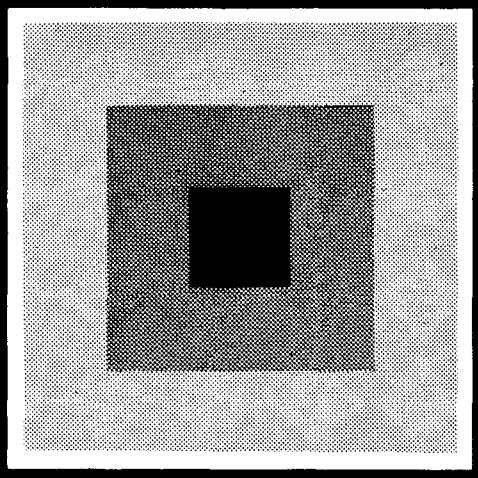
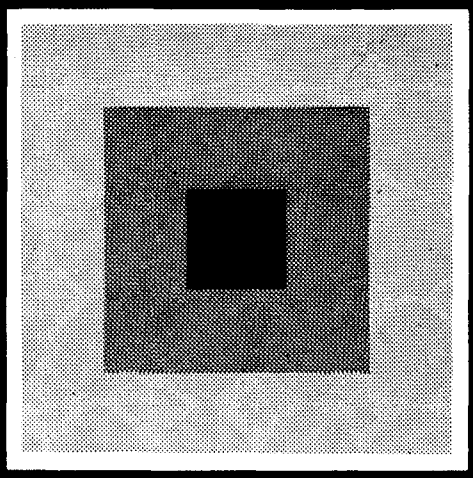
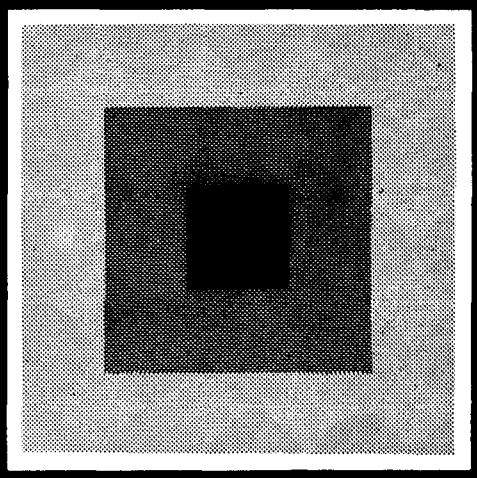
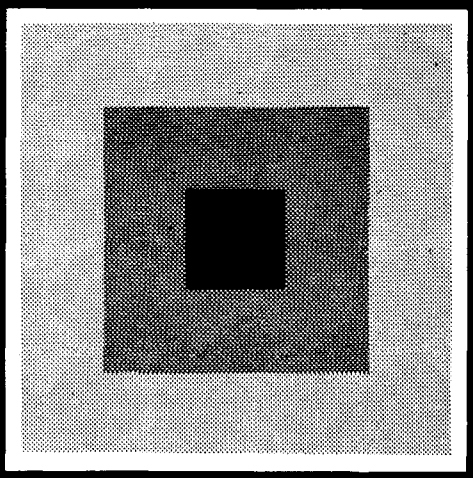
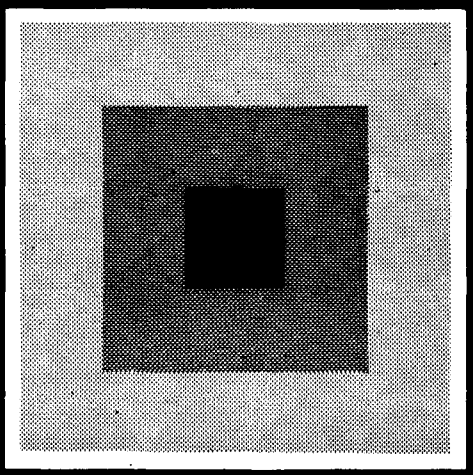
tribologija u industriji

YU ISSN 0351-1642
GODINA II
jun 1980

2

YU ISSN 0351—1642

GODINA II
BROJ 2
JUN 1980.

tribologija u industriji

sadržaj contents содержание

UVODNIK
INTRODUCTION
ПЕРЕДОВИЦА

B. IVKOVIĆ: Tribo-mehanički sistemi u obradi metala rezanjem — Tribo-mechanical System in Metal Cutting — Трибо-механические системы в обработке металлов резанием 3

ISTRAŽIVANJA
RESEARCH
ИССЛЕДОВАНИЯ

D. MILIKIĆ: Određivanje karaktera i veličina habanja na grudnoj i leđnoj površini alata metodom otisaka — Determination of Wearing Characteristics and Extents on Front and Back Tool Surfaces by Moulding Method — Определение характера и величины износа на предней и задней гранях инструмента методом реплик 5

П. И. ЯЩЕРИЦЫН, Ю. В. СКОРЫНИН: Vek trajanja mašina u funkciji uslova obrade osnovnih elemenata — Machine Service Life as Machining Conditions Function of Basig Elements — Технологическая и эксплуатационная наследственость машин 10

Z. PALUNČIĆ: Uticaj sredstava za hlađenje i podmazivanje na vrednost obrade — Influence of Cutting Fluids to Machining Costs — Влияние средств охлаждения и смазки на стоимость обработки 22

ZA NEPOSREDNU PRAKSU
FOR DIRECT PRACTICE
ДЛЯ НЕПОСРЕДСТВЕННУЮ ПРАКТИКУ
. 26

NOVOSTI
NEWS
ИЗВЕСТИЯ
. 28

KNJIGE I ČASOPISI
BOOKS AND JOURNALS
КНИГИ И ЖУРНАЛЫ
. 29

NAUČNI SKUPOVI
SCIENTIFIC MEETINGS
НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ
. 31

REZIMEA
ABSTRAKTS
РЕЗЮМЕ
. 32

B. IVKOVIĆ

Tribo-mehanički sistemi u obradi metala rezanjem

Problemi koji se javljaju u procesu prerade metala, pri svim vrstama obrade, nastaju, dobrim delom, zbog prisustva triboloških procesa na kontaktnim površinama elemenata tribo-mehaničkih sistema, sadržanih u sredstvima rada. Kao što je poznato posledice triboloških procesa je habanje elemenata sredstava rada koje posle određenog vremena može da bude i tako veliko da dovede do prekida njihovog funkcionisanja.

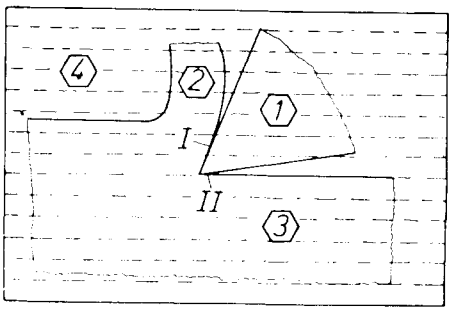
Sredstva rada u industriji prerade metala sadrže, po pravilu, skoro sve vrste tribo-mehaničkih sistema, počev od osnovnog, koji se sastoji iz dva elementa koji klize jedan po drugom u određenoj sredini, pa sve do složenih kod kojih su i geometrija kontaktnih površina i uslovi pod kojima se kontakt ostvaruje izuzetno složeni (zupčasti parovi, kotrljajući ležajevi, proces rezanja itd.).

Kada se govori o tribo-mehaničkim sistemima u industriji prerade metala još uvek se retko pominje tribo-mehanički sistem koji se odnosi na sam proces prerade metala, na primer, na proces rezanja. Pojam »tribologija rezanja« pojavljuje se tek poslednjih godina, ali se sve više koristi, tako da se već i na internacionalnim konferencijama iz oblasti proizvodnog mašinstva javlja sekcija koja nosi upravo ovaj naziv (Tribology metall cutting).

Razmatranje postupka oblikovanja predmeta obrade bilo kojom vrstom obrade metala rezanjem dovodi do zaključka da se višak materijala sa predmeta obrade uklanja ostvarivanjem relativnog kretanja između dva elementa od kojih je jedan alat a drugi predmet obrade. Ovo relativno kretanje izvodi se, po pravilu, u sredini koja je ispunjena fluidom (sredstvo za hlađenje i podmazivanje), a kontakt između alata i predmeta obrade ostvaruje se po grudnoj površini reznog klina alata i strugotine i po leđnoj površini reznog klina alata i obrađenoj površini predmeta obrade. U procesu rezanja strugotina se kreće po grudnoj površini reznog klina alata, a leđna površina reznog klina kreće se po obrađenoj površini predmeta obrade.

Tribo-mehanički sistem u kome se odigrava proces rezanja sadrži, dakle, tri elementa i to rezni alat, strugotinu i predmet obrade između kojih postoji relativno kretanje. Na ova tri elementa nalaze se četiri kontaktne površine tako da se u procesu rezanja formiraju dva klizna para (slika 1). Četvrti element ovog tribo-mehaničkog sistema je sredina u kojoj sistem obavlja svoju funkciju. Ova sredina je uvek ispunjena fluidom, ređe vazduhom, a vrlo često sredstvom za hlađenje i podmazivanje čija je uloga u procesu rezanja poznata.

I — II: KONTAKTNI PAROVI



Sl. 1. — Tribo-mehanički sistem u obradi metala rezanjem

Trenje koje se javlja između oba para kontaktnih površina je trenje klizanja. *Tribološki procesi koji* se razvijaju u kontaktnim slojevima su vrlo intenzivni, a njihova priroda još uvek nedovoljno poznata. Posledice razvoja triboloških procesa i to na sva četiri elementa trnbo-mehaničkog sistema su vrlo velike. Intenzivan razvoj triboloških procesa u kontaktnim slojevima oba para dovodi do prenosa masa u tribo-mehaničkom sistemu i to u svim pravcima. Sa obe kontaktne površine alata masa alatnog materijala prelazi u strugotinu, obrađenu površinu predmeta obrade i sredinu koja okružuje zonu rezanja (sredstvo za hlađenje i podmazivanje). U obrnutom pravcu teče prenos mase materijala sa strugotine i predmeta obrade na rezni klin alata i sredinu. Iz fluida koji ispunjava sredinu u kojoj se kontakt ostvaruje prelaze čestice različitih materijala koji se u njemu nalaze i zadržavaju se na alatu i na predmetu obrade. Materijali sadržani u fluidu, odnosno sredstvu za hlađenje i podmazivanje, vrlo često hemijski reaguju sa materijalima alata i predmeta obrade stvarajući hemijska jedinjenja na kontaktnim površinama i prevlake različitih vrsta.

Upoređenjem ovog tribo-mehaničkog sistema sa drugim tribo-mehaničkim sistemima u kojima se javlja trenje klizanja dolazi se do zaključka da on obiluje većim brojem specifičnosti zbog kojih i postojeće teorije trenja i habanja koje se odnose na slučaj klizanja ne mogu, bez znatnih modifikacija, da budu primenjene.

Osnovne karakteristike tribo-mehaničkog sistema u kome se ostvaruje proces rezanja su sledeće:

- ☐ Po jedan element oba kontaktna para dolazi u dodir sa drugim elementom neprekidno sa novim površinama, dok drugi element u procesu ostvarivanja dodira učestvuje sa istom površinom koja se vremenom lagano menja. U procesu rezanja stalno nove površine strugotine dolaze u dodir (klize) sa istom grudnom površinom alata, a uvek ista leđna površina reznog klina klizi stalno po novoj obrađenoj površini predmeta obrade. Nikada se ne događa da ista strugotina dva puta pređe preko iste grudne površine reznog klina alata, ili da ista leđna površina reznog klina dva puta pređe preko iste obrađene površine predmeta obrade.

- ☐ Razlike u fizičko-hemijskim karakteristikama materijala sva četiri elementa tribo-mehaničkog sistema su, po pravilu, ogromne. Ovo ima značajnog uticaja na razvoj triboloških procesa a posebno na hemijsku prirodu kontakta.

- ☐ Razlike u mikrogeometrijskim karakteristikama kontaktnih površina jednog para (strugotine i grudne površine alata, na primer) su vrlo velike. Hrapavost na površinama strugotine i na obrađenoj površini predmeta obrade je vrlo velika u odnosu na hrapavost obe površine reznog klina alata. Kao posledica ovog stanja javlja se, u procesu ostvarivanja kontakta, mala realna površina kontakta i vrlo veliki realni pritisak.

- ☐ Temperature u zoni kontakta su vrlo visoke u poređenju sa drugim tribo-mehaničkim sistemima i kreću se i do 1273 K. Prisustvo sredstva za hlađenje i podmazivanje u tečnoj fazi pri ovako visokim temperaturama izaziva burne hemijske reakcije koje menjaju prirodu kontaktnih slojeva, pa prema tome i tribološke procese i njihove posledice u značajnoj meri.

Problemi koji u industriji nastaju zbog razvoja triboloških procesa i procesa habanja na reznim elementima

alata u toku prerade materijala rešavaju se poboljšanjem obradivosti konstrukcijskih materijala, povećanjem otpornosti alata na habanje i poboljšanjem kvaliteta sredstava za hlađenje i podmazivanje. Kao parametar sa kojim se meri obradivost materijala, kvalitet reznih alata i kvalitet sredstava za hlađenje i podmazivanje služi postojanost alata koja se definiše kao vreme efektivnog rezanja do pojave kritične pohabanosti reznog alata posle koje on ne može da obavlja dalje svoju funkciju. Pored postojanosti alata mere se, vrlo često, sile rezanja, temperature u pojedinim tačkama zone rezanja i srednja temperatura rezanja. Prirodu triboloških procesa na oba para kontaktnih površina, međutim, još uvek malo poznajemo, pa čak nedovoljno poznajemo i mehanizam procesa habanja elemenata tribo-mehaničkih sistema ove vrste. Po mišljenju autora ovog napisa neophodno je, zbog sve većih problema koji u ovoj vrsti tribo-mehaničkih sistema nastaju (povećani zahtevi za većim brzinama rezanja i kraćim vremenom obrade) razvijati i fundamentalna i primenjena istraživanja interdisciplinarnog karaktera, čiji bi nam rezultati omogućili da upoznamo ne samo mehanizam i razvoj procesa habanja, već i prirodu i razvoj triboloških procesa, kako bismo mogli da preduzmemo mere za njihovo usporavanje i stvaranje uslova za povećanje brzine relativnog kretanja u ovoj vrsti tribo-mehaničkog sistema.

Velike brzine relativnog kretanja u ovoj vrsti tribo-mehaničkih sistema omogućavaju visoku produktivnost rada pri preradi materijala i povećanje dohotka u proizvodnim sistemima iz oblasti prerade metala.

Obaveštenje čitaocima

Na drugoj zajedničkoj sednici Izdavačkog saveta i Redakcije časopisa, održanoj u maju ove godine odlučeno je da se kao naredni korak daljeg usavršavanja časopisa kako po formi, tako i po sadržaju, oformi i postavi rubrika preko koje će se približiti naučna saznanja iz tribologije udruženom radu metaloprerađivačkog kompleksa.

Od ovog broja časopisa će redovno pripremati ovu rubriku pod naslovom ZA NEPOSREDNU PRAKSU.

Cilj redakcije je da časopis »Tribologija u industriji« najneposrednije uključi u proizvodne procese i na taj način utiče na uvećanje ekonomičnosti rada, odnosno na uvećanje produktivnosti i dohotka. Ukupna koncepcija časopisa upravo se temelji na ovoj funkciji. Zadatak rubrike ZA NEPOSREDNU PRAKSU je da određena naučna saznanja popularno i koncizno predstavi i da ih stavi direktno u funkciju proizvodnje. To znači da se udruženi rad ovom rubrikom može koristiti kao uputstvima za najracionalnije izvođenje određene proizvodne operacije.

Očekujemo da će ova rubrika naići na prijem u organizacijama udruženog rada i da će istovremeno biti od pomoći u sve zaoštrenijim uslovima bitke za uvećanje produktivnosti i ekonomičnosti rada. Očekujemo da će inženjeri, tehničari i radnici iz neposredne proizvodnje uticati da se obrade u ovoj rubrici pitanja za koja su posebno zainteresovani.

Očekujemo najtešnju saradnju između naših čitalaca i naučno-stručnih radnika Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, Laboratorije za obradu metala i tribologiju, okupljenih i na uređivanju časopisa »Tribologija u industriji«.

Redakcija

LOMT

nauka i istraživanje
u službi privrede

* minimizacija troškova

* optimizacija proizvodnje

Za uspostavljanje saradnje i sve informacije obratite nam se dopisom ili telefonom.

Laboratorija za obradu metala i tribologiju
Mašinskog fakulteta u Kragujevcu,
34 000 Kragujevac
Ul. Sestre Janjić br. 6

UDK 621.91:620.178.16

D. MILIKIĆ

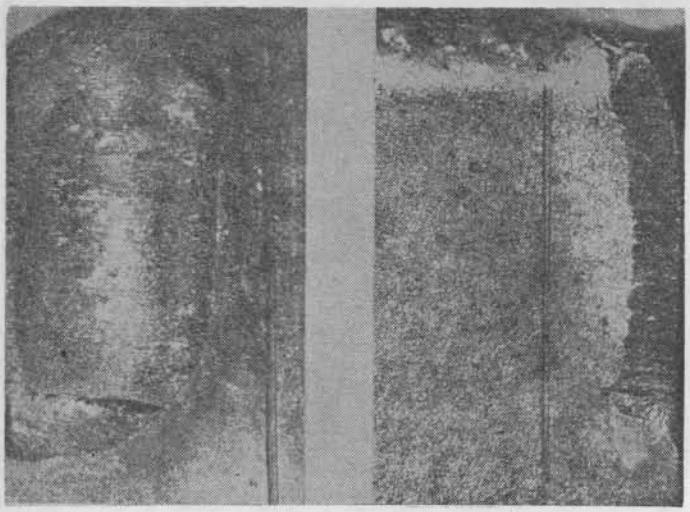
Određivanje karaktera i veličina habanja na grudnoj i leđnoj površini alata metodom otisaka

UVOD

Habanje alata je jedan od najvažnijih parametara koji utiču na ekonomičnost procesa obrade rezanjem. Ono ograničava postojanost alata, tj. vreme u kome je on sposoban za obradu i uzrokuje troškove koji su u vezi sa njegovom promenom i ponovnim oštrenjem.

Habanje alata je posledica opterećenja koje nastaje u zoni kontakta za vreme nastajanja strugotine. Pri tom se ne radi samo o mehaničkim već i o termičkim opterećenjima, koja istovremeno deluju na materijal reznog alata i tako izazivaju različite procese habanja.

Utvrđivanje karaktera i veličina kojima se određuje mera habanja na grudnoj i leđnoj površini alata (slika 1.) tokom rezanja, nije jednostavan i lak zadatak.

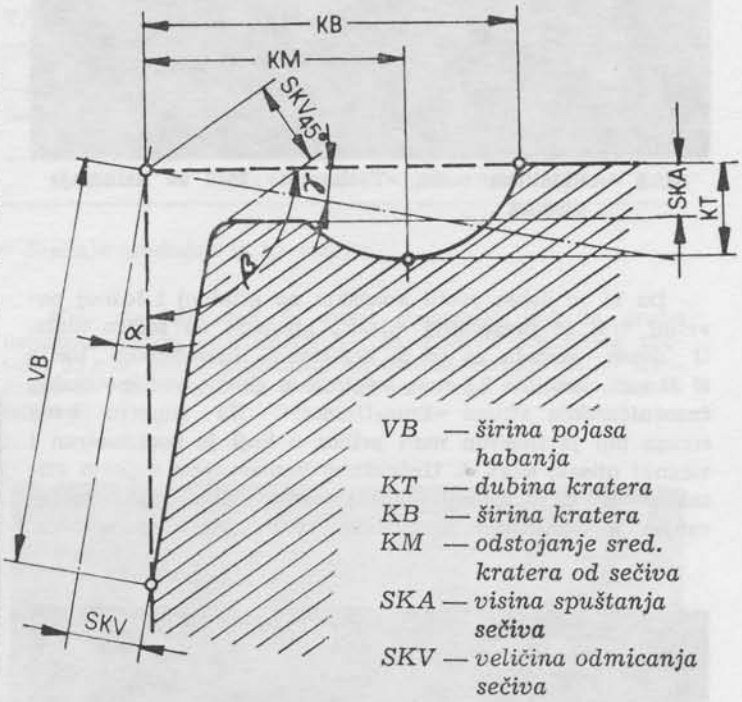


Sl. 1. — Habanje po grudnoj i leđnoj površini alata

Do sada primenjivane metode za određivanje habanja alata omogućavale su uglavnom merenje pojedinih veličina koje karakterišu habanje na grudnoj ili leđnoj površini, ali se do kompletnog profila habanja teže dolazilo.

Koristeći neka iskustva Instituta za tehnologiju i mašine alatke Tehničke visoke škole iz Darmaštata, SR Nemačka [1], autor je u ovom radu detaljno razradio primenu metode otisaka za sveobuhvatno praćenje habanja na grudnoj i leđnoj površini strugarskog noža tokom rezanja.

Kako postojećim standardima nisu obuhvaćene veličine koje karakterišu habanje po grudnoj i leđnoj površini alata, korišćen je ISO predprojekt [2], kao i u praksi najčešće primenjivani sistem označavanja [3]. Slika 2. prikazuje veličine koje karakterišu kompletno habanje na primeru alata sa negativnim grudnim uglom, koje su određivane pri ovim ispitivanjima.



Sl. 2. — Veličine koje karakterišu habanje alata na grudnoj i leđnoj površini pri negativnom grudnom uglu

ODREĐIVANJE KARAKTERA I VELIČINA HABANJA NA GRUDNOJ I LEĐNOJ POVRŠINI ALATA POMOĆU OTISAKA

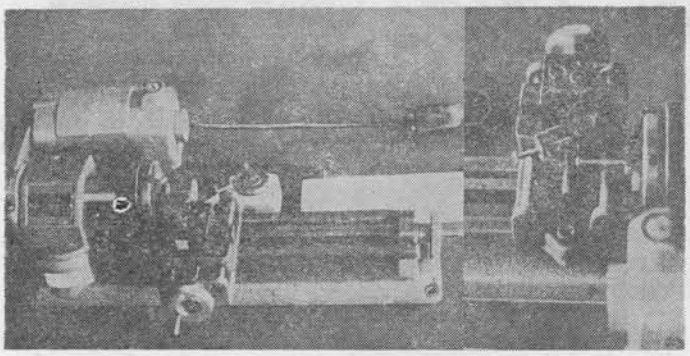
Kao sredstvo za uzimanje otiska kontaktnih površina alata koristi se specijalni dvokomponentni polimer—plastična masa, u ovom slučaju marke »TECHNOVIT« 3040 (crne boje) koji proizvodi firma »Kulzer«, Bad Hamburg — SR Nemačka. Od domaćih sredstava može se koristiti akrilna smola za hladnu polimerizaciju »SIMPLEX«, koju po licenci proizvodi »Galenika«, Beograd. Pošto se ova smola normalno proizvodi u ružičastoj boji potrebno je istu obojiti crnom bojom, dodavanjem npr. grafita u prahu, u cilju dobijanja boljeg kontrasta pod mikroskopom.

Plastična masa »Technovit« 3040, omogućuje veoma tačno i brzo preslikavanje kontaktnih površina alata. U tom cilju potrebno je od finog praha i tečnosti, u težinskom odnosu 2:1, umešati ređu masu. Pomoću jednog staklenog štapića masa se skupi i u vidu kapi nanese na vrh alata sa koga se želi skinuti otisak. Duvanjem toplim vazduhom, na površini kapi se brzo stvori tanka opna koja sprečava njeno razlivanje. Posle kraćeg vremena otisak očvrsne i može se skinuti. To se najjednostavnije čini pomoću jednog nožića koji se pažljivo uvuče između otiska i alata i po-

digne nagore. Izgled korišćenog sredstva i pribora za pripremanje otisaka dat je na slici 3., dok se na sl. 9. vidi izgled gotovog otiska.

Sl. 3. — Plastična masa »Technovit« 3040 za uzimanje otisaka

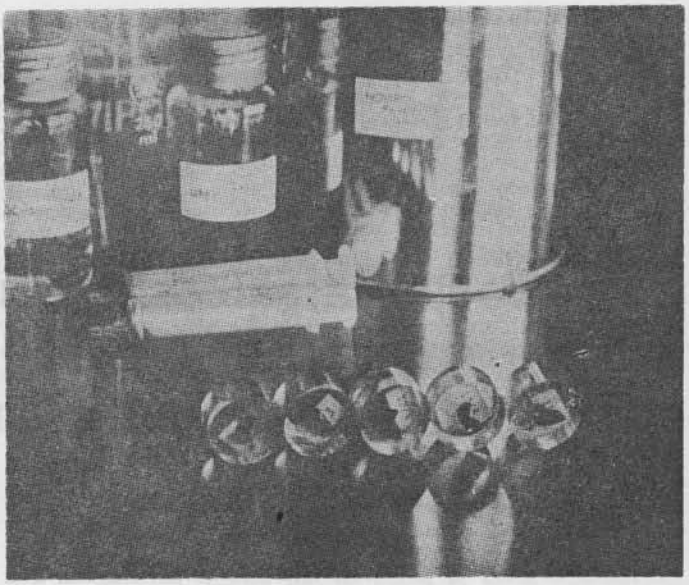
Da bi se dobio profil kontakta na grudnoj i leđnoj površini vrši se presecanje otisaka upravno na sečivo alata. U ovom slučaju za to je korišćeno dijamantsko tocilo Ø 22 mm, debljine 0,3 mm, stegnuto u glavno vreteno malog časovničarskog struga »Ema-Unimat«. Na suportu ovog struga bio je fiksiran mali pribor u koji je pozicioniran i stegnut otisak, slika 4. Uzdružnim pomeranjem suporta otisak se dovodi u željeni položaj prema tocilu (ravan presecanja), a poprečnim pomeranjem vrši njegovo presecanje.



Sl. 4. — Presecanje otisaka upravno na sečivo alata

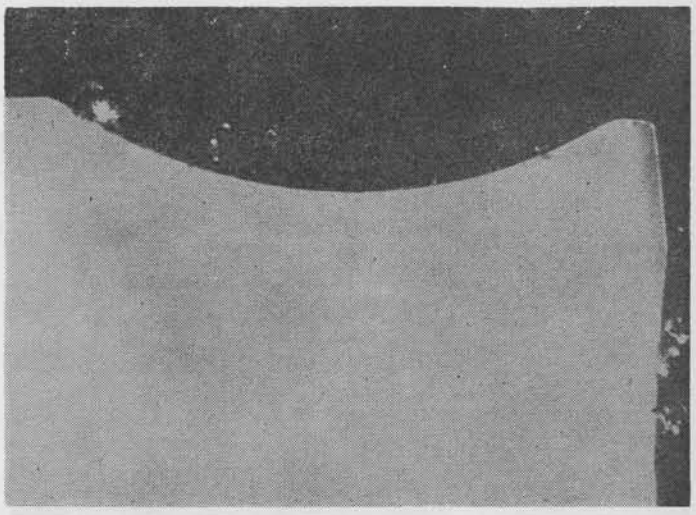
U cilju olakšanja dalje obrade, presečeni otisci se ulivaju u bezbojnu poliestersku smolu, »NOVIPOL« H-200, proizvodnje »HINS«, Novi Sad. Da bi se sprečilo pomeranje otiska za vreme njegovog ulivanja isti se preko odsečene površine zalepi za selotejp traku. Ulivanje se vrši u prstenove Ø 25 mm, širine 15 mm, koji su sa unutrašnje strane fino ostrugani i polirani kako bi se očvrsla masa lakše izvadila napolje.

Ovako uliveni otisci se sa čeone strane fino poravnavaju na strugu, a zatim se vrši njihovo poliranje, slično kao kod pripreme metalografskih uzoraka. Na slici 5. dato je nekoliko ovako pripremljenih otisaka.



Sl. 5. — Izgled nekoliko pripremljenih otisaka

Posmatranjem ovako pripremljenih otisaka pod mikroskopom dobija se jasna slika profila grudne i leđne površine, slika 6., sa koje se lako mogu izmeriti sve veličine koje karakterišu habanje alata na grudnoj i leđnoj površini, označene na slici 2. Crna boja mase za uzimanje otisaka i prozirna masa za njihovo ulivanje omogućuje dobar kontrast pri posmatranju pod mikroskopom.



Sl. 6. — Mikroskopski snimak profila grudne i leđne površine dobijen metodom otisaka

Pošto se većina veličina koje karakterišu habanje na grudnoj i leđnoj površini alata vezuje za vrh reznog klina (slike 2. i 7.), koji zbog habanja menja svoj položaj, to se koristi sledeći postupak za njihovo određivanje.

Na grudnoj i leđnoj površini alata naprave se reperni zarezi, slika 1. i 7., a njihovo odstojanje od vrha (kote A i B) se izmeri na prvom otisku koji se uzme pre početka rezanja. Merenje veličina A i B vrši se tako što se jedna od končanica mikroskopa, koje stoje pod pravim uglom, poklopi sa grudnom površinom alata. Kod otisaka koji slede tokom rezanja mere se na isti način veličine A_1, A_2 i B_1, a potom se vrši računanje parametara habanja, odnosno:

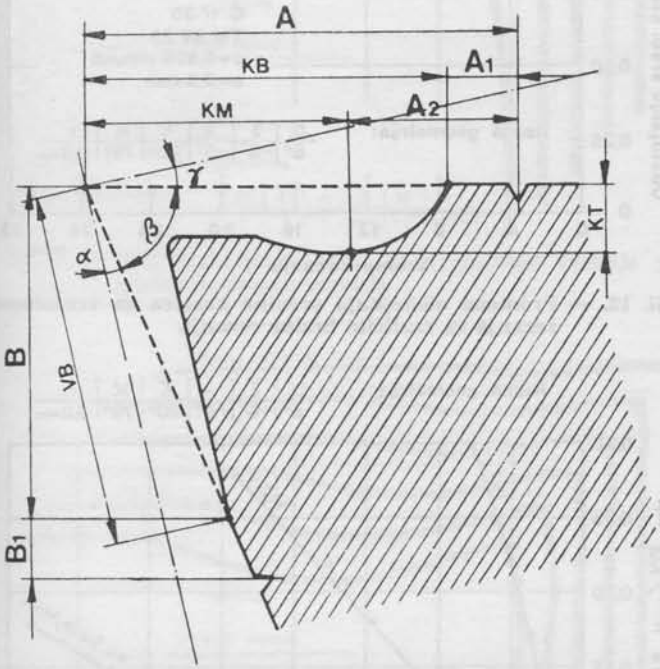
$$KB = A - A_1,\ KM = A - A_2 \text{ i } VB = (B - B_1)\frac{1}{\cos\alpha}$$

— za negativan grudni ugao, odnosno

$$VB = (B - B_1) \frac{\cos \alpha}{\cos (\alpha + \gamma)}$$

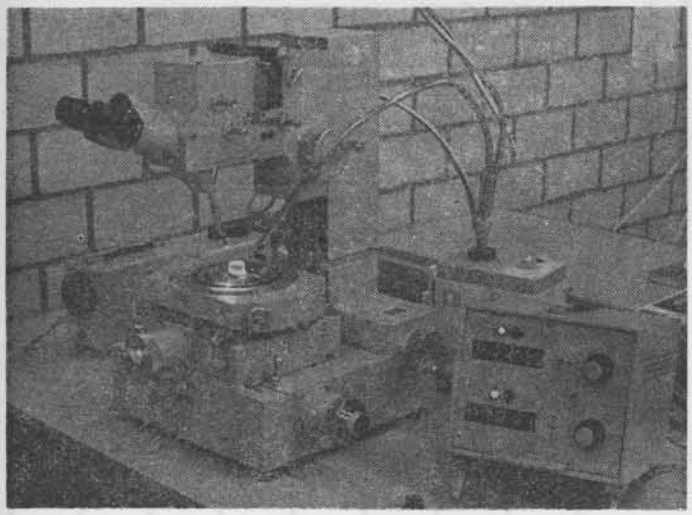
— za pozitivan grudni ugao. Međutim, kako je

zbog relativno malih vrednosti uglova $\cos \alpha \cong 1$ i $\cos (\alpha + \gamma) \cong 1$, to se može uzeti da je u oba slučaja $VB \cong B - B_1$. Dubina kratera (KT) meri se direktno.



Sl. 7. — Indirektno merenje veličina habanja alata sa otiska

U ovim ispitivanjima vršeno je merenje širine pojasa habanja (VB), dubine kratera (KT), širine kratera (KB) i odstojanja sredine kratera od sečiva (KM), a na osnovu izmerenih vrednosti računat je odnos kratera K = KT/KM. Merenja su vršena na digitalnom mernom mikroskopu sa ukrštenim stolom, firme »Carl Zeiss«, Oberkochen/SR Nemačka, slika 8. Opseg povećanja mikroskopa je od 10 do 120 puta, a tačnost očitavanja 2 μm.



Sl. 8. — Digitralni merni mikroskop firme »Carl Zeiss«

Paralelno sa merenjem veličina habanja vršeno je i snimanje profila habanja kako bi se mogla uočiti njegova promena sa vremenom rezanja.

USLOVI PRI EKSPERIMENTALNIM ISPITIVANJIMA

U cilju provere metodologije uzimanja i pripreme otisaka opisane u predhodnom odeljku, vršeno je praćenje karaktera habanja kao i promene svih veličina koje određuju meru habanja na grudnoj i leđnoj površini alata tokom rezanja.

Eksperimenti su sprovedeni za tri različite brzine rezanja i to: $v_1 = 94$ m/min kao mala, $v_2 = 112$ m/min kao srednja i $v_3 = 147$ m/min kao velika brzina rezanja za korišćene vrednosti pomaka i dubine, kao i odabrani materijal obradka.

Vrednosti pomaka i dubine rezanja nisu varirani tokom ispitivanja i iznosili su: pomak s = 0,428/o i dubina rezanja a = 3,5 mm. Prema tome presek režućeg sloja bio je: $A = a \cdot s = 1{,}498$ mm², a njegov koeficijent vitkosti $g = a/s = 8{,}18$.

Ispitivanja su vršena na čeliku za poboljšanje Č 1730 u normalizovanom stanju, za koji su mehanička svojstva i hemijski sastav dati u tabeli 1.

TABELA 1

Mehanička svojstva*		Hemijski sastav*				
Zatezna čvrstoća kp/mm²	Tvrdoća kp/mm²	C %	Si %	Mn %	S %	P %
78	215	0,62	0,22	0,75	0,021	0,016

* Srednje vrednosti iz tri uzorka

Kao alat korišćen je pravi strugarski nož za grubu uzdužnu obradu »PROMAX-A«, sa drškom poprečnog preseka 25 x 25 mm i pločicama od tvrdog metala SNUN kvaliteta SV 25 (odgovara P 25) proizvodnje »Sintal« Zagreb (slika 9).

Sl. 9. — Korišćeni strugarski nož sa pločicama od tvrdog metala proizvodnje »Sintal«

Geometrijski elementi reznog alata nisu varirani i bili su: grudni ugao $\gamma = -6^0$, leđni ugao $\alpha = 6^0$, ugao vrha noža $\varepsilon = 90^0$, napadni ugao $\varkappa = 75^0$, pomoćni napadni ugao $\varkappa_1 = 15^0$, ugao nagiba sečiva $\lambda = -6^0$ i poluprečnik zaobljenja vrha noža r = 0,8 mm.

Sva ispitivanja su obavljena bez primene sredstva za podmazivanje i hlađenje.

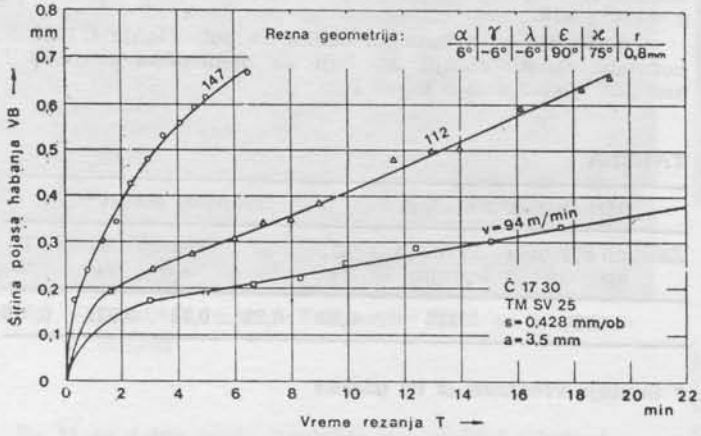
Ispitivanja su sprovedena na univerzalnom strugu »Potisje-Morando« PA 22 sledećih karakteristika: pogonska snaga 11 kW, raspon šiljaka 750 mm, broj obrta glavnog vretena 20 do 2000 o/min (24 stepena), brzina pomoćnog kretanja 0,04 do 9,14 mm/o (48 stepeni).

REZULTATI ISPITIVANJA

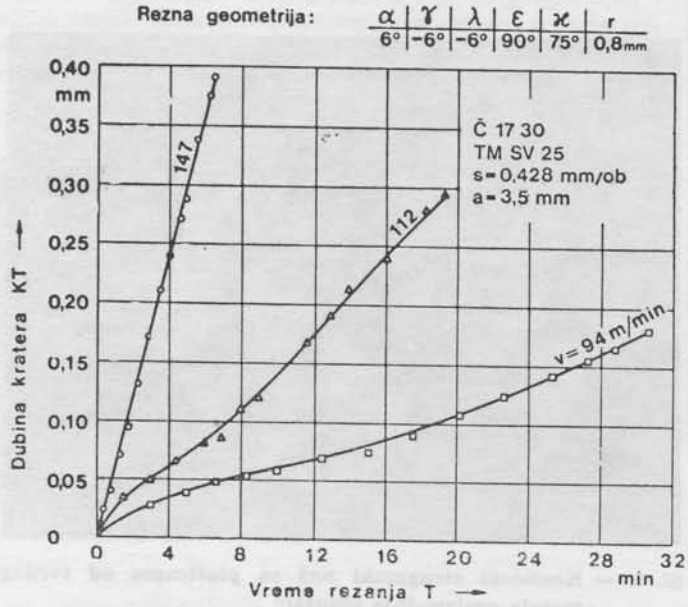
Opiti rezanja vršeni su do potpunog zatupljenja alata. Taj trenutak određivan je na osnovu izrazitog pogoršanja kvaliteta obrađene površine.

Merene veličine su prvo sređivane tabelarno, a na osnovu tih podataka crtani su odgovarajući dijagrami. Radi bolje preglednosti u ovom radu se daje samo dijagramska interpretacija rezultata.

Rezultati merenja promene širine pojasa habanja (VB), dubine kratera (KT), odstojanja sredine kratera (KM), odnosa kratera (K) i širine kratera (KB) sa vremenom rezanja (T), za sve tri brzine rezanja, prikazani su na dijagramima slike 10, 11, 12, 13 i 14.

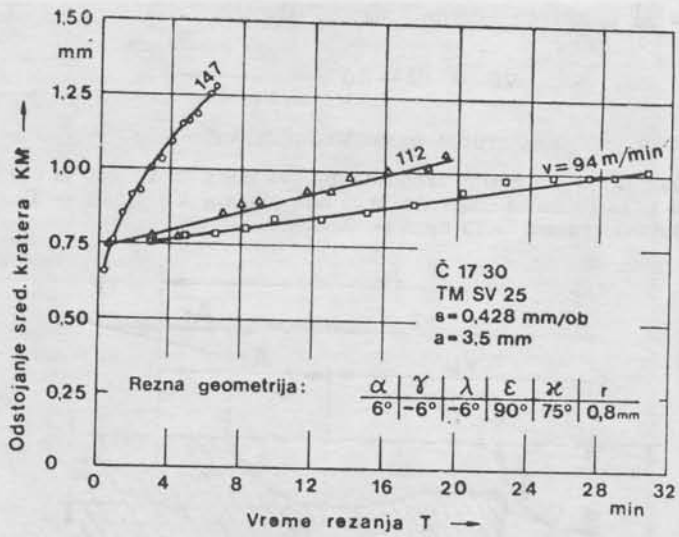


Sl. 10. — Promena širine pojasa habanja sa vremenom rezanja za različite brzine rezanja

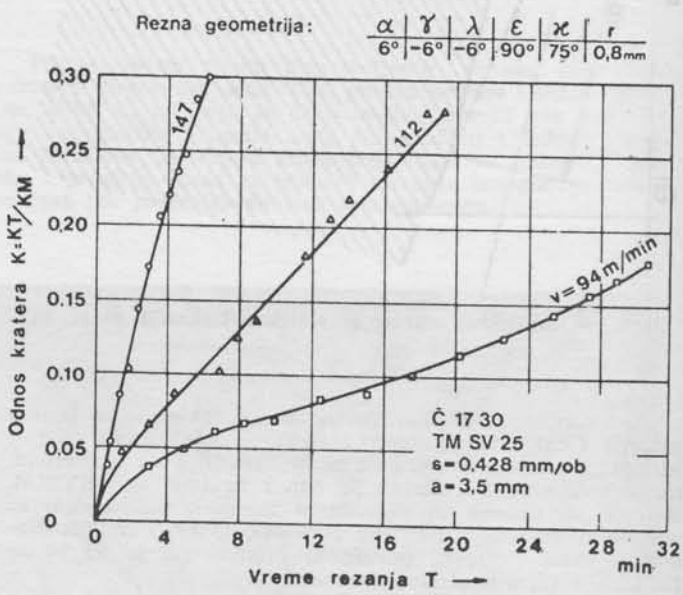


Sl. 11. — Promena dubine kratera sa vremenom rezanja za različite brzine rezanja

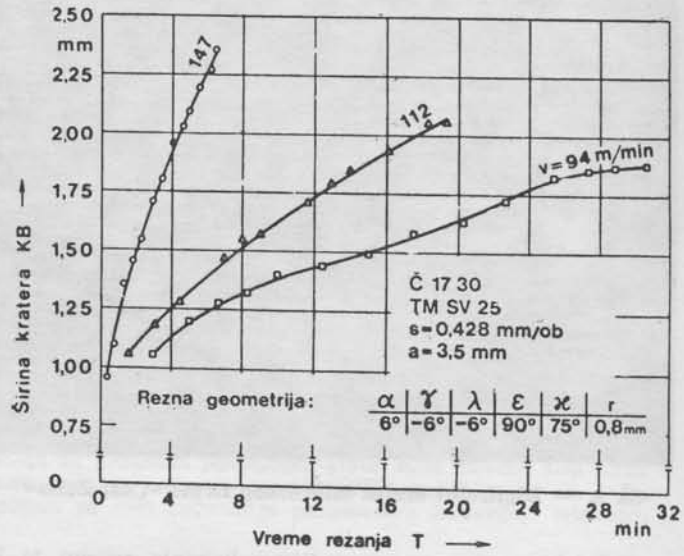
Kao što je napred rečeno uporedo sa merenjem veličina habanja alata vršeno je i snimanje profila habanja u određenim vremenskim razmacima. Korišćenjem ovih snimaka sačinjene su šeme razvoja habanja sa vremenom rezanja za sve tri karakteristične brzine rezanja, slike 15, 16. i 17. Treba napomenuti da je u slučaju manje brzine rezanja (v = 94 m/min) posle 17 34" došlo do krzanja sečiva zbog odvajanja navarene naslage. Od tog trenutka habanje na leđnoj površini bilo je znatno intenzivno, slika 15.



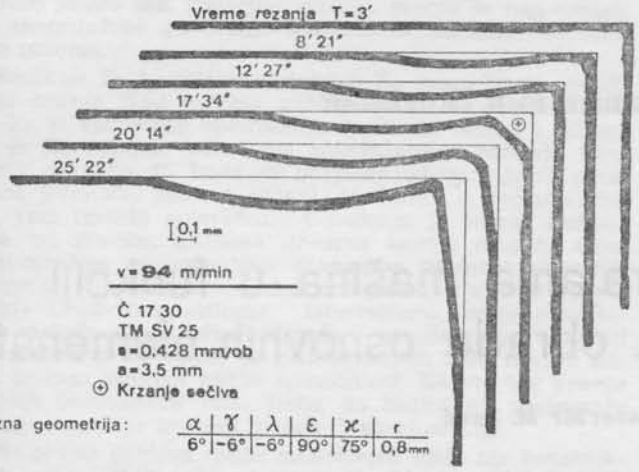
Sl. 12. — Promena odstojanja sredine kratera sa vremenom rezanja za različite brzine rezanja



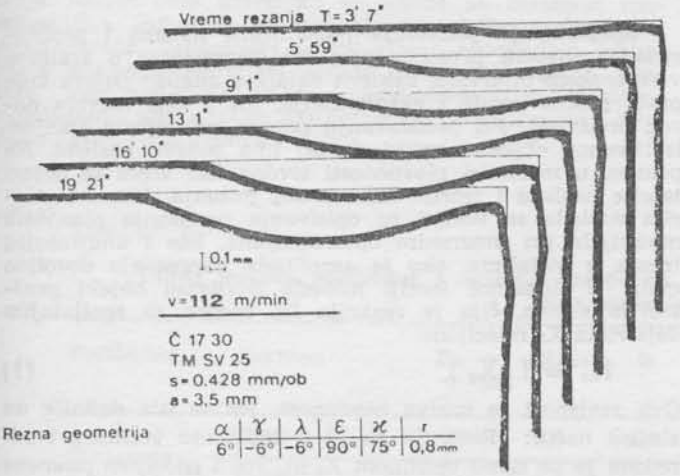
Sl. 13. — Promena odnosa kratera sa vremenom rezanja za različite brzine rezanja



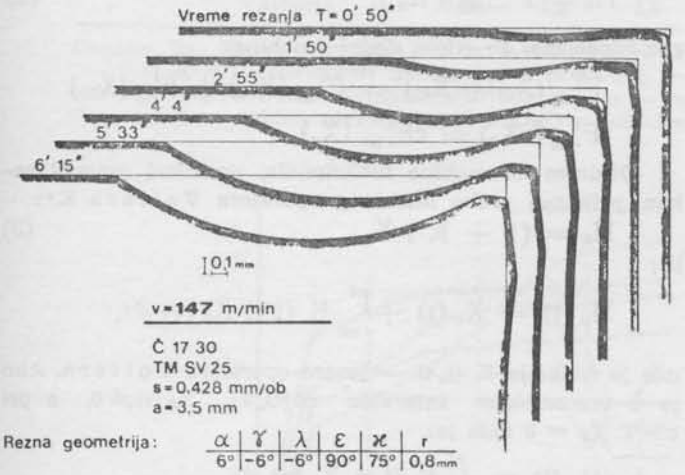
Sl. 14. — Promena širine kratera sa vremenom rezanja za različite brzine rezanja



Sl. 15. — Razvoj habanja alata sa vremenom rezanja pri malim brzinama rezanja



Sl. 16. — Razvoj habanja alata sa vremenom rezanja pri srednjim brzinama rezanja



Sl. 17. — Razvoj habanja alata sa vremenom rezanja pri velikim brzinama rezanja

ZAKLJUČCI

Na osnovu napred izloženog mogu se izvesti sledeći zaključci:

(1) Razrađena metodologija za praćenje veličina i karaktera habanja na grudnoj i leđnoj površini alata pomoću otisaka, pokazala se veoma efikasnom i pouzdanom. Pri tome se rezni alat ne mora skidati sa mašine i ponovo nameštati posle svakog merenja, što je takođe od značaja za razvoj samog habanja zbog eventualne promene položaja.

(2) U poređenju sa drugim do sada razvijenim metodama za određivanje habanja alata, otisak daje puno više informacija o karakteru habanja na grudnoj i leđnoj površini alata.

(3) Rezultati merenja veličina koje karakterišu habanje alata na grudnoj i leđnoj površini, dijagrami slike 10, 11, 12, 13 i 14, dobijeni metodom otisaka, vrlo dobro se slažu sa rezultatima dobijenim primenom drugih, većinom optičkih metoda merenja [4, 5, 6].

(4) Razvoj kompletnog habanja alata, slike 15, 16 i 17, dobijen takođe metodom otisaka, pokazuje neznatne razlike u obliku habanja pri malim, srednjim i velikim brzinama rezanja. Međutim, već pri srednjim, a pogotovo pri velikim brzinama rezanja javlja se deformacija reznog klina alata, što ukazuje na prisustvo visokih temperatura rezanja.

LITERATURA

1. FREI R., Drehmeissel mit selbstlaufgetriebener rotierender Schneide, Wissenschaftliche Hausarbeit, TH Darmstadt, 1977.
2. ISO 36 85 — Predprojekt, Ispitivanje postojanosti strugarskih alata sa jednim sečivom, Međunarodna organizacija za standardizaciju, Tehnički komitet ISO/TC 29 »Sitan alat«, Beograd, 1977.
3. BELLMANN B., Messverfahren zur kontinuerlichen Erfassung des Freiflächenverschleisses beim Drehen, Dissertation, TH Darmstadt, 1978.
4. EHMER H. J., Beitrag zur Ermittlung der Gesetzmässigkeiten und Ursachen des Freiflächenverschleisses an Hartmetalldrehwerkzeugen, Dissertation, TH Achen, 1970.
5. OPITZ H., Moderne Produktionstechnik — Stand und Tendenzen, 3. Auflage, Girardet, Essen, 1971.
6. OSTERMANN G., Neuere Erkenntnisse über die Ursachen des Verschleisses auf der Spanfläche von Hartmetall — Drehwerkzeugen, Dissertation, TH Aachen, 1960.
7. MILIKIĆ D., Nova metoda za merenje temperatura pri obradi rezanjem i mogućnosti njene tehnološke i senzorske primene, Doktorska disertacija, FTN Novi Sad, 1979.

Dr DRAGOJE MILIKIĆ, dipl. inž.
asistent Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu

Rođen 1943. godine. Diplomirao 1967. godine na Mašinskom fakultetu u Novom Sadu. Radio u FAP-u Priboj. Od 1968. godine asistent na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu. Duže vremena boravio na specijalizaciji u Institut für Technologie und Werkzeugmaschine TH Darmstadt, SR Nemačka.

UDK 621.192

П. И. ЯЩЕРИЦЫН, Ю. В. СКОРЫНИН

Vek trajanja mašina u funkciji uslova obrade osnovnih elemenata

S ruskog preveo: Mr M. Lazić

Fizičko-hemijske karakteristike kontaktnih slojeva u tribo-mehaničkim sistemima zavise od uslova pod kojima su nastale kontaktne površine. U dosadašnjim razmatranjima uticaj vrste postupaka obrade i režima rezanja, korišćenih pri formiranju kontaktnih površina, na razvoj procesa habanja elemenata u dodiru je veoma malo bio analiziran.

Poslednjih godina razvija se takozvana teorija tehnološkog i eksploatacijskog nasleđa kojom su i ovi problemi obuhvaćeni. Jedna od prvih publikacija ove vrste je knjiga sovjetskih autora koju prezentiramo jugoslovenskim čitaocima u dva nastavka počev od ovog broja u prevodu Lazić Miodraga dipl. ing., magistra tehničkih nauka.

PREDGOVOR AUTORA

Jedan od osnovnih zadataka mašinogradnje je sistematsko povećanje kvaliteta i pouzdanosti rada mašina, jer je to, prema programu KPSS, osnovni uslov razvoja nacionalne ekonomije. S obzirom na visoke zahteve u pogledu kvaliteta i pouzdanosti rada mašina, suštinski se menja prilaz njihovoj konstruktivnoj i tehnološkoj razradi, izvođenju profilaktičkih i remontnih radova. Pri tome treba imati u vidu da je mašina sistem koji »stari«, sistem čiji se parametri postepeno menjaju u procesu eksploatacije. Promene nastaju usled habanja, izmene zazora, zamora i starenja materijala. Većina pojava nastala u procesu izrade elemenata značajno utiče na proces gubitka radne sposobnosti mašina u eksploatacionim uslovima. Otuda je za obezbeđenje neophodnog nivoa kvaliteta i pouzdanosti rada mašina potrebno analizirati sve pojave koje prate proces izrade i eksploatacije mašina.

Zadnjih godina se sve veća pažnja posvećuje uticaju prethodne obrade elemenata na eksploataciona svojstva istih i njihovoj međusobnoj zavisnosti. U knjizi se uvodi pojam »tehnološko i eksploataciono nasleđe«, koji potpuno karakteriše zavisnost tehnološkog procesa izrade i parametara kojima se definiše radna sposobnost mašina. Za razliku od tehnološkog nasleđa, koje se uočava u bilo kom tehnološkom procesu i izražava međusobnom zavisnošću geometrijskih i fizičko-mehaničkih parametara proizvoda formiranih kroz prethodne i završne tehnološke operacije, pojava eksploatacionog nasleđa se odražava vezom parametara procesa gubitka radne sposobnosti proizvoda, vrednosti radnog resursa i predistorijom opterećenja.

Uslovi i režim rada mašina određuju, uglavnom, oblik habanja kontaktnih površina, veličinu i oblik zazora sklopova, i slično, što se u određenom odnosu odražava na krutost sistema i veličinu specifičnih pritisaka između kontaktnih površina. To znatno utiče na intenzitet habanja u narednom periodu rada i predstavlja pojavu eksploatacionog nasleđa. Istovremeno intenzitet habanja kontaktnih površina zavisi i od makro i mikrogeometrije kontaktnih površina, mikrotvrdoće, strukture i naponskog stanja površinskih slojeva, formiranih u procesu izrade. Prema tome povezanost tehnološkog i eksploatacionog nasleđa je potpuna, a proučavanje ove zavisnosti omogućuje ne samo uzimanje u obzir datih pojava u procesu konstruisanja, već i upravljanje procesom gubitka radne sposobnosti elemenata.

POJAM »NASLEĐE« U MAŠINOGRADNJI I TEORIJA FIZIČKOG STARENJA MAŠINA

Razjašnjenje ponašanja mehaničkih sistema i prognoziranje mogućih promena njegovih parametara u kratkom vremenskom intervalu, zahteva detaljnu analizu pojava koje prate proces izrade i eksploatacije, još u fazi razvoja novog proizvoda. Pri proučavanju pojava, uslovljenih stanjem ispitivanog objekta, veliki značaj ima pojava nasleđa. Na primer, u mehanici plastičnosti tvrdog tela sreće se pojam teorije nasleđa i teorije nelinearnog puzanja. Linearna teorija nasleđa se koristi za opisivanje ponašanja plastičnih materijala pri umerenim opterećenjima, kao i unutrašnjeg trenja u metalima, ako je amplituda naprezanja dovoljno mala. U linearnoj teoriji nasleđa ispitivani objekt predstavlja sistem, čija je reakcija H_0 vezana sa spoljašnjim dejstvima X_0 relacijom:

$$H_0 = f(X_0), \tag{1}$$

Ova zavisnost se naziva osnovnom, jer se ista definiše na sledeći način: »Reakcija $H_0(t)$ u momentu vremena t određena je ne samo veličinom $X_0(t)$, već i istorijom promene funkcije $X_0(\tau)$ gde $\tau \in (-\infty, t)$«.

Osnovni zakon se simbolično zapisuje izrazom oblika:

$$H_0 = F^t_{-\infty}(X_0), \tag{2}$$

gde funkcional $F^t_{-\infty}$ ima sledeće osobine:

$$F^t_{-\infty}(X_{01} + X_{02}) = F^t_{-\infty}(X_{01}) + F^t_{-\infty}(X_{02})$$

$$F^t_{-\infty}(cX_0) = cF^t_{-\infty}(X_0)$$

Obzirom na osobine funkcionala, proizilazi osnovni zakon, prikazan preko linearnog operatora Voltera K^*:

$$H_0 = (1 + K^*)X_0, \tag{3}$$

ili:

$$H_0(t) = X_0(t) + \int_{-\infty}^{t} K(t,\tau)X_0(\tau)\,d\tau,$$

gde je funkcija $K(t,\tau)$ — jezgro operatora Voltera. Ako je u vremenskom intervalu $\tau \in [O, T]$, $X_0(\tau) \neq 0$, a pri $t > T$, $X_0 = 0$ tada je:

$$H_0(t) = \int_0^T K(t,\tau)X_0(\tau)\,d\tau,$$

gde $t \in [T, \infty]$.

U momentu vremena $t > T$, kada spoljašnja funkcija $X_0(t)$ ne postoji, sistem menja svoju reakciju usled dejstva u prethodnom vremenskom intervalu $\tau \in [O, T]$.

Ponašanje jezgra nasleđa $K(t,\tau)$ u vremenskom intervalu $\tau \in [O, T]$ i njegovim granicama pri $t \to \infty$ određuje karakter izmene svojstava sa vremenom. Ako jezgro teži nuli pri povećanju vremena t, proces je povratan i opisan je jednačinom (3). Ukoliko pak, sa povećanjem vremena t,

vrednost jezgra teži konačnoj granici, proces je nepovratan, dok neograničeno povećanje karakteriše nastanak nepostojanog procesa.

Reakcija H_0 i spoljašnje dejstvo X_0 mogu imati različit fizički smisao. Kod procesa gubitka redne sposobnosti mašina X_0 je spoljašnje opterećenje (pritisak, brzina i slično), dok je H_0 veličina određenja intenzitetom habanja kontaktnih površina, ili brzinom promene odgovarajućih parametara (čvrstoća, zazor i slično). Međutim, u većini slučajeva, veza između opterećenja i reakcija je veoma složena, pa je, po pravilu, primena linearne teorije moguća samo pri suštinskim ograničenjima diapazona promene ukazanih parametara i uz uvođenje niza pretpostavki u cilju uprošćavanja ispitivanog sistema. Istovremeno, dalje usavršavanje metoda ocene, prognoziranja i povećanja pouzdanosti rada mašina je povezano sa prikazivanjem istih u vidu sistema procesa gubitka radne sposobnosti. Razvoj tog pravca u teoriji pouzdanosti rada treba da bazira na izučavanju fizičkih pojava u procesu izrade i eksploatacije.

Na proces gubitka radne sposobnosti utiče niz konstruktivnih, tehnoloških i eksploatacionih faktora. Modeli ovih procesa mogu biti razvijeni na bazi rezultata proučavanja zavisnosti eksploatacionih osobina elemenata, mehanizama i mašina i tehnologije izrade, kao i režima njihove eksploatacije. Većina ovih zavisnosti se odnosi na zavisnost naslednog tipa. Pri tome se razdvaja tehnološko i eksploatacionо nasleđe. Tehnološko je uslovljeno redosledom tehnoloških operacija, režimima obrade, kvalitetom izrade, kontrole i regulisanja mehanizma. Eksploataciono je uslovljeno redosledom i intenzitetom eksploatacije, periodičnošću i kvalitetom remontnih radova i slično.

Suština pojave tehnološkog i eksploatacionog nasleđa

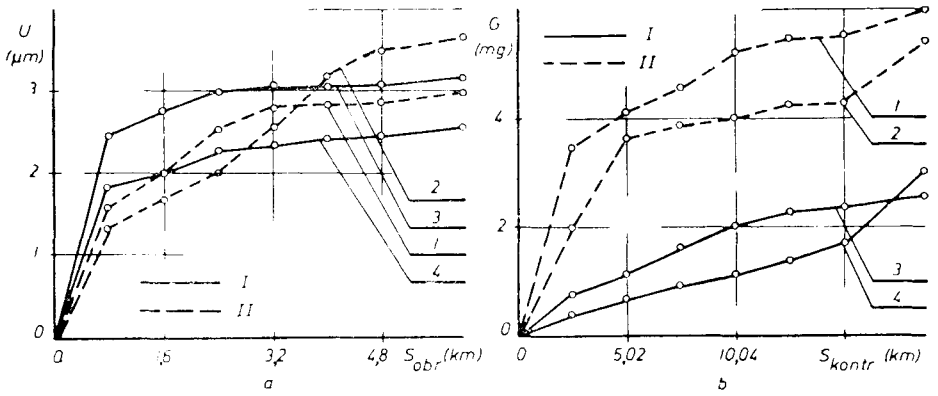
Osnovni parametri elemenata mašina nasleđeni kroz tehnološki proces izrade su dvojaki. Naime, to su parametri vezani za materijal elemenata i njegove geometrijske pokazatelje. Prvu grupu karakteriše hemijski sastav, struktura i naponsko stanje površinskih slojeva, površinska energija i sl. Drugu grupu karakteriše makro i mikrogeometrija kontaktnih površina (valovitost, ovalnost, hrapavost i sl.). Vrednost ovih parametara zavisi, kako od vida i režima završnih operacija, tako i od vida i režima prethodnih mehaničkih, elektromehaničkih, termičkih i drugih tehnoloških operacija. Naime, greške prethodne obrade, kao i osobine, se prenose od prethodne ka narednim operacijama. Kao primer može poslužiti geometrijsko kopiranje grešaka oblika elemenata pri mehaničkoj obradi, nastalih usled pojave elastičnih deformacija sistema mišna-pribor-alat-predmet obrade. Na fizičko-mehaničke osobine i strukturu površinskih slojeva utiče i vid i režim prethodne obrade, dubina površinskog sloja u kojoj dolazi do strukturnih promena pod uticajem mehaničkih i toplotnih opterećenja nastalih u procesu prethodne obrade, jer ista može biti veća od dodatka za operacije završne (naredne) obrade. Iz podataka prikazanih u tablici 1 i na slici 1 uočava se da metode prethodne obrade mogu znatno više uticati na intenzitet habanja kontaktnih površina nego metode završne obrade. Od vrste obrade kontaktnih površina suštinski zavisi i intenzitet habanja, što ukazuje na značaj vrste prethodne i završne obrade i njihov uticaj na prilagodljivost kontaktnih površina u toku kontakta.

TABELA 1.

Uticaj metoda prethodne i završne obrade na karakteristike kvaliteta površina uzoraka od nekaljenog čelika 30 X ГСА

Prethodna	Završna	R_a µm	R_{max}	b	ν	ϱ µm	β	$\Delta = \frac{R_{max}}{10^3 \rho b^{1/\nu}}$	H^{μ}_{max} kgs/mm²	h µm
Struganje	EMO	0,5	2,6	2,7	1,8	750	2°	2,85	235	50
	Valjanje	0,18	1,0	2,1	1,8	980	1°35'	0,675	270	30
Brušenje	EMO	0,52	2,4	1,0	1,5	1430	1°15'	1,65	270	40
	Valjanje	0,25	1,2	1,0	1,7	600	1°40'	1,57	280	40

Oznake: R_a, R_{max} — srednje kvadratno odstupanje i maksimalna visina neravnina profila površine, b, ν — parametri noseće krive profila, ϱ — radijus zaobljenja vrha mikroneravnina, β — ugao nagiba bočnih strana neravnina, H^{μ}_{max} — maksimalna mikrotvrdoća površinskih slojeva, h — dubina otvrdnjavanja i EMO — elektromehanička obrada površine uzorka.

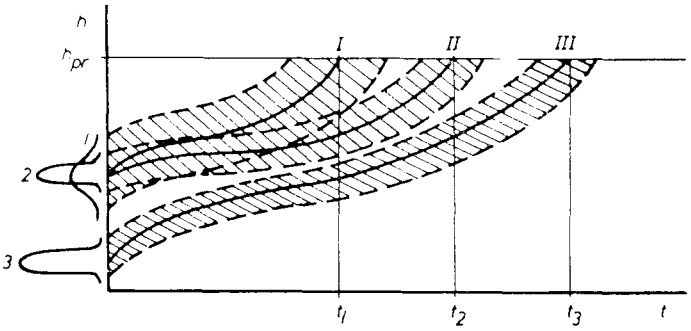


Sl. 1. — Uticaj metoda prethodne (I-brušenje i II-struganje) i završne obrade na habanje površine uzorka od nekaljenog čelika 30 X ГСS (a) i kontratela od sivog liva СЧ 19—36 (b); 1, 3-elektromehanička obrada (I = 600 A, P = 60 kgs, V = 45 m/min, S = 0,08 mm/o); 2, 4-valjanje (P = 60 kgs, V = 45 m/min, S = 0,08 mm/o); U, S_{obr} — linearno habanje i put trenja uzorka, G, S_{kontr} — težinsko habanje i put trenja kontratela.

Kao rezultat preraspodele zaostalih napona, faznih i strukturnih promena u materijalu, dolazi do promene geometrijskog oblika. Slične promene su prouzrokovane osobenostima tehnološkog procesa izrade i imaju nasledni karakter. Na primer, neravnomernost dodatka pri brušenju dovodi do pojave zona povećanog zagrevanja, a time i mestimičnih naprezanja. Vremenom ova naprezanja dovode do elastičnih deformacija, a time i izmene geometrijskog oblika. Eksperimentalna ispitivanja uticaja toplotnih pojava nastalih u zoni rezanja, na tačnost brušenja pokazala su da se polazna greška, pri definisanju tehnologije izrade osovinice od čelika III X 15, uvećava više od 4 puta (od 9 na 40 μm). Proučavanjem izmene oblika radnog vretena alatnih mašina sa vremenom, uočeno je da se povećava deformacija radnog vretena nakon obrade, kod svih radnih vretena kod kojih je postojala neravnomernost dodatka za obradu.

Pojedine operacije tehnološkog procesa izrade elemenata su »tehnološke barijere« za nasledne osobine proizvoda. Ove »barijere« mogu suštinski smanjiti dejstvo negativnih faktora tehnološkog nasleđa. Kao »tehnološke barijere« javljaju se operacije termičke obrade (kaljenje, otpuštanje, žarenje, normalizacija i sl.) i otvrdnjavanje (valjanje kuglicama i valjčićima, glačanje i sl.). Otklanjanje greški obrade povezano je sa stabilnošću i krutošću sistema mašina — pribor — alat — predmet obrade i razradom metoda upravljanja stabilnošću u procesu rezanja. Često kvalitet obrade zavisi i od toga u kojoj su meri negativni uticaji prekriveni pozitivnim.

Tehnološko nasleđe sklopova, agregata i mašina je uslovljeno tehnološkim nasleđem elemenata, kvalitetom njihove montaže i regulisanjem. U opštem slučaju uticaj tehnologije izrade na proces gubitka radne sposobnosti prikazan je na slici 2. Tehnološki proces I pri određenim



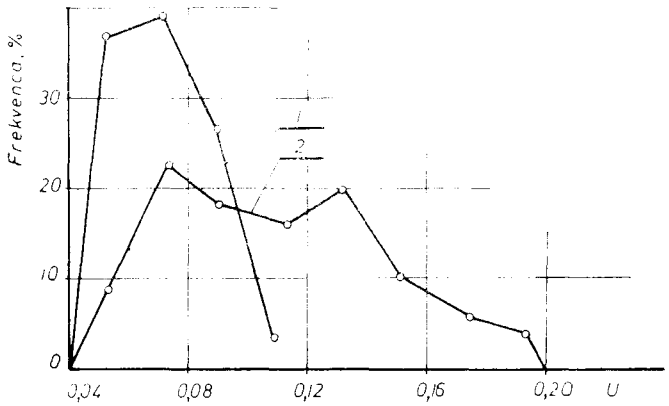
Sl. 2. — Uticaj tehnologije izrade na proces gubitka radne radne sposobnosti proizvoda; 1, 2, 3 — grafici gustine raspodele polaznih vrednosti određenog parametra h za tehnološke procese I, II, III, t_1, t_2, t_3 — srednji vek trajanja proizvoda pri primeni tehnoloških operacija I, II i III, h_{pr} — granična vrednost parametra h

uslovima eksploatacije obezbeđuje vek trajanja t_1. Usavršavanjem tehnološkog procesa izrade moguće je, smanjenjem nejednorodnosti strukture materijala, umanjiti ili isključiti neke od grešaka obrade i montaže, i pri istoj početnoj vrednosti parametra h povećati vek trajanja proizvoda na t_2 (tehnološki proces II). Dalje povećanje veka trajanja proizvoda može se postići razradom principijelno novog tehnološkog procesa III.

U zavisnosti od različitih faktora vezanih sa okolinom (vlažnost, zagađenost vazduha, temperatura i sl.), režima rada (opterećenje, brzina, hlađenje i sl.) i uslova opsluživanja (periodičnost i kvalitet profilaktičkih radova, remonta i sl.), u procesu eksploatacije elemenata dolazi do promene polazne strukture materijala, mikro i makrogeometrije kontaktnih površina, krutosti sklopova, kinematike i dinamike sklopova i mehanizama. Proces gubitka radne sposobnosti mašina se odražava u naknadnim dejstvima prethodnih uslova eksploatacije i formiranih oštećenja. Pri tome se predistorija opterećenja ogleda u potpunoj izmeni strukture materijala, makro i mikrogeometrije, veličine i oblika zazora. Slične pojave se mogu zadržati i u toku dugog vremenskog perioda, što ukazuje na suštinski uticaj na preraspodelu opterećenja, uslove podmazivanja i kontakta, a time i na dalji razvoj procesa gubitka radne sposobnosti mašina. Eksploataciono nasleđe ovakvog tipa ima mesta i u onim slučajevima kada je obezbeđen visok kvalitet izrade i kada je isključena pojava negativnih faktora tehnološkog nasleđa. Jasno je da tehnologija izrade i montaže mašina određuju otpornost na habanje, zamornu čvrstoću, otpornost na koroziju i druge eksploatacione kvalitete elemenata. No, za efektivnije korišćenje ovih osobina (u fazi konstruisanja) neophodno je uzeti u obzir mogućnosti izmene međusobnog dejstva elemenata u sklopovima i agregatima, usled njihovog habanja, starenja i promena nivoa regulisanja. Na primer, pojava zakošenja osa zupčanika usled habanja ležišta i elastičnih deformacija vratila može dovesti do ivičnog kontakta zuba zupčanika i njihovog naglog trošenja. Time se smanjuje efekat dejstva mera povećanja veka trajanja zuba zupčanika izraženih kroz postupke usavršavanja tehnologije njihove izrade.

Vek trajanja, na primer automobila, automobilskih motora i drugih agregata se, nakon remonta, smanjuje više od 1,5 puta u odnosu na novi proizvod. Prema tome vek trajanja remontovanih mašina zavisi od nivoa tehnologije, remonta i kontrole kvaliteta. Ipak i pored uspostavljanja svih tehničkih uslova moguće je postići početni resurs mašine. Nakon remonta povećava se ne samo srednje vrednost parametra habanja već i njegova disperzija (slika 3).

Smanjenje veka trajanja mašina, nakon remonta, vezano je sa pojavom tehnološkog i eksploatacionog nasleđa. Naime, pri remontu se koristi i deo elemenata, čiji parametar habanja nije dostigao graničnu vrednost. Pohabani elementi »pamte« prethodni period eksploatacije, kroz već formiran dijagram raspodele habanja kontaktnih površina, plastične deformacije lokalnih zapremina materijala i drugih oštećenja vezanih sa oblikom i karakterom međusobnih opterećenja. U zavisnosti od karaktera i veličine formiranih oštećenja ovi elementi utiču, znatno, na uslove rada i opterećenja odgovarajućih sklopova i mehanizama, nakon remonta. Od broja delimično pohabanih elemenata u znatnom stepenu zavisi i vek trajanja sklopova, agregata i mašina.

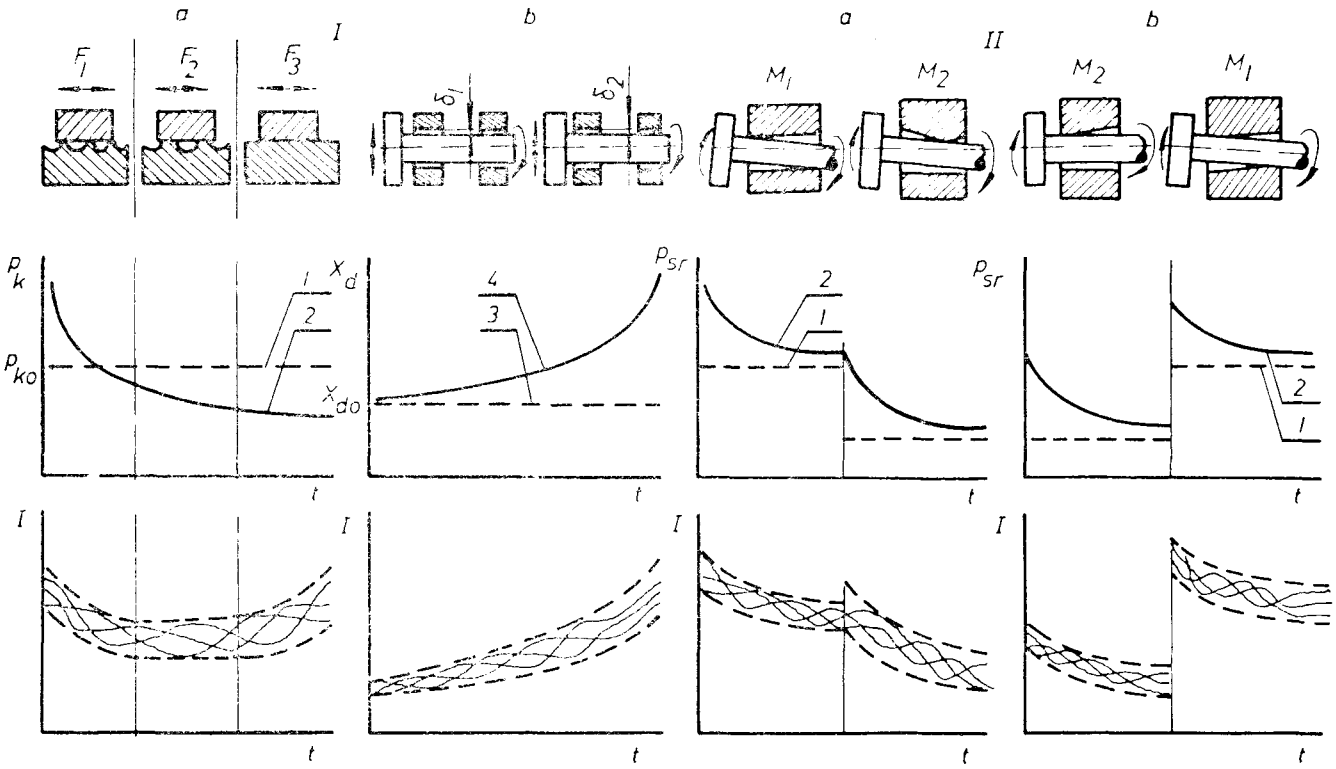


Sl. 3. — Raspodela parametara habanja košuljice cilindra novih (1) i remontovanih (2) traktorskih motora

Usavršavanjem tehnologije izrade i remonta, razradom novih konstruktivnih rešenja i metoda kompenzacije habanja, elastičnih i toplotnih deformacija elemenata mašina, u procesu eksploatacije, moguće je suštinski smanjiti ili isključiti pojavu negativnih faktora vezanih sa tehnološkim i eksploatacionim nasleđem tehničkih sistema.

Na slici 4 potpunije je prikazan proces gubitka radne sposobnosti osnovnih parova trenja, prouzrokovan eksploatacionim nasleđem. Radna sposobnost i vek trajanja vođica alatnih mašina zavisi od tačnosti izrade (valovitost, neravnost, neparalelnost), kontaktne površine, kontaktne čvrstoće i drugih parametara uslovljenih tehnologijom izrade, montaže i kontrole. Na kvalitet izrade elemenata utiče tehnološki nasleđena struktura materijala i greška oblika. U toku rada mašine, a u zavisnosti od konstrukcije, tehnologije i tačnosti izrade vođica sa jedne i dimenzija predmeta obrade i režima sa druge strane, pritisak u zoni kontakta se raspodeljuje na odgovarajući način što dovodi do formiranja i profila pohabane površine. Habanjem kontaktnih površina javlja se preraspodela pritiska i dolazi do promene kontaktne čvrstoće i uslova podmazivanja. Prema tome, intenzitet habanja vođica u fiksiranom momentu zavisi ne samo od veličine stvarnih opterećenja i dimenzija pred-

meta obrade, već i od kompletne predistorije rada mašine, njenog profilaktičkog opsluživanja i remonta. Promena makrogeometrije vođica je rezultat kako habanja tako i starenja materijala, a odvija se u uslovima pojave negativnih faktora tehnološkog i eksploatacionog nasleđa. Uticaj tehnološkog nasleđa na proces gubitka radne sposobnosti je rezultat i različite otpornosti na habanje pojedinih delova koji »stare« i čiji se parametri menjaju u procesu eksploatacije. Kao primer procesa habanja nepovratnog karaktera prikazano je klizno ležište pri stepenastoj promeni opterećenja, na šemi IIa i b. Svakom opterećenju odgovara određena raspodela habanja kontaktnih površina uslovljena elastičnim deformacijama vretena i pojavom zazora. U početnom periodu rada ležišta nastaje proces uhodavanja i for-



Sl. 4. — Uticaj režima i vremena rada na intenzitet habanja elemenata mašina: I — promena intenziteta habanja vođica (a) i ležišta (b) sa vremenom pri promeni pritiska P_k u zoni kontakta vođica i dinamičkih opterećenja X_d kod ležišta: 1 — računski kontaktni pritisak, 2 — stvarni kontaktni pritisak kod koga se uzima u obzir povećanje površine kontakta vođice ($F_1 < F_2 < F_3$), 3 — računsko dinamičko naprezanje ležišta, 4 — stvarno dinamičko naprezanje koje uključuje i dinamičke komponente nastale usled promene zazora δ ($\delta_1 < \delta_2$); II — promena intenziteta habanja ležišta pri stepenastom smanjenju (a) i povećanju (b) torzionog momenta M na vratilu $M_1 > M_2$): 1 — srednji računski kontaktni pritisak, 2 — stvarni srednji kontaktni pritisak u zavisnosti od makrogeometrije kontaktne površine.

kontaktnih površina. To je posledica raznorodnosti strukture materijala formirane u procesu obrade, kao i pojave geometrijskih grešaka izrade i montaže elemenata, sklopova i mašina. U vezi sa tim ocena stepena uticaja tehnološkog i eksploatacionog nasleđa na gubitak radne sposobnosti mašina, često je uslovljena znatnim teškoćama metodološkog karaktera.

Šema prikazana na slici 4 — Ia ilustruje promenu kontaktne površine i kontaktnog pritiska pri habanju vođica. Stvarni kontaktni pritisak (kriva 2) se znatno razlikuje od računskog, koji nije zasnovan na analizi uticaja veličine i oblika habanja kontaktnih površina. Oblik i veličina habanja, pak, zavise od oblika veličine i karaktera promene međusobnih dejstava (pritiska, relativne brzine, zagađenosti okoline itd.), kao i od momenta početka rada. U skladu s tim menja se i intenzitet habanja. Smanjenjem pritiska u kontaktu opada i intenzitet habanja. Međutim, sa habanjem elemenata pogoršavaju se uslovi trenja usled smanjenja zapremine udolina, koje predstavljaju rezervoar sredstava za podmazivanje, i skupljanja sve veće količine produkata habanja, koji izazivaju povećanje intenziteta habanja.

Na šemi Ib prikazana je promena intenziteta habanja kličnog ležišta pri naizmenično-promenljivim opterećenjima u uslovima povećanja radijalnog zazora δ i nastanka dopunskih komponenti dinamičkih opterećenja. Uočljivo je da pojava dinamičkih opterećenja utiče na proces gubitka radne sposobnosti i drugih elemenata mehanizama, kinematski povezanih sa ležištem. Zbog toga je, u većini slučajeva, pri oceni veka trajanja mašina neophodno poći od elemenata, sklopova, mehanizama i agregata, kao dinamičkih sistema miranja »radne« strukture površinskih slojeva, kao i njihove makro i mikrogeometrije. Povećanjem, ili smanjenjem, stvarnog torzionog momenta M na vratilu menja se vrednost elastičnih deformacija elemenata i vratilo zauzima novi prostorni položaj, što dovodi do preraspodele specifičnih pritisaka u zoni kontakta. Prema tome nastaje period sekundarnog uhodavanja elemenata. Vreme trajanja ovog perioda i veličina parametara habanja zavise od raspodele habanja duž kontaktnih površina, kao i od vremena trajanja i veličine torzionog opterećenja u prethodnom periodu. Posle perioda sekundarnog uhodavanja nestaje »pamćenje« veličine i karaktera prethodnih opterećenja, a koje se odražava u osobenostima raspodele habanja kontaktnih površina i strukture materijala površinskih slojeva. U periodu ustaljenog habanja intenzitet razaranja površinskih slojeva zavisi, uglavnom, od veličine stvarnih opterećenja u datom vremenskom momentu.

Neki pojmovi vezani za fizičko starenje i eksploataciono nasleđe mašina

Pretpostavimo da postoji zavisnost:

$$h_k = h_k(x_1, x_2, \ldots, x_q, t) \quad k = 1 \ldots, z, \qquad (4)$$

u kojoj su $h_1, h_2, \ldots, h_q$ — nezavisni parametri koji karakterišu radnu sposobnost ispitivanog objekta. Kao parametar h_k može se pojaviti parametar habanja (težinskog ili zapreminskog habanja, linearnog habanja u određenim tačkama kontaktne površine), parametar kojim se karakteriše odstupanje oblika radne površine od zadatog, karakteris-

tike mikrogeometrije i fizičko-mehaničkih karakteristika materijala elemenata i njegovih površinskih slojeva. Za sklopove ti parametri bi bili: tačnost pomeranja spregnutih elemenata, kontaktna čvrstoća, temperatura u zoni kontakta, nivo vibracija, zazor i drugi. Kod, pak, agregata i mašina to bi bili: tačnost obrade i kvalitet obrađenih površina, proizvodnost, utrošak vremena i sredstava za pripremu i remont (alatne mašine), snaga (motori), koeficijent iskorišćenja (energetski uređaji) i dr; $x_1, x_2, \ldots, x_q$ — opterećenja, kao što su za elemente i klizne parove mašine: opterećenje ili specifični pritisak na kontaktnim površinama, brzina relativnog pomeranja spregnutih elemenata, temperatura sredine i slično, a za agregate i mašine: sila rezanja (alatne mašine), brzina kretanja (transportne mašine), temperatura i zagađenost okoline i slično.

Primenom vektorno-matričnog računa prethodna relacija se prikazuje u obliku:

$$H = H(X, t), \tag{5}$$

gde je H-z — redni vektor, $H = (h_1, h_2, \ldots, h_z)$, H-q — redni vektor, $X = (x_1, x_2, \ldots, x_q)$.

Ukoliko je funkcija 5 definisana u ispitivanoj oblasti i u istoj postoje neprekidni pojedinačni proizvodi, tada se formira funkcionalni operator oblika:

$$\frac{DH}{D(x,t)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial h_1}{\partial x_1} & \frac{\partial h_1}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial h_1}{\partial x_q} & \frac{\partial h_1}{\partial t} \\ \frac{\partial h_2}{\partial x_1} & \frac{\partial h_2}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial h_2}{\partial x_q} & \frac{\partial h_2}{\partial t} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial h_z}{\partial x_1} & \frac{\partial h_z}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial h_z}{\partial x_q} & \frac{\partial h_z}{\partial t} \end{vmatrix}; \tag{6}$$

Proces gubitka radne sposobnosti objekata (elemenata, kliznih parova, sklopova i mašina) ima naknadno dejstvo kada funkcionalni operator, u momentu t, zavisi ne samo od modula i pravca vektora X, već i od modula i pravca vektora X u momentu $\tau < t$ i vrednosti resursa r (t).

Vrednost resursa r_{h_k} (t) objekta za vremenski interval (0, t) određen je relacijom:

$$r_{h_k}(t) = \frac{1}{\overline{\Delta h}_{ksr}} \int_0^t \xi_{h_k}(\tau)\, d\tau,$$

gde je $\overline{\Delta h}_{ksr}$ — srednja vrednost graničnog odstupanja parametra h_k od njegove početne vrednosti, ξ_{h_k} (t) — brzina promene parametra h_k.

Za proces gubitka radne sposobnosti bez naknadnog dejstva funkcionalni operator zavisi samo od modula i pravca vektora X u datom momentu t. Pri analizi habanja pojedinih elemenata i sklopova celishodno je razmotriti vektor:

$$\Psi(x, t) = [\xi_1(x, t), \xi_2(x, t), \ldots, \xi_n(x, t)],$$

u kome je ξ_j (X, t) — brzina habanja j-tog elementa ili sklopa ili brzina habanja u j-toj tački kontaktne površine elementa, ili sklopa pri uzajamnom opterećenju X na sklopovima mašina, ili agregata $j = 1, \ldots, n$. U tom slučaju, očigledno je, da proces habanja poseduje naknadno dejstvo ako modul i pravac vektora Ψ (X, t) zavise ne samo od modula i pravca vektora X, već i od modula i pravca vektora X u momentu $\tau < t$, kao i od veličine linearnog habanja U kontaktnih površina u vremenskom intervalu (0, t). Pri tome je U-r — redni vektor $U = (U_1, U_2, \ldots, U_r)$; U — vrednost habanja i-tog elementa, ili sklopa, ili vrednost parametra habanja u i-toj tački kontaktne površine $i = 1, \ldots, r$.

$$U_i(t) = \int_0^t \xi_i(\tau)\, d\tau, \qquad i = 1, \ldots, r.$$

Za proces habanja bez naknadnog dejstva karakteristično je da modul i pravac vektora Ψ (X, t) zavisi samo od modula i pravca vektora X u momentu t.

U zavisnosti od vremena u kome se javlja promena procesa gubitka radne sposobnosti T_p, vezana za predistoriju eksploatacije, celishodno je razdvojiti dva vida naknadnog dejstva. Naknadno dejstvo prvog vida karakteriše promena radne sposobnosti proizvoda kao posledica predistorije opterećenja X. Izmena radne sposobnosti se zadržava u toku celokupnog veka eksploatacije T_d, tj. $T_p \geq T_d$. Ako je $T_p < T_d$ tada je reč o naknadnom dejstvu drugog vida (proces izmene radne sposobnosti uslovljen predistorijom opterećenja se postepeno gubi).

UTICAJ TEHNOLOŠKOG I EKSPLOATACIONOG NASLEĐA NA KVALITET I EKSPLOATACIONE OSOBINE ELEMENATA MAŠINA

Eksploatacione osobine elemenata mašina (otpornost na habanje, dinamička čvrstoća, otpornost na koroziju itd.) zavise od fizičko-mehaničkih osobina i naponskog stanja elemenata, a naročito površinskih slojeva, kao i od mikro i makrogeometrije kontaktnih površina. Iste su uslovljene i naknadnim dejstvom tehnoloških operacija, a i međusobnim dejstvom opterećenja pri montaži, transportu i eksploataciji.

Nasleđe strukture materijala elemenata u procesu izrade i eksploatacije

Struktura i različiti oblici defekta materijala (nemetalni uključci, risevi itd.) nastali u procesu izrade materijala, kao i u toku tehnološkog procesa izrade proizvoda znatno utiču na kvalitet proizvoda. Pri formiranoj nepravilnoj strukturi proizvod će imati umanjene fizičko-mehaničke karakteristike i mali vek trajanja bez obzira na visoku tačnost i kvalitet mehaničke obrade.

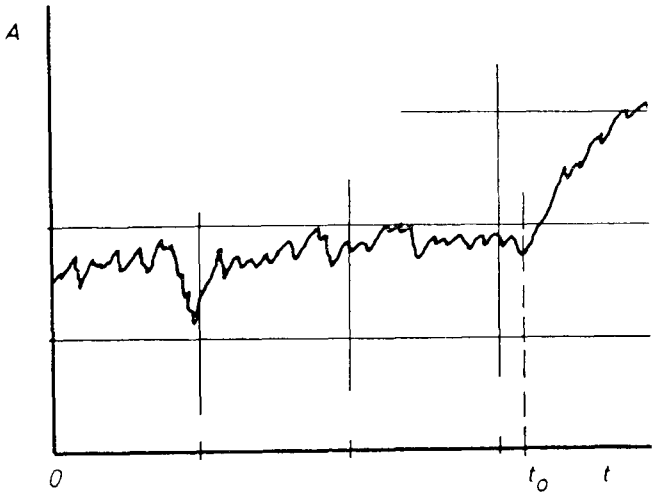
Nasleđe strukture se ogleda u zadržavanju oblika i kristalne orjentacije bilo kog elementa strukture nakon direktnog (pri hlađenju) i indirektnog (pri zagrevanju) polimorfnog preobražaja. Pri direktnom preobražaju mogu se formirati konture polaznog kristala, orjentacija kristalnih rešetki, mestimična dislokacija i defektni uključci, kao i makroskopski oblik defekta, kada se pri plastičnoj deformaciji obrazuje martenzit. Nasleđe dislokacija čelika, pri plastičnom deformisanju, može, često, dovesti do povećanja čvrstoće pri termo-mehaničkoj obradi. U uslovima eksploatacije, koje karakterišu relativno visoka opterećenja, niske i visoke temperature, dolazi do strukturnih i faznih preobražaja. Isti suštinski menjaju eksploatacione osobine proizvoda. Ove pojave su vezane za tehnološko i eksploatacione nasleđe. Pri radu u uslovima smanjenih temperatura menjaju se dimenzije elemenata, jer dolazi do preobražaja zaostalog austenita u martenzit. Dimenzije elemenata izrađenih od čelika za ležišta (ШХ 15 i ШХ 15 СГ, pri preobražaju 1% zaostalog austenita povećavaju se za 10 μm na svakih 100 mm. Povećanje sadržaja austenita kod kaljenih i niskootpuštenih čelika može dovesti do smanjenja kontaktne čvrstoće elemenata. Zato je neophodno, pri razradi tehnološkog postupka izrade, posebno analizirati operacije koje obezbeđuju dobijanje dozvoljene količine zaostalog austenita. Na primer, kod čelika ШХ 15 pre otpuštanja na temperaturi 423—433 K koristi se hlađenje elemenata do temperature 293—298 K. Za elemente koji rade u uslovima niskih temperatura (203 K) u cilju smanjenje količine zaostalog austenita primenjuje se obrada na hladno sa hlađenjem na temperaturu 243—233 K. Ako u procesu rada sklopova nastaje dovoljno visoka temperatura, tada u lokalnim zapreminama metala dolazi do faznog preobražaja. Pri temperaturama manjim od kritičnih u površinskim slojevima kaljenih čelika se javlja i proces otpuštanja.

Ispitivanja dinamike strukturnih promena materijala u procesu trenja su pokazala da, nakon određenog perioda rada, najveći uticaj na proces trenja i habanja ima struktura formirana pri kontaktnom uzajamnom dejstvu spregnutih površina. Pri tome je ponašanje materijala definisano vrednostima termo-dinamičkih parametara: temperaturom u kontaktu, pritiskom i kinematskim parametrima koji karakterišu vremensko trajanje kontakta. Veliku ulogu ima i koncentracija suvišnih faza. Jasno je da postoji neka optimalna struktura za date uslove trenja. Ista se formira kao rezultat međusobnog dejstva polazne i obrazovne strukture, a vezana je za strukturni i fazni preobražaj, difuzione procese, procese preraspodele dislokacija i slično. U uslovima trenja heterogenih legura sa optimalnom strukturom, kod brzog zagrevanja i hlađenja, dolazi do direktnih faznih preobražaja martenzit ⇄ austenit ⇄ karbid. U mnogim radovima, a posebno u radu I. M. Lubomirskog, uvode se pojmovi »kvaziravnotežno stanje« i »kvazireverzibilni

procesi«. Vek trajanja strukture zavisi od njene sposobnosti prilagođavanja i preobražaja u najpovoljnije stanje, koje je znatno manje podložno procesima rekristalizacije, smanjenja sadržaja karbida i slično.

B. I. Kostecki, pri klasifikaciji oblika razaranja, uvodi dve grupe: dozvoljeno (habanje) i nedozvoljeno (oštećenje). U prvu grupu ubraja mehano-hemijsko habanje, koroziono habanje, mehano-hemijsko normalno habanje opni neoksidnog karaktera i abrazivno habanje. Druga grupa uključuje mikro-zavarivanje prvog i drugog reda, freting procese (mikro-zavarivanje, dinamička oksidacija), mehaničke oblike abrazivnog habanja (rezanje, risevanje), zamor pri kotrljanju i druge oblike oštećenja (korozija, kavitacija, erozija, smicanje).

Mnogi radovi metalofizičkog karaktera su posvećeni ispitivanjima ponašanja materijala pri kritičnim vrednostima opterećenja i relativne brzine pomeranja, kao i pri visokim temperaturama u vakuumu. Slični radovi, prema klasifikaciji B. I Kosteckog, su u osnovi posvećeni pojavi oštećenja pri trenju. Pojava eksploatacionog nasleđa, u tim slučajevima, je uslovljena promenom fizičko-mehaničkih osobina površinskih slojeva, nastalom kao rezultat faznih i strukturnih preobražaja. Na slici 5 prikazana je promena količine austenita u površinskom sloju pri naglom povećanju opterećenja u kontaktu. Već nakon kratkovremenog perioda rada na kritičnim režimima dinamika habanja se znatnije menja usled formiranja novog sloja čija debljina može biti znatno veća.



Sl. 5. — Promena količine zaostalog austenita u površinskom sloju materijala pri povećanju opterećenja (A — količina austenita, to — momenat nagle promene opterećenja).

Intenzitet habanja nakon kritičnog opterećenja zavisi od veličine i trajanja istog. Ako elementi u kontaktu rade pri normalnom opterećenju X_n, zatim određeni period (t_0, t_1) pri kritičnom X_{kr}, a nakon vremena t_1 ponovo pri opterećenju X_n intenziteti habanja I'_{x_n} ($t < t_0$) i I''_{x_n} ($t > t_1$) su različiti, to jest: $I'_{x_n} \neq I''_{x_n}$. Nejednačina je aktuelna do momenta kada iz procesa habanja bude uklonjen sloj materijala kod koga je došlo do promena pri djestvu kritičnog opterećenja, odnosno dok se ne formira struktura koja odgovara dejstvu opterećenja X_n.

Kritično opterećenje u eksploatacionim uslovima nastaje vrlo retko, a njegova pojava izaziva havarije. Otuda rezultati ispitivanja pri kritičnom opterećenju ne omogućuju prognoziranje veka trajnja pri normalnoj eksploataciji. Ovakvi zadaci mogu biti rešeni na bazi ispitivanja normalnog habanja, pri kome se razaranje lokalizuje na tanke površinske slojeve. Poznati su modeli normalnog mehano-hemijskog procesa habanja, čiji osnov predstavlja strukturno prilagođavanje materijala pri trenju. Rad sile trenja, kroz procese plastičnog deformisanja, izaziva primarnu promenu strukture površinskog sloja i oslobađanje toplote, dok su ostale komponente energetskog bilansa pri trenju relativno male. Na plastičnu deformaciju pri formiranju uslova strukturnog prilagođavanja odnosi se: a. — lokalizacija u tankim površinskim slojevima, b. — disperzija i orjentacija relativnih pravaca pomeranja uočenih difuznih i teksturnih maksimuma, c. — isključivo visoka gustina energije u površinskom sloju i d. — jednovremena strukturna i termička aktivnost površinskih slojeva. Sekundarna struktura visoke čvrstoće nastaje kao rezultat strukturne i termičke aktivnosti površinskih slojeva i međusobnog dejstva istog sa komponentama iz okoline. Ista smanjuje silu trenja i štiti potpovršinske slojeve od razaranja. Pri cikličnom opterećenju u sloju sekundarne strukture se obrazuju i razaraju mikropukotine. One slabe vezu sekundarnog sloja i osnovnog metala i izazivaju razaranje i odvajanje sloja sekundarne strukture. Treba naglasiti da je evidentna dinamička ravnoteža procesa razaranja i formiranja sekundarnih struktura (metastabilno stanje kontaktnih površina).

Kinematika nastanka i razvoja žarišta razaranja kontaktnih površina vezana je za formiranje strukture i substrukture (količina i karakter raspodele defekata kristalne rešetke) po dubini površinskog sloja pri različitim spoljašnjim opterećenjima. U tom pogledu značajni su radovi koji razvijaju teoriju habanja usled odnošenja čestica površinskog sloja. Uočeno je da se na nekom rastojanju od površine obrazuju jamice, kao rezultat spajanja dislokacija. Iste vremenom postaju znatno veće i pretvaraju se u pukotine paralelne kontaktnim površinama. Odvajanje slojeva materijala, prema P. I Suhu, je posledica dejstva smičućih napona pri kritičnoj dužini pukotine.

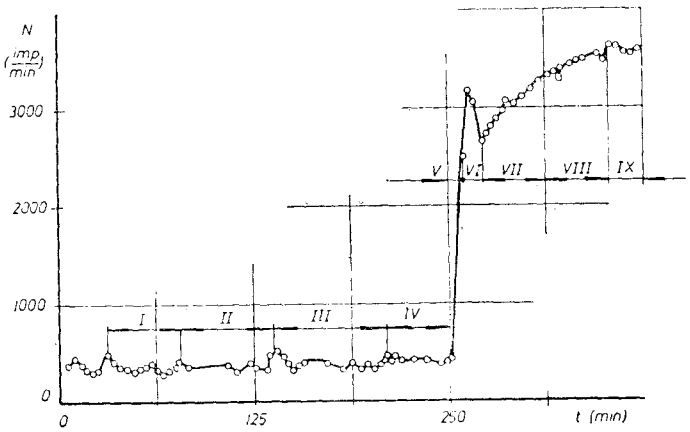
Promene strukturnog stanja površinskih slojeva pri trenju proučavali su K. Hakajama, I. Kavamoto i dr. Oni razdvajaju deformisani sloj pri trenju na dva dela: prvi — jako deformisani koji je neposredno uz kontaktnu površinu i drugi — središnji koji se nalazi između prvog i materijala čija struktura nije pretrpela uočljive promene u procesu trenja. Za legure Fe-C debljina prvog sloja ne zavisi od sadržaja ugljenika, a debljina drugog se smanjuje sa povećanjem sadržaja. Pri određenim opterećenjima i brzinama klizanja u prvom sloju se formira zrnasta struktura. Maksimalna vrednost parametra habanja odgovara onim režimima rada i ispitivanja pri kojima ne dolazi do formiranja zrnaste strukture.

Napred razmatrane pojave prate kontakt tvrdih tela. Proučene su na različitim modelima pri konstantnim uslovima podmazivanja. Stvarni kontaktni parovi u eksploatacionim uslovima imaju promenljivo opterećenje. Habanje elemenata u takvim uslovima je intenzivnije i izraženije što se objašnjava pojavom prelaznih procesa između jednog i drugog nivoa opterećenja. Postojanje ovih perioda eksperimentalno je utvrđeno pri stepenastoj promeni opterećenja. U momentu povećanja opterećenja dolazi do naglog povećanja intenziteta habanja. Isti se zatim smanjuje do nivoa koji odgovara datom opterećenju. Pri smanjenju opterećenja, takođe se javlja prelazni period koga karakteriše »inercioni« tok procesa izražen u postepenom prelazu sa jednog intenziteta habanja na drugi. Nastanak prelaznih pojava pri stepenastoj promeni opterećenja moguće je ilustrovati na primeru habanja belog metala po sivom livu (slika 6). Ocena habanja izvedena je primenom radioaktivne metode, pa je na ordinati prikazana brzina brojanja, odnosno radioaktivnost produkata habanja. Prelazni periodi na slici odgovaraju porastu brzine brojanja. Proces habanja u datom slučaju moguće je svrstati u proces gubitka radne sposobnosti sa naknadnim dejstvom drugog tipa.

Šema naknadnog dejstva zasnovana na transformaciji strukture metala pri trenju*

Šema naknadnog dejstva pri slabom** (normalnom) habanju u uslovima graničnog podmazivanja zasniva se na sledećim pretpostavkama:

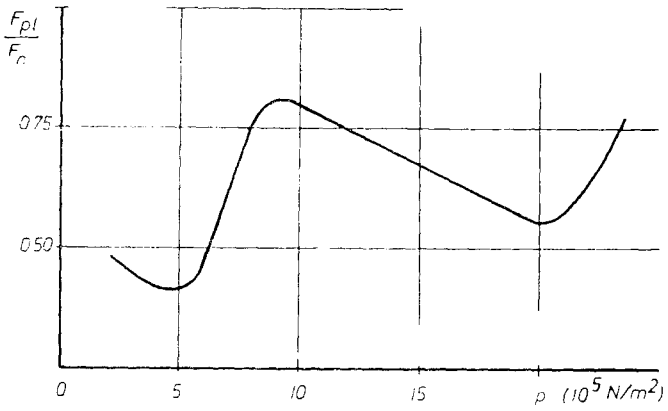
1. — U procesu trenja na aktivnim površinskim slojevima formira se struktura od koje u značajnoj meri zavisi otpornost na habanje. Prema tome otpornost na habanje je strukturno-osetljiva karakteristika. Pod strukturom se, ovde, podrazumeva i fazni sastav homogenog i heterogenog sistema, makro i mikrostruktura i karakter formiranja i raspodele defekata kristalne rešetke.



Sl. 6. — Izmena intenziteta habanja belog metala (brzine brojanja) sa vremenom u zavisnosti od opterećenja: I—4 10^6 N/m², II—6,5 10^6, III—9 10^6, IV—11,5 10^6, V—15 10^6, VI—9 10^6, VII—15 10^6, VIII—17,5 10^6 i IX—19 10^6 N/m².

2. — Aktivna zapremina metala se može razdeliti na tri dela po dubini: prvi — od oko 100 Å u kojem dolazi do intenzivne plastične deformacije, aktivizacije i obrazovanja opni sekundarne strukture; drugi — do nekoliko desetina mikrona, koga karakterišu elastično-plastične deformacije i pojava zrnaste strukture u zonama sa dovoljno visokim stepenom plastične deformacije; treći — reda 100 μm sa pojavom talasastog procesa elastičnog deformisanja metala. Habanje površine pri promenljivim opterećenjima je rezultat plastičnog deformisanja tankih površinskih slojeva (mikro-rezanje ili niskociklični zamor pri plastičnom kontaktu) i razaranje opni sekundarnih struktura i potpovršinskog sloja used razvoja mikro-pukotina ili višestrukocikličnog opterećenja (mnogociklični zamor pri elastičnom kontaktu).

3. — Usled statističkog karaktera mikrogeometrije kontaktnih površina i fizičko-mehaničkih osobina lokalnih zapremina materijala, u bilo kom momentu vremena, na delovima površina se uočavaju različiti oblici frikcionog uzajamnog dejstva (elastično ili plastično potiskivanje materijala, obrazovanje ili razaranje sekundarnih struktura), to jest na površini kontakta se istovremeno javljaju različiti stadijumi procesa habanja. Za konkretne uslove svakom nivou opterećenja, brzine i temperature odgovaraju i određeni odnosi frikcionih veza. U oblastima slabog habanja površina i debljina sloja sekundarnih struktura zavise od specifičnih pritisaka i dimenzija zona elastičnog i plastičnog kontakta. Na slici 7 prikazana je promena odnosa površine sekundarnih struktura F_{pl} i nominalne površine kontakta F_n u zavisnosti od kontaktnog pritiska p.



Sl. 7. — Promena relativne površine sekundarnih struktura na kontaktnoj površini u zavisnosti od kontaktnog pritiska

4. — Svakoj kombinaciji specifičnog pritiska i relativne brzine pomeranja odgovara određenog strukturno stanje. Njega karakteriše sloj sa deformisanom kristilnom rešetkom, određenom srednjom dužinom zrna i dubinom fragmentacije. Formiranje strukturnog stanja određeno je konkretnim režimima trenja uslovljenim plastičnim deformisanjem površinskog sloja metala do onog stepena koji odgovara veličini kontaktnih opterećenja. To samo u slučajevima kada nastala naprezanja u površinskom sloju prevazilaze granicu razvlačenja materijala, to jest: $\sigma_\varepsilon > C_k \sigma_s$. Pri tome je C_k koeficijent koji karakteriše uslove kontakta, σ_s — granica razvlačenja, dok je σ_ε napon nastao kao rezultat dejstva opterećenja:

$$\sigma_\varepsilon = k_p \cdot f\, p_r ,$$

gde su: k_p — koeficijent naponskog stanja, f — koeficijent trenja klizanja i p_r — srednji pritisak na jedinicu površine kontakta.

Granica razvlačenja metala sa zapreminski centriranom kubnom rešetkom određuje se po formuli Holl-Peč:

$$\sigma_s = \sigma'_0 + k_d \cdot d^{-1/2} \qquad (7)$$

u kojoj su: σ'_0 — vrednost unutrašnjeg trenja pri kretanju dislokacija, k_d — koeficijent koji karakteriše barijerni efekat granica zrna i d — dimenzija zrna.

Kada veličina opterećenja na pojedinim delovima kontaktnih površina ne prelazi granicu razvlačenja materijala, to jest $\sigma_\varepsilon < C_k \sigma_s$, razaranje je rezultat zamora materijala usled mnogocikličnog opterećenja. U slučaju da je $\sigma_\varepsilon > C_k \sigma_s$ dolazi do plastičnog deformisanja površinskog sloja, pri čemu, u zavisnosti od odnosa h'/ϱ' (h' — dubina utiskivanja mikroneravnina, ϱ' — radijus vrha utisnute mikroneravnine), se javljaju različiti vidovi frikcionog uzajamnog dejstva (potiskivanje materijala), a razaranje je posledica zamora materijala pri niskocikličnom opterećenju. Plastično deformisanje i aktivizacija površinskih slojeva dovodi do obrazovanja sekundarnih struktura, dok se u potpovršinskom sloju formira zrnasta struktura, koja obezbeđuje veću vrednost granice razvlačenja materijala u odnosu na polazna mehanička svojstva.

U momentu kada je ustanovljen odnos veličine napona i formirane strukture pri trenju $\sigma_\varepsilon > C_k \sigma_s$ prestaje plastično deformisanje. Pri tome je ispunjen uslov:

$$\frac{h'}{\rho'} \leq \sim 200 \left(\frac{\sigma_s}{E}\right)^2,$$

gde je E — modul elastičnosti materijala, kojim se određuje postojanje mehanizma razaranja nastalog kao rezultat zamora materijala, a uslovljenog granicom razvlačenja σ_s i povezanog sa submikroskopskim oštećenjima pri smanjenju dubine utiskivanja h'.

Nakon razaranja površinskog sloja, podpovršinski sloj biva izložen opterećenju i trpi plastičnu deformaciju. Rezultat iste je usitnjavanje zrnaste strukture i obrazovanje slojeva sekundarnih struktura. Na taj način proces se ob-

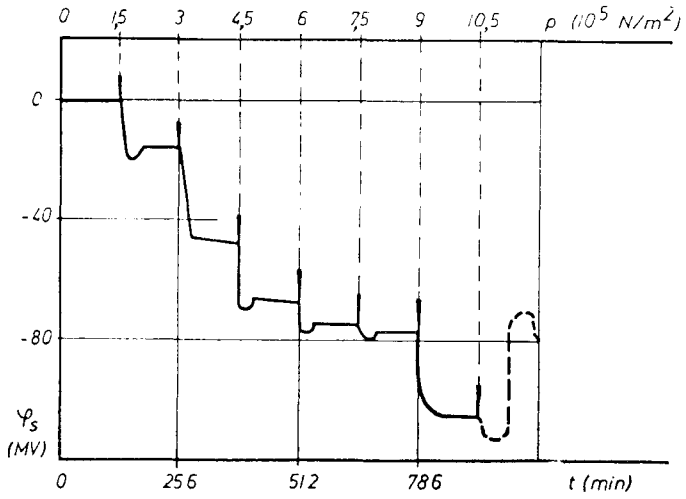
* U pripremi ovog paragrafa učestvovao je I. I. Garbar.

** Termin »slabo« i »intenzivno« habanje se obično koriste za definisanje procesa nastalih pri suvom trenju. Istovremeno se ovi termini koriste i pri oceni habanja u uslovima graničnog podmazivanja. Saglasno klasifikaciji B. I. Kosteckog procesi habanja se dele na normalno habanje i oštećenje. Kako za slabo tako i za normalno habanje karakteristična je pojava razaranja i nastanka oksida (sekundarnih struktura) na kontaktnim površinama. U vezi sa tim termini »slabo« i »normalno« habanje se koriste kao sinonimi.

navlja obezbeđujući prilagođavanje materijala opterećenjima koja dejstvuju.

Ukoliko je sposobnost submikroskopskog otvrdnjavanja materijala iscrpljena tada, pri datom opterećenju, nastaju takvi vidovi razaranja, kao što su dubinsko izbacivanje i obrazovanje mesta zavarivanja čija je čvrstoća znatno veća od materijala parova trenja.

Bazirajući se na poznavanju transformacija struktura površinskih slojeva pri trenju mogu se razjasniti pojave prelaznih perioda procesa habanja pri promeni opterećenja. Površina kontakta se uslovno deli na zone. U jednoj od njih dolazi samo do plastične deformacije aktivnih mikrozapremina materijala, a u drugoj do elastičnog deformisanja, dok treću karakteriše razaranje površinskih slojeva. Stepenasta promena opterećenja narušava dinamičku ravnotežu procesa razaranja površina i formiranja strukture aktivnih zapremina materijala, jer je nejednačina $\sigma_\varepsilon > C_k \sigma_s$ važeća i za zonu sa samo plastičnim deformisanjem. Površina sloja sekundarnih struktura se znatno smanjuje uz povećanje zone plastičnog deformisanja što dovodi do naglog povećanja intenziteta habanja. Proces plastičnog deformisanja transformisane strukture površinskog sloja vodi do povećanja granice razvlačenja σ_s. Otuda je, u određenom momentu, važeća nejednačina $\sigma_\varepsilon > C_k \sigma_s$, što izaziva novo ravnotežno stanje, a intenzitet habanja ima vrednost koja odgovara novom opterećenju.



Sl. 8. — Grafik promene elektrohemijskog potencijala površine pri stepenastoj promeni opterećenja

O suštinskim promenama nastalim u zoni kontakta sa prelaznim periodom svedoči i karakter promene napona elektrode φ_s pri stepenastoj promeni pritiska (slika 8). Napon elektrode se meri u procesu trenja, koje se ostvaruje u vodenom rastvoru permanganata kalaja. Kao merna elektroda korišćen je ispitivani uzorak, dok je katoda bila izrađena od legure hroma i srebra.

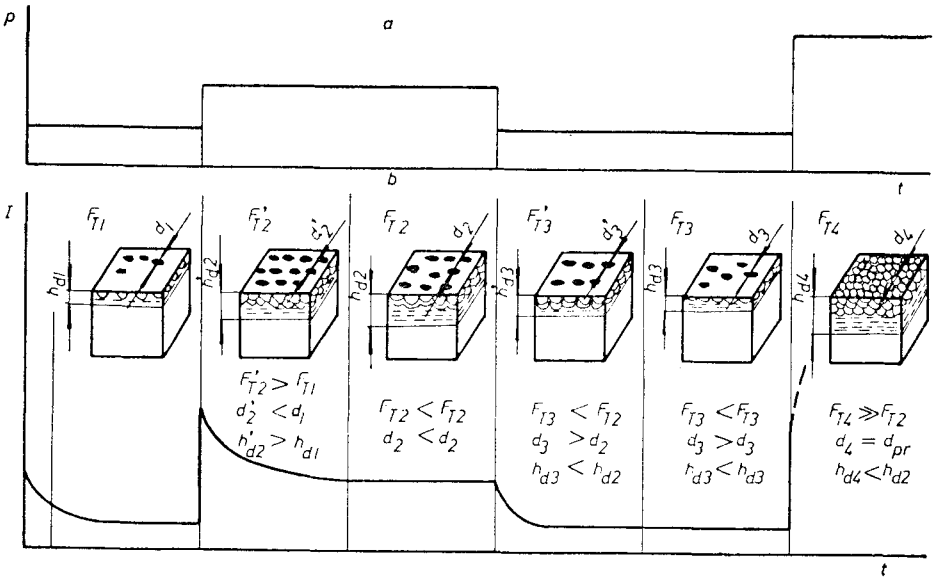
Povećanje opterećenja dovodi do povećanja potencijala, koji se stabilizuje, u toku vremena, na određenu vrednost. Ta vrednost odgovara datom opterećenju. Moguće je pretpostaviti da je povećanje vrednosti potencijala u prelaznom periodu povezano sa povećanjem zone plastičnog deformisanja površinskih slojeva metala. Naknadno smanjenje napona — potencijala i stabilizacija pokazuju da se uloga plastičnog deformisanja, pri kontaktu, smanjuje. Pri tome kontaktna površina biva prekrivena pasivnim slojevima sekundarnih struktura.

Pri stepenastom smanjenju opterećenja nejednačina $\sigma_\varepsilon > C_k \sigma_s$ ima smisla za zonu kontakta u kojoj su površinski slojevi podvrgnuti plastičnom deformisanju. U tim zonama se javlja plastično deformisanje tako da opada intenzitet habanja. Međutim, razaranje prethodno deformisanih slojeva, nastaje pri manjem broju ciklusa opterećenja. Pri tome dolazi do pojave »inercionog« procesa habanja pri prelazu od većeg ka manjem opterećenju. Promena intenziteta habanja kontaktnih površina sa vremenom, pri stepenastoj promeni opterećenja, saglasna je transformaciji strukture pri trenju (slika 9).

U cilju provere pojedinih pretpostavki na kojima se bazira razmatrana šema naknadnog dejstva, u **Institutu za pouzdanost i vek trajanja mašina AN BSSR** izvedena su ispitivanja strukturnih promena po dubini deformisanog sloja metala pri trenju. Time se stvara mogućnost sagledavanja uticaja promena u potpovršinskim slojevima na naknadni proces habanja. Ispitivanja su se sastojala iz dve etape: prva — izučavanje strukture površinskih slojeva metala pri trenju u uslovima nepromenljivih opterećenja i druga — ispitivanje kinematike strukturnih promena u metalu pri trenju sa promenljivim opterećenjima.

Ispitivanja su izvedena na mašini trenja sa oscilatornim kretanjem uzoraka pri režimu: srednja brzina 0,05 m/s i pritisak 3,3 10^5 — 33 10^5 N/m² pri opterećenju 10^2 — 10^3 N. Kao sredstvo za podmazivanje korišćeno je mineralno industrijsko ulje MS—20 koje se periodično dozira u zonu kontakta. Uzorci su izrađeni od niskougljeničkog čelika 45 i Y 8 sa 0,08% C u vidu valjčića dimenzija Ø 20 x 7,5 mm i pločica debljine 50 — 150 μm. Nakon izrade uzorci su termički obrađeni žarenjem u vakuumu, a zatim hlađeni zajedno sa peći.

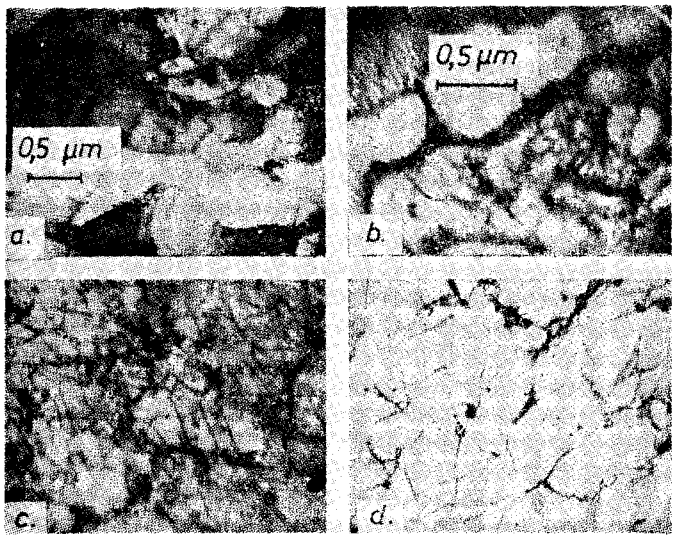
Ispitivanja su izvedena primenom elektronskog mikroskopa i rendgenskom analizom. Za ispitivanja na elektron-



Sl. 9. — Promena intenziteta habanja sa vremenom (b) pri stepenastom opterećenju (a) saglasno teoriji transformisanja strukture metala pri trenju h_d — debljina sloja metala u kome se javljaju elastično-plastične deformacije, F_T — ukupna površina zone kontakta u kojoj dolazi do plastičnog deformisanja materijala pri $\sigma_\varepsilon > C_k \sigma_s$ pri čemu su zone prikazane u vidu crnih tačaka, d — srednja dimenzija zrna (formirana u površinskom sloju metala pri trenju).

skom mikroskopu jednostranim i dvostranim uklanjanjem tankih površinskih slojeva elektrohemijskim putem formirane su tanke folije. Folije su formirane na različitim rastojanjima od površine. Rendgenska ispitivanja strukture uzorka izvedena su na difraktometru sa scintilacionom registracijom FeK α zračenja. Fizičko širenje difrakcionih linija definiše se po metodologiji izloženoj u radovima L. I. Lisaka. Za proučavanje strukture na različitoj dubini od površine kontakta pre svakog zapisa difrakcionih linija, sa površine uzorka se uklanjaju slojevi metala debljine 5 — 10 μm. Pored toga izvodi se snimanje pri različitim uglovima pada rendgenskog snopa na uzorak, tako da se pri odbijanju mogu analizirati slojevi koji se nalaze na različitim dubinama metala.

Na slici 10 prikazane su fotografije strukture slojeva niskougljeničnih čelika nakon ispitivanja pri pritisku 3,3 10^5 N/m². Fotografije su dobijene na elektronskom mikroskopu i pokazuju da se formira zrnasta struktura, kako u površinskim tako i u potpovršinskim slojevima. Dimenzije zrna,



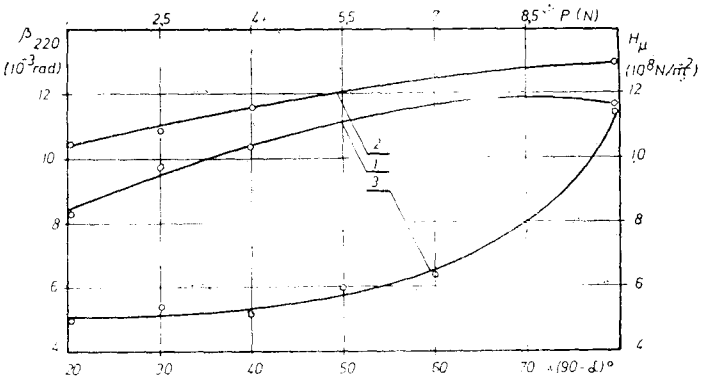
Sl. 10. — Dislokaciona struktura formirana u površinskom i potpovršinskom sloju niskougljeničnog čelika pri trenju: a — površinski sloj, b — oko 5 μm od površine trenja, c — oko 10 μm od površine i d — oko 20 μm od površine.

gustina dislokacija unutar istih i njihovih zidova zavisi od dubine ispitivanih slojeva. Srednja dimenzija zrna se povećava od 0,3 — 0,6 μm u površinskom sloju do 1 — 3 μm na dubini od 5 μm. U površinskim slojevima granice zrna su gusto spojene dislokacijama, dok je unutar iste broj dislokacija relativno mali. Povećanjem rastojanja od površine gustina dislokacija u zidovima zrna se smanjuje, a unutar zrna povećava. Na dubini oko 20 μm istovremeno sa delovima na kojima se uočavaju dovoljno gusto ispreplетane dislokacije, postoje i delovi sa statički ravnomerno raspoređenim dislokacijama.

Rendgenska ispitivanja cilindričnih uzoraka pokazuju da je dubina deformisanog sloja pri trenju približno 200 μm. To potvrđuje činjenica da se širenje rendgenskih linija β javlja samo na rastojanju većem od 200 μm. Na osnovu analize većeg broja fotografija, dobijenih na elektronskom mikroskopu, ustanovljeno je da se u površinskom sloju formira usmerena zrnasta struktura. Srednja vrednost azimuta razorjentacije između susednih zrna površinskog sloja je približno 3°. Na određenom stadijumu obrazuju se zidovi zrna normalni na pravac sile trenja, to jest zidove koji sprečavaju širenje dislokacije. Ovi zidovi su izvori koncentracije napona pri približavanju kontaktnoj površini. Pri cikličnom opterećenju isti su izvori mikropukotina, čiji razvoj predstavlja realizaciju mehanizma zamornog habanja deformisanog sloja metala.

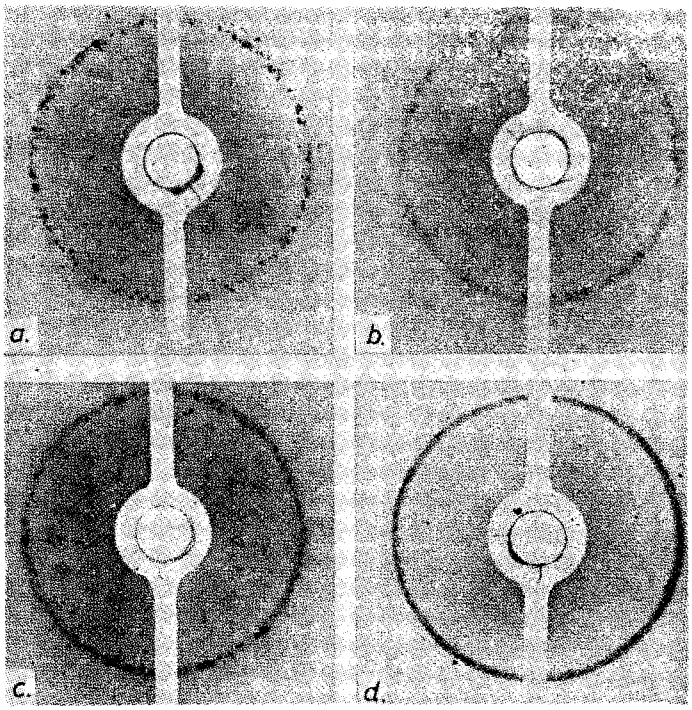
Granica razvlačenja metala sa zrnastom strukturom, kada su zidovi zrna neprobojni za širenje dislokacija suštinski zavisi od dimenzija zrna. U tom slučaju u formuli Holl-Peč se kao parametar d javlja dimenzija zrna u pravcu sile trenja.

Na slici 11 prikazana je promena fizičkog širenja linija 220 i mikrotvrdoće uzorka od niskougljeničnog čelika ispitivanog pri različitim opterećenjima. Put trenja je iznosio



Sl. 11. — Zavisnost fizičkog širenja difrakcionih linija β_{220} i mikrotvrdoće Hμ uzoraka od niskougljeničnog čelika od vrednosti opterećenja pri kontaktu: 1 — $\beta_{220} = \beta_{220}$ (P), α = 10°, 2 — $H_\mu = H_\mu$ (P), 3 — izmena β_{220} uzorka ispitivanog pri opterećenju 1000 N u zavisnosti od ugla nagiba uzorka u odnosu na snop rendgenskih zraka.

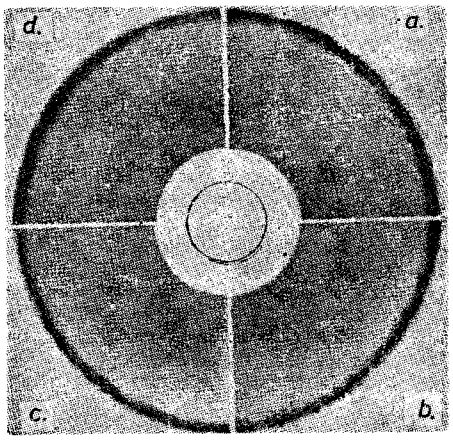
5000 m. Izmenu β_{220}, pri uglu klizanja 10°, sa porastom opterećenja (kriva 1) karakteriše povećani stepen promene oblika kristalne rešetke površinskog sloja uzorka, debljine oko 2 μm. Kriva 1 je saglasna promeni mikrotvrdoće površinskog sloja sa optrećenjem (kriva 2). Na osnovu rezultata dobijenih pri različitim uglovima nagiba uzorka u odnosu na snop rendgenskih zraka (kriva 3), moguće je zaključiti da stepen izmene oblika kristalne rešetke naglo opada pri smanjenju ugla klizanja od 10 — 20°, što odgovara debljini sloja efektivnog rasturanja 2 — 4 μm. Dalje povećanje ugla klizanja do 70° dovodi do znatnog smanjenja parametra β_{220} pri opterećenju 1000 N. Rendgenske fotografije uzoraka pre i posle ispitivanja pri različitim opterećenjima se znatno razlikuju, a prikazane su na slici 12. Linije na fotografijama su različitog oblika i intenziteta. Pre ispitivanja linije su tačkastog oblika, dok se pri povećanju opterećenja povećavaju delovi linija, da bi pri opterećenju od 1000 N linije dobile kontinualan oblik. Takav oblik i promena oblika uslovljena je obrazovanjem zrnaste strukture i njenom promenom pri povećanju opterećenja. Za određivanje debljine sloja zrnaste fragmentacije izvodi se rendgensko snimanje uzoraka uz prethodno elektrohemijsko uklanjanje



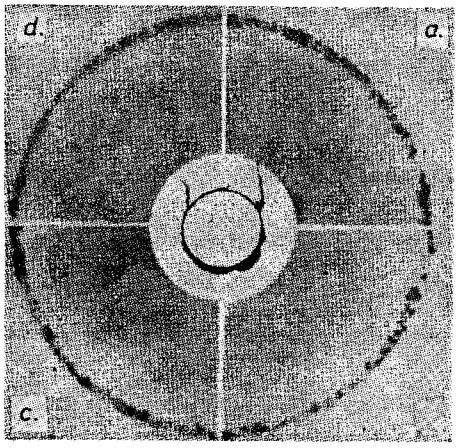
Sl. 12. — Rendgenske fotografije: a — uzorka pre ispitivanja, b — uzorka ispitivanog pri opterećenju 98 N, c — 245 N, d — 980 N, dok je materijal uzorka niskougljenični čelik

slojeva metala debljine do 5 μm. Utvrđeno je da se zrnasta struktura menja na dubini od 10 μm, pri opterećenju 100 N, do 50 — 60 μm, pri opterećenju od 1000 N. To je potvrđeno i rezultatima dobijenim ispitivanjima tankih folija na elektronskom mikroskopu.

Prema tome srednja dimenzija zrna i dubina fragmentacije zavise od opterećenja i određuju stepen plastične deformacije pri trenju. Međutim, poznato je da se stepen deformacije kod svakog metala smanjuje do određene minimalne vrednosti. Prema tome moguće je pretpostaviti da uslovi trenja pri kojima dimenzije zrna dostižu minimalnu vrednost, predstavljaju granične uslove koje prati slabo habanje datog metala. Pri daljem pooštravanju uslova trenja (opterećenja) intenzitet habanja raste. U tom slučaju sposobnost otvrdnjavanja površinskog sloja za račun smanjenja zrna je iscrpljena. Rendgenska struktura ispitivanja uzoraka od čelika 45 (HV = 28,7 10^8 N/m² — slika 13) i Y 8 (HV = 80,4 10^8 N/m² — slika 14) su pokazala da povećanje otperećenja, kao i kod ugljeničnih čelika dovodi do obrazovanja razvijenije zrnaste strukture. Međutim, stepen fregmentacije kod čelika Y 8 je znatno manji nego kod čelika 45, a još više nego kod niskougljeničnih čelika pri istim uslovima ispitivanja. Očigledno je da je to povezano sa različitim osobinama kojima je određena čvrstoća materijala (granica razvlačenja), njihovog polaznog stanja i u skladu sa tim stepena plastične deformacije površinskih slojeva u procesu trenja.



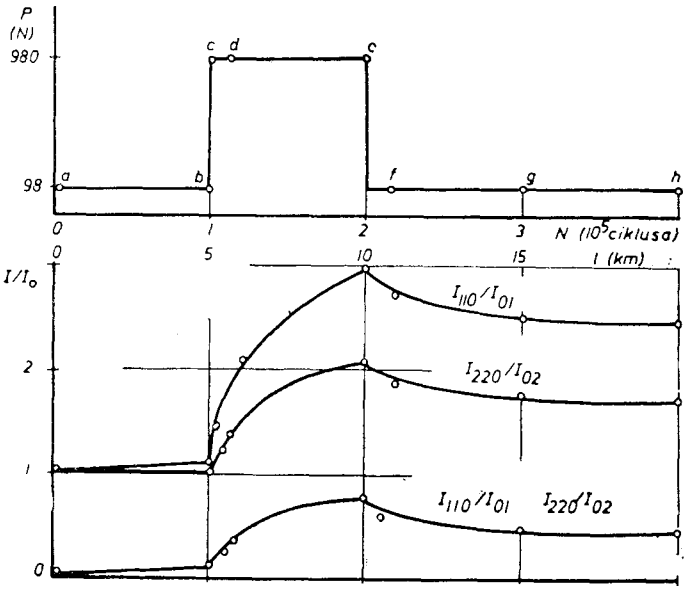
Sl. 13. — Rendgenska fotografija: a — polaznog uzorka, b — uzorka ispitivanog pri opterećenju 98 N, c — 392 N, d — 686 N, pri čemu je materijal uzorka St 45, dok se trenje ostvaruje u prisustvu abraziva, q_a = 500 mg/l.



Sl. 14. — Rendgenska fotografija: a — polaznog uzorka, b — uzorka ispitivanog pri opterećenju 98 N, c — 392 N, d — 686 N, pri čemu je materijal uzorka Y 8, dok se trenje ostvaruje u prisustvu abraziva, q^a = 500 mg/l.

Za proučavanje promena strukture površinskih slojeva metala pri prelazu od jednog nivoa opterećenja na drugi, izvedena su ispitivanja uzoraka prema šemi datoj na slici 15. Pri fiksiranim brojevima ciklusa, označenih na slici tačkama a, b, c, d, e, f i g izvedeno je rendgenografsko snimanje prema podacima iz tablice 2.

U polaznom stanju uzorci su imali krupnozrnastu strukturu (slika 15a). Nakon rada na prvom stepenu opterećenja od 100 N (slika 15 b) na rendgenogramu se povećava dužina linija uz istovremeno povećanje intenziteta linija (110) α — Fe (slika 16 b i tablica 2) što ukazuje na promenu polazne strukture. Prelaz na drugi stepen opterećenja od 1000 N dovodi do dalje suštinske promene strukture površinskog sloja. Na rendgenogramu dobijenom od obrasca



Sl. 15. — Izmena intenziteta difrakcionih linija 110 i 220 α — Fe uzorka od niskougljeničnog čelika, ispitivanog pri trenju sa stepenastom promenom opterećenja

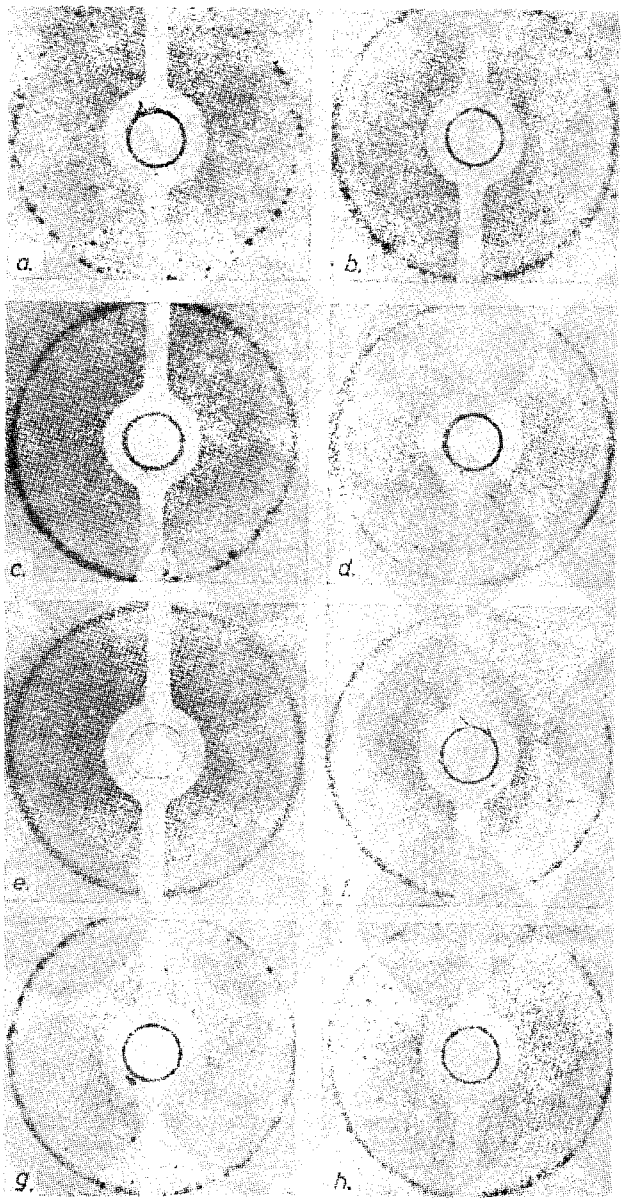
TABLICA 2:

Relativni intenziteti I_{110}/I_{01} i I_{220}/I_{02} linija 110 i 220 α — Fe uzoraka od niskougljeničnog čelika nakon različitog vremena ispitivanja pri stepenastoj promeni opterećenja

Relativni intenzitet rendgenskih linija	Tačke na grafiku (slika 15), koje odgovaraju različitom vremenu rada, nakon koga se određuje intenzitet rendgenskih linija						
	b	c	d	e	f	g	h
I_{110}/I_{01}	1,15	1,70	2,29	3,00	2,68	2,51	2,34
I_{220}/I_{02}	1,05	1,34	1,68	2,21	2,00	1,85	1,78
I_{110}/I_{01} — I_{220}/I_{02}	0,10	0,36	0,61	0,79	0,68	0,66	0,56

nakon 5250 m rada (tačka c) dužina delova linija se povećava da bi nakon 5500 — 10000 m (tačka d i e) došlo do pojave punih linija (slika 16 d i e). Istovremeno raste intenzitet linije 110 α — Fe (slika 15 d, e i tablica 2) u poređenju sa intenzitetom linije uzorka pre ispitivanja, kao i intenzitet linija 220 α — Fe. To pokazuje da sa promenom zrnaste strukture dolazi do pojave i teksture površinskih slojeva.

Smanjenje opterećenja od 1000 na 100 N, takođe, dovodi do postepene promene strukture površinskog sloja. To se ogleda u smanjenju intenziteta linije 110 α — Fe, pojavi delova različitog intenziteta na punim difrakcionim linijama i smanjenja debljine tih linija (slika 16 f, g i h). Prema tome habanje deformisanog sloja materijala na prethodnom stepenu opterećenja dovodi do povećanja zrna, što izaziva pojavu potpovršinskog sloja, manjeg stepena deformisanja, u zoni kontakta. Međutim, srednje dimenzije zrna nakon 10000 m rada na trećem stepenu opterećenja su nekoliko puta manje od zrna obrazovanih na prvoj etapi ispitivanja pri istom opterećenju. Prema tome struktura metala zavisi od predistorije opterećenja i pojave eksploatacionog nasleđa



Sl. 16. — Rendgenske fotografije uzoraka od niskougljeničnog čelika ispitivanih pri trenju sa stepenastom promenom opterećenja

metala pri trenju. Ova pojava je aktuelna pri slabom habanju uzoraka kada vid habanja i karakter ostaju nepromenjeni.

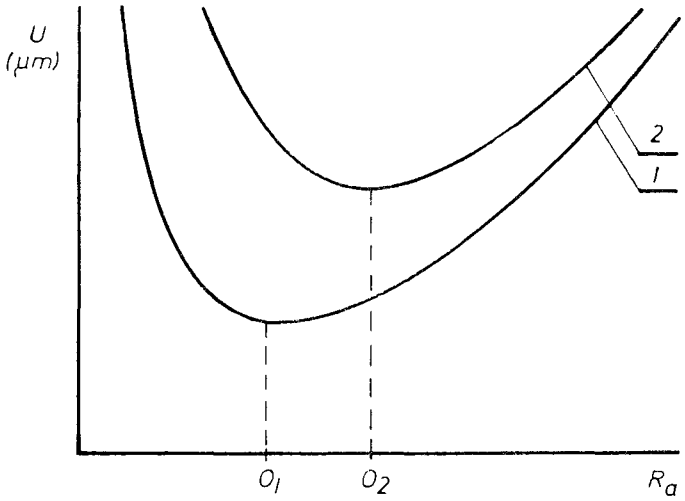
Na taj način, eksperimentalna ispitivanja strukture tankih površinskih slojeva metala pri trenju klizanja sa stepenastom promenom opterećenja potvrđuju pojavu prelaznih perioda pri formiranju strukture. Proučavanje strukture površinskog sloja pri slabom habanju, istovremeno sa postojećim rezultatima ispitivanja, daju osnove za pretpostavku da se u tankim površinskim slojevima javlja mehanizam zamornog habanja. Isti nastaje na mestima na kojima se javlja oscilatorno kretanje elemenata kontaktnih parova.

Pri radu mašina kontaktni parovi su često podvrgnuti dejstvu impulsnih opterećenja znatno većih od opterećenja pri kojima se javlja normalno habanje. Takva preopterećenja najčešće dovode do naglog povećanja temperatura u zoni kontakta, povećanja stepena plastične deformacije i izmene strukture metala. U tim slučajevima, u zavisnosti od polazne strukture, javljaju se procesi sekundarnog kaljenja, homogenizacije strukture, rastvaranja otvrdnute faze, preraspodele ugljenika itd. Eksploataciono nasleđe uslovljeno promenom fizičko-mehaničkih karakteristika materijala, javlja se u toku dužeg vremenskog perioda, a nekada i do momenta kada parovi dostignu granične vrednosti bilo zazora, dinamičke čvrstoće ili nekog drugog parametra.

Zavisnost tehnološkog i eksploatacionog nasleđa od hrapavosti i valovitosti kontaktnih površina

Parametri hrapavosti (R_a, R_z, R_{max} i drugi) i valovitosti (korak i visina) kontaktnih površina utiču na dinamičku čvrstoću, raspodelu pritisaka u zoni kontakta i uslove podmazivanja, a time i na radnu sposobnost i vek trajanja elemenata i sklopova mašina.

Na slici 17 prikazan je uticaj parametra R_a na otpornost na habanje elemenata mašina, prema podacima P. E. Djačenka. Tačke 0_1 i 0_2 odgovaraju optimalnim uslovima habanja (krive 1 i 2). Kriva 2 je dobijena za teže uslove rada.



Sl. 17. — Zavisnost parametra habanja (u) elemenata od parametra R_a hrapavosti površina

Otpornost na habanje elemenata zavisi ne samo od vrednosti parametara hrapavosti već i od pravca tragova na obrađenoj površini. Važna karakteristika mikrogeometrije kontaktnih površina je noseća kriva profila, čiji se prvi deo opisuje relacijom oblika:

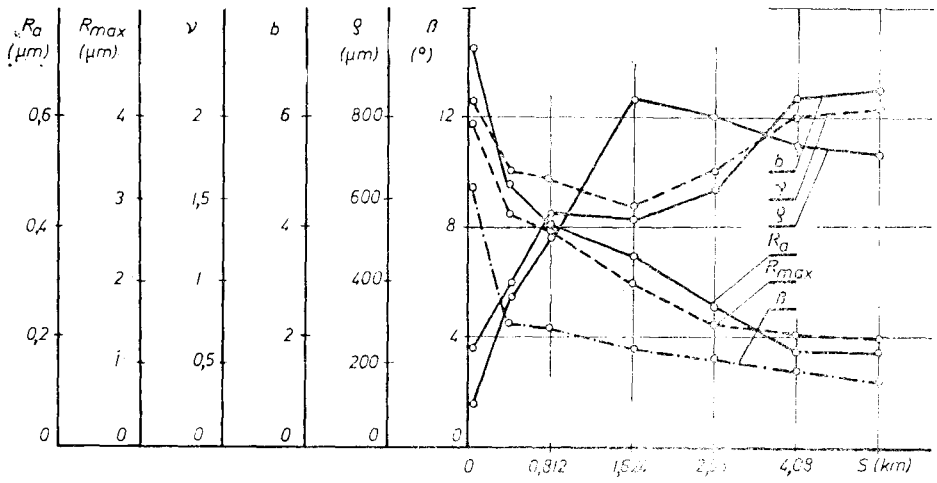
$$t'_p = b\varepsilon^{\nu}$$

gde su: t'_p — relativna površina (dužina) preseka materijala, ε — relativno približavanje $\varepsilon = p'/R_{max}$, p' — brojna vrednost nivoa preseka profila, R_{max} — maksimalna visina neravnina, b, ν — parametri zavisni od vrste obrade kontaktnih površina.

Svakom tehnološkom postupku obrade kontaktnih površina odgovara određena vrednost parametara hrapavosti. Otuda se za glavne elemente, kao neophodnost, javlja obavezno propisivanje visine neravnina, parametara noseće krive profila, radijusa zaobljenja vrhova i udubljenja neravnina, kao i pravaca tragova obrade.

U procesu uhodavanja kontaktnih površina, parametri koji definišu njihovu hrapavost se suštinski menjaju u zavisnosti od režima rada, uslova podmazivanja, materijala i metoda obrade površina kontratela (slika 18).

U cilju smanjenja veličine habanja, u procesu uhodavanja, neophodno je procesom mehaničke obrade formirati takve geometrijske i fizičko-mehaničke karakteristike, koje odgovaraju karakteristikama formiranim pri kraju perioda uhodavanja. Potrebno je, takođe, uzeti u obzir činjenicu da eksploatacione osobine zavise ne samo od hrapavosti površine formirane operacijama završne obrade, već i od hrapavosti nakon operacija prethodne obrade. Naprimer, polazna mikrogeometrija utiče na kontaktnu nosivost elemenata od čelika ШХ 15. U cilju provere ove konstatacije izrađene su četiri grupe uzoraka od jedne čelične šipke. Mehanička obrada pre kaljenja je bila različita: 1-a grupa: gruba strugarska obrada, 2-a i 3-a grupa: strugarska obrada 5-e klase hrapavosti i 4-a grupa: brušenje 9-e klase hrapavosti. Zatim se uzorci kale pri istim režimima, kako bi nakon termičke obrade imali istu tvrdoću. Kaljeni uzorci su brušeni, a neki i polirani. Završno obrađeni uzorci su imali hrapavost 10-e klase (po GOST-u). Ispitivanja kontaktne nosivosti su pokazala da se mehanizam zamornog habanja, u najvećem broju slučajeva, javlja na uzorcima koji su pre kaljenja obrađivani grubom strugarskom obra-



Sl. 18. — Izmena karakteristika hrapavosti kontaktnih površina valjčića od kaljenog čelika 12 X H3A u procesu uhodavanja (S—put trenja, R_a, R_{max} —srednje aritmetičko odstupanje i maksimalna visina neravnina profila, b, ν —parametri noseće krive profila, ρ —radijus zaobljenja vrha, β—ugao nagiba strana mikroneravnina profila).

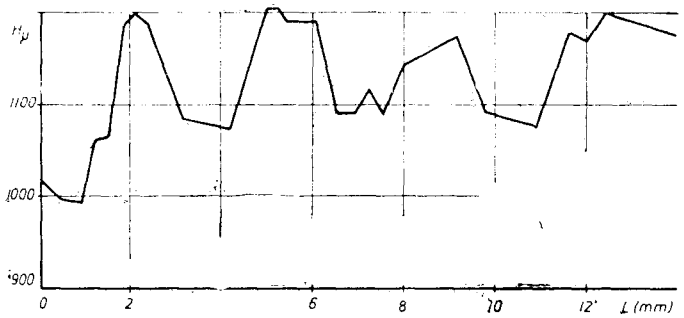
dom. Nekoliko puta manje razaranje imaju uzorci 2-e i 3-e grupe, dok se na uzorcima brušenim pre kaljenja mehanizam zamornog habanja ne uočava.

Nejednorodnost strukture, koja je znatnije izražena kod uzoraka grubo obrađenih pre termičke obrade, je osnovni uzrok smanjenih eksploatacionih osobina. Pri brušenju grubo obrađenih površina na uzvišenjima, u momentu njihovog uklanjanja tocilom nastaju toplotni udari. Toplotni udari dovode do promene strukture lokalnih zapremina. Na udubljenjima, pak, metal se menja, zagreva pa se struktura razlikuje od strukture formirane na uzvišenjima. Ta razlika izaziva pojavu strukturne koncentracije napona, obrazovanja mikropukotina i stvaranja uslova za razvoj mehanizma zamornog habanja.

Strukturne razlike u površinskim slojevima su prouzrokovane i valovitošću površina. Oscilovanje reznih elemenata alata u odnosu na predmet obrade, uslovljeno valovitošću površine, dovodi do periodičnog povećanja dubine rezanja, a time i do promene strukture površinskih slojeva usled dejstva promenljivih dinamičkih i temperaturnih faktora. Pri brušenju može doći do pojave mestimičnih pregorevanja površina, tako da naredne operacije završne obrade ne mogu isključiti dobijanje sloja različite strukture. Pojave različite strukture smanjuju eksploatacione osobine elemenata. Takav tip »strukturnog« tehnološkog nasleđa se delimično javlja u vidu određene raspodele mikrotvrdoće površinskih slojeva nakon brušenja (slika 19).

Otpornost na habanje u znatnoj meri zavisi od valovitosti kontaktnih površina. U radovima P. E Djačenka dati su rezultati ispitivanja kontaktnih parova čiji su elementi izrađeni od čelika i belog metala. Pri povećanju valovitosti čeličnih uzoraka za 8—15 μm, habanje uzoraka od belog metala se povećava više od 2 puta.

U cilju obezbeđenja neophodne kontaktne čvrstoće i pogodnih uslova podmazivanja često se izvodi i šaberovanje kontaktnih površina. Pri habanju takvih površina dolazi do stalne promene dubine udubljenja i povećanja površine



Sl. 19. — Izmena mikrotvrdoće brušene površine u pravcu glavnog kretanja, L-dužina mernog dela površine

kontakta. Kontaktna površina pri šaberovanju se definiše koeficijentom popunjenosti K_3. Isti predstavlja odnos stvarne površine kontakta F_{sum} i nominalne površine F_n : $K_3 = F_{snm} / F_n$. Zavisnost koeficijenta K_3 i parametra linearnog habanja u, po Yu. V. Skorininu, je oblika:

$$\lg K_3 = \left(1 - \frac{u}{R_M}\right)^m \lg K_{30},$$

gde su: R_M—maksimalna dubina udubljenja formiranih postupkom šaberovanja K_{30}—početna vrednost koeficijenta popunjenosti, m—koeficijent zavisan od postupka šaberovanja.

Konturna površina pri sprezanju dve površine obrađene postupcima šaberovanja je manja od konturne površine bilo koje od njih. Pri istim koeficijentima popunjenosti konturna površina je određena relacijom:

$$F_{sum} = F_n \cdot K_{30}^{2\left(1 - \frac{u}{R_M}\right)^m}.$$

Ova zavisnost odražava eksploataciono nasleđe sklopa vezano sa nepovratnim karakterom promene konturne površine pri habanju.

Uloga tehnološkog i eksploatacionog nasleđa pri formiranju mikrogeometrije elemenata

Prema Š. M. Bilaku, makrogeometrija kontaktnih površina određuje pouzdanost rada sklopova i mehanizama. Izmena geometrijskog oblika uslovljena je tehnologijom izrade, montaže, uslovima rada (temperaturnim i elastičnim deformacijama) i kvalitetom remontnih radova. Ta promena dovodi do narušavanja pravilnog rasporeda osa i površina, nastanka pregrejanih mesta, površinskog habanja i zadora, plastičnog deformisanja i drugih oblika intenzivnog razaranja kontaktnih površina. Pored toga, znatno se povećava verovatnoća pojave loma elemenata tipa osovina, vratila i ležišta usled pojave preopterećenja.

Međutim, pojava greške obrade na alatnim mašinama dovodi do odstupanja trenutne putanje kretanja predmeta obrade i alata od zadate. Ovo odstupanje je uslovljeno tačnošću izrade kinematskih parova mehaničkih sistema i faktorima vezanim za uslove njihove eksploatacije (elastične i temperaturne deformacije elemenata, habanje kontaktnih površina, starenje materijala, kolebanje dubine odnosno debljine uljnog filma i slično). Pri oceni veka trajanja sklopova preciznih alatnih mašina granično stanje mnogih elemenata (vođice, kopiri, zavojni parovi i dr.) karakteriše veličina odstupanja oblika radnih površina od početnih—računskih.

(Nastavak u narednom broju časopisa)

UDK 620.178.162:621.91.003.12

Z. PALUNČIĆ*

Uticaj sredstava za hlađenje i podmazivanje na vrednost obrade

UVOD

Proces rezanja u obradi metala praćen je razvojem visokih temperatura i visokim pritiscima u zoni rezanja. U ovakvim uslovima na reznom klinu alata intenzivno se razvijaju tribološki procesi, čija je posledica trošenje alata. Sredstva za hlađenje i podmazivanje, svojim dejstvom, koje se u osnovi sastoji u odvođenju razvijene toplote i podmazivanju kontaktnih površina, smanjuje intenzitet razvoja triboloških procesa na reznim elementima alata. Pravilna primena sredstava za hlađenje i podmazivanje može znatno uvećati postojanost alata, a time i ekonomičnost obrade u celini.

S obzirom na važnost koju imaju u proizvodnom sistemu, razvoju sredstava za hlađenje i podmazivanje poklanja se velika pažnja. Savremena sredstva za hlađenje i podmazivanje predstavljaju složene, mnogokomponentne sisteme, kod kojih nije važan samo sastav već i kvalitet komponenti.

U obradi metala rezanjem koriste se, po pravilu, sredstva za hlađenje i podmazivanje dobijena na bazi rafinisanih mineralnih ulja, koja se primenjuju kao čista ulja za rezanje ili kao uljne emulzije. Poslednjih godina, zahvaljujući brzom razvoju proizvodnje površinski aktivnih materija, razvijena su sredstva za hlađenje i podmazivanje koja sadrže malo ili nimalo mineralnih ulja. Uobičajeni naziv za ova sredstva je polusintetička odnosno sintetička sredstva za hlađenje i podmazivanje i kao takva predstavljaju alternaciju uljnim emulzijama, a po tribološkim osobinama već ih i prevazilaze.

Poslednjih godina svetska industrija suočena je sa izrazitom krizom proizvodnje nafte, što je dovelo do povećanja njene cene. S obzirom na ograničenost izvora nafte i neminovnost sve veće štednje, zamena sredstava za hlađenje i podmazivanje na bazi mineralnih ulja sintetičkim sredstvima postaje sve aktuelnija.

U Laboratoriji za obradu metala i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu izvršena su ispitivanja kvaliteta sredstava za hlađenje i podmazivanje sa tribološkog aspekta. Za ispitivanje su odabrane uljne emulzije, polusintetička i sintetička sredstva za hlađenje i podmazivanje, koja se najčešće primenjuju u klasičnim vrstama obrade kao što su struganje, brušenje i glodanje. Kvalitet sredstava za hlađenje i podmazivanje definisan je na osnovu otpornosti alata na habanje. Otpornost alata na habanje, za svaku vrstu ispitivanih sredstava za hlađenje i podmazivanje, utvrđena je praćenjem intenziteta razvoja procesa habanja na leđnoj površini reznog elementa alata. Metodologija ispitivanja zasnovana je na korišćenju radioaktivnih izotopa kao indikatora za praćenje razvoja procesa habanja.

VRSTE SREDSTAVA ZA HLAĐENJE I PODMAZIVANJE

Sredstva za hlađenje i podmazivanje se, po najopštijoj podeli svrstavaju u tri grupe:

- ☐ čista rezna ulja
- ☐ uljne emulzije
- ☐ sintetička sredstva

Čista rezna ulja primenjuju se u operacijama koje treba da daju dobar kvalitet obrađene površine, kao što je obrada navoja, zupčanika ili obrada provlačenjem. Takođe se primenjuju za obradu teže obradivih materijala, na primer legiranih i termički obrađenih čelika. U početku su kao rezna ulja korišćena masna ulja biljnog ili životinjskog porekla, ali danas su potisnuta mineralnim uljima koja imaju veću postojanost.

Uljima za rezanje često se dodaju različiti sastojci, čiji je zadatak poboljšanje eksploatacijskih karakteristika ulja. Ovi sastojci predstavljaju aditive, koji načešće imaju antifrikciona ili antihabajuća svojstva. Prema načinu delovanja aditiva na obojene metale rezna ulja se dele na ulja aktivnog i neaktivnog tipa. Ulja aktivnog tipa imaju nisku cenu, ali je njihova primena ograničena zbog opasnosti da izazovu koroziju delova alatne mašine. Ulja neaktivnog tipa na normalnim temperaturama ne reaguju sa obojenim metalima pa stoga, pored funkcije koju obavljaju pri rezanju, mogu vršiti i podmazivanje određenih sklopova mašine.

Uljne emulzije sastoje se od mineralnog ulja, vode i emulgatora. Emulgatori su površinski aktivne materije, čiji je zadatak obrazovanje stabilnih emulzija u vodi. U sastav uljnih emulzija, pored emulgatora ulaze još i inhibitori korozije i baktericidi kao i sastojci za smanjenje penušanja.

Uljne emulzije se, s obzirom na primenu, mogu podeliti na tri grupe:

- ☐ mlečne neprozirne emulzije,
- ☐ čiste mlečne emulzije koje se primenjuju u operacijama brušenja; sadržaj emulgatora u ovim emulzijama je povećan, tako da se dobijaju finije emulzije, što im daje veću prozirnost,
- ☐ uljne emulzije sa EP-aditivima koje imaju mlečan izgled, a aditivi na bazi sumpora, hlora i fosfora obezbeđuju smanjenje trenja u uslovima ekstremnih pritisaka.

Sintetička sredstva za hlađenje i podmazivanje predstavljaju prave rastvore neorganskih ili organskih materija u vodi ili rastvore obogaćene aditivima za snižavanje površinskog napona vode. Sintetička sredstva, analogno emulzijama, pripremaju se na mestu upotrebe rastvaranjem koncentrata u vodi. Imaju prednost u odnosu na emulzije zbog svoje prozirnosti, koja olakšava praćenje procesa obrade, kao i veće postojanosti eksploatacionih svojstava. Neke negativne osobine, kao što su sklonost ka obrazovanju naslaga na delovima mašine, visoka Ph-vrednost ili opasnost od emulgovanja ulja koje se koristi za podmazivanje sklopova mašine, su otklonjene.

Mešanjem mineralnih ulja i hemijskih sredstava dobijaju se polusintetička sredstva za hlađenje i podmazivanje. Sadržaj mineralnog ulja u njima iznosi 5—40%, dok je povećan sadržaj emulgatora kako bi se dobile što finije kapljice ulja, a time i bolje eksploatacijske karakteristike.

* Biografija autora data u časopisu br. 1 (1979.).

METOLOGIJA ISPITIVANJA TRIBOLOŠKIH KARAKTERISTIKA SREDSTAVA ZA HLAĐENJE I PODMAZIVANJE

Svojim prisustvom u procesu rezanja sredstva za hlađenje i podmazivanje usporavaju razvoj triboloških procesa na kontaktnim površinama između alata i predmeta obrade. 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. Sredstvo za hlađenje i podmazivanje, pri kojem se tribološki procesi na reznim elementima alata najsporije odvijaju, obezbeđuje najveću postojanost alata, a time i mogućnost povećanja ekonomične brzine rezanja. Veća ekonomična brzina rezanja smanjuje vreme efektivnog rezanja pri izvođenju proizvodne operacije, čime se stvaraju uslovi za smanjenje troškova obrade.

Vrednost obrade jedne proizvodne operacije koja se ostvaruje u serijskoj ili masovnoj proizvodnji može se predstaviti sledećim izrazom:

$$V_0 = R + A + M + V_{SHP} \qquad (1)$$

Primenjene oznake u izrazu predstavljaju:

- vrednost rada proizvodnog i stručnog radnika (brigadira)

$$R = n\, K_1\, t_k \qquad (2)$$

- troškovi reznog alata

$$A = \left(n\, K_1\, t_1 + K_2\, t_2 + \frac{C_a}{i+1}\right)\frac{t_g}{T} \qquad (3)$$

- veličina amortizacije proizvodne opreme po jednoj operaciji

$$M = \frac{C_m\, p}{100 \cdot 60 \cdot F}\, t_k \qquad (4)$$

- troškovi sredstva za hlađenje i podmazivanje

$$V_{SHP} = \frac{C_u\, k\, q}{100 \cdot 60}\, t_k \qquad (5)$$

gde je:

n — faktor koji uzima u obzir uticaj ličnog dohotka stručnog radnika na vrednost proizvodne operacije

K_1 i K_2 — bruto lični dohotci operacijskog radnika i oštrača, din

t_1 i t_2 — vreme promene alata na proizvodnoj mašini i vreme oštrenja alata, min

C_a — vrednost alata, din

i — broj mogućih oštrenja alata

C_m — vrednost mašine na kojoj se primenjuje amortizaciona stopa, din

p — amortizaciona stopa, u procentima

F — ukupno vreme koje se troši na proizvodnoj mašini u toku godine, u časovima

C_u — vrednost emulgirajućeg ulja, odnosno koncentrata za hlađenje i podmazivanje, din/lit

q — potrošnja sredstava za hlađenje i podmazivanje, lit/h

k — sadržaj ulja ili koncentrata u sredstvu za hlađenje i podmazivanje, u procentima

t_k — vreme trajanja proizvodne operacije, min

t_g — vreme efektivnog rezanja, min

Vreme trajanja proizvodne operacije t_k može se izraziti u obliku

$$t_k = t'_k + t_g \qquad (6)$$

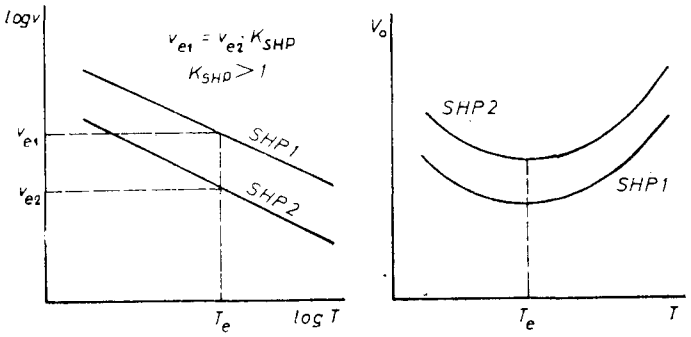
gde je:

t_k' — ostali deo ukupnog vremena trajanja proizvodne operacije (pomoćno vreme, pripremno — završno vreme itd.)

Unošenjem zavisnosti (6) u izraz za vrednost proizvodne operacije moguće je formirati dva člana izraza, od kojih jedan zavisi od t_g dok je drugi nezavisan. S obzirom da postoji veza između t_g i brzine rezanja i brzine rezanja i postojanosti (Tejlor), može se konačno vrednost obrade izraziti u zavisnosti od postojanosti:

$$V = V_1 + V_2\,(T) \qquad (7)$$

Najmanja vrednost ove funkcije ostvaruje se pri ekonomičnoj postojanosti alata, koja je posledica obrade ekonomičnom brzinom rezanja. Kvalitet sredstava za hlađenje i podmazivanje ne utiče na veličinu ekonomične postojanosti, ali može da promeni veličinu ekonomične brzine rezanja, što se najočiglednije vidi na sl. 1. a. Povećanjem ekonomične brzine rezanja smanjuje se minimum funkcije (7) za vrednost obrade (sl. 1. b.), što znači da kvalitetnije sredstvo za hlađenje i podmazivanje utiče na smanjenje troškova alata, troškova mašine i vrednosti rada potrebnog za ostvarenje proizvodne operacije.



a) b)

Slika 1.

Da bi se odredile tribološke karakteristike sredstava za hlađenje i podmazivanje, potrebno je utrvditi u kolikoj meri svako od ispitivanih sredstava za hlađenje i podmazivanje utiče na intenzitet razvoja triboloških procesa. U Laboratoriji za obradu metala i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu razvijena je metoda praćenja razvoja triboloških procesa na reznim elementima alata, koja se zasniva na utvrđivanju otpornosti alata na habanje u funkciji stepena pohabanosti reznih elemenata. Poznajući funkcionalnu zavisnost između otpornosti na habanje i pohabanosti reznih elemenata alata moguće je izračunati odgovarajuću postojanost alata za određeni kriterijum zatupljenja. Otpornost na habanje definiše se izrazom:

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

Funkcionalna veza $R = f\,(h)$, dobija se praćenjem širine pojasa habanja na leđnoj površini reznog klina (Δh) posle određenih vremenskih perioda rezanja (ΔT). U principu, dovoljno je odrediti po tri tačke funkcije $R = f\,(h)$ u prvom i drugom periodu rezanja. Postojanost se izračunava prema izrazu:

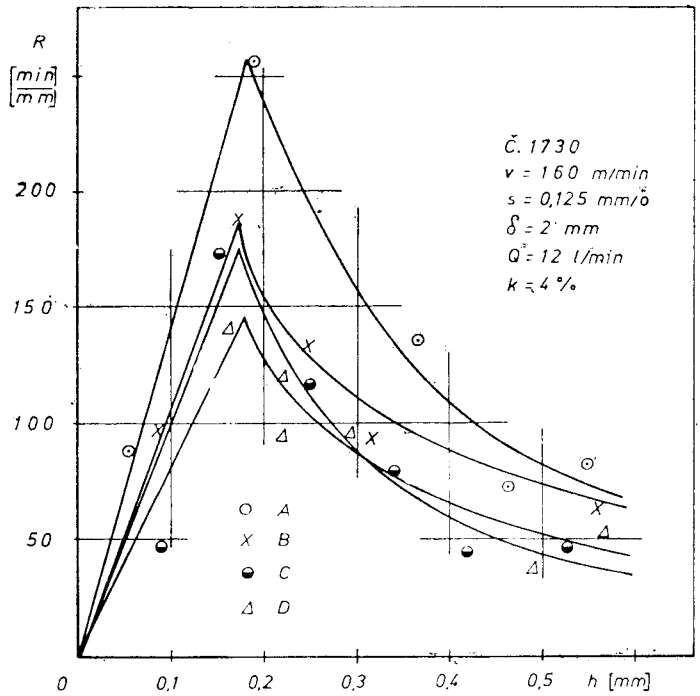
$$T = \int_0^{h_0} R_1\,(h)\,dh + \int_{h_0}^{h_k} R_2\,(h)\,dh \qquad (9)$$

Praćenje razvoja širine pojasa habanja na leđnoj površini reznog klina vrši se radioaktivnim putem. Deo leđne površine reznog klina i to onaj koji neposredno učestvuje u kontaktu sa obrađivanim materijalom u toku obrade, ozračuje se bombardovanjem teškim česticama (deuteroni, protoni, α-čestice). Produkti habanja, koji odlaze sa leđne površine usled triboloških procesa, odnose sa sobom deo radioaktivnih čestica ozračene površine, čime se njena radioaktivnost smanjuje. Merenjem radioaktivnosti ozračene po-

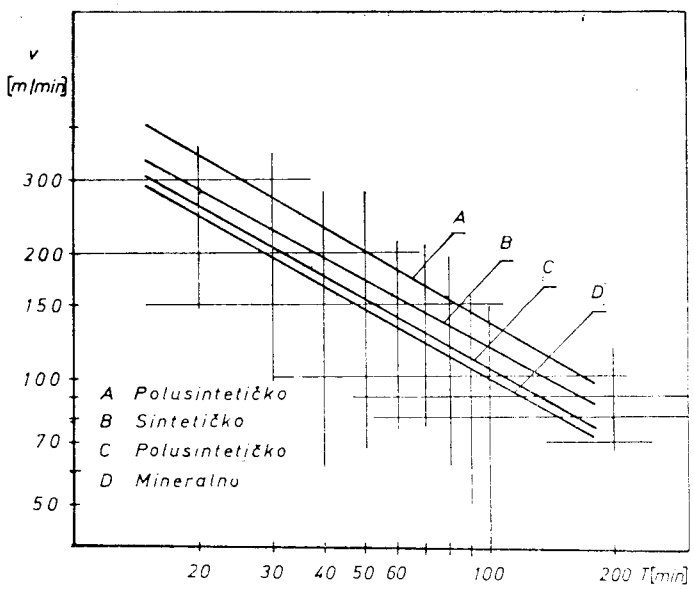
vršine posle relativno malih perioda rezanja (oko 0,5 min) određuje se promena širine pojasa pohabanosti. Zahvaljujući ovako velikoj osetljivosti metode pri praćenju habanja moguće je jednim ozračenim alatom i za kratko vreme, izvršiti program ispitivanja, koji bi zahtevao, pri klasičnim metodama ispitivanja, veliki broj alata i vreme ispitivanja.

REZULTATI ISPITIVANJA

Programom ispitivanja triboloških karakteristika sredstava za hlađenje i podmazivanje predviđeno je određivanje njihovog kvaliteta u obradi struganjem i obimnim glodanjem.



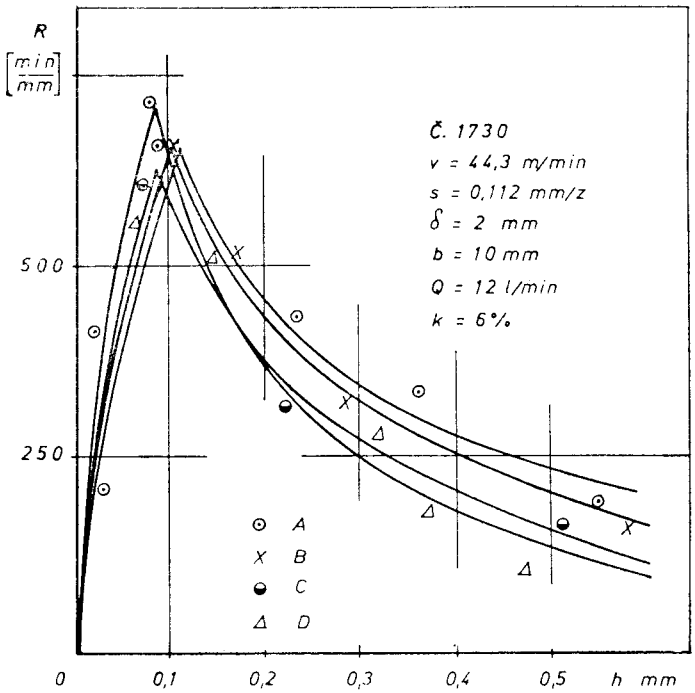
Sl. 2 — Otpornosti na habanje pri obradi struganjem



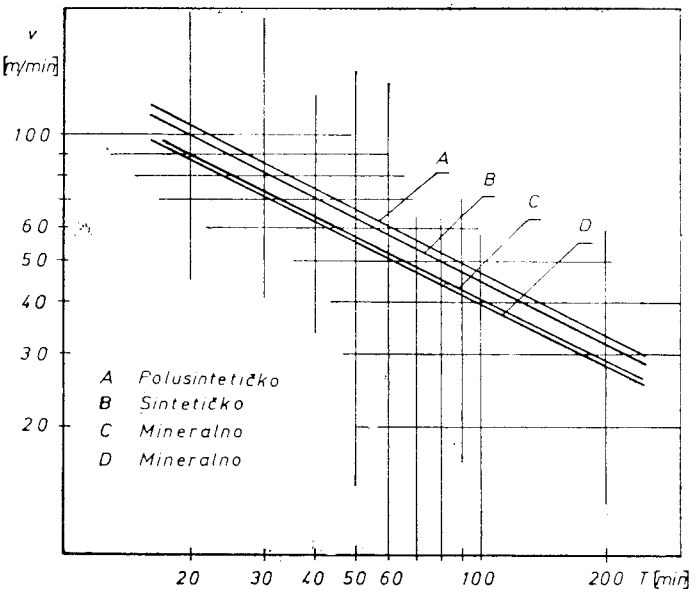
Sl. 3. — Tejlorove zavisnosti

Na sl. 2. prikazane su otpornosti na habanju dobijene pri ispitivanju četiri vrste sredstava za hlađenje i podmazivanje u obradi struganjem, a pri brzini rezanja v = 160 m/min. Na dijagramu su sa A i C označena polusintetička sredstva za hlađenje i podmazivanje, sa B sintetičko, a sa D emulzija na bazi mineralnog ulja. Na sl. 3. predstavljene su odgovarajuće Tejlorove zavisnosti za ispitivane vrste sredstava za hlađenje i podmazivanje.

Iz prikazanih rezultata zaključuje se da su ispitivana sredstva za hlađenje i podmazivanje različitog kvaliteta, posmarano sa tribološkog aspekta, s obzirom da u različitoj meri utiču na smanjenje triboloških procesa na reznim elementima alata. Sredstvo A omogućava obradu sa najvećom brzinom rezanja, a time i najmanjim vremenom efektivnog rezanja u odnosu na ostale vrste ispitivanih sredstava za hlađenje i podmazivanje. Takođe se zapaža da je po kvalitetu, s obzirom na tribološke karakteristike, mineralno emulgirajuće ulje D pokazalo najslabije rezultate. Rezultati ispitivanja sredstava za hlađenje i podmazivanje pri obradi obimnim glodanjem prikazani su na sl. 4. i sl. 5.



Sl. 4. — Otpornosti na habanje pri obradi obimnim glodanjem



Sl. 5. — Tejlorove zavisnosti

Ispitivano je polusintetičko (A), sintetičko (B) kao i dva sredstva za hlađenje i podmazivanje na bazi mineralnog emulgirajućeg ulja (C i D).

Kod oba postupka obrade najslabije tribološke karakteristike pokazala su mineralna emulgirajuća ulja, što znači da ih polusintetička i sintetička sredstva za hlađenje i podmazivanje prevazilaze po kvalitetu. Ranije je izneto

da kvalitetnija sredstva za hlađenje i podmazivanje omogućavaju smanjenje troškova alata, mašine kao i vrednosti rada potrebnog za ostvarenje proizvodne operacije. S druge strane mineralna emulgirajuća ulja još uvek su po ceni ispod cene koštanja polusintetičkih i sintetičkih sredstava za hlađenje i podmazivanje (izuzimajući sredstvo B korišćeno pri struganju). Da bi se dobila prava predstava o uticaju svakog od ispitivanih sredstava na ekonomičnost izvođenja proizvodne operacije, izvršen je proračun vrednosti obrade. Podaci za proračun uzeti su iz proizvodnih uslova za prosečne operacije struganja i obimnog glodanja. Kvalitet sredstava za hlađenje i podmazivanje definisan je na osnovu prikazanih rezultata preko faktora K_{SHP}, koji ima uticaj na brzinu rezanja.

na vrednost obrade odlučujući uticaj ima kvalitet primenjenog sredstva za hlađenje i podmazivanje, dok je cena koštanja od manjeg značaja.

S obzirom na veliki uticaj kvaliteta sredstava za hlađenje i podmazivanje na vrednost obrade potrebno je posvetiti pažnju izboru odgovarajućeg sredstva za određenu vrstu obrade, jer u zavisnosti od proizvodnih uslova u kojima se primenjuju, različita sredstva za hlađenje i podmazivanje u različitoj meri utiču na usporavanje triboloških procesa na reznim elementima alata, odnosno na povećanje postojanosti alata.

U analiziranim operacijama udeo efektivnog vremena rezanja t_z u ukupnom vremenu trajanja proizvodne operacije t_k iznosio je oko 60%. Efekat uticaja kvaliteta sred-

TABELA 1.

Analiza vrednosti obrade proizvodne operacije struganja

SREDSTVO		Polusintetičko A		Sintetičko B		Polusintetičko C		Mineralno D	
C_u	(Indeks)	100		25		92		30	
K_{SHP}	—	1,29		1,10		1,00		0,93	
t_k	(min)	1,82		2,00		2,12		2,22	
		VREDNOST OBRADE							
		din	indeks	din	indeks	din	indeks	din	indeks
Vrednost rada (R)		1,29	100	1,42	110	1,51	117	1,58	122
Troškovi alata (A)		0,88	100	1,04	118	1,14	129	1,23	140
Troškovi mašine (M)		2,92	100	3,20	110	3,39	116	3,55	122
Troškovi SHP (V_{SHP})		0,15	100	0,04	27	0,16	107	0,05	33
Vrednost obrade (V_0)		5,24	100	5,70	109	6,20	118	6,41	122

TABELA 2.

Analiza vrednosti obrade proizvodne operacije glodanja

SREDSTVO		Polusintetičko A		Sintetičko B		Mineralno C		Mineralno D	
C_u	(Indeks)	100		131		32		29	
K_{SHP}	—	1,00		0,95		0,83		0,81	
t_k	(min)	0,93		0,96		1,04		1,06	
		VREDNOST OBRADE							
		din	indeks	din	indeks	din	indeks	din	indeks
Vrednost rada (R)		0,46	100	0,48	104	0,51	111	0,52	113
Troškovi alata (A)		0,13	100	0,135	104	0,156	120	0,16	123
Troškovi mašine (M)		0,60	100	0,62	103	0,67	112	0,68	113
Troškovi SHP (V_{SHP})		0,05	100	0,07	140	0,02	40	0,02	40
Vrednost obrade (V_0)		1,24	100	1,31	106	1,36	110	1,38	111

U tab. 1. i 2. prikazan je uticaj ispitivanih sredstava za hlađenje i podmazivanje na vrednost obrade za operacije struganja i obimnog glodanja.

ZAKLJUČAK

Na vrednost obrade sredstva za hlađenje i podmazivanje utiču na dva načina: svojim kvalitetom, odnosno uticajem na povećanje postojanosti alata i cenom koštanja. Cene koštanja ispitivanih sredstava bile su veoma različite, pri čemu su mineralna emulgirajuća ulja bila najjeftinija (izuzimajući sredstvo B u tab. 1). Posmatrajući ukupan efekat uticaja na vrednost obrade, mineralna emulgirajuća ulja su u obe analize pokazala najslabije rezultate, s obzirom da je vrednost obrade pri njihovoj upotrebi veća nego kada se u obradi koriste polusintetička i sintetička sredstva za hlađenje i podmazivanje. Iz ovoga se nameće zaključak da

stava za hlađenje i podmazivanje na vrednost obrade bio bi još izraženiji za operacije u kojima je deo efektivnog vremena rezanja u ukupnom vremenu tk veći.

LITERATURA

1. IVKOVIĆ B., Tribologija rezanja, sredstva za hlađenje i podmazivanje, Građevinska knjiga, Beograd, 1979.
2. IVKOVIĆ B., Tribološke karakteristike sredstava za hlađenje i podmazivanje, »Obrada metala i tribologija« 10, Kragujevac, 1978.
3. JEREMIĆ B., Tribološke karakteristike sredstava za hlađenje i podmazivanje pri obradi brušenjem, »Obrada metala i tribologija«, 10, Kragujevac, 1978.
4. ARSOVSKI S., Tribološke karakteristike sredstava za hlađenje i podmazivanje pri obradi glodanjem, »Obrada metala i tribologija«, 10, Kragujevac, 1978