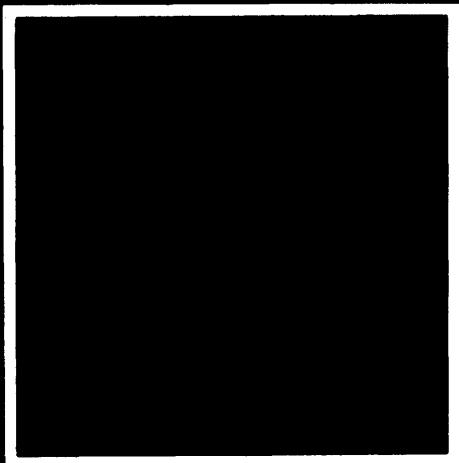
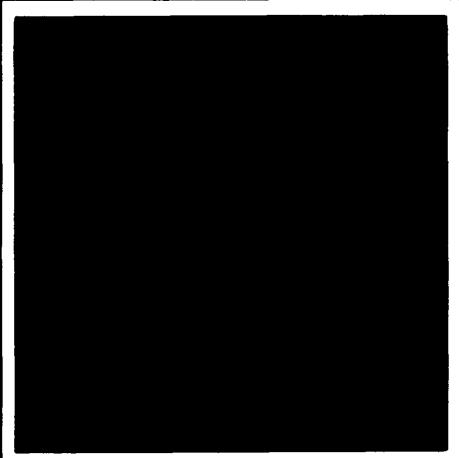
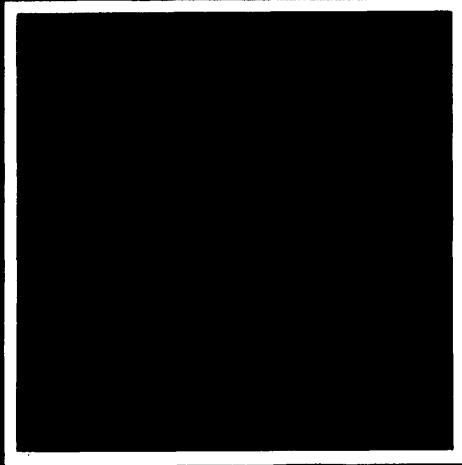
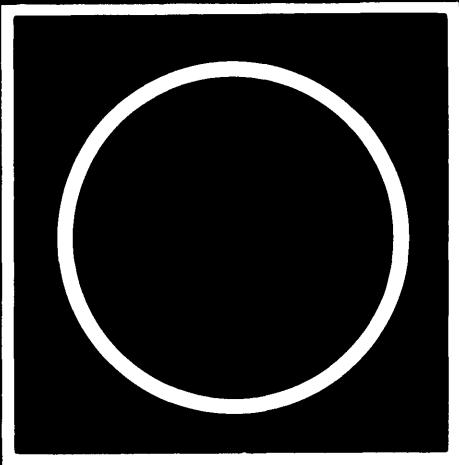
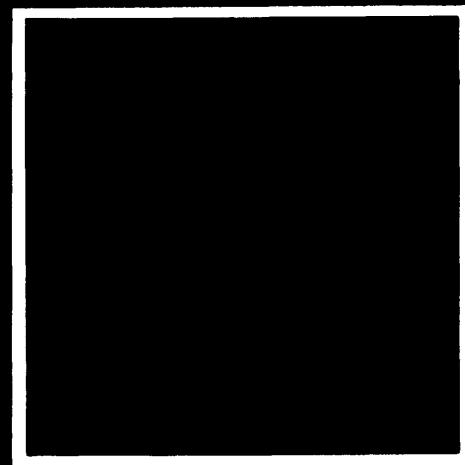


# tribologija u industriji

YU ISSN 03551-1642  
GODINA XI  
DECEMBAR 1989.

4



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

# tribologija u industriji

## sadržaj    contents    содержание

UVODNIK INTRODUCTION ПЕРЕДОВИЦА	B. IVKOVIĆ: Tribologija u BAM-u - Tribology at BAM - Трибология в БАМ-е . .....	99
ISTRAŽIVANJA RESEARCH ИССЛЕДОВАНИЯ	B. VASILJEVIĆ: Razmatranje mogućnosti identifikacije razvoja procesa habanja pomoću la- sera - Consideration of possibility of identification of wear process development by la- ser - Обсуждение возможности идентификации развития процесса изнашивания использо- ванием лазера .....	101
	D. RADONJIĆ: Uticaj režima rada motora SUS na proces habanja rukavca kolenastog vratila- Influence of the engine operating regimes on the wear process of the crankshaft jour- nals - Воздействие режима работы двигателя на процесс изнашивания шеек коленчатого вала .	108
	V. DJUKIĆ, B. NEDIĆ: Metode za određivanje athenzione čvrstoće prevlaka - Methods for determining adhesive coat strength - Методы определения сил сцепления покрытий .....	112
	N. NEDELJKOVIĆ, D. TRIFUNOVIĆ, M. BOŽIKOVIĆ: Primjena matematičke simpleks metode kod istraživanja optimalnih osobina sinterovanih frikcionih materijala na osnovi bakra - Application of mathematical simplex method in search of optimum characteristics of sintered frictional materials based on copper - Применение математического метода сим- плекс при исследовании оптимальных свойств порошкообразных фрикционных материалов на основании меди .....	116
NOVOSTI NEWS ИЗВЕСТИЯ	Zlatna medalja za tribologiju 1989. god. .....	120
KNJIGE I ČASOPISI BOOKS AND JOURNALS КНИГИ И ЖУРНАЛЫ	.....	122
NAUČNI SKUPOV SCIENTIFIC MEETINGS НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ	.....	124
REZIMEA ABSTRACTS РЕЗЮМЕ	.....	127

B. IVKOVIĆ

## Tribologija u BAM-u

U aprilu ove godine izšao je iz štampe poseban broj časopisa TRIBOLOGY INTERNATIONAL posvećen tribološkim istraživanjima u Federalnom institutu za istraživanja i ispitivanja u oblasti materijala (BAM), Zapadna Nemačka. U uvodnom delu H. Czichos i K. H. Häbig prezentirali su javnosti kratak istorijat razvoja ovog Instituta i ukazali na osnovne istraživačke pravce koji se u njemu realizuju u Odeljenju za Reologiju i Tribologiju (Rheology and Tribology Division). Ovaj uvodnik posvećen je informacijama o istraživanjima u ovom značajnom Institutu iz oblasti tribologije kako bi i čitaoci našeg časopisa koji ne prate časopis Tribology International mogli da budu upoznati o njemu u određenoj meri.

BAM je u osnovi, danas, državni Institut za nauku o materijalima, kontrolu kvaliteta i zaštitu na radu (safety engineering). Ovaj Institut ima, međutim, veliku tradiciju. Prvi put osnovan je 1870. godine za "mehaničko-tehnička ispitivanja" i to od strane Ministarstva za trgovinu, komercijalu i narodne poslove Pruske. Kasnije je menjao svoje ime više puta udružujući se sa drugim institutima (1304, 1919 i 1945) da bi danas dobio ime Federalni Institut za istraživanja i ispitivanja u oblasti materijala (Federal Institute for Materials Researches and Testing) sa skraćenim nazivom BAM.

U 50-tim godinama ovog veka istraživanja u ovom Institutu koja su bila u vezi sa tribološkom problematikom odnosila su se na istraživanja ponašanja Newton-ovih i drugih fluida i trenja i habanja pod različitim uslovima podmazivanja. Takođe su vršena i istraživanja reoloških ponašanja mineralnih ulja sa polimerima i to u kliznim ležištima. Krajem 50-tih godina pripremljen je detaljan program istraživanja u oblasti habanja, trenja i podmazivanja zajedno sa odgovarajućim katedrama Tehničkog univerziteta u Berlinu i prezentiran odgovarajućim državnim institucijama. U 60-tim godinama ovaj program finansiran je od strane Nemačke Fondacije za istraživanje (German Researches Foundation), što je omogućilo da se u BAM-u poveća broj istraživača u ovoj oblasti i obezbedi odgovarajuća oprema i instrumentacija za obavljanje istraživanja.

Odeljenje za Reologiju i Tribologiju na čijem se čelu danas nalazi prof. Dr H. H. Häbig ima četiri laborato-

rije i to:

- Laboratorijska reologija tečnosti i viskozimetrija,
- Laboratorijska trenaža čvrstih tela i "fretting"
- Laboratorijska maziva i podmazivanje i tribohemiju
- Laboratorijska ispitivanja trenja i habanja i tribofiziku

Pored ovih laboratorijskih u okviru ovog Odeljenja organizovan je i poseban tribološki dokumentacioni centar.

Broj zaposlenih u ovom Odeljenju kreće se oko 30. Među njima je 18 istraživača različitih profila. Odeljenje saraduje i sa drugim sektorima u BAM-u a posebno sa sektorom za tehnologiju površina.

U uvodnom tekstu prezentacije tribologije u BAM-u istaknuto je 15 projekata koji su prethodnih 20 godina realizovani u BAM-u. Navodi se nekoliko naslova samo da bi se ukazalo na svu širinu bavljenja tribologijom u ovoj značajnoj naučno-istraživačkoj instituciji. To su:

- Korelacija između atezije pri trenju kotrljanja i elektronske strukture metala.
- Trenje i habanje čistih metala u vakumu i različitim pritiscima okoline (plastična deformacija, tribohemiske reakcije i sl.).
- Termoplastični polimeri i korelacijske između habanja i karakteristika materijala (površinska energija i sl.).
- Korelacija između tvrdoće materijala i habanja.
- Absorpcija aditiva ulja za podmazivanje na metalnim i keramičkim površinama i njen uticaj na trenje i habanje.
- Uticaj aditiva ulja za podmazivanje na pojavu "pittinga" kod kotrljajućih ležajeva.
- Degradacija sredstava za hladjenje i podmazivanje pri obradi metala mikroorganizmima.
- Nove metode za reološka ispitivanja motornih ulja.
- itd.

Sadašnja i buduća istraživanja u BAM-u u oblasti tribologije usmerena su na istraživanja i ispitivanja svih vrsta inžinjerskih materijala metala i legura, prevlaka, polimera, keramike i kompozita u različitim usl-

ovima podmazivanja i u uslovima suhog trenja.

Posebnu pažnju privlači informacija da je dokumentacioni centar Odeljenja za Reologiju i Tribologiju organizovan tako da ima dva bloka informacije. Prvi se odnosi na tribologiju odnosno na trenje, habanje i podmazivanje a drugi blok sadrži informacije o reologiji. Oba bloka informacija odnose se na reference iz svetske literaturе. Očekuje se da će odgovarajuće baze podataka biti uključene i u internacionalni tribološki informacioni sistem koji je u razvoju.

Ukupan broj referenci koji je krajem prošle godine egzistirao u tribološkom dokumentacionom centru iznosio je oko 65.000. Polovina od ovih referenci odnosi se na radeve štampane na engleskom jeziku a druga polovina je iz istočnih zemalja i iz publikacija koje se štampaju na nemačkom i francuskom jeziku. Prosečno 5.000 novih radova iz tribologije se publikuje godišnje. Tribološki dokumentacioni centar svaka četiri meseca povećava broj referenci u svojim bazama podataka. Interesantno je za buduće korisnike i sagledavanje sadržaja podataka o svakoj referenci u ovom Centru. Informacija o svakom radu sadrži po pravilu:

- Naslov na engleskom jeziku a za radeve štampane na drugim jezicima i originalan tekst naslova (samo za radeve štampane na nemačkom i francuskom jeziku).
- Imena i prezimena autora ili institucije koja objavljuje rad.

- Izvor odnosno vrsta publikacije koja je štampana (časopis, izdavačka kuća, godišnji izveštaj, zbornik radova i sl.).
- Vrsta rada (da li je knjiga, časopis ili članak, saopštenje na konferenciji, izveštaj, disertacija, standard i sl.).
- Abstrakt na engleskom jeziku.
- Klasifikaciju: kod i tekst.
- Objasnjenje termina.

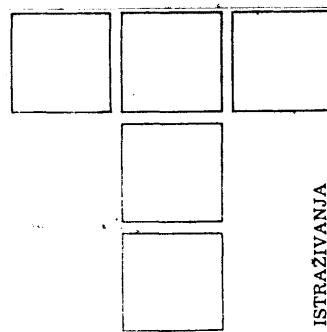
Na osnovu ovih osnovnih informacija o svakoj referenci moguće je posredstvom odgovarajućih institucija (biblioteka i dr.) doći i do kopije rada ili do pozamlijivanja bilo koje vrste publikacije (knjiga, disertacija i sl.).

U odeljku ovog i prošlog broja časopisa u kome se daju prikazi knjiga i časopisa dat je i prevod abstrakta rada kojima se saopštavaju rezultati savremenih istraživanja u laboratorijama Odeljenja za Reologiju i Tribologiju u BAM-u, a objavljeni su u ovom posebnom broju časopisa TRIBOLOGY INTERNATIONAL.

**Svim našim  
čitaocima  
želimo  
srećnu i uspešnu  
1990. godinu**

**Redakcija časopisa  
TRIBOLOGIJA U INDUSTRIJI**

# Razmatranje mogućnosti identifikacije razvoja procesa habanja pomoću lasera



ISTRAŽIVANJA

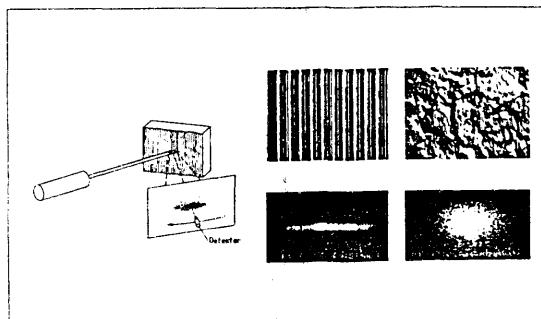
## 1. UVOD

Potreba za savremenim metodama identifikacije razvoja procesa habanja uslovjava pojačane napore koji se danas preduzimaju u cilju pronađenja i usavršavanja metoda i postupaka za što preciznije, brže i jednostavnije određivanje neophodnih podataka. Imajući u vidu nivo razvijenosti laserske tehnike i veoma intenzivna istraživanja u ovoj oblasti na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu razvijen je Laserski merni sistem sa ciljem da se eksperimentalno proveri mogućnost primene laserskih mernih postupaka u identifikaciji razvoja procesa habanja.

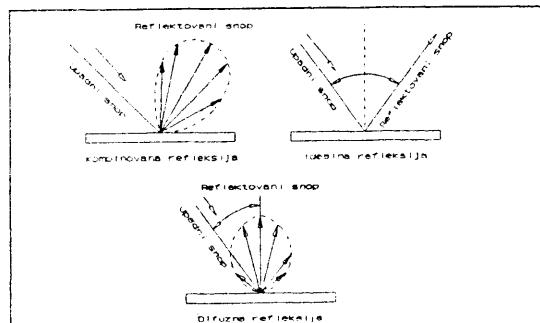
Primena lasera u analizi inženjerskih površina je još uvek limitirana raspoloživom mernom tehnikom. Jedan od ograničavajućih faktora je i nedovoljan broj eksperimentalnih i eksploracionih podataka o stvarnim radnim karakteristikama laserskih mernih postupaka. Refleksija laserskog snopa sa realnih inženjerskih površina, koje poseduju veoma različitu strukturu i kvalitet, je jako složena. Šira primena laserskih mernih postupaka zahteva još dosta, pre svega eksperimentalnih istraživanja, koja će proširiti područja primene i olakšati izbor mernih principa za konkretnе proizvodne i istraživačke aplikacije.

## 2. TEORIJSKE OSNOVE I FIZIČKA OGRANIČENJA

Kada uzani laserski snop padne na "grubu" inženjersku površinu odbija se od mikroneravnina raspršujući se oko odbojnog ugla  $\theta$ , sl. 1. Najčešći rezultat je kombinacija idealne (Snell-ov zakon) i difuzne refleksije (Lambert-ov zakon), sl. 2.



Slika 1.



Slika 2.

Učešće navedenih faza zavisi od odnosa između hrapavosti površine i talasne dužine laserskog snopa, tako da jedna ista površina može za različite talasne dužine laserskog snopa izgledati potpuno drugačije. Osim toga, različiti obradni procesi i tehnologije, kao i ostvareni kvalitet obradjene površine uslovjavaju različite raspodele intenzitete refleksije. Zavisnost je veoma komplikovana i složena gotovo isto kao i topografija realnih inženjerskih površina, tako da egzaktne i opšte prihvaćene teorije nema. Izvesno slaganje teorije i rezultata eksperimentalnih istraživanja postoji samo u oblasti veoma finih površina sa sinusoidalnim profilom i hrapavošću mnogo manjom od talasne dužine laserskog snopa i kod površina sa hrapavošću znatno većom od talasne dužine laserskog snopa. U literaturi iz ove oblasti dominiraju dva teorijska pristupa. Za "fino" obradjene površine koristi se difrakcioni model, a za "grube" uprošćeni model zasnovan na zamjeni realne površine sa nizom konačnih idealno glatkih segmenata.

Difrakcioni model apliciran na idealiziranoj inženjerskoj površini sa visinom neravnina  $h$  i korakom neravnina  $d$ , prikazan je na sl. 3.

Nakon odbijanja ravnog paralelnog laserskog snopa sa graničnim zracima  $s_1$  i  $s_2$  zraci pokazuju putnu razliku  $\Delta r$ :

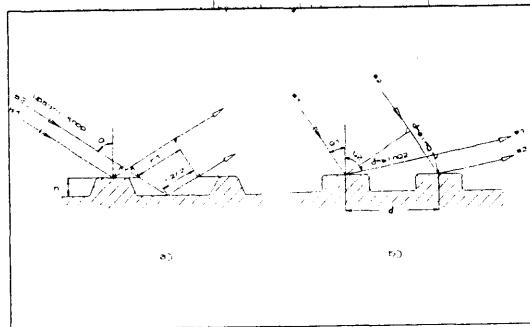
$$\Delta r = 2 \cdot h \cdot \cos \theta \quad (1)$$

Na osnovu poznate zavisnosti između putne i fazne razlike:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \Delta r \quad (2)$$

Zamenom izračunate putne razlike, (izraz (1) u odnosu na (2)) dobijamo odgovarajuću faznu razliku:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi \cdot h \cdot \cos\theta}{\lambda} \quad (3)$$



Sl. 3.

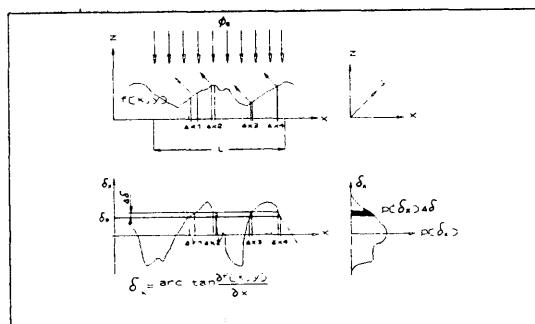
Ako je fazna razlika mala ne dolazi do značajnijih promena, međutim, kada fazna razlika dostigne vrednost  $\Delta\varphi = \pi$  dolazi do interference i poništavanja talasa. Kako usled poništavanja nema toka energije u tom pravcu on mora biti alociran u drugim pravcima. Tako pri faznoj razlici  $\Delta\varphi = \pi$  površina izgleda kao "gruba", a pri  $\Delta\varphi = 0$  kao "glatka" jer je refleksija idealna. Ako se sredina između dva ekstremna slučaja,  $\Delta\varphi = \pi$  i  $\Delta\varphi = 0$ , odnosno  $\Delta\varphi = \pi/2$ , usvoji kao kriterijum za klasificiranje površina i zameni u jednačini (3) dobija se "Rayleigh-tov kriterijum":

$$h < \frac{\lambda}{8 \cdot \cos\theta} \quad (4)$$

Za slučaj normalnog upadnog ugla nejednačina (4) dobija još jednostavniji oblik:

$$h < \frac{\lambda}{8} \quad (5)$$

U literaturi se srećemo i sa drugim kriterijumima za graničnu faznu razliku  $\Delta\varphi = \pi/4$  odnosno  $\Delta\varphi = \pi/8$  (Norton, Kerr, itd.), međutim, to samo utiče na imenilac u izrazu (4) koji dobija nove vrednosti 16 odnosno 32.



Sl. 4.

Model zasnovan na zameni realne površine sa nizom idealno glatkih i ravnih segmentata se najčešće koristi kod analize relativno grubih površina, sl. 4 [8].

Zakoni idealne refleksije se primenjuju na svaki od segmentata pri čemu se uspostavlja čvrsta korelacija između raspodele ugla nagiba profila i intenziteta reflektovanog laserskog snopa  $I(Q_2)$ . Model se pojednostavljuje svodenjem na dvodimenzionalni, time što se vrši zanemarivanje promena na površini u pravcu  $y$ -ose. Ukupni svetlosni fluks  $\phi_e$  koji pada na čitavu oblast dužine  $x=1$ , se razlaže na delove koji padaju na elementarne površine dužine  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) sa uglom nagiba  $\delta_0 \leq \delta_i + \Delta\delta$ . Elementarni svetlosni fluks koji pada na elementarnu površinu se izračunava na osnovu sledeće zavisnosti

$$\Delta\phi_e = \frac{\phi_e}{L} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (6)$$

Uticaj nagiba profila se izražava preko funkcije  $p(\delta)$ :

$$p(\delta) = \lim_{\substack{\Delta\delta \rightarrow 0 \\ L \rightarrow \infty}} \frac{1}{L} \cdot \frac{\Sigma \Delta x_i}{\Delta\delta} \quad (7)$$

Zanemarivanjem graničnih uslova jednačina se svodi na:

$$p(\delta)\Delta\delta = \frac{1}{L} \cdot \Sigma \Delta x_i \quad (8)$$

Uvodjenjem jednačine (8) u jednačinu (6) dobija se sledeća zavisnost:

$$\Delta\phi_e = \phi_e \cdot p(\delta) \cdot \Delta\delta \quad (9)$$

Reflektovani svetlosni fluks koji pada na segment sa uglom  $\theta_2 \leq \theta \leq \theta_2 + \Delta\theta_2$  je:

$$\Delta\phi_r = R \cdot \Delta\phi_e \quad (10)$$

gde je:  $R$  - koeficijent refleksije materijala. Ukoliko se jednačina (9) izrazi u diferencijalnom obliku korišćenjem veze  $d\theta_2 = 2\Delta\theta$  dobija se sledeća zavisnost:

$$\frac{d\phi_r}{d\theta_2} = \frac{1}{2} \cdot \phi_e \cdot R \cdot p(\delta) \quad (11)$$

Uvodjenjem konstanti:

$$K = 1/2\phi_e \cdot R \cdot i$$

$$I(\varphi) = d\phi_r / d\theta_2$$

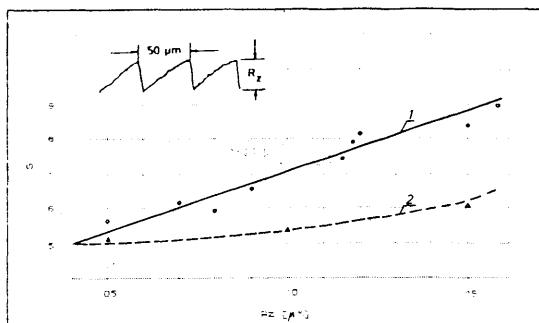
dolazi se do izraza:

$$I(\varphi) = K \cdot p(\delta) \quad (12)$$

Izloženi model je eksperimentalno proverio Brodmann [8] testirajući devet uzoraka različite hrapavosti ( $0.05 \mu\text{m} \leq R_z \leq 0.16 \mu\text{m}$ ). Rezultati istraživanja, prikazani na sl. 5, pokazuju značajne razlike između izmenjenog intenziteta refleksije, kriva 1 i vrednosti I izračunate na osnovu jednačine (12), kriva 2.

Neophodno je napomenuti da je "Rayleigh-tov kriterijum", iako baziran na jednostavnoj talasnoj teoriji uz korišćenje samo jednog visinskog parametra hrapavos-

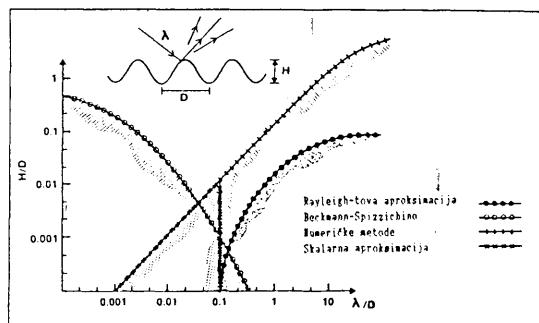
ti h, do danas najčešće korišćen kriterijum za ocenu po- našanja inženjerskih površina pri optičkim ispitivanjima.



Sl. 5.

Osim "Rayleigh-tovog kriterijuma" u literaturi se srećemo sa čitavim nizom teorija (Beckmann-Sipzzichino [1], Goodman [4], Meecham [9], itd.), koje manje ili više uspešno tumače složenu refleksiju sa realnih "grubih" sinusoidalnih površina. Međutim, realne inženjerske površine nemaju samo sinusoidalni profil. Struktura inženjerskih površina je znatno složenija od one uključene u teorijska razmatranja, tako da su to veoma značajne aproksimacije koje rezultiraju u dosta velikom neslaganju između teorije i eksperimenta.

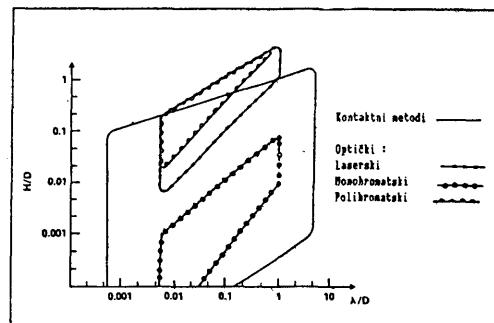
Teague [3] je analizirao primenljivost pojedinih teorija i utvrdio da još uvek ne postoji opšti prihvatljivi teorijski model koji bi dao zadovoljavajuće slaganje sa eksperimentalnim rezultatima.



Sl. 6.

Na sl. 6. su prikazana područja aproksimativne primenljivosti najznačajnijih teorijskih modela. Koordinatni sistem koji se koristi sadrži topografske karakteristike inženjerskih površina  $H/D$  (nagib profila), korak neravnina  $D$ , kao i talasnu dužinu laserskog izvora  $\lambda$ . Navedeni parametri se najčešće koriste u literaturi pri određivanju validnosti teorijskih modela i eksperimentalnih tehniki.

Odredjene tehnike i metode za analizu inženjerskih površina imaju takođe svoja ograničenja i područja primene. Na sl. 7. su prikazana područja primenljivosti najznačajnijih tehnika za analizu realnih inženjerskih površina. Najšire područje primene imaju kontaktni metodi, što je i normalno imajući u vidu sistem rada i nivo razvijenosti uređaja. Laserski merni metodi takođe pokrivaju dosta široku



Sl. 7.

oblast koja uključuje područje najznačajnije sa praktičnog inženjerskog aspekta. Može se reći da je primenljivost laserskih metoda teoretski, eksperimentalno i praktično neosporna i da je to područje koje pruža široke mogućnosti za istraživanja.

### 3. Konstrukcija laserskog mernog sistema

Laserski metodi i tehnike za analizu i merenje osnovnih parametara obradnih procesa predstavljaju područje veoma intenzivnog istraživanja u svetu. U poslednjih deset godina je razvijen čitav niz laserskih mernih sistema od kojih se neki već komercijalno plasiraju na tržištu.

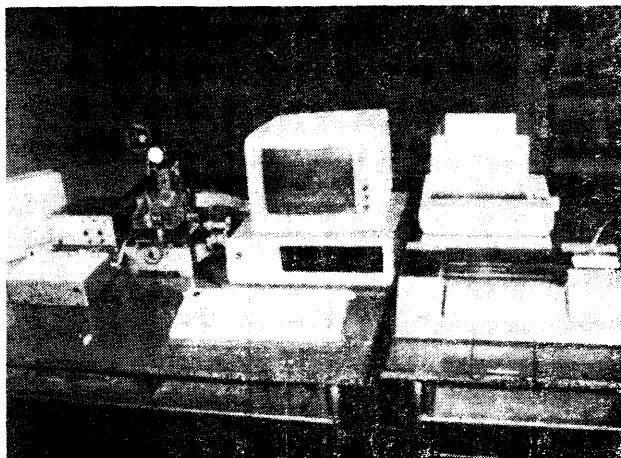
Najpoznatiji su optički sistemi firmi Wyko, Kosaka i Rodenstock. Svima je zajedničko korišćenje uzanog laserskog snopa usmerenog na određenu oblast ispitivane površine. Usled specifičnih zahteva koji se postavljaju u identifikaciji razvoja procesa habanja pristupilo se konstrukciji i izradi originalnog laserskog mernog sistema sa odgovarajućom programskom podrškom.

Izrada laserskog mernog sistema za planirane aplikacije je podrazumevala projektovanje, izradu, testiranje i baždarenje složenog mernog sistema koji se sastoji od laserskog izvora, servo sistema za dinamičko fokusiranje, detektora, pratećih elektronskih komponenti (napajanje, pojačanje, filtriranje, itd.) i mehaničkog dela za precizno vodjenje i pozicioniranje. Primena računara zahteva da se razvije i odgovarajući softver za upravljanje eksperimentom, akviziciju signala, analizu i prikaz rezultata merenja, itd. Celokupno istraživanje je bazirano na primeni najsavremenijih mernih postupaka u oblasti laserske tehnike i korišćenju najnovijih saznanja iz primene računara u eksperimentalnim istraživanjima.

Laserski merni sistem, prikazan fotografijom na sl. 8, obuhvata sledeće komponente:

1. Laserski čitač,
2. Sistem za pomeranje,
3. Univerzalni alatni mikroskop,
4. Elektronski upravljački deo,
5. Ispravljač za napajanje,
6. "Tektronix" osciloskop T 422,

7. "Burr-Brown" A/D konvertor PCI 2000,
8. "IBM PC" računar,
9. Ploter "Hewlett Packard" - 7475A i
10. Printer "Epson" - LX-800.



Sl. 8.

Pored navedenih elemenata laserskog mernog sistema pri uporedjivanju rezultata merenja i baždarenju korišćeni su i uređaj za analizu i merenje mikrogeometrije površina "Talysurf"-6, univerzalni alatni mikroskop i komparatori.

Za akviziciju rezultata merenja je korišćen računar IBM PC koji je osim standardnih perifernih jedinica bio opremljen i periferijom za akviziciju analognih i digitalnih signala.

Konstrukcija obezbeđuje upravljanje i rad u tri osnovna sistema:

I \* Sa povratnom spregom i automatskim fokusiranjem. Izlazni signal predstavlja intenzitet reflektovanog laserskog snopa sa površine koja se analizira. Automatsko fokusiranje se ostvaruje brzom povratnom spregom posredstvom kalema i stalnog magneta na kome je pričvršćeno sočivo. U ovom modu je moguć rad sa veoma grubim površinama i širokom mernom opsegu od  $\pm 0.5$  mm. Nedostatak je limitirana brzina merenja prouzrokovana inercijom mehaničkih komponenti sistema za automatsko fokusiranje.

II \* Bez povratne sprege i pomeranja sočiva (nakon završenog fokusiranja na površini koja se ispituje). Izlazni signal takođe predstavlja intenzitet reflektovanog laserskog snopa. Kako nema povratne sprege i inercije pokretnih delova moguće je veoma brzo očitavanje sa frekvencom do 1 kHz. Nedostatak je nizak opseg merenja od samo  $\pm 0.1$  mm limitiran dubinom fokusa i nešto značajniji uticaj nagiba profila. Ukoliko se ne zahteva visoka vertikalna rezolucija moguće su i aplikacije na grubljim inženjerskim površinama i merenje profila pohabanog sloja.

III \* Praćenje signala za automatsko fokusiranje. Prati se signal koji upravlja automatskim fokusiranjem i određuje položaj sočiva u odnosu na ispitivanu površinu. Na taj način moguće je eliminisati uticaj stepena refleksije i nagiba na rezultate merenja, ali uz znatno sporije očitavanje. In

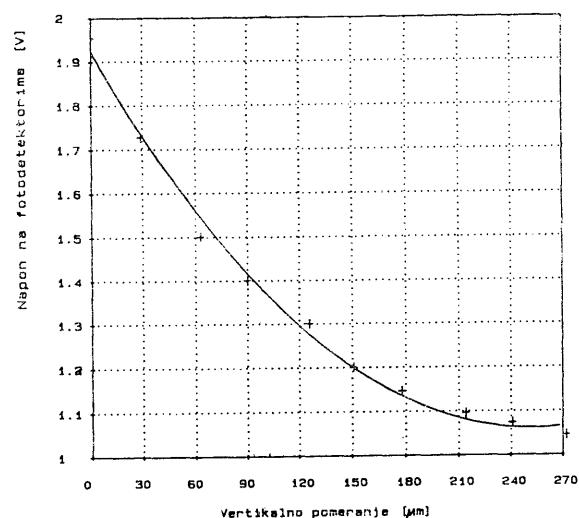
nje. Inercija mehaničkog dela sistema za automatsko fokusiranje ograničava frekvencu očitavanja na 30-40 Hz. Ovaj sistem rada je veoma pogodan za merenje dužina.

Kako je laserski merni sistem projektovan i izradjen u sopstvenoj režiji bilo je neophodno izvršiti detaljno testiranje ponašanja i odziva pojedinih komponenti kao i baždarenje kompletног mernog lanca u sprezi sa računaram. Preliminarna ispitivanja IMS, literaturni podaci i prateće tehničke informacije proizvodjača korišćenih komponenti predstavljali su polaznu osnovu za definisanje plana i programa baždarenje.

Osnovni princip rada laserskog mernog sistema je registriranje intenziteta reflektovanog laserskog snopa, čiji je prečnik u fokusu samo 1.6 m. Na detektorima se registruje svaka promena intenziteta refleksije nastala usled vertikalnog ili horizontalnog pomeranja površine koja se ispituje. Kako je IMS projektovan tako da može raditi u dva osnovna sistema rada bilo je neophodno obaviti odvojena baždarenja za svaki od njih.

Rad IMS u "open loop" modu je baziran na merenju intenziteta reflektovanog laserskog snopa sa površine koja se ispituje. Nakon izvršenog fokusiranja isključuje se povratna sprega, a svako vertikalno pomeranje površine izaziva promenu intenziteta refleksije. Baždarenje IMS u "open loop" modu je izvršeno sa površinom kvaliteta N5, a izmerene vrednosti intenziteta refleksije u zavisnosti od vertikalnog pomeranja su prikazane na sl. 9. Vertikal-

Open loop baždarna zavisnost



Korelacione zavisnost :  $Y = 1.923423 + -6.869084E-03 \cdot X + 1.368996E-05 \cdot X^2$   
Koefficijent korelacije: .9880752  
Standardno odstupanje : .693301E-02

$h$ [μm]	$U$ [V]	$U(h)$ [V]	Greska [%]
.1	1.954	1.922736	1.599985
29	1.727	1.735733	-5.056628
63	1.5	1.545005	-3.000441
90	1.4	1.418094	-1.149586
126	1.3	1.27526	1.903057
151	1.2	1.198336	.1386503
178	1.145	1.134479	.9188798
214	1.095	1.080385	1.334752
241	1.073	1.063101	.9225886
272	1.045	1.06787	-2.188546

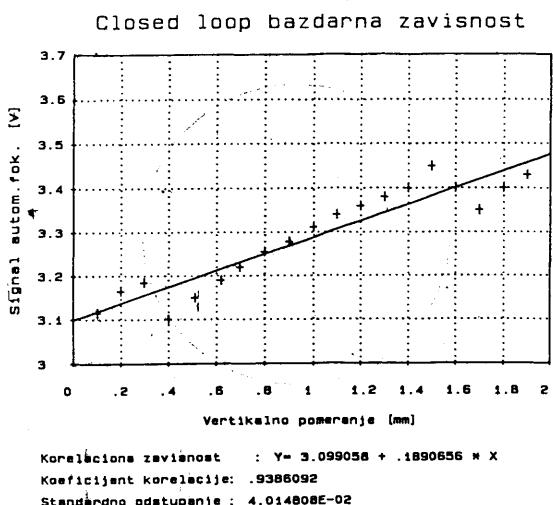
Sl. 9.

lni položaj površine je meren komparatom postavljenim na alatnom mikroskopu paralelno sa laserskim čitačem. Zavisnost je parabolična, a stepen korelacije veoma visoko i iznosi 0,98.

Na osnovu utvrđene analitičke zavisnosti moguće je za konkretnu površinu precizno odrediti vertikalno pomeranje, odnosno položaj u odnosu na fokusnu tačku. Opseg merenja je relativno nizak i iznosi približno  $\pm 0.1$  mm. Prečnik fokusne tačke za izabranu optiku i laserski izvor je  $1.5 \mu\text{m}$ , a svako vertikalno odstupanje u pozitivnom ili negativnom smeru povećava prečnik snopa i snižava intenzitet refleksije. Kako je dubina fokusa LMS  $\pm 4 \mu\text{m}$ , najveća osetljivost odgovara malim vrednostima defekta fokusa, što se može videti i sa baždarne krive čiji je nagib u početnom delu i najveći. Za precizna merenja je moguće odrediti baždarnu zavisnost u opsegu najveće osetljivosti od  $\pm 20 \mu\text{m}$ . Veoma značajna karakteristika rada u "open loop" modu je velika brzina odziva mernog sistema (oko 1000 Hz) što omogućava praćenje veoma brzih procesa.

Pri radu u "closed loop" modu koristi se automatsko fokusiranje u povratnoj sprezi. Rad LMS u "closed loop" modu omogućava praćenje signala koji upravlja automatskim fokusiranjem i određuje položaj sočiva u odnosu na površinu koja se ispituje. Istovremeno je moguće pratiti i odgovarajući intenzitet refleksije, odnosno napon na fotodetektorima. Ovaj sistem rada je veoma pogodan za merenje dužina, pri čemu je eliminisan uticaj stepena refleksije i vrste materijala na rezultate merenja. "Closed loop" baždarna zavisnost je univerzalna tako da nije potrebno vršiti baždarenje za konkretnе uslove, kao što je to slučaj pri radu u "open loop" modu.

Ispitivanje korelacije između signala koji upravlja automatskim fokusiranjem i vertikalnog položaja površine koja se ispituje, je izvršeno u širokom opsegu, sl. 10.

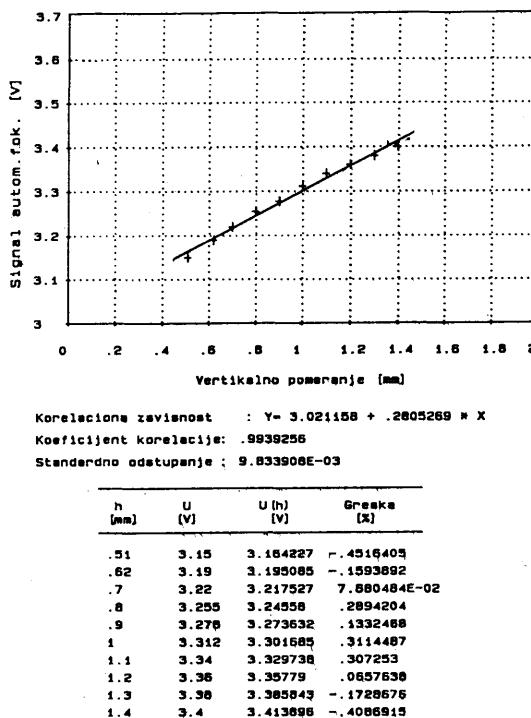


Sl. 10.

Odstupanja od linearnosti i određeni diskontinuiteti su uočeni izvan područja od  $\pm 0.5$  mm, što ne predstavlja bi-

tniju prepreku i može se korigovati u slučaju da je potrebno raditi u širem opsegu. Najbolji rezultati se mogu očekivati u centralnoj oblasti baždarne zavisnosti gde postoji čvrsta linearna korelacija. Na sl. 11. je prikazana optimalna oblast rada LMS u "closed loop" modu sa koeficijentom korelacije 0,99. Ova oblast u baždarnoj zavisnosti ujedno predstavlja i preporučeni radni opseg LMS.

Closed loop bazdarna zavisnost



Sl. 11.

#### 4. Identifikacije razvoja procesa habanja primenom lasera

Metode definisanja procesa habanja možemo klasirati u dve osnovne grupe. Prvu grupu čine direktne metode merenja promena mikrogeometrije, oblika, težine ili zapremine analiziranog elementa tribomehaničkog sistema, odnosno praćenje promena dimenzija ili zapremine pohabanog sloja. Drugu grupu metoda čine postupci indirektnog praćenja razvoja habanja. Indirektne metode se bazuju na merenju promene onih izlaznih veličina tribomehaničkih sistema koje poseduju najvišu korelaciju u odnosu na razvoj procesa habanja. Drugim rečima, razvoj procesa habanja se može kvantificirati preko više izlaznih parametara tribomehaničkih sistema koji su po svojoj prirodi veoma različiti.

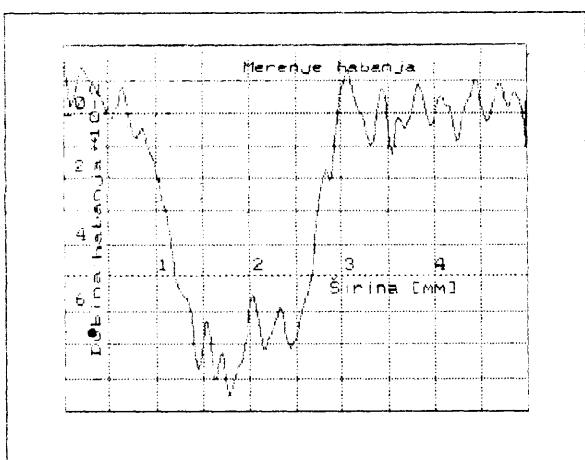
Sa aspekta primene Laserskog mernog sistema u ovoj oblasti najinteresantniji su metodi bazirani na direktnom merenju habanja (širina pojasa habanja, dubina i zapremina pohabanog sloja, itd.), kao i metodi zasnovani na praćenju promena mikrogeometrije i statističkih karakteristika mikrogeometrije kontaktnih površina.

Mikroskopski metod, iako još uvek najrasprostranjeniji postupak direktnog kvantificiranja habanja, ima čitav niz nedostataka. Najznačajniji su nemogućnost dobijanja preciznih informacija o razvoju procesa habanja i "off-line" princip merenja. Loše strane mikroskopskog metoda se žele eliminisati pronalaženjem novih postupaka na kojima se trenutno u svetu intenzivno radi.

Habanje elemenata tribomehaničkih sistema ima složen trodimenzionalni oblik, tako da svako svestrejanje na dvodimenzionalni model ne predstavlja kvalitetno rešenje i povlači za sobom odredjene greške. Jedino merenjem zapremine pohabanog sloja obezbedujemo precizno definisanje razvoja procesa habanja.

Sledeći problem predstavlja činjenica da se proces habanja najčešće odvija na maloj i ograničenoj oblasti. Mesto, oblik i dinamika razvoja procesa habanja zavise od vrste kontakta, vrste materijala i uslova kontakta, itd.

Preliminarna ispitivanja karakteristika laserskog mernog sistema u praćenju procesa habanja pokazuju zadovoljavajuće rezultate koji u kombinaciji sa priborom za automatsko skaniranje pohabanog sloja (za sad se bočno pomerenje vrši ručno) omogućava brzo određivanje zapremine pohabanog sloja. Odgovarajućim izborom koraka bočnog pomerenja pri skaniranju, kao i izborom koraka pri numeričkom integraljenju, može se postići željena tačnost merenja. Brzo merenje habanja je moguće obaviti u "open loop" modu, pri čemu se širina pojasa habanja određuje direktno sa profila prikazanog na monitoru PC-računara, sl. 12.



Sl. 12.

Izračunavanje površine pohabanog sloja u određenom preseku se vrši numeričkim integraljenjem profila:

$$P_i = f_i(x) dx, \text{ gde je:} \quad (13)$$

$f_i(x)$  - profil pohabanog sloja u preseku i.

Elementarne zapremine pohabanog sloja se određuju množenjem izračunatih površina sa korakom skaniranja:

$$Vi = Pi, \text{ gde je:} \quad (14)$$

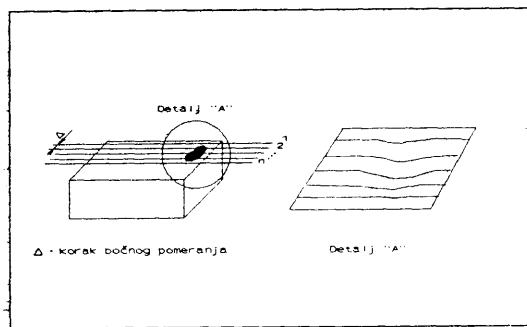
$Pi$  - površina u preseku i, i

- korak bočnog pomerenja.

Na kraju se izvrši sumiranje elementarnih zapremina po ukupnoj dužini merenja:

$$Vh = \sum Vi = \sum Pi$$

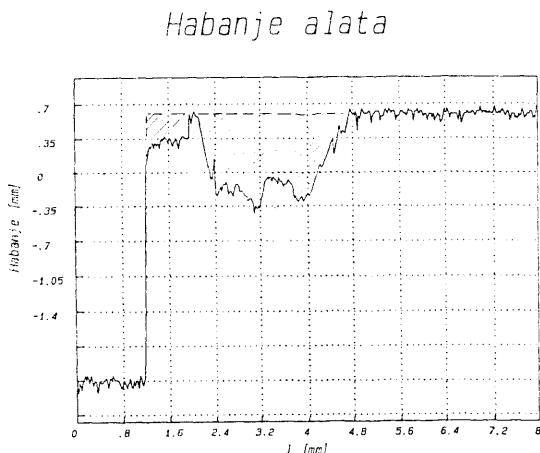
(15)



Sl. 13.

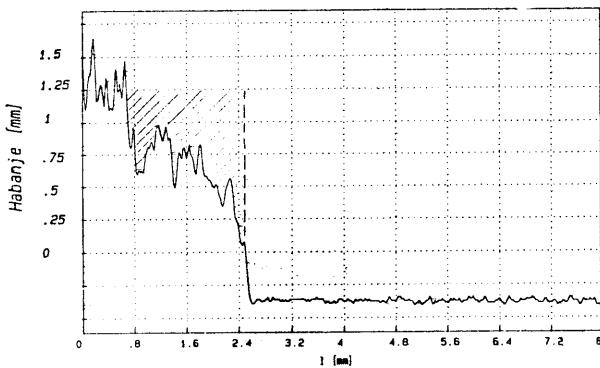
Princip merenja površine i zapremine pohabanog sloja je prikazan na sl. 13. Merenje se obavlja poluautomatski uz kontrolu profila na monitoru računara. Izborom odgovarajućih programskih opcija je moguće određene preseke uvećavati, analizirati i memorisati. Ugradnjom koordinatnog postolja sa koračnim motorima moguće je proces merenja potpuno automatizovati, čime bi se sam proces merenja značajno skratio.

Izmereni profili pohabanog sloja na grudnoj i ledjnoj površini strugarske pločice od tvrdog metala su prikazani na slikama 14 i 15.



Sl. 14.

Neophodno je napomenuti da su najveća ograničenja u primeni laserskog mernog sistema ispoljena upravo pri merenju habanja reznih alata. Osnovni razlog je primena savremenih alatnih materijala i prevlaka sa difuznom refleksijom. Keramički alatni materijali, polikristalne prevlake kao i prevlake od TiC i Al2O3 imaju veoma nizak stepen refleksije što onemogućava automatsko fokusiranje i normalan rad sa izabranim laserskim izvorom i optikom. Najbolji rezultati su postignuti pri merenju habanja reznih alata od brzorenog čelika i tvrdog metala.



Sl. 15.

#### 5. ZAKLJUČAK

Osnovne prednosti primene lasera u odnosu na klasične mernе postupke su beskontaktni princip rada i mogućnost potpune automatizacije merenja putem računara. Svakako da, kao i kod svih mernih metoda, postoje odredjena ograničenja i nedostaci, koji se daljim razvojem Laserskog mernog sistema mogu minimizirati.

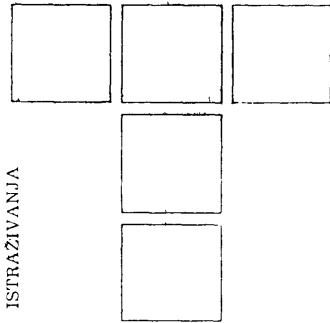
Najznačajnije karakteristike Laserskog mernog sistema su odlična vertikalna i horizontalna rezolucija, a ograničenja tamni materijali sa difuznom refleksijom i površine koje ne zadovoljavaju "Rayleigh-ov kriterijum".

Mogućnost izbora sistema rada obezbeđuje, kada je to potrebno, eliminisanje uticaja stepena refleksije različitih materijala na rezultate merenja. Praćenje signala za automatsko fokusiranje, odnosno registrovanje položaja sociva u odnosu na nosač čitača, predstavlja, i pored znatno sporijeg rada, pogodan sistem merenja dužina, odnosno habanja.

Primena Laserskog mernog sistema treba da doprinese kvalitetnijoj i savremenijoj identifikaciji razvoja procesa habanja, što je jedan od osnovnih preduvlastova za razumevanje složenih procesa unutar tribomehaničkih sistema.

#### LITERATURA

- [1] BECKMANN P., SPIZZICHINO A., *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*, The Macmillan Co., New York, 1963.
- [2] CHURCH E.L., *The measurement of surface texture and topography by differential light scattering*, Wear, Vol. 57, 1979., pp. 93-105.
- [3] CLAYTON TEAGUE, THEODORE V., VORBURGER, DANIEL MASTRE, *Light scattering from manufactured surfaces*, Annals of CIRP, Vol. 30, No 2, 1981.
- [4] GOODMAN W. JOSEPH, *Introduction to Fourier optics*, McGraw-Hill, New York, 1968.
- [5] THOMAS G.G., *Engineering Metrology*, Butterworth & Co. Ltd., 1974.
- [6] ZASTROGIN J.F., *Precizionije izmerenija parametrov dviženija s ispoljzovanjem lazer*, Mašinostroenie, Moskva, 1986.
- [7] BRODMANN R., *ROUGHNESS form and waviness measurement by means of light-scattering*, Precision Engineering, Vol. 8, No 4, 1986., pp. 221-226.
- [8] BRODMANN R., THURN G., *Roughness measurement of ground, turned and shot-peened surfaces by the light scattering method*, Wear, Vol. 109, 1986., pp. 1-13.
- [9] MEECHAM W.C., *Fourier Transform Method for the Treatment of the problem of the Reflection of Radiation from Irregular Surfaces*, J. Acoust. Soc. of America, Vol. 28, 1956.



D. RADONJIĆ

# Uticaj režima rada motora SUS na proces habanja rukavca kolenastog vratila

## 1. UVOD

Izlazni parametri motora sa unutrašnjim sagorevanjem, pri istom kvalitetu radnog procesa zavise od veličine mehaničkih gubitaka. Najveći deo mehaničkih gubitaka čine gubici na trenje u kliznim parovima motora, od kojih u prvom redu treba spomenuti ležišta kolenastog vratila i sklop klip - cilindar. Pojava trenja se višestruko nepovoljno odražava na performanse i ukupno stanje motora, s jedne strane, kroz pogoršanje izlaznih karakteristika (pad snage i porast potrošnje), s druge strane, kroz izazivanje procesa habanja u ovim sklopovima čime se povećavaju zazorji i menjaju uslovi odvijanja procesa u motoru.

Mere koje se danas preduzimaju u cilju smanjenja mehaničkih gubitaka u motoru odnose se, pre svega, na smanjenje broja kliznih parova (uglavnom kod pomoćnih uredjaja motora), izbor materijala sa boljim tribološkim svojstvima, viši kvalitet obrade površina i optimalno projektovanje sistema za podmazivanje.

Imajući u vidu izrazito negativan uticaj navedenih procesa na rad motora potrebno je posebnu pažnju posvetiti metodama za praćenje habanja kliznih sklopova motora i utvrđivanje kriterijuma, na toj osnovi, za pristupanje generalnom remontu. U tu svrhu se obično koriste eksperimentalne metode, a u ovom radu je učinjen pokušaj da se formira matematički model habanja letećih i osnovnih rukavaca kolenastog vratila čijom primenom je bilo moguće oceniti uticaj različitih faktora na proces habanja.

## 2. MODEL HABANJA RUKAVACA KOLENASTOG VRATILA

Zbog specifične konstrukcije kolenastog vratila, kod motora sus se skoro isključivo koriste klizna ležišta. U cilju smanjenja trenja i habanja, u ležišta se dovodi ulje pod pritiskom iz sistema za podmazivanje, koji je tako projektovan da u najširem dijapazonu režima rada motora obezbedi tečno trenje. Medutim, zbog izrazito promenljivih režima rada motora ugradjenog u vozilo, uslovi podmazivanja se menjaju tako da se u toku eksploatacije javljaju svi vidovi trenja počev od polusuvog i polutečnog do tečnog.

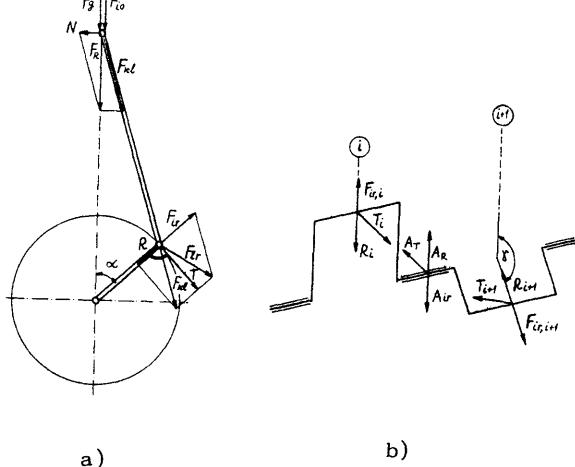
Glavne uticajne veličine na proces trenja i habanja rukavaca kolenastog vratila su svakako, opterećenje, broj obrtaja, veličina zazora, pritisak i vrsta sredstva za podmazivanje kao i vrsta materijala i kva-

litet obrade. U konkretnom slučaju proces habanja je posmatran samo u funkciji opterećenja, odnosno, sila koje deluju na kolenasto vratilo, a dobijeni rezultati mogu korisno poslužiti za proračun i projektovanje sistema za podmazivanje.

### 2.1. Struktura modela

Jedna od bitnih karakteristika motora sus je svakako promenljivost njegovih izlaznih parametara, čak i pri ustaljenim režimima rada. Ovo se posebno odnosi na sile koje deluju na kolenasto vratilo i izazivaju habanje njegovih rukavaca. One po svojoj prirodi mogu biti sile pritiska gasova, koje su posledica odvijanja radnog procesa u motoru i inercijalne sile koje izazivaju pokretni delovi motora.

Na sl.1-a su šematski prikazane sile koje deluju na klipni mehanizam motora kao i rezultujuća sila:  $F_{lr} = F_{kl} + F_{ir}$  koja opterećuje leteći rukavac kolenastog vratila.



Sl.1. Sile koje deluju na osnovne i leteće rukavce kolenastog vratila.

Ostale oznake na slici imaju sledeća značenja:

$F_g$  - sila pritiska gasova,

$F_{io}$ ,  $F_{ir}$  - inercijalne sile translatorno-oscilatornih, odnosno, rotativnih masa motora,

$F_R = F_g + F_{io}$  - rezultujuća sila koja deluje na klip,

$N$  - normalna sila klipa,

$F_{kl}$  - sila u klipnjači,

$T$  - tangencijalna sila,

$R$  - radijalna sila.

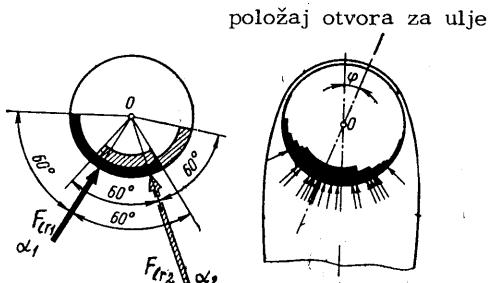
Osnovni rukavci kolenastog vratila su opterećeni silama koje predstavljaju otpore oslonaca izazvane dejstvom sila na leteći rukavac, pri čemu se jedno koleno posmatra kao kruta greda oslojena u osnovnim ležištima.

Na sl.1-b je prikazana šema dejstva sila na osnovne rukavce jednocilindričnog motora, s tim što su sa indeksom "T" označeni otpori oslonaca u horizontalnoj a sa "R" u vertikalnoj ravni. Pri određivanju vektora sila koje deluju na osnovne rukavce kolenastog vratila višecilindričnog motora mora se uzeti u obzir i uticaj ostalih cilindara, imajući pre svega u vidu međusobni položaj kolena kolenastog vratila i njihov razmak paljenja.

S obzirom da su rezultujuće sile koje deluju na leteće odnosno, osnovne rukavce kolenastog vratila, promenljive veličine i da zavise od položaja kolenastog vratila, uobičajeno je da se njihovo dejstvo prikazuje zatvorenim, polarnim dijagramom za ceo radni ciklus motora. Prednost ovakvog prikazivanja se ogleda u tome što se za svaki položaj kolenastog vratila u toku ciklusa može tačno sagledati karakter opterećenja rukavca datom sistemom.

Često se polarni dijagram opterećenja rukavaca prikazuje u pravouglim koordinatama u funkciji ugla kolenastog vratila kada se dobija razvijeni dijagram čije se srednje i maksimalne vrednosti koriste za proračun sistema podmazivanja motora.

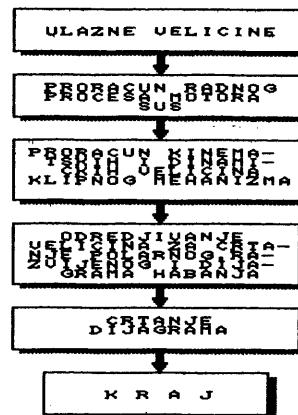
Zatvoreni polarni dijagram opterećenja rukavaca kolenastog vratila može se takođe iskoristiti za određivanje tkzv. uslovnog dijagrama habanja. Postupak određivanja je ilustrovan na sl.2.



Sl.2. Postupak crtanja uslovnog dijagrama habanja rukavaca kolenastog vratila.

Naime, pretpostavlja se da svaka sila koja deluje na rukavac izaziva habanje proporcionalno svom intenzitetu u ugaonom intervalu od  $60^\circ$  levo i desno od svoje napadne tačke. Sumiranjem zona habanja koje izazivaju sile za svaki položaj kolenastog vratila u toku ciklusa, dobija se ukupni dijagram habanja rukavaca.

Na bazi opisanog postupka formiran je matematički model čija je struktura prikazana blok dijagramom na sl.3.



Sl.3. Blok dijagram modela.

U prvom koraku se vrši proračun radnog procesa motora da bi se odredio tok promene pritiska u cilindru koji se kasnije, u bloku za kinematski i dinamički proračun, koristi za određivanje sile pritiska gasova koja deluje na klip. U ovom bloku se takođe, određuju ubrzanja pokretnih delova klipnog mehanizma i intenziteti ostalih sila prikazanih na sl.1-a. Na osnovu sračunatih vrednosti rezultujućih sila koje deluju na leteće i osnovne rukavce kolenastog vratila u narednom bloku se određuju veličine potrebne za crtanje zatvorenog i razvijenog polarnog dijagrama i dijagrama habanja ovih rukavaca. Konačno, u bloku za crtanje daje se grafička interpretacija rezultata proračuna.

### 3. REZULTATI PRORAČUNA

Oписан model je verifikovan na motoru 128 A.064 koji ima sledeće karakteristike bitne za proračun:

- četvorotaktni, četvorocilindrični, redni otok motor,
- dimenzije cilindra:  $S/D=55,5/80$  mm,
- maksimalna snaga:  $P=40,5$  kW pri  $n=6000$  o/min
- kolenasto vratilo sa 5 osnovnih ležajeva, uglovi između kolena pojedinih cilindara su redom:  
 $1-2: 180^\circ$ ,  $2-3: 0^\circ$ ,  $3-4: 180^\circ$ ,
- redosled paljenja cilindara: 1-3-4-2.

Proračun je sproveden za režim maksimalne snage a rezultati proračuna su prikazani dijagramske.

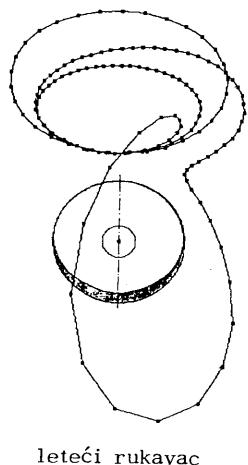
Na sl.4. su prikazani polarni i dijagrami habanja letećih i osnovnih rukavaca kolenastog vratila motora 128 A 0.64. Uočava se da presudan uticaj na proces habanja rukavaca ima karakter promene sile pritiska gasova i inercijalnih sile. U tom pogledu posebno je izražen uticaj inercijalnih sile rotativnih masa od čijeg intenziteta zavisi veličina promjena polarnog dijagrama u odnosu na osu rukavca a samim tim i veličina i neravnomernost habanja po obimu (leteći rukavci, I, III, V osnovni rukavac).

Uticaj inercijalnih sile rotativnih masa može se u potpunosti eliminisati postavljanjem protivtegova na kolenasto vratilo (uravnoteženje), a bitno smanjiti pogodnim rasporedom kolena kolenastog vratila (osnovni rukavci II i IV).

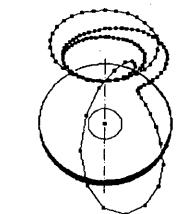
Izvedeni zaključci u potpunosti važe i za razvijene, polarnе dijagrame prikazane na sl.5. sa kojih se mogu očitati maksimalne i srednje vrednosti sile za uga-

oni interval koji odgovara jednom ciklusu četvorotaktnog motora.

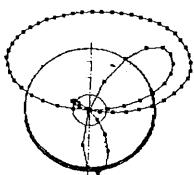
Na sl.6. je prikazano kolenasto vratilo motora 128 A. 064 i oblici habanja njegovih rukavaca. Zbog opšte simetrije koja postoji izmedju pojedinih cilindara i oblici habanja odgovarajućih rukavaca su isti.



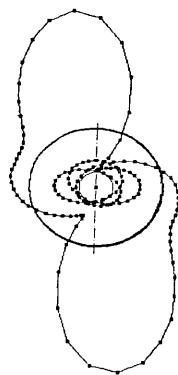
leteći rukavac



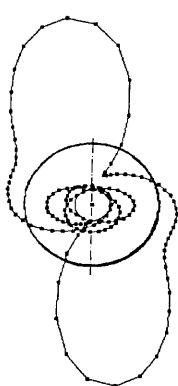
I i V osnovni rukavac



III osnovni rukavac

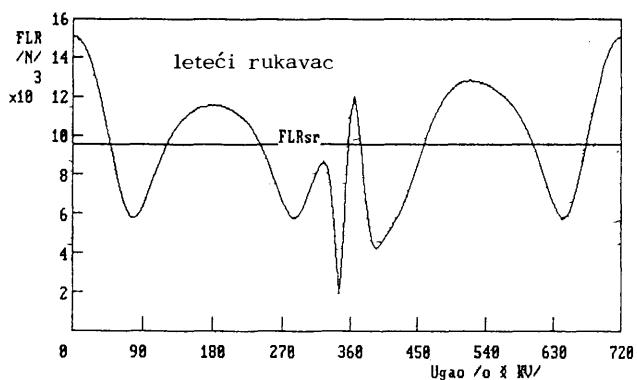


II osnovni rukavac

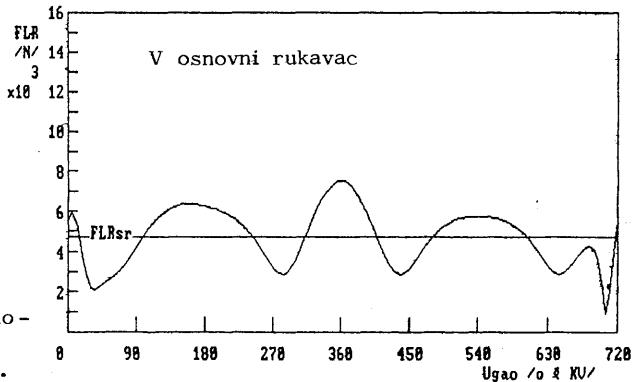
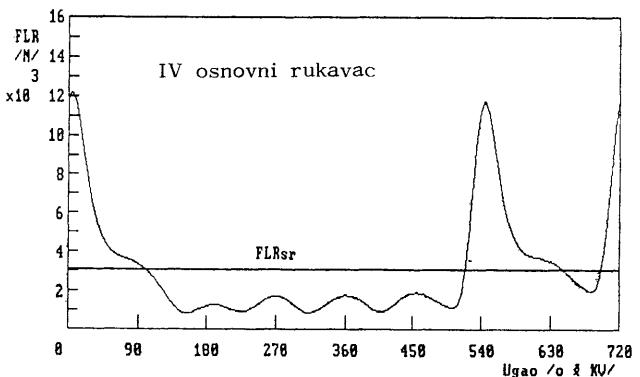
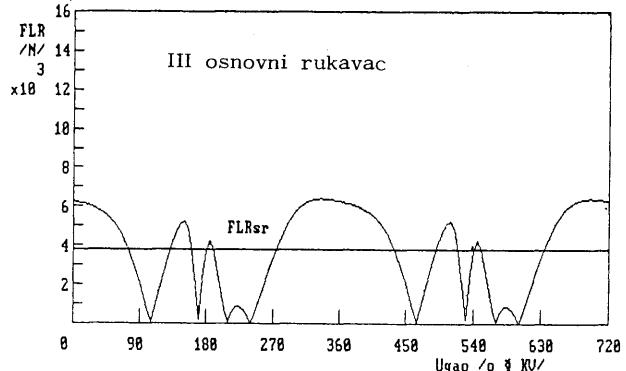
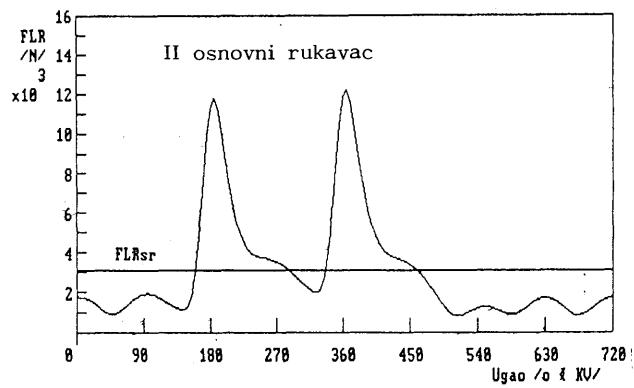
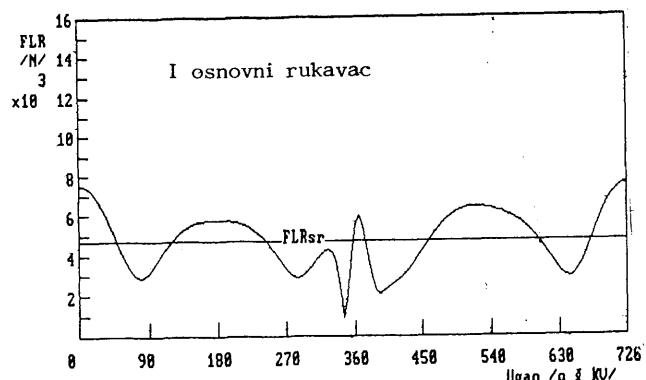


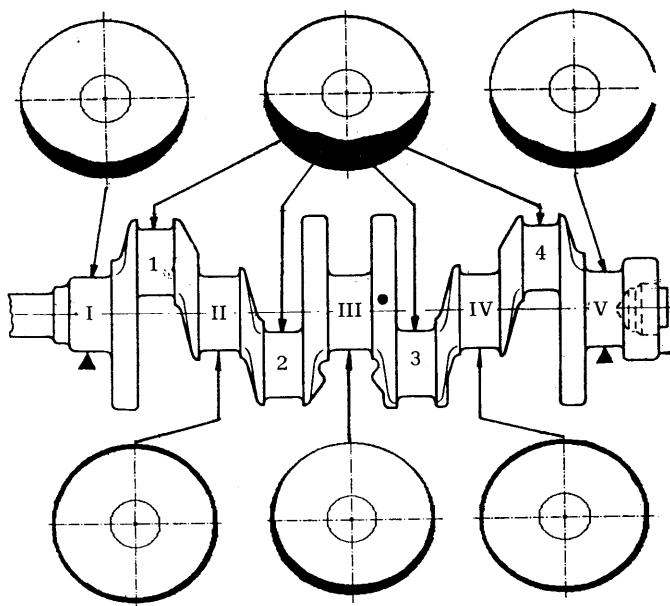
IV osnovni rukavac

Sl.4. Podarni i dijagrami habanja letećih i osnovnih rukavaca kolenastog vratila motora 128 A.064 pri režimu maksimalne snage.



Sl.5. Razvijeni polarni dijagrami letećih i osnovnih rukavaca kolenastog vratila motora 128 A.064 pri režimu maksimalne snage.





Sl.6. Oblici habanja rukavaca kolenastog vratila motora 128 A.064.

#### 4. ZAKLJUČAK

Prikazani model omogućava kompleksnu analizu opterećenja rukavaca kolenastog vratila u ustaljenim režimima rada motora i određivanje oblika njihovog

habanja s obzirom na karakter opterećenja. Proračun je sproveden za režim maksimalne snage kao najnepovoljniji slučaj jer su tada sile pritiska gasova i inercijalne sile maksimalne. Ostali, karakteristični režimi rada motora (prazan hod, maksimalni obrtni moment, maksimalni broj obrtaja neopterećenog motora) odlikuju se nižim vrednostima obe ili jedne od navedenih sila.

Svakako, da se realnija slika o procesu habanja rukavaca kolenastog vratila može dobiti dopunjavanjem postojećeg modela modelom sistema za podmazivanje uz uzimanje u obzir zazora u ležištima što predstavlja sledeći korak u ovom radu.

#### 5. LITERATURA

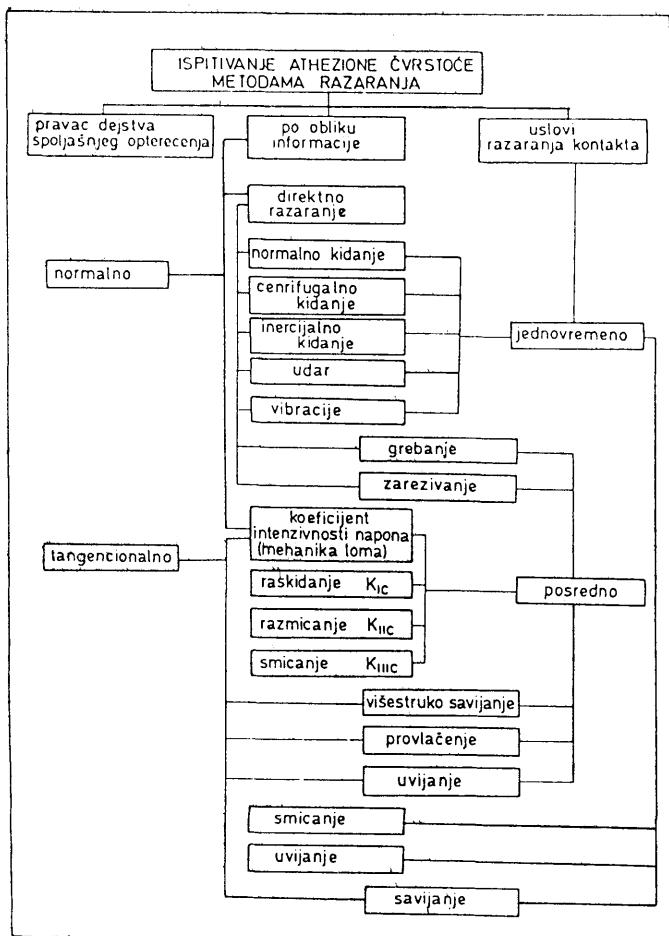
- /1/ Orlin.S.A., Kruglov.G.M. i dr.: Dvigateli vnutrennjego sgoranija - Konstruirovanie i raschet na prochnost porshnevih i kombinirovannih dvigatelej, Mašinostroenie, Moskva 1984.
- /2/ Arkhangelsky.V. i dr.: Motor vehicle engines, MIR Publishers, Moscow 1979.
- /3/ Milowitz.K.: Lager und Schmierung, Springer-Verlag, Wien 1962.

V. DJUKIĆ, B. NEDIĆ

# Metode za određivanje athezije čvrstoće prevlaka

## 1. KLASIFIKACIJA METODA ISPITIVANJA

Postojanje niza metoda za određivanje athezije čvrstoće, koje se koriste u sadašnje vreme, zahteva njihovu sistematizaciju, a jedna takva data je na sl. 1.



Sl. 1.

## 2. ANALIZA METODA ISPITIVANJA

Brojne metode ispitivanja athezije čvrstoće su vezane na najznačajnije, a šematski prikaz opterećenja je dat u tabeli 1. označen brojnim simbolima 1-18.

1. Metoda bombardovanja /1/ predstavlja eksperesnu kontrolu kvaliteta athezije čvrstoće i pripada grupi tehnoloških proba.

Metoda se sastoji iz bombardovanja česticama korunda, granulacije 70-120  $\mu\text{m}$ , mase manje od 0,1 g, iz mlaznice prečnika 20 mm udaljene od ispitivane prevlake za 60 mm.

Pored parametra ispitivanja kao što su rastojanje mlaznice, prečnik mlaznice, tip obrazovnog sredstva, vreme bombardovanja, moraju se strogo kontrolisati kinetička energija struje, dimenzije, oblik i fizičko hemijska svojstva abraziva, da bi se rezultati ispitivanja mogli poređati.

Rezultat ispitivanja je stanje prevlake posle "bombardovanja", a kvalitetna prevlaka ne sme imati pojavu raslojavanja tj. odvajanje prevlake što se lako utvrđuje mikroskopskim ispitivanjem.

2. Metoda jednovremenog savijanja kompozita /2, 3/ sastoji se od utvrđivanja kvaliteta, kako celog kompozita, tako i narušavanja kontakta između komponenata kompozita tj. osnove i prevlake izražene preko athezije čvrstoće.

Pri ispitivanju savijanjem kompozita, kao merilo kvaliteta veze prevlake sa osnovom, može se koristiti kao kriterijum i veličina ugla savijanja do pojave prve prskotine.

Značajno je napomenuti da brzina deformisanja ima bitan uticaj na veličinu ugiba što se kod komparativnog ispitivanja mora uzeti u obzir, jer ova proba pripada grupi tehnoloških proba.

Metoda deformacije kompozita može se izvesti ne samo savijanjem i statičkim delovanjem, već i delovanjem silama promenljive vrednosti tj. na zamor, čime metoda dobija u značaju. Takodje, posmatrajući opterećenje metoda može biti i ispitivanje zatezanjem, ispitivanje pritiskom, ispitivanje na udar i dr.

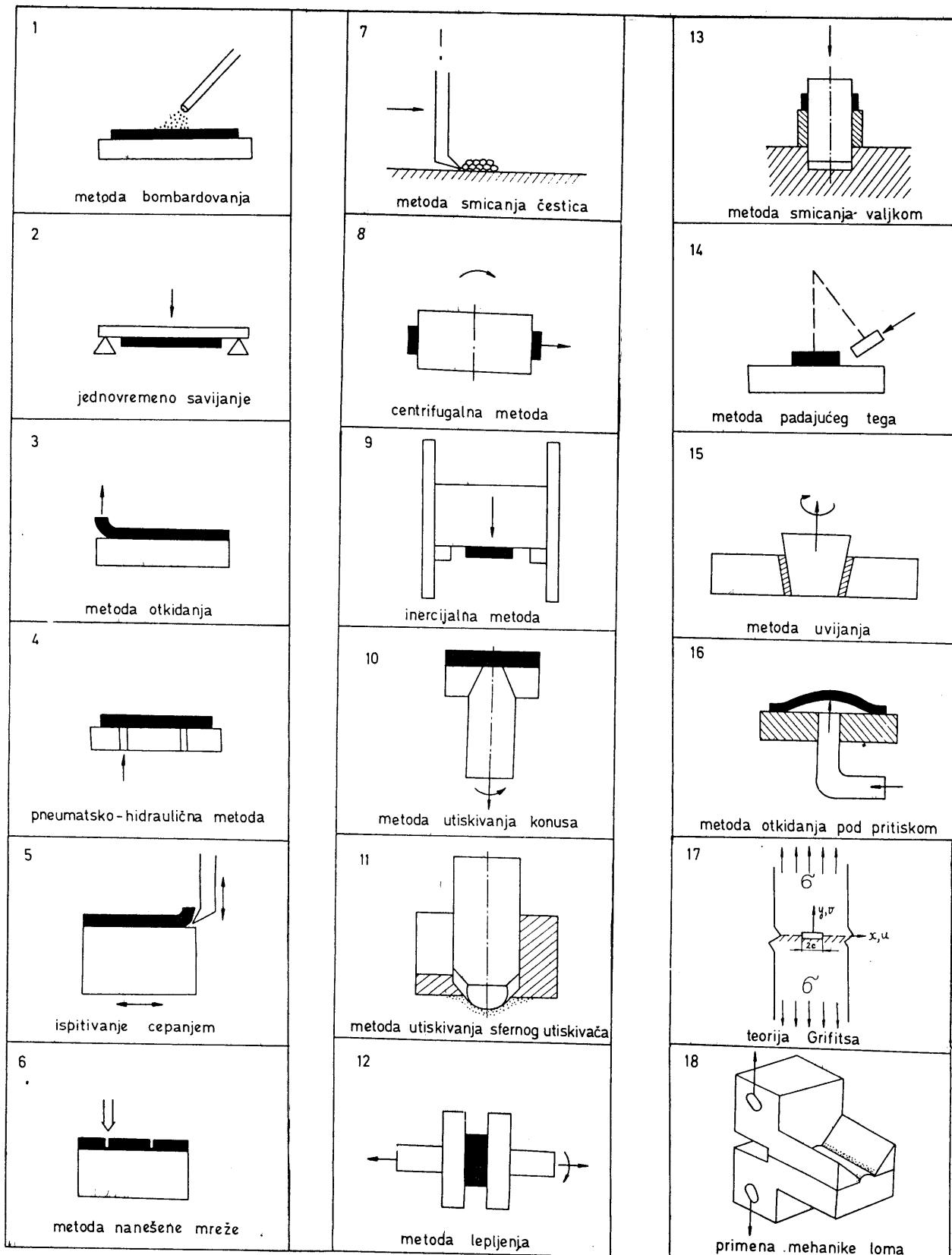
U slučaju ispitivanja na zamor savijanjem, kao kriterijum ocene kvaliteta može se uzeti broj promena pri kojoj nastaje prskotina u prevlaci.

3. Metoda otkidanja /4,5/, koristi se za ispitivanje elastičnih prevlaka, a sastoji se u jednovremenom delova nju sile otkidanja kako na prevlaku tako i na osnovu. Merilo atmeteone čvrstoće je ugao koga zahvata prevlaka i osnova.

Tabela 1. - Šematski prikaz opterećenja

Metoda otkidanja predstavlja tehnološku probu a mjeru otkidanja u najvećoj meri zavisi od debljine prevlake.

4. Pneumatsko hidraulična metoda /6,7/ sastoji se od delovanja vazduha ili tečnosti na prevlaku (kroz otvore) i utvrđivanju trenutka otkidanja prevlake (naduvanje) kao i pritiska za odvajanje prevlake.



Pneumatsko-hidraulična metoda obiluje poteškoćama, počev od mogućnosti da se koristi samo za nepropustive prevlake i da se pojavljuju problemi pri utvrđivanju površine odvojene prevlake, do potrebnog većeg broja uzoraka pri ispitivanju.

5. Ispitivanje struganjem /8/ izvodi se struganjem ko rišenjem noža od tvrdog metala uz praćenje sile pritiska i brzine kretanja.

Atheziona čvrstoća se ocenjuje preko širine rezanja i odgovarajuće sile rezanja.

6. Metoda nanošenja mreže /9/ predstavlja jednu od varijanti metode ispitivanjem struganjem. Naime, na prevlaci se reznim alatom napravi mreža oblika kvadrata čije strane ne prelaze 1 mm, a zarezivanje prevlake se izvodi do same metalne osnove.

Atheziona čvrstoća se ocenjuje na osnovu broja i rasporeda odvojenih kvadratičnih prevlake usled delovanja radnog opterećenja.

Jedan od osnovnih problema kod primene ove metode je nemogućnost uspostavljanja linearne veze između širine i dubine zareza sa jedne i atheziona čvrstoće s obzirom na različita naporna stanja kompozita.

7. Metoda smicanja čestica /10/, koja se primenjuje u praksi a sastoji se iz struganja bilo grupe čestica ili pak cele prevlake. Međutim, postoje brojne poteškoće s obzirom da struganjem se ne može postići da nož odvaja samo prevlaku odnosno odredjeni broj čestica, već se odvaja i sama osnova. Takođe prevlaka se nalazi u složenom napornom stanju usled pritiska pri struganju.

Metoda nije pouzdana i zbog neidentičnosti uslova nanošenja prevlake u ispitivanim uzorcima i radnim uslovima.

8. Centrifugalna metoda, zasniva se na jednovremenom otkidanju prevlake korišćenjem centrifugalne sile. Samo ispitivanje izvodi se na specijalnim centrifugama, a sastoji se iz nanošenja prevlake na čone strane valjka i zatim se obráti oko svoje ose takvim ubrzanjem da se prevlaka otkinu od valjka.

Centrifugalna sila koja izaziva otkidanje prevlake se može izračunati ali veoma je teško ustanoviti trenutak otkidanja prevlake s obzirom da broj obrtaja dostiže i vrednosti 10.000 o/min.

9. Inercijalna metoda, relativno prostog konstruktivnog režima ali sa vrlo malom tačnošću, a zasniva se na otkidanju prevlake pod dejstvom inercijalne sile.

Prevlaka se nanosi na ispitivanu epruvetu koja ima oblik metka koji se ispaljuje u metu koja ima prsten manjeg prečnika od prečnika metka.

Veličina atheziona čvrstoće direktno je srazmerna ubrzanju u trenutku otkidanja  $a_v$ , gustine materijala  $\rho$  i debljine prevlake  $h$ , odnosno

$$F = \rho \cdot h \cdot a_v$$

Najveći problem kod ove metode ispitivanja je utvrđivanje dijagrama sile-vreme u trenutku otkidanja prevlake.

Metod postepenog povećanja ubrzanja (na velikom broju epruveta) je veoma dugotrajan proces ispitivanja.

10. Metoda utiskivanja konusa (štifta) /11/ zasniva se na utiskivanju koncentričnog konusa u alatu i utvrđivanju sile otkidanja prevlake.

Zazor između konusa i alata mora biti 10 μm, kako bi se onemogućilo nalepljivanje čestica prevlake u toku njenog nanošenja.

Pozastom debljina prevlaka iznad 300-500 μm atheziona čvrstoća se uvećava 1,5 - 3 puta.

Osnovni problem kod ove metode je pojava savijanja prevlake što otežava izračunavanje atheziona čvrstoće.

11. Metoda utiskivanja sfernog utiskivača /12/ jedna je od varijanti prethodne metode a koristi se za slučaj tanke i lako deformirajuće prevlake.

Veličina atheziona čvrstoće zavisi kako od debljine prevlake tako i od geometrije sfernog utiskivača.

Metoda je vrlo nepodesna s obzirom na poteškoće oko nanošenja prevlake na alat-matricu, a i činjenica da se ne može ispitivati na smicanje već samo na otkidanje prevlake.

12. Metoda lepljenja /13/ sastoji se od lepljenja nosača na prevlaku i naknadno ispitivanje (na kidanje i uvijanje) slepljene epruvete.

Osnovni nedostatak ove metode je niska čvrstoća lepljenog sloja (200-500 MPa) kao i visoka koncentracija napona pri uvećanju prečnika nosača. Takođe jedan od značajnih nedostataka ove metode je nemogućnost ispitivanja lepljene prevlake na smicanje.

13. Metoda smicanja valjkom /14, 15/ predstavlja najčešće primenjenu metodu odredjivanja atheziona čvrstoće. Na valjak se nanosi prevlaka, optimalne površine 200 mm<sup>2</sup>, postavlja u matricu sa cilindričnim otvorom i opterećuje se silom brzinom 20-200 mm/min.

Atheziona čvrstoća predstavlja količnik sile smicanja i površine prevlake.

14. Metoda padajućeg tegu /16/ predstavlja udarno smicanje, pri čemu klatno otklonjeno za neki ugao pada na prevlaku, srušće je, i klatno se zaustavlja na nekom uglu. Razlika uglova otklona i posle pada omogućuje izračunavanje energije smicanja odnosno atheziona čvrstoće.

15. Metoda uvijanja /17/ predstavlja smicanje prevlake primenom uvijanja a atheziona čvrstoća se određuje na osnovu poznatih izraza.

Samo ispitivanje je prosto kao i sama epruveta na kojoj se izvodi ispitivanje. Mogu se primeniti i drugi oblici uvijanja ali pri tome se mora обратити pažnja na korekciju smicajne čvrstoće.

16. Metoda otkidanja pod pritiskom /18/ zasnovana je na analizi bilansa energije po Grifitsu saglasno kome umanjenje energije loma nastaje pri uvećanju površine razaranja a na račun stvaranje prskotine.

17. Teorija Grifitsa /19/. Iz teorije Grifitsa može se za razmatranu prskotinu konačne dužine za koja leži duž ose OX, pri graničnim uslovima za  $|X| > a$ :

$$V(x_0, 0) = 0 \quad i$$

$$U(x, a) = 0$$

atheziona energije izračunava se na osnovu izraza:

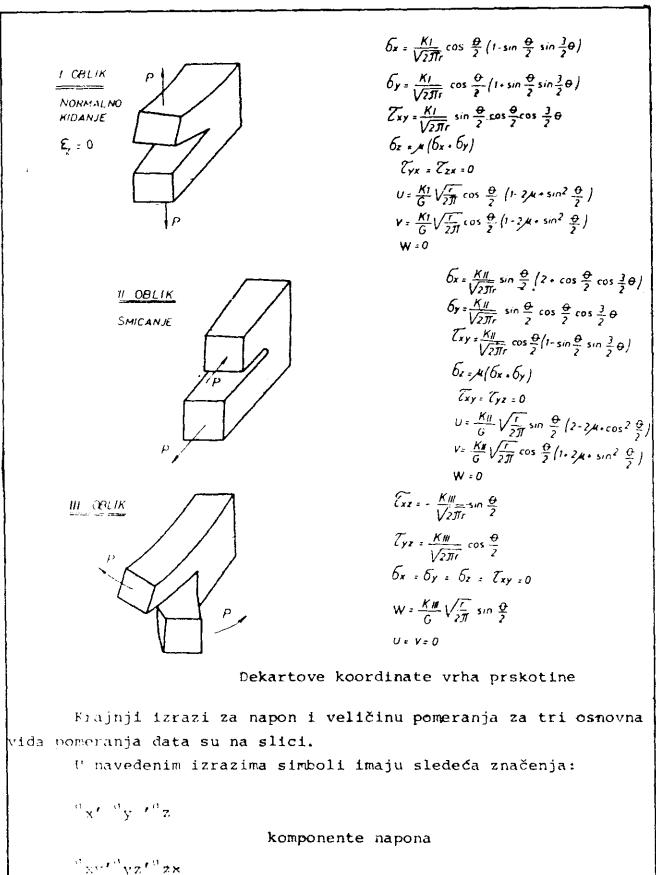
$$\sigma_{kp} = \sqrt{\frac{2EY}{a}}$$

gde je  $Y_a$  - gustina athezione energije loma.

18. Primena mehanike loma /20/ predstavlja najsavremeniji prilaz u oceni kvaliteta spoja izmedju osnove i prevlake putem utvrđivanja kritičnog koeficijenta intenzivnosti napona  $K_{IC}$  odnosno  $K_{IIC}$  i  $K_{IIIC}$ .

Metode ispitivanja su u razvoju i prevazilaze ovaj rad.

## LITERATURA



Sl. 2.

## ZAKLJUČAK

Predstavljene metode određivanja athezione čvrstoće, kao osnovnog parametra za ocenu kvaliteta kompozita sa prevlakama, su samo veći deo metoda obradjenih u literaturi.

Ova ispitivanja su u povoju pa im treba prići sa najvećom pažnjom.

- | 1 | А.с. 714246 СССР Способ контроля адгезии пленок к подложке Карибуло, А.Г., Баландин В.Н. и др. - Опубл. в БИ 1980.
- | 2 | Чернявский Е.А., Турков И.Я. Влияние параметров напыления на плотность и прочность сцепления. - Порошковая металлургия, -1976, № 1, с. 35-39.
- | 3 | Кудинов В.В. Определение прочности спечения покрытий, - Заводская лаборатория, 1976, № 2, с. 232-234.
- | 4 | Цинин В.Г. Качество сцепления никель фосфорного покрытия.-Автомобильное производство, 1977, № 6, с.33-34.
- | 5 | Парванский Н.Я. Прочность сцепления электроискровых покрытий.-Электронная обработка материалов, 1980, № 5, с. 74-75.
- | 6 | А.с. 619834 "/СССР/ Пневматическое устройство для контроля качества адгезии покрытий. В.Е. Михайленко. Опубл. в. БИ 1978, № 30.
- | 7 | А.с. 796745 /СССР/ Образец для испытания на адгезионную прочность. И.Е. Пурисов, В.А. Сидоров, О.Ф. Тараненко. Опубл. в БИ 1981, № 2.
- | 8 | А.с. 678910 /СССР/ Способ определения адгезионной прочности покрытия с подложкой. Н.В. Кузнецов Опубл. в БИ 1978, № 28.
- | 9 | Rossini A. Chem. and Engng. News., 1968, vol. 46, No 41, p. 60-61
- | 10 | Готлиб В. Отчет по теме В7-64. В кн. Труды ВНИИАВТОГЕНМАЗа, 1966, с. 1/-у8.
- | 11 | А.с. 278182 /СССР/ Способ определения прочности сцепления покрытий. Н.Н. Дорожкин, И.М. Зуев. Опубл. в. БИ. 1970, № 25.
- | 12 | А.с. 1073637 /СССР/ Образец для определения адгезионной прочности Е.П. Генин, В.В. Бродко. Опубл. в БИ. 1984, № 6.
- | 13 | А.с. 855443 /СССР/ Образец для определения адгезионной прочности и способа изготовления. В.А. Куперман, В.Л. Авраменко, Н.И. Федосик. Опубл. в БИ. 1981, № 30.
- | 14 | Хасци А., Моригаки О. Наплавка и напление.-М. Машиностроение, 1985.
- | 15 | Обносов В.В. Труды Гос. института Аэотной промышленности 1973, № 18, с. 40-45.
- | 16 | А.с. 715978 /СССР/ Устройство для определения адгезии. Н.А. Броновец и др. Опубл. в БИ. 1989, № 6.
- | 17 | А.с. 1076820 /СССР/ Способ определения адгезионной прочности слоев соединения при скручивании, И.И. Шеверов, А.В. Шапарев. Опубл. в БИ. 1984, № 8.
- | 18 | Dannenberg H., J. Appl. Polym. Sci., 5, 125 (1961)
- | 19 | Griffith A.A. Proc. Ist. Intern. Congress Appl. Mech. Delft.
- | 20 | Ripling F. Y., Mostovoy S., Patrick R. L. Recent Developments in Adhesive Science, ASTM STP 360, 1964, p.5.



N. NEDELJKOVIĆ, D. TRIFUNOVIĆ, M. BOŽIKOVIĆ

# Primjena matematičke simpleks metode kod istraživanja optimalnih osobina sinterovanih frikcionih materijala na osnovi bakra

$$c_{23} = 9/4(3y_{223} - 3y_{233} - y_2 + y_3) \quad (8)$$

$$b_{123} = 27y_{123} - 27/4(y_{112} + y_{122} + y_{113} + y_{133} + y_{223} + y_{233}) + 9/2(y_1 + y_2 + y_3) \quad (9)$$

## 1. UVODNA RAZMATRANJA

Korištenjem simpleks planova moguće je pratiti promjene osobina u zavisnosti od procentualnog učešća pojedinih komponenata koje grade frikcioni materijal.

Pri istraživanju osobina smjese u zavisnosti od njenog sastava, najčešći su slučajevi kada je ograničena koncentracija pojedinih ili svih komponenti. Ovi slučajevi iziskuju, umjesto posmatranja simpleksnog prostora, trougao  $X_1X_2X_3$ , na slici 1, sa sadržajem komponenata u temenima trougla od 100%, posmatranje malog podprostora, trougao  $Z_1Z_2Z_3$ . Koordinate  $z_1, z_2$  i  $z_3$  su "lažne" koordinate, a novonastali podprostor ima sve potrebne osobine simpleksa. Zbir procentualnog učešća u mešavini svih komponenti uvijek je jednak 100%, ili iskazano u udjelima, zbir iznosi 1 ( $z_1 + z_2 + z_3 = 1$ ).

Za matematički model eksperimenata korišten je potpuni kubni model sa  $q = 3$  komponente i  $n = 3$  stepena polinoma koji ima 10 eksperimentalnih jedinica. Rešetka korištenog potpunog kubnog modela, sa oznakama i položajem eksperimentalnih tačaka, prikazana je na slici 2. Vrijednosti  $y_i$  su srednje vrijednosti eksperimentalnih rezultata.

Opći oblik regresionog polinoma za primijenjeni potpuni kubni model sa  $q = 3$  komponente glasi:

$$\hat{y} = b_1z_1 + b_2z_2 + b_3z_3 + b_{12}z_1z_2 + b_{13}z_1z_3 + b_{23}z_2z_3 + c_{12}z_1z_2(z_1 - z_2) + c_{13}z_1z_3(z_1 - z_2) + c_{23}z_2z_3(z_2 - z_3) + b_{123}z_1z_2z_3 \quad (1)$$

Koefficijenti regresionog polinoma se izračunavaju iz srednjih vrijednosti  $y_i$  rezultata eksperimenata:

$$b_1 = y_1; \quad b_2 = y_2; \quad b_3 = y_3 \quad (2)$$

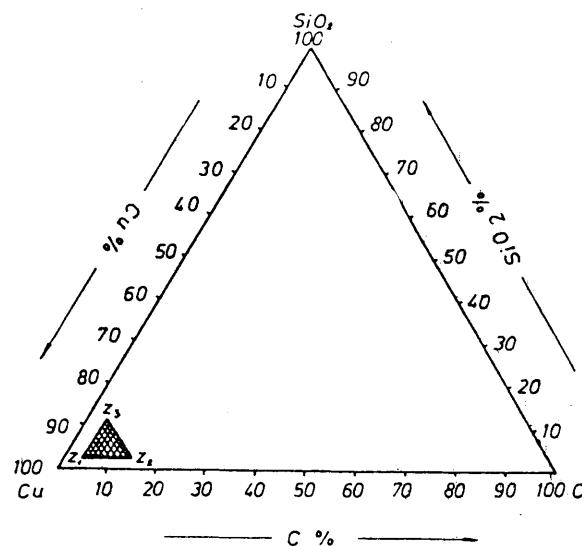
$$b_{12} = 9/4(y_{122} - y_1 - y_2) \quad (3)$$

$$b_{13} = 9/4(y_{113} + y_{133} - y_1 - y_3) \quad (4)$$

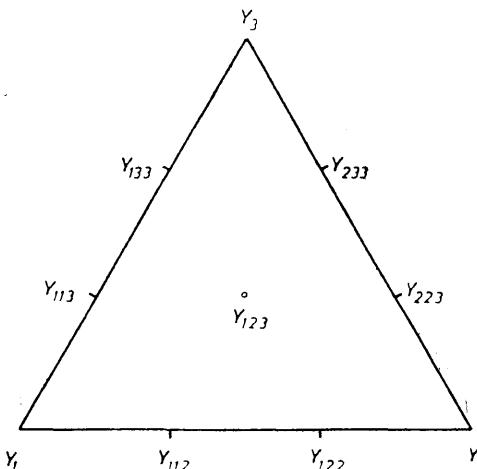
$$b_{23} = 9/4(y_{223} + y_{233} - y_2 - y_3) \quad (5)$$

$$c_{12} = 9/4(3y_{112} - 3y_{122} - y_1 + y_3) \quad (6)$$

$$c_{13} = 9/4(3y_{113} - 3y_{133} - y_1 + y_3) \quad (7)$$



Sl.1. Položaj ispitivanog podprostora  $Z_1Z_2Z_3$  u potpunoj simpleks rešetci  $X_1X_2X_3$



Sl.2. Oznaka položaja eksperimentalnih tačaka u podprostoru  $Z_1Z_2Z_3$

## 2. PRIKAZ I OBRADA EKSPERIMENTALNIH REZULTATA

Ispitivani materijali su petokomponentne pseudolegure dobijene presovanjem i sinterovanjem smjese prahova bakra, kositra, olova, grafita i  $\text{SiO}_2$ .

U tabelama 1-4 dati su rezultati ispitivanja koeficijenta frikcije sinterovanih frikcionih materijala sa 2, 5, 8 i 11% Pb.

Tabela 1. Koeficijenti frikcije frikcionih materijala sa 2% Pb

Broj uzor.	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$K_{f1}$	$K_{f2}$	$\bar{K}_f$	$\hat{K}_f$	$y_i$
1.	1	0	0	0,64	0,62	0,63	0,63	$y_1$
2.	0	1	0	0,55	0,55	0,55	0,47	$y_2$
3.	0	0	1	0,65	0,63	0,64	0,59	$y_3$
4.	2/3	1/3	0	0,60	0,58	0,59	0,59	$y_{112}$
5.	1/3	2/3	0	0,56	0,56	0,56	0,56	$y_{122}$
6.	0	2/3	1/3	0,56	0,54	0,55	0,55	$y_{223}$
7.	0	1/3	2/3	0,61	0,59	0,60	0,60	$y_{233}$
8.	1/3	0	2/3	0,53	0,51	0,52	0,52	$y_{133}$
9.	2/3	0	1/3	0,55	0,52	0,54	0,54	$y_{113}$
10.	1/3	1/3	1/3	0,56	0,54	0,55	0,55	$y_{123}$
11.	0,6	0,2	0,2	0,57	0,56	0,57	0,56	$y_{01}$
12.	0,2	0,6	0,2	0,55	0,55	0,55	0,55	$y_{02}$
13.	0,2	0,2	0,6	0,57	0,55	0,56	0,55	$y_{03}$
14.	0,1	0,1	0,8	0,60	0,58	0,59	0,58	$y_{04}$

$z_{1,2,3}$  - koordinate u "Simpleska" rešetci,

$K_{f1,2}$  - izmerene vrijednosti koeficijenata frikcije za I i II ciklus trenja,

$\bar{K}_f$  - srednje vrijednosti koeficijenata frikcije,

$\hat{K}_f$  - vrijednosti koeficijenata frikcije izračunate iz regresionog polinoma,

$y_i$  - položaj u "Simpleska" rešetci

Tabela 2. Koeficijenti frikcije frikcionih materijala sa 5% Pb

Broj uzor.	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$K_{f1}$	$K_{f2}$	$\bar{K}_f$	$\hat{K}_f$	$y_i$
1.	1	0	0	0,58	0,58	0,58	0,58	$y_1$
2.	0	1	0	0,52	0,52	0,52	0,52	$y_2$
3.	0	0	1	0,59	0,59	0,59	0,59	$y_3$
4.	2/3	1/3	0	0,60	0,56	0,58	0,58	$y_{112}$
5.	1/3	2/3	0	0,54	0,50	0,52	0,52	$y_{122}$
6.	0	2/3	1/3	0,58	0,56	0,57	0,57	$y_{223}$
7.	0	1/3	2/3	0,54	0,54	0,54	0,54	$y_{233}$
8.	1/3	0	2/3	0,55	0,51	0,53	0,53	$y_{133}$
9.	2/3	0	1/3	0,57	0,53	0,55	0,55	$y_{113}$
10.	1/3	1/3	1/3	0,57	0,55	0,56	0,56	$y_{123}$
11.	0,6	0,2	0,2	0,57	0,57	0,57	0,58	$y_{01}$
12.	0,2	0,6	0,2	0,56	0,55	0,55	0,55	$y_{02}$
13.	0,2	0,2	0,6	0,57	0,55	0,56	0,55	$y_{03}$
14.	0,8	0,1	0,1	0,58	0,58	0,58	0,59	$y_{04}$

$z_{1,2,3}$  - koordinate u "Simpleska" rešetci,

$K_{f1,2}$  - izmerene vrijednosti koeficijenata frikcije za I i II ciklus trenja,

$\bar{K}_f$  - srednje vrijednosti koeficijenata frikcije,

$\hat{K}_f$  - vrijednosti koeficijenata frikcije izračunate iz regresionog polinoma,

$y_i$  - položaj u "Simpleska" rešetci

Tabela 3. Koeficijenti frikcije frikcionih materijala sa 8% Pb

Broj uzor.	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$K_{f1}$	$K_{f2}$	$\bar{K}_f$	$\hat{K}_f$	$y_i$
1.	1	0	0	0,60	0,58	0,59	0,59	$y_1$
2.	0	1	0	0,49	0,47	0,48	0,48	$y_2$
3.	0	0	1	0,57	0,53	0,55	0,55	$y_3$
4.	2/3	1/3	0	0,51	0,49	0,50	0,50	$y_{112}$
5.	1/3	2/3	0	0,50	0,48	0,49	0,49	$y_{122}$
6.	0	2/3	1/3	0,53	0,49	0,51	0,51	$y_{223}$
7.	0	1/3	2/3	0,54	0,54	0,54	0,54	$y_{233}$
8.	1/3	0	2/3	0,51	0,51	0,51	0,51	$y_{133}$
9.	2/3	0	1/3	0,56	0,54	0,55	0,55	$y_{113}$
10.	1/3	1/3	1/3	0,51	0,51	0,51	0,51	$y_{123}$
11.	0,6	0,2	0,2	0,52	0,50	0,51	0,52	$y_{01}$
12.	0,2	0,6	0,2	0,52	0,48	0,50	0,50	$y_{02}$
13.	0,2	0,2	0,6	0,52	0,52	0,52	0,51	$y_{03}$
14.	0,15	0,30	0,35	0,51	0,49	0,50	0,51	$y_{04}$

$z_{1,2,3}$  - koordinate u "Simpleska" rešetci,

$K_{f1,2}$  - izmerene vrijednosti koeficijenata frikcije za I i II ciklus trenja,

$\bar{K}_f$  - srednje vrijednosti koeficijenata frikcije,

$\hat{K}_f$  - vrijednosti koeficijenata frikcije izračunate iz regresionog polinoma,

$y_i$  - položaj u "Simpleska" rešetci

Tabela 4. Koeficijenti frikcije frikcionih materijala sa 11% Pb

Troj. izvor.	$z_1$	$z_2$	$z_3$	$K_{f1}$	$K_{f2}$	$\bar{K}_f$	$\hat{K}_f$	$y_i$
1.	1	0	0	0,56	0,52	0,54	0,54	$y_1$
2.	0	1	0	0,47	0,42	0,44	0,44	$y_2$
3.	0	0	1	0,55	0,55	0,55	0,55	$y_3$
4.	2/3	1/3	0	0,49	0,47	0,48	0,48	$y_{112}$
5.	1/3	2/3	0	0,47	0,47	0,47	0,47	$y_{122}$
6.	0	2/3	1/3	0,48	0,48	0,48	0,48	$y_{223}$
7.	0	1/3	2/3	0,52	0,52	0,50	0,50	$y_{233}$
8.	1/3	0	2/3	0,52	0,52	0,50	0,50	$y_{133}$
9.	2/3	0	1/3	0,54	0,54	0,51	0,51	$y_{113}$
10.	1/3	1/3	1/3	0,54	0,54	0,51	0,51	$y_{123}$
11.	0,6	0,2	0,2	0,52	0,50	0,52	0,52	$y_{01}$
12.	0,2	0,6	0,2	0,52	0,48	0,50	0,50	$y_{02}$
13.	0,2	0,2	0,6	0,52	0,52	0,52	0,51	$y_{03}$
14.	0,1	0,3	0,1	0,48	0,46	0,47	0,47	$y_{04}$

$z_{1,2,3}$  - koordinate u "Simpleska" rešetci,

$K_{f1,2}$  - izmerene vrijednosti koeficijenata frikcije za I i II ciklus trenja,

$\bar{K}_f$  - srednje vrijednosti koeficijenata frikcije,

$\hat{K}_f$  - vrijednosti koeficijenata frikcije izračunate iz regresionog polinoma,

$y_i$  - položaj u "Simpleska" rešetci

Veličine  $K_{f1}$  i  $K_{f2}$  su srednjedostne vrijednosti koeficijenata frikcije za prvi i drugi ciklus trenja, očitane sa dijagrama dobijenih ispitivanjem na mašini RANZI-CUNA.

$\bar{K}_f$  je srednjedostna vrijednost koeficijenta frikcije iz  $K_{f1}$  i  $K_{f2}$ . Veličina  $\hat{K}_f$  je vrijednost koeficijenta frikcije izračunata iz regresionog polinoma. Oznaka  $y_i$  ima vrijednost srednjeg koeficijenta frikcije  $\hat{K}_f$  i određuje položaj ispitivanog uzorka friкционog materijala u simplexu rešetci prikazanoj na slici 2.

Na bazi rezultata prikazanih u tabelama 1-4 izračunati su regresioni polinomi za svaku grupu ispitivanih sinterovanih frikcionih materijala sa 2, 5, 8 i 11% Pb, prema jednačinama (1-9).

Regresioni polinom za koeficijent frikcije sinterovanih frikcionih materijala sa 2% Pb:

$$\hat{y} = 0,63z_1 + 0,55z_2 + 0,64z_3 - 0,068z_1z_2 - 0,472z_1z_3 - 0,90z_2z_3 + 0,020z_1z_2(z_1 - z_2) + 0,158z_1z_3(z_1 - z_3) - 0,135z_2z_3(z_2 - z_3) + 0,360z_1z_2z_3 \quad (12)$$

Regresioni polinom za koeficijent frikcije sinterovanih frikcionih materijala sa 5% Pb:

$$\hat{y} = 0,58z_1 + 0,52z_2 + 0,59z_3 - 0,202z_1z_3 + 0,270z_1z_2(z_1 - z_2) + 0,225z_1z_2(z_1 - z_3) + 0,360z_2z_3(z_2 - z_3) + 0,517z_1z_2z_3 \quad (13)$$

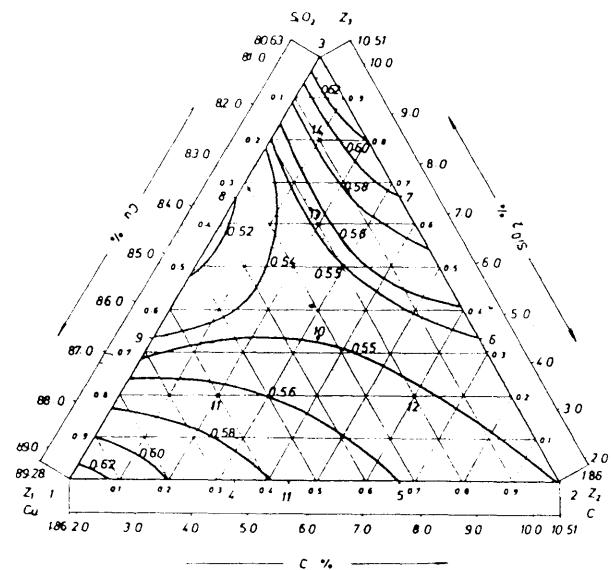
Regresioni polinom za koeficijent frikcije sinterovanih frikcionih materijala sa 8% Pb:

$$\hat{y} = 0,59z_1 + 0,48z_2 + 0,55z_3 - 0,180z_1z_2 - 0,180z_1z_3 + 0,045z_2z_3 - 0,180z_1z_2(z_1 - z_2) + 0,180z_1z_3(z_1 - z_3) + 0,135z_1z_2z_3 \quad (14)$$

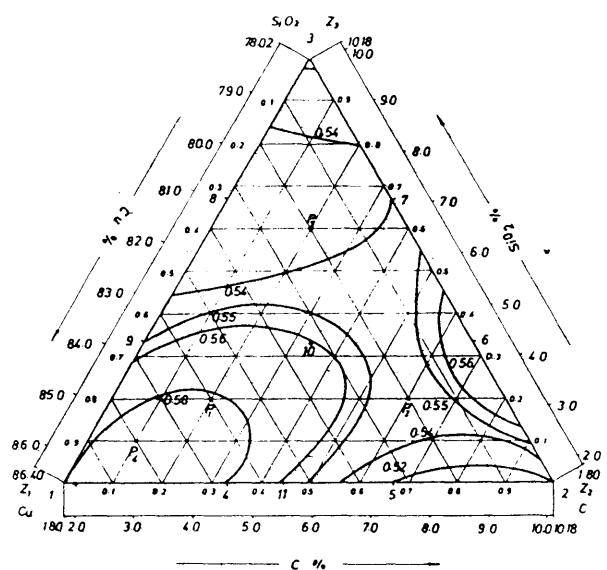
Regresioni polinom za koeficijent frikcije sinterovanih frikcionih materijala sa 11% Pb:

$$\hat{y} = 0,54z_1 + 0,44z_2 + 0,55z_3 - 0,068z_1z_2 - 0,180z_1z_3 - \\ - 0,022z_2z_3 - 0,158z_1z_2(z_1-z_2) + 0,090z_1z_3(z_1 - \\ - z_3) + 0,112z_2z_3(z_2 - z_3) + 0,810z_1z_2z_3 \quad (15)$$

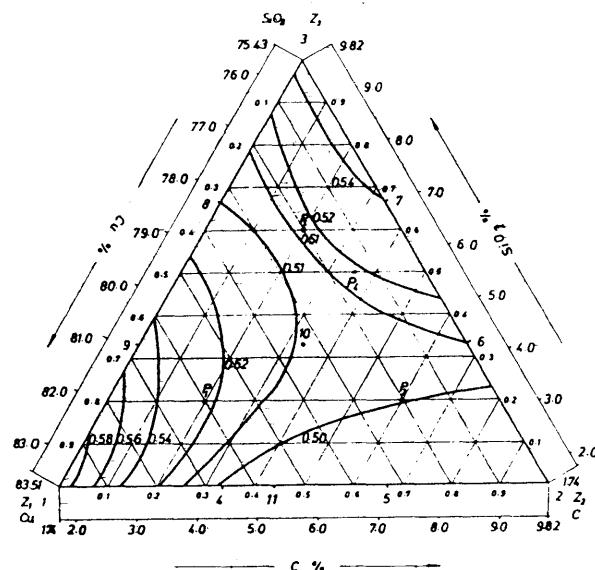
Iz rezultata eksperimenata datih u tabelama 1-4 izračunatih regresionih polinoma (12)-(15), kompjuterskom obradom konstruirane su izo-krive koeficijenata frikcije, prikazane u simpleks rešetkama na slikama 3-6.



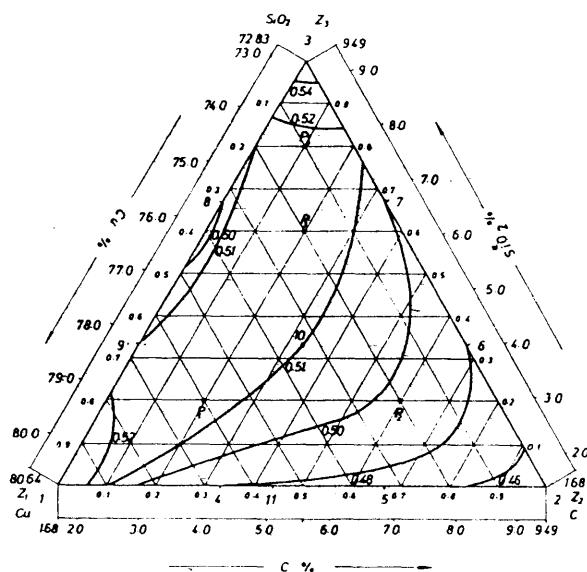
S1.3. Izo-krive koeficijenta frikcije materijala sa 2% Pb



S1.4. Izo-krine koeficijenta frikcije materijala sa 5% Pb



S1.5. Izo-krine koeficijenta frikcije materijala sa 8% Pb



S1.6. Izo-krine koeficijenta frikcije materijala sa 11% Pb

### 3. ZAKLJUČAK

U radu su ispitani sinterovani friкционni materijali koji predstavljaju petokomponentne pseudolegure Cu-Sn-Pb-grafit-SiO<sub>2</sub>. Prisustvo svake od komponenata utiče na vrijednosti koeficijenta frikcije materijala. Simpleks plan omogućuje praćenje osobina materijala pri istovrijemenoj promjeni tri komponente. U ovom slučaju to su bakar, grafit i SiO<sub>2</sub>. Utjecaj olova prati se kroz pet simplex rešetki, sa 2,5,8 i 11% Pb. Procentualni sadržaj kalaja je konstantan kod svih ispitivanih materijala i iznosi 5%. Na ovaj način, primjenom simplex planova, omogućeno je da se sist-

matski prate promjene koeficijenta frikcije sinterovanih friкционih materijala, u zavisnosti od četiri, od ukupno pet priutnih komponenti koje grade frikcione materijale.

#### LITERATURA

- /1/ FEDORČENKO I.M., KRJAČEK V.M., PANAIOTI I.I.: Sovremennye frikcionnye materialy, Naukova dumka, Kiew, 1975.  
/2/ NEWMAN L.B.: Friction Materials - Recent Advan-

- ces, NDC, Park Ridge, 1981.  
/3/ PANTELIĆ I.: Uvod u teoriju inženjerskog eksperimenta, Novi Sad, 1976.  
/4/ COLLINS B.T.: Friction and Antifriction Materials, Volume 4, New York, 1970.  
/5/ ZEDGINIDZE I.G.: Matematicheskoe planirovaniye eksperimenta dlja issledovaniya i optimizacii svojstv smesej, Mecničerba, Tbilisi, 1971.  
/6/ NEDELJKOVIĆ N.: Prilog izučavanja sinterovanih friкционih materijala, Bor, 1982.

## OBAVEŠTENJE PRETPLATNICIMA

Na osnovu sagledane strukture troskova izdavanja našeg i Vašeg časopisa "Tribologija u industriji" u 1990. godini ocenili smo da bi minimalna pretplata za narednu godinu morala da iznosi 1.000,- dinara za radne organizacije, odnosno 500,- dinara za pojedince.

Nadamo se da ćemo sa ovom cenom uspeti da obezbedimo redovno izlaženje časopisa u 1990. godini uz odgovarajuću pomoć Republike zajednice nauke i drugih društvenih institucija.

Redakcija časopisa  
"TRIBOLOGIJA U INDUSTRIJI"