



GODINA I
BROJ 3.
NOVEMBAR, 1979.

tribologija u industriji

sadržaj contents содержание

UVODNIK
INTRODUCTION
ПЕРЕДОВИЦА

ISTRAŽIVANJA
RESEARCH
ИССЛЕДОВАНИЯ

KNJIGE I ČASOPISI
BOOKS AND JOURNALS
КНИГИ И ЖУРНАЛЫ

NAUČNI SKUPOVİ
SCIENTIFIC MEETINAS
НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ

REZIMEA
ABSTRAKTS
РЕЗЮМЕ

- R. ZGAGA:** Ekonomski aspekti tribologije — Economical Aspects of Tribology — Экономические аспекты трибологии 3

- M. NEDELJKOVIĆ, M. VELIMIROVIĆ, A. VULIĆ:** Određivanje temperature maziva i graničnog opterećenja pužnog prenosnika primenom metode višefaktornog planiranja eksperimenta — Establishing of lubricant temperature of worm transmission limit load by applying of technique of multifactoral planning experiments — Определение температуры смазки и граничной нагрузки червячной передачи с использованием метода многофакторного планирования экспериментов 6

- M. LAZIĆ:** Vrednost obrade u funkciji koncentracije polusintetičkih emulgirajućih ulja u sredstvu za hlađenje i podmazivanje — Machining value in function of concentration of semi-synthetical emulzive oils in cutting fluids — Стоимость обработки в функции концентрации полисинтетических эмульгирующих масел в средстве для охлаждения и смазки 13

- S. MAHOVIĆ:** Uticaj hrapavosti površine na prionljivost maziva — Effects of surface roughness to the lubricant adhesion — Влияние шерховатости на прилипаемость смазки 19

- S. ARSOVSKI:** Analiza mogućnosti adaptivnog upravljanja alatnim mašinama na osnovu merenja intenziteta habanja raznih elemenata alata — Analysis of possibility of adaptive running with machine tools based upon measurements of wear intensify on tools cutting elements — Анализ возможности адаптивного управления металлообрабатывающими станками на основе интенсивности износа режущих элементов инструмента 23

- M. STUPNIŠEK:** Primjena skening mikroskopa i elektronskog mikroanalizatora u tribološkim istraživanjima — Application of scanning mikroscop and electronic microanalyser in tribological researches — Применение сканинг микроскопа и электронного микроанализатора в трибологических исследованиях 29

3

6

13

19

23

29

32

34

35

Ekonomski aspekti tribologije

Prijeći zbivanja na području strojarstva, sve češće se u zadnjih petnaestak godina susrećemo sa tribologijom kao djelatnošću koja tretira probleme trenja i trošenja, te suzbijanja ovih pojava. Brojne knjige, časopisi, savjetovanja, kongresi, te seminari, kao i predmeti u fakultetskim nastavnim planovima, ukazuju na izrazito rastuću značajnost tribologije u suvremenom tehničkom svijetu, posebno na području strojarstva.

Cinjenica je, s druge strane, da tribologija nije jedina novina s kojom smo se sreli u zadnja dva decenija. Objektivno govoreći, stalno se susrećemo s novim pojmovima, pristupima, djelatnostima, prijedlozima za uvađanje novina, te stavovima koji se zalažu za novo, ali i mišljenjima da predložene novine predstavljaju samo prolazno pomodarstvo. Ova bujica novih zbivanja, pogotovo u tehničkom svijetu, postala je karakteristika našeg doba. Na taj način, danomice se u našoj inženjerskoj praksi susrećemo sa problemom donošenja odluke i zauzimanja stava prema tim novinama. Znatna je pri tome odgovornost, jer i precjenjivanje i potcenjivanje značajnosti analiziranog problema, nanosi štete. Donešenu odluku, bilo prihvaćanja bilo neprihvaćanja, potrebno je obrazložiti, pri čemu je poželjno da donešena odluka bude čim manje temeljena na procjeni, a čim više na kvantificiranim argumentima.

Tretiramo li tribologiju kao takvu novinu, potrebno je i u našem, tehničkom svijetu, valorizirati i rangirati tribologiju, kako bi bili jasni i objektivizirani stavovi o značajnosti tribologije. Ovakvi stavovi pretstavljeni bi neophodnu bazu za daljnju smisljenu eventualnu aktivnost. Pri tome, treba početi od činjenice da je tribologija sastavni dio proizvodnje i eksploatacije materijalnih dobara, koja područja i jesu osnova naše djelatnosti. Samim time nužno je u tim okvirima i tribologiju tretirati kao integralni dio naznačenih tehničkih aktivnosti, što znači da prije svega treba analizirati ekonomski efekti tribologije, budući da svaka tehnička aktivnost mora biti temeljena na direktnim ili indirektnim pozitivnim ekonomskim efektima. Na taj način se tribologija neposredno odražava na cijenu proizvoda kao i tro-

škove održavanja, te ostale karakteristike proizvoda u eksploataciji, i samim time ima, dakle, direktni utjecaj i na stvaranje dohotka.

Kako je već u samom početku bilo rečeno, tribologija tretira probleme trenja i trošenja, te prema tome treba ekonomski efekte tribologije sagledavati u okviru tih pojava, odnosno konkretnije, analizirati tribološke gubitke uzrokovane trenjem i trošenjem. Ako u tom smjeru napravimo i površni pregled u području proizvodnje i eksploatacije dobara, možemo se brzo uvjeriti u veliku učestalost pojave triboloških gubitaka. Prijе svega, posvuda gdje koristimo mehaničku energiju, prisutna je radnja trenja, koja radnja predstavlja direktni energetski gubitak, budući da je stupanj mehaničke iskoristivosti uvek niži, pa i znatno niži od 100%. Možemo, dakle, ocijeniti da su sumarno tribološki gubici uslijed radnje trenja, kao djela ukupno proizvedene energije, znatni, te samim time opravdano ilustruju značajnost tog dijela tribologije. Za pojavu trošenja, primjeri su više nego brojni. Vijek trajanja dobara uvjetovan istrošenjem, presudan je za većinu pomagala u društvenoj i pojedinačnoj eksploataciji. Pomislimo samo na vozila u cestovnom, željezničkom i zračnom saobraćaju, alatne strojeve, sve vrste klinnih i rotacionih strojeva, prenosnike snage, zupčanike, kotrljajuće i klizne ležaje, sve vrste alata, elemente kočnica, spojke, vodilice, elemente poljoprivrednih, građevinskih i rudarskih strojeva izvrgnutih abraziji, bandaže i tračnice, automobilske gume i puteve, električne kontakte, užad, lance i lančanike, kućanske aparate i uredske strojeve, ... itd. Očito je, da već na ovaj način, spomenuti objekti izvrnuti trošenju, kako po učestalosti u svakodnevnom životu tako i po broju, pri čemu bi nabranje mogli nastaviti u nedogled, možemo procijeniti da nam fenomen trošenja, koji predstavlja osnovni mehanizam dotrajavanja za mnoštvo naših dobara, mora biti sa ekonomskog aspekta vrlo značajan.

Gubici uslijed radnje trenja i dotrajavanje dobara uslijed istrošenja, kao osnovni sadržaj tribologije, očito su prisutni, te samim time opravdavaju nastojanja za smanjenje ovih gubitaka. No, ta konstatacija nije nova.

I do sada su vršeni uspješni naporci za smanjenje ovih gubitaka. Ipak, ukoliko u tim nastojanjima želimo ići naprijed i ukorak sa razvojem u svijetu, nužno je probleme suzbijanja triboloških gubitaka postaviti sveobuhvatno, sistematski, potrebno je kvantificirati ove gubitke, te na temelju ovakvog pristupa, koji se ne bazira na subjektivnim procjenama i stihijiskim detaljističkim aktivnostima, ostvariti u polstojećim uvjetima aktivnosti koje daju maksimalne moguće uštede.

Prvi zahvat izведен na ovaj način bio je u Velikoj Britaniji 1966. godine. Radna grupa financirana od vlade, pod vodstvom dr P. Josta, objavila je rezultate istraživanja kojih je težište na konstataciji da se u Velikoj Britaniji, uz ispravnu tribološku praksu, mogu godišnje smanjiti tribološki gubici za 515 milijuna funti (tada 18 797 milijuna novih dinara). Ovaj iznos svakako je bio dovoljan argumentom da se i u zemlji kao što je Velika Britanija sistematski pristupi aktivnostima za smanjenje triboloških gubitaka. Dodatno, za sada, u tom izvještaju dana je i struktura mogućih ušteda po stavkama.

U našim prilikama, nakon neuspjele afirmacije tribologije ukazivanjem općenito na njenu značajnost, nastala je također potreba da se tribološki gubici kvantificiraju, da se definira njihova struktura, kako bi se na taj način pobudio interes kvantitativnim ukazivanjem na njenu korisnost. Istovremeno, dobila bi se i podloga za optimalni izbor aktivnosti u cilju smanjenja ovih triboloških gubitaka. Ne znači tada još za rad i rezultate spomenute radne grupe u Velikoj Britaniji, prvi globalni podaci o tribološkim gubicima u našoj zemlji, dobiveni su radom nastalim 1972. godine. Rezimirajući rezultate ovog rada za potrebe ovog prikaza, dan je u prikazanoj tabeli pregled triboloških gubitaka u SFRJ za 1970. godinu.

TRIBOLOŠKI GUBICI U SFRJ 1970. GODINE

Vrsta gubitka	Stavka	Godišnji iznos u n. din.	Udio u ukupnim gubicima %	Udio u direktnim odnosno indirektnim gubicima %
DIREKTNI	ENERGIJA za svladavanje trenja			
	— el. energija	584 500 000	2,42	4,5
	— benzin, nafta	370 000 000	1,41	3,10
	ALATI sa održavanjem	1 108 000 000	4,32	9,20
	SERVISI (zanat. org.)	475 550 000	1,81	3,50
	POLJOPRIVREDNI STROJEVI vrijednost doknadnih dijelova + 40%	691 600 000	2,60	5,50
	VANJSKE GUME VOZILA samo maloprodaja	270 120 000	1,04	2,20
	ODRŽAVANJE industrijski strojevi i saobraćaj, samo dinamička oprema	8 669 570 000	33,00	72,00
	UKUPNO	12 169 340 000	46,80	100,00
	ZASTOJI tribološkog porijekla	10 758 760 000	41,00	76,70
INDIREKTNI	PROIZVODNJA ODRŽAVANJA	3 298 830 000	12,20	23,30
	UKUPNO	14 057 590 000	53,20	100,00
	S V E U K U P N O u 1970:	26 226 930 000	100,00	

Iz ovog tabelarnog prikaza treba kao značajno, prije svega, uočiti da od ukupnih triboloških gubitaka, koji su u 1970. godini iznosili okruglo 26 milijardi novih dinara, 53% otpada na indirektnie, a 47% na direktnie tribološke gubitke. Zastoji tribološkog porijekla iznose pri tome 41% ukupnih gubitaka. Ove činjenice redovito nismo dosta svjesni, i stavljam u prvi plan kod triboloških aktivnosti samo uzroke nastajanja ovih zastoja, a ne uzimamo u obzir same gubitke kod zastoja, koji, kako vidimo, su daleko zašnajniji.

Korisno je nadalje konstatirati da stavka »zastoje« sa 41% i »održavanje« sa 33%, čine zajedno 74% od ukupnih triboloških gubitaka, što treba imati na umu pri planiranju dalnjih aktivnosti za smanjenje triboloških gubitaka.

Prikaz nadalje, daje uvid i u udio ostalih pojedinih značajnih stavki direktnih gubitaka u ukupnim tribološkim gubicima, s napomenom, što je lako i uočljivo, da postoji još niz triboloških gubitaka (stavki), koje u ovom prikazu nisu obuhvaćene, a spomenimo još vojnu opremu i industriju, koja ovdje također nije uključena. Možemo ustvrditi da su stvarni tribološki gubici i osjetno veći od prikazanih.

Navedeni iznos godišnjih triboloških gubitaka od 26 milijardi novih dinara, dovoljno kvantitativno argumentira opravdanost smišljenih akcija sa ciljem smanjenja ovih gubitaka. No, ovaj iznos odnosi se na 1970. godinu i bez sumnje, ovi gubici rastu iz godine u godinu. Kako bi iznos iz 1970. godine imao trajnu vrednost, određen je u okviru navedenog rada i iznos stopa rasta ovih gubitaka. Ustanovljeno je, na temelju određivanja triboloških gubitaka za navedene stavke za 1963., 1967., 1968., 1969. i 1970. godinu, da prosječna stopa rasta ovih gubitaka iznosi 19% godišnje. Ova vrijednost obuhvaća svakako i privredni rast i inflaciju, te ako je primijenimo u tom iznosu za razdoblje od 1970. do 1980. godine, pri čemu vjerojatno ne grijesimo na više, dobijamo slijedeće godišnje iznose triboloških gubitaka:

Godišnja	Iznos gubitaka u n. din.
1970.	26 200 000 000
1971.	31 700 000 000
1972.	37 100 000 000
1973.	44 100 000 000
1974.	52 600 000 000

1975.	62 500 000 000
1976.	74 400 000 000
1977.	88 500 000 000
1978.	105 300 000 000
1979.	125 300 000 000
1980.	149 100 000 000

Sveukupni tribološki gubici u SFRJ za razdoblje od 1970. do 1980. godine, računati na temelju gubitaka iz 1970. godine uz stopu rasta od 19% godišnje.

Ovaj eksponencijalni rast triboloških gubitaka pokazuje da su se isti u razdoblju od 1970. do 1974. godine udvostručili, a u razdoblju od 1970. do 1980. godine, gotovo ušestrostručili.

Ako želimo uspoređivati podatke o sveukupnim tribološkim gubicima u SFRJ s podacima koji proizlaze iz rada grupe istraživača u Velikoj Britaniji iz 1963. godine, moramo uočiti jedan bitan momenat. Britanski podaci daju iznose o mogućim godišnjim usredama, a naši podaci odnose se na sveukupne godišnje gubitke. Ovo predstavlja bitnu razliku, te se za nas namente pitanje, kolike su moguće ušte-

de, odnosno u kojem dijelu možemo određene godišnje gubitke umanjiti. U nedostatku vlastitih podataka o ovom iznosu, oslanjamо se na vrijednosti koje na temelju iskustva daje dr P. Jost koji smatra da primjenom ispravne tribološke prakse na temelju postojećih saznanja, postojeći tribološki gubici mogu biti umanjeni za 15—20%. Primijenimo li vrijednost ovog iznosa na naše prilike, možemo konstatirati da bi moguće uštete smanjenjem triboloških gubitaka 1980. godine iznosile 30 milijardi n. din. Ovo, dakako, nije ostvarivo preko noći, već može biti plod tek sмишljene i organizirane, barem srednjoročne, aktivnosti. Ove uštete manifestirale bi se kroz smanjenje potrošnje energije, radne snage, materijala i dočekadnih dijelova, gubitaka uslijed zastoja, a smanjile bi se i investicije uslijed povećane produktivnosti i povećanog vijeka trajanja proizvodnih sredstava.

Tribologija, kao nova interdisciplinarna tehnologija, prema brojnim do sada stečenim iskustvima, predstavlja djelatnost koja uz minimalna ulaganja ostvaruje u kratkom roku izvрeno veliku dobit.

Rad na određivanju iznosa triboloških gubitaka u SFRJ, osim podataka o iznosu ovih gubitaka i njihovoj strukturi, daje još jednu korist, a to je

metodologija po kojoj se može pristupiti određivanju ovih gubitaka u svakoj analiziranoj sredini. Pri tome naravno, treba uočavati i u metodologiju ugradivati specifičnosti istraživanog sistema.

Prikaz ovakvog jednog zahvata dat je, po obavljenim istraživanjima, na primjeru jedne tipične metaloprerađivačke radne organizacije. Analizirane stavke pokazuju da od ukupnih godišnjih triboloških gubitaka u iznosu od okruglo 50 milijuna n. din, što iznosi približno 5% od vrijednosti godišnje proizvodnje ove organizacije, 7,5% otpada na gubitke električne energije, 52% na gubitke održavanja strojeva s pripadajućim zastojima, te 45% na gubitke na alatima i napravama s pratećim zastojima. Izdvajamo li ukupne gubitke na zastojima održavanja strojeva i alata i naprava, oni iznose 33,5%, dakle trećinu ukupnih gubitaka. Očito je da gubitak električne energije uslijed trenja predstavlja najmanju stavku, tako da otklanjanje ovih gubitaka ne bi bio primarni zadatak, tim više što bi zahvati u tom smjeru bili dugotrajni i skupi. Nasuprot tome, tribološki gubici u održavanju strojeva, te na alatima i napravama, predstavljaju najznačajnije tribološke gubitke.

Bez sumnje, tribološki gubici posje toje. Samim tim opravdano je razmatrati mogućnost smanjenja tih gubitaka, koji su brojni i susrećemo ih na svakom koraku u makro i mikro sistemima, te kao takovi mogu biti i tretirani. Svakoj, ali takvoj, aktivnosti za suzbijanje gubitaka treba neminovno prethoditi snimanje postojećeg stanja, nakon čega slijedi analiza i sinteza. Moramo imati na umu, da problema ima uvijek više nego što smo s obzirom na kadrove i sredstva u stanju rješavati. Baš zato ovakovo preliminarne istraživanje omogućava optimalni izbor problema. Pri tome, ne znači da je optimalno rješavati onaj problem koji nanosi najveće gubitke. Izbor problema treba vršiti prema složenom kriteriju, pri čemu osim apsolutnog gubitka, treba pri donošenju odluke, uzeti u obzir potrebna ulaganja, moguće smanjenje gubitaka, te trajanje zahvata do ostvarenja uštede.

Na ovaj način bi tribologija, koja neminovno postaje sastavni dio proizvodnje i eksploatacije dobara, i u našim uvjetima najprije doživjela svoju punu afirmaciju.

M. NEDELJKOVIC, M. VELIMIROVIC, A. VULIC

Određivanje temperature maziva i graničnog opterećenja pužnog prenosnika primenom metode višefaktornog planiranja eksperimenta

UVOD

Težnja da se prenesu velike snage uz istovremeno povećanje kompaktnosti prenosnika, a što se postiže izborom kvalitetnijih i termički obradenih materijala elemenata, doveća je do toga da zupčasti prenosnici budu toplotno više napregnuti. Ovo je karakteristično za pužne prenosnike kod kojih se zbog povećanja klizanja u zahvatu oslobođa znatna količina toplote.

Znatna sila trenja kod pužastih parova ima za posledicu zagrevanje prenosnika, što dalje dovodi do smanjenja viskoznosti, a ovo opet do povećanja sile trenja. Stoga se mora obezbediti da temperatura ulja u stacionarnom stanju ne pređe određenu granicu.

Ulje koje po svojoj funkciji ima zadatak da smanji trenje na dodirnim površinama funkcionalno je vezano za izvor toplote. Preko ulja se u velikoj meri odvodi toplota od izvora u smeru nižih temperatura okoline.

Vremenski ciklus promena temperature ulja određen je početnom temperaturom okoline do postizanja radne stacionarne temperature i dalje do hlađenja ulja na početnu temperaturu okoline. Prema tome, ukupni ciklus možemo podeliti na tri područja:

- područje zagrevanja, odnosno porasta temperature ulja,
- područje toplotne ravnoteže ($t_m = \text{const}$) i
- područje hlađenja odnosno pada temperature.

Posebno je interesantno područje toplotne ravnoteže odnosno stacionarne temperature ($t_m = \text{const}$).

Tačno određivanje temperature odnosno stepena uticaja pojedinih faktora na porast temperature omogućilo bi izbor odgovarajućeg maziva za određene radne uslove ili utvrđivanje graničnog opterećenja s obzirom na zagrevanje pužnog prenosnika.

Za određivanje temperature maziva ili određivanje graničnog opterećenja s obzirom na zagrevanje puža postavljen je veliki broj teoretskih i empirijskih obrazaca, nomograma i dijagrama. Teorijski izrazi sadrže u sebi niz neizbežnih uprošćenja i ograničenja kao i parametara koji se mogu odrediti samo eksperimentalno.

Dosadašnja eksperimentalna istraživanja su po pravilu »jednofaktornog« tipa i svode se na određivanje graničnog opterećenja u funkciji najuticajnijih faktora. Ovakvim eksperimentalnim postupcima ne obuhvata se uticaj združenih dejstava izabranih faktora, što je važno za iznalaženje optimalnih uslova procesa.

U ovom radu je izložen teorijski pristup ovoj problematični i razrađen je analitičko-ekperimentalni prilaz određivanju temperature maziva i graničnog opterećenja pužnog prenosnika.

Određivanje temperature ulja, zasnovan na univerzalnom metodu (višefaktornog) planiranja eksperimenta, koji ima izvesne prednosti u odnosu na uobičajene eksperimentalne i čisto teorijske metode.

TEORIJSKE OSNOVE

Uz pretpostavku da se ukupni gubitak snage u pužnom prenosniku pretvara u toplotu, količina toplote koja se izdvaja u toku jednog časa pri neprekidnom radu prenosnika može se dati obrascem:

$$Q = 3,6 \cdot 10^3 (1 - \eta) P_1 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right] \quad (2.1)$$

gde je: P_1 — snaga pogonskog vratila u [kW]

η — stepen iskoriscenja prenosnika.

Daljom analizom utvrđuje se da ukupni gubici snage koji se pretvaraju u toplotu potiču od:

- trenja na radnim površinama pužnog para Q_{tr} ,
- otpora ulja pri kretanju uronjenog elementa Q_m , kao i
- trenja u ležajevima prenosnika Q_L tako da je:

$$Q = Q_{tr} + Q_m + Q_L = 3,6 \cdot 10^3 (1 - \eta) P_1 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right] \quad (2.2)$$

U prvom vremenskom području rada razvijena toplota troši se na zagrevanje mase zupčanika i susednih elemenata kao i na zagrevanje ulja. Posle određenog vremena postiže se toplotna ravnoteža, te se ukupna razvijena toplota predaje okolini.

Količina toplote Q_o — koja se odvede u toku jednog časa sa površine kućišta (bez veštačkog hlađenja) izražava se relacijom:

$$Q_o = k_t (t_m - t_0) A (1 + \Theta) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{h}} \right] \quad (2.3)$$

gde je: k_t — koeficijent prenosa toplote $\left[\frac{\text{kJ}}{\text{m}^2 \text{h K}} \right]$

t_m — temperatura okolnog vazduha [K]

t_0 — temperatura maziva [K]

Θ — koeficijent koji uzima u obzir odvod toplote u postolje i

A — efektivna spoljna površina reduktora koja se hlađi [m^2].

* Dr MILAN NEDELJKOVIC, van. profesor Mašinskog fakulteta u Nišu. (Biografija data u 1. broju časopisa — april 1979.)

Koefficijent Θ — uzima u obzir odvod topline kroz vratila i postolje reduktora. Kod povoljnih uslova odvodeњa topline može se uzeti $\Theta=0,3$.

Kako se spoljna površina kućišta reduktora sastoji iz ravnih i očebrenih delova, koji podjednako ne odaju toplatu, uvodi se pojam efektivne spoljne površine:

$$A = A_p - \Psi_e A_r \quad [m^2] \quad (2.4)$$

gde je:

A_p — ravna površina kućišta [m^2]

A_r — površina rebara kućišta [m^2]

Ψ_e — koefficijent ekvivalentnosti koji se po preporukama u literaturi uzima $\Psi_e \approx 0,5$.

Pri radu reduktora u ustaljenom režimu, tj. pri konstantnoj temperaturi zadovoljen je uslov:

$$Q = Q_0 \quad (2.5)$$

Iz prethodnog izraza možemo sračunati temperaturu maziva:

$$t_m = t_0 + \frac{3.6 \cdot 10^3 (1 - \eta) P_1}{k_t A (1 + \Theta)} \quad (2.6)$$

odnosno za odgovarajuću maksimalnu temperaturu ulja $t_{m\max}$ granično opterećenje pužnog prenosnika pri neprekidnom radu bez veštačkog klađenja:

$$P_{tz} = \frac{k_t (t_{m\max} - t_0) A (1 + \Theta)}{3.6 \cdot 10^3 (1 - \eta)} \quad (2.7)$$

Najveću poteškoću pri proračunu ove snage predstavlja određivanje koefficijenta prenosa topline k_t . U literaturi se preporučuje $k_t = (30-60) \frac{m^2 h}{K}$ u zavisnosti od brzine okolnog vazduha.

Ne može se smatrati da k_t — zavisi samo od intenziteta cirkulacije vazduha, jer takvo uprošćavanje otežava shvatanje procesa razmene topline i fizičkog smisla koefficijenta k_t .

Kako pokazuju opiti na razmenu topline reduktora sa okolinom osim brzine vazduha značajan uticaj ima viskozitet ulja za podmazivanje i intenzitet njegove cirkulacije unutar kućišta.

EKSPERIMENTALNA MERENJA I OBRADA REZULTATA

3.1. Izbor uticajnih faktora

Iz prethodnog izlaganja možemo zaključiti da na temperaturu ulja u pužnom prenosniku utiče niz faktora kao što su: opterećenje (M_0), broj obrtaja puža (n_1), viskozitet ulja (η^0), termičke konstante ulja (c), konstruktivni oblik i veličine elemenata (k), vrsta ulja (r), kvalitet obrade (k_v) i temperatura okoline (t_0):

$$t_m = f(M_0, n_1, \eta^0, c, k, r, k_v, t_0) \quad (3.1)$$

U stacionarnom stanju je

$$t_m - t_0 = \Delta t_{tr} + \Delta t_{or} \quad (3.2)$$

gde je:

t_m — temperatura ulja u stacionarnom stanju,

t_0 — temperatura okoline,

Δt_{tr} — deo porasta temperature ulja usled trenja na radnim površinama pužnog prenosnika,

Δt_{or} — deo porasta temperature ulja usled otpora koje ulje pruža pri kretanju uronjenog elementa.

Porast temperature ulja izazvan trenjem radnih površina:

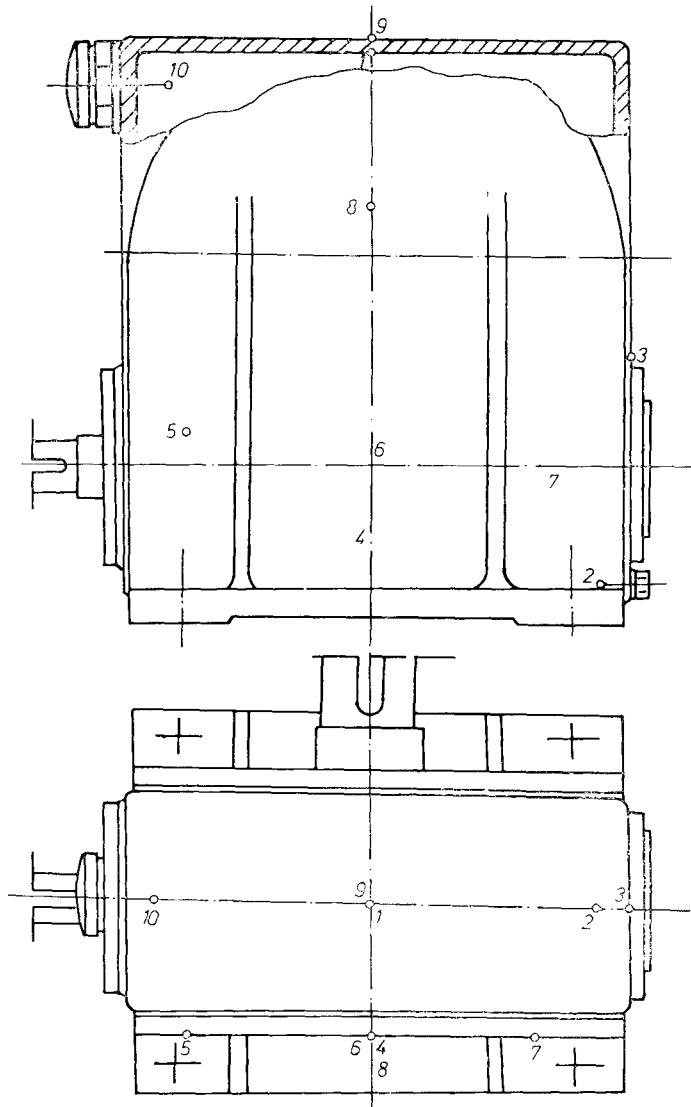
$$\Delta t_{tr} = t_m - (t_0 + \Delta t_{or}) = t_m - t_{or} \quad (3.3)$$

Član ovog izraza t_{or} predstavlja temperaturu ulja u stacionarnom stanju pri praznom hodu pužnog prenosnika. Temperatura t_{or} je posebno interesantna jer pokazuje kvalitet izvedene konstrukcije s obzirom na kinematsku tačnost, geometrijsku tačnost, tačnost montaže i adekvatnost izbora materijala i ulja, pa može da služi kao kriterijum kvaliteta pužnog prenosnika.

Kao što je napred naglašeno, cilj ovog istraživanja, pa i eksperimenta, je utvrđivanje stepena uticaja pojedinih faktora na veličinu stacionarne temperature ulja u pužnom prenosniku.

Zbog ograničenosti nivoa materijalnih troškova ispitivanja su obavljena na jednom prenosniku, odnosno za jedan nivo konstruktivnog oblika i veličine elemenata (k), kvaliteta obrade (k_v), kao i temperature okoline $t_0 = (294 - 295) K$.

Ispitivanja su izvršena na predstavniku familije pužnih prenosnika proizvodnje Mašinske industrije u Nišu (sl. 1).



Sl. 1. — Raspored mernih mesta (termoelemenata) pri merenju temperature ulja i kućišta

Parametri puža i pužnog točka dati su u tabeli 1.

TABELA 1.

Naziv	Puž	Pužni točak
Broj zuba	$z_1 = 2$	$z_2 = 30$
Podeoni prečnik	$d_{\text{ø}1} = 50 \text{ mm}$	$d_{\text{ø}2} = 150 \text{ mm}$
Sirina-dužina	$b_1 = 75 \text{ mm}$	$b_2 = 40 \text{ mm}$
Materijal	C. 1730	PbSn 14
Ostalo	$q = 10$ $i = 15$ $\alpha_n = 20^\circ$ $\gamma_m = 11^{\circ}18'36'' = 0,197401 \text{ rad}$ $a = 100 \text{ mm}$ $x_1 = x_2 = 0$	

Ispitivanji pužni prenosnik je pre početka merenja razrađivan u Mašinskom industriji u Nišu i laboratoriji za strojne elemente (LASEL) Fakulteta za strojništvo u Ljubljani, a u tabeli 2 su dati uslovi pri kojima je vršeno uhođavanje pužnog prenosnika.

TABELA 2.

Vreme uhođa- vanja [h]	Optere- ćenje $M_{\text{ø}2}$ [kNm]	Broj obr. puža $n_1 [\text{min}^{-1}]$	Vrsta ulja	Stacio- narna tempe- ratura $t_m [\text{K}]$
8	0	750	EPOL 110	341
12	10	750	EPOL 110	338
4	15	1000	EPOL 150	368
16	12	1000	EPOL 150	355
6	10	750	EPOL 110	335
14	12	750	EPOL 110	343

Uz prethodna ograničenja, a na osnovu teorijskih i eksperimentalnih ispitivanja, dolazi se do zaključka da na temperaturu ulja u pužnom prenosniku mogu da utiču sledeći faktori:

- broj obrtaja puža (n_1).
- viskozitet ulja (η^0).
- opterećenje ($M_{\text{ø}2}$).

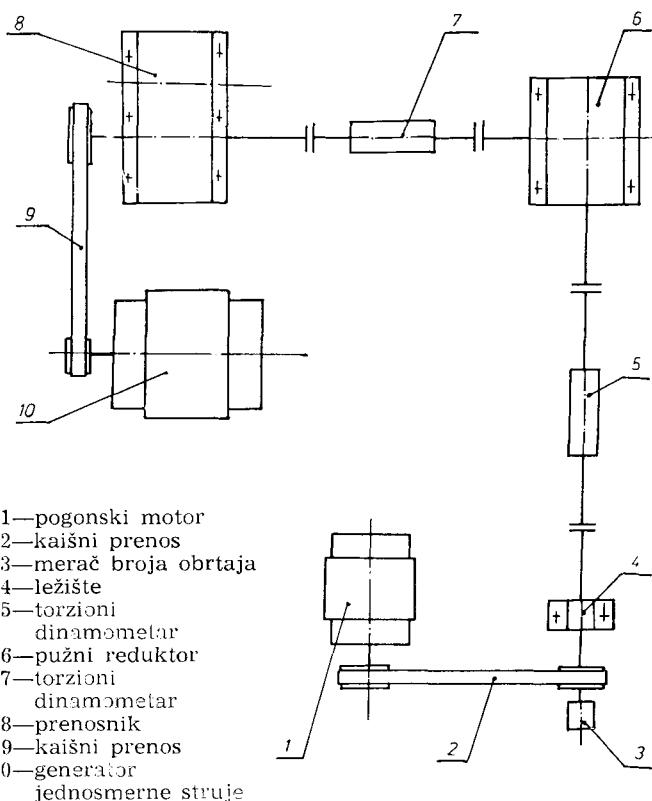
Izbor intervala varijacije izvršen je prema preporukama i prethodnim proračunima i prikazan je u tabeli 3.

TABELA 3.

Oznaka	Faktor		
	n_1 [min^{-1}]	η^0_{323K} [$\text{Pa} \cdot \text{s}$]	$M_{\text{ø}2}$ [kNm]
Kod	x_1	x_2	x_3
Osnovni nivo	1061	0,136	11,83
Interval	750	0,15	4
Goraji nivo variranja	1500	0,23	14
Donji nivo	750	0,08	10

3.2. Opis ispitnog stola i instrumenata

Eksperimentalna ispitivanja koja su obrađena u ovom radu obavljena su na ispitnom stolu Fakulteta za strojništvo u Ljubljani (sl. 2).



Sl. 2. — Šema ispitnog stola za pužne prenosnike

Kao pogonski motor upotrebljen je elektromotor jednosmerne struje (1) snage 15 kW i sa maksimalnim brojem obrtaja 1450 min^{-1} . Elektromotor pokreće prenosnik (6) kaišnim prenosom (2). Na ulaznom vratilu reduktora postavljen je torzionalni dinamometar (5). Na izlaznom vratilu iz reduktora je, takođe, postavljen torzionalni dinamometar (7). Pužni prenosnik koji se ispituje je preko prenosnika (8), kojim se uvećava broj obrtaja i kaišnog prenosnika (9) povezan sa generatorom jednosmerne struje (10) snage 41 kW i sa maksimalnim brojem obrtaja 950 min^{-1} .

Broj obrtaja upotrebljenog pogonskog elektromotora jednosmerne struje proizvodnje »Rade Končar« — Zagreb može se regulisati u području $n_1/n_{\text{min}} = 10$, gde je $n_{\text{m}} = 1450 \text{ min}^{-1}$.

Generatorom jednosmerne struje (10) postižu se različita opterećenja na izlaznom vratilu pužnog reduktora, odnosno različita opterećenja u čitavom otvorenom kolu i na taj način omogućava se ispitivanje pužnog prenosnika pri različitim opterećenjima.

Veličine ulaznog i izlaznog **obrtajnog momenta** merena su torzionalnim dinamometrima. Broj obrtaja je meren Hottingerovim tahometrom, koji je pričvršćen na ulazno vratilo reduktora. **Viskozitet maziva** nije meren, već su korišćeni podaci proizvodača ulja. **Temperatura ulja** i kućišta merena je termoelementima karakteristike po DIN 43710.

3.3. Postavljanje matematičkog modela

Nivo temperature maziva u pužnom prenosniku, a na osnovu (3.2) i napred uvedenih ograničenja, može se izraziti u obliku:

$$t_m = t_0 + \Delta_{\text{tot}} + \Delta_{\text{tr}} \quad (3.4)$$

gde je:

$$\Delta t_{\text{tot}} = f_1(n_1; \eta^0) \quad i \quad (3.5)$$

$$\Delta t_{\text{tr}} = f_2(n_1; \eta^0; M_{02}) \quad (3.6)$$

Određivanje funkcija f_1 i f_2 moguće je aproksimiranjem u polinom oblika:

$$y = b_0 + \sum_i b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \dots \quad (3.7)$$

Vrednosti parametara modela mogu se oceniti statistički a na osnovu rezultata eksperimenta. Koeficijenti regresije (b_0 ; b_i ; b_{ij}) određuju se za definisane granice hiperprostora, odnosno određeni interval promene nezavisno promenljivih koji je dat u tabeli 2.

Da bi se iskoristilo svojstvo višefaktornog plana pri određivanju koeficijenata regresije potrebno je linearno transformisati faktorni prostor, odnosno uvesti kodirane varijable x_1 ; x_2 ; x_3 , prema izrazu:

$$x_i = \frac{x_i - \bar{x}_i}{\Delta X_i} \quad (3.8)$$

gde su:

x_i — kodirana vrednost nezavisno promenljive,

\bar{x}_i — prirodna vrednost nezavisno promenljive,

\bar{x}_i — srednji nivo nezavisno promenljive,

ΔX_i — interval variranja nezavisno promenljive.

Na osnovu izraza (2.6) možemo uočiti da se funkcije f_1 i f_2 mogu »linearizovati« logaritmovanjem, te se mogu aproksimirati izrazima:

$$y^{(1)} = \ln \Delta t_{\text{tot}} = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{1,2} x_1 x_2 \quad (3.9)$$

$$y^{(2)} = \ln \Delta t_{\text{tr}} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{1,2} x_1 x_2 + b_{1,3} x_1 x_3 + b_{2,3} x_2 x_3 + b_{1,2,3} x_1 x_2 x_3 \quad (3.10)$$

gde su:

x_i — kodirane vrednosti odgovarajućih faktora, koje se izvode pomoću jednačina transformacije

$$x_1 = 2 \frac{\ln n_1 - \ln n_{1\max}}{\ln n_{1\max} - \ln n_{1\min}} + 1$$

$$x_2 = 2 \frac{\ln \eta - \ln \eta_{\max}}{\ln \eta_{\max} - \ln \eta_{\min}} + 1$$

$$x_3 = 2 \frac{\ln M_{02} - \ln M_{02\max}}{\ln M_{02\max} - \ln M_{02\min}} + 1 \quad (3.11)$$

3.4. Određivanje koeficijenta regresije

U cilju određivanja koeficijenata regresije u jednačinama (3.9.) i (3.10.) sprovedeno je $N_0 = 2^k + n_0$ nezavisnih opita, odnosno:

$$N_0^{(1)} = 2^2 + 3 = 7 \text{ opita i}$$

$N_0^{(2)} = 2^3 + 3 = 11$ opita, čiji su rezultati prikazani u tabelama 4 i 5.

Koeficijenti regresije se u opštem slučaju računaju po obrascima:

$$b_0 = - \frac{\sum_{u=1}^{N_0} y_u}{N_0} \quad (3.12)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} y_u}{N} \quad i = 1, 2, \dots, k$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} y_u}{N} \quad i < j = 1, 2, \dots, k$$

$$b_{ijl} = \frac{\sum_{u=1}^N x_{iu} x_{ju} x_{lu} y_u}{N} \quad i < j < l = 1, 2, \dots, k$$

gde je:

$$N_0 = 2^k + n_0 = \text{ukupni broj opita},$$

$$N = 2^k = \text{broj opita bez opita u centralnoj tačci eksperimenta}$$

Sračunate vrednosti koeficijenata regresije date su u poslednjim redovima tabela 4 i 5.

TABELA 4.

Plan matrica Δt_{tot}

Op. br.	x_0	x_1	x_2	$x_1 x_2$	$\Delta t_{\text{tot}} [\text{K}]$	$y_i = \ln \Delta t_{\text{tot}}$	\bar{y}	$(y_i - \bar{y})^2$
1	1	1	1	1	38,5	3,650	3,621	$8,41 \cdot 10^{-4}$
2	1	-1	1	-1	25	3,219	3,251	$10,89 \cdot 10^{-4}$
3	1	1	-1	-1	30	3,401	3,403	$10,24 \cdot 10^{-4}$
4	1	-1	-1	1	22	3,091	3,063	$7,84 \cdot 10^{-4}$
5	1	0	0	0	27,5	3,314	3,342	$7,84 \cdot 10^{-4}$
6	1	0	0	0	28,5	3,350	3,342	$0,64 \cdot 10^{-4}$
7	1	0	0	0	29	3,367	3,342	$6,25 \cdot 10^{-4}$
Koeficijent regresije	3,342	0,185	0,094	0,030		$y_0 = 3,344$	$\Sigma (y_i - \bar{y}) = 52,11 \cdot 10^{-4}$	
	a_0	a_1	a_2	$a_{1,2}$				

TABELA 5.

Plan matrica Δt_{tr}

br. opita	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	$\Delta t_{tr} [K]$	$y = \ln \Delta t_{tr}$	y	$(y_i - \bar{y})^2$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	58,5	4,069	4,060	$81 \cdot 10^{-6}$
2	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	38,8	3,658	3,656	$4 \cdot 10^{-6}$
3	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	60,8	4,108	4,094	$196 \cdot 10^{-6}$
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	45,2	3,811	3,858	$2209 \cdot 10^{-6}$
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	35,5	3,569	3,588	$361 \cdot 10^{-6}$
6	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	23,8	3,170	3,184	$196 \cdot 10^{-6}$
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	36,5	3,597	3,622	$625 \cdot 10^{-6}$
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	30,6	3,421	3,386	$1225 \cdot 10^{-6}$
9	1	0	0	0	0	0	0	0	40,5	3,701	3,681	$400 \cdot 10^{-6}$
10	1	0	0	0	0	0	0	0	41	3,714	3,681	$1089 \cdot 10^{-6}$
11	1	0	0	0	0	0	0	0	39,5	3,676	3,681	$25 \cdot 10^{-6}$
Koefi- cijent regre- sije	3,681	0,160	-0,059	0,236	0,042	0,011	0,017	-0,014		$\bar{y}_o =$ 3,698	$S_R = \sum_i (y_i - \bar{y}_i)^2$ $= 6,411 \cdot 10^{-3}$	
	b_0	b_1	b_2	b_3	$b_{1,2}$	$b_{1,3}$	$b_{2,3}$	$b_{1,2,3}$				

3.5. Provera značajnosti koeficijenata regresije

Disperzija eksperimenta (greška eksperimenta) računa se kao:

$$S_E^2 = \frac{S_E}{f_E} \quad (3.13)$$

Za usvojeni sistem ponavljanja eksperimenta:

$$S_E = \sum_{u=1}^{n_0} (y_{uo} - \bar{y}_o)^2 \quad \text{suma kvadrata greške eksperimenta}$$

$$f_E = n_0 - 1 \quad \text{— stepen slobode greške eksperimenta.}$$

Da bi koeficijent regresije bio značajan (signifikantan) mora po svojoj brojnoj vrednosti da zadovolji nejednakost:

$$| b_i | \geq \Delta b_i = \pm t(\alpha, f_E) \cdot \frac{S_E}{\sqrt{N}} \quad (3.14)$$

gde je:

Δb_i — interval pouzdanosti koeficijenta regresije,

$t(\alpha, f_E)$ — tabična vrednost t — kriterijuma (Studentovog kriterijuma) za izabrani nivo značajnosti α i f_E — stepeni slobode.

Za razmatranu funkciju Δt_{tr} dobijaju se sledeće vrednosti:

$$S_E = 52,11 \cdot 10^{-4}; \quad f_E = 2; \quad S_E = 7,218 \cdot 10^{-2}$$

$$t(0,05; 2) = 2,92; \quad \Delta b_i = \pm 0,039$$

Nejednakost (3.14.) nije ispunjena za koeficijent $a_{1,2}$ pa jednačinu (3.9.) možemo napisati u obliku:

$$y^{(1)} = 3,342 + 0,185 x_1 + 0,094 x_2 \quad (3.15)$$

Za funkciju Δt_{tr} je:

$$S_E = 749 \cdot 10^{-6}; \quad f_E = 2; \quad S_E = 1,935 \cdot 10^{-2}$$

$$t(0,05, 2) = 2,92 \quad \text{i} \quad \Delta b_i = \pm 0,020$$

Nejednakost (3.14.) nije ispunjena odnosno nesignifikantni su koeficijenti: $b_{1,3}$; $b_{2,3}$ i $b_{1,2,3}$, pa jednačinu (3.10) možemo napisati u obliku:

$$y^{(2)} = 3,681 + 0,160 x_1 - 0,059 x_2 + 0,236 x_3 + 0,042 x_1 x_2 \quad (3.16)$$

3.6. Provera adekvatnosti modela

Provera adekvatnosti vrši se F-kriterijumom (Fišerovim kriterijumom) pri čemu se postavljeni model smatra adekvatnim, ako je ispunjena nejednakost:

$$F = \frac{\frac{s_{LF}^2}{S_E}}{f_E} < F_{rt}(\alpha, f_{LF}, f_E) \quad (3.17)$$

gde su:

$F_{rt}(\alpha, f_{LF}, f_E)$ — tabična vrednost Fišerovog kriterijuma za izabrani nivo značajnosti α

$$S_{LF}^2 = \frac{S_{LF}}{f_{LF}} \quad \text{disperzija adekvatnosti modela}$$

$$S_E^2 = \frac{S_E}{f_E} \quad \text{disperzija greške eksperimenta}$$

$S_{LF} = S_R - S_E$ — suma kvadrata vezana za adekvatnost modela

$$S_R = \sum_{u=1}^{n_0} (y_{uo} - \bar{y}_o)^2 \quad \text{rezidualna suma}$$

$$S_E = \sum_{u=1}^{n_0} (y_{uo} - \bar{y}_o) \quad \text{suma grešaka u centralnoj tačci eksperimenta}$$

$f_{LF} = f_R - f_E$ — stepen slobode adekvatnosti

f_R — stepen slobode rezidualne sume

f_E — stepen slobode greške eksperimenta.

Provera adekvatnosti modela za Δt_{tot} :

$$\begin{aligned} S_R &= 52,11 \cdot 10^{-4} & f_R &= 4 \\ S_E &= 14,65 \cdot 10^{-4} & f_E &= 2 \\ S_{LF} &= 37,46 \cdot 10^{-4} & f_{LF} &= 2 \\ s_{LF}^2 &= 18,73 & s_E^2 &= 7,325 \end{aligned}$$

$$F_{\text{rt}} = 2,51 < F_{\text{rt}}(0,05; 2; 2) = 19$$

gde je:

$$F_{\text{rt}}(0,05; 2; 2) = 19 \text{ — tablječna vrednost kriterijuma Fišera}$$

Provera adekvatnosti modela za funkciju Δt_{tr} :

$$\begin{aligned} S_R &= 6,411 \cdot 10^{-3} & f_R &= 6 \\ S_E &= 0,749 \cdot 10^{-3} & f_E &= 2 \\ S_{LF} &= 5,662 \cdot 10^{-3} & f_{LF} &= 4 \\ s_{LF}^2 &= 1,415 \cdot 10^{-3} & s_E^2 &= 0,374 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

$$F_{\text{rt}} = 1,89 < F_{\text{rt}}(0,05; 4; 2) = 19,25$$

Kako je jednakost (3.17.) zadovoljena to postavljeni matematički model verno opisuje proces.

Kada se u jednačinama (3.15.) i (3.16.) izvrši zamena kodiranih faktora prirodnim pomoću jednačina transformacije dobijaju se izrazi:

$$\Delta t_{\text{tot}} = 0,98 n_i^{0,534} \cdot t_i^{0,178} \quad (3.18)$$

$$\Delta t_{\text{tr}} = 1,633 \cdot 10^{-3} \frac{n_i^{0,92} \cdot M_{02}^{1,403}}{t_i^{1,71} - 0,23 \ln n_i} \quad (3.19)$$

Kada se jednakosti (3.18.) i (3.19.) zamene u izrazu (3.4.) dobija se konačan izraz za temperaturu ulja:

$$t_m = t_0 + 0,98 n_i^{0,534} t_i^{0,178} + 1,633 \cdot 10^{-3} \frac{n_i^{0,92} \cdot M_{02}^{1,403}}{t_i^{1,71} - 0,23 \ln n_i} \quad (3.20)$$

Grafička analiza rezultata

Regresiona funkcija $\Delta t_m = t_m - t_0 = \Delta t_{\text{tot}} + \Delta t_{\text{tr}}$ prikazana je grafički na slici 3.

Veličine Δt_m date su linijama $\Delta t_m = \text{const}$ (izoterme) u zavisnosti od opterećenja M_{02} i viskoziteti n_i^0 . Data su tri grafikona za različite brojeve obrtaja:

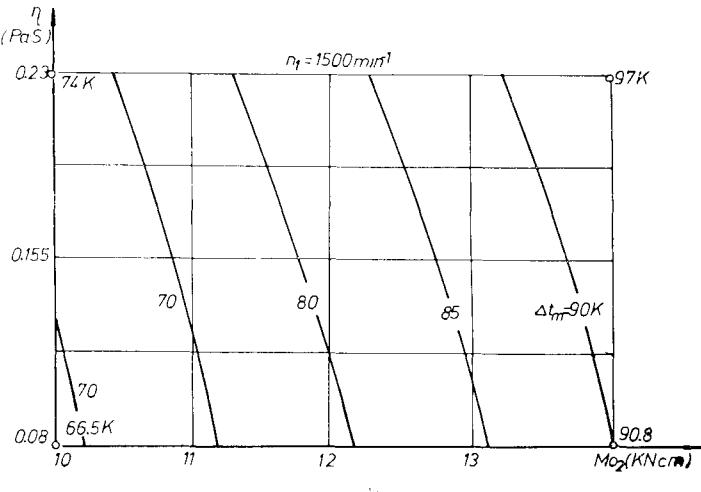
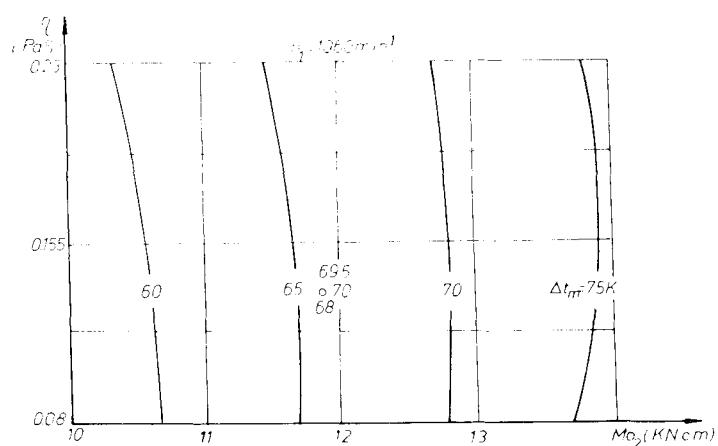
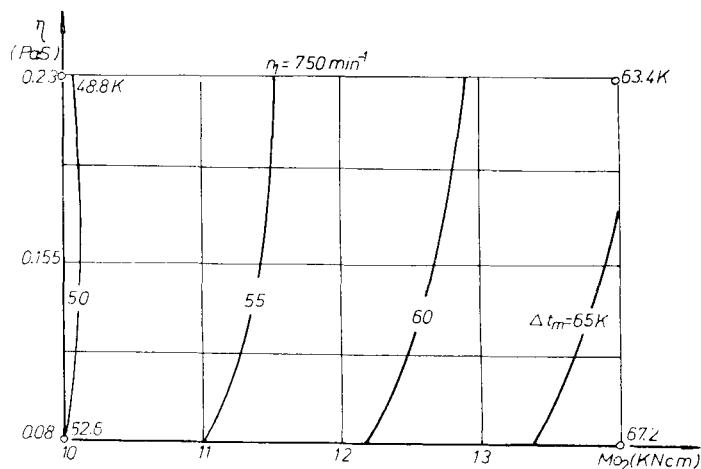
$$n_i = 750; 1060; 1500 [\text{min}^{-1}]$$

U grafikonima na sl. 3. su ozнакама »o« prikazane eksperimentalno dobivene vrednosti.

Sa dijagrama a) i c) može se uočiti da izabrani nivo variranja viskoznosti ulja ne dovodi do optimalnog izbora ulja s obzirom na zagrevanje.

Ulja veće viskoznosti pri broju obrtaja puža $n_i = 750 \text{ min}^{-1}$ i ulja manje viskoznosti pri $n_i = 1500 \text{ min}^{-1}$ bi omogućila prenošenje većih snaga sa istim nivoom porasta temperature ulja.

Sa dijagrama b) se uočava da bi ulje viskoznosti $\eta_{02} = 0,175 (\text{Pa} \cdot \text{s})$ obezbedilo minimalno zagrevanje pužnog prenosnika.



Sl. 3. — (a, b, c.)

ZAKLJUČAK

Na osnovu teorijskih razmatranja i eksperimentalnih rezultata može se zaključiti da:

□ Izvršeni proračun odnosno izabrani matematički model u potpunosti opisuje proces porasta temperature ulja u ispitivanom pužnom prenosniku i pokazuje stepen uticaja pojedinih faktora,

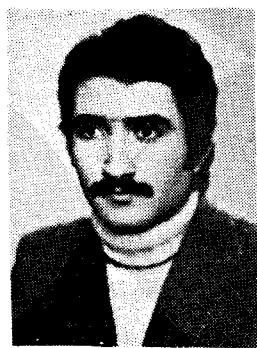
□ Na osnovu izraza (3.20.) moguće je, za poznate radne uslove izabrati maziva koja će imati minimalnu temperaturu u procesu eksploatacije pužnog prenosnika i utvrđivanje maksimalnog opterećenja s obzirom na zagrevanje,

□ Dalja istraživanja u ovoj oblasti direktno su povezana sa variranjem konstruktivnih karakteristika i materijala pužnog točka.

LITERATURA

1. БЕРШАДСКИЙ Н. И., Эффективность применения новых легированных индустриальных масел в червячных редукторах, Вестник машиностроения, Москва, 1977.
2. HADŽIVUKOVIĆ dr STEVAN, Planiranje eksperimenta, Privredni pregled, Beograd, 1977.
3. KURŠANAC A., Temperaturne promene u uljnim punjenjima zupčastih prenosnika »Goriva i maziva«, 5/73.

MIODRAG VELIMIROVIĆ, dipl. inž.
asistent Mašinskog fakulteta u Nišu



Roden 1949. god. Diplomirao na Mašinskom fakultetu u Nišu. Asistent na Katedri za mašinske konstrukcije Mašinskog fakulteta Univerziteta u Nišu.

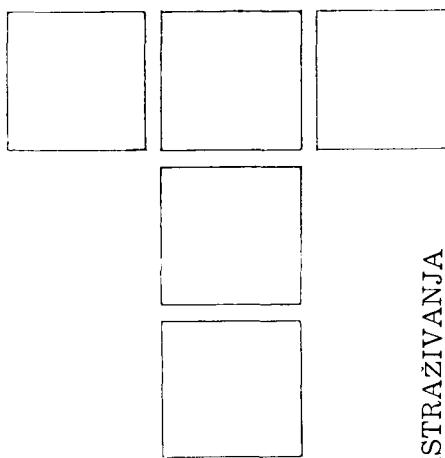
4. NEDELJKOVIC M, VULIĆ A., Analiza uticajnih faktora na energetske gubitke kinematskih parova i ukupne energetske gubitke pužnih parova. IFTOMM JuDEKO. Svetski simpozijum o zupčanicima i zupčastim prenosima, Kupari, 1978.
5. NIEMAN G., Maschinenelemente, Schpringer — Verlag, Berlin, 1975.
6. NILIMOV V. V., Teorija eksperimenta, Nauka, Moskva, 1971.
7. OBERŠMIT E. i saradnici, Opteretivost pužnih prenosnika ako su pužna kola izrađena od AlSn — legura. IFTOMM JuDEKO, Svetski simpozijum o zupčanicima i zupčastim prenosnicima, Kupari, 1978.
8. PANTELIĆ I., Uvod u teoriju inžinjerskog eksperimenta, »Radivoje Čiprinov«, Novi Sad, 1976.
9. STANIĆ J., Metod inžinjeriskih merenja, Mašinski fakultet, Beograd, 1975.
10. VULIĆ A., Razvoj konstrukcije i kvalitativnih ispitivanja predstavnika familije jednostepenih pužnih prenosnika (Magistarski rad), Niš, 1977.

Mr ALEKSANDAR VULIĆ, dipl. inž.
asistent Mašinskog fakulteta u Nišu



Roden 1941. godine u s. Popšica SO Sviljig. Diplomirao 1964. g. i posle diplomiranja radio kao projektant u MIN-u. Od 1969. g. asistent na Mašinskom fakultetu u Nišu. Magistrirao 1978. god. na Mašinskom fakultetu u Beogradu.

M. LAZIĆ



ISTRAGIVANJA

Vrednost obrade u funkciji koncentracije polusintetičkih emulgirajućih ulja u sredstvu za hlađenje i podmazivanje

UVOD

Proces obrade metala rezanjem se, po pravilu, izvodi uz korišćenje odgovarajućeg sredstva za hlađenje i podmazivanje. Pri tome je izbor sredstava uslovljen nizom elemenata, kao što su: vrsta materijala predmeta obrade i alata, vrsta proizvodne operacije, režim obrade, tip proizvodnje... Efekat primene sredstava može biti veoma visok za jednu grupu materijala, dok je veoma nizak, ili negativan, za drugu grupu materijala prelmeta obrade. Takođe, pri obradi jednog te istog materijala, efekat promene sredstava za hlađenje i podmazivanje zavisi od parametara režima rezanja, vrste proizvodne operacije i primenjenog alatnog materijala. Sve ovo uslovljava neophodnost razrade širokog asortimana sredstava za hlađenje i podmazivanje (mineralna emulgirajuća ulja, polusintetička i sintetička emulgirajuća ulja, ulja za rezanje aktivnog i neaktivnog tipa).

Polusintetička sredstva za hlađenje i podmazivanje predstavljaju mešavinu rafinisanog mineralnog ulja, visoko molekularnih organskih jedinjenja, EP aditiva, antipenušavca i baktericida. Efekat primene, pri obradi čelika, sivog željeza, laktih i obojenih metala, u operacijama koje karakterišu relativno visoke temperature i otpori rezanja, u mnogome zavisi i od pravilno definisane koncentracije sredstva za hlađenje i podmazivanje.

Problematika definisanja triboloških karakteristika i optimalne koncentracije polusintetičkih emulgirajućih ulja u sredstvu za hlađenje i podmazivanje i uticaj koncentracije istog na vrednost obrade proizvodne operacije u obradi bušenjem i glodanjem je predmet ovog saopštenja.

FIZIČKO-HEMIJSKA DEJSTVA SREDSTAVA ZA HLAĐENJE I PODMAZIVANJE

Povećanje efektivnosti procesa rezanja i smanjenje intenziteta razvoja triboloških procesa na reznim elementima alata predstavlja rezultat fizičko-hemijskih dejstava primenjenih sredstava za hlađenje i podmazivanje. Naiće, ista dovode do: smanjenja trenja na kontaktnim površinama alata i predmeta obrade (sposobnost podmazivanja), snižavanja temperaturna kontaktnih površina (sposobnost hlađenja), smanjenja sile i rada potrebnih za plastičnu deformaciju i razaranje materijala u zoni rezanja (disperziona sposobnost), poboljšanja hemijske zaštite obrađene površine preko obrazovanog zaštitnog hemijskog sloja (poboljšanje eksploracionih karakteristika predmeta obrade) i lakšeg odvođenja strugotine iz zone rezanja (sposobnost spiranja).

Prodiranje sredstava za hlađenje i podmazivanje u zonu kontakta grudne i ledne površine reznog kline alata sa strugotinom i obradenom površinom predmeta obrade, ostvaruje se, pod dejstvom sila hemijskog međudejstva, kroz zazore, molekularnog poretka, između strugotine i grudne

površine reznog kline ili direktno kroz zonu rezanja, blagodareći pojavi ultramikroskopskih ili mikroskopskih pukotina u zoni obrazovanja strugotine.

Sposobnost podmazivanja sredstava za hlađenje i podmazivanje se ogleda u obrazovanju, na kontaktnim metalnim površinama, više ili manje složenih—sekundarnih struktura. Time se intenzitet direktnog uzajamnog dejstva kontaktnih površina prigušuje ili sprečava. U zavisnosti od uslova pri kojima se proces rezanja odvija, sekundarne strukture mogu biti: apsorbovani atomi i molekuli sredstva za hlađenje i podmazivanje, hemijski formirana jedinjenja materijala predmeta obrade i alata sa komponentama iz sredstva za hlađenje i podmazivanje (mazivi—noseći filmovi), slojevi tvrdih rastvora atoma sredstva za hlađenje i podmazivanje u kristalnim rešetkama materijala alata i predmeta obrade. Najčešće se na kontaktним površinama javljaju mazivi—noseći filmovi različiti po svojoj prirodi, u ovom ili onom sklopu.

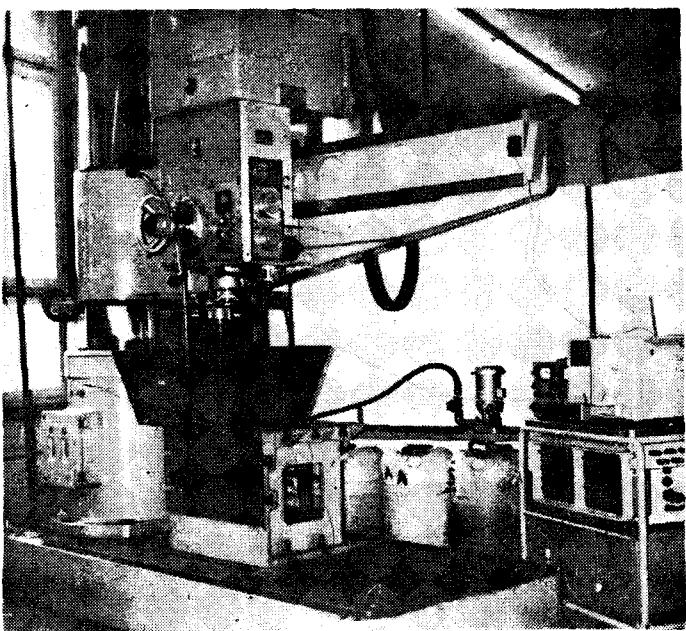
Sposobnost hlađenja sredstava za hlađenje i podmazivanje se ogleda u smanjenju čvrstoće površinskih slojeva toplotnom provodljivošću, toplotnim kapacitetom i skrivenom toplotnom obrazovanju pare.

Disperziona sposobnost sredstva za hlađenje i podmazivanje se ogleda u smanjenju čvrstoće površinskih slojeva predmeta obrade. Smanjenje čvrstoće je rezultat adsorpcionog dejstva, to jest smanjenja površinske energije, pojave mikropukotina i rasklinjavajućeg dejstva, difuzije atoma azota, ugljenika i drugih elemenata iz sredstva za hlađenje i podmazivanje u površinske slojeve materijala predmeta obrade.

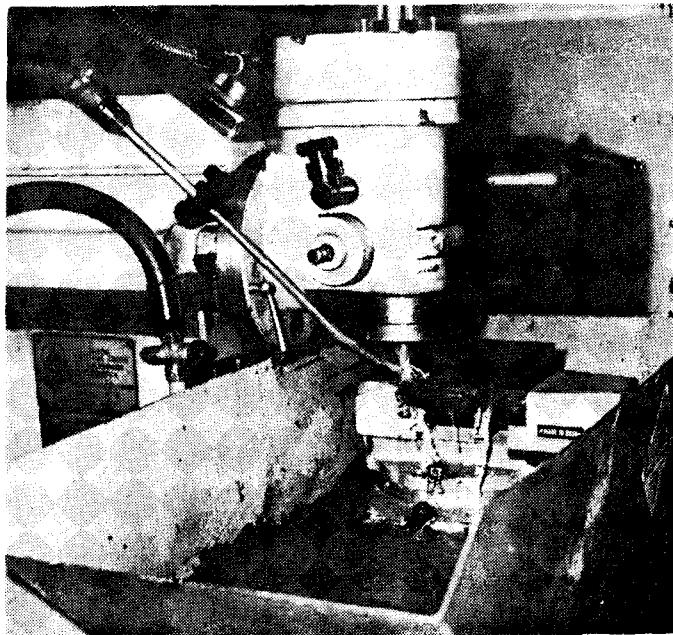
METODOLOGIJA I REZULTATI ISPITIVANJA TRIBOLOŠKIH KARAKTERISTIKA SREDSTAVA ZA HLAĐENJE I PODMAZIVANJE

Značaj razvoja i primene sredstava za hlađenje i podmazivanje za metaloprerađivačku industriju zahteva i odgovarajuća kontinualna i kompleksna ispitivanja triboloških karakteristika istih, uz istovremeno definisanje i ekonomskih efekata primene. Stalni razvoj i usavršavanje metodologije ispitivanja doveo je do metodologije razvijene u Laboratoriji za obradu metala i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu, zasnovane na primeni radioaktivnih izotopa [1, 3, 4] i definisanju otpornosti na habanje reznih elemenata alata.

Ispitivanja uticaja koncentracije polusintetičkog emulgirajućeg ulja u sredstvu za hlađenje i podmazivanje na tribološke karakteristike istih izvedena su pri obradi bušenjem (slika 1) i pri obradi glodanjem (slika 2). Dijagram-



Slika 1.

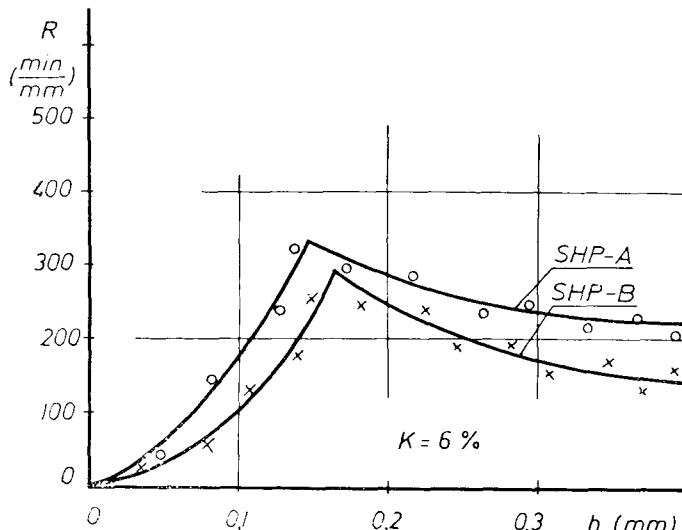


Slika 2.

ska zavisnost otpornosti na habanje i širine pojasa habanja reznih elemenata alata, pri određenoj koncentraciji polusintetičkog emulgirajućeg ulja A i B u sredstvu za hlađenje i podmazivanje data je na slikama 3 i 4.

Na bazi ispitivanjima dobijenih zavisnosti otpornosti na habanje i širine pojasa habanja, pri odgovarajućem kriteriju pohabanosti reznih elemenata alata, definiše se funkcionalna zavisnost postojanosti alata i koncentracije K(%) sredstva za hlađenje i podmazivanje:

$$T = f(K). \quad (1)$$



Brzina: 31,4 m/min, Korak: 0,08 mm/o
Prečnik: 12 mm, Protok: 6 lit/min,
Materijal alata: Č. 6880
Materijal predmeta obrade:
Č. 1730 poboljšan na 270 HB

Sl. 3. — Krive otpornosti na habanje u obradi bušenjem

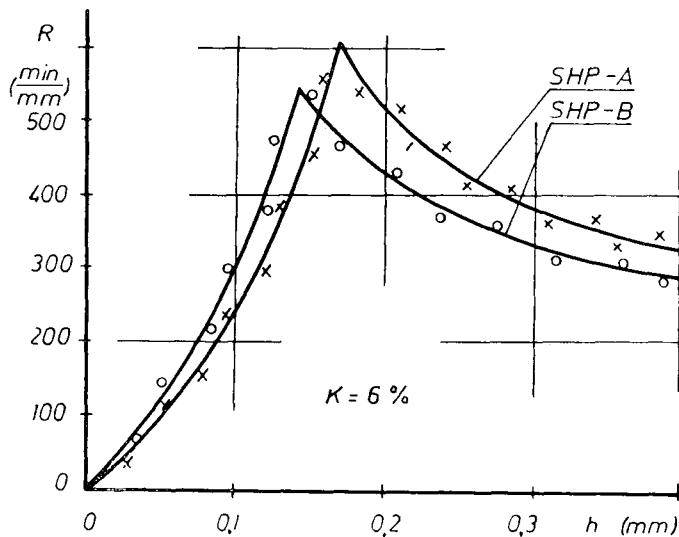
Naime, postojanost alata je definisana izrazom:

$$T = \int_0^{h_0} R_1(h) dh + \int_{h_0}^{h_k} R_2(h) dh, \quad (2)$$

odnosno:

$$T = K_1 \int_0^{h_0} h^{u_1} dh + K_2 \int_{h_0}^{h_k} h^{u_2} dh, \quad (3)$$

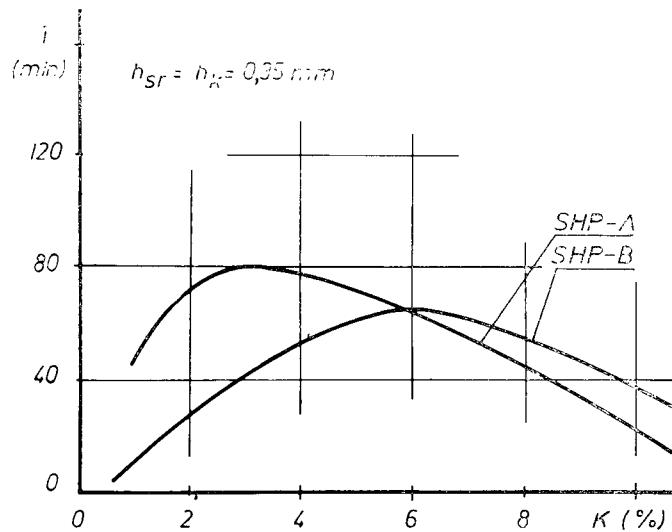
gde su: K_1 i K_2 — konstante krive otpornosti na habanje, u_1 i u_2 — eksponenti širine pojasa habanja u jednačini



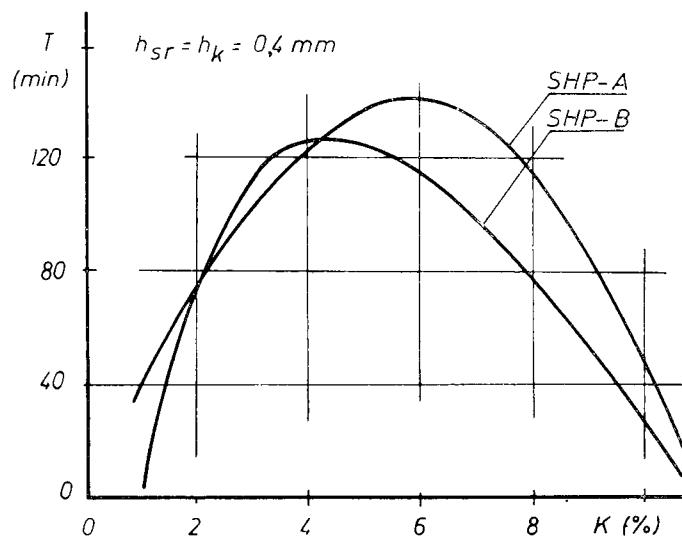
Brzina: 44 m/min, Korak: 0,0125 mm/z,
Dubina: 3 mm, Širina: 10 mm,
Protok: 8 lit/min, Materijal alata: Č. 6880
Materijal predmeta obrade:
Č. 1730 poboljšan na 270 HB

Sl. 4. — Krive otpornosti na habanje u obradi glodanjem

krive otpornosti na habanje, h_0 —apscisa tačke preloma krive otpornosti na habanje i h_K —kriterijum pohabanosti reznih elemenata alata. Koristeći zavisnost $R = f(h)$ moguće je definisati postojanost alata pri različitim koncentracijama sredstava za hlađenje i podmazivanje i time formirati funkcionalne zavisnosti $T = f(K)$ prikazane na slikama 5 i 6.



Sl. 5. — Postojanost alata u obradi bušenjem



Sl. 6. — Postojanost alata u obradi glodanjem

STRUKTURA VREDNOSTI OBRADE PROIZVODNE OPERACIJE I UTICAJ KONCENTRACIJE SREDSTVA ZA HLAĐENJE I PODMAZIVANJE

Vrednost obrade proizvodne operacije u serijskoj i masovnoj proizvodnji definisana je izrazom:

$$V_o = R + A + M + V_{shp} \quad (4)$$

U izrazu su:

□ Vrednost rada:

$$R = n k_1 t_k \quad (5)$$

□ Troškovi alata:

$$A = (n k_1 t_1 + k_2 t_2 + \frac{C_a}{i+1}) \frac{t_g}{T}, \quad (6)$$

□ Troškovi mašine:

$$M = \frac{C_m \cdot p}{F} t_k \quad (7)$$

□ Troškovi sredstva za hlađenje i podmazivanje:

$$V_{shp} = \frac{C_u \cdot K \cdot Q}{100 \cdot 60} t_k. \quad (8)$$

U relacijama je:

n — faktor koji uzima u obzir uticaj ličnog dohotka stručnog radnika,

k_1 i k_2 — bruto lični dohotci operacijskog radnika i oštarača, din/min,

t_1 i t_2 — vreme promene i vreme oštrenja alata, min,

C_a — vrednost alata, din,

i — broj mogućih oštrenja alata,

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

p — procenatna amortizaciona stopa,

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

C_u — vrednost jednog litra polusintetičkog emulgira-

jućeg ulja, din,

Q — potrošnja sredstva za hlađenje i podmazivanje,

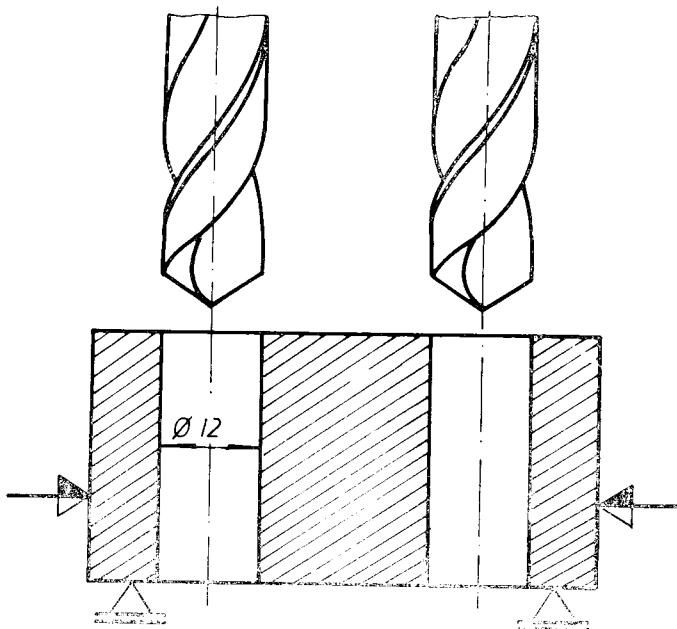
lit/h,

t_k — komadno vreme, min i

t_g — efektivno vreme rezanja, min

S obzirom na funkcionalnu zavisnost $T = f(K)$, proizilazi da vrednost obrade proizvodne operacije direktno zavisi od koncentracije sredstva za hlađenje i podmazivanje, to jest:

$$V_o = V_1 + V_2 (K).$$



Mašina: Viševretena bušilica sa vremenskim stepenom iskorišćenja 0,75,

Rezni alat: Spiralna burgija Ø12 JUS. K. D2. O22,

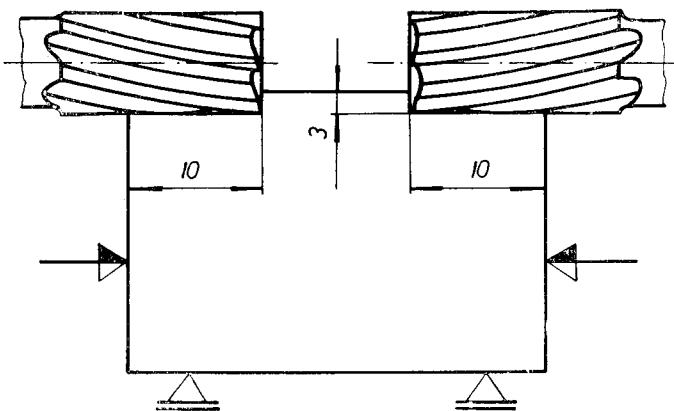
Materijal predmeta obrade: C.1730 poboljšan na 270 HB

Dubina rezanja 38 mm,

Protok sredstva za hlađenje i podmazivanje 6 lit/min.

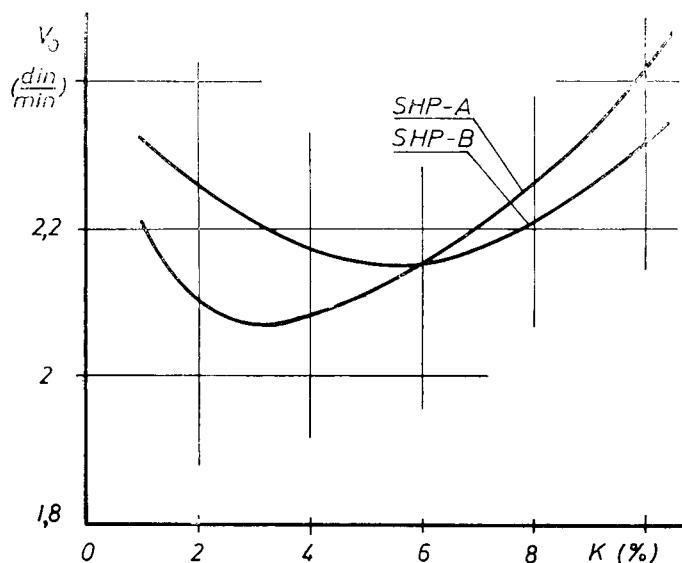
Slika 7.

Na slikama 7 i 8 prikazane su proizvodne operacije bušenja i glodanja i dati uslovi pri kojima se iste realizuju. Na osnovu elemenata kojima su definisane proizvodne operacije, kao i podataka dobijenih laboratorijskim istraživanjima triboloških karakteristika sredstava za hlađenje i podmazivanje, formirane su funkcionalne zavisnosti ukupne vrednosti obrade proizvodnih operacija i koncentracije sredstva za hlađenje i podmazivanje (slike 9 i 10).

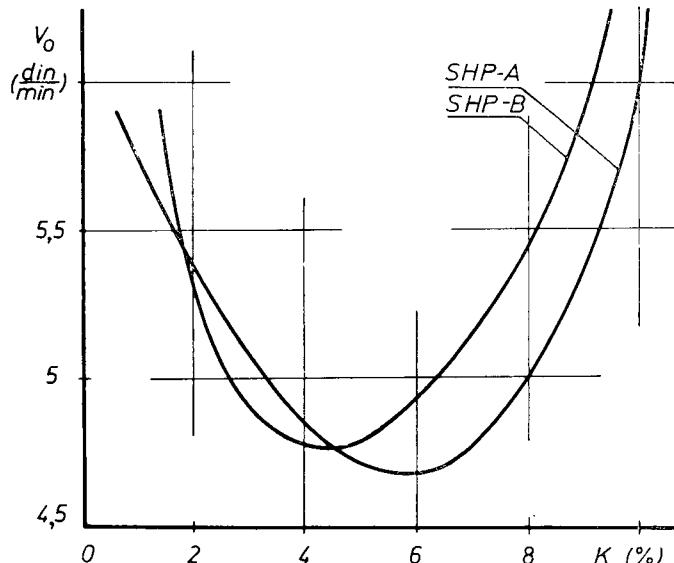


Sl. 8.

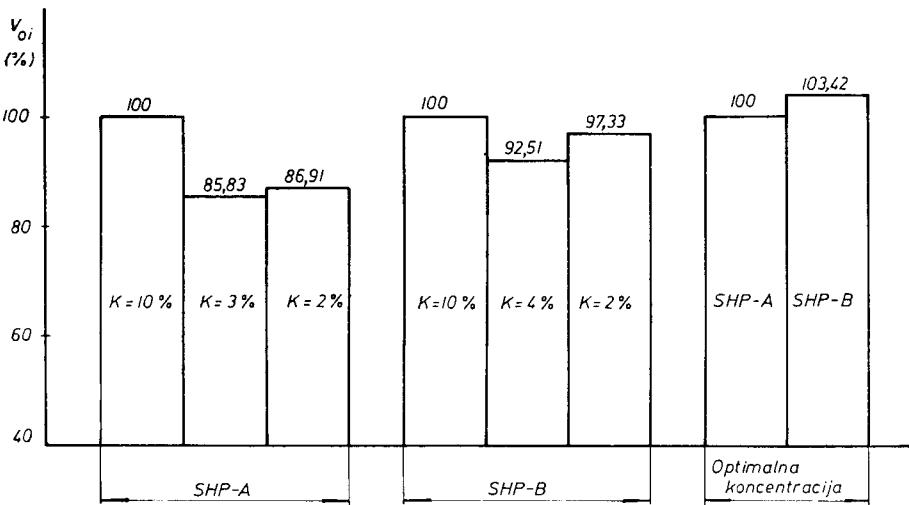
Mašina: Dvovretna glodalica sa vremenskim stepenom iskorišćenja 0,60,
Rezni alat: Vretenasto glodalo Ø12 JUS. K. D2. 091.
Materijal predmeta obrade: Č.1730 poboljšan na 270 HB,
 Dužina rezanja 85 mm,
 Protok sredstva za hlađenje i podmazivanje 8 lit/min.



Sl. 9. — Vrednost obrade proizvodne operacije u funkciji koncentracije SHP pri bušenju



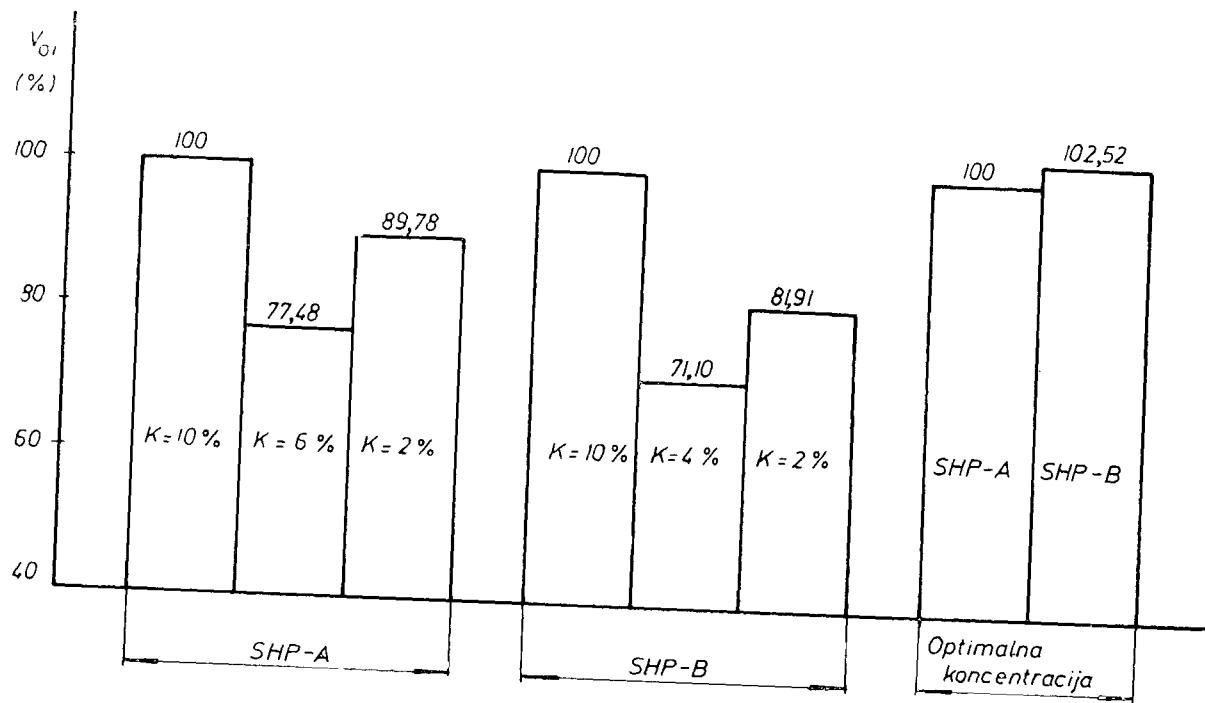
Sl. 10. — Vrednost obrade proizvodne operacije u funkciji koncentracije SHP pri glodanju



Sl. 11. — Relativni indeks uticaja u obradi bušenjem

Prikazana funkcionalna zavisnost $V_0 = f(K)$ definiše optimalnu koncentraciju polusintetičkog emulgirajućeg ulja u sredstvu za hlađenje i podmazivanje. Naime, ista predstavlja onu koncentraciju sredstva za hlađenje i podmazivanje pri kojoj je vrednost obrade proizvodne operacije minimalna. Optimalna koncentracija zavisi kako od tipa polusintetičkog sredstva za hlađenje i podmazivanje tako i od vrste proizvodne operacije.

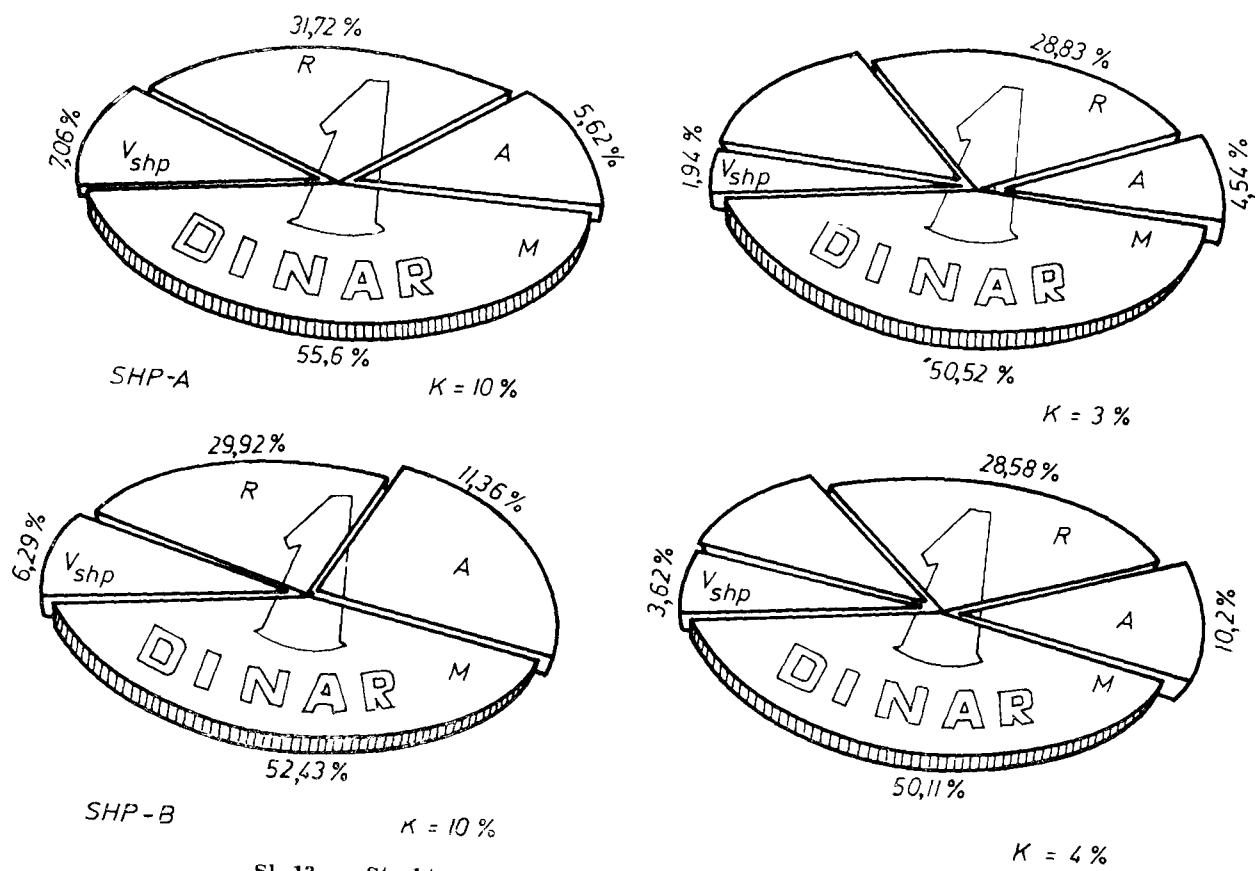
Na slikama 11 i 12 prikazan je relativni indeks uticaja koncentracije i tipa sredstva za hlađenje i podmazivanje na vrednost obrade proizvodne operacije. Histogramske za-



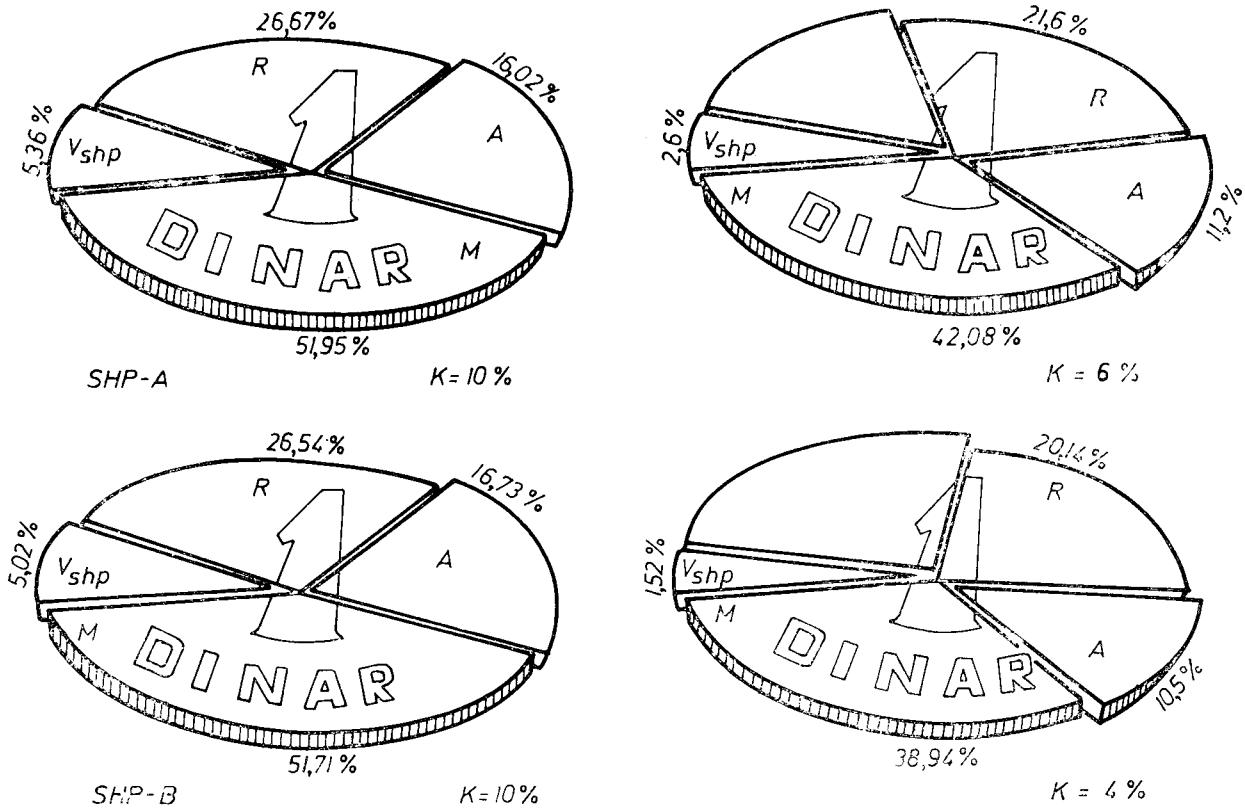
Sl. 12. — Relativni indeks uticaja u obradi glodanjem

visnosti pokazuju da je uticaj koncentracije sredstva za hlađenje i podmazivanje znatan i da isti zavisi kako od tipa sredstva za hlađenje i podmazivanje tako i od vrste proizvodne operacije. Naime, kod bušenja uticaj koncentracije sredstva za hlađenje i podmazivanje A je znatnije izražen, dok je kod glodanja znatnije izražen uticaj koncentracije sredstva za hlađenje i podmazivanje B.

Percentualno učešće pojedinih elemenata strukture vrednosti obrade proizvodne operacije pri optimalnoj i najvećoj koncentraciji polusintetičkog emulgirajućeg ulja u sredstvu za hlađenje i podmazivanje prikazano je na slikama 13 i 14.



Sl. 13. — Struktura vrednosti obrade proizvodne operacije bušenja



Sl. 14. — Struktura vrednosti obrade proizvodne operacije glodanja

Skice pokazuju da, pri koncentraciji sredstva za hlađenje i podmazivanje većoj od optimalne, vrednost rada, troškovi alata, mašine i sredstva za hlađenje i podmazivanje rastu. Slično je i pri koncentraciji manjoj od optimalne, kada vrednost rada i troškovi alata i mašine rastu, dok troškovi sredstva za hlađenje i podmazivanje opadaju. Dakle, uticaj koncentracije sredstva za hlađenje i podmazivanje je nelinearnog karaktera, sa karakterističnim minimumom funkcije $V_0 = f(K)$.

ZAKLJUČCI

Izvedena tribološka istraživanja kvaliteta i uticaja koncentracije polusintetičkih emulgirajućih ulja u sredstvu za hlađenje i podmazivanje ukazuju na značaj i neophodnost potpunijeg sagledavanja ove problematike i projektovanja optimalnih uslova eksploracije i primene sredstava za hlađenje i podmazivanje.

Naime, prikazani rezultati i analize navode na nekoliko zaključaka:

i — uticaj koncentracije sredstva za hlađenje i podmazivanje je evidentan i zavisi kako od tipa sredstva za hlađenje i podmazivanje, tako i od vrste proizvodne operacije,

ii — zavisnost vrednosti obrade proizvodne operacije i koncentracije sredstva za hlađenje i podmazivanje je nelinearna sa karakterističnim minimumom, kome odgovara optimalna koncentracija,

iii — optimalna koncentracija sredstva za hlađenje i podmazivanje je različita i zavisi od tipa sredstva za hlađenje i podmazivanje i vrste proizvodne operacije i

iv — izbor optimalne koncentracije polusintetičkog emulgirajućeg ulja u sredstvu za hlađenje i podmazivanje je jedan od mogućih puteva optimizacije procesa rezanja.

Prikazani rezultati istraživanja predstavljaju deo rezultata dobijenih realizacijom naučno-istraživačkog projekta »Optimizacija proizvodnih uslova u metaloprerađivačkoj industriji sa aspekta minimiziranja troškova obrade« — deo

»Razvoj proizvodnje i primene sredstava za hlađenje i podmazivanje« u čijem finansiranju učestvuje Republička zajednica nauke SR Srbije i FAM—Kruševac.

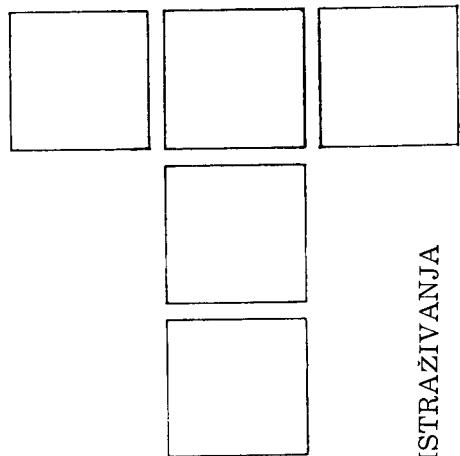
LITERATURA

1. B. IVKOVIĆ, Tribologija rezanja, Sredstva za hlađenje i podmazivanje, Građevinska knjiga, Beograd, 1979.
2. B. IVKOVIĆ, Struktura troškova proizvodnje u obradi metala, Mašinski fakultet, Kragujevac, 1974.
3. B. JEREMIĆ, Tribološke karakteristike sredstava za hlađenje i podmazivanje pri obradi bušenjem, Obrada metala i tribologija No. 10, Kragujevac, 1977.
4. S. ARSOVSKI, Tribološke karakteristike sredstava za hlađenje i podmazivanje pri obradi glodanjem, Obrada metala i tribologija No. 10, Kragujevac, 1977.

Mr MIODRAG LAZIĆ, dipl. inž.
asistent Mašinskog fakulteta u Kragujevcu



Roden 1949. godine. Diplomirao 1973. godine na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu. Magistrirao 1976. godine na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu. Do sada objavio više stručnih i naučnih radova i učestvovao u realizaciji većeg broja naučno-istraživačkih projekata. Bavi se tribološkim istraživanjima elemenata alata i mašina.



Uticaj hrapavosti površine na prionljivost maziva

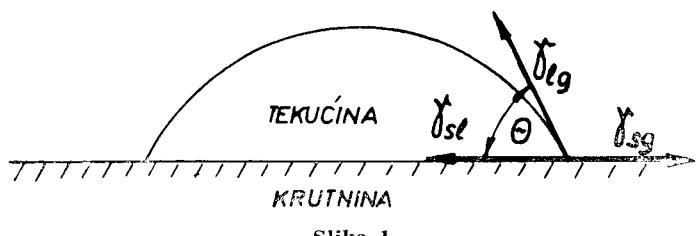
UVOD

Jedno od važnih svojstava mazivih ulja je prionljivost, tj. sposobnost maziva da se u većoj ili manjoj mjeri prione uz metalnu površinu. Očito je da prionljivost ovisi, kako o svojstvima ulja, tako i o prirodi metalne površine. Za istraživanje ponašanja metalne površine u kontaktu s mazivom, tj. istraživanja vrlo složenih utjecaja površinskih sila, površinskih energija i površinskih reakcija koje su posljedica strukture, apsorpcionog sloja, površinsko-aktivnih supstanci, vrlo značajno mjesto zauzima mikrogeometrija površine s hrapavošću, koja je direktna posljedica procesa obrade.

U sklopu istraživanja prionljivosti maziva metodom plošne kapilare, koja je razvijena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, izvršeno je ispitivanje utjecaja hrapavosti površina na određivanje prionljivosti maziva plošnom kapilarom.

TEORIJSKO RAZMATRANJE

Ako tekućina jedinične površinske energije γ_{lg} čini kontakt s krutninom jedinične površinske energije γ_{sg} , dodirna površina krutnina — tekućina ima jediničnu površinsku energiju γ_{sl} .



Slika 1.

Ako je Θ kut kvašenja, rezultat mehaničke ravnoteže postavljenе kapljice tekućine na ravnu, krutu površinu unutar tri površinske napetosti iznosi:

$$\gamma_{sg} - \gamma_{sl} = \gamma_{lg} \cdot \cos \Theta \quad (1)$$

Iz analize promjene energije površine u plošnoj kapilari, prije i nakon što se tekućina digla za visinu »h«, formirane od dvije glatke površine istog materijala između kojih je konstantan razmak (slika 2), proizlazi izraz za prionljivost maziva na metalnu površinu.

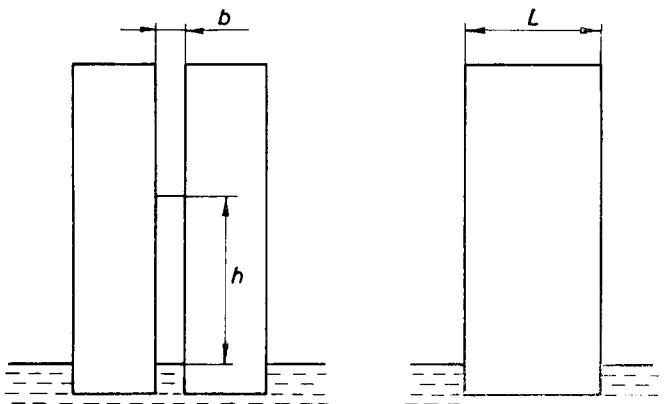
Energije površina u plošnoj kapilari iznose:

a) prije nego se tekućina digne za visinu »h«

$$W_I = 2A_s \cdot \gamma_{sg} + A_{sl} \cdot \gamma_{lg},$$

b) nakon što se tekućina digne za visinu »h«

$$W_{II} = 2A_s \cdot \gamma_{sg} + A_{sl} \cdot \gamma_{lg} + 2A_{s2} \cdot \gamma_{lg}.$$



Slika 2.

gde je:

γ_{sg} — jedinična površinska energija krutnina — plin

γ_{lg} — jedinična površinska energija tekućina — plin

γ_{sl} — jedinična površinska energija krutnina — tekućina

$$A_s = h \cdot L$$

$$A_{sl} = b \cdot L$$

$$A_{s2} = b \cdot h$$

Razlika energija W_I i W_{II} predstavlja dobiveni rad, koji je ekvivalentan energiji prijanjanja tekućine uz krutu površinu, a po jedinici površine iznosi:

$$W = -\frac{W_{II} - W_I}{2A_s} = \gamma_{sg} - \gamma_{sl} - \frac{A_{s2}}{A_s} \cdot \gamma_{lg} \quad [J/m^2] \quad (2)$$

Rubni utjecaj jedinične granične površine tekućina — plin $A_{s2}/A_s \cdot \gamma_{lg}$ moguće je svesti na zanemarivo mjeru korištenjem dovoljno široke kapilare »L« i malog razmaka »b« između površina kapilare. U tom slučaju energija prijanjanja po jedinici površine, koristivši izraz pod (1), iznosi:

$$W = \gamma_{sg} - \gamma_{sl} = \gamma_{lg} \cdot \cos \Theta \quad [J/m^2] \quad (3)$$

Dobiveni rad iz razlike energija W_I i W_{II} ima za posljedicu dizanje tekućine u plošnoj kapilari.

Izjednačavajući učinjeni rad, tj. da se tekućina podigne s visine »h« za »dh« sa slobodnom površinskom energijom, dobivamo izraz:

$$\gamma_{lg} \cdot \cos \Theta \cdot 2 \cdot L \cdot dh = \varrho \cdot L \cdot b \cdot g \cdot h \cdot dh$$

$$W = \gamma_{lg} \cdot \cos \Theta = \frac{b}{2} \cdot \varrho \cdot g \cdot h \quad [J/m^2] \quad (4)$$

ϱ — gustoća tekućine
 L — širina kapilare
 b — debeljina kapilare
 g — gravitaciona konstanta
 h — postignuta visina ulja

Iz izraza (4.) vidljiva je mogućnost mjerjenja energije prijanjanja ulja u plošnoj kapilari mijereći postignutu visinu „h“ uz poznati razmak između površina kapilare i gustoće tekućine.

Ukoliko je jedna površina plošne kapilare od metala, a druga od stakla, iznos jedinične energije prijanjanja ulja samo za metalnu površinu plošne kapilare iznosi:

$$W_m = b \cdot \varrho \cdot g \cdot \left(h - \frac{h_{st}}{2} \right) \quad [J/m^2] \quad (5)$$

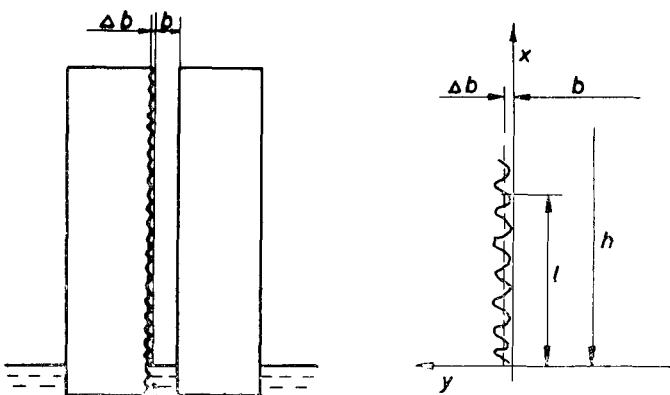
gdje je h_{st} visina do koje bi se popelo ulje u kapilari s dvije staklene površine uz širinu kapilare „b“.

$$h_{st} = \frac{2W_{st}}{\varrho \cdot g \cdot b} \quad (6)$$

Izraz h_{st} moguće je izračunati na osnovu eksperimentalno određene jedinične energije prijanjanja ulja uz staklenu površinu W_{st} dobivene u plošnoj kapilari s dvije staklene površine uz širinu kapilare „b“.

Ukoliko je metalna površina hrapava dolazi do povećanja razmaka kapilare „b“ za Δb . Na osnovu postavljenog koordinatnog sustava prema slici 3. povećanje razmaka Δb iznosi:

$$\Delta b = \frac{1}{h} \int_0^h y \cdot dx \quad (7)$$



Slika 3.

Povećanje razmaka Δb moguće je približno odrediti pomoću parametra hrapavosti R_p — dubina poravnjanja, definiran kao razmak između srednje linije i linije koja je paralelna s njom, a prolazi najvišom točkom efektivnog profila. Prema tome je:

$$\Delta b \approx R_p = \frac{1}{l} \cdot \int_0^l y \cdot dx \quad (8)$$

gdje je l referentna dužina ispitivanja profila.

Pošto dolazi do povećanja zazora za Δb , potrebno je izvršiti korekciju h_{st} s obzirom na to povećanje i to prema slijedećem izrazu:

$$h_{st} = \frac{2W_{st}}{(b + R_p) \cdot \varrho \cdot g} \quad (9)$$

Energija prijanjanja ulja uz metalnu površinu, dobivena u plošnoj kapilari s hrapavom metalnom površinom i glatkom staklenom, u tom slučaju iznosi:

$$W_m = (b + R_p) \cdot \varrho \cdot g \cdot \left(h - \frac{h_{st}}{2} \right) \quad (10)$$

EKSPERIMENTALNI DIO

Za provedeni pokus odabранo je 5 vrsta materijala:

- čelik Č.1730
- sivi lijev SL 22
- kositrena bronce Cu Sn 14
- aluminjska bronce Cu Al 10 Fe Sn Ni
- aluminjska slitina ALCOA — TOP
(Sn 6,27; Cu 1,91; Ni 1,02; Mg 0,75; ost. Al)

Na uzorcima dimenzija $20 \times 20 \times 100$ mm izvršene su na površini veličine 20×100 mm, za svaku vrstu materijala, slijedeće obrade:

- poliranje
- blanjanje fino s uzdužno usmjerenim tragovima
- blanjanje fino s poprečno usmjerenim tragovima
- blanjanje grubo s uzdužno usmjerenim tragovima
- blanjanje grubo s poprečno usmjerenim tragovima

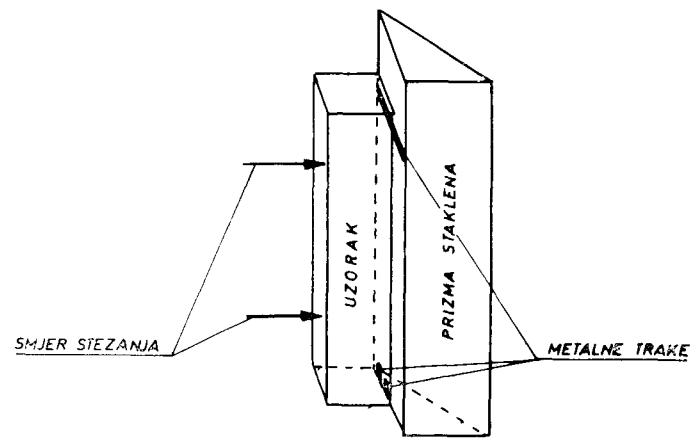
Pod uzdužno usmjerenim tragovima podrazumijeva se usmjerenost tragova obrade koji su paralelni sa dužom stranicom ispitivane površine uzroka (100 mm), a pod poprečno usmjerenim tragovima poprečno na tu stranicu.

S obzirom na vrstu materijala, način obrade i usmjerenost tragova eksperimenti su izvršeni na 25 različitih površina, čija je hrapavost ispitana pomoću mehaničko-elektronskog uređaja Hommel — Tester, tip T, uz referentnu dužinu $l = 6,3$ mm. Prilikom ispitivanja ustanovljene su vrijednosti parametara hrapavosti R_a , R_{max} i R_p tabela br. 1.

Za pokuse je korišteno bazno ulje INA A/3°E kod 323 K, gustoće $\varrho = 858 \text{ kg/m}^3$.

Ispitivanje prionljivosti vršeno je metodom plošne kapilare. Kapilara je formirana od obradene metalne površine uzorka na koju je postavljena staklena prizma odvojena s tri uske metalne trake za osiguranje konstantnog zazora. U svrhu stezanja i uranjanja uzorka i staklene prizme u ulje korištena je specijalno konstruirana naprava. Postignuta visina ulja očitavana je s milimetarske skale postavljene na dužoj strani prizme.

Principijelna shema stezanja uzorka i staklene prizme s prikazom položaja metalnih traka za osiguranje zazora prikazana je na slici br. 4.



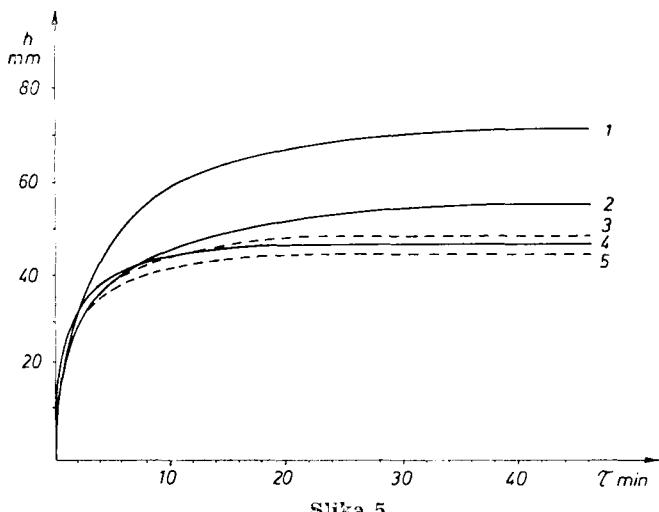
Slika 4.

TABELA 1.

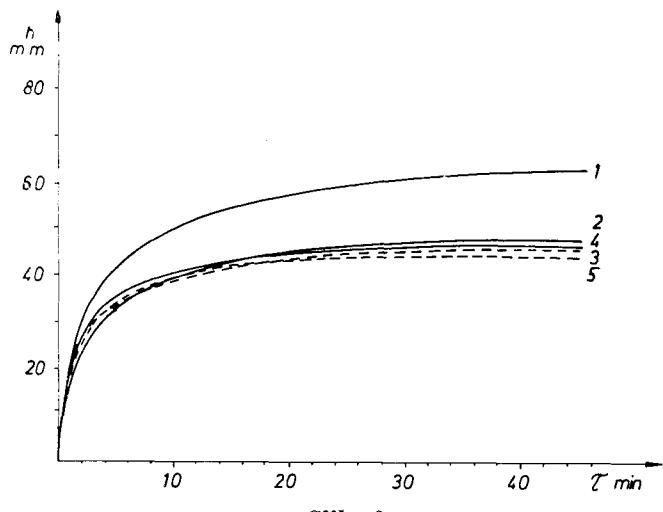
	ČELIK			SIVI LIJEV			Sn BRON.			Al BRON.			ALCOA			
	R _a	R _{max}	R _p	R _a	R _{max}	R _p	R _a	R _{max}	R _p	R _a	R _{max}	R _p	R _a	R _{max}	R _p	
POLIRANO	0,04	0,50	0,14	0,08	1,00	0,21	0,03	0,20	0,03	0,03	0,20	0,13	0,18	1,00	0,30	
O N J A N O	FINO UZD.	2,70	20,0	8,50	4,00	30,0	10,0	4,00	16,5	9,00	3,90	17,0	9,50	2,10	10,0	4,50
	FINO POP.	3,30	24,0	10,0	6,00	42,0	19,0	2,40	11,0	8,00	2,30	11,0	8,30	2,90	12,0	6,50
B L A N J A N O	GRUBO UZD.	14,0	64,0	29,5	8,00	36,0	20,0	10,5	38,0	25,0	10,0	39,0	24,0	6,60	32,0	20,0
	GRUBO POP.	11,5	57,0	29,5	7,50	36,0	21,0	10,0	36,0	25,0	11,0	37,0	23,0	9,00	50,0	21,0

Ispitivanje prionljivosti ulja vršeno je na svim površinama uz kontantnu debljinu kapilare od 0,106 mm. Mjerenja je postignuta visina ulja u vremenskim razmacima od 1 minute do maksimalno postignute visine, tj. do ravnotežnog stanja, koje je obično uslijedilo nakon 40 minuta.

Usporedni prikaz krivulja postignutih visina ulja u kapilari u ovisnosti s vremenom, obzirom na obradu i usmjerenost tragova (hrapavost površine), dat je za dva materijala i to za čelik — slika br. 5 i kositrenu broncu — slika br. 6 (najviša i najniža postignuta visina ulja na poliranoj površini).



Slika 5.



Slika 6.

Oznake krivulja:

- 1 — polirana površina
- 2 — fino blanjana površina — uzdužno usmjereni tragovi
- 3 — fino blanjana površina — poprečno usmjereni tragovi
- 4 — grubo blanjana površina — uzdužno usmjereni tragovi
- 5 — grubo blanjana površina — poprečno usmjereni tragovi

Iz prikazanih dijagrama za oba materijala uočljiva je izrazita razlika postignutih visina ulja na poliranim površinama s obzirom na blanjane površine. Isto takvo ponašanje susrećemo i kod ostale tri vrste materijala, što se dade zaključiti na osnovu datih maksimalno postignutih visina ulza »h« u mm u tabeli br. 2.

TABELA 2.

	ČELIK	SIVI LIJEV	Sn BRON.	Al BRON.	ALCOA
POLIRANO	73	69,5	66	70	68,5
O N J A N O	FINO UZD.	57	61	47	45,5
	FINO POP.	49	43	45	44
B L A N J A N O	GRUBO UZD.	47	52	45,5	38
	GRUBO POP.	45	42	43,5	49

MATERIJAL	Suma kvadrata odstupanja	Stupnjevi slobode	Procjena varijance	F _{rac}	F _{0,05}	F _{0,01}
MATERIJAL	108,26	4	27,065	1,66	3,007	4,773
OBRADA	2183,26	4	545,815	33,42	3,007	4,773
OSTATAK	261,34	16	16,33	—	—	—
UKUPNO	2552,86	24	—	—	—	—

Iz analize varijance dobivene na temelju podataka maksimalno postignutih visina ulja u plošnoj kapilari proizlazi da hrapavost površina značajno utječe na visinu ulja »h« u plošnoj kapilari. Što se tiče materijala nema signifikantne razlike između ispitivanih vrsta materijala, što treba uzeti s oprezom, jer je eksperimentalni dio vođen tako, da se prvenstveno izluči utjecaj hrapavosti površina.

Na osnovu izraza (10) izračunata je energija prijanjanja ulja uz metalnu površinu za sve ispitane uzorke, čiji iznosi u mJ/m^2 dati su u tabeli br. 3.

TABELA 3.

ČELIK	SIVI LIJEV	Sn BRON.	Al BRON.	ALCOA
POLIRANO 36,58	33,45	30,34	33,90	32,57
O FINO UZD.	26,99	30,95	16,94	15,67
O FINO POP.	19,23	16,62	14,59	13,76
O GRUBO UZD.	25,09	26,62	21,61	13,02
B L A N D O GRUBO POP.	22,81	26,36	19,41	24,65
				19,56

Ako se promatraju samo uzorci s poliranom površinom (hrapavost površine neznatna i bez izrazitog usmjerenja tragova obrade) vidljiva je razlika u energiji prijanjanja s obzirom na materijal, te redoslijed materijala prema dobivenoj energiji prijanjanja je slijedeći:

MATERIJAL	W _m mJ/m ²
Celik	36,58
Al. bronca	33,90
Sivi lijev	33,46
ALCOA	32,57
Kos. bronca	30,33

Utjecaj usmjerenosti tragova obrade na dobivenu energiju prijanjanja u plošnoj kapilari ukazuje da je energija prijanjanja kod uzorka istog materijala uzdužno usmjerenih tragova veća nego kod poprečno usmjerenih tragova, kako kod finog, tako i kod grubog blanjanja.

Kod uzorka od istog materijala s uzdužno usmjerenim tragovima energija prijanjanja kod fino blanjanih površina je veća nego kod grubo blanjanih površina (osim kod kositrene bronce).

Uspoređujući energije prijanjanja kod uzorka od istog materijala s poprečno usmjerenim tragovima, energija prijanjanja kod fino blanjanih površina je manja, nego kod grubo blanjanih površina.

ZAKLJUČAK

Na osnovu provedenih eksperimenata može se zaključiti da hrapavost površine značajno utječe na visinu penjanja ulja, tj. na dobivenu energiju prijanjanja ulja u plošnoj kapilari. Dobivanjem manje energije prijanjanja u plošnoj kapilari na blanjanim površinama u odnosu na poliranu, ne može se razlučiti koliki utjecaj na to smanjenje ima promjena energije površine uslijed različite obrade, a koliki uslijed povećanja unutrašnjeg trenja radi povećane hrapavosti. Da povećanje unutrašnjeg trenja uslijed hrapave površine ima značajan utjecaj na smanjenje energije prija-

njanja ukazuje različita energija prijanjanja dobivena kod istog materijala s različito usmjerenim tragovima, a s približno sličnim vrijednostima hrapavosti.

Ukoliko se želi ispitati utjecaj materijala na prionljivost maziva, moraju se upotrijebiti fino obrađene površine bez izrazite usmjerenosti tragova s približno istim vrijednostima parametara hrapavosti.

LITERATURA

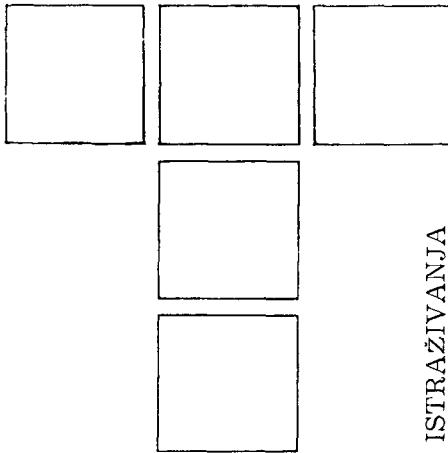
1. S. TURINA, P. RAKAMARIĆ, E. OBERŠMIT, »Ispitivanje prionljivosti mazivih ulja Cirkol 50, Cirkol 170, Hidraol 50 HD uz površinu aluminijske slitine ALCOA — TOP«. Zbornik radova II jugoslavenskog simpozija o aluminiju, Radenci, 1974.
2. V. IVUŠIĆ, S. TURINA, R. ZGAGA, »Istraživanje prionljivosti maziva u ovisnosti o materijalu i završnoj obradi površine«. Zbornik radova naučno-stručnog skupa o zupčanicima i kliznim ležajevima, Zagreb, 1976.
3. V. IVUŠIĆ, S. TURINA, »Prilog poznavanju prionljivosti mazivih ulja uz metalne površine«. Strojstvo 4, 1977.
4. W. M. WESTPHALL, »Physik«, Springer—Verlag, Berlin, 1963.
5. B. PUGH, »Friction and wear«, Butterworths, London, 1973.
6. F. P. BOWDEN, D. TABOR, »The friction and lubrication of solids«, Part II, Oxford University Press, 1964.
7. F. T. FARAGO, »Handbook of dimensional measurement«, Industrial Press INC, New York, 1968.
8. JUS M. Al. 021, »Klasifikacija površinske hrapavosti industrijskih proizvoda«, 1964.
9. DIN 4762, »Erfassung der Gestaltabweichungen 2. bis 5. Ordnung an Oberflächen an Hand von Oberflächenschlitten. Begriffe für Bezugssystem und Maße«, 1960.

SANJIN MAHOVIĆ, dipl. inž.

asistent Fakulteta strojarstva i brodogradnje
u Zagrebu



Rođen 1947. godine u Zagrebu, gdje je i diplomirao na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Od 1974. do 1976. godine radio je u Tvornici malih kućanskih aparata »Rade Končar« u Samoboru na radnom mestu tehničkog električnog grijajućeg vode. U istom periodu uključen je u rad na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu kao honorarni voditelj vježbi iz predmeta »Mjerenje oblika i dimenzija«. Od 1976. godine neprekidno radi na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u svojstvu asistenta pri znanstvenoj disciplini Mjerenje i kontrola Zavoda za automatiku i mjeru tehniku.



Analiza mogućnosti adaptivnog upravljanja alatnim mašinama na osnovu merenja intenziteta habanja reznih elemenata alata

UVOD

Jedan od najsloženijih problema pri razvoju sistema sa optimizacionim regulisanim (Adaptive Control Optimisation — ACO sistema) je pravilan izbor senzora habanja, koji treba da ostvari visoku tačnost i pouzdanost i istovremeno bude ekonomičan. Do sada razvijeni senzori habanja nisu dali očekivane rezultate i to, kako u pogledu tačnosti (greška merenja habanja 0,005 — 0,05 mm), tako i u pogledu pouzdanosti rada (npr. nije u potpunosti otklonjen uticaj promene temperature, pritiska, kvaliteta odbojne površine kod pneumatskih senzora habanja) i ekonomičnosti (npr. TV kamera kao senzor habanja).

U okviru razvoja radioaktivne metode za tribološka istraživanja u Laboratoriji za obradu metala i tribologiju uočena je mogućnost njene primene za adaptivno upravljanje alatnih mašina. Dosadašnja istraživanja su pokazala da je pri konstantnim uslovima ozračivanje reznih elemenata alata radioaktivnosti alata u strogoj korelacionoj vezi sa habanjem alata (indeks krivolinijske korelacije je veći od 0,999), pa se empirijska korelaciona zavisnost radioaktivnosti i habanja alata može tretirati kao funkcionalna zavisnost.

Na ovaj način se preko radioaktivnosti alata (koja se meri neprekidno u toku obrade) može odrediti habanje alata sa tačnošću od 0,002 mm.

U radu su dati neki rezultati ispitivanja tačnosti radioaktivnih senzora habanja, koji su dobijeni pri obradi glodanjem vretenastim glodalima. Prikazan je i jedan od algoritama za upravljanje ACO sistemom sa aspekta minimalnih troškova obrade.

OSNOVI RAZVOJA ADAPTIVNIH SISTEMA NA BAZI KORIŠĆENJA RADIOAKTIVNIH REZNIH ELEMENATA

Poznato je da se rezni alati habaju po lednoj i grudnoj površini. Zbog veće korelacije između habanja po lednoj površini i postojanosti i lakšeg merenja kao parametar habanja se uzima habanje po lednoj površini.

Površina na kojoj se prate tribološki procesi bombarduje se teškim česticama (protoni i deuteroni). Usled toga dolazi do ekcitiranosti atoma pri čemu se višak energije emituje u vidu α , β ili γ zračenja. Primena radioaktivne metode zasniva se na merenju γ zračenja.

Usled habanja smanjuje se masa alatnog materijala za:

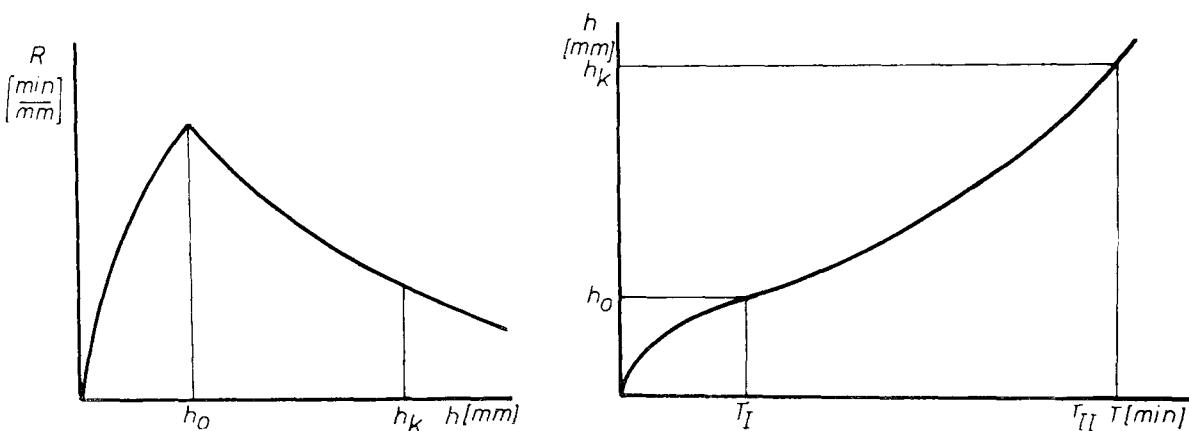
$$\Delta G = \gamma_a \cdot l \frac{h}{2} = \frac{\gamma_a \cdot l}{2} \cdot \frac{h^2 \cdot \operatorname{tg} \gamma}{1 - \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \gamma} \quad (1)$$

Kako je ista masa ozračena, radioaktivnosti alata će usled habanja opadati sa kvadratom habanja, tj.

$$A = A_0 - K_a \cdot h^2 \quad (2)$$

Ova zavisnost radioaktivnosti od habanja bi se dobila pri konstantnoj specifičnoj radiaktivnosti po dubini i duž sečiva. Na osnovu eksperimentalnih podataka o veličini radioaktivnosti i širine pojasa habanja ustanovljeno je da je najveći indeks krivolinijske korelacije ako se veza pretpostavi u obliku:

$$A = A_0 \cdot e^{-k \cdot h^n} \quad (3)$$



Sl. 1. Opšta zavisnost otpornosti na habanje od habanja alata

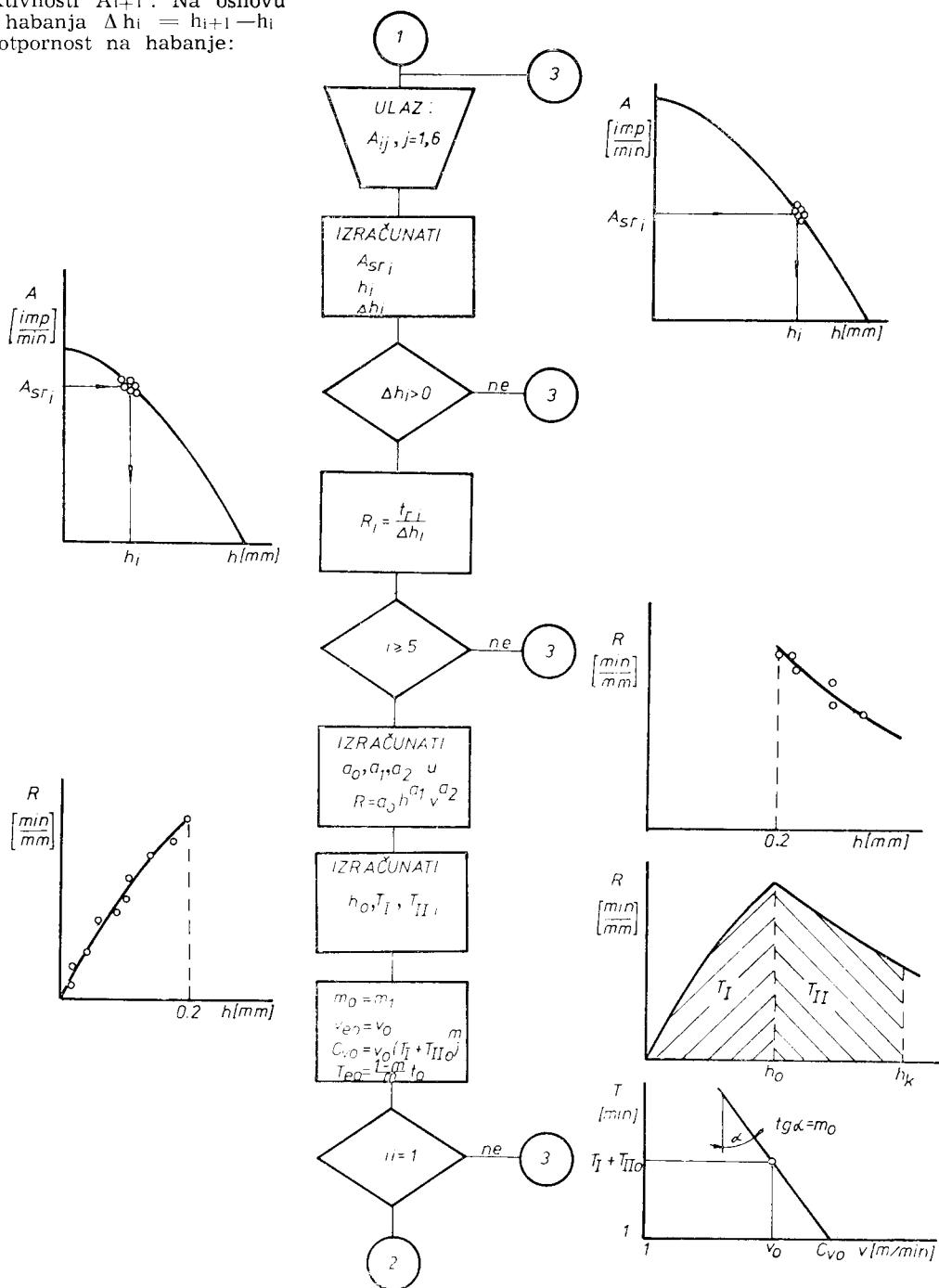
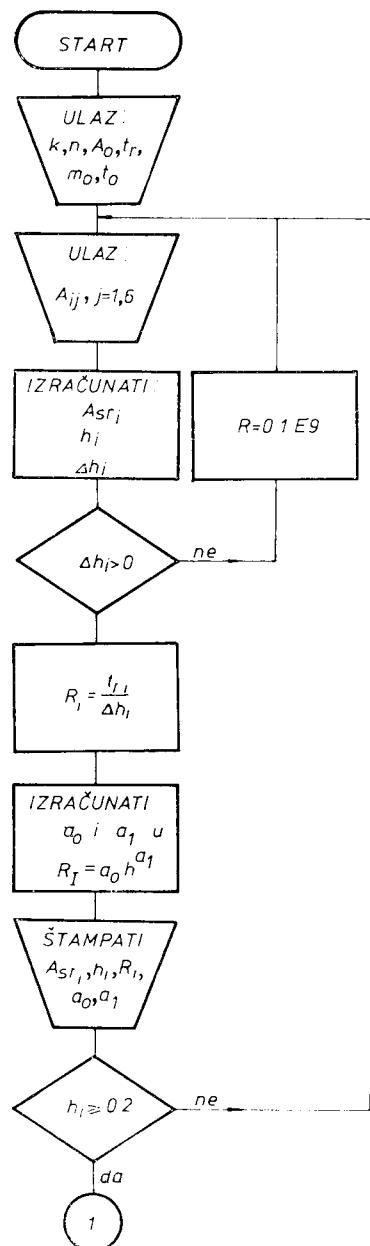
Radioaktivnost alata opada, dakle, sa porastom habanja. Uticaj prirodnog pada radioaktivnosti se, kod dugotrajnih eksperimenata, elemišće množenjem izmerene radioaktivnosti faktorom e^{-kT} , gde je T vreme od početka eksperimenta.

Ako je radioaktivnost pre rezanja iznosila A_i , a posle rezanja u trajanju t_i iznosi A_{i+1} , habanje alata će se povećati od vrednosti h_i na h_{i+1} .

Na osnovu ranije izračunatih veličina k i n može se odrediti parametar h koji odgovara izmerenoj radioaktivnosti A_{i+1} , tj.

$$h_i = \left(\frac{\ln A_0}{\ln A_i} \right)^{1/n} \quad (4)$$

Na isti način se može odrediti parametar habanja h_{i+1} koji odgovara izmerenoj radioaktivnosti A_{i+1} . Na osnovu ovoga može se odrediti porast habanja $\Delta h_i = h_{i+1} - h_i$ za vreme rezanja t_i , odnosno, otpornost na habanje:



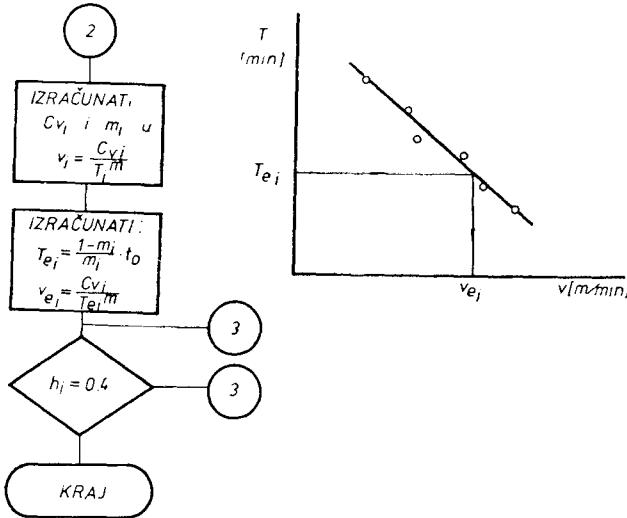
Slika 2a.

$$R_i = \frac{t_i}{\Delta h_i} \quad (5)$$

Na osnovu podataka otpornosti na habanje pri određenim proizvodnim uslovima može se odrediti postojanost:

$$T_I = \int_0^{h_0} a_{0I} h^{a_{II}} dh \quad (6)$$

$$T_{II} = \int_{h_0}^{h_k} a_{0II} h^{a_{III}} dh$$



Slika 2c.

Sl. 2. (a, b, c) Algoritam za primenu radioaktivne metode za adaptivno upravljanje kopirne glodalice

Ukupna postojanost predstavlja površinu ispod R-h krive (sl. 1) u intervalu $0 \dots h_k$. Veličina h_0 se dobija iz uslova jednake otpornosti na habanje za prvi i drugi period habanja.

Jednačina krive habanja se dobija integraljenjem u prvom periodu od 0 do h_0 , a u drugom od h_0 do h_k .

Na sl. 2. prikazan je algoritam za primenu radioaktivne metode za adaptivno upravljanje kopirne glodalice. Na osnovu 6 izmerenih vrednosti radioaktivnosti u toku $1 \cdot \text{min}$ ($t_{\text{mer}} = 10 \text{ sec}$) određuje se preko računara srednja vrednost radioaktivnosti. U memoriji računara smještene su vrednosti k i n iz izraza (3) tako da se u svakom trenutku vremena može izračunati habanje alata prema (4).

Adaptivno upravljanje se ne vrši u inicijalnom periodu habanja, već se obrada vrši sa ekonomičnom brzinom koja odgovara datim proizvodnim uslovima. Ista se nalazi u tehnološkoj banci podataka. Prethodnim ispitivanjima je utvrđeno da je inicijalni period habanja za vretenasta glodalica do 0,2 mm, pa se obrada vrši sve dok radioaktivnost alata ne bude jednak:

$$A = a_0 \cdot e^{-k \cdot 0,2^n} \quad (7)$$

Prema ranije opisanoj metodologiji određuje se zavisnost otpornosti na habanje pri radu sa početnom ekonomičnom brzinom.

Za $h \geq 0,2 \text{ mm}$ obrada se vrši sa početnom ekonomičnom brzinom u trajanju od 3 puta po 1 min. Kao i u prethodnom slučaju, određuju se a_{0II} i a_{III} u proširenom izrazu za otpornost na habanje:

$$R_{II} = a_{0II} \cdot h^{a_{III}} \quad (8)$$

i određuje prevojna tačka krive habanja h_0 iz:

$$h_0 = \left(\frac{a_{0II}}{a_{0I}} \right)^{\frac{1}{a_{III} - a_{II}}} \quad (9)$$

Na osnovu ovako izračunatog h_0 određuje se postojanost alata u prvom i drugom periodu habanja alata.

Za poznatu vrednost eksponenta postojanosti m (koji se uzima iz tehnološke banke podataka) može se izračunati konstanta Cv u Tajlorovom izrazu za brzinu:

$$Cv = v(T_I + T_{II})^m \quad (10)$$

Ekonomična postojanost alata iznosi:

$$T_e = \frac{1-m}{m} \cdot \frac{nk_1 t_1 + k_2 t_2 + \frac{Ca}{i+1}}{nk_1 + \frac{Cm \cdot p}{F \cdot r \cdot 100 \cdot 60}} = \frac{1-m}{m} t_0 \quad (11)$$

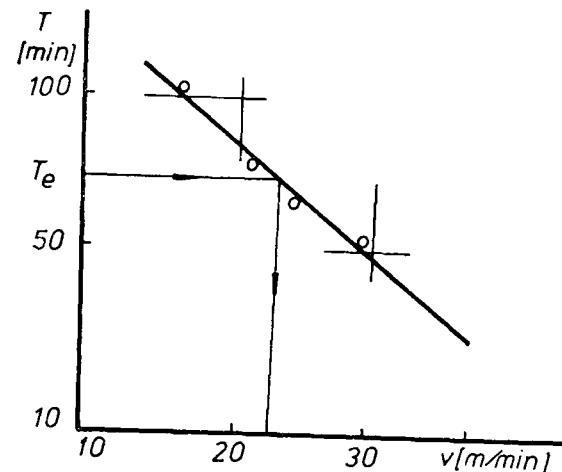
Poznavajući prethodno navedene veličine može se odrediti nova vrednost ekonomične brzine rezanja:

$$v_e = \frac{Cv}{T_e^m} \quad (12)$$

Obrada se nastavlja sa ovom brzinom i dobija nova vrednost otpornosti na habanje. Metodom najmanjih kvadrata mogu se dobiti a_0 , a_1 i a_2 u izrazu:

$$R = a_0 h^{a_1} v^{a_2} \quad (13)$$

Zatim se na isti način određuje T . Eksponent postojanosti m i konstanta Cv dobijaju se metodom najmanjih kvadrata na osnovu podataka o brzini i izračunatoj postojanosti T_I i T_{II} (sl. 3).



Sl. 3. Veza brzine rezanja i izračunatih postojanosti

Za izračunatu ekonomičnu postojanost:

$$T_{e2} = \frac{1-m_2}{m_2} \cdot t_0 \quad (14)$$

dobija se nova vrednost ekonomične brzine

$$v_{e2} = \frac{Cv_2}{T_{e2}^{m_2}} \quad (15)$$

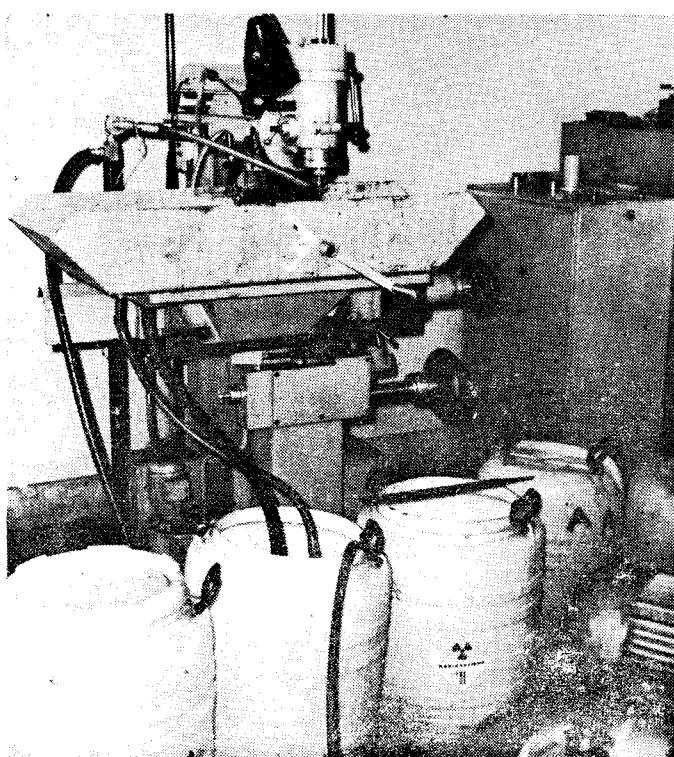
sa kojom se vrši dalja obrada. Obrada se prekida u trenutku postizanja kriterijuma zatupljenja, tj. kada se radioaktivnost alata smanji na veličinu:

$$A = A_0 \cdot e^{-kh_k^n}$$

REZULTATI ISPITIVANJA

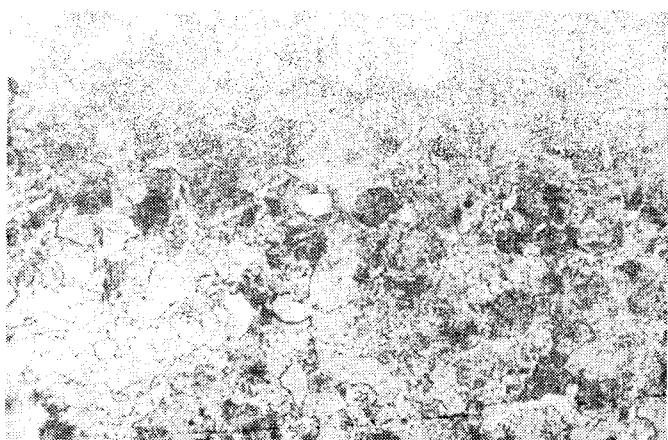
Ispitivanja su vršena vretenastim glodalom prečnika 12 mm JUS K.D2.090 proizvodnje JAL sa 4 zuba. Jedan zub je ozračen na dužini 10 mm i širini 0,6 mm.

Mašina na kojoj su vršena ispitivanja je glodalica sovjetske proizvodnje snage 1,5 kW. Na sl. 4. prikazan je izgled mašine.



Sl. 4. Gledalica na kojoj su vršena ispitivanja

Materijal predmeta obrade je Č.5421 u poboljšanom stanju termičke obrade. Na sl. 5. prikazana je struktura čelika, a u tabeli 1. mehaničke osobine i hemijski sastav.



Sl. 5. Struktura Č.5421

TABELA 1.

S	Hemijski sastav			Meh. osobine		
	Mn	Cr	Ni	σ_m kN/cm ²	σ_v kN/cm ²	HB
%	%	%	%			
0.18	0.50	1.95	1.90	76.8	63.6	228

Pri ispitivanjima je korišćeno sredstvo za hlađenje i podmazivanje SOL 42 koncentracije 6%. Protok SHP je u toku eksperimenta bio konstantan i iznosio je 1.5 l/min.

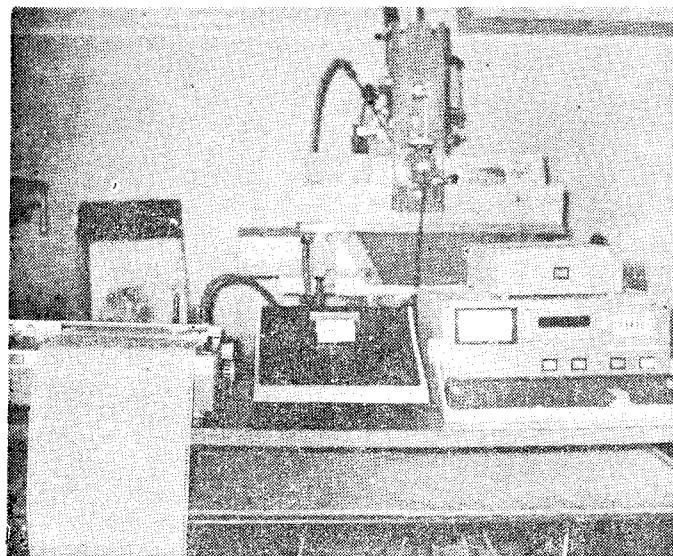
U toku eksperimenta varirana je samo brzina rezanja, dok su korak, dubina i širina rezanja bili konstantni i iznosili su:

$$s_t = 0,012 \text{ mm/z}, \quad \delta = 2 \text{ mm} \quad i \quad b = 10 \text{ mm}.$$

Ozračivanje reznog elementa je vršeno u ciklotronu (Birmingem) pod sledećim uslovima:

- | | |
|--|-----------------|
| <input type="checkbox"/> vrsta čestice: | protoni |
| <input type="checkbox"/> energija snopa: | 9 MeV |
| <input type="checkbox"/> struja ozračivanja: | 5 μA |
| <input type="checkbox"/> vreme ozračivanja: | 1 h |

Na reznom elementu je bombardovana površina dimenzija $10 \times 0,6$ mm. Merni instrumentarijum se sastoji iz detektora zračenja (sonde), brojačkog kompleta, štampača i pisača proizvodnje Reading (Engleska). Na sl. 6. prikazana je mašina sa mernim instrumentarijumom.



Sl. 6. Mašina sa mernim instrumentarijumom

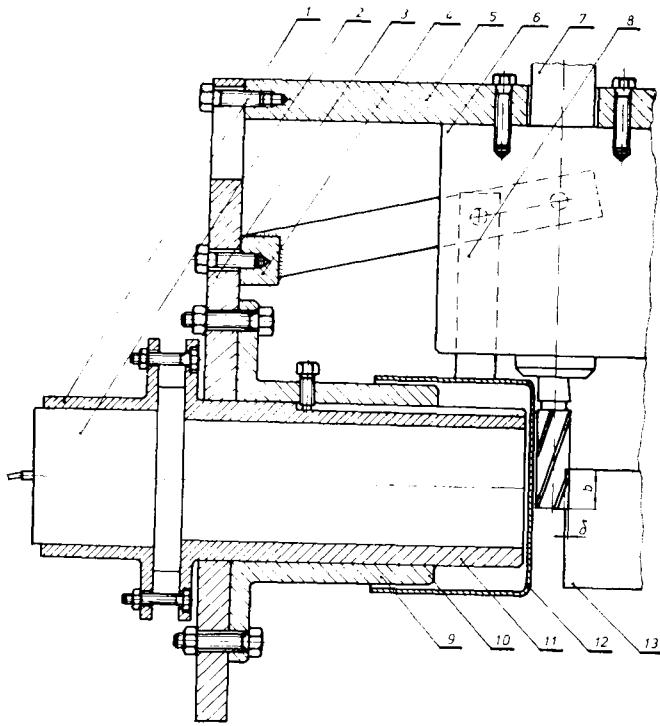
Sonda je pomoću pribora fiksirana za mašinu i može se pomeriti u tri nezavisna ortogonalna pravca. Na sl. 7. prikazan je sklopni crtež pribora sa sondom, kao i veza pribora sa mašinom. Pri izvođenju eksperimenata osa sonde je biha u pravcu sredine ozračenog dela glodalja, tj. 5 mm iznad vrha glodalja.

U cilju sagledavanja osetljivosti radioaktivne metode za adaptivno upravljanje kopirne glodalice varirane su tri brzine rezanja: $v_1 = 37,7$ m/min, $v_2 = 30,16$ m/min i $v_3 = 23,75$ m/min pri ostalim nepromjenjenim uslovima. Praćena je radioaktivnost alata pre ulaska u materijal, za vreme rezanja i posle rezanja. Kako je merenje radioaktivnosti vršeno za vreme rezanja, neophodno je bilo ustanoviti zavisnost promene radioaktivnosti od broja obrtaja glodalja i rastojanja detektora od ozračenog glodalja. Svi navedeni rezultati dobijeni su u digitalnom obliku preko štampača i analognom preko pisača.

Na osnovu podataka o veličini radioaktivnosti određene su otpornosti na habanje za dva slučaja: na osnovu merenja radioaktivnosti pre i posle rezanja (klasična radioaktivna metoda) i merenjem radioaktivnosti u toku obrade.

Opitne operacije su vršene do pune pohabanosti alata od 0,4 mm.

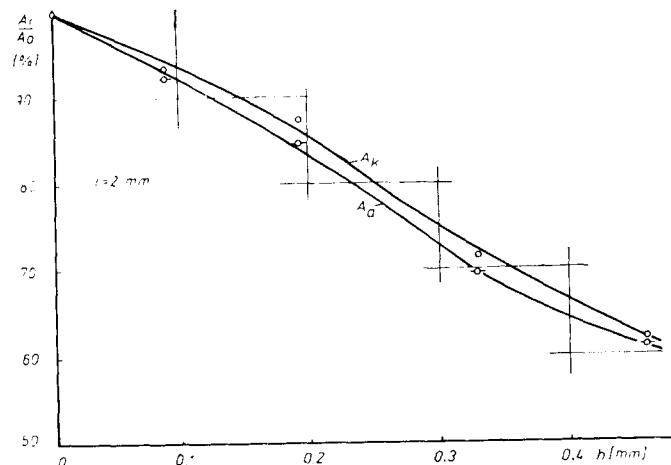
Kao što je ranije rečeno, osnova adaptivnog upravljanja je poznavanje veličine habanja alata i to po mogućству neprekidno za vreme obrade. Poznavajući vezu $A=f(h)$ može se u svakom trenutku odrediti $h=f^{-1}(A)$. Oblik veze



Sl. 7. Shema fiksiranja sonde za mašinu pomoću pribora

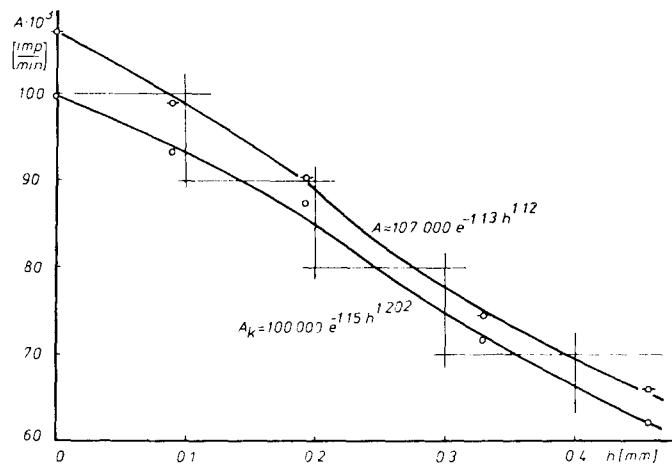
$A=f(h)$ zavisi od uslova ozračivanja i pri konstantnim uslovima ozračivanja dobijaju se približno iste vrednosti konstanti k i n u izrazu (3).

U toku izvođenja eksperimenta glodalje je skidano sa mašine četiri puta radi merenja habanja mikroskopom. Na osnovu podataka o veličini radioaktivnosti glodala u toku rezanja, kao i pre rezanja, i veličini habanja alata dobijene su krive date na sl. 8. Jedna kriva se odnosi na merenje radioaktivnosti (A_a) u toku obrade (što omogućuje ostva-



Sl. 8a.

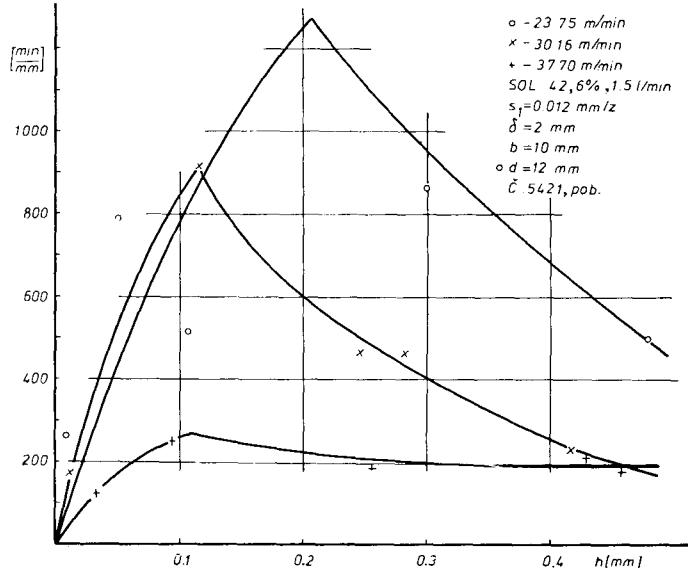
rivanje adaptivnog upravljanja). Druga kriva se odnosi na izmerenu radioaktivnost pre rezanja. Uporedjivanjem konstanti k i n vidi se da su približno jednake pa se sa dovoljnom tačnošću kriva $A_a = f(h)$ može zameniti sa $A_k = f(h)$.



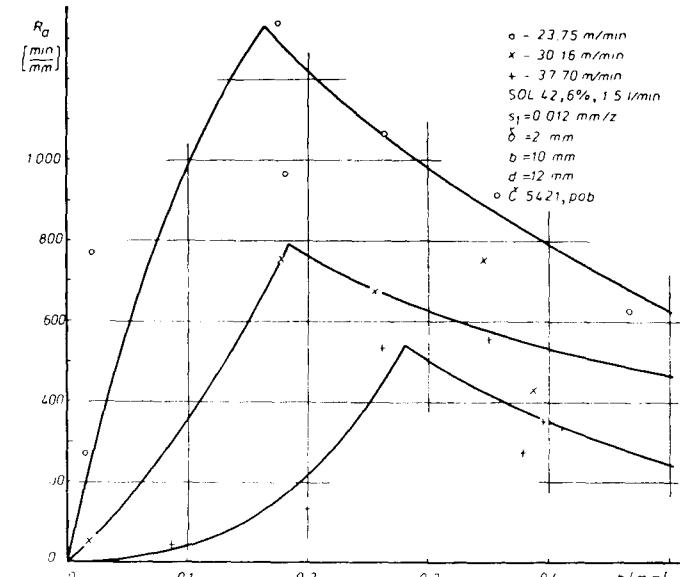
Sl. 8b.

Sl. 8. (a, b) Zavisnost radioaktivnosti od habanja merene za vreme obrade

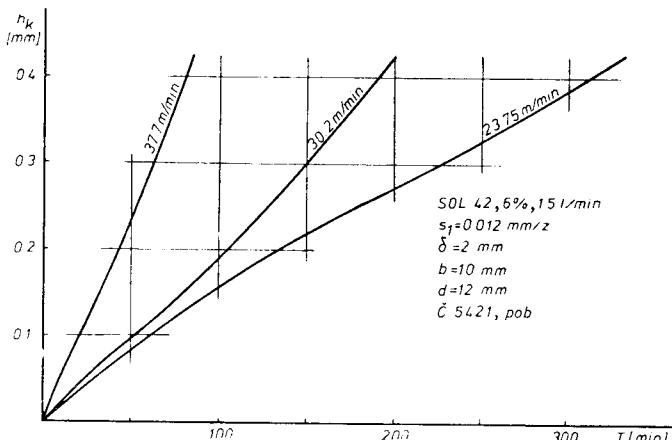
Prema opisanom postupku odredene su otpornosti na habanje u oba slučaja (sl. 9. i sl. 10.).



Sl. 9. Uticaj brzine rezanja na otpornost na habanje



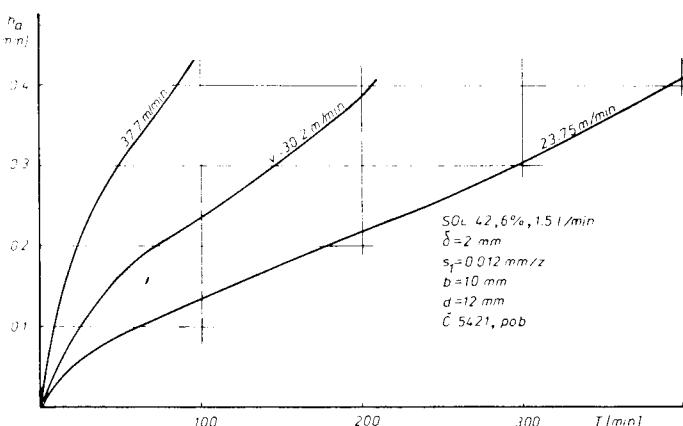
Sl. 10. Uticaj brzine rezanja na otpornost na habanje u toku obrade



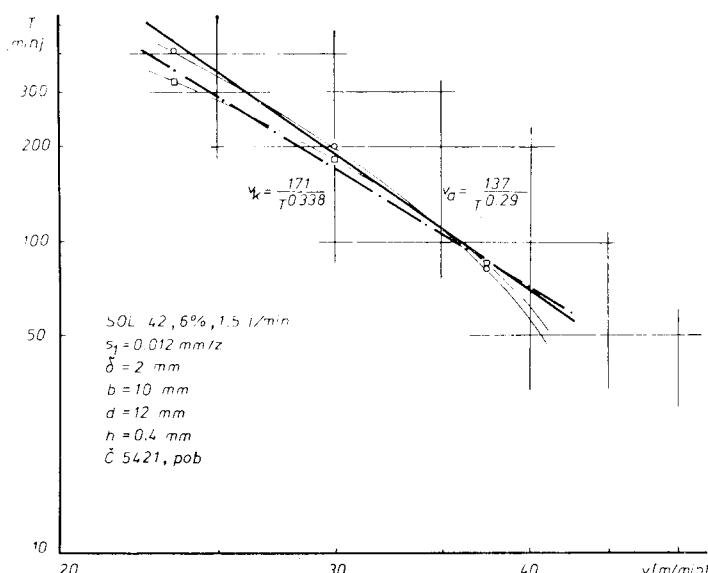
Sl. 11. Krive habanja dobijene radioaktivnom metodom

Nakon određivanja konstanti u proširenom izrazu za otpornost na habanje za tri brzine rezanja dobijene su integralnjem krive habanja. Na sl. 11. prikazane su krive habanja dobijene radioaktivnom metodom, a na sl. 12. krive habanja dobijene praćenjem radiokatavnosti alata u procesu rezanja.

Na osnovu izračunatih postojanosti za kriterijum zatpljenja $h=0,4$ mm i odgovarajućih brzina rezanja dobijen je T-v dijagram prikazan na sl. 13.



Sl. 12. Krive habanja dobijene praćenjem radioaktivnosti alata u procesu rezanja



Sl. 13. Veza brzine i postojanosti dobijena radioaktivnom metodom sa oba postupka merenja radioaktivnosti alata

Praćenje radioaktivnosti alata u procesu rezanja
Radioaktivna metoda

Za ekonomičnu postojanost glodala $T_e=32$ min. razlika brzine dobijenih preko obe metode iznosi $v_e=2,9$ m/min što je manje od 6%.

ZAKLJUČAK

Na osnovu napred navedenog može se dati sledeći zaključak:

1. Pri korišćenju radioaktivne metode mora se posebno pažnja posvetiti pravilnom izboru uslova ozračivanja u cilju postizanja veće osetljivosti pri praćenju habanja alata.

2. Na osnovu poznate zavisnosti $A=X(h)$ može se sa visokom tačnošću definisati otpornost na habanje, a preko nje i postojanost alata što omogućuje određivanje konstanti Cv u m u Taylorovom izrazu za brzinu rezanja. Na taj način se bilo koja promena uslova obrade manifestuje preko promene otpornosti na habanje, a time i ekonomične brzine rezanja.

3. Tačnost dobijanja ekonomične brzine rezanja je u dozvoljenim granicama (oko 5%).

LITERATURA

1. KLAUS ESSEL, Entwicklung einer Optimierregelung für das Drehen, Dissertation, Aachen 1972.
2. STÄFERLE Th., BELLMANN B.: Verschleissensoren für adaptive Regelungen bei der Drehbearbeitung, Werkstatt und Betrieb, 8/1972.
3. PEKLENIK J., Analysis of the adaptive control of manufacturing systems — a critical assessment, Forth international seminar of manufacturing system, Ljubljana, 1972.
4. IVKOVIĆ B.: Definisanje habanja višesecnih alata pomoću radioaktivnih izotopa, Monografija, Kragujevac, 1970.
5. ARSOVSKI S.: Tribološke karakteristike sredstava za hlađenje i podmazivanje pri obradi glodanjem.
6. ARSOVSKI S.: Analiza mogućnosti adaptivnog upravljanja alatnim mašinama na osnovu merenja intenziteta habanja reznih elemenata alata, Magistarски рад, Kragujevac, 1978.

Mr SLAVKO ARSOVSKI, dipl. inž.

asistent pripravnik Mašinskog fakulteta u Kragujevcu



Rođen 1952. godine u Kragujevcu. Diplomirao na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu 1975. godine. Magistrirao 1978. godine na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu.

Bavi se problematikom razvoja radioaktivne metode, ispitivanja sredstava za hlađenje i podmazivanje, adaptivnog upravljanja alatnih mašina.

M. STUPNIŠEK

Primjena skening mikroskopa i elektronskog mikroanalizatora u tribološkim istraživanjima

UVOD

Suvremeni israživački instrumenti, kao što su skening mikroskop (SEM) i elektronski mikroanalizator (EPMA), imaju široku primjenu kod ispitivanja materijala. Osnovni principi i tehniki ispitivanja opširno su opisani u literaturi [1 do 5]. Premda se radi o relativno skupim instrumentima, oni se sve više nabavljaju i koriste jer istraživačima daju veoma korisne informacije. Tako se i u Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, od 1976. godine koristi skening mikroskop i elektronski mikroanalizator.

Na području istraživanja materijala u literaturi su najčešće opisivani radovi o strukturološkim problemima, međutim, u posljednje vrijeme se navedeni instrumenti primjenjuju i na području tribologije. S nekoliko primjera bit će opisane eksperimentalne tehnike navedenih instrumenata, koje se mogu korisno primjeniti kod triboloških istraživanja. Opisani će biti samo osnovni principi tehnika, koje su inače opširno opisane u specijalističkoj literaturi za to područje. U označavaju se skraćeno odgovarajućim internacionalnim znakama. Njemjera članka je samo upoznavanje s mogućnostima primjene, zato su kod navedenih primjera izostavljeni podaci o vrstama i stanju materijala, kao i podaci o tribološkim uvjetima.

Kod triboloških primjera, uzorci za ispitivanje obično ne zahtijevaju posebnu pripremu. Ispitivati se mogu relativno veliki uzorci (do promjera 25 mm i visine 25 mm). Ako se žele ispitivati još veći uzorci bez razaranja, moguće je sa njih uzeti otisak (repliku), koji vjerodostojno predstavlja površinu uzorka. Električki nevodljive materijale potrebno je napariti tankim slojem ugljika, zlata ili nekog drugog kontaktног sredstva, tako da se zadrži kontura površine. To je slučaj kod nemetalnih i kompozitnih materijala.

Za sve eksperimentalne tehnike je način "pobuđivanja" i dobivanja slike uglavnom identičan. Elektronski snop, određenog napona (kV) i struje (A), skanira po dijelu površine uzorka (čini tzv. raster) i pri tome prouzrokuje cijeli niz pojava u atomima ispitivanog materijala. Primarni elektronski snop tako izbija elektrone iz atomskog omotača, zatim atomi apsorbiraju elektrone primarnog elektronskog snopa, a također i primarni elektronski snop pobuduje rentgensko zračenje (X-zrake) koje je karakteristično za svaki kemijski element. Sve te pojave registriraju posebni detektori pomoću kojih dobivamo elektronske slike stanja površinskog sloja materijala uzorka. Kod navedenih instrumenata najviše se koriste sljedeće eksperimentalne tehnike:

PRIMJERI

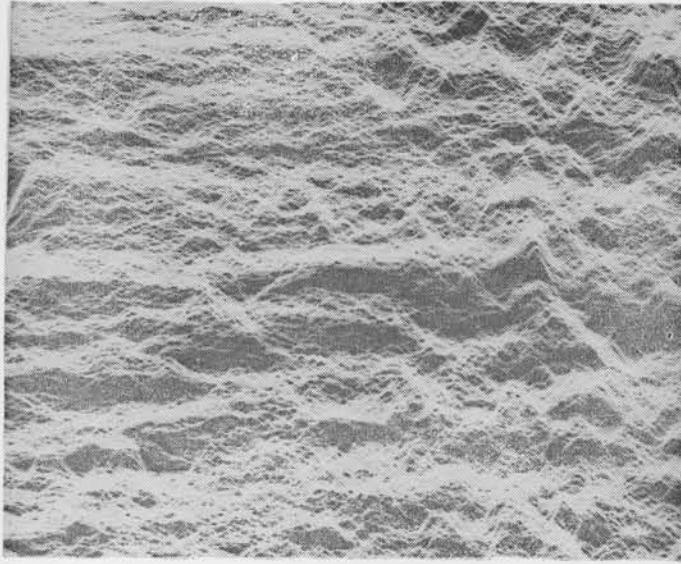
1. Slika sekundarnih elektrona (SEI, Secondary electron image)

Detektiraju se sekundarni elektroni izbijeni iz vanjske ljeske atoma i time dobivamo elektronske slike površine uzorka. Za izbijanje sekundarnih elektrona nije potrebna velika energija, pa elektronski snop ima mali promjer (zadno ispod 1 m). Na taj se način postiže dobra rezolucija slike i dubinska oština kod velikih povećanja.

Na slici 1 prikazan je primjer istrošenja na dijelu uzorka. Ovakvom tehnikom, uz odgovarajuća povećanja, moguće je pratiti pojave koje nastaju na površini uslijed trošenja, što je inače ograničeno kod primjene optičke mikroskopije. Naime, kod hraptavih površina nema mogućnosti odbora svjetla u optičkom refleksnom mikroskopu, dok stereo-mikroskopi imaju mogućnost relativno malih povećanja. Odgovarajućim moduliranjem elektronskog impulsa dobije se slika 2, koja na određeni način daje trodimenzionalni prikaz hraptosti površine. Dimenzije u osnovnoj ravnini su apsolutne, dok je prikaz dimenzija u okomitom smjeru relativan i može se potenciometrički podešavati.



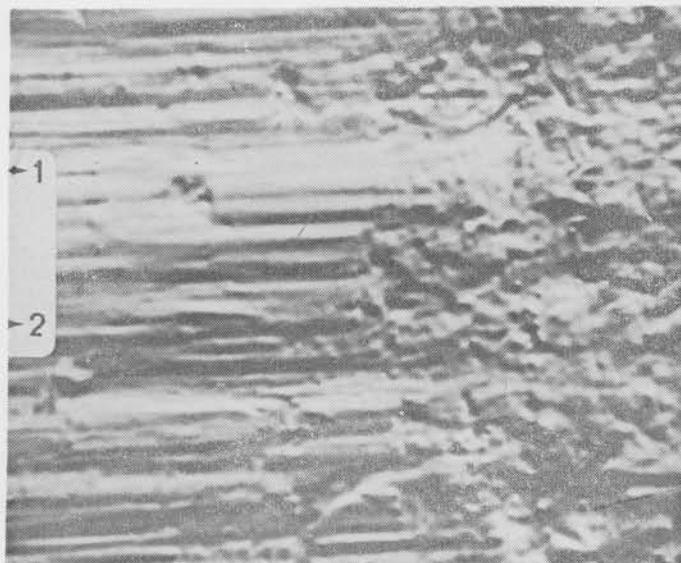
Sl. 1. — SEI 1000:1



Sl. 2. — SEI — Modulacija (ista površina kao i na slići 1)

2. Topografska slika (TOPO, Backscattered electron image — Topography)

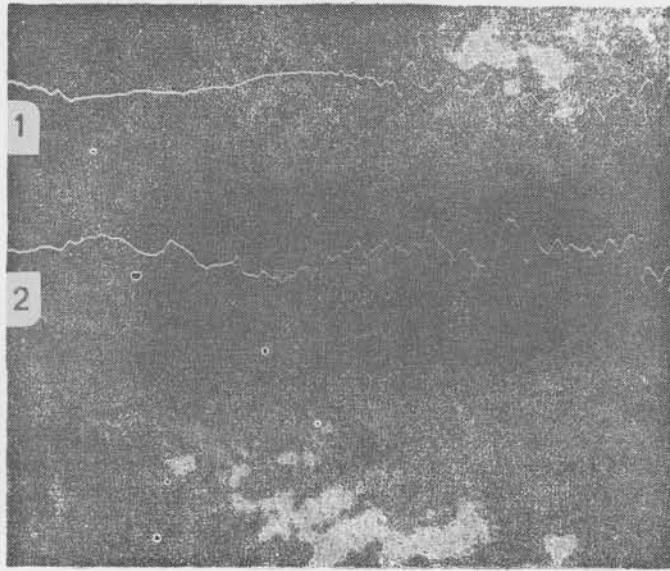
Kod većih energija primarnog elektronskog snopa od atoma uzorka odbija se određeni dio elektrona i tako dobivamo tzv. povratno odbijene elektrone. Posebni detektori ih registriraju, što uz odgovarajuće elektroničko pretvaranje daje topografsku sliku površine. Budući je promjer primarnog elektronskog snopa oko $1 \mu\text{m}$, ova tehnika daje slabiju rezoluciju slike nego tehnika SEI. Primjer korištenja ove tehnike prikazan je slikama 3, 4 i 5 na istom uzorku kao i tehnika SEI. Pomoću ovih prikazana je topografska slika, 2 topografska profila i modulacija topografske slike. Također i u ovom slučaju je prikaz visine reljefa relativan i može se potenciometrički podešavati.



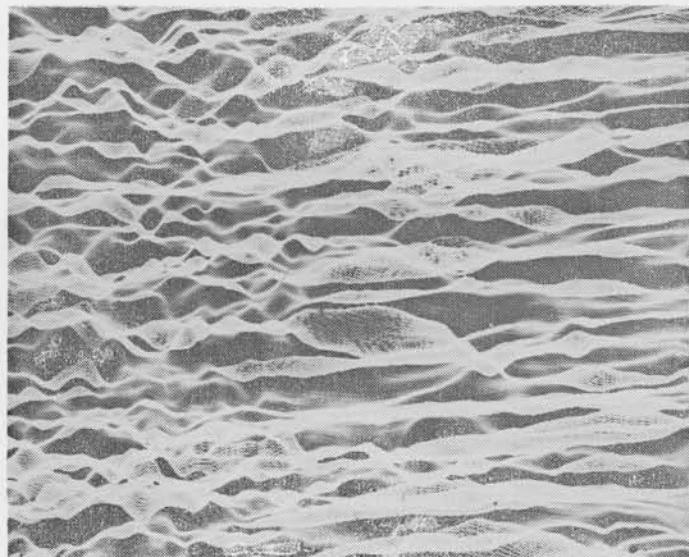
Sl. 3. — TOPO 1000:1

3. Kompozicijska slika (COMPO, Backscattered electron image — Composition)

Povratno odbijeni elektroni uz odgovarajuće elektroničko pretvaranje (različito od uvjeta dobivanja topografske slike) daju mogućnost uvida o rasporedu kemijskih elemenata koji se razlikuju po atomskom broju. Relativno teži elementi (s većim atomskim brojem) imaju u elektronskom



Sl. 4. — TOPO — profili (uvjeti kao slika 3)



Sl. 5. — TOPO — X — Modulacija (uvjeti kao slika 3)

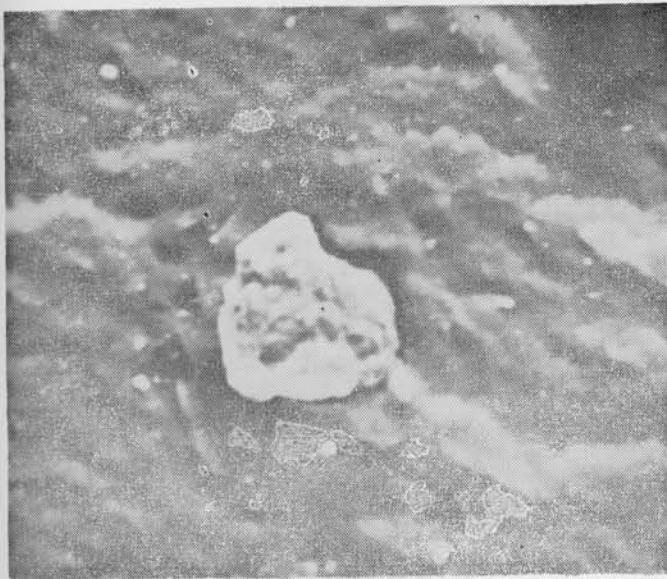
omotaču veći broj elektrona nego relativno lakši elementi. Zato se u tom slučaju detektira veći broj povratno odbijenih elektrona i na tom mjestu svjetlja mesta na slici. Na taj način se mogu utvrditi eventualne razlike u sastavu na površini uzorka ili registrirati dijelići materije različite od osnovnog materijala (slika 6).

4. Apsorbcionska slika (AEI, Absorption electron image)

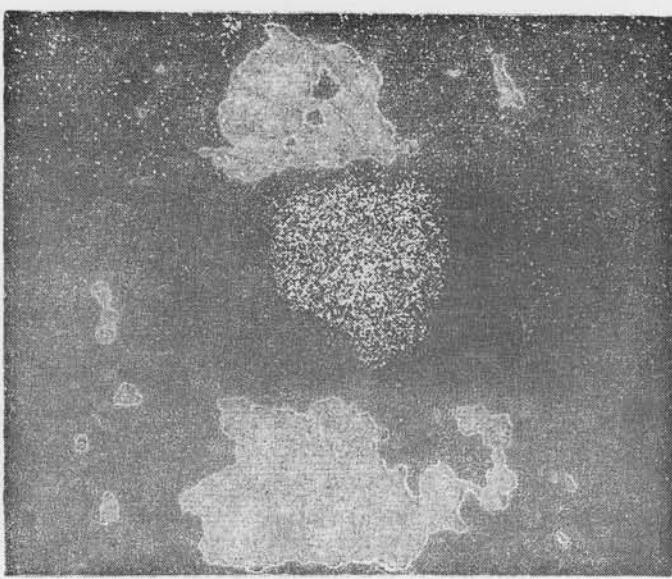
Suprotno prethodnoj tehnici, relativno teži elementi apsorbiraju manje elektrona od primarnog elektronskog snopa nego relativno lakši elementi. Na taj način dobivamo sliku koja prema intenzitetu svjetla odgovara negativu kompozicijske slike.

5. Rendgenska slika (X-ray image)

Primarni elektronski snop sa identičnim uvjetima primjene kao kod tehnika TOPO i COMPO, pobuduje rendgensko zračenje koje je karakteristično za svaki kemijski element. Ono se registruje posebnim detektorima (spektrometrima), čime se dobije slika rasporeda nekog kemijskog



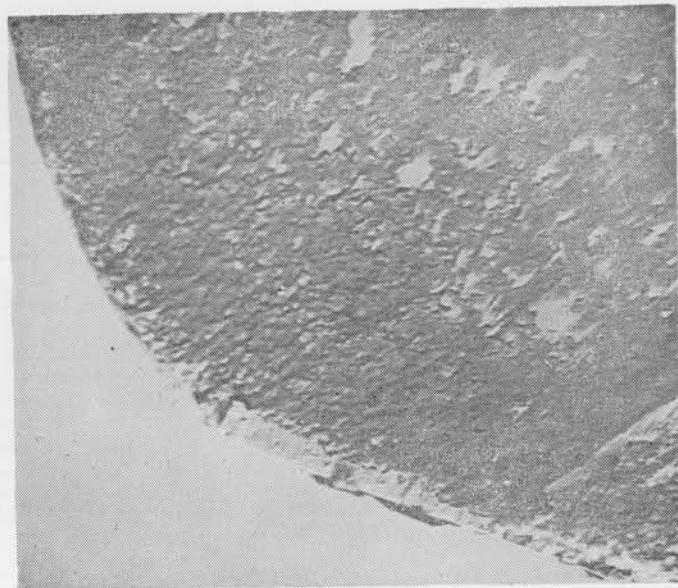
Sl. 6. — COMPO 1000:1



Sl. 7. — Rendgenska slika rasporeda magnezija (Mg—K α)
(isti uvjeti kao na slici 6)



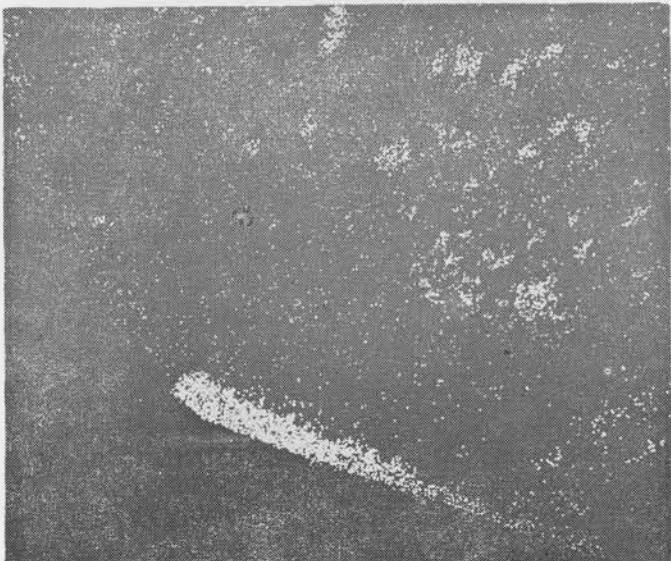
Sl. 8. — TOPO 300:1



Sl. 9. — COMPO 300:1

elementa u površinskom sloju ispitivanog uzorka. Zavisno o tipu mikroanalizatora, ovom tehnikom moguće je detektirati većinu kemijskih elemenata, zavisno o vrsti instrumenta a najčešće od atomskog broja 5 (bor, B) do atomskog broja 92 (uran, U). Rendgenske slike daju često korisne informacije jer daju uvid o prisutnosti i rasporedu pojedinih elemenata na habanim površinama. Na slikama 6 i 7 prikazan je primjer utvrđivanja porijekla čestica koje su uvjetovale abrazivno trošenje dok je na slikama 8, 9 i 10 primjer utvrđivanja rasporeda čestica obratka koje su naljepljene na reznu oštricu.

Sl. 10. — Rendgenska slika rasporeda željeza (Fe — K α)



ZAKLJUČAK

Navedenim primjerima prikazane su neke od mogućnosti primjene skening mikroskopa i elektronskog mikroanalizatora kod analize triboloških pojava.

Eksperimentalne tehnike SEI i TOPO daju uvid o stanicu površine u pogledu reljefa (hrapavosti). Radi malog promjera elektronskog snopa dobra je rezolucija slike, pa se kod profila i moduliranih slika registriraju znatno sitnije neravnine nego što ih registriraju uobičajeni instrumenti za mjerjenje hrapavosti, koji imaju vrh dijamantnog ticala promjera oko 10 μm. Premda navedeni prikaz hrapavosti nije apsolutan, ali može biti koristan jer ima veliku osjetljivost i mogućnost velikih povećanja. Prikaz je posebno interesantan jer daje na određeni način trodimenzionalnu sliku. Postoji također mogućnost dobivanja stereo slike. U budućim radovima nastojat će se kvantificirati prikaz hrapavosti.

Ostale navedene tehnike (COMPO, AEI i rendgenske slike) daju mogućnost utvrđivanja nehomogenosti i određivanje prisutnosti nekih elemenata u površinskom sloju ili eventualnih čestica na površini.

LITERATURA

1. GOLDSTEIN J. I., H. YAKOWITZ, Practical scanning electron microscopy, Plenum Press, New York, London 1976.
2. Mc KINLEY T. D., K. F. J. HEINRICH, D. B. WITTRY, The electron microprobe John Wiley & Sons, New York 1956.

3. MALISA H., Elektronenstrahl — Microanalyse, Springer Verlag, Wien, New York 1956.
4. CHRISTIAN H., SCHAAEBER O., Elektronenstrahlmikroanalysator. Prinzip und Anwendungsbeispiele, Härtetei—Tech. Mitt. 19 (1964) Nr. 4, s. 209—219.
5. CHRISTIAN H., SCHAAEBER O., Elektronenstrahlmikroanalysator II, Härtetei—Tech. Mitt. 21 (1966) nr. 3, s. 210—214.

Mr MLADEN STUPNIŠEK, dipl. inž.
znanstveni asistent Zavoda za materijale,
Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu



Roden 1939. godine u Zenici. Diplomirao i magistrišao na Metalurškom odjelu FNT u Ljubljani. Od 1964. do 1975. godine radio u tvornici alatnih strojeva »Prvomajska« u Zagrebu.

LOMT

nauka i istraživanje
u službi privrede

* minimizacija
troškova

* optimizacija
proizvodnje

za uspostavljanje saradnje
i sve informacije обратите
nam se dopisom ili telefonom

Laboratorijska obrada metala i tribologiju
Mašinskog fakulteta u Kragujevcu,
34 000 Kragujevac
Ul. Sestre Janjić br. 6