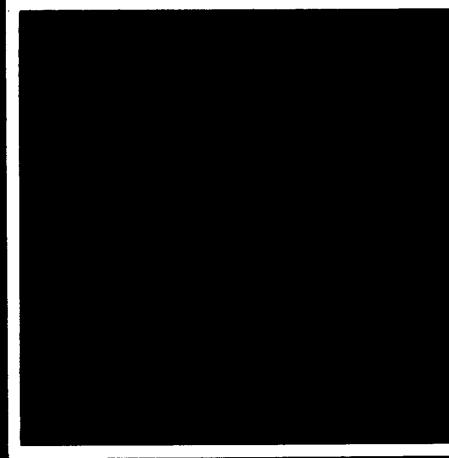
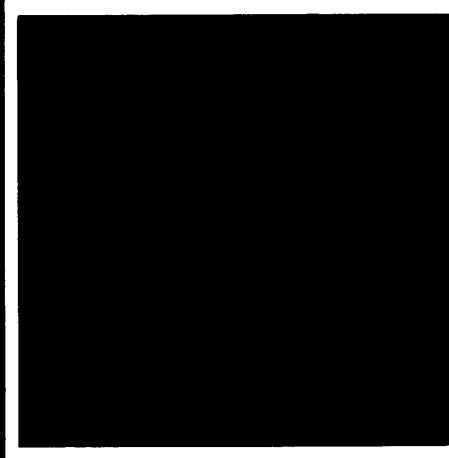
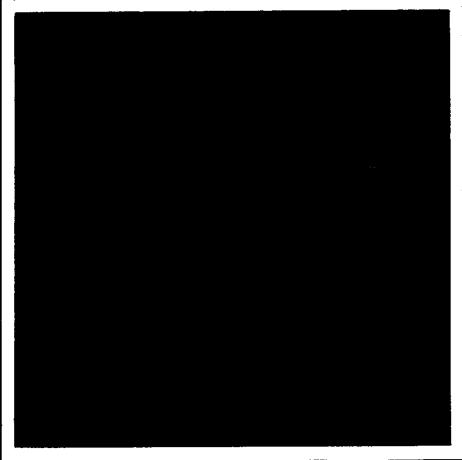
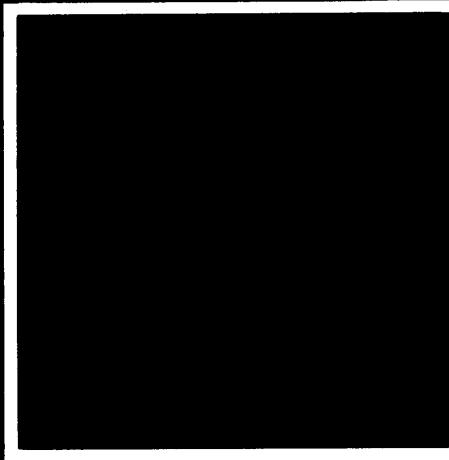
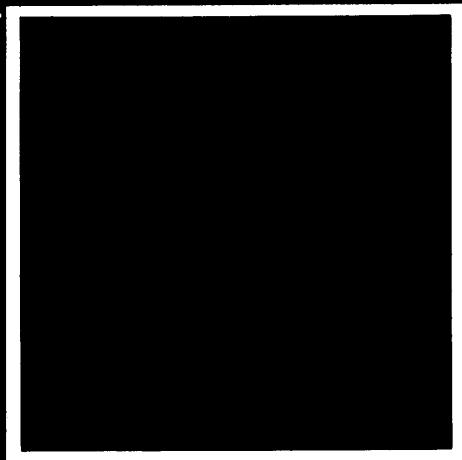


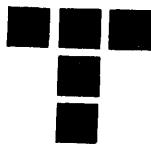
tribologija u industriji

YU ISSN 0351-1642
GODINA III
OKTOBAR 1981.

3



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



**GODINA III
BROJ 3
OKTOBAR 1981**

tribologija u industriji

sadržaj contents содержание

VI internacionalna konferencija o proizvodnim istraživanjima

U izvrsnoj organizaciji Instituta za proizvodne sisteme Tehničkog fakulteta u Novom Sadu održana je krajem avgusta meseca ove godine VI Internacionalna konferencija o proizvodnim istraživanjima na kojoj su, među mnogobrojnim referatima (oko 200) iz zemlje i inostranstva, saopšteni i rezultati i istraživanja koji se u osnovi odnose na tribološku problematiku i problematiku održavanja proizvodne i druge opreme u proizvodnim i transportnim sistemima.

Konferencija je održana u novom sportskom centru Novog Sada uz prisustvo oko 800 učesnika (oko 140 iz 38 zemalja) i trajala je pet dana. Opšta problematika proizvodnih sistema tretirana je sa aspekta efikasnosti, kvaliteta i humanizacije rada.

Rad se na Konferenciji odvijao u plenarnim sednicama i po sekcijskim kojih je bilo ukupno šest i to:

Sekcija A — tehnologija obrade

Sekcija B — grupna tehnologija i troškovni materijala

Sekcija C — upravljanje proizvodnjom

Sekcija D — automatizacija proizvodnih procesa i industrijske robotike

Sekcija E — efikasnost proizvodnih sistema

Sekcija F — organizacija, samoupravljanje i participacija.

Sa tribološkog aspekta posmatrano materijali izloženi u većini referata u Sekciji A (tehnologija obrade)

odnosili su se u osnovi na problematiku razvoja procesa habanja reznih elemenata alata odnosno obuhvatili su problematiku osnovnih tribomehaničkih sistema u obradi metala rezanjem koji u savremenim uslovima obrade egzistiraju.

Potreba za sve većom produktivnošću rada uslovjava i neophodnost korišćenja takvih vrsta alata i materijala predmeta obrade koji omogućavaju obradu sa visokim brzinama rezanja uz velike strugotine. Pritisci i temperature u kontaktnim slojevima alata i materijala predmeta obrade pri rezanju neprekidno rastu jer raste i brzina rezanja i brzine pomoćnih kretanja. Razvoju novih alatnih materijala i materijala predmeta obrade ovog puta na Konferenciji nije bila posvećena veća pažnja mada se u ovom trenutku u svetu radi u ovoj oblasti sve više. Razvoj novih alatnih materijala je u toku a posebno je intenzivan razvoj postupaka optimizovanja kontaktnih površina alata bilo nanošenjem prevlaka različitih vrsta bilo korišćenjem drugih postupaka. Osnovni cilj istraživanja u ovom pravcu je povećanje otpornosti alata na habanje u uslovima koje karakterišu velike brzine prerade materijala i veliki otpori rezanja.

Na Konferenciji, u okviru ove sekcije, još uvek nije u dovoljnoj meri na direktni način izražen tribološki aspekt procesa prerade materijala. Npr., trećem elementu tribomehaničkih sistema u obradi metala rezanjem koji je u najvećem broju slučajeva prisutno u procesu rezanja (sredstvo za hlađenje i podmazivanje) nije posvećena nikakva pažnja i ako se već zna da kroz primenu novih vrsta sredstava za hlađenje i podmazivanje otpornost alata na habanje može da se poveća u velikoj meri u odnosu na primenu klasičnih sredstava za hlađenje i podmazivanje.

Druga sekcija u kojoj su se saopštili referati u kojima se, u osnovi tretira tribološka problematika ali na indirektni način je Sekcija E (efikasnost proizvodnih sistema). U velikom broju referata istaknut je značaj održavanja proizvodne i druge opreme na pouzdanost i efikasnost proizvodnih sistema u celini. Referatima je obuhvaćen više organizacijski aspekt problema održavanja dok tribološki aspekt ove funkcije u proizvodnom sistemu nije dovoljno istaknut. Ovo pokazuje da je tribologija kao naučna disciplina još uvek nedovoljno prisutna i u naučnim institucijama koje se bave opštom problematikom proizvodnih sistema i u praksi naročito kod onih stručnjaka koji se bave problemima održavanja proizvodnje i druge opreme. Još uvek se dovoljno ne shvata da organizacijom i tehnologijom održavanja proizvodne i druge opreme rešavamo posledice koje na elementima tribomehaničkih sistema sadržanim u sredstvima rada ostavljaju tribološki procesi koji se uvek javljaju u kontaktnim slojevima kontaktnih parova, a da kroz tribologiju otklanjamo u određenoj meri uzroke pojedinačnih zastoja u proizvodnim procesima.

Takođe nije dovoljno istaknuta i veza između pouzdanosti proizvodnih sistema (proizvodne opreme u njima) i triboloških procesa na kontaktnim parovima elemenata odgovarajućih tribomehaničkih sistema. Po mišljenju autora ovog napisa u narednom periodu predstoji ulaganje značajnog napora u povezivanju stručnjaka, posebno istraživača, iz oblasti pouzdanosti proizvodnih sistema i održavanja proizvodnih sistema i tribologije kako bi se stvorili bolji uslovi da proizvodni procesi teku efikasnije i kvalitetnije.

Naučno - istraživačkim i stručnim radnicima koji se bave tribologijom kao naučnom disciplinom predstoji, očigledno, u narednom periodu zadatak da pored saopštavanja rezultata svojih istraživanja na domaćim i internacionalnim konferencijama koje tretiraju isključivo tribološku problematiku učestvuju, znatno aktivnije nego do sada i na skupovima koji razmatraju probleme pouzdanosti i održavanja proizvodne i druge opreme u proizvodnim i transportnim sistemima.

Takođe treba napomenuti da pouzdanost proizvodnih sistema u celini a posebno pouzdanost proizvodne op-

reme nije do sada razmatrana u dovoljnoj meri u funkciji triboloških procesa na kontaktnim površinama osnovnih tribomehaničkih sistema preko kojih se vrši prenos i kretanje energije u sredstvima rada.

VI Internacionalna konferencija o proizvodnim istraživanjima održana u Novom Sadu omogućila je razmenu mišljenja velikog broja naučnih i stručnih radnika iz različitih zemalja o problemima efikasnijeg, kvalitetnijeg i humanijeg rada i time doprinela da se u narednom periodu razviju i novi istraživački programi koji će u većoj meri nego do sada okupiti stručnjake različitih profila kako bi rešavanje problema, pre svega, efikasnosti proizvodnih sistema bilo kvalitetnije. Konferencija je takođe pokazala da u našoj zemlji postoji naučno-istraživačke institucije koje su sposobne da organizuju velike međunarodne skupove iz oblasti nauke i

tehnike na nivou koji je u mnogo čemu viši nego što je to slučaj sa održavanjem sličnih skupova i u industrijskim zemljama.

Napori koje je učinio Institut za proizvodne sisteme Tehničkog fakulteta u Novom Sadu za organizovanje ovog skupa vredni su pažnje, a njegovo održavanje u našoj zemlji doprineće daljem razvoju naučne misli u oblasti proizvodnog mašinstva i organizacije.

Obaveštenje

Redakcija časopisa **TRIBOLOGIJA U INDUSTRiji** organizuje na proljeće 1982. godine tri **PROLEĆNA SEMINARA** iz serije

»PRODUKTIVNOST I EKONOMIČNOST RADA U INDUSTRiji PRERADE METALA«

i time nastavlja akciju započetu 1981. godine u oblasti permanentnog obrazovanja radnika u udruženom radu.

Planirani su sledeće seminari:

1. — **IZVORI NISKE PRODUKTIVNOSTI RADA U PROIZVODNIM SISTEMIMA METALOPRERAĐIVAČKE DELATNOSTI**

Jednodnevni seminar namenjen Poslovodnim organima Radnih organizacija i OOUR-a iz oblasti industrije prerade metala.

2. — **TEHNOLOGIJA OBRADE NA NC-STRUGOVIMA**

Dvodnevni seminar namenjen radnicima iz tehnološke funkcije Radnih organizacija metaloprerađivačke delatnosti.

3. — **TRIBO-MEHANIČKI SISTEMI U SAVREMENIM PROIZVODNIM MAŠINAMA**

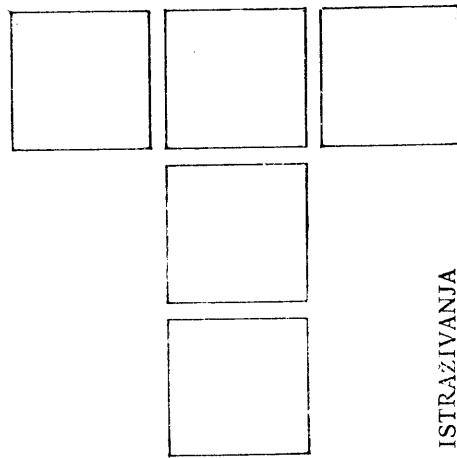
Dvodnevni seminar namenjen radnicima iz funkcije proizvodnje i održavanja Radnih organizacija metaloprerađivačke delatnosti.

Pozivi za učešće na seminarima sa detaljnim sadržajem istih (teme, predavači i slično) biće upućeni stručnoj javnosti u januaru 1982. godine.

Tri prolećna seminara iz serije:

Produktivnost i ekonomičnost rada u industriji prerade metala

Redakcija časopisa **TRIBOLOGIJA U INDUSTRiji** bila bi veoma zahvalna svim korisnicima ovog časopisa na predlozima tema budućih seminara iz oblasti **PRODUKTIVNOSTI I EKONOMIČNOSTI RADA U INDUSTRiji PRERADE METALA**.



Abrazivno trošenje i tvrdoča karbidnog gvožđa

ISTRAŽIVANJA

Abrazivno trošenje koje nastaje djelovanjem tvrdih, najčešće mineralnih materijala na metalnu površinu uzrokuje velike ekonomske gubitke u različitim područjima privrede. Debljina istrošenog metala može iznositi nekoliko milimetara, čak centimetara, tako da upotrebljivost strojeva i uređaja dolazi u pitanje. Rasprostranjenost ove pojave objašnjava činjenica da u abrazivne mineralne materijale spadaju rudače, kamen, cement, zemljište i pijesak (i u obliku najfinijih čestica prašine). Takvom su trošenju izloženi posebice alati i uređaji za drobljenje, miješanje i transport mineralnih tvari u rudarstvu, metalurškoj preradi rudače, proizvodnji cementa, uređaji i alati za obradu i pokretanje zemljišta, uređaji za pneumatski i hidraulički transport mulja i zrnatih minerala, itd.

Potrebe za alatima i dijelovima konstrukcija otpornim na abrazivno trošenje, stalno rastu. Uzrok tome leži u povećanju obrade raznih minerala i zemljišta, u sve intenzivnijoj preradi mrsavih ruda i u ubrzanoj mehanizaciji i automatizaciji u industriji i poljoprivredi. Kod takvih velikih postrojenja sigurnost rada i smanjenje trošenja posebice su značajni jer se nastoji smanjiti visoke troškove stajanja radi izmjene dotrajalih dijelova.

I KARAKTERISTIKE TEHNIČKE FUNKCIJE

II ODNOŠI KRETANJA ODNOŠI OPTERECENJA

III TRIBOSTRUKTURA $s = F(A, B, C)$

A Elementi: mineral, metal, medij

B Svojstva

C Interakcija elemenata

IV KARAKTERISTIKE TROŠENJA I TRENA

Iznos trošenja, konačno stanje sistema

Sl. 1. Shema tribološkog sistema prema DIN 50320

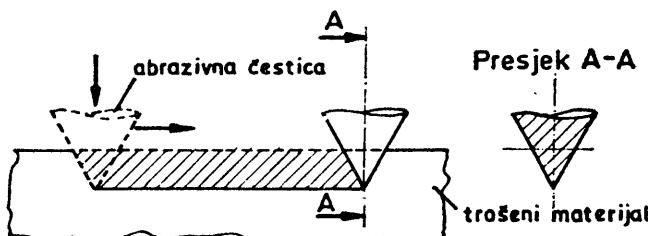
Abrazivno trošenje je složena pojava i moguće ju je sistematski analizirati samo u sklopu tribološkog sistema (slika 1). U određenim se eksploracijskim uvjetima (kojima odgovara određeni tribološki sistem) smanjenje trošenja može postići na nekoliko načina. Na osnovi petrografske svojstava minerala i njegove konačne upotrebe

vrši se izbor najpovoljnijeg tehničkog postupka i tipa postrojenja, a za pojedine njegove dijelove nastoji se upotrebiti optimalne materijale. Za takve materijale traži se da odnos iskorištenja prema troškovima bude što veći. Takav se odnos pokazuje naročito povoljnim za legirani karbidni i čelični lijev ako se u bilancu unesu i smanjeni troškovi održavanja i stajanja postrojenja. Potražnja za tim materijalima je znatno povećana pa je praktički istisnut iz upotrebe jeftini, ugljični čelični i gvozdjeni lijevi.

U ovom će se radu pokušati pokazati u kojoj mjeri neki parametri tribološkog sistema utječu na otpornost karbidnih slitina prema kliznom abrazivnom trošenju i na koji se način ta otpornost može povećati.

KLIZNO ABRAZIVNO TROŠENJE

Klizno abrazivno trošenje je pojava kada tvrda čestica (ili brije hrapave površine) prodre u metalnu površinu i klizi tangencijalno na tu površinu, pri čemu se uz nastanak brazde, odstrani određena količina metala (slika 2). Mehanizam trošenja odgovara mikrorezanju, tj. skida-



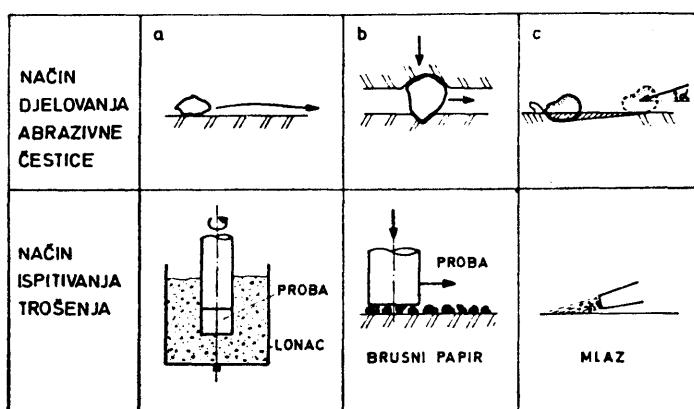
Sl. 2. Shema nastanka brazde pri kliznom abrazivnom trošenju

nju strugotine na mikropodručju. U tribološkim sistemima u kojima prevladava klizno trošenje, mogu se s obzirom na način i intenzitet djelovanja abrazivne čestice, razlikovati sljedeće vrste trošenja (slika 3):

- trošenje pod niskim naprezanjem (low-stress abrasion, Schichtverschleis) pri kojem slobodna čestica klizi po površini. Proces trošenja je ograničen na tanki površinski sloj i brazda koja nastaje je plitka. Na intenzitet trošenja može u ovom slučaju znatno utjecati u mediju u

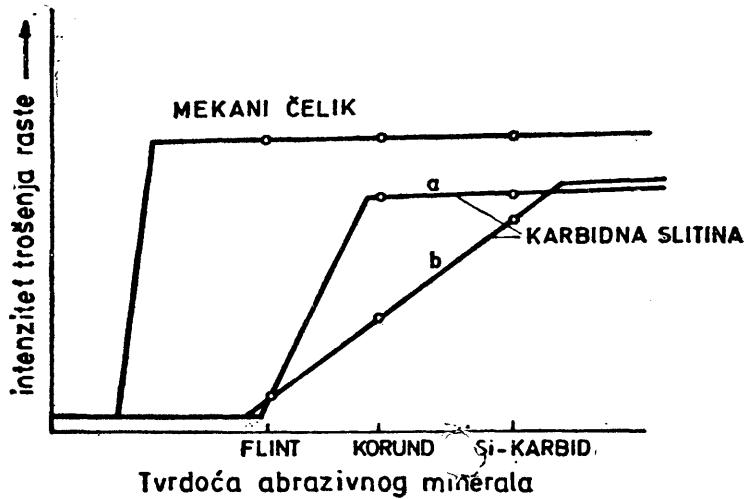
kojem se nalaze partneri trošenja (abrazivna čestica, metal) zbog pobuđenog stanja površine. Zbog toga mogu dominirati njihova kemijsko-fizička svojstva u odnosu na mehaničko-tehnološka [1].

- trošenje pod visokim naprezanjem (high-stress abrasion, Furchungsverschleiss) pri kojem učvršćena čestica pod pritiskom prodre dublje u metalnu površinu i zatim klizi uz nastanak brazde.
- klizno trošenje mlazom (erosion wear, Strahlverschleiss) pri kojem abrazivna čestica u struji zraka (plina) upada pod malim kutem na metalnu površinu. Pri takvom upadnom kutu prevladava horizontalna komponenta brzine čestice i nastaje brazda.



Sl. 3. Vrste abrazivnog trošenja kod kojih prevladava klizanje

Na slici 3 prikazana je vrsta trošenja i način djelovanja abrazivne čestice u odgovarajućim laboratorijskim uređajima koji su upotrebljeni za ispitivanje trošenja. Detaljniji opis uređaja prikazan je na drugom mjestu [2].



Sl. 4. Intenzitet abrazivnog trošenja i tvrdoca slitine (S-krivulje)

Trošenje zavisi o odnosu tvrdoće partnera, tj. abrazivne čestice i metala [3], i ne raste proporcionalno s povećanjem tvrdoće abrazivne čestice, već s relativno naglim prelazom (slika 4). Na prikazanim S — krivuljama mali intenzitet trošenja (donji krak S — krivulje) postiže se kada je tvrdoća abrazivne čestice manja od tvrdoće metala. Prelazno područje započinje kada tvrdoća abrazivne čestice dostigne približno tvrdoću metala. U tom području trošenje se strmo povećava s porastom tvrdoće abrazivne čestice. Nakon što postigne jednu približno maksimalnu vrijednost, raste malo s povećanjem tvrdoće abrazivne čestice. Krivulja S sa strmim srednjim dijelom vrijedi za materijale s homogenom mikrostrukturom. Materijali s heterogenom mikrostrukturom, tj. s velikim razlikama tvrdoće pojedinih faza pokazuju manji nagib srednjeg dijela krivulje (krivulja b).

Intenzitet trošenja i otpornost prema trošenju

Intenzitet trošenja W obično se definira smanjenjem visine ili debljine probe za 1 km pređena puta. Recipročna vrijednost intenziteta trošenja predstavlja otpornost prema trošenju

$$\epsilon = \frac{1}{W} \quad (1)$$

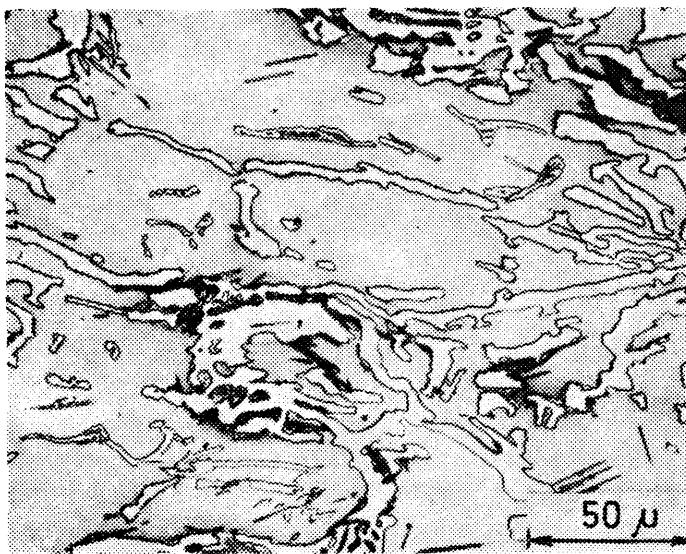
Na taj način dobijene vrijednosti za W i ϵ mogu se koristiti za ocjenu otpornosti materijala pod potpuno istim uvjetima trošenja. Međutim, uvjeti se razlikuju već i zbog razlika u izvedbi laboratorijskih uređaja ili dimenzija probne epruvete. Zbog toga nije preporučljivo uspoređivati vrijednosti za intenzitet trošenja objavljenih u literaturi. Bolje mogućnosti pruža relativni intenzitet trošenja ϵ_{St37} koji predstavlja odnos intenziteta trošenja W slitine koja se ispituje, prema intenzitetu trošenja W_{St37} jednog standarda (npr. čelika St37). Recipročna vrijednost tog odnosa je relativna otpornost na trošenje

$$\epsilon_{St37} = \frac{W_{St37}}{W} \quad (2)$$

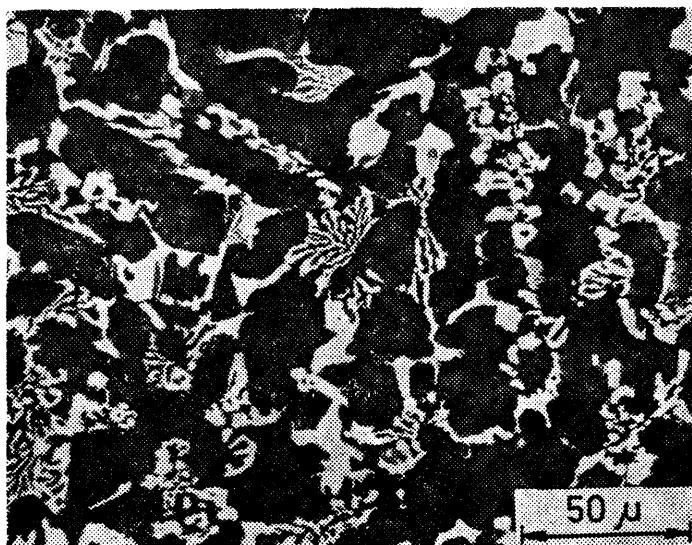
Nažalost, malo je podataka o ispitivanju abrazivnog trošenja prikazanih na ovaj način.

Slitine i abrazivni minerali

Za izradu dijelova (odljevaka) otpornih na klizno abrazivno trošenje upotrebljavaju se najčešće krom karbidne slitine Fe—C—Cr—Mo i Fe—C—Ni—Cr. Mikrostrukture ovih slitina sastoje se od kompleksne mješavine martenzita i/ili austenita, te karbida (slika 5). Slitine odgovarajućeg kemijskog sastava postignu austenitno-karbidnu mikrostrukturu već u odljevenom stanju. Martenzitno-karbidne strukture postižu se termičkom obradom (kaljenjem) odljevaka.



a) 700 ×



b) 700 ×

Sl. 5. Tipična mikrostruktura krom-karbidnih slitina (a) austenitno-karbidna (b) martenzitno-karbidna

Za analizu abrazivnog trošenja karbidnih slitina nužno je potrebno poznavati tvrdoće minerala i tvrdoće mikrostrukturnih faza slitine (tablica 1).

TABLICA I

Tvrdoća nekih minerala i mikrostrukturnih faza Fe-slitina

Mineral	Tvrdoća HV	Mikro-struktura	Tvrdoća HV
Gips	36	Ferit	70—200
Kalcit	140	Perlit	250—460
Staklo	500	austenit krom-karbidnog	
Apatit	540	gvožđa	300—400
Feldšpat	775	martenzit	
		krom-karbidnog gvožđa	700—850
Flint	930	Cementit	840—1100
Kvarc	900—1280	Cr-karbidi	1200—1800
Korund	1775	V-Karbidi	2300—2700
Silicijev karbid	2700	Titan karbid	2800
Diamant	10000	Bor karbid	3700

Tvrdoća i otpornost na trošenje krom-karbidnih slitina

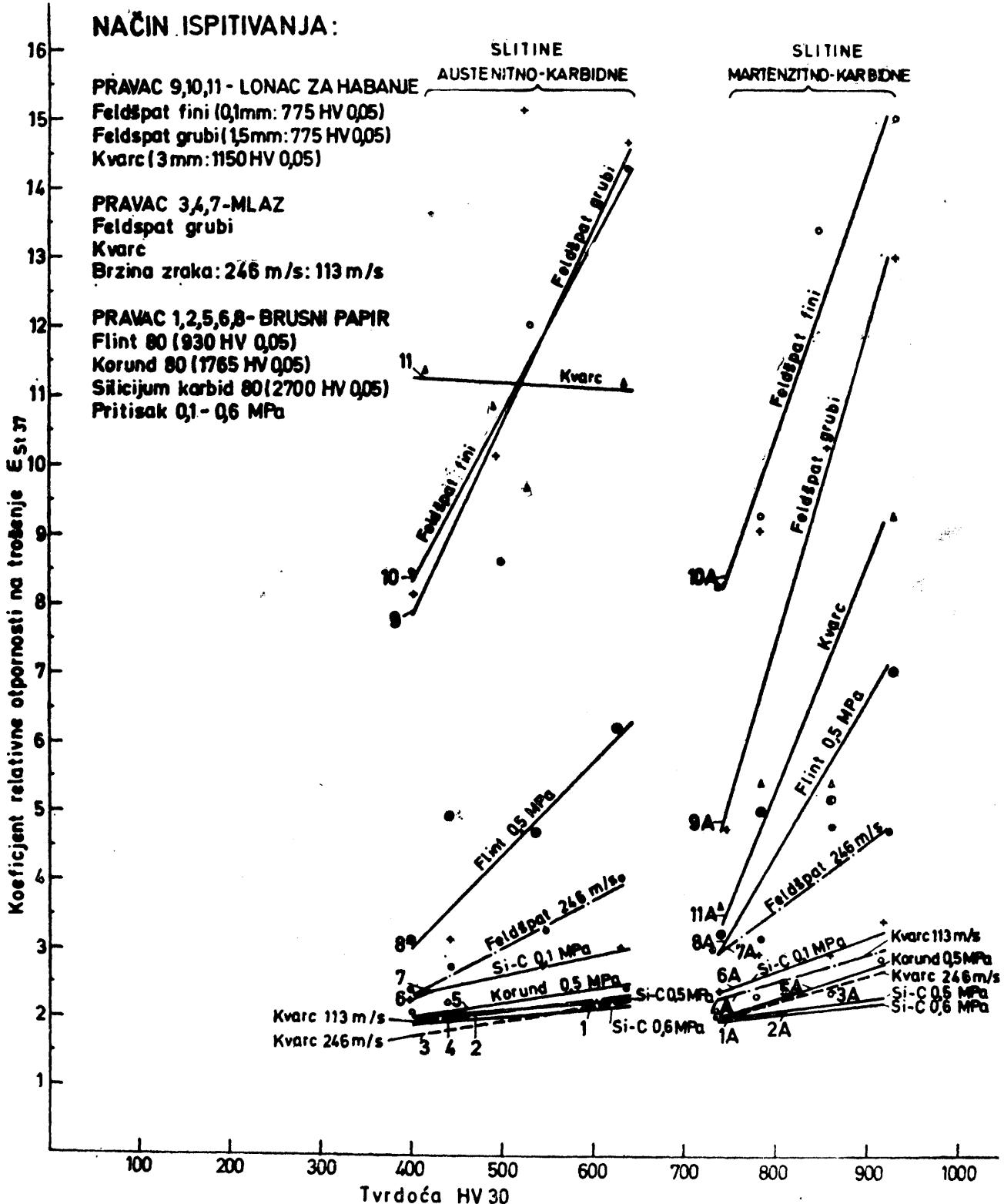
Tendencija porasta otpornosti na trošenje slitina iz tablice 2 s njihovom tvrdoćom prikazana je na slici 6. Ispitivanja su izvršena brusnim papirom, u loncu za habanje i mlazom abrazivnih čestica, dakle metodama u kojima prevladava klizno abrazivno trošenje [4]. S obzirom na mikrostrukturu i tvrdoću slitina mogu se uočiti:

- pravci za područje tvrdoće od 400 do 650 HV (za slitine s austenitsko-karbidnom mikrostrukturom).
- pravci za područje tvrdoće od oko 750 do 930 HV (za slitine s martenzitno-karbidnom mikrostrukturom).

Krom-karbidne slitine mogu imati i znatno složeniju mikrostrukturu, koja osim martenzita, odnosno austenita i karbida sadrži i druge faze (perlit, ferit, bainit). Osim toga, u mikrostrukturi kaljenih slitina može zaostati neprevoren i dio austenita. Takve mikrostrukture nastaju kada kemijski sastav slitine nije prilagođen brzini ohladijanja, odnosno kada nije osigurana njihova prokaljivost. Tvrdoća takvih slitina kreće se uglavnom između 550 i 750 HV.

TABLICA II Kemijski sastav i tvrdoća ispitanih karbidnih slitina

SLITINA	T V R D O C A			KEMIJSKI SASTAV %				
	HV30	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	
GX290CrNi86	400	2,94	1,62	0,80	7,65	—	5,58	
GX280CrNi24	444	2,79	0,58	0,69	2,11	—	4,24	
GX300CrMo21	520	3,47	0,34	0,67	2,10	2,11	—	
GX290CrMo153	554	2,94	0,61	0,73	14,86	2,06	—	
GX280CrMo281	642	2,80	1,30	0,69	26,67	1,80	—	
GX290CrNi86	736	2,94	1,62	0,80	7,65	—	5,58	
GX300CrMo121	780	2,95	0,60	0,75	12,10	0,95	—	
GX290CrMo153	860	2,90	0,62	0,71	15,10	2,85	—	
GX290CrMo153	918	2,94	0,61	0,73	14,86	2,06	—	
Čelik St37	120	0,20	0,20	0,50	—	—	—	



Sl. 6. Zavisnost relativne otpornosti na klizno abrazivno trošenje od tvrdoće slitine ([4] i neka novija ispitivanja)

a podaci za njihovu otpornost često su kontradiktorni odnosno pokazuju veliko rasipanje [5, 6]. Oni se u ovom radu ne analiziraju (osim za usko područje tvrdoće od 730 do 750 HV).

Na osnovu analize slike 6, može se zaključiti slijedeće:

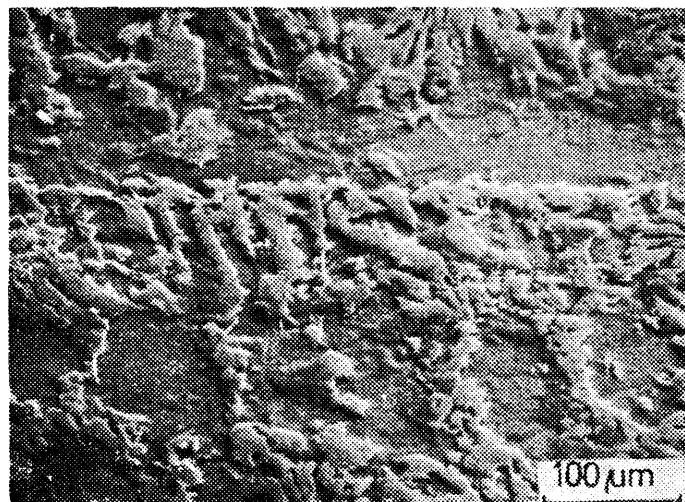
Pravci koji prikazuju sklonost porasta relativne ot-

pornosti ϵ_{S137} s porastom tvrdoće H slitine mogu se prikazati općom jednadžbom:

$$\epsilon_{S137} = a + b H \quad (3)$$

u kojoj a i b zavise od ostalih parametara tribološkog sistema (tvrdoće, oblika, dimenzija abrazivnog minerala, njegove brzine odnosno pritiska i mikrostrukture slitine).

Iz vrijednosti za relativnu otpornost ε_{St37} može se ocijeniti smanjenje trošenja pod određenim abrazivnim uvjetima kada se obični konstrukcijski čelik St37 zamjeni krom-karbidnom slitinom.* Ako, primjerice, prevladava kli-



a) 700 ×



b) 700 ×

Sl. 7. REM — snimke površine probi GX290CrMo153 nakon trošenja (a) kvarcom u loncu za habanje (b) Si — C brusnim papirom

zno trošenje pod malim naprezanjima (ispitivanje u loncu), postiže se 10 do 15 puta manje trošenje (najveće vrijednosti za ε_{St37} na prvcima 9, 10, 11). U slučaju kada prevladava trošenje pod velikim naprezanjima (ispitivanje brusnim papirom), takvo smanjenje iznosi 1,8 do 7 puta (maksimalne vrijednosti ε_{St37} na prvcima 1, 2, 5, 6, 8). Čim dublje pri tome čestica prodre u metal (povećanje nebezpečnosti tvrdoće, povećanje pritiska), tim manje su vrijednosti članova a i b u jednadžbi (3). Slična težnja se može primjetiti i kod ispitivanja mlazom (povećanje brzine i oštine abrazivnog zrna).

* Apsolutne vrijednosti intenziteta trošenja čelika St37 iznose npr. pri ispitivanju brusnim papirom flintom $w = 13300 \mu\text{m}/\text{km}$; korundom $w = 13700 \mu\text{m}/\text{km}$, a kvarcom u loncu za habanje $w = 5,22 \mu\text{m}/\text{km}$.

Dakle, može se zaključiti da uvjeti koji omogućuju dublji prodror abrazivnog minerala u metal vode smanjenju razlika u otpornosti između običnih mekih čelika i tvrdih krom-karbidnih slitina. Slika 7a pokazuje da je prilikom trošenja jedne krom-karbidne slitine pod niskim naprezanjima integritet mikrostrukture održan, i karbidi predstavljaju barijeru kretanja abrazivne čestice. U slučaju trošenja pod visokim naprezanjem (dublje prodiranje abrazivne čestice u površinu) dolazi do dezintegracije strukture, razbijeni i olabavljeni karbidi ne pružaju veći otpor abrazivnoj čestici (Slika 7b). Mikrostrukture mekog čelika nakon trošenja pod različitim uvjetima ne razlikuju se u takvoj mjeri. Uzrok tome je homogena mikrostruktura čelika bez masivnih karbida. Osim toga, s obzirom na njegovu malu tvrdoću, abrazivno trošenje mekog čelika je uvijek visokog intenziteta (Slika 4).

Nagib pravca 11 na slici 6 pokazuje da oblik abrazivne čestice može značajno utjecati na trošenje pod niskim naprezanjima. Pri trošenju s oblim abrazivnim zrnima kvarca, relativna otpornost na trošenje austenitsko-karbidnih slitina ne zavisi o njihovoj tvrdoći. Raster-elektronske snimke trošenih površina pokazuju da se mehanizam djelovanja čestica prilikom ispitivanja u loncu vjerojatno sastoji od plitkog brazdanja i udarnog gnječenja. U tom slučaju gnječenjem dolazi do znatno većih plastičnih deformacija austenita a s time i do njegova intenzivnijeg učvršćivanja negoli u slučaju brazdanja. Zbog toga austenit pod takvim uvjetima više pridonosi povećanju otpornosti prema trošenju. Povećanje tvrdoće koje se ostvaruje povećanjem količine karbida (uz istovremeno smanjenje udjela austenita) ne pridonosi povećanju otpornosti slitine prema trošenju.

Mogućnosti povećanja otpornosti na klizno abrazivno trošenje

Iz spomenutog proizlazi da otpornost krom-karbidnih slitina na klizno abrazivno trošenje ne raste približno linearno s njihovom tvrdoćom za čitavo područje od 400 do 950 HV. Ove slitine s austenitsko-karbidnom i martenzitno-karbidnom mikrostrukturom ponašaju se pod abrazivnim uvjetima kao različiti materijali. Primjerice, austenitno-karbidne slitine tvrdoće oko 650 HV znatno su otpornije negoli martenzitno-karbidne slitine tvrdoće 750 HV.

Tvrdoća austenitno-karbidnih slitina zavisi o količini i tvrdoći karbidne faze pošto je tvrdoća austenita praktično konstantna. Povećanje količine karbida postiže se povećanjem ugljenika i kroma prema [7]:

$$\% K = 12,33 (\% C) + 0,55 (\% Cr) - 15,2 \quad (4)$$

Tvrdoća krom-karbida zavisi također o sadržaju kroma i ugljika i kreće se od 1150 do 1700 HV. Povećanje količina karbida iznad oko 36 posto (što odgovara tvrdoći od 650 HV30 austenitskih slitina) uzrokuje pad otpornosti na trošenje jer se veća količina karbida ne može dovoljno čvrsto uklještiti u austenitnoj matici.

Tvrdoća martenzitno-karbidnih slitina zavisi također o sadržaju ugljika i kroma. Povećanjem tih elemenata u slitini raste tvrdoća martenzita i karbida ali i prokaljivost slitine. Ako su npr. u debljim stijenkama odljevka zbog nedovoljne prokaljivosti prisutni u mikrostrukturi osim martenzita i drugi produkti transformacije (perlit, ferit), tvrdoća opada. Prokaljivost tih slitina može se povećati legiranjem s drugim metalima (molibdenom, bakrom, niklom).

U tehničkoj praksi susrećemo se i s abrazivnim mineralima visoke tvrdoće kao što su silicijum-karbidi (2800 HV) i korund (1750 HV). Krom-karbidi slitine pokazuju relativno slabu otpornost prema trošenju ovim mineralima (Slika 6). Povećanje otpornosti moguće je ako se tvrdoća karbidne faze slitine poveća toliko da dostigne tvrdoću minerala. To se može postići s vanadijevim karbindima čija tvrdoća iznosi 2700 HV. Rezultati ispitivanja otpornosti na klizno abrazivno trošenje jedne slitine tipa GX260VCr61 prikazani su na slici 8. Radi usporedbe ucrtni su pravci otpornosti za krom-karbidi slitine. Vana-

ći i mikrostrukturi, već i u velikoj mjeri i o drugim parametrima tribološkog sistema (tvrdoci, obliku, dimenziji, pritisku odnosno brzine abrazivne čestice).

Optimalnu relativnu otpornost na trošenje pokazuju slitine tvrdoće oko 650 HV koje imaju austenitsko-karbidičnu mikrostrukturu i slitine tvrdoće oko 900 HV koje imaju martenzitno-karbidičnu mikrostrukturu. U slučaju trošenja s vrlo tvrdim mineralima, kao što su korund ili silicijum-karbidi, daljnje povećanje otpornosti na trošenje može se postići vanadij-karbidičnim slitinama.

LITERATURA

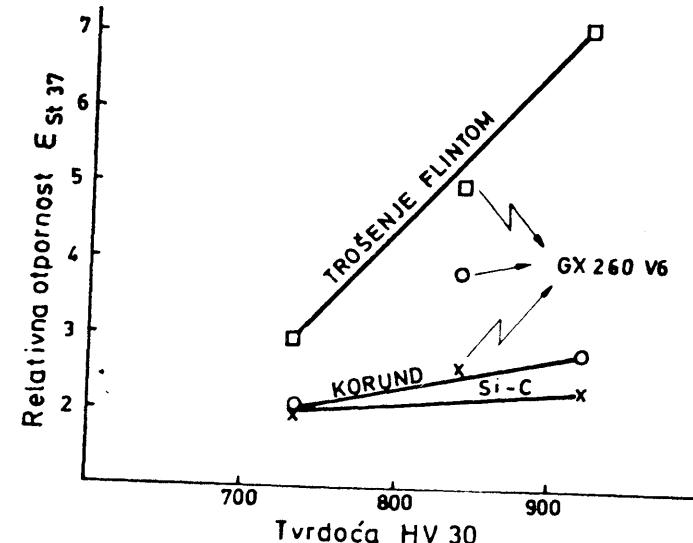
1. UETZ H., Verschleiss durch körnige mineralische Stoffe, Aufbereitungstechnik 4 (1963) 8, 319—335
2. WELLINGER K., UETZ H., Gleitverschleiss, Spülverschleiss, Strahlverschleiss unter der Wirkung von körnigen Stoffen, VDI — Forschungsheft 449 (1955)
3. WAHL H., Praktische Verschleissabwehr, Archiv für Metallkunde (1949) 4, 121—128
4. KATAVIĆ I., Untersuchungen über die Beeinflussung des Gefüges karbidischer Gusseisen bei abrasiver Verschleissbeanspruchung, Wear 48 (1978) 35—53
5. FIORE N. F., Abrasive Wear-Microstructure Interactions in a Ni-Cr White Iron, Wear 62 (1980) 387—404
6. GUNDLACH R., PARKS J., Influence of abrasive hardness on wear resistance of high-chromium irons, International Conference on Wear of Materials 1977, St. Louis, USA
7. MARATRAY F., USSEGLIO R., Factors affecting the Structure of Chromium and chromium-Molybdenum White Irons, Climax Molybdenum S. A., France

Prof. dr IVO KATAVIĆ, dipl. inž.

Roden je 31. 10. 1929. u Splitu. Nakon završenih studija na Metalurškom fakultetu u Ljubljani 1957. god. radio je u Ijevaonica-ma u Rijeci (brodogradilište »3. maj«, »Vulkan« Rijeka) i inozemstvu (Sulzer, Winterthur). God. 1970. prelazi na Strojarsko-brodograđevni fakultet u Rijeci gdje vodi pojedine kolegije sa područja Obrade materijala i Ijevarstva. Znanstveni rad je usmjerio na područje Ijevačkih slitina otpornih na habanje.



Glavni urednik je časopisa Ijevarstvo, Društvo Ijevača SRH.



Sl. 8. Odnos otpornosti jedne vanadij-karbidične slitine i krom-karbidičnih slitina pri trošenju brusninom papirom

dij-karbidična slitina pokazuje veću otpornost na trošenje od krom-karbidičnih slitina u slučaju trošenja s vrlo tvrdim mineralima korundom i silicij-karbidom, a praktički jednak u slučaju trošenja s mekšim mineralom flintom (930 HV). Ovi rezultati mogu se protumačiti pomoću zakonitosti prikazanih S-krivuljom trošenja (slika 4) a na osnovi odnosa tvrdoće karbidne faze i tvrdoće abrazivnih minerala. Heterogenije slitine (one s većom razlikom tvrdoće između mikrostrukturnih faza), a to je u ovom slučaju slitina s vanadijem, pokazuju blaži uspon prema gornjem kraku S-krivulje (krivulja b). Karbidi kroma kao i karbidi vanadija, znatno su tvrđi no minerali flinta. Trošenje se odvija na početku prelaznog dijela S-krivulje, i razlike u intenzitetu trošenja između tih slitina su neznatne.

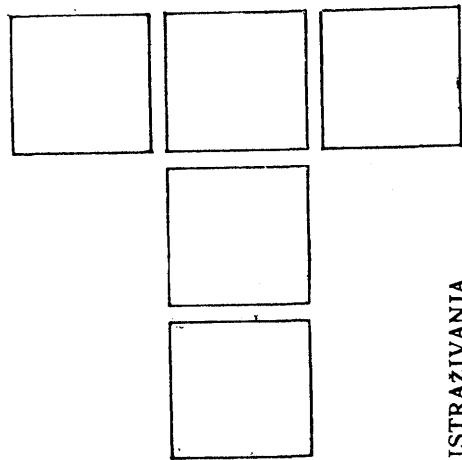
Međutim, u slučaju ispitivanja sa silicijum-karbidom, trošenje krom karbidičnih slitina se odvija na gornjem kraku njihove S-krivulje (silicijum-karbidi je znatno tvrđi od slitine kao i njenih karbida), a vanadij-karbidičnih slitina na prelaznom području (vanadijevi karbidi dostižu tvrdoću silicijum-karbida).

Trošenje korundom je za obje grupe slitina na prelaznom području S-krivulja i razlike u intenzitetu trošenja su također moguće.

ZAKLJUČAK

Pokazano je da otpornost krom-karbidičnih slitina na klizno abrazivno trošenje ne zavisi samo o njihovoj tvrdo-

M. J. NEDELJKOVIC, V. Đ. MILTENOVIC,
M. V. VELIMIROVIC*



Prognoziranje pouzdanosti zupčastih parova**

ISTRAŽIVANJA

UVOD

Savremene mašine sastoje se od velikog broja posebnih delova, i svi ovi delovi dužni su da pouzdano rade u toku zadatog perioda vremena. Uz to uslovi eksploatacije mogu biti veoma različiti, pa je zbog toga ocena pouzdanosti takvih mašina vrlo ozbiljan i složen problem. Korišćenje računskih metoda prognoziranja na osnovu verovatnosne prirode akumulacije oštećenja u materijalu delova ima za cilj ocenu pouzdanosti sistema u različitim etapama razrade i ispitivanja. Pri tome, metode prognoziranja zahtevaju detaljno izučavanje kako fizičkih procesa koji dovode do otkaza, tako i zakonitosti koje ima verovatnosa na priroda razaranja. To i čini osnovu prognoziranja stanja mašinskih sistema.

Ocena pouzdanosti sistema u stadijumu stvaranja novih proizvoda bazira se na analizi slučajnih procesa spoljašnjeg uticaja na sistem, dinamičkih veza između elemenata sistema, kao i na promenama u mikro strukturi materijala delova u procesu eksploracije. Zbog toga metoda prognoziranja treba da objedini verovatnosni postupak proračuna i osnovu teorija slučajnih funkcija, a sve to treba da se bazira na eksperimentima u uslovima bliskim eksploracionim.

Otkaz kod mašinskih sistema može da se javi zbog otkaza niza njegovih različitih elemenata. Pored toga slučajni karakter otkaza uslovljen je rasipanjem karakteristika izdržljivosti delova i drugim faktorima.

Između elemenata mašinskog sistema najčešće postoji jaka dinamička veza koja ima bitan uticaj na identifikaciju režima opterećenja delova.

Pri oceni pouzdanosti složenog mašinskog sistema moguće je formulisati dva osnovna zadatka:

- odrediti pouzdanost sistema u celini,

prema zadatoj pouzdanosti sistema naznačiti pokazatelje pouzdanosti njegovih elemenata.

Za sada ne postoji metoda koja omogućuje da se tačno reše ovi zadaci za mehanički sistem, imajući u vidu njegove osobine. Najtačnije metode su one koje se zasnivaju na modeliranju fizičkih procesa koji dovode do otkaza. Pri tome je za realizaciju takvih metoda neophodna primena računara na kojima se vrši modeliranje ponašanja sistema pri različitim uslovima eksploatacije što odgovara različitim opterećenjima delova sistema. Ovo pak ima za posledicu akumulaciju zamora u materijalu što dovodi do otkaza.

Simulacija procesa izlaza iz stroja realnih elemenata sistema omogućuje dobijanje zahtevanih karakteristika i pokazatelja pouzdanosti. Dinamičke veze dovode do određenog režima opterećenja delova što pruža mogućnost da se oceni pouzdanost sistema u celini.

Pod dejstvom opterećenja u delovima mašinskog sistema mogu da se javi dva principijelno različita tipa otkaza: postepeni i iznenadni.

Prognoziranje postepenih otkaza vezano je sa modeliranjem u toku vremena fizičkih procesa akumulacije zamora kod delova mašinskih sistema u određenim uslovima i režimima eksploracije.

Prognoziranje iznenadnih otkaza vezano je sa modeliranjem najnepovoljnijih faktora i slučajnih spoljašnjih uticaja koji imaju za posledicu preopterećenje, što prevaziđa mogućnosti karakteristika čvrstoće delova sistema.

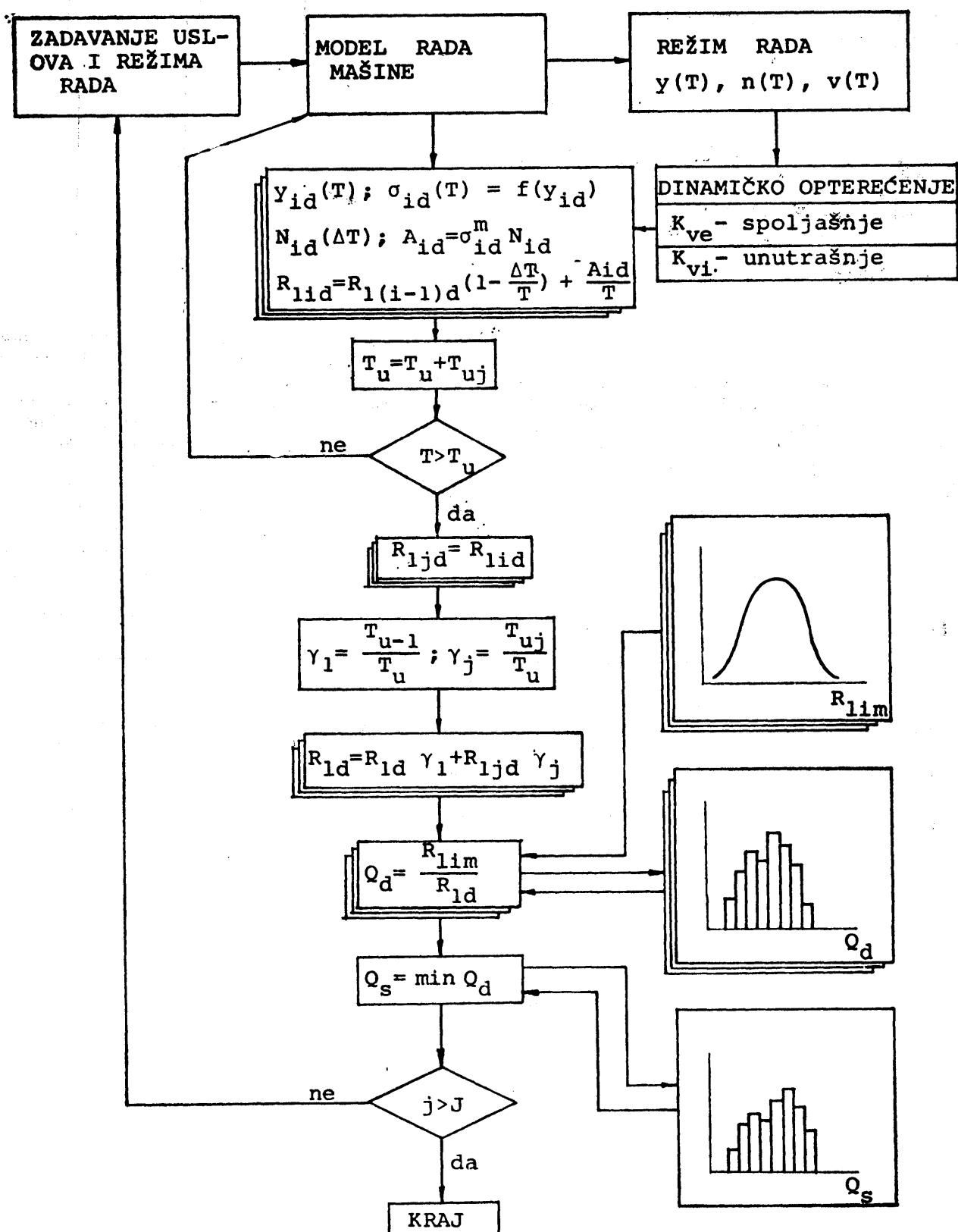
MODELIRANJE POSTEPENIH OTKAZA

Metoda se sastoje u višestrukom modeliranju rada mašine u različitim uslovima i režimima eksploracije. Pri tome se simuliraju procesi opterećenja i njihovo delovanje na akumulaciju zamora u materijalu. Šema statističkog modeliranja procesa oštećenja i nastajanja postepenog otkaza delova i sistema prikazana je na slici 1. Proses rada mašine modelira se analitičkim izrazima i logičkim jednačinama.

Opterećenje delova sistema na svakom koraku modeliranja određuje se na osnovu režima rada, uticaja okoline sredine i kinematskih parametara koji određuju njihovu obimnu ili translatornu brzinu odnosno brojeve obrtaja. Ovako sračunato opterećenje je kvazistatičko.

* Dr Milan J. Nedeljković, redovni profesor, Mr Vojislav Đ. Miltenović, asistent i Miodrag V. Vukmirović, asistent, Mašinski fakultet u Nišu (biografije date u časopisu br. 1/1979)

** Rad je pod naslovom THE FORECASTING OF RELIABILITY OF GEARS saopšten na THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON GEARING AND POWER TRANSMISSIONS, TOKYO, JAPAN



Sl. 1. — Šema statističkog modeliranja procesa izlaza iz stroja delova i sistema u celini — postepeni otkazi

Uticaj dinamičkog ponašanja sistema na opterećenje delova može da se uzme sa određenom tačnošću preko koeficijenata: K_{ve} — za spoljašnje dinamičke uticaje i K_{vi} — za unutrašnje dinamičke uticaje. Ovi koeficijenti zavse od režima rada. Na osnovu ovako određenog ekvivalentnog opterećenja y_{id} (T) (d-tog dela sistema na i-tom koraku modeliranja) računa se radni napon σ_{id} za razmatrano granično stanje dela i broj promena opterećenja N_{id} (ΔT) pri kome on deluje. Ukupna akumulacija oštećenja u materijalu delova sistema pri i-tom koraku modeliranja može da se izrazi kao

$$R_i = R_{i-1} + A_i \quad (1)$$

gde su:

R_i i R_{i-1} — akumulacija oštećenja na odgovarajućim koracima modeliranja,

A_i — priraštaj akumulacije oštećenja za korak modeliranja T.

Definišući tempo akumulacije oštećenja kao

$$R_{li} = \frac{R_i}{T} \quad (2)$$

moguće je napisati

$$R_{li} = R_{li-1} \left(1 - \frac{\Delta T}{T}\right) + \frac{A_i}{T} \quad (3)$$

Na osnovu jednačine (3) vrši se proračun tempa akumulacije oštećenja (akumulacija zamora u materijalu za 1 čas rada ili za 1 pređeni kilometar mobilne mašine) za svaki od razmatranih delova sistema i po svakom granič-

nom stanju. Pri tome period eksploatacije T_{uj} koji odgovara jednom ciklusu modeliranja mora u sebi da sadrži sve moguće režime i uslove rada sistema. Uslovi i režimi rada kao i vreme rada sistema mogu se u toku modeliranja menjati, čime se omogućuje vrlo veliki broj kombinacija, što povećava tačnost dobijenih rezultata.

U narednom bloku vrši se sračunavanje relativnih vremena rada γ_1 i γ_j gde se γ_1 odnosi na prethodne, a γ_j na date uslove i režime rada.

Zatim se određuju ukupni tempo akumulacije oštećenja i vrši upoređenje ovako dobijenih vrednosti mera akumulacije zamora u materijalu R_l sa raspoloživom merm (izdržljivošću) dela R_{lim} . Pri tome je potrebno raspodeliti krivom raspodele karakteristika izdržljivosti za materijale od kojih su izrađeni delovi sistema. Vrednosti R_{lim} određuju se slučajnim izborom prema zakonu raspodele karakteristika izdržljivosti materijala. Kao rezultat upoređenja dobija se resurs dela za razmatrano granično stanje u odnosu na usvojene kriterijume.

Resurs (obim rada) dela Q_d jednak je minimalnoj vrednosti od sračunatih za različita granična stanja. Na ovaj način može se dobiti i resurs sistema Q_s , koji je jednak minimalnoj vrednosti Q_{di} . Sračunate slučajne vrednosti Q_d i Q_s koriste se za određivanje zakona raspodele obima rada do otkaza delova i sistema u celini.

Opisani postupak statističkog modeliranja pruža mogućnost da se uzme u obzir promena parametara i karakteristika mašine u zavisnosti od vremena ili obima rada i uslova eksploatacije. Raspodela resursa sistema formira se na osnovu variranja uslova i režima rada i slučajnog izbora karakteristika izdržljivosti delova.

Tačnost ove metode za ocenu resursa delova i sistema u celini zavisi od broja ispitivanja J. Sa druge strane broj ispitivanja ograničen je vremenom rada računara.

Poziv na saradnju

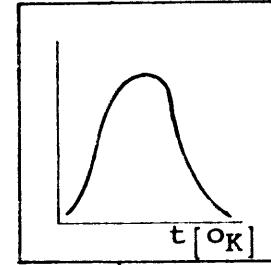
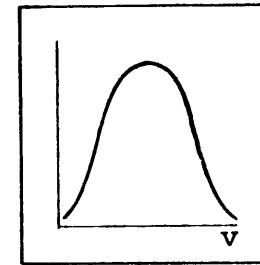
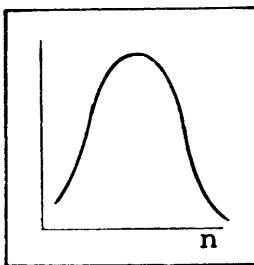
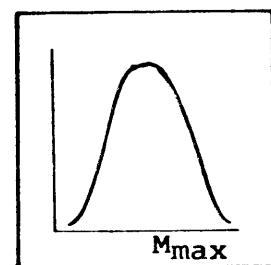
Redakcija časopisa »Tribologija u industriji« poziva na saradnju naučne radnike koji se bave tribološkim istraživanjima i optimizacijom proizvodnje, kao i inženjere i tehničare iz neposredne proizvodnje, zainteresovane da svoja saznanja i iskustva saopšte široj javnosti.

Kao što je poznato časopis »Tribologija u industriji« najneposrednije je zainteresovan za uvećanje produktivnosti i ekonomičnosti u osnovnim organizacijama udruženog rada metaloprera-

divačke industrije, što potvrđuje svojim naučno-istraživačkim i stručnim saopštenjima, usredstvenim na otkrivanje pojedinih problema u neposrednoj praksi uz nuđenje optimalnih rešenja da se problemi reše. Međutim, redakcija časopisa smatra da je nužno uspostaviti još bližu saradnju između naučnih institucija i industrije. To praktično znači da redakcija časopisa poziva inženjere i tehničare iz metaloprerađivačke industrije na tešnju saradnju bilo kroz sopstvena saopštenja, bilo kroz sugestije koje bi probleme valjalo obraditi i objaviti na stranicama časopisa.

Ubeđeni smo da se tešnjom saradnjom može u okviru funkcije časopisa pomaći granica u saznanjima o mogućnostima uvećanja produktivnosti i ekonomičnosti u metaloprerađivačkoj industriji.

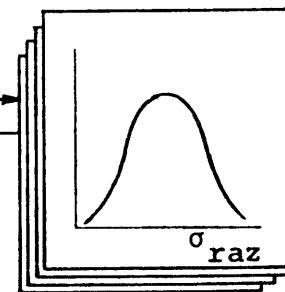
Redakcija



PRORAČUN MAKSIMALNOG OPTEREĆENJA Y_{max}

$$\sigma_{i \ max} = f(Y_{max})$$

$$S_{\sigma di} = \frac{\sigma_{raz}}{\sigma_{i \ max}}$$



$$\text{da} \rightarrow N_{\sigma di} = N_{\sigma di} + 1$$

$$S_{\sigma s} = \min S_{\sigma di}$$

$$\text{da} \rightarrow N_{\sigma s} = N_{\sigma s} + 1$$

$$\text{ne} \rightarrow N > N_k$$

$$\text{da} \rightarrow P_{di} = \frac{N_{\sigma di}}{N}$$

$$P_s = \frac{N_{\sigma s}}{N}$$

Kraj

Sl. 2. — Šema statističkog modeliranja procesa izlaza iz stroja delova i sitsema u celini — iznenadni otkazi

MODELIRANJE IZNENADNIH OTKAZA

Modeliranje iznenadnih otkaza vezano je sa pojavom preopterećenja koja prevazilaze karakteristike čvrstoće delova sistema. Šema statističkog modeliranja iznenadnih otkaza pod dejstvom maksimalnog opterećenja data je na slici 2. Na svakom ciklusu modeliranja potrebno je odrediti maksimalno opterećenje Y_{\max} koje može da se javi u sistemu. Prema njemu se računa maksimalni napon delova sistema $\sigma_{i \max}$. Ovakvo dobijena vrednost $\sigma_{i \max}$ upoređuje se sa vrednošću σ_{raz} koja karakteriše čvrstoću dela. Vrednost σ_{raz} bira se na slučajan način prema unapred zadatom zakonu raspodele. Zatim se računa odnos

$$S_{di} = \frac{\sigma_{raz}}{\sigma_{i \max}} \quad (4)$$

Minimalna od vrednosti S_{di} dobijene za različite delove sistema, prema razmatranim grančnim stanjima, daje koeficijent S_s koji karakteriše čvrstoću sistema u celini.

Verovatnoća otkaza P određuje se po završenom procesu statističkog modeliranja kao odnos

$$P_{d(s)} = \frac{N\sigma_d(s)}{N} \quad (5)$$

gde je:

$N\sigma$ — broj slučajeva pri kojima je po jednom grančnom stanju $S\sigma < 1$,

N — broj ispitivanja.

Ovde kao problem može da se javi određivanje maksimalnog opterećenja u sistemu. Ukupno opterećenje delova sistema treba da uzme u obzir:

- opterećenje izazvano savlađivanjem otpora pri radu sistema,
- dinamičko opterećenje zbog uticaja okolne sredine,
- dinamičko opterećenje izazvano unutrašnjom dinamikom sistema.

Dinamičko opterećenje izazvano unutrašnjom dinamikom sistema karakteriše delovanje oscilatornih procesa i dopunskih opterećenja na sistem, koja se javljaju kao posledica netačnosti pri izradi i montaži elastičnih deformacija spregnutih parova (na primer kod zupčanika i ležajeva), kao i habanja delova sistema.

Zupčasti prenosnici, koji ulaze u sastav većine mašinskih sistema, su aktivni izvor pojave oscilatornih procesa u sistemu, što u najvećoj meri zavisi od njihovih konstruktivnih i tehnoloških parametara. Tehnološki parametri u znatnoj meri određuju intenzitet unutrašnjih oscilacija sistema, zbog nebalansiranosti obrtnih delova prenosnika, netačnosti pri izradi i različitog stepena deformacije elemenata zupčanika.

Formiranje oscilatornog procesa u sistemu određuju pored toga i elastično-inercijalni parametri delova sistema, čija veličina i uzajamna povezanost zavise od strukture sistema.

Prema tome dinamika sistema i njegov režim opterećenja uslovjeni su kako spoljašnjim tako i unutrašnjim izvorima oscilovanja. Zbog toga se pri projektovanju mašinskih sistema vodi računa o tome da se frekvencije oscilovanja od spoljašnjih uticaja razlikuju od sopstvenih frekvencija delova sistema, odnosno izbegavaju se opasne rezonantne zone.

Za određivanje dinamičkog opterećenja sistema može da se koristi prenosna funkcija sistema, koja u sebi sadrži amplitudno-frekventnu i faznu karakteristiku i pokazuje promenu spoljašnjih uticaja (njegovu amplitudu i fazu) pri prolazu kroz sistem.

ODREĐIVANJE KARAKTERISTIKA IZDRŽLJIVOSTI I RADNOG NAPONA KOD ZUPČANIKA

U procesu eksploracije zupčanika može da se javi veći broj graničnih stanja od kojih svako može da doveđe do otkaza. Sledeća granična stanja se najčešće javljaju:

- čvrstoća podnožja zubaca,
- piting,
- zajedanje,
- habanje bokova zubaca.

Dva granična stanja će biti ovde razmatrana, i to s obzirom na čvrstoću podnožja zubaca i s obzirom na piting. Treba primetiti da se lom zubaca zupčanika najčešće javlja u podnožju zupca, ali takođe može da se javi i na delu glave zupca. Prelom može da se javi zbog zamora ili preopterećenja. Preopterećenje je rezultat udara i dovodi do iznenadnog otkaza, dok prelom od zamora dovodi do postepenog otkaza.

Prema ISO preporukama dokumenti TC 60-WG 6 201 E, 193 E, proračun radnog napona u podnožju i na bokovima zubaca vrši se prema sledećim izrazima:

$$\sigma_H = Z_H Z_\epsilon Z_\beta Z_E \sqrt{\frac{W_t}{d_1} \frac{u+1}{u} K_{H\alpha} + K_{H\beta}} \quad (6)$$

$$\sigma_r = \frac{W_t}{m_n} Y_F Y_\epsilon Y_\beta K_{F\alpha} K_{F\beta} \quad (7)$$

gde su:

u — prenosni odnos,

W_t — jedinična merodavna sila,

$K_{H\alpha}, K_{F\alpha}$ — faktori raspodele opterećenja u čeonoj ravni,

Y_F, Z_H	— faktor oblika boka zupca,	$S_{lg R_{lim}} = 0,434 \text{ m} \quad V$	(10)
Y_E, Z_E	— faktori raspodele opterećenja,	gde su:	
Y_β, Z_β	— faktori ugla nagiba zupca,		
Z_E	— faktor elastičnosti,		
d_1	— prečnik podeonog kruga,		
m_n	— normalni modul.		

Dosadašnja istraživanja karakteristika zamora za materijale od kojih su izgrađeni zupčanici, dozvoljavaju da raspodela veličine R_{lim} može da se uzme kao normalna ili log-normalna. Osnovne karakteristike veličine $\lg R_{lim}$ za normalni zakon raspodele su srednja vrednost $\lg \bar{R}_{lim}$ i srednje kvadratno odstupanje $S_{lg R_{lim}}$.

Srednja vrednost logaritma raspoloživog resursa dana je izrazima:

□ s obzirom na bok

$$\lg \bar{R}_{H_{lim}} = m_H \lg \bar{\sigma}_{Hk} + \lg N_{H_0} \quad (8)$$

□ s obzirom na podnožje

$$\lg \bar{R}_{F_{lim}} = m_F \lg \bar{\sigma}_{Fk} + \lg N_{F_0} \quad (9)$$

gde su:

N_{H_0}, N_{F_0} — bazni broj ciklusa
 m_H, m_F — koeficijent nagiba krive izdržljivosti

$$\bar{\sigma}_{Hk} = \bar{\sigma}_{F_{lim}} Z_L \cdot Z_R \cdot Z_V \cdot Z_W \cdot Z_X$$

$$\bar{\sigma}_{Hk} = \bar{\sigma}_{H_{lim}} \frac{Y_{sr}}{Y_{sa}} \cdot Y_\delta \cdot Y_X \cdot Y_R \cdot K_{Fc}$$

$\bar{\sigma}_{H_{lim}}, \bar{\sigma}_{F_{lim}}$ — srednje vrednosti dinamičke izdržljivosti,
 Z_R, Y_R — faktor hraptavosti,
 Z_X, Y_X — faktor veličine zupca,
 Z_V — faktor brzine klizanja,
 Z_W — faktor tvrdoće spregnutih bokova,
 Y_δ — faktor relativne osetljivosti na rez,
 $Y_{sr} = 2,1$ — faktor koncentracije napona modelnog zupčanika,
 Y_{sa} — faktor koncentracije napona proračunavanog zupčanika,
 K_{Fc} — faktor asimetrije ciklusa

Srednje kvadratno odstupanje se može odrediti na osnovu sledeće jednačine:

V_H, V_F — koeficijenti varijacije.

Za materijale od kojih se izrađuju zupčanici, a na osnovu eksperimenata, utvrđeno je da se koeficijenti varijacije kreću u granicama:

$$V_H = 0,10 - 0,12 \text{ i}$$

$$V_F = 0,06 - 0,11.$$

ZAKLJUČAK

Na osnovu napred izloženog se može zaključiti sledeće:

1. Problem prognoziranja stanja mašinskih sistema u eksploataciji je od izuzetnog značaja zbog mogućnosti sprečavanja otkaza sa katastrofalnim posledicama. Istovremeno, ovaj problem je vrlo kompleksan zbog velikog broja uticajnih parametara stohastičkog karaktera.

2. Izložena metoda prognoziranja pouzdanosti se zasniva na statističkom modeliranju i pruža mogućnost razmatranja velikog broja uticajnih parametara. Na taj način se simuliranje rada sistema u velikoj meri približava realnim uslovima eksploatacije.

3. Zbog velikog broja uticajnih parametara ova metoda prognoziranja pouzdanosti zupčastih parova je vrlo efikasna. Tačnost ove metode umnogome zavisi od broja »testova«.

LITERATURA

1. BIRJUKOV M. P., 1980, Dinamika i prognozirajući raschet mehaničkih sistem, »Vještaja škola«, Minsk, SSSR.
2. VELIMIROVIĆ V. M., MILTENOVIĆ Đ. J., 1981, Prognoziranje pouzdanosti u procesu konstruisanja, Metode konstruisanja i primena računara u konstruisanju, Zagreb.
3. NEDELJKOVIĆ J. M., VELIMIROVIĆ V. M., MILTENOVIĆ Đ. V., 1980, Optimierung der Geometrie und Bestimmungen der Zuverlässigkeit von Zahnradoaren mit Hilfe der Rechentechnik, Proc. of 25. Intern. Wiss. Koll. TH Ilmenau, DDR.
4. MILTENOVIĆ Đ. V., 1979, Prilog proučavanju pouzdanosti i trajnosti plameno kaljenih zupčanika po kriterijumu čvrstoće podnožja zubaca, Magistarski rad, Mašinski fakultet Niš.

LIN FU SHENG, V. IVUŠIĆ, M. JAVOR

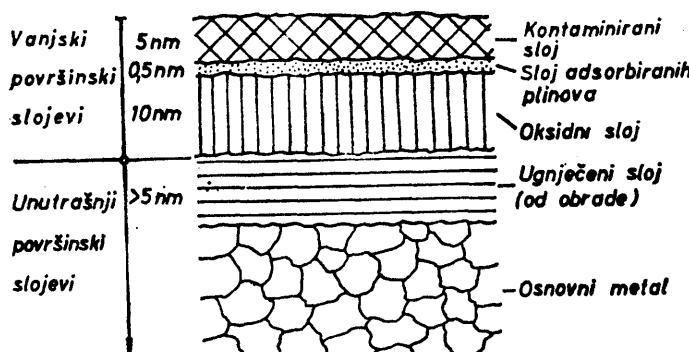
Utjecaj nitriranja na adhezijsko trošenje kod pokusa s 4 kuglice

UVOD

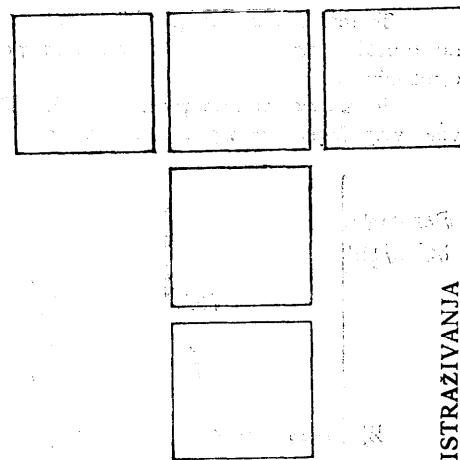
U situaciji kada dvije metalne površine dođu u kontakt, pojavljuju se adhezijske sile koje mogu dovesti do mjestimičnog mikrozavarivanja u točkama stvarnog kontakta dviju površina. Ukoliko se radi o dva dijela nekog tehničkog sistema, koji se istovremeno dodiruju i gibaju jedan u odnosu na drugi, kao rezultat raskidanja mikrozavarenih spojeva pojavljuje se trošenje poznato kao adhezijsko trošenje. Adhezijsko trošenje predstavlja najveći problem kod tehničkih sistema koji, iz razloga ekonomičnosti (ušteda prostora, materijala, energije), ne mogu biti dimenzionirani tako da se već niskom razinom naprezanja izbjegne pojava makrozavarivanja tarnog para. Takvi sistemi su npr. i zupčasti prijenosnici motornih vozila kod kojih, uz visoke specifične pritiske u nominalno kotrljajućem kontaktu, postoji i klizno relativno gibanje između elemenata u paru.

ADHEZIJSKO TROŠENJE I MOGUĆNOSTI ZAŠTITE

Adhezijske sile zavise od kristalne i elektronske strukture površina u kontaktu, [1]. Sklonost stvaranju mikrozavarenih spojeva naziva se kompatibilnost i ona je najveća kod potpuno čistih metalnih površina. Eksperimentalno određivanje kompatibilnosti odnosno inkompatibilnosti pričinjava dosta poteškoća, najviše zbog problema koje stvaraju reakcije metalnih površina s okolinom. Na realnim metalnim površinama uvek postoje produkti interakcija s okolinom. Ti produkti čine vanjske površinske slojeve, slika 1.

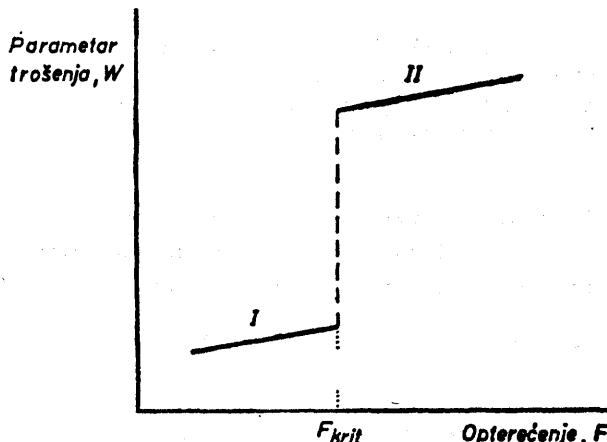


Sl. 1 — Shematski prikaz slojevite građe metalne površine iz [1]



Budući da interakcija između metalnih površina i okoline može rezultirati velikim brojem kombinacija površinskih slojeva (obzirom na njihov stvarni sastav i debљine), prikaz na slici 1 ima samo orientaciono značenje.

Do stvarnog kontakta metal — metal u tarnom paru može doći samo ako se vanjski površinski slojevi mehanički odstrane, a to se dešava tek kod nekog kritičnog opterećenja. Kritično opterećenje može se odrediti praćenjem nekog od parametara trošenja (gubitak težine ili volumena, promjena dimenzija) s porastom opterećenja, kako je prikazano na slici 2.



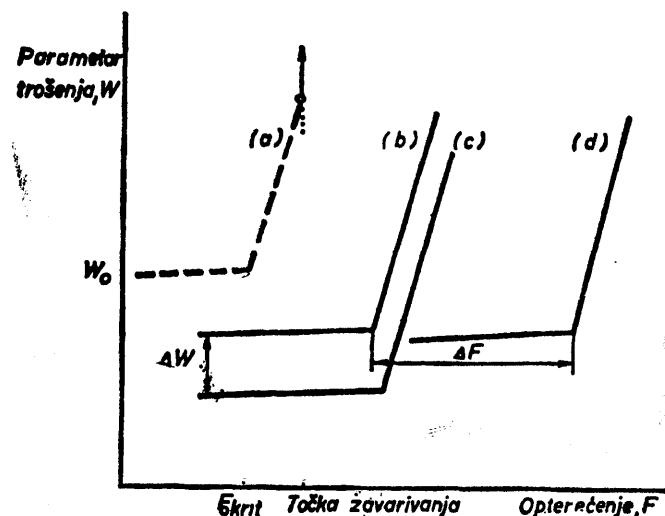
Sl. 2 — Ovisnost parametra trošenja o opterećenju u kliznom kontaktu tarnog para metal — metal, prema [2]

U dijagramu na slici 2 postoje dva područja. U području I opterećenje nije dovoljno visoko da probije oksidni sloj. Trošenje u području I je minimalno jer zahvaća samo vanjske površinske slojeve. Takvo trošenje obično se naziva umjerenom, blago ili normalno trošenje a također i oksidacijsko trošenje jer se troši uglavnim oksidni sloj.

Ukoliko opterećenje poraste iznad kritične vrijednosti (F_{krit}), oksidni sloj se troši brže nego se može obnavljati te dolazi do direktnog kontakta metal — metal. Trošenje u području II naziva se intenzivno ili metalno trošenje jer zahvaća metalnu osnovu. Ono je obično za nekoliko redova veličine veće nego u području I. Oslobođanje velike količine toplinske energije i porast temperature može dovesti i do makrozavarivanja dijelova u kontaktu. Trenutak nastajanja metalnog tj. adhezijskog trošenja obično se označava kao početak zaribavanja.

Tehnički sistemi projektiraju se tako da se izbjegne metalno trošenje, uz mogućnost podnošenja što većih opterećenja.

Jedan od načina pomicanja kritičnog opterećenja na više vrijednosti je upotreba maziva, slika 3.



Sl. 3 — Karakter trošenja sistema s graničnim podmazivanjem, prema [1]

Krivulja (a) opisuje ponašanje sistema metal — metal kod suhog trenja. Uz niska opterećenja proces trošenja zahvaća samo oksidni sloj i parametar trošenja W_0 je relativno nizak, ali se naglo povećava kada opterećenje prijeđe kritičnu vrijednost F_{krit} . Opterećenje kod kojega nastaje makrozavarivanje dijelova sistema naziva se točka zavarivanja.

Krivulja (b) vrijedi za slučaj podmazivanja istog sistema s baznim uljem. Parametar trošenja je nešto niži a kritično opterećenje nešto veće u odnosu na slučaj (a).

Dodavanjem kemijskih aditiva baznom ulju mogu se postići dva efekta:

1. smanjenje parametra trošenja za iznos ΔW , krivulja (c). Aditivi kojima se postiže ovakav efekt nazivaju se aditivi protiv trošenja.
2. pomicanje kritičnog opterećenja za iznos ΔF tj. povećanje opteretivosti sistema, krivulja (d). Aditivi koji izazivaju ovakav efekt nazivaju se aditivi za visoke pritiske.

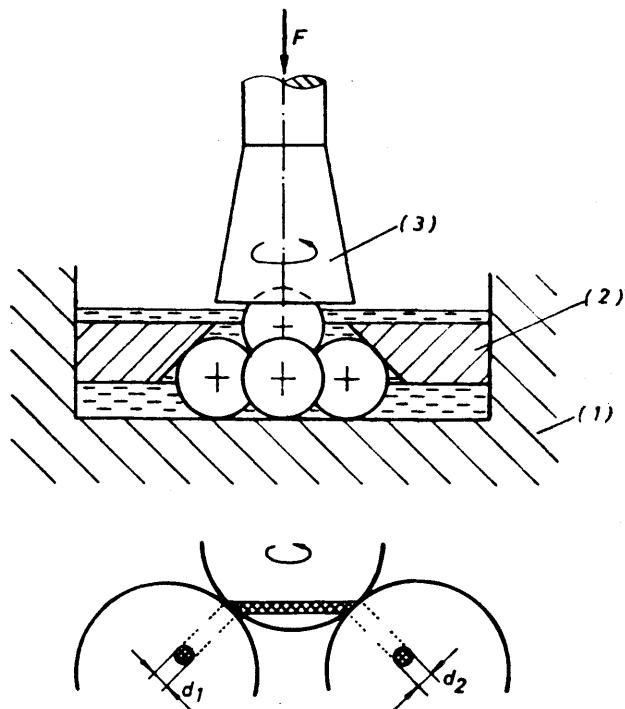
Opteretivost sistema može se povećati i termokemijskim obradama, kojima se na površini metala stvaraju slojevi daleko otporniji nego spontano nastali oksidni slojevi. U tehničkoj praksi nitriranje se pokazalo kao vrlo efikasan način zaštite metalnih površina od adhezijskog trošenja.

Svrha ovoga rada je da se ispita mehanizam zaštitnog djelovanja nitriranja na metalne površine u kliznom kontaktu.

EKSPERIMENTALNI POSTUPAK

Uredaj i metoda

Budući da je cilj rada određivanje efikasnosti nitriranja u pogledu zaštite od adhezijskog trošenja, potrebno je iznaci kriterije na temelju kojih se o toj efikasnosti može suditi. Početak zaribavanja i točka zavarivanja su pokazatelji efikasnosti zaštite pa je zbog toga izabrana standardna metoda s četiri kuglice kojom se ti parametri određuju. Metoda i uređaj definirani su standardom ASTM D 2783-71 [3]. Princip rada uređaja prikazan je na slici 4.



Sl. 4 — Shematski prikaz rada uređaja s 4 kuglicama

Tri kuglice učvršćene su u nosaču (1) pomoću prstena (2) i prekrivene uljem. Četvrta kuglica učvršćena je u držaću (3) koji se zajedno s njom okreće s 1770 okretaja u minuti. Opterećenje F prenosi se preko rotirajuće kuglice ravnomjerno na tri mirujuće kuglice. Istrošenje mirujućih kuglica je u obliku kalote, a rotirajuće kuglice u obliku prstena, kako je prikazano na slici 4.

Ispitivanje se provodi u seriji pokusa uz postupno povećanje opterećenja. Pojedinačni pokusi izvode se s određenim opterećenjem u trajanju od deset sekundi. Poslije svakog pokusa mjere se promjeri kalota istrošenja d_1 , d_2 , d_3 i srednje vrijednosti unose u dijagram »promjer kalote — opterećenje«. Za svaki pokus koriste se četiri nove kuglice, a opterećenje se povećava do pojave zavarivanja. Točkom zavarivanja također se smatra opterećenje koje napravi kalotu promjera 4 mm.

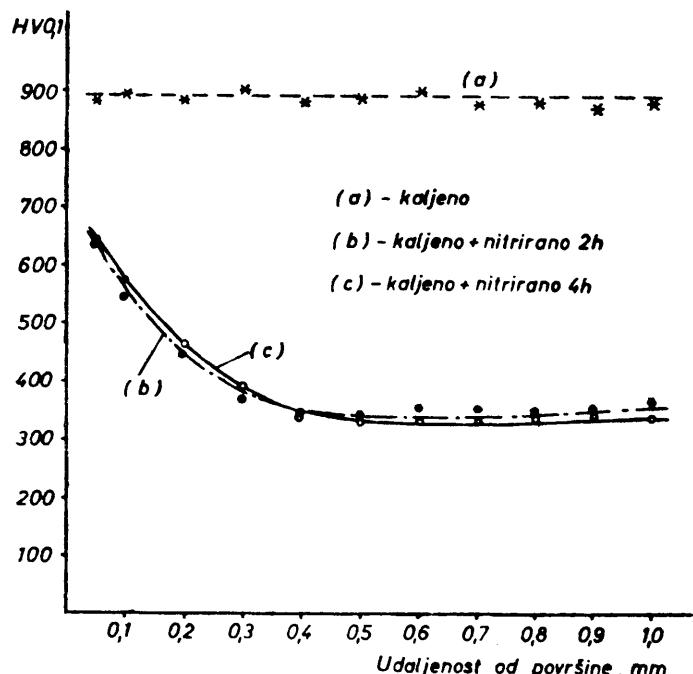
Maksimalno opterećenje na uređaju iznosi 7848 N.

Pokusni materijal

U svim pokusima korišteno je bazno ulje SAE-10 bez ikakvih dodataka.

Materijal kuglica bio je Č. 4146 u dva stanja: kaljeno i kaljeno + nitrirano. Originalne kaljene kuglice promjera 12,7 mm kakve se, prema standardu [3], koriste za pokuse na uređaju s 4 kuglice imale su ulogu kontrolnog uzorka. Iste takve kuglice bile su nitrirane postupkom Tenifer na temperaturi 580°C. Parametar vremena bio je variran: 2 sata i 4 sata, kako bi se dobole dvije različite dubine nitriranja.

Različita stanja materijala kuglica karakterizirana su različitim krivuljama tvrdoće određenim na normalnom presjeku kuglica, kako je prikazano na slici 5.



Sl. 5 — Dijagram toka tvrdoće po presjeku kuglica (prije pokusa)

Držanje kaljenih kuglica na temperaturi 580°C kod nitriranja izazvalo je popuštanje osnovnog materijala što se vidi iz krivulja tvrdoće (b) i (c).

Efektivne dubine nitriranja, određene prema DIN 50190, iznosile su:

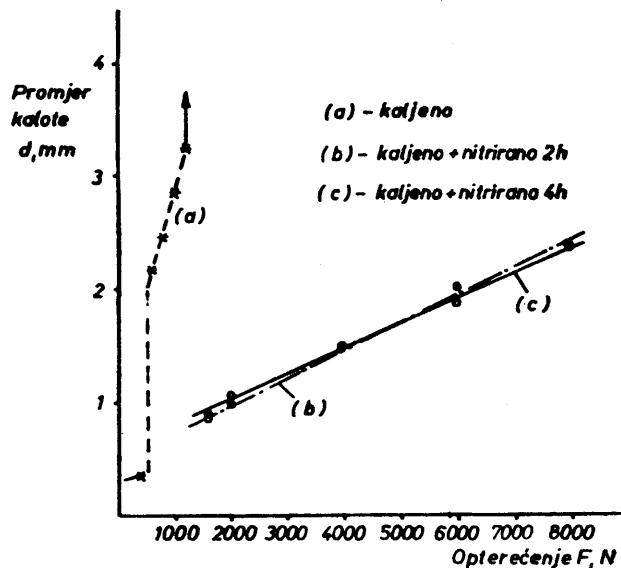
- za kuglice (b) nitrirane 2 sata . . . $E_{dn} = 0,24 \text{ mm}$
- za kuglice (c) nitrirane 4 sata . . . $E_{dn} = 0,32 \text{ mm}$

REZULTATI I DISKUSIJA

Rezultati pokusa na uređaju s četiri kuglice dani su u dijagramskom obliku na slici 6.

Kod kaljenih kuglica zaribavanje počinje već kod opterećenja od 589 N, a zavarivanje kuglica nastaje kod 1177 N.

Kod nitriranih kuglica nema nikakvih naglih promjena promjera kalote istrošenja, što pokazuje da je mehanizam nastajanja oštećenja ostao isti u cijelom području



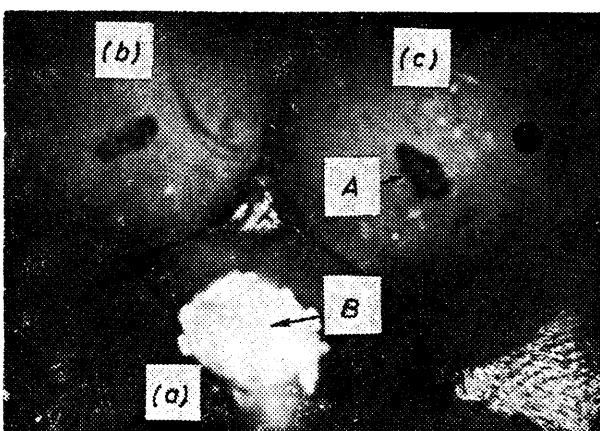
Sl. 6 — Ovisnost promjera kalote istrošenja o opterećenju

opterećenja. Zavarivanje se nije pojavilo niti kod maksimalnog opterećenja od 7848 N.

Kod standardnog pokusa s 4 kuglice upotrebom ulja s aditivima za visoke pritiske mogu se postići točke zavarivanja reda veličine 4000 N. Na temelju usporedbe ovog podatka i rezultata pokusa s nitriranim kuglicama moglo bi se zaključiti da nitriranje zaštićuje od zaribavanjadaleko bolje nego ulja s aditivima za visoke pritiske. Ipak, treba uzeti u obzir da su mehanizmi djelovanja različiti. Nitrirani sloj ne obnavlja se kontinuirano kao što je to slučaj sa slojevima koji nastaju kao produkti reakcije između aditiva i metalnih površina. Zato bi tek trebalo istražiti korelaciju između rezultata dobivenih u ovom radu i ponašanja stvarnih sistema u uvjetima eksploatacije.

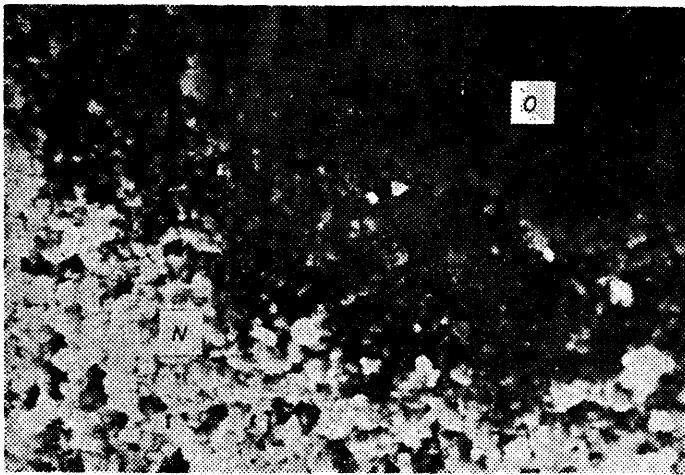
Objašnjenje rezultata dobivenih u ovom radu treba potražiti u struktURNIM razlikama površina kuglica koje su bile u kontaktu.

Najveće postignute kalote istrošenja za sve tri grupe ispitivanih kuglica prikazane su na slici 7.

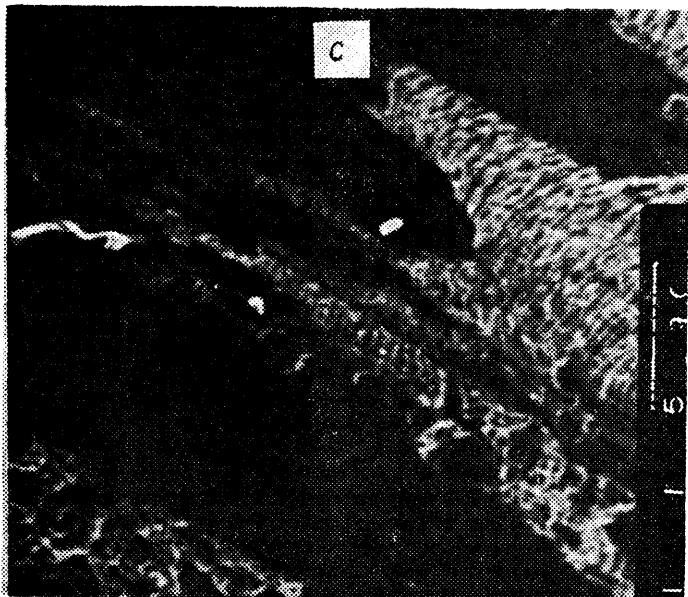


Sl. 7 — Najveće kalote istrošenja za kaljene kuglice (a) uz opterećenje od 1177 N i za nitrirane kuglice (b) i (c) uz opterećenje od 7848 N. Povećanje 2:1

Uvećani detalji oštećenih površina snimljeni na scanning elektronском mikroskopu prikazani su na slikama 8, 9 i 10.



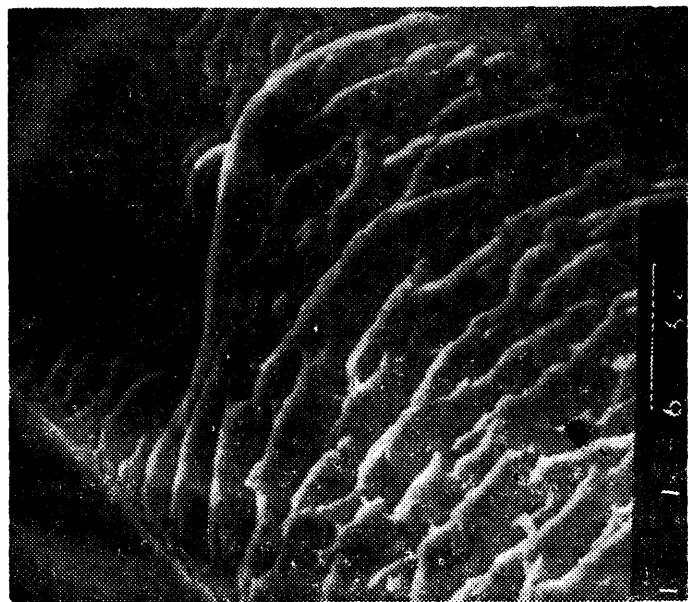
Sl. 8 — Detalj A sa slike 7. Neoštećena nitrirana površina označena je sa N a oštećena površina sa O. Scanning elektronski mikroskop, 3000:1



Sl. 9 — Detalj B sa slike 7. Tamno — površina kalote istošenja mirujuće kuglice. Svjetlo — u daljem postupku dokazano da je to materijal rotirajuće kuglice koji se zavario na mirujuću kuglicu. Scanning elektronski mikroskop, 200:1

Vidljivo je, prije svega, da je kod nitriranih kuglica došlo do znatno manjeg oštećenja uz opterećenje od 7848 N nego kod kaljenih kuglica uz opterećenje od samo 1177 N, slika 7.

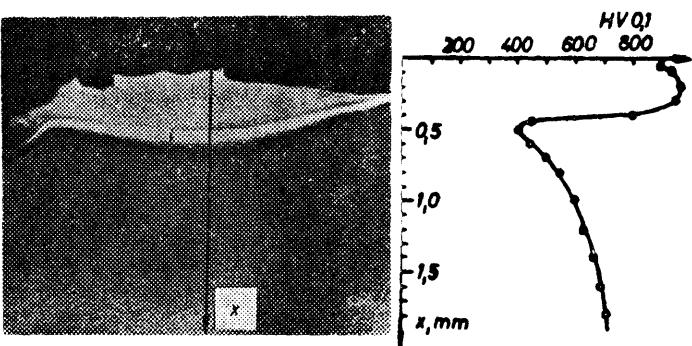
Detaljni snimci na scanning elektronskom mikroskopu otkrivaju da je kod nitriranog sloja došlo do ugnjećenja bez znatnog odnošenja materijala, slika 8, dok je kod kaljenih kuglica došlo do makrozavarivanja i prijelaza materijala s rotirajuće na mirujuću kuglicu.



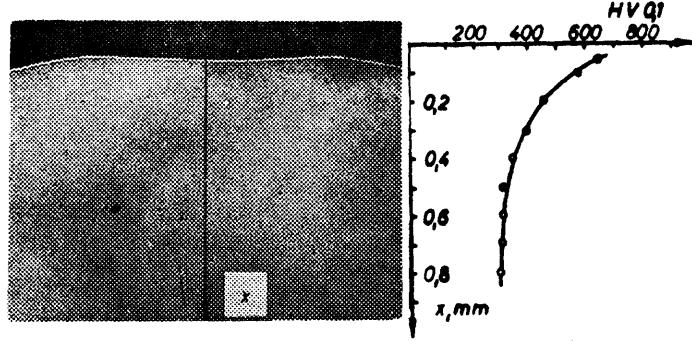
Sl. 10 — Detalj C sa slike 9. Scanning elektronski mikroskop, 1500:1

Ove zaključke potvrđuje metalografsko ispitivanje presjeka kuglica u području kalote i mjerene mikrotvrdće metodom Vickers HV 0,1 s opterećenjem od 0,981 N.

Fotografije mikrostrukture presjeka i tok mikrotvrdće po presjeku prikazani su na slikama 11 i 12.



Sl. 11 — Mikrostruktura i tok mikrotvrdće po presjeku kaljene kuglice kod koje je došlo do zavarivanja. Opterećenje 1177 N. Nagriženo nitalom. Povećanje 25:1



Sl. 12 — Mikrostruktura i tok tvrdoće po presjeku nitrirane kuglice. Opterećenje 7848 N. Nagriženo nitalom. Povećanje 50:1

Na temelju slike 11 može se zaključiti da je kod kaljenih kuglica došlo do makrozavarivanja i prijelaza materijala s rotirajuće na mirujuće kuglice uslijed oslobađanja relativno velike količine topline i povećanja temperature. Kao posljedica promjena temperature nastale su karakteristične promjene izvorne kaljene strukture kuglica. U trenutku neposredno prije prestanka rotacije materijal oko kontaktne zone bio je zagrijan na visoku temperaturu. U trenutku prestanka rotacije materijal koji je bio u austenitnom stanju ohladio se je u ulju brzinom većom od kritične i transformirao se u martensit tj. zakalio se. Na slici 11 to je bijela zona povишene tvrdoće. Ispod te zone nalazi se zona materijala niže tvrdoće uslijed popuštanja pod utjecajem topline oslobođene za vrijeme trajanja kontakta. Tek na udaljenosti od oko 4 mm zona utjecaja topline prestaje i materijal ima tvrdoću ishodne kaljene strukture. Objasnjenje ove pojave značajno je i za općenito razumijevanje procesa adhezijskog trošenja jer i za mikrozavarivanje čestica vjerojatno vrijedi isti slijed događaja.

Kod nitriranih kuglica, zahvaljujući nitriranim sloju koji nije sklon adheziji, nije uopće došlo do kontakta metal — metal. Nitrirani sloj se deformirao prateći plastičnu deformaciju osnovnog materijala bez znatnog oštećenja, slika 12. Tok tvrdoće je ostao isti kao i prije opterećivanja, tako da se može zaključiti da nije došlo do znatnijeg oslobađanja topline. Na ovakvom ponašanju se u stvari temelji djelovanje nitriranja kod uhodavanja. Nitrirani sloj omogućuje prilagođavanje površina putem plastične deformacije podloge bez oslobađanja topline trenja što bi inače, u istim uvjetima, moglo prouzročiti zarivanje.

ZAKLJUČAK

U pokusima na uređaju s 4 kuglice nitriranjem kuglica postupkom Tenifer izbjegnuta je pojava međusobnog zavarivanja kuglica i pri maksimalnom opterećenju od 7848 N, dok su se kaljene kuglice, uz iste uvjete pokusa, međusobno zavarivale već kod opterećenja od 117 N. Ta visoka sposobnost opteretivosti nitriranih čeličnih površina u kliznom kontaktu objašnjena je zaštitnim djelovanjem nitriranog sloja koji sprječava direktni kontakt metal — metal.

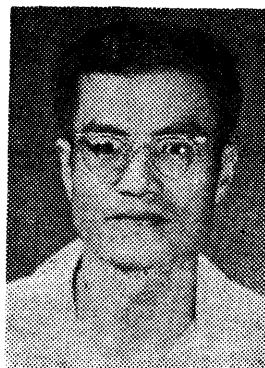
ZAHVALA

Pokusi na uređaju s 4 kuglice obavljeni su u Istraživačkom laboratoriju INA Rafinerije Zagreb. Autori se zahvaljuju osoblju laboratorija, a posebno dipl. inž. Zorki Sečak.

LITERATURA

1. H. CZICHOS; Tribology, a systems approach to the science and technology of friction, lubrication and wear, Elsevier, Amsterdam 1978
2. N. A. WATERMAN; Fulmer Materials Optimizer, Fulmer Research Institute, Slough 1976
3. STANDARD DESIGNATION ASTM D 2783-71

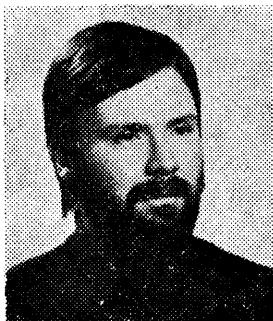
LIN FU SHENG, dipl. inž.



Kandidat tehničkih nauka. Dozent Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nanningu, Guanxi NR Kina.

Roden je 1932. godine. Pored nastavne djelatnosti, bavi se pitanjima vezanim za trenje i trošenje elemenata strojarstva. Sada je na specijalizaciji na Zavodu za materijale, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Mr VINKO IVUŠIĆ, dipl. inž.



Znanstveni asistent na Zavodu za materijale, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Roden je 1946. godine. Diplomirao je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu 1970. godine. Magistrirao na istom fakultetu 1979. godine. Bavi se tribologijom i izborom materijala.

MILKA JAVOR, dipl. inž.



Asistent Zavoda za materijale, Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Rođena je 1952. godine. Diplomirala je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Od 1977. godine radi kao asistent na Zavodu za materijale, na istom Fakultetu. Pored nastavne djelatnosti bavi se problemima vezanim za izbor materijala.