odgovaraju izotopu Co^{56} .

Iz izloženog se može sa velikom pouzdanošću tvrditi da je daleko najuticajniji izotop u ozračenom sloju Co^{56} , čiji je period poluživota $T=77,3$ dana, a radioaktivna konstanta $\lambda = 3,736 \times 10^{-4}$.

UREDAJ ZA PRAĆENJE PROCESA HABANJA ELEMENATA KOTRLAJNIH LEŽAJEVA

U cilju što većeg približavanja eksploatacijskim uslovima rada ležajeva, kao osnova uređaja korišćena je standardna obradna jedinica za glavno kretanje pri struganju, proizvedena u Fabriči alatnih mašina i zupčanika »Potisje« iz Ade. Obradna jedinica snabdevena je pomoćnim uređajem za opterećivanje i posebnom hidrauličnom instalacijom za autonomno podmazivanje ozračenog ležaja.



Sl. 4. Spektar γ -zračenja

Na sl. 5. dat je presek obradne jedinice sa delom uređaja za opterećivanje.

Na glavnem vretenu nalaze se tri ležaja. Ispitivan je ležaj koji se nalazi na prednjem kraju obradne jedinice. Pošto primenjena radioaktivna metoda zahteva nezavisno podmazivanje ozračenog ležaja, zaptivačem je pregrađen prostor između ispitivanog ležaja i ostalog dela obradne jedinice. Na taj način ozračeni ležaj je izolovan od ulja, kojim se, metodom kupanja, podmazuju ostala dva ležaja. Dinamometar prikazan na slici služi za merenje uzdužnog opterećenja.

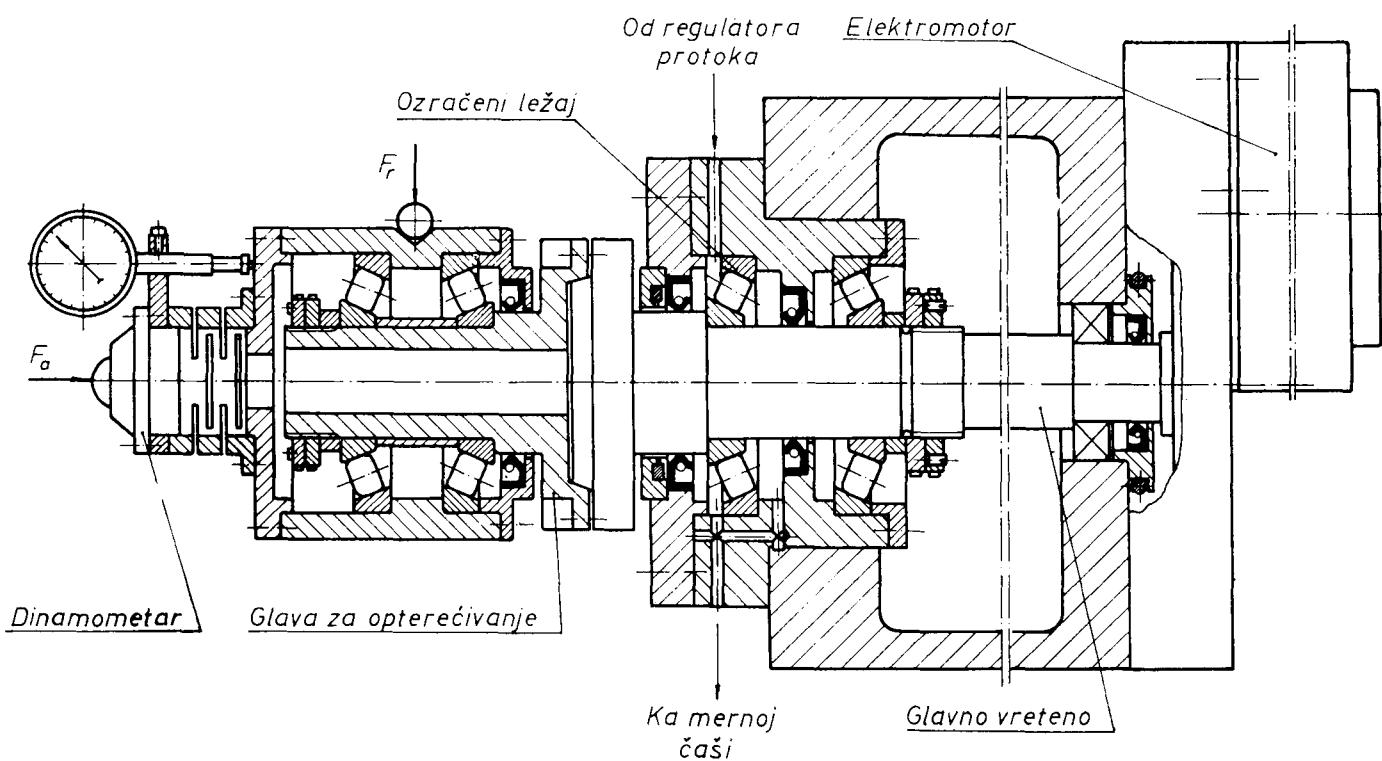
Na sl. 6. predstavljena je shematski hidraulična instalacija za podmazivanje ozračenog ležaja.

Cirkulacija ulja ostvaruje se zupčastom pumpom (1), čiji je kapacitet 3 litra u minuti. Puma je zaštićena od eventualnih udara u instalaciji nepovratnim ventilom (2).

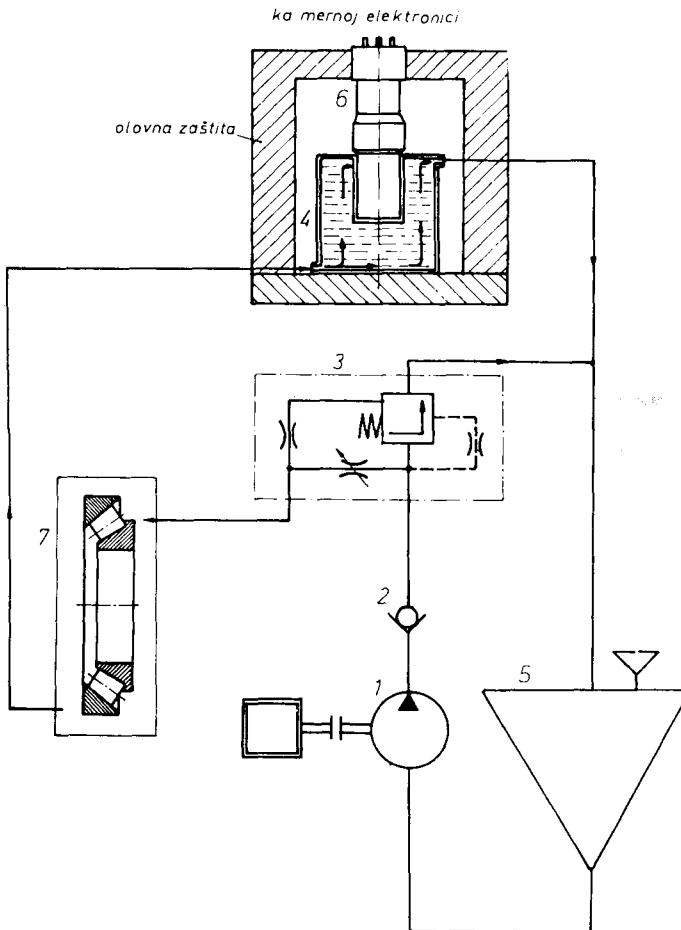
Količina ulja koja protiče kroz ozračeni ležaj (7) podešava se pomoću regulatora protoka (3). Iz ležaja ulje za podmazivanje odlazi ka mernoj čaši (4), koja se nalazi u olovnoj zaštiti, zajedno sa detektorom zračenja (6). Olovna zaštita je neophodna, kako bi se uticaj okoline na rezultate merenja smanjio na najmanju meru.

Iz merne čaše i prelivnog voda regulatora protoka ulje odlazi u rezervoar (5). Rezervoar ima suženo dno, kako bi se izbeglo taloženje produkata habanja u njemu.

Na sl. 7. i sl. 8. predstavljen je izgled istraživačkog punkta.



Sl. 5. Obradna jedinica sa uređajem za opterećivanje



Sl. 6. Shema hidraulične instalacije za podmazivanje ozračenog ležaja

USLOVI I REZULTATI MERENJA INTENZITETA HABANJA KOTRLJAJNIH ELEMENATA KONIČNOVALJČASTIH LEŽAJEVA

Čestice habanja sa ozračenih radnih površina kotrljačnih elemenata ispitivanog ležaja dospevaju u cirkulišuću masu ulja za podmazivanje, koje se kreće kroz instalaciju opisanu ranije.

Prema [8] količina produkata habanja u ulju može se izraziti jednačinom:

$$G = K \cdot \frac{1}{A_s} \cdot \frac{V_u}{V_b} A e^{\lambda t}$$

gde je: K — konstanta merne glave, zavisno od vrste izotopa i geometrije merenja

V_u — ukupna zapremina ulja za podmazivanje u instalaciji

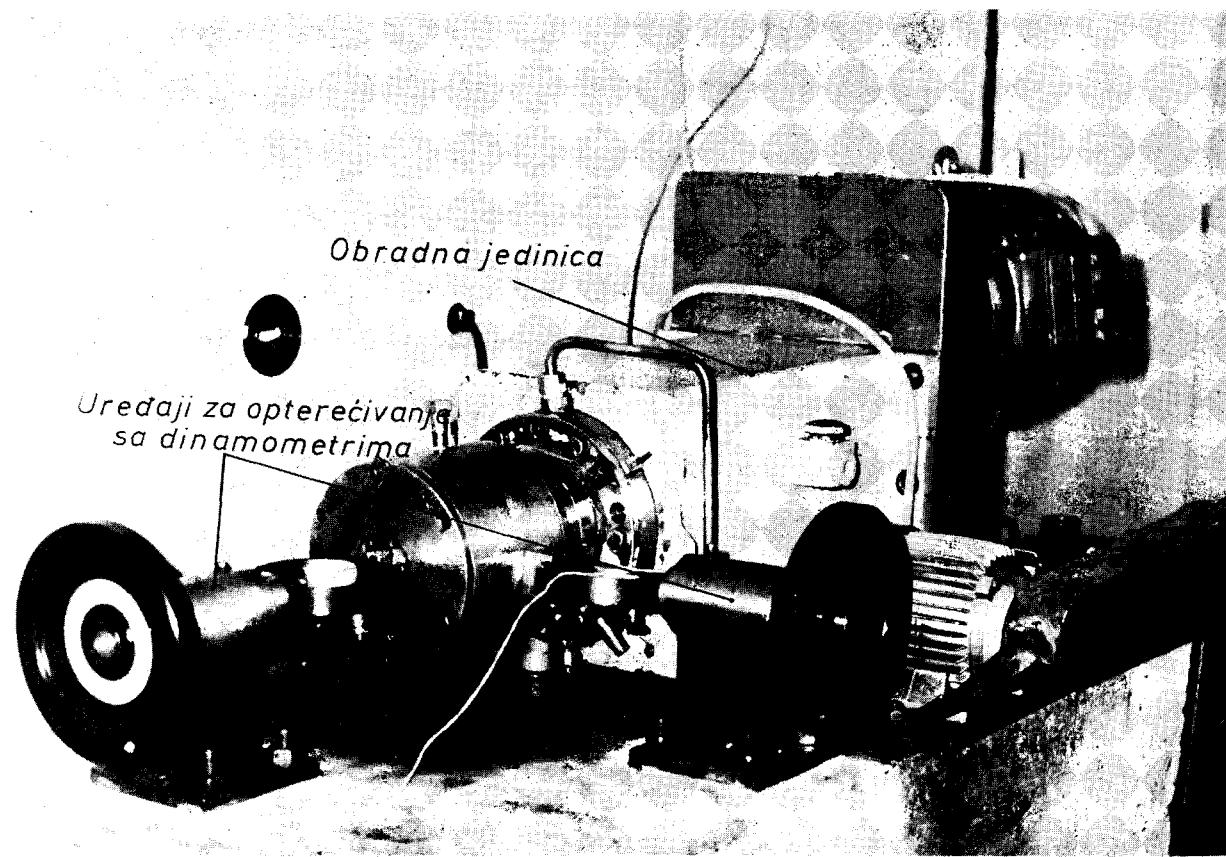
A_s — specifična radioaktivnost ozračenog sloja

V_b — zapremina ulja korišćena pri baždarenju

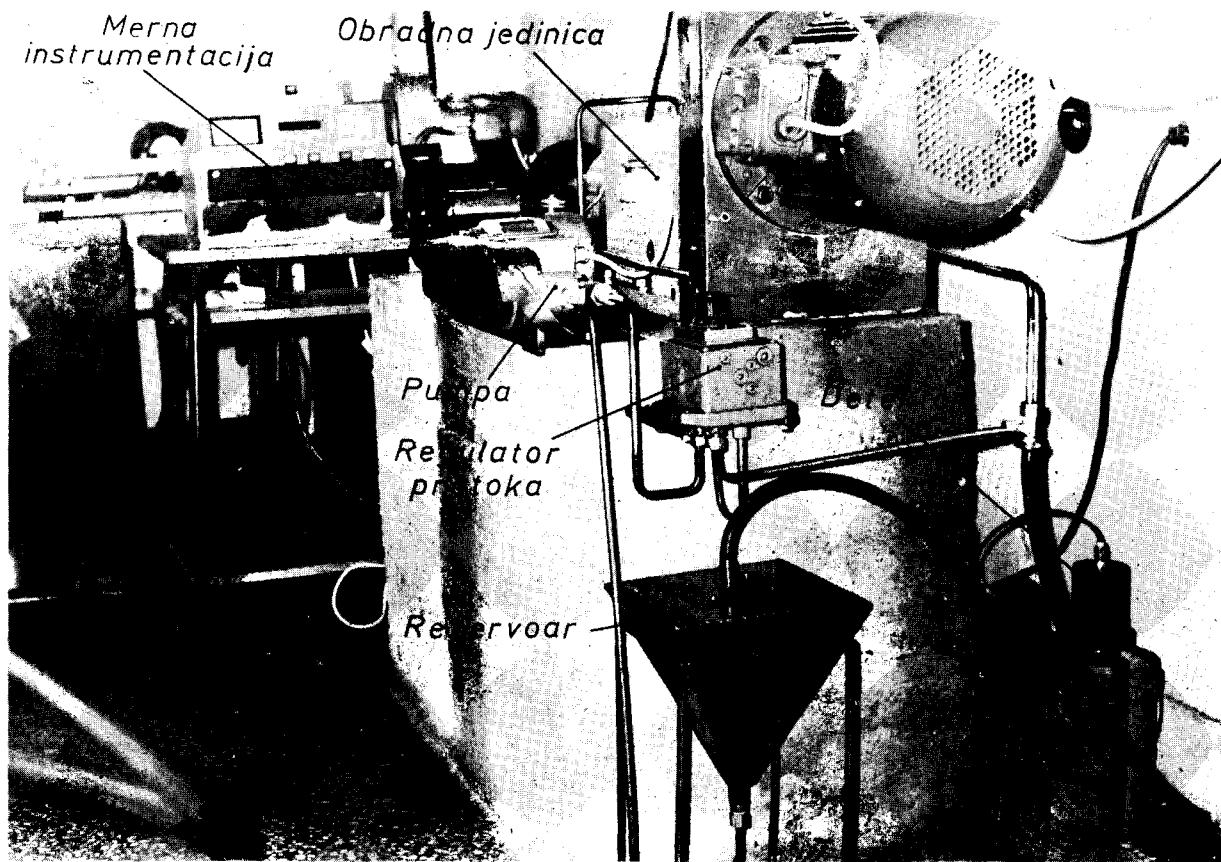
A — radioaktivnost izmerena u toku izvođenja eksperimenta

$e^{\lambda t}$ — popravka, koja uzima u obzir prirodni pad radioaktivnosti u toku izvođenja eksperimenta.

Pod pretpostavkom da je specifična aktivnost ozračenog sloja konstantna najmanje do dubine očekivanog habanja, registrovani nivo radioaktivnosti ulja za podmazivanje direktno zavisi od koncentracije produkata habanja u njemu. Iz ovog razloga nije neophodno znati veličinu habanja količinski izraženu preko težine produkata habanja u ulju, već se ispitivanje uticaja režima rada ležaja i vrste ulja na intenzitet razvoja habanja može vršiti uporednim putem. U cilju utvrđivanja uticaja režima rada ispitivanog ležaja na intenzitet habanja kotrljajnih elemenata ležaja, napravljen je program ispitivanja dat u tabeli 1.



Slika 7.



Slika 8.

TABELA 1.

		465,	955
Broj obrtaja glavnog vretena o/min			
Opterećenje glavnog vretena [N]	U poprečnom pravcu	1000,	4000,
	U uzdužnom pravcu	500,	2000,
Ulje za podmazivanje	A		
Količina ulja kroz ležaj [1/min.]	0,5		

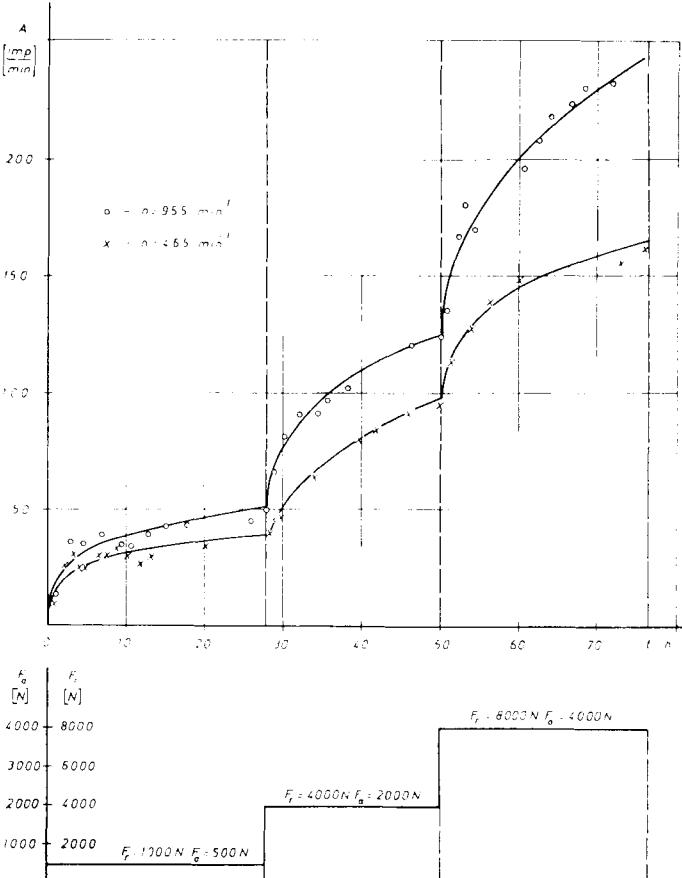
Za podmazivanje je korišćeno hidraulično ulje A, čije su karakteristike predstavljene u tabeli 2.

Da bi se utvrdio uticaj vrste ulja za podmazivanje na intenzitet razvoja habanja, korišćena su u eksperimentima još dva cirkulaciona ulja B i C (tab. 2).

TABELA 2.

Fizičko-hemijske karakteristike primenjenih ulja

Karakteristika	Jedinica	Sredstvo za podmazivanje		
		A	B	C
1. Spoljni izgled	—	bistro prozirno ulje		
2. Viskoznost na 323 K	E	4,46	3,94—4,2	6,1—6,4
3. Indeks viskoziteta	—	110	90	90
4. Tačka paljenja	K	503	> 448	> 473
5. Tačka stinjanjanja	K	253	> 253	> 263
6. Neutralizacični broj mgKOH/g	1,5	< 0,05	< 0,05	
7. Stabilnost pene	—	ne peni		
8. Voda i meh. nečistoće	—	ne sadrži		
9. Oksidac. stabilnost mgKOH/g	—	< 0,35	< 0,35	



Sli. 9. Promena nivoa radioaktivnosti ulja za podmazivanje u zavisnosti od režima rada ležaja

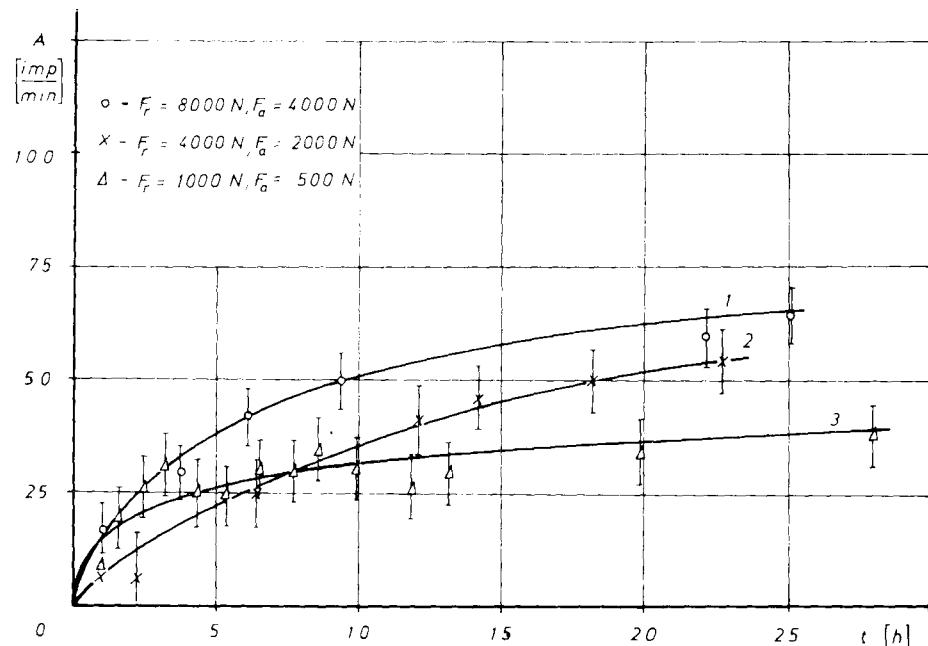
Izabrana ulja poizvedena su od selektivno rafiniranih ulja, visoke oksidacione stabilnosti i visokog indeksa viskoznosti. Svojstva baznog ulja poboljšana su EP aditivima, protiv korozije, penušanja i emulgovanja.

Ispitivani radijaksijalni ležaj tipa FAG 30216 sastavni je deo obradne jedinice za glavno kretanje pri struganju i nalazi se na prednjem kraju glavnog vretena obradne jedinice. U toku rada u eksploatacijskim uslovima ovaj ležaj je, pod dejstvom otpora rezanja, izložen opterećenju u uzdužnom i poprečnom pravcu. Iz ovog razloga je ispitivani ležaj u toku izvođenja eksperimenata bio opterećivan jednovremeno u uzdužnom i poprečnom pravcu.

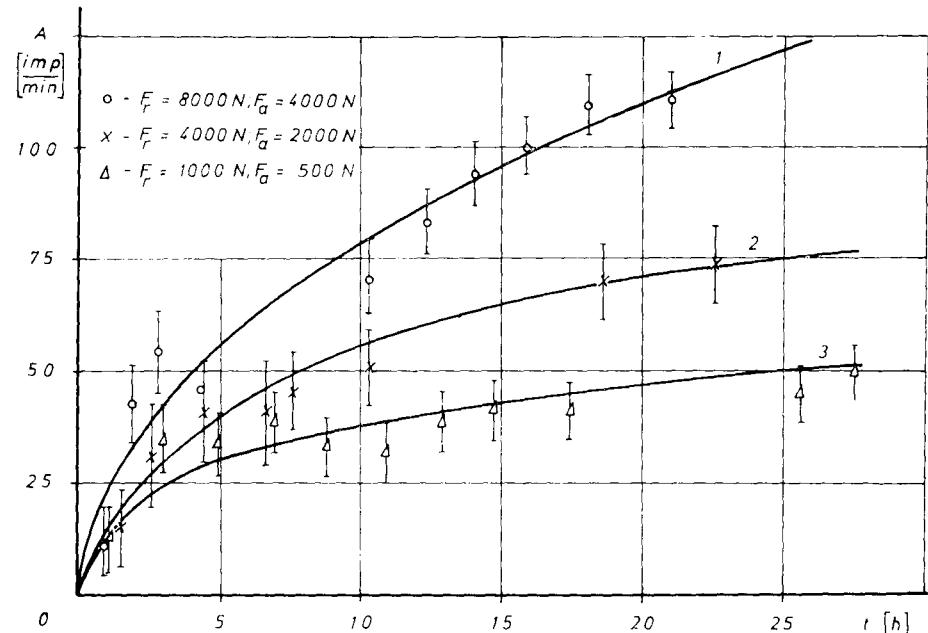
Na prvom režimu opterećenja ležaj je radio oko 28 časova neprekidno, pri aksijalnoj sili $F_a = 500 \text{ N}$ i radikalnoj sili $F_r = 1000 \text{ N}$. U sledećem režimu opterećenja (pri $F_a = 2000 \text{ N}$ i $F_r = 4000 \text{ N}$) ležaj je radio daljih 22 časa. U trećem režimu ležaj je bio izložen maksimalnom opterećenju, koje je iznosilo $F_a = 4000 \text{ N}$ i $F_r = 8000 \text{ N}$.

Za vreme rada obradne jedinice neprekidno je vršeno merenje nivoa radioaktivnosti ulja za podmazivanje.

Režim rada ležaja menjanj je i premenom brzine obrtanja glavnog vretena obradne jedinice. Ispitivanje je izvršeno sa dve brzine obrtanja i to pri $n = 465 \text{ o/min}$ i $n = 955 \text{ o/min}$. Zavisnost nivoa radioaktivnosti ulja za podmazivanje od režima rada ispitivanog ležaja data je na sl. 9.



Sl. 10. Promena nivoa radioaktivnosti ulja u zavisnosti od opterećenja pri broju obrtaja $n = 465 \text{ o/min}$. 1— $A = 17,3 \text{ } t^{0,526}$; 2— $A = 5,8 \text{ } t^{0,75}$; 3— $A = 18,4 \text{ } t^{0,33}$



Sl. 11. Promena nivoa radioaktivnosti ulja u zavisnosti od opterećenja pri broju obrtaja $n = 955 \text{ o/min}$. 1— $A = 19,9 \text{ } t^{0,276}$; 2— $A = 16,5 \text{ } t^{0,49}$; 3— $A = 25,9 \text{ } t^{0,49}$

Na sl. 10. i sl. 11. ovi rezultati su prikazani tako da se uočava uticaj opterećenja na intenzitet razvoja habanja pri jednoj brzini obrtanja.

Karakter dobijenih zavisnosti ukazuje da pri svakoj promeni režima rada ležaja intenzitet habanja naglo raste, da bi se postepeno smanjivao u toku sledećih dvadesetak časova, koliko je ispitivanje u jednom režimu trajalo. Pri najoštijim režimima rada primiče se da se procesi habanja na radnim površinama ležaja veoma intenzivno razvijaju.

Sredstva za hlađenje i podmazivanje, kao što je poznato, imaju ulogu da svojim prisustvom i delovanjem usporavaju razvoj triboloških procesa na radnim površinama delova mašina. S obzirom na svoj kvalitet i eksploatacijske uslove u kojima se primenjuju, sredstva za hlađenje i podmazivanje u različitoj meri utiču na smanjenje razvoja triboloških procesa na radnim površinama.

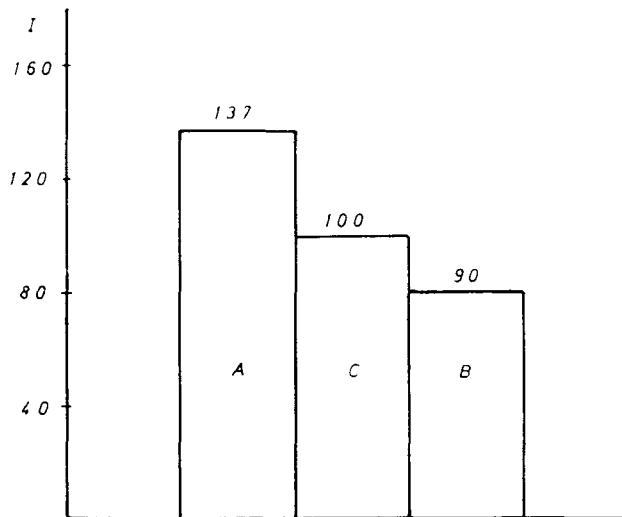
Da bi se utvrdio uticaj različitih vrsta ulja za podmazivanje kotrljajnih ležajeva, na habanje kotrljajnih elemenata, programom je predviđeno i ispitivanje tri vrste ulja za podmazivanje, čije su osobine date u tabeli 2. Testiranje ulja za podmazivanje izvršeno je pri opterećenju $F_a = 4000 \text{ N}$ i $F_r = 8000 \text{ N}$, dakle pri maksimalnom opterećenju i broju obrtaja glavnog vretena $n = 955 \text{ o/min}$.

Na sl. 12. Predstavljeni su rezultati ispitivanja, iz kojih se vidi da ulje A poseduje najbolje tribološke osobine, s obzirom na habanje radnih površina kotrljajnih elemenata ispitivanog ležaja. Registrovana radioaktivnost je u slučaju primene ulja A, kao podmazujućeg sredstva, bila najmanja u toku testiranja, koje je trajalo 12 časova za svako ulje.

Ulje B, prema ovom ispitivanju pokazalo je najslabije tribološke osobine.

Sl. 12. Promena nivoa radioaktivnosti ulja primenom različitih vrsta ulja za podmazivanje

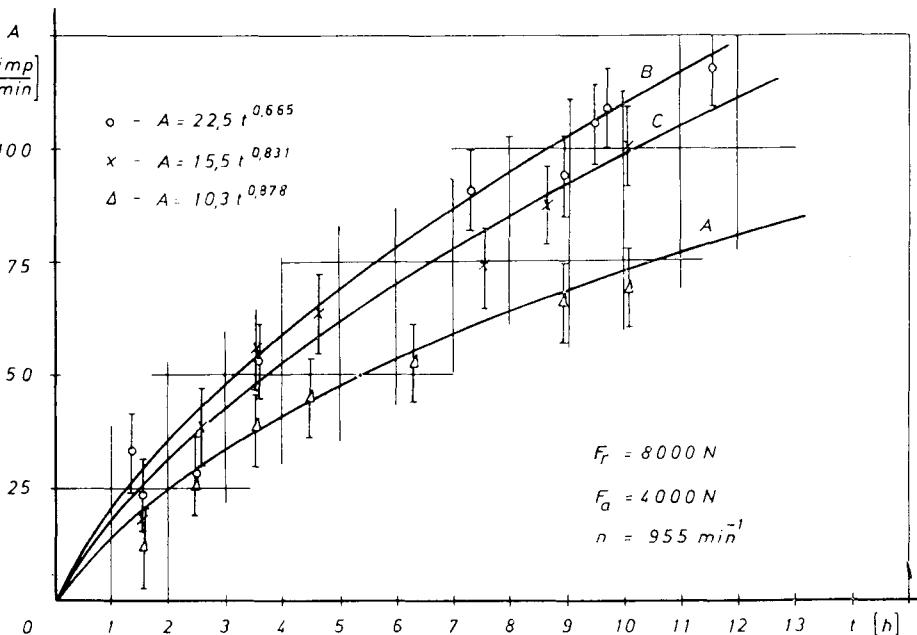
Na osnovu rezultata merenja nivoa radioaktivnosti ulja za podmazivanje izračunati su indeksi njihovog kvaliteta sa tribološkog aspekta. Za proračun indeksa kvaliteta korisćeni su nivoi radioaktivnosti ulja za podmazivanje dobijeni posle 12 časova rada uredaja sa jednim uljem. Ovi indeksi predstavljeni su histogramski na sl. 13.



Sl. 13. Indeksi kvaliteta ispitivanih ulja za podmazivanje

ZAKLJUČAK

Preim秉tva kotrljajnih ležajeva, koja se sastoje u malom otporu kretanja, relativno jednostavnom načinu podmazivanja, velikoj moći nošenja, mogućnosti izdržavanja opterećenja promenljivih po smeru i karakteru, učinila su ih nezamenljivim sastavnim delovima sklopova savremenih alatnih mašina. Tačnost rada, trajnost, pouzdanost rada ležajeva u velikoj meri određuju i radnu sposobnost alatnih mašina u koje se ugrađuju. Procesi habanja kotrljajnih elemenata ležaja, koji se odvijaju u toku eksploatacije mašina, povećavaju zazore u ležaju, narušavaju pravilan oblik radnih površina — što dovodi do gubitka tačnosti obrtanja ležaja, gubitka krutosti sklopa, povećanja otpora obrtanju ili čak zaklinjavanja, povećanja radne temperature, šumnosti ležajeva itd. Habanje kotrljajnih ležajeva zavisi od mnogih faktora, kao što su: opterećenje, brzina obrtanja, uslovi podmazivanja, stepen zagadenja mazivog sredstva itd.



U radu su prikazani rezultati eksperimentalnih ispitivanja, čiji je cilj bio utvrđivanje uticaja režima opterećenja i brzine obrtanja, kao i vrste ulja za podmazivanje, na intenzitet razvoja procesa habanja na radnim površinama koničnih valjaka koničnovaljčastih ležajeva.

Iz dobijenih zavisnosti vidi se da pri svakoj promeni režima rada intenzitet habanja naglo raste da bi se u toku daljeg rada ležaja postepeno smanjivao. Oštrijim režimima rada ležajeva odgovara i intenzivniji razvoj procesa habanja.

Praćenje habanja izvršeno je metodom radioaktivnih indikatora, zasnovanoj na površinskom ozračivanju ispitivanih delova snopom ubrzanih čestica. Registrovani nivo radioaktivnosti ulja za podmazivanje direktno zavisi od koncentracije produkata habanja u njemu. Pod pretpostavkom da je specifična radioaktivnost ozračenog sloja konstantna najmanje do dubine očekivanog habanja, nije neophodno znati veličinu habanja količinski izraženu preko težine produkata habanja. Ispitivanje uticaja režima rada ležaja i vrste ulja za podmazivanje na karakter procesa habanja izvršeno je uporednim putem.

Ulje za podmazivanje ima zadatak da svojim prisustvom uspori razvoj triboloških procesa na radnim površinama. Iz dobijenih rezultata zaključuje se da su primenjena maziva različitog kvaliteta sa tribološkog aspekta, s obzirom da se njihovom primenom registruju različite koncentracije produkata habanja za jednake vremenske periode rada mašine i jednake ostale eksploatacione uslove.

Primenjena metoda praćenja intenziteta habanja na radnim površinama kotrljajnih elemenata, pokazala se veoma osetljivom, uzimajući u obzir da je već posle nekoliko časova rada ležaja moguće registrovati prisustvo čestica habanja u ulju za podmazivanje.

Druga bitna karakteristika metode je što ona omogućava neprekidno praćenje procesa habanja u toku rada uredaja, pošto nije potrebno zaustavljanje uređaja pri merenju. Usložnjavanja, koja se odnose na rukovanje ozračenim materijalom, svedena su na najmanju meru, jer je ukupna radioaktivnost aktiviranog ležaja u okvirima propisa za rad bez posebnih mera zaštite, zahvaljujući postupku ozračivanja snopom teških čestica.

LITERATURA

1. СПИЦИН Н. А., СПРИШЕВСКИЙ А. И., Подшипники качения, М., МАШГИЗ, 1961.
2. ПИНЕГИН С. В., Работоспособность деталей машин, М., МАШГИЗ, 1949.
3. РЕШЕТОВ Д. Н., Детали и механизмы металлорежущих станков, М. Машиностроение, 1972.
4. ПОСТНИКОВ В. И., Исследование и контроль износа машин методом поверхностной активации, М., 1973.
5. HERKERT B., Bestimmung des Verschleisses und Kinetik schnellaufender Wälzlager mit Hilfe radioaktiver Isotope, Karlsruhe, 1972.
6. JEREMIĆ B., PALUNČIĆ Z., Tribološka istraživanja na vodicama i kotrljajnim ležajevima alatnih mašina. Obrada metala i tribologija 3, (8), 75, (1977).
7. IVKOVIĆ B., LAZIĆ M., Eksperimentalna istraživanja triboloških pojava na zupčastim prenosnicima radioaktivnom metodom, Maštine i mehanizmi, Zagreb, 1975.
8. KAISER W., Der Einfluss verschiedener Kolbenring- und Nutformen sowie der Nutwerkstoffe auf den Ring- und Nut-Verschleiss in einem 6-Zylinder-Dieselmotor, Karlsruhe, 1972.

Mr ZDRAVKO PALUNČIĆ, dipl. ing.
asistent Mašinskog fakulteta u Kragujevcu



Roden 1949. godine. Diplomirao 1973. godine na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu. Do 1975. godine radio u Zavodima »Crvena zastava«. Magistrirao 1978. godine na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu. Bavi se tribološkim istraživanjima u oblasti alata i alatnih mašina.

V. IVUŠIĆ

Ferografija — metoda za proučavanje procesa trošenja zatvorenih sustava

UVOD

Cesti problem u tribologiji predstavlja praćenje procesa trošenja zatvorenih sustava tj. kada površine izložene trošenju nisu pristupačne za direktni pregled. U takvoj situaciji jedino je moguća detekcija i analiza jedne ili više izlaznih veličina sustava (trenje, buka, vibracije, temperatura, čestice trošenja itd.).

Općenita karakteristika metoda posrednog praćenja procesa trošenja je nedovoljna pouzdanost, ili nedovoljna osjetljivost, tj. reagiranje tek nakon što je znatnije oštećenje unutar sustava već nastalo. Međutim, 1972. godine prvi puta je opisana tehnika ferografije [1], koja se u ovako kratkom vremenu pokazala vrlo uspješnom, zahvaljujući tome što omogućuje ne samo rano upozorenje da je u procesu trošenja došlo do nepoželjne promjene, nego također omogućuje svestrano proučavanje procesa trošenja.

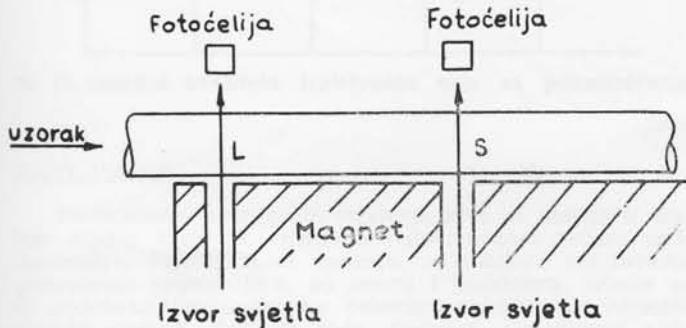
DEFINICIJA

Ferografija je postupak za izdvajanje čestica materijala koji se troši iz medija kojim su nošene. Izdvajanje se vrši na način pogodan za daljnju analizu.

Ulje za podmazivanje je najčešće medij nosač čestica, ali također i ispušni plinovi Diesel motora, mlaz mlažnog motora, rashladni medij kod obrade rezanjem, sinovijalna tekućina koja podmazuje ljudske zglobove itd.

Postoje dva osnovna postupka u ferografiji: određivanje indeksa intenziteta trošenja I_s i analitička ferografija.

INDEKS INTENZITETA TROŠENJA (INSTRUMENT S DIREKTNIM OCITANJEM)



Slika 1. — Princip rada instrumenta s direktnim očitanjem. iz [2]

Princip rada instrumenta prikazan je na slici 1. Uzorak ulja teče iznad jakog magneta, što dovodi do taloženja čestica na staklenu podlogu. Veće čestice se talože prije tj. oko mjesta L, a manje čestice kasnije, oko mjesta S. To je zbog toga, jer je sila na česticu u magnetskom polju proporcionalna njenom volumenu, a otpor gibanja kroz

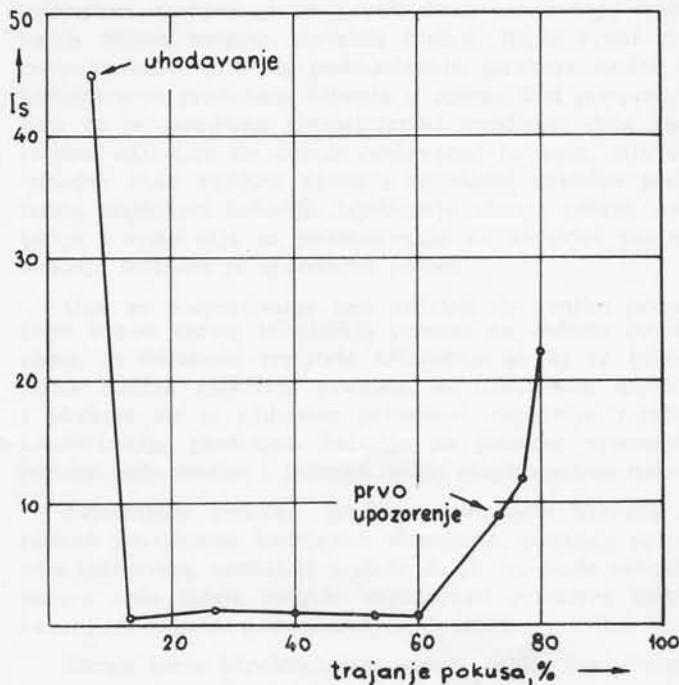
medij proporcionalan je površini presjeka čestice poprečno na smjer gibanja [3]. Nakon što je taloženje završeno, mjerjenjem intenziteta prolazne svjetlosti određuje se postotak površine pokriven velikim česticama A_L i malim česticama A_S (na mjestu L odnosno S). Pokazalo se da, za izvjesne procese trošenja, pouzdan pokazatelj karaktera trošenja predstavlja takozvani indeks intenziteta trošenja [4].

$$I_s = (A_L + A_S)(A_L - A_S) = A_L^2 - A_S^2$$

A_L — postotak površine pokrivene većim česticama,
 A_S — postotak površine pokrivene manjim česticama i
 I_s — indeks intenziteta trošenja.

Tumačenje indeksa I_s nije uvijek jednoznačno, ali se u većini slučajeva pokazalo da nagli porast I_s ukazuje na »nenormalnost« procesa i tako daje upozorenje prije nego je nastalo znatno oštećenje unutar sustava.

Primjer 1: Test zupčaničkog prijenosnika

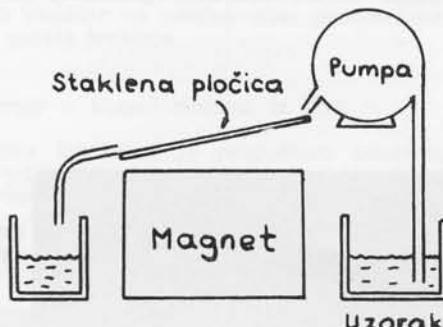


Slika 2. — Indeks intenziteta trošenja u raznim fazama pokusa, prema [4]

Mehanizmi trošenja mogu biti različiti, također i apsolutne količine čestica, ali nagli porast I_s nakon što je sustav već prošao kroz period uhodavanja ukazuje redovito na predstojeći kvar.

Ovakva osjetljivost u pogledu davanja ranog upozorenja pruža mogućnost prelaska s periodičkog rasklapanja u svrhu pregleda na održavanje intervencijama kada je to zaista potrebno. Koliko znači, ako se u toku tehničkog života sustava uštedi makar jedno rasklapanje ilustrira podatak da jedno takvo rasklapanje modernog mlaznog motora košta otprilike jednu osminu njegove cijene [3]. Također, jednostavnost metode omogućuje lako automatiziranje postupka, te se na principu direktnog očitanja temelji automatizirani ferograf, koji ima kompjuterom upravljeni ciklus uzorkovanja i proračuna indeksa I_S . Taj instrument je u fazi razvoja, a prototip je uspješno primjenjen na mlaznom motoru [5]. Ovo je naročito interesantno za avionske motore, gdje se ekonomskim razlozima pridružuje zahtjev sigurnosti, a pouzdana metoda otkrivanja potencijalnih kvarova smanjuje mogućnost iznenadne havarije.

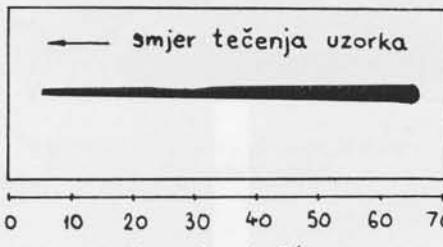
ANALITIČKA FEROGRAFIJA



Slika 3. — Shema dobivanja ferograma, iz [1]

Analitička ferografija temelji se na analizi ferograma koji se dobiva puštanjem uzorka medija na staklenu pločicu ispod koje je jaki magnet, slika 3. Čestice se talože selektivno po veličini kako je to već prije opisano kod instrumenta s direktnim očitanjem. Treba napomenuti, da je ovaj efekt izraženiji što je materijal magnetičniji. Tako će se i velike, a slabo magnetične čestice, izlučivati cijelom dužinom ferograma (olovo u primjeru 7, sl. 14, u dalnjem tekstu). Čestice neželjenzih metalova, ili nemetala, postaju ograničeno magnetične transferom željeznih materijala ukoliko rade u međusobnom kontaktu. Čak i potpuno nemagnetične čestice, npr. iz prirodnog zgloba, mogu se pogodnim postupkom izlučiti iz medija nosača [5].

Nakon što je izlučivanje čestica završeno, ostatak medija se ispiri otapalom, a čestice učvrste na staklu pogodnim sredstvom za fiksiranje. Tako dobivena pločica s česticama izlučenim prema veličini naziva se ferogram, slika 4.



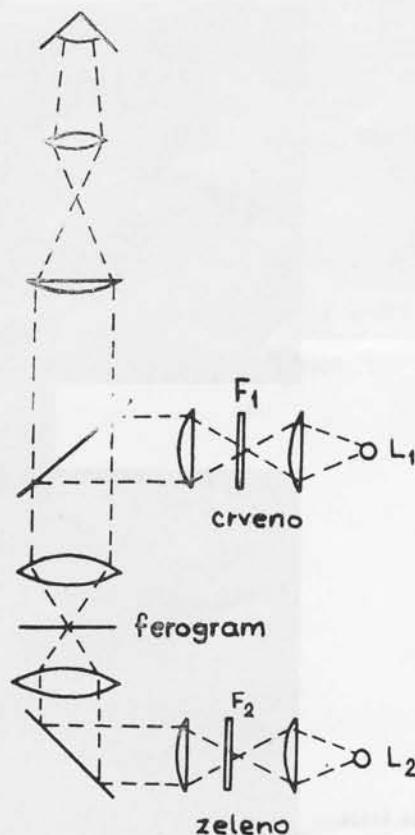
Slika 4. — Izgled ferograma, iz [1] 1:1

Ferogram se, zavisno od problema, može analizirati na različite načine. Osnovni instrument za analizu ferograma je bikromatski mikroskop, shema na slici 5.

Upotreba dvostrukog osvjetljenja omogućuje razlikovanje čestica prema karakterističnim bojama od reflektirajuog i prolaznog svjetla. Dalje, ako je potrebno, može se upotrijebiti SEM*, elektronski mikroanalizator, kvantimet i druge metode. Općenito, ferografija daje dvije osnovne informacije: o mehanizmu trošenja i o dijelu koji je »ugrožen« trošenjem. Različite mogućnosti su prikazane primjerima prema slijedećoj tablici:

TABLICA 1. — INFORMACIJA PUTEM FEROGRAFIJE

Informacija	Predmet analize	Instrument	Primjer br.
O mehanizmu trošenja	Količina, distribucija (I_S)	Direktno očitanje	1
	Oblik čestica	Bikromatski mikroskop;	2 3 4
		SEM	5
O dijelu koji je pogoden trošenjem	postojeća	Mikromatski mikr.	6
	Boja izazvana grijanjem ferograma	Topla ploča + bikromatski mikroskop	7
	Kemijski sastav	Elektronski mikroanalizator	8



Slika 5. — Shema bikromatskog mikroskopa, iz [6]

L_1, L_2 — izvori svjetlosti

F_1, F_2 — filteri za crveno odnosno zeleno svjetlo

*SEM — scanning elektronski mikroskop

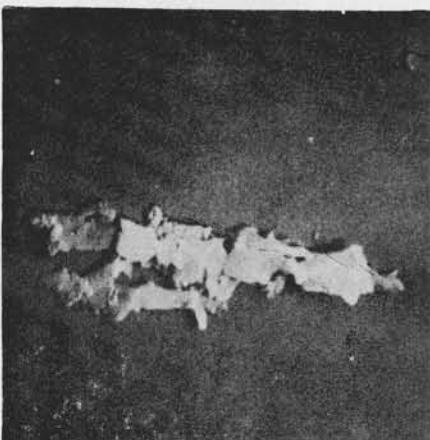
Primjer 2: Čestice nastale abrazivnim trošenjem, iz [4]



Sl. 6. — SEM
fotografija 1800:1

Čestice su oblika strugotine što pokazuje da se radi o procesu mikrorezanja.

Primjer 3: »Normalno« trošenje dobro uhodanog kliznog para, iz [4]



Sl. 7. — SEM
fotografija 6000:1

Čestice trošenja su sitne, tanke pločice koje potječu od trošenja unutar vanjskog graničnog sloja materijala.

Primjer 4: Pojava kuglastih čestica

400:1
Početak testa



(a)

2000:1
60% trajaanja testa



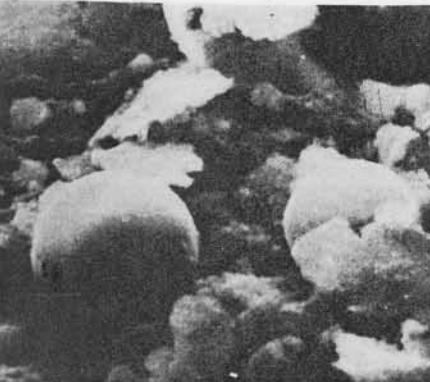
(b)

1600:1
80% trajaanja testa



(c)

2000:1
Pri kraju testa



(d)

Sl. 8. — Čestice trošenja u raznim fazama testa
turbomlaznog motora, iz [7]

Iz ovog primjera se vidi da je analizom ferograma moguće još ranije doći do upozorenja o »nenormalnosti« procesa trošenja nego pomoću indeksa intenziteta trošenja (60% trajaanja testa prema 73% u primjeru 1). Sam mehanizam nastajanja kuglastih čestica nije sasvim razjašnjen, ali je zajedničko za sve takve slučajevе postojanje izmje-

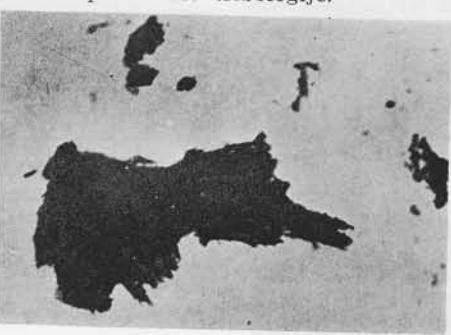
ničnih smičnih naprezanja površinskog sloja [8]. Kuglice se formiraju prije kcnačne propagacije pukotine od umora i na taj način imamo upozorenje prije nego je došlo do otkidanja velikih čestica. Nastajanje kuglastih čestica kod frettinga ilustrirano je slikom 9.



Sl. 9. — Kuglasta čestica kod frettinga, iz [8] 980:1

Primjer 5: Trošenje zgloba (biotribologija)

Proučavanje trošenja prirodnih i umjetnih zglobova dobro ilustrira interdisciplinarnost tribologije.



Sl. 10. — Čestica kosti, iz [9] 100:1

Pojava oksidnih čestica (crveni, odnosno crni, željezni oksid, slike 11. i 12) ukazuje na neadekvatno podmazivanje odnosno pogoršanje uvjeta trošenja.

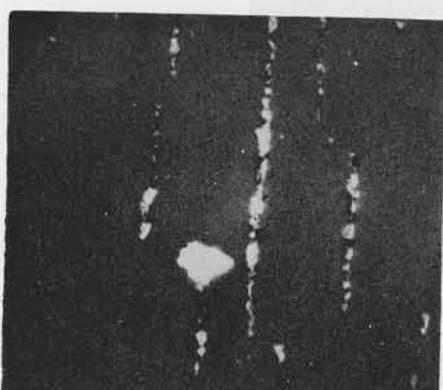
Primjer 7: Trošenje u Diesel motoru, iz [11]

U ovom primjeru korištena je mogućnost izazivanja obojenja čestica zagrijavanjem ferograma. Poznato je, da različiti metali stvaraju oksidne prevlake pri različitim

Na sobnoj temperaturi — sve čestice iste boje:

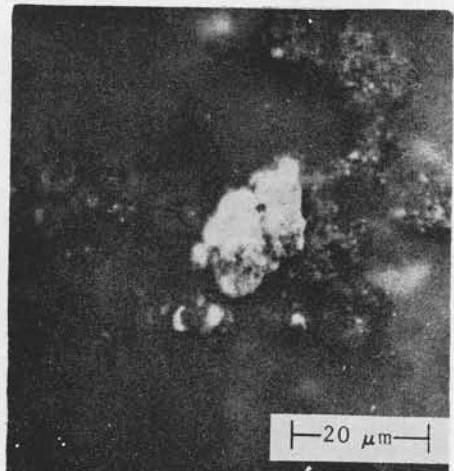


(a)

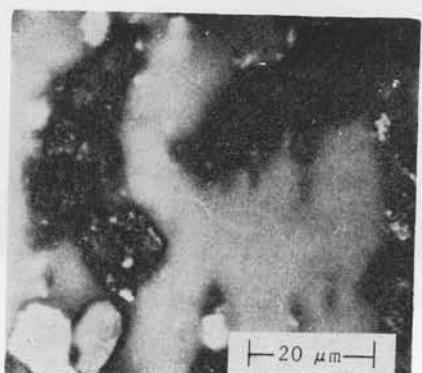


(b)

Primjer 6: Proučavanje režima trošenja kliznog para, iz [10]

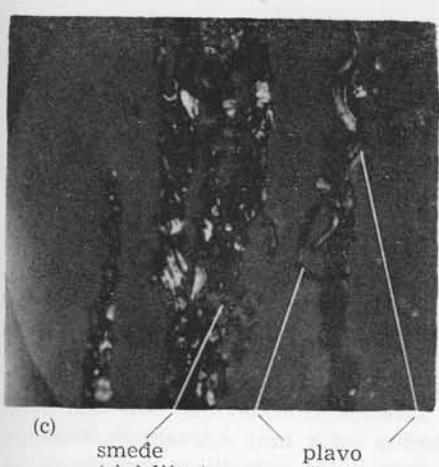


Sl. 11. — crveni oksid

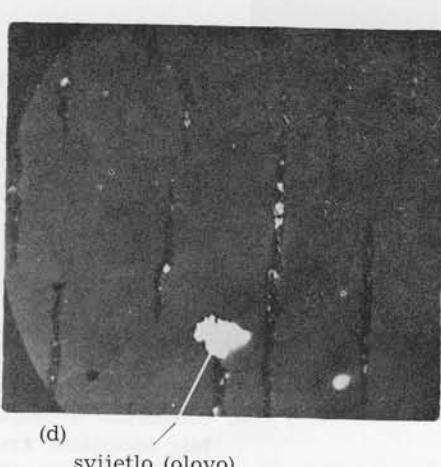


Sl. 12. — crni oksid

Nakon grijanja 330°C/90 sek:

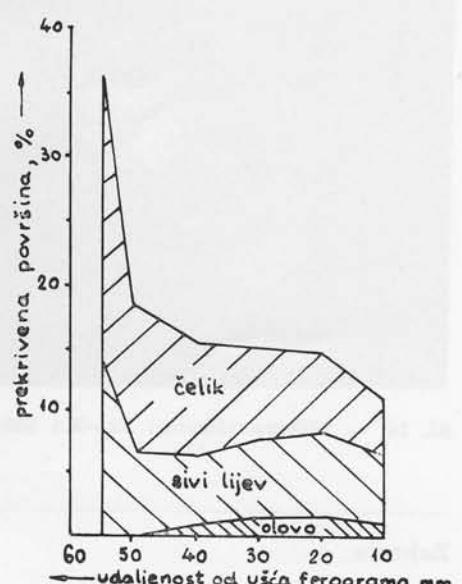


(c) smeđe (sivi lijev)
plavo (čelik)



(d) svijetlo (olovo)

Sl. 13. — Identifikacija čestica zagrijavanjem ferograma (fotosi: a, b, c i d)



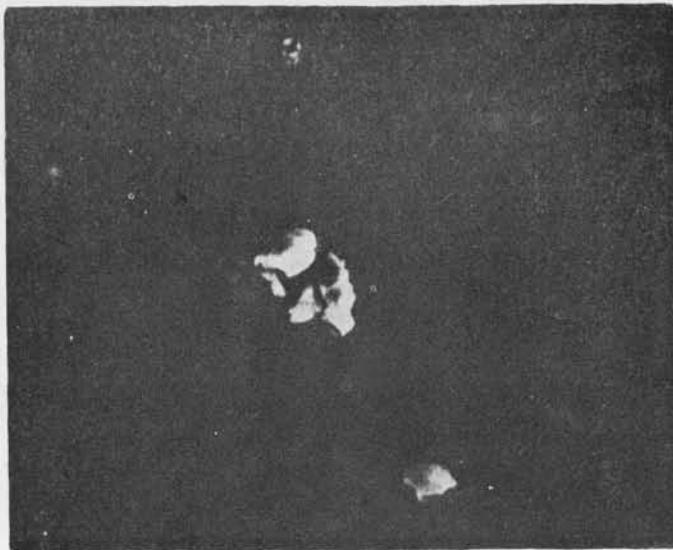
Sl. 14. — Dijagram trošenja sklopova Diesel motora

temperaturama. Za ispitivani motor bili su poznati materijali najugroženijih dijelova i njihove boje nakon grijanja, tablica 2.

Grijanje ferograma na 330°C u trajanju od 90 sekundi omogućilo je identifikaciju čestica, slika 13, i procjenu iznosa trošenja pojedinih dijelova odnosno sklopova, slika 14.

Kada je naročito važno pouzdano utvrditi sastav čestica, primjenjuje se elektronski mikroanalizator. Primjer na slikama 15. i 16. pokazuje kako je tim putem postignuto razlikovanje čestica željeznog i neželjeznog materijala.

Primjer 8: Analiza sastava čestica, iz [12]



Sl. 15. — SEM 500:1



Sl. 16. — Mikroanalizator: Fe—K α 500:1

Zahvala

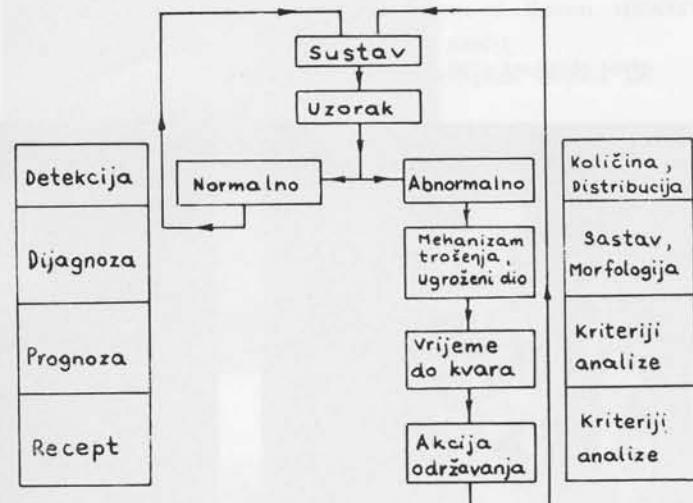
Autor se zahvaljuje izdavaču časopisa »Wear« za dopuštenje reproduciranja fotografija uz primjere 2, 3, 4, 5, 6. i 7.

TABLICA 2.

MATERIJALI U DIESEL MOTORU

Površina izložena trošenju	Metal	Boja nakon grijanja $330^{\circ}\text{C}/90\text{s}$
Ležajevi radilice	Bijeli metal (Pb)	Nepromijenjena
Klipni prstenovi	Sivi lijev	Smeđa
Košuljica cilindra	Sivi lijev	Smeđa
Radilica	Čelik	Plava

Postoji dosta veliki popis uspješnih primjera ferografije. Prema [5] praćenje procesa trošenja ferografijom uspješno se primjenjuje kod građevinarske i rudarske opreme, brodskih postrojenja, hidrauličnih sistema, procjene efikasnosti maziva, aditiva i filtera itd. Kod komplikiranih sistema koji imaju više sličnih jedinica (na primjer valjanočka postrojenja) može se posebnom tehnikom ispiranja pratiti stanje pojedinih jedinica bez potrebe rutinskog rasklapanja cijelog postrojenja.



Sl. 17. — Proces donošenja odluke na temelju ferografske analize, iz [13]

Svi cpisani primjeri pokazuju da ferografija može biti od velike pomoći pri praćenju i proučavanju procesa trošenja, ali ne treba zaboraviti da npr. proces donošenja odluke kod održavanja, ustvari, najviše zavisi o valjanosti kriterija analize, kako je ilustrirano shemom na slici 17.

ZAKLJUČAK

Ferografija omogućuje uvid u samu bit procesa trošenja, tj. u mehanizam i dinamiku nastajanja materijalnih produkata trošenja u zatvorenim sustavima, bilo tehničkim, bilo biološkim. Izvanredno velik broj relevantnih informacija koje ferografija daje pruža uzbudljive mogućnosti za sasvim novi pristup rješavanju mnogobrojnih problema koji proizlaze iz raznih situacija s pojavama trošenja.

LITERATURA

1. W. W. SEIFERT, V. C. WESTCOTT, Wear, 21 (1972) 27—42.
2. G. POCOCK, Proceedings of »Tribology 1978«, Swansea 1978, 111—121, Mechanical Engineering Publications Bury St. Edmunds.
3. D. P. ANDERSON, Industrial Research Development, 8 (1978), 75—78.
4. D. SCOTT, V. C. WESTCOTT, Wear, 44 (1977) 173—182.
5. S. SCOTT, V. C. WESTCOTT, Proceedings of »Tribology 1978«, Swansea 1978, 123—128, Mechanical Engineering Publications Bury St. Edmunds.
6. R. BOWEN, D. SCOTT, W. SEIFERT, V. C. WESTCOTT, Tribology International 9 (1976), 109—115.
7. SCOTT, Wear, 34 (1975), 15—22.
8. P. L. HURRICKS, Wear, 27 (1974), 319—328.
9. D. C. MEARS, E. N. HANLEY, R. DUTKOWSKY, V. C. WESTCOTT, Wear, 50 (1978), 115—125.
10. M. V. HOFMAN, J. H. JOHNSON, Wear, 44 (1977), 183—199.
11. A. A. REDA, R. BOWEN, V. C. WESTCOTT, Wear, 34 (1975), 261—273.
12. S. TURINA, N. TURINA, Use of Microcrystalline Cellulose for Concentrating Traces of Metals in Analyses of Mineral and Organic Oils and Fats, u tisku (Wear).
13. P. B. SENHOLZI, Proceedings of »Tribology 1978«, Swansea 1978, Mechanical Engineering Publications Bury St. Edmunds.

VINKO IVUŠIĆ, dipl. ing.

asistent Zavoda za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu



Roden 1946. godine u Veloj Luci. Diplomirao na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu 1970. godine. Radio u tvornici »Nikola Tesla« — Zagreb i brodogradilištu »Greben« u Veloj Luci. Od 1974. godine asistent na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Školsku godinu 1977./78. proveo na specijalizaciji u Fulmer Research Institute, Velika Britanija.