tribologija u industriji

YU ISSN 03551-1642
GODINA X
DECEMBAR 1988.
4

10
GODINA
1978-1988

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

YU ISSN 0351—1642

GODINA X
BROJ 4
DECEMBAR 1988.

tribologija u industriji

sadržaj contents содержание

UVODNIK
INTRODUCTION
ПЕРЕДОВИЦА

B. JEREMIĆ: Osvrt na tribološka istraživanja u SAD - A short survey of tribological reserch in the U.S.A. - Коротко о трибологических исследованиях в США 99

ISTRAŽIVANJA
RESEARCH
ИССЛЕДОВАНИЯ

HOLODILOV O.V., GRIGOREV A. A., MIŠKIN N.K.: Novi aspekti istraživanja hrapavosti površina u tribologiji - New aspects of surface roughness assessment in tribology - Новые аспекты оценки шероховатости поверхности в трибологии 101

M. JANKOVIĆ: Istraživanje trenja poroznih radijalnih kliznih ležišta od kalajne bronze - Investigation of friction in porous bronze radial sliding bearings - Исследования трения пористых радиальных подшипников скольбения из оловянной бронзы . . . 114

*** Desetogodišnji pregled istraživačkih i stručnih radova - Ten-Vear survey of research and technical papers - Десятилетное содержание статьей из области исследования по трибологии 118

NOVOSTI
NEWS
ИЗВЕСТИЯ

Zlatna medalja za tribologiju 1988. 122

KNJIGE I ČASOPISI
BOOKS AND JOURNALS
КНИГИ И ЖУРНАЛЫ

. 125

NAUČNI SKUPOVI
SCIENTIFIC MEETINGS
НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ

. 127

REZIMEA
ABSTRACTS
РЕЗЮМЕ

. 128

B. JEREMIĆ

Osvrt na tribološka istraživanja u SAD

Na osnovu izvršenih analiza procenjeno je da su vladine organizacije u USA osamdesetih godina učestvovale u finansiranju 640 većih istraživačkih projekata iz oblasti tribologije. Polovinom ove decenije od navedenog broja projekata u fazi realizacije je bilo oko 200, finansiranih od 21 različite vladine organizacije.

Najveći broj projekata je bio finansiran od strane ministarstva odbrane. Na taj način bi se rezultati istraživanja prvenstveno koristili kod proizvoda vojne industrije.

Drugi veoma značajan segment aktivnosti u oblasti tribologije je iniciran i finansiran od strane ministarstva za energiju. Rezultati istraživanja treba da doprinesu razvoju novih maziva i materijala elemenata tribo - mehaničkih sistema. Cilj ovih istraživanja je minimizacija trenja uz obezbedjenje smanjenja godišnje potrošnje energije u USA za 11 odsto.

Svi istraživački projekti u USA iz oblasti tribologije klasifikovani su prema:

- predmetu istraživanja,
- cilju istraživanja,
- nivou uštede energije,
- vrsti istraživanja,
- fenomenu koji se istražuje,
- promenljivim veličinama od značaja za istraživani fenomen,
- tipu kretanja kontaktnih elemenata,
- vrsti materijala kontaktnih elemenata i
- mogućnosti direktne primene dobijenih rezultata.

Najveći deo triboloških istraživanja u USA je usmeren za potrebe:

- mornarice,
- vazduhoplovstva,
- armije,
- nacionalne aeronautike (NASA),
- nacionalne naučne fondacije,
- nacionalnog biroa standarda,
- ministarstva energije.

Tako se istraživanja za potrebe mornarice, vazduhoplovstva, armije i NASA odnose na:

- nove materijale kontaktnih elemenata,
- procese habanja (abrazija, erozija, freting i kavitacija),
- procese trenja,
- oplemenjivanje kontaktnih slojeva (prevlake),
- nove vrste maziva (čvrsta i tečna) za podmazivanje u vakumu i pri visokim temperaturama,
- otkaze prouzrokovane razvojem triboloških procesa,
- topografiju kontaktnih površina,
- tribološke procese kod zupčanika, kotrljajućih ležišta i zaptivki.

U osnovi, navedena istraživanja treba da doprinesu povećanju pouzdanosti namenske opreme i značajnom smanjenju troškova njenog održavanja.

Projekti za potrebe nacionalne naučne fondacije su usmereni na:

- modeliranje tribomehaničkih sistema,
- materijale elemenata tribomehaničkih sistema,
- dijagnostiku tribomehaničkih sistema,
- transfer tribotehnoloških znanja,
- razvoj novog koncepta u tribologiji.

Napravljene analize ukazuju da je predmet triboloških istraživanja (izražen u procentima u odnosu na ukupan broj) sledeći:

- maziva i hidraulički fluidi	18%
- materijali i prevlake	16,7%
- trenje i otkazi zbog habanja	14,3%
- kotrljajuća ležišta	7,9%
- čvrsta maziva	6%
- ostalih petnaest oblasti	37,1%

Otkrivanje, odnosno prognoziranje otkaza opreme je glavni prioritet u tehnologiji održavanja. Ovo ima dominantan uticaj na orijentaciju istraživačkih programa u USA u oblasti istraživanja tribološkog otkaza (otkaz nastao kao posledica razvoja triboloških procesa).

Svi istraživački programi prema postavljenom cilju orijentisani su na:

- povećanje veka trajanja elemenata tribomehaničkih sistema i smanjenje troškova održavanja 32,4%
- fundamentalna istraživanja 29,7%
- razvoj visokotemperaturskih maziva 17,8%
- razvoj novih materijala 9,2%
- ušteda energije 5,4%
- ostale tri oblasti 5,5%

Kada su u pitanju istraživanja vezana za materijale elemenata tribomehaničkih sistema, odnosi su sledeći:

- metali 36,8%
- tečna maziva 15,4%
- keramika 10,9%
- prevlake 8,9%
- aditivi 6%
- ostalih devet grupa materijala 22%

Neke analize sačinjene u USA ukazuju na činjenicu da se u budućnosti očekuju intenziviranja triboloških istraživanja u oblasti:

- čvrstih i tečnih maziva za visoke temperature i vakum,
- šire primene metoda oplemenjivanja kao i kontrole karakteristika i debljine oplemenjenog sloja u uslovima eksploatacije,
- korišćenja keramičkih materijala kod tribomehaničkih sistema izloženih visokim temperaturama i
- primene kompozitnih materijala za izradu kontaktnih elemenata tribomehaničkih sistema.

Svim našim
čitaocima
želimo
srećnu i uspešnu
1989. godinu

Redakcija časopisa
TRIBOLOGIJA U INDUSTRIJI

UDK 620.93.003.1:621.891

HOLODILOV O.V., GRIGOREV A.A., MIŠKIN N.K.

Novi aspekti istraživanja hrapavosti površina u tribologiji

- S ruskog preveo: dr Miodrag Lazić -

1. UVOD

Mikrogeometrija površina elemenata mašina i mehanizama je jedan od važnijih eksploatacionih parametara uticajnih na pouzdanost rada i vek trajanja proizvoda. Zbog toga, proučavanje topografije površina predstavlja veoma aktuelni zadatak, a njegovo korektno rešenje obezbedjuje tačnije opisivanje procesa koji nastaju pri kontaktu tvrdih tela.

Ispitivanja toplografije zahtevaju rešavanje tri osnovna problema: analitičko opisivanje površina, razrada sistema prikazivanja parametara i tehničke realizacije procesa izvodjenja merenja. Svi ovi problemi su medjusobno zavisni i kompleksni. Medjutim, tehnička realizacija procesa merenja obezbedjuje direktnu identifikaciju realnih osobina površina i kao takva ima poseban značaj.To iz razloga što kvalitativna i kvantitativna ocena, formirana merenjima, predstavlja osnov teorijskih analiza procesa u površinskim slojevima i u skladu s tim, razjašnjenja mehanizama odvijanja pojedinih procesa. Zato, pitanja merenja parametara hrapavosti imaju primarni značaj pri ispitivanju topografije.

2. GEOMETRIJA POVRŠINA

Odstupanje realne površine od idelane-glatke, kao što je poznato, rezultat je dejstva niza različitih faktora na objekat. Svi faktori se, po svojoj suštini, mogu razvrstati na tehnološke, eksploatacione i strukturne |11, 33|. Visina obrazovanih neravnina nalazi se u veoma širokim granicama. Kada su minimalne visine neravnina,formiranih kao rezultat diskretne prirode materijala, ograničene na nivo atomarnih i nadmolekularnih dimenzija, tada su maksimalne visine proporcionalne dužini razmatranog profila |33|. Očigledno je da pri tome nema bilo kakvih ograničenja u postojanju neravnina različitih dimenzionalnih oblasti - dijapazona (kako u pogledu koraka tako i u pogledu visina). Medjutim, bez obzira na to što ne postoje kompleksno definisani kriterijumi dimenzionalnog razvrstavanja visina, usaglašena je definicija površine kao skup neravnina četiri dimenzionalna nivoa: makro - odstupanja, valovitosti, hrapavosti i sub-hrapavosti.Osnova ovakve klasifikacije je teorema superponiranja odstupanja, uslovljenih nezavisnim faktorima |11|.

Osnovni uzroci nastanka makro-odstupanja (koničnost, granost, buričatost, itd.) su, na primer, greške postavljanja i stezanja predmeta obrade u procesu obrade, pojava elastičnih deformacija elemenata tehnološkog sistema (mašina-pribor-alat-predmet obrade), habanje reznih elemenata alata itd. Sve su to uzroci koji dovode do odstupanja oblika realne površine ili profila od odgovarajućih parametara, naznačenih konstruktivnom dokumentacijom.

Valovitost je rezultat sistematskih dinamičkih procesa formiranja-oblikovanja proizvoda. Karakteristične dimenzije valovitosti su:

- rastojanje vrhova talasa 0,8 - 10 mm i
- visina talasa 0,03 - 500 μm

Po važećim standardima (ISO, GOST,...) hrapavost površina je skup svih neravnina sa relativno malim korakom (odnos korak/visina manji od 40). Po pravilu hrapavost se posmatra kao uslovno-slučajna karakteristika razaranja površinskih slojeva i proces "kopiranja" pri kontaktnim medjudejstvima (na primer, interakcija rezni alat - predmet obrade).

Finija struktura, koju čine bočne neravnine udubljenja i uzvišenja profila površine, definiše se kao sub-hrapavost ili hrapavost 2-gog reda. Sub-hrapavost zavisi, u značajnoj meri, od strukture, materijala i njegovog naponskog stanja. Karakteristične dimenzije se kreću sve do atomarnih |5,7|. U praktičnim zadacima ograničeno je izračunavanje dimenzija neravnina do 2 nm, što je povezano sa očuvanjem obrazovanih osobina konti-

nualnog tvrdog tela.

Zakonitosti raspodele visina neravnina

Pri razmatranju zakonitosti raspodele visina neravnina, treba imati u vidu činjenicu da se analiza i merenje izvodi u odgovarajućem dijapazonu koraka i visine neravnina. Ograničenje u pogledu oblasti izmene parametara neravnina (koraka i visine) uslovljena je normiranim karakteristikama merne instrumentacije. Zbog toga, ako je potrebno u prikazanoj klasifikaciji razdvojiti zakone raspodele na odgovarajućim dimenzionalnim nivoima, dobijene ocene raspodele karakterišu samo neki uzorak (izvod) iz svih mogućih vrednosti odstupanja površina.

Parametri raspodele visina neravnina hrapavosti odredjeni su, u osnovi, tehnološkim faktorima |26, 40|. Tako je, na primer, za površine obradjene peskarenjem i elektroerozionom obradom, primenljiv normalni zakon raspodele |34|. Pojava kinematski ili geometrijski deterministički oblikovanog alata (pri struganju, rendisanju, glodanju, itd.) dovodi do sistematske komponente a time i bimodalnosti zakona raspodele |40|. Za sub-hrapavost, zbog nepostojanja odgovarajuće eksperimentalne bazne površine postoje samo teorijske pretpostavke o obliku raspodele visine neravnina |46|.

Napred razmatrani pojmovi su osnova prikazivanja hrapavosti površina u takvim oblastima kao što su mehanika, tehnologija obrade, teorija trenja, termodinamika,itd. U osnovi, prema postojećim definicijama, površina se razmatra kao realizacija nekog slučajnog polja |20,28,35|, čije su karakteristike rezultat analize dvodimenzionalnih izvoda - dijagrama profila (profilograma). Sistem ocene topografije, pri tome, bazira na analizi histogramskih karakteristika neravnina u nekom dijapazonu njihovih vrednosti.

Karakteristika takvog prilaza je ignorisanje medjuzavisnosti i medjusobnog odnosa neravnina (isključujući podatak da se površine mogu klasificirati kao izotropne i anizotropne). To znači da se prostornoj organizaciji neravnina ne posvećuje pažnja. Kompleksna ispitivanja površina, različite prostorne strukture, su pokazala da se, praktično, sve dobijene kvantitativne karakteristike (histogramske, korelacione, spektralne) nalaze u granicama greške merenja, bez obzira na postojanje značajnih razlika kod ispitivanih objekata. Ta činjenica ne dozvoljava utvrdjivanje kriterijuma za ocenu karaktera medjusobne razlike površina.

3. TOPOGRAFIJA I TOPOLOGIJA POVRŠINA

U radu |37| analizirani su principijelni uzroci i razlozi, zbog kojih se topografske osobine površina ne mogu identifikovati samo pomoću histogramskih parametara. U pojedinostima je pokazano da se, na osnovu tih karakteristika, ne može formirati zadovoljavajući prognostički model. Svaki pogodan model pokazao se, u konačnom rezultatu, primenljivim samo u granicama onih vrednosti, koje su iskorišćene za formiranje modela. Primena takvih modela može dovesti do neočekivanih rezultata. Na primer, superponiranjem njegovih parametara može se dobiti dovoljno dobar opis "praktično svake pojave" pa i pojava koje se ne odnose na razmatranu oblast. Imajući u vidu da savremeni pribori daju oko 50 različitih karakteristika, koje se mogu koristiti za dalje analize, sve je očigledniji nedostatak pogodnog prilaza ovoj problematici.

Za pravilno predstavljanje površina neophodno je stvoriti mogućnosti za njihovo prikazivanje kao prostornog objekta odredjene topologije. Pri tome se mogu, u kraj - njoj meri, izdvojiti dva nivo shvatanja, koja to omogućuju. Prvo od njih bazira na medjusobnoj strukturnoj organizaciji neravnina, a drugo na morfološkoj gradji elementarnih objekata koji čine površinu.

Strukturna organizacija neravnina

Strukturna organizacija neravnina može se opisati korišćenjem teksturnih obeležja, koja se široko primenjuju pri rešenju različitih zadataka u oblasti analize rezultujuće informacije (prikaza, fotografije i sl.). Bez obzira na dovoljno jasnu definiciju pojma teksture, formalno odredjivanje ovog objekta je relativno složeno. Respektivno se ovaj pojam može uvesti na sledeći način |19|:

1. Na površini se može naći fragment, "slika" koja se regularno ponavlja u granicama oblasti, koja je velika u poredjenju sa dimenzijama fragmenata.
2. "Slika" predstavlja elementarne sastavne delove framenata, rasporedjenih u nekom neslučajnom poretku.
3. Elementarni deo je primerno jednorodna jedinica, približno istog oblika u kompletnoj teksturnoj oblasti.

Obrazovanje teksture se, obično, povezuje sa neslučajnim karakterom spoljašnjih medjudejstava oblikovanja (kinematika kretanja reznog alata, različiti vidovi deformisanja, itd.).

Posmatrano na kvalitativnom nivou tekstura može imati jedan ili više oblika. Ona može biti sitno-zrnasta, krupno-zrnasta, glatka, u vidu graška (granulasta), neuredjena linearno, neregularna, bregasta, itd. Svaki od ovih oblika predstavlja obeležje prostornog rasporeda elementarnih komponenti teksture. Kvantitativno identi-

fikovanje i merenje teksture podrazumeva primenu autokorelacionih funkcija, različitih optičkih i digitalnih pretvarača, usaglašene terminologije opisivanja strukturnih elemenata, matrice susedstva analiziranih obeležja, dužine serije i autoregresionih modela. Karakter raspodele neravnina u prostoru, prema zapažanjima niza autora |13, 25, 29, 47|, suštinski utiče na eksploatacione parametre proizvoda. Tekstura se nekim standardima (na primer, GOST), pojednostavljeno prikazuje kao "nepravilnost obrade". Pri tome je propisan i način prikazivanja tipova tekstura u konstruktivnoj dokumentaciji. Bez obzira na to, parametri kojima se opisuje tekstura praktično se ne koriste u analitičkim modelima, mada neki istraživači ukazuju na potrebu njihovog uvodjenja |1|. Dati navod se objašnjava nizom razloga, medju kojima treba uočiti, pre svega, nedostatak odgovarajućih metoda merenja.

Morfologija površina

Osim teksturnih obeležja, koji se mogu razmatrati kao "fonska" prostorna karakteristika, na površini se uočava skup specifičnih elemenata. U te elemente se ubrajaju pore, pukotine, pojedine neravnine, čestice abraziva, delovi različitog tipa nehomogenosti, itd. Elementi, često, predstavljaju osnovu niza ispitivanja, u kojima se upravo njihovom pojavom objašnjavaju mnogi procesi nastali pri kontaktu tvrdih tela. To znači da su pojmovi "tekstura" i "element" medjusobno oredjeni i uslovljeni. Unutrašnji odnos izmedju ovih pojmova može se opisati na sledeći način: ako je izmena lokalnih karakteristika, u granicama neke oblasti, mala tada je dominantno obeležje geometrijskih osobina površina morfologija elemenata. U suprotnom kada se navedene karakteristike suštinski menjaju tada je preovladujuće obeležje oblasti tekstura.

Na površini se, evidentno, može izdvojiti i nih drugih struktura, koje sačinjavaju njenu gradju. Te strukture se nalaze u odgovarajućem hijerarhijskom redosledu. Upravo ovaj aspekt posmatranja površina, u savremenoj teoriji predstavlja osnovu mnogih istraživanja. Tako, na primer, postoje istraživanja po kojima se površina posmatra kao realizacija izdvojenih delova |10, 27|, tj. struktura koja se ponavlja na različitim dimenzionalnim nivoima formiranja. Takva struktura je definisana procedurom stohastičke interpolacije |10, 27|. Osnovne osobine izdvojenih delova uslovljene su rekursivnim odredjivanjem morfologije obrazovanih površina. Teorija izdvojenih delova se, dosta dobro, može primeniti za opisivanje površina formiranih peskarenjem. To su površine koje se, tradicionalno, ubrajaju u površine sa čisto slučajnom strukturom. U celini posmatrano, primena teorije izdvojenih delova, odražava takve osobine površina, kao što su, neprekidnost i korelaciona povezanost svih njenih tačaka u prostoru.

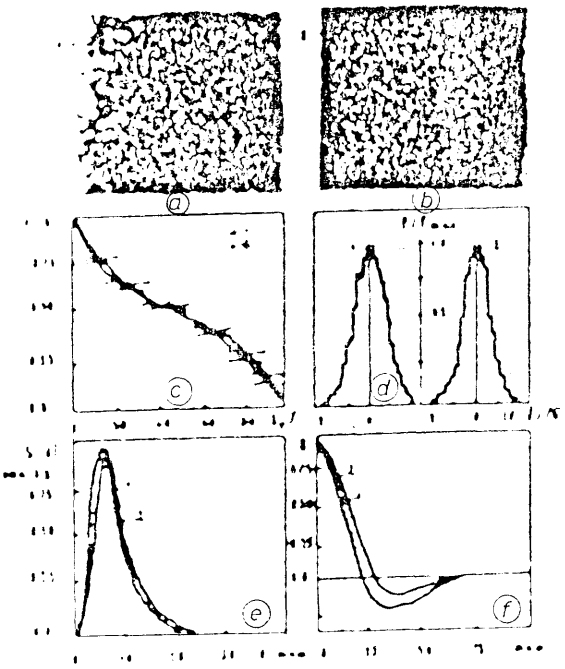
Evidentno je da površina predstavlja složeni strukturno organizovani geometrijski objekt, čije su karakteristike uslovljene kako dimenzionalnim (metričkim) tako i faktorima kojima se identifikuje topolognja, njenog formiranja (topološki faktori).

Medjutim, savremeni prilaz (kod rešavanja zadataka u oblasti teorije trenja) karakteriše prilaz sa odgovarajućom analizom samo metričkih karakteristika površina. Neadekvatnost takvog prilaza zapažena je od strane niza autora. Tako je, na primer, niz autora, ukazao na potrebu istovremene analize informacija dobijenih i na profilometru i na mikroskopu.

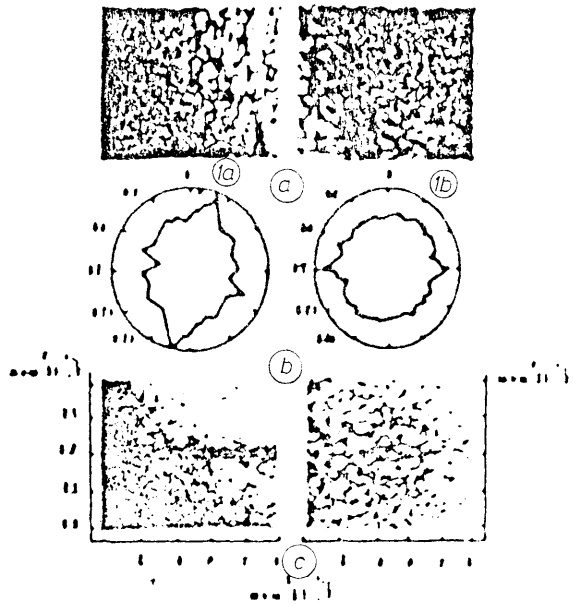
Geometrijske i topološke karakteristike zahtevaju različite postupke prikazivanja izlazne informacije. Tako na primer, za kvantitativnu ocenu geometrijskog odnosa potrebno je poznavanje samo nekih parametara, kao što je to, na primer, visina neravnina. Pri tome nije potrebno i poznavanje odnosa njihovih koordinata u prostoru. Izbor vrednosti parametara može biti organizovan na odgovarajući proizvoljan način. Merenje hrapavosti duž njene trase sa vektorskom organizacijom, noštva dobijenih rezultata je najčešće primenjivani prilaz za identifikovanje ovih parametara. Medjutim, interpretacija rezultata je jedan od značajnijih aspekata. Problem je u tome što površina predstavlja trodimenzionalni merni objekat, a analiza njenih karakteristika se, u datom slučaju, izvodi na osnovu dvodimenzionalnih isečaka profila. U takvoj analizi se može uočiti čitav niz grešaka. Razvijene teorije obezbedjuju odgovarajuću korelacionu razradu i analizu samo za površine odgovarajuće klase 7 . To znači da je, u opštem slučaju, procedura raspodela dvo-dimenzionalnih karakteristika objekta, sa trodimenzionalnim mernim svojstvima, netrivijalna. Tako, na primer signal zavisan od jedne prostorne promenljive zahteva drugi postupak obrade od signala, koji zavisi od dve prostorne promenljive. Primena metoda jednodimenzionalne spektralne analize na rešavanje zadataka u oblasti proučavanja površina ne omogućuje, kao što je to prikazano na sl. 1e,f, identifikovanje razlika u osobinama površina. Nasuprot tome, dvodimenzionalna Furijeva transformacija (sl. 2c) savršeno jasno ukazuje na evidentne razlike.

Topologija površina

Tekstura i morfologija, objedinjene opštim pojmom, topologija površina, za svoju kvantitativnu ocenu zahtevaju poseban postupak prikazivanja informacija - rezultata. To su postupci odgovarajuće funkcionalne transfor-



Sl. 1. - Snimak površine formiran na raster elektronskom mikroskopu
a-anizotropna (indeks 1); b-izotropna hrapavost (indeks 2), c-krive nošenja profila; d-krive raspodele visina neravnina profila; e-grafik spektralnih gustina; f-autokorelacione funkcije profila



Sl. 2. - Rezultati obrade elektronograma (snimaka na mikroskopu - indeks 1) za površinu "a" - indeks 2, za površinu "b" sa sl. 1)
a-segmentiranje i iznalaženje okosnice; b-obrnuti histogram broja tačaka sekundarnog snimka u zadatom pravcu sabijanja; c-dvomerna spektralna gust.snimka

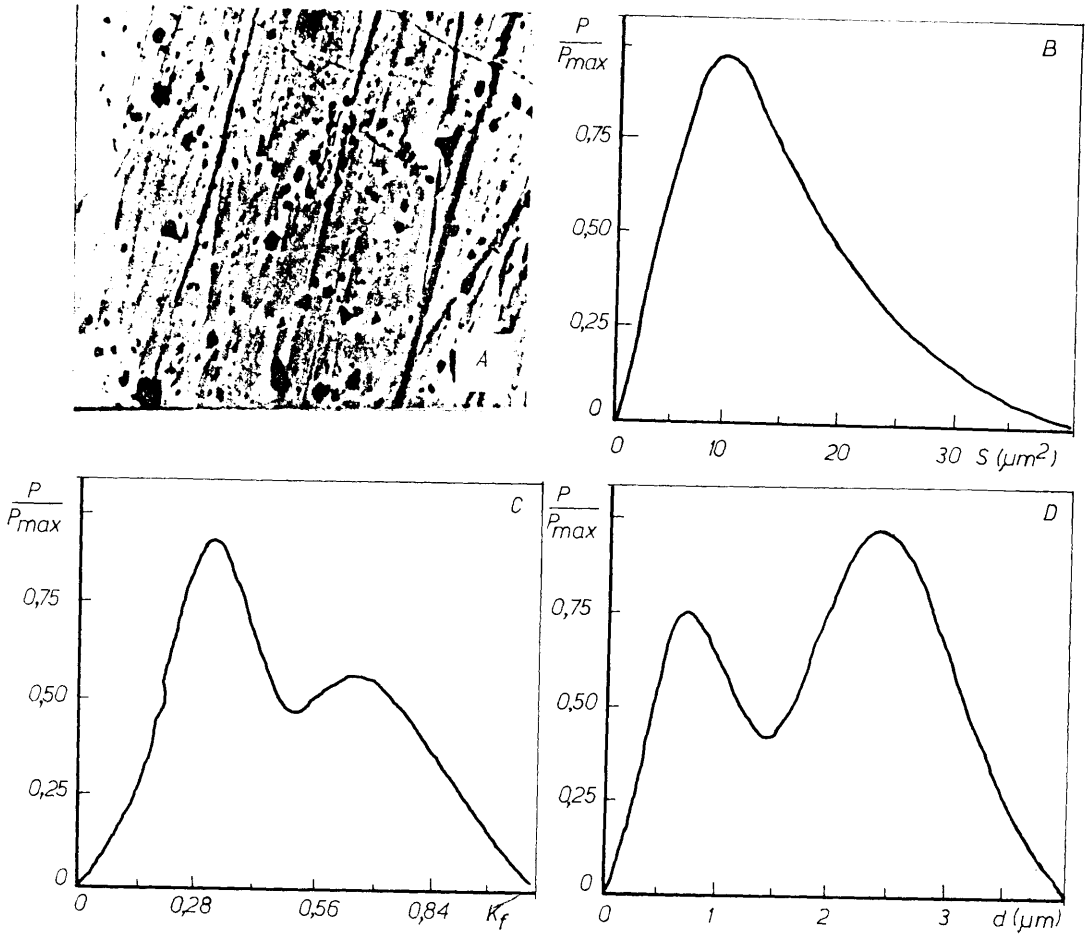
macije geometrijskih osobina površina u niz tačaka različitog stepena osvetljenosti. Postojeći analitički aparat teorije obrade podataka i informacija dozvoljava dovoljno efektivno izdvajanje i analiziranje različito formiranih površina, shvaćenih kao neki vizuelno-interpretirajući element. Tako je, na primer, na sl. 2.a prikazan rezultat obrade snimka površina (sl. 1.a i b). Obrada se sastoji u njihovoj segmentaciji i iznalaženju okosnice, koja obezbedjuje izdvajanje tekstura ispitivanih površina.Dalja analiza dobijenih binarnih snimaka površina, metodama obrtnih histograma, stvara uslove za odredjivanje pretežne orijentacije neravnina i pravca njihovog grupisanja (sl. 2.b). Na sl. 3 i u tablici 2 prikazani su rezultati odredjivanja karakteristika poroznosti uzoraka izradjenih od mesinga, a nakon abrazivnog habanja.

Evidentno je da se, u datom slučaju, mogu korektno ispitivati samo dvodimenzionalne osobine površine. Ova činjenica objašnjava se nepostojanjem direktne zavisnosti izlazne informacije i trodimenzionalne merne strukture objekta. Korišćenje informacije u obliku snimanja olakšava zadatak izdvajanja i analize različitih elemenata, prema njihovim projektovanim karakteristikama. Medjutim, takva informacija ne obezbedjuje kvantitativnu ocenu neravnina.

Formiranje prostornih karakteristika površina, na bazi njihovih odgovarajućih snimaka, je moguće samo korišćenjem odgovarajućih modelskih prikaza osobina struktura. Na primer, pri odredjivanju poroznosti najpre se nalazi površina pora, a na osnovu iste, za svaku od pora, izvodi se aproksimacija, unutrašnjeg prostora pora, segmentom obrtnog elipsoida sa odgovarajućom površinom preseka. Zapremina segmenta odgovara zaprimeni pore. To znači da je neophodno, istovremeno sa formiranjem snimka, koristiti mnoštvo podataka, organizovano tako da je svaka tačka snimka prikazana u odgovarajućoj veličini, koja karakteriše njen položaj po visini. Snimak se koristi za izdvajanje i identifikaciju različitih struktura a matrica ordinata za njihovu kvantitativnu ocenu.

4. METODE IDENTIFIKACIJE KARAKTERISTIKA TOPOLOGIJE POVRŠINA

Savremene metode merenja parametara hrapavosti su metode profilometrisanja - profilografisanja. To su istovremeno i najčešće korišćene metode |11, 14|. Česta primena ovih metoda se objašnjava jednostavnom šemom registrovanja i analize izlaznih informacija. Osnova ovih metoda je mehaničko ispitivanje neravnina, indikatorom (davačem), i prenos oscilovanja indikatora na osetljivi davač, koji pretvara mehaničko oscilovanje u električni signal. Pri linearnoj karakteristici davača, formirani signal predstavlja



Sl. 3. - Morfološka analiza poroznosti

a - snimak ispitivane površine; b - raspodela pora na površini; c - raspodela pora po koeficijentu oblika; d - raspodela pora po dimenzijama

TABLICA 1. - Rezultati merenja parametara hrapavosti

Parametar	Oznaka	jed. mere	Uzorak 1	Uzorak 2
Srednje aritm. odstup. od sred.linije prof.	Ra	μm	3.2±0.5	2.3±0.3
Maksim. visina neravn.	R_{max}	μm	19.3±4.2	15.9±9.0
Srednja visina neravn.	R_z	μm	15.0±3.7	12.2±1.4
	S_m	μm	165.9±44.4	117.7±8.7
	S	μm	56.7±18.6	43.2±7.6
Asimet.raspod.visina neravnina	R_{sk}	-	-0.1	-0.4
Odstup.raspod.visine neravnina	R_{ku}	-	0.03	0.04
Sred.ugao nag.nerav.	A	(°)	21.9±1.5	21.0±1.1
Asimet.raspod.ugla nagiba neravnina	A_{sk}	-	-0.4±0.1	0.2±0.2
Odstup.raspod. ugla nagiba neravnina	A_{ku}	-	-0.8±0.5	-0.7±0.3
Gustina ekstrema povr.	$D_e 10^4$	μm^{-2}	3.2±2.0	3.0±1.0
	U_p	-	1.08±0.02	1.08±0.01

TABLICA 2. - Rezultati morfološke analize pora-pukotina

Parametar	Oznaka	Jed. mere	Vrednost
Relativ.površina pukotina - pora		%	8.5
Ukupna površina	S	μm^2	2556.1
Ukupni parametar		μm	2566.0
Broj pora			226
Srednja dimenzija pora	d	μm	3.8
Srednja površina	S_m	μm	11.3
Srednji parametar		μm	10.5
Srednji koeficijent oblika pora	K_ϕ	-	0.58

profil ispitivane površine u ravni pomeranja indikatora. Stvaranjem mernog lanca za merenje hrapavosti (sa profilometrom i računarom) obezbedjeno je formiranje profila površine u bilo kom preseku, dužine i površine noše - nja profila na datom nivou zapremine zatvorenih šuplji - na, itd. Primena metoda profilometrisanja, za identifikovanje parametara hrapavosti, je ograničena u pogledu tačnosti i adekvatnosti dobijene informacije. Ograničenje je uslovljeno karakteristikama indikatora, kao tvrdog tela. Indikator ima odgovarajuće dimenzije i odredjene konstruktivne veze. Mogućnosti metoda ograničene su registracijom neravnina koraka do 2 μm i ugla nagiba iznad 20°. Nedostatak metodskog karaktera se ogleda u nemogućnosti dobijanja informacija o morfologiji i teksturi površina.

Polazeći od ove činjenice celishodna je, za ispitivanje površina, primena metoda koje omogućuju, na osnovu snimka, odredjivanje visina neravnina.U zavisnosti od načina formiranja izlazne informacije, ove metode se,uslovno razvrstavaju na optičke, elektronsko-optičke i optičke. Ovakva podela odražava i oblik primenjivanog "probnog tela". Od "probnog tela" zavise granični parametri mernog sistema i način prikazivanja izlazne informacije.

Medju pomenutim metodama najčešće primenjivane su optičke metode. Najpoznatije optičke metode su metode zasnovane na primeni laserskih profilografa, uredjaja sa svetlosnim presekom i interferometara različitog tipa |14, 15|. Bez obzira na visoku rezoluciju po visini (do 0,1 nm) kod nekih od ovih metoda, njihova praktična primena potisnuta je nizom teškoća. Jedna od najvažnijih se ogleda u ograničenu rezolucije u ravni ispitivanja.Ograničenje je uslovljeno dužinom talasa korišćenog zračenja (oko 2000 nm) |8|. Neuporedljivost horizontalne i vertikalne rezolucije i neophodnost dobrih odbojnih sposobnosti osvetljenih objekata, dovodi do toga da date metode nalaze ograničenu primenu. Primena je ograničena na ispitivanje optičkih površina, merenje različitih defekata tipa stepenice, itd.

Prosvetljivi elektronski mikroskopi

Primenom prosvetljivih elektronskih mikroskopa ispituju se objekti sa horizontalnom rezolucijom do 0,1 nm. Poznato je da se snimak na elektronskom mikroskopu formira na račun disperzije elektrona na uzorku (meti).Snimak predstavlja preslikavanje lokalnog intenziteta snopa elektrona, koji prolazi kroz metu. Preslikavanje se ostvaruje na odgovarajućoj površini. Za opisivanje nastalih procesa postoji razvijen detaljan teorijski prilaz |31|. Teorija obezbedjuje, u principu, obrnutu rekonstrukciju trodimenzionalnih mernih objekata na osnovu snimka elektronskog mikroskopa |7, 14|. U opštim crtama,procedura formiranja topografskih informacija predstavlja merenje optičke gustine elemenata snimka duž nekog izabranog pravca. Ukoliko je data gustina proporcionalna tangensu ugla nagiba površine, jednomerni profil se nalazi kao grafička interpretacija procesa integriranja:

$$Z = \int tg\omega . dx ,$$

Z - tekuća visina profila preseka površine u posmatranoj tački i

ω - ugao nagiba profila u posmatranoj tački.

Pri takvom prilazu vertikalna rezolucija (R_v) je funkcija minimalno identifikovanog ugla nagiba (ω) i horizontalne rezolucije (R_h):

$$R_v = R_h tg.\omega .$$

Ugao (ω) je odredjen relacijom |42|:

$$\omega = arc\ cos\ (1 + \frac{h_{min}}{h_o})^{-1} ,$$

gde su:

h_{min} - minimalna efektivna debljina replika, odredjena iz uslova minimalno-različitog kontrasta snimka i

h_o - debljina replike.

Veličina horizontalne rezolucije, za ne sasvim tanke replike, je:

$$R_h = (\frac{h_o . h_{min}}{2})^{1/2}$$

Pri korišćenju oksidno-aluminijumskih replika debljine 10 nm, horizontalna rezolucija je 2.5 nm, a vertikalna -1.3 nm.

Metod se može korektno primeniti samo za ispitivanje anizotropnih površina i to u preseku normalnom na pravac maksimalne anizotropije. Ova napomena je rezultat činjenice da ugao karakteriše nagib površine, a ne profila. Za ispitivanje površina opštijeg oblika neophodna je primena metodički složenijih postupaka i uredjaja.

Raster elektronski mikroskopi

Za kvantitativnu ocenu topografije površine, široku primenu su našle metode zasnovane na obradi stereo-parova dobijenih kako pa prosvetljivim tako i na raster elektronskom mikroskopu. Suštine metoda se sastoji u odredjivanju visine neravnina po paralaksi istoimenih tačaka uočenih pri različitim rakursima na snimku (elektronogramu). Za formiranje stereo-parova koriste se dva postupka |9|. U jednom od njih primenjuje se paralelno preslikavanje uzoraka izmedju dve redosledne ekspanzije. Deo snimka, koji predstavlja oblast prekrivanja, identifiku-

je se stereoskopijom. Za obradu stereo parova, u datom slučaju, mogu se primeniti i metode fotografske identifikacije pri aero-foto snimanju. Medjutim, potreba za većim pomeranjima objekata ne dozvoljava dobijanje stereopara pri uvećanju većem od 20x. Drugi metod bazira na korišćenju snimaka površine uzoraka, dobijenih pri različitim uglovima nagiba uzoraka. U ovom slučaju stereopar se može dobiti pri bilo kom uvećanju u ublasti preklapanja, obuhvatajući kompletan kadar. Visina neravnina odredjena je izrazom:

$$Z = \frac{P\sin\theta}{2M} ,$$

gde su: P - vrednost paralakse,

θ - ugao nagiba uzorka i

M - uveličanje elektronsko-optičkog sistema raster elektronskog mikroskopa.

U zavisnosti od uveličanja, optimalni ugao nagiba uzorka je 5-10°. Dostignuta rezolucija, po visini, je reda prečnika elektronske sonde, pri tačnosti 15-30% |21, 30|. Osnovna prepreka za širu primenu ove metode u toku istraživanja, je nemogućnost potpune automatizacije, usled otežane identifikacije i raspoznavanja elemenata stereo parova.

Jedna od važnijih osobenosti raster elektronske mikroskopije je znatno veća oštrina i dubina snimka. Time se obezbedjuje i identifikovanje objekata sa grubim reljefom. Oštrina snimka, u značajnom stepenu, zavisi od rastojanja i smanjuje se sa porastom rastojanja. Ta činjenica omogućuje tačno odredjivanje položaja žiže (fokusa) na uzorku. Fokus se odredjuje po oštrini formiranog snimka. Kako je fokusno rastojanje funkcija i jačine struje elektro-magnetnog sočiva, nije teško uočiti da se relativna visina tačaka ispitivane površine može odrediti registrovanjem jačine fokusa sočiva objektiva. Osnovni uslov, pri tome, je odgovarajuća kalibracija sistema.

Metod obezbedjuje dobre rezultate za slučaj hrapavih površina, ali nije pogodan za ravne-glatke površine, na kojima je teško uočiti tačku fokusa. Inače, postupak obezbedjuje ocenu visine neravnina u dijapazonu 0,1 - 5 mm, sa tačnošću $\pm$ 0,08 mm |24, 30, 43, 45|.

Metod senki

Formiranje snimaka elektronsko-optičkim metodama ostvaruje se na račun različitih fizičkih pojava, koje nastaju dejstvom elektronskog snopa na ispitivani objekat. Specifičnosti nastalih pojava se uočavaju u odredjenim karakteristikama snimka. Te karakteristike se mogu u nizu slučajeva, iskoristiti za formiranje informacija o topografiji površina ispitivanog uzorka. Tako na primer, kod raster elektronskih mikroskopa, pri registrovanju elastično odbijenih elektrona, kontrast slike odredjen je ne samo geometrijskim karakteristikama objekta, već i oblastima medjudejstva elektronske sonde sa površinom odgovarajućeg detektora. Ako se koristi svetlosna optička analgija, slika na raster elektronskom mikroskopu predstavlja pogled sa gornje površine uzorka, pri njegovom osvetljavanju detektorom. Kada elastično odbijeni elektroni imaju značajniju trajektoriju kretanja, na snimcima se pojavljuju zatamnjeni delovi. Ta činjenica se može iskoristiti za odredjivanje lokalnih uzvišenja |16, 32|. Da bi se to ostvarilo objekat se ispituje pri optimalnom zakursu, kada je moguće odvajanje senki od malih i grubih struktura. Ugao "osvetljavanja" a samim tim i dužina odbačene senke, bira se pri fiksiranom položaju detektora, izmenom radnog rastojanja pribora.

Tačnost metoda zavisi od tačnosti odredjivanja granica senki. Za smanjenje linearne dekompozicije senke, izazvane na krajevima uglova aparature detektora, koristi se metod usmeravanja snopa elastičnog odbijanja elektrona. Usmeravanje se postiže pravouglom maskom postavljenom na detektor i orijentisanom normalno na sondu. Dekompozicija se ostvaruje do stotih delova mikro-metra.

Trajektorijski efekat izlaska elastično odbijenih elektrona može se iskoristiti za odredjivanje ugla nagiba neravnina u prostoru. U tom cilju koristi se sistem dva detektora sa nezavisnim registrovanjem signala |22|. Odredjivanje ugla nagiba i neravnina u preseku normalnom na ispitivanu površinu (u ravni koja prolazi kroz detektor) ostvaruje se preko empirijske zavisnosti (primenljive samo za odredjenu geometriju detektor - uzorak) oblika:

$$\sin\omega = \frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} ,$$

gde su: ω - ugao nagiba neravnina,

I_1, I_2 - vrednosti signala sekundarnog elektronskog zračenja identifikovana detektorom.

Profil površine, u preseku, može se dobiti grafičkim integriranjem tangensa, ugla ω. Korišćenjem četiri detektora identifikuje se profil preseka u uzajamno normalnim pravcima. Mrežni ili složeni algoritmi obrade podataka, mogu uspostaviti topografsku strukturu površine sa minimalnom greškom |44|. Treba zapaziti da primena elastično odbijenih elektrona, kao metoda, uprošćava opštu šemu ispitivanja ograničavajući mogućnosti metode u pogledu rezolucije. Po svojoj vidljivosti, povećanje od 5000x je granično u pogledu informacionog sadržaja snimaka. Rezolucija, koja se dostiže pri ispitivanju, je približno 1 μm |22|.

Metod niskoenergetskih sekundarnih elektrona

Znatno viša rezolucija pri formiranju elektronograma (snimaka površine) postiže se primenom nisko-energetskih sekundarnih elektrona. Njihova oblast generiranja je srazmerna dimenzijama elektronske sonde. Prednosti metoda, izmedju ostalih, se ogledaju u većem broju parametara identifikovanih pri obradi sekundarnih elektronskih stereo - parova formiranih na raster elektronskim mikroskopima. Upravo zbog toga, primena metode sekundarnih elektrona je i efikasnija.

Zavisnost intenziteta emisije sekundarnih elektrona od geometrije površina proučena je detaljno |12, 23|. Ustanovljena je i zavisnost oblika:

$$C = C_o \sec \Omega, \qquad (1)$$

gde su: C_o - intenzitet emisije sekundarnog elektronskog zračenja, pri normalnom padu sekundarnog elektronskog snopa,

C - intenzitet emisije sekundarnog elektronskog zračenja, pri kosom padu primarnog snopa i

Ω - lokalni ugao nagiba površine u tački pada snopa.

Bez obzira na to što je proces formiranja snimaka metodom sekundarnih elektrona na raster elektronskom mikroskopu jasan, zadatak prevoda signala u ordinate neravnina je otežan. Problem se sastoji u tome što sekundarni elektroni nemaju takvu trajektoriju kao i elastično odbijani elektroni. Zbog toga je neophodan drugi prilaz.

Jedan od mogućih postupaka odredjivanja profila površine, u nekom preseku, bazira na relativnoj promeni intenziteta emisije sekundarnih elektrona u istoimenim tačkama, pri zakretanju uzorka |17, 41|. Izraz koji povezuje signal od sekundarnih elektrona, i parametre profila ima oblik:

$$Z = \frac{1}{\Delta\theta} \int \frac{C_1 - C_2}{C_1} dx \quad ,$$

gde su: $\Delta\theta$ - ugao zakretanja uzorka i

$C_{1,2}$ - vrednost signala sekundarnog elektronskog zračenja u nekoj tački pre i nakon zakretanja uzorka, respektivno.

Zakretanje uzorka za ugao $\Delta\theta$ ostvaruje se u odnosu na osu normalnu na ravn premeštanja sonde. Za dati metod može se identifikovati i granična vertikalna rezolucija. Identifikacija se ostvaruje na bazi fizičkih aspekata obrazovanja sekundarnih elektrona i mogućnosti aparature za registrovanje. Vertikalna rezolucija je odredjena fluktuacijama šuma i prečnikom elektronske sonde. Razmatrane karakteristike, uticajne na veličinu šuma i mogućnost primene kriterijuma "idealnog posmatranja" Ziegerta-Kotelnikova, omogućuju dobijanje odnosa šuma merne instrumentacije i vertikalne rezolucije (bez uzimanja u obzir steorpcije elektronsko-optičkog sistema raster elektronskog mikroskopa. Zavisnost je oblika:

$$R_v = \frac{2H}{\pi\gamma}\left(\frac{2e}{\beta\Delta t}\right)^{1/2} tg\left|arc\ cos\left(\frac{1}{H}\ln\frac{2}{p} + \frac{1}{2}\right)\right| \ .$$

U izrazu su:

γ - prečnik otvora izvora elektrona,

β - jačina izvora elektrona,

H - odnos signal/šum,

q,p - verovatnoća "a priori" pojave i odsustva signala, respectivno.

Δt - diskretnost očitavanja signala i

e - naelektrisanje elektrona.

Za najčešće primenjivanu volframovu termokatodu, pri odnosu signal/šum oko 10, vertikalna rezolucija je reda R_v = 10 nm. Visoka rezolucija metode ilustrovana je primerom rekonstrukcije profila površine razorene silicijumove pločice (sl. 4).

Kompleksni merni lanci

Za opisivanje topografije površina, u savremenoj tribologiji, široko se koristi matematički aparat teorije slučajnih polja. Pri tome se površina opisuje slučajnim poljem oblika:

$$Z(x,y) = \sum C_n \cos(xK_{xn} + yK_{yn} + \varepsilon_n), \qquad (2)$$

k - talasni brojevi

ε - slučajna faza (komponenta)

Poznavanje statističkih momenata spektralne gustine:

- nultog (m_o),
- sekundarnog (m_2) i
- četvrtog reda (m_4),

stvara uslove za identifikovanje karakteristika površina, kao što su visinski parametri, ugaoni koeficijenti, radijusi vrha neravnina itd. Analiza zavisnosti intenziteta sekundarne emisije elektrona od ugla pada primarnog snopa na sondu (1), ukazuje na činjenicu da se, po karakteru izmene i amplitudi signala emisije sekundarnih elektrona, može direktno odrediti:

- broj ekstrema površine D_e (broj preseka signala sa srednjom linijom na jedinici dužine) i

- srednja vrednost tangensa ugla nagiba mikroneravnina $\overline{tg}\theta$.

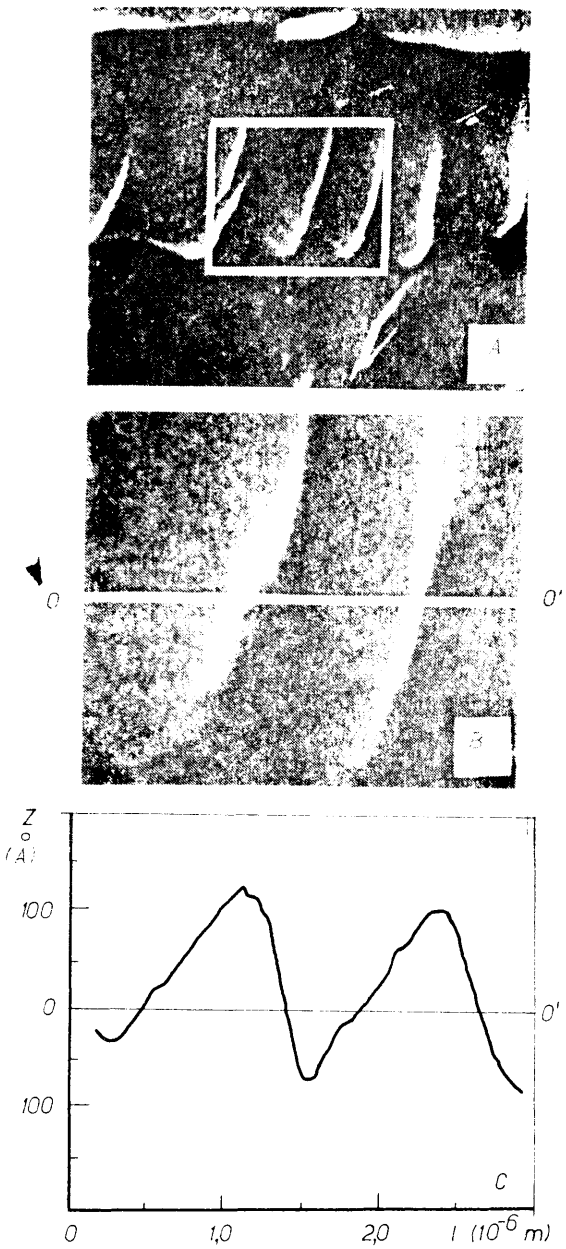
Na osnovu ovih vrednosti definišu se i vrednosti spektralnih momenata:

$$m_2 = \frac{2\ \bar{tg}\ \theta}{\pi} ,$$

$$m_4 = 6\pi \sqrt{3}\ D_e . m_2 \quad i \qquad (3)$$

$$m_o = \frac{(\pi m_2)^2}{2 l_B \sqrt{\frac{D_e}{1,2} - 1}} ,$$

gde je l_B - dužina reda.



Sl. 4. - Ispitivanje strukture isečka kristala silicijuma a,b - fotografija površine na raster elektron. mikroskopu c - profil površine utvrđen prema signalu emisije sekundarnih elektrona

Izmedju spektralnih momenata i parametara hrapavosti postoji zavisnost:

$$R_a = \sqrt{\frac{2m_o}{\pi}} ,$$

$$S_m = \frac{2\pi}{\sqrt{m_2/m_o}} \quad i \qquad (4)$$

$$S = \frac{2\pi}{\sqrt{m_4/m_o}} .$$

U izrazima su:

R_a - srednje aritmetičko odstupanje od srednje linije profila,

S_m - srednji korak neravnina i

S - srednji korak lokalnih uzvišenja.

U nizu slučajeva neophodno je poznavati ukupnu ili specifičnu površinu. Njihova vrednost se odredjuje kao odnos srednje vrednosti intenziteta emisije sekundarnih elektrona ($\bar{S}$), duž kompletne ispitivane površine, i minimalne vrednosti intenziteta (S_{min}), tj.:

$$V_u = \frac{\bar{S}}{S_{min}} = \int (1 + q^2)^{1/2} p(q) dq , \qquad (5)$$

gde su:

V_u - specifična površina kontakta,

$q = tg\theta$ - gradijent površine,

$p(q)$ - gustina verovatnoće gradijenta:

$$p(q) = \Delta q^{1/2} \exp(-\frac{M_2 q^2}{4\Delta_1}) I_o \left| q^2 \frac{(M_2 - 4\Delta_1)^{1/2}}{4\Delta_1} \right| ,$$

Δ_1, M_2 - invarijante površine,

I_o - nulta Besel-ova funkcija sa fiktivnim argumentima.

Ukupna površina (realna površina) kontakta se nalazi množenjem specifične površine (V_u) i nominalne površine analizirane oblasti (V_n).

Izvedena ispitivanja su pokazala da se specifična površina kontakta metala, dobijena različitim postupcima obrade, neznatno razlikuje i da ne prelazi 10% od nominalne (tablica 3).

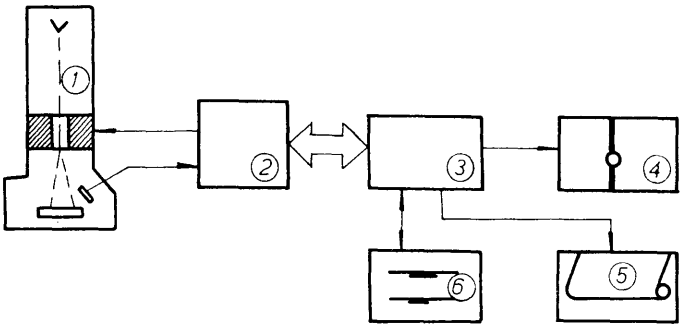
Prikazana metodologija je realizovana na mernom lancu koga, u osnovi (sl. 5), čine:

- raster elektronski mikroskop i
- računar.

Povezivanje mikro-računara (3) sa elektronskim mikroskopom (1) ostvaruje se preko bloka (2), koji sadrži analogno-digitalni pretvarač za uvodjenje rezultata merenja (snimka) u računar (8 bita, ciklus 12 μs), digitalni generator skaniranja (256 x 256 tačaka), sistem upravljanja karakteristikama (parametrima - veličina i sl.) elektronske sonde i displejem raster elektronskog mikro-

TABLICA 3: - Vrednosti specifične površine kontakta (oblast promene prečnika sonde u granicama 0.07 - 9 μm)

Vrsta obrade	Parametar hrapavosti Ra (μm)			
	1,60	0,80	0,40	0,20
Okruglo struganje	1,047	1,036	1,054	
Ravno brušenje	1,047	1,038	1,038	1,036
Okruglo brušenje		1.043		1,061
Čeono glodanje	1,055	1,029		



Sl. 5.-Blok šema složenog mernog kompleksa 1-raster elektronski mikroskop; 2-blok povezivanja; 3-mikro-računar; 4-ploter; 5-matrični štampač; 6-jedinica za snimanje podataka (na elastičnim magnetnim diskovima)

skopa, kao i digitalno analogni pretvarač za identifikaciju rezultata (8 bita), šemu za upravljanje sinhronizacijom rada mernog lanca i programiranje reda elektronskog mikroskopa. Merni lanac može sadržati i manji ili veći broj perifernih jedinica kao što su: ploter (4) sa poljem od 2500 x 4000 tačaka, matrični štampač (5) (za formiranje izlazne informacije), kao i jedinicu sa elastičnim ili magnetnim diskovima (6) (za čuvanje rezultata).

Za pravilno funkcionisanje mernog sistema razvijen je paket prikladnih programa, kao što su programi za:

- odredjivanje profila površine u izabranom preseku,
- proračun parametara hrapavosti i momenata spektralne gustine,
- odredjivanje specifične površine kontakta i
- organizaciju i prikaz rezultata analize, formiranje grafika, izradu karte fona i sl. (6 nivoa na običnom metričkom printeru).

Veličina memorije potrebne za čuvanje svakog od programa u računaru ne prelazi 30 KB, u dinamičkom režimu rada. Moguća je izrada snimaka - crteža od 64 x 64 do 1024 x 1024 tačaka. Programi su izradjeni - napisani na BASIC jeziku, verzije IBM PC. Modularni princip organizacije programa, dozvoljava i uvodjenje, po potrebi, neophodne procedure obrade dobijenih informacija o topografiji površina.

Iako su mogućnosti prikazanog sistema značajne, bez primene specijalnih konstruktivnih rešenja, oblast primene je ograničena. To iz razloga što su granične vrednosti eksploatacijskih karakteristika ograničene takvim razlozima kao što su vibracije stuba mikroskopa, pomeranje njegovog radnog stola, toplotne dilatacije i sl. To znači da se pri upotrebi standardnih pribora ne može očekivati vertikalna rezolucija iznad granične horizontalne, koja iznosi 3-7 nm.

Metod tunelske raster mikroskopije

Praktično se granična vrednost odstupanja površina, nivoa atomske strukture tela može ispitivati i identifikovati metodama tunelske raster mikroskopije. Pri tome se koristi |2, 3, 4| pojava prevodjenja elektrona izmedju dve elektrode na bliskom rastojanju. Princip rada ovakvog tipa mikroskopa se sastoji u sledećem: metalna igla postavljena u trodimenzionalni pijezo-pogonski sistem, pomera se iznad površine ispitivanog objekta na rastojanju koje obezbedjuje proticanje tunelske struje. Vrednost jačine struje odredjena je veličinom zazora izmedju igle i površine i iznosi:

$$I = U \exp(-A\phi^{1/2} D),$$

gde su: I - tunelska jačina struje,
U - napon izmedju igle i ispitivane površine,
A - koeficijent proporcije,
ϕ - vrednost potencijalne barijere u zazoru igla-ispitivana površina i
D - veličina zazora igla-ispitivana površina.

Igla se pomera iznad uzorka pri konstantnom naponu. Posredstvom sistema površine sprege, kao elementa-sistema upravljanja pijezo-pogonskim sistemom pomeranja igle, jačina struje se zadržava konstantnom. Tačnost kretanja igle je toliko visoka da je rezoluciona sposobnost po vertikali ograničena samo amplitudom vibracija. Vertikalna rezolucija je svega nekoliko stotih delova Angstrema.

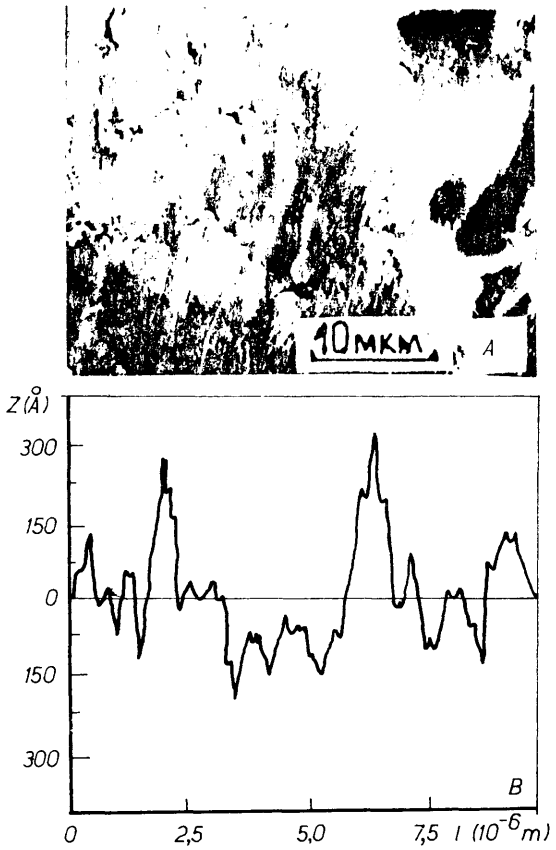
Horizontalna rezolucija metode |38, 39| je:

$$R_h = |2(r + D)|^{1/2},$$

gde je r - radijus zaobljenja igle.

Za dostizanje horizontalne rezolucije reda 0,2 nm, na oštrim iglama, treba smestiti ne više od jednog atoma metala. Formiranje profila površine postiže se zapi-

sivanjem kretanja igle. Ako je zadato skaniranje po površini, nakon obrade podataka na računaru, formira se tro-dimenzionalna kvazi-slika objekta. Otklanjanje uticaja apsorbovanih slojeva kod raster tunelskog mikroskopa, ostvaruje se visokim vakuumom (oko 10^{-6} Pa). Medjutim, za to nema principijelne potrebe, jer tunelsko strujanje izmedju igle i uzorka, na rastojanju medju - atomskog nivoa, uočava se u bilo kojoj dielektričnoj sredini (mazivo, gasovi, itd.). Pri tome je moguća mikroskopija široke klase materijala, uključujući i izolatore |6|. U radu |18| razmatrano je i pitanje poklapanja rekonstruisanog profila sa stvarnim, kao i pitanje dobijanja integralne zavisnosti, čije rešenje, u principu bazira i na analizi greške nastale uticajem dimenzija igle.

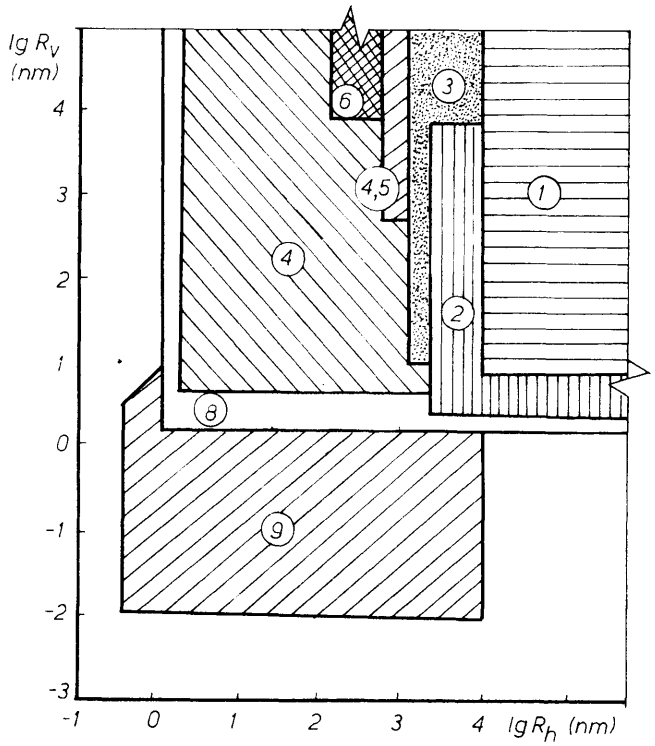


Sl. 6. - Ispitivanje topografije poliranog aluminijuma a - raster-mikroskopski snimak površine; b - profil dobijen na tunelskom raster mikroskopu na bazi 10 μm

Na sl. 6. prikazani su rezultati ispitivanja na tunelskom raster mikroskopu. Ispitivanja se odnose na aluminijumski uzorak izradjen brušenjem dijamantskim toci - lom. Za uporedjenje prikazana je slika uzorka, formirana na raster elektronskom mikroskopu, dobijena pri uveličavanju od 5000 x.

5. Z A K LJ U Č C I

Uporedjenje karakteristika metoda ispitivanja topografije površina prikazano je na sl. 7. Prikazani podaci omogućuju odredjivanje granica korektne primene pojedinih metoda. Tema, takodje, ukazuje i na oblast izmene dimenzija neravnina identifikovanih pojedinim metodama (7, 8 i 9). To su dimenzije koje se koriste pri praktičnom rešavanju zadataka. Medjutim, zbog relativne složenosti ob - last primene je ograničena na naučni prilaz i ekspertnu kontrolu.



Sl. 7. - Granične karakteristike dostignute pri ispitivanju mikrogeometrije površina različitim metodama

1-profilometrisanje; 2-interferometrija; 3-stereo snimak (raster i prosvetljivim elektronskim mikroskopima; 4,5 - metode senki, 6-metod analize defokusiranog snimka raster elektronskog mikroskopa; 7-registrovanje sekundarnih elektrona u raster elektronskom mikroskopu; 8-pojava disipacija elektrona na uzorku-replici kod prosvetljivog elektronskog mikroskopa; 9-tunelski raster mikroskop

Iz istih razloga ograničena je i oblast primene drugih metoda (na primer, 3). Za većinu pitanja, povezanih sa tehničkom upotrebom, potpuno dostizanje tih mogućnos-

ti obezbedjeno je metodama 4-6 i 1 (modifikovanog na osnovu dvomernog profilometrisanja). Optičke metode 2, kako pokazuju analize literaturnih podataka, karakteriše relativno uska oblast primene u takvim oblastima kao što su optika, mikro-elektronika, precizna mehanika i sl.

Površina je složeni tro-dimenzionalni geometrijski objekat čija je jedna od osobina i prostorna korelacija. Ovo dovodi do odredjene organizacije površine i omogućuje izdvajanje na njoj niza geometrijskih struktura, koje se nalaze u odredjenom hijerarhijskom redosledu. Polazeći od toga zadaci proučavanja površina, razrade ocene njihovih topografskih osobina i sl., treba da se rešavaju uzimajući u obzir osnove hijerarhije formiranja površina i na osnovu tih operacija pomoću kojih površina može biti sintetizovana od niza elemenata jednostavnije prirode, izdvojenih na različitim morfološkim nivoima. Adekvatnije identifikovanje karakteristika površina postiže se istovremenim korišćenjem informacija kako o njihovim metričkim tako i njihovim topološkim osobinama. Polazeći od činjenice da se pri proučavanju površina i analize snimaka rešavaju, u mnogome, slični zadaci u oblasti ispitivanja strukture objekata. Osim toga, uzimanjem u obzir činjenice da se snimak može razmatrati i kao način organizovanja informacija o hrapavosti, moguća je primena i analitičkih sredstava teorije obrade informacija i podataka za proučavanje mikrogeometrije površina. U skladu sa tim nastaje potreba razvoja i primene odgovarajuće instrumentalne metodologije, koja će stvoriti mogućnost formiranja informacija o objektu i istovremene identifikacije parametara hrapavosti. Razmatranje, već razvijenih, laboratorijskih i inženjerijskih metoda, koje odgovaraju navedenim zahtevima, stvara uslove za izdvajanje najpovoljnijih metoda. To su metode koje se zasnivaju na primeni mikro-računara.

6 *LITERATURA*

|1| АЛЕКСЕЕВ Н.М., ГОРЯЧЕВА И.Г., ЧЕКИНА О.Г., Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей с учетом процесоов фрикционного взаимодепствия, Трение и износ, 1987, Т.8, Но 6, с. 977-984.

|2| BINNIG G., ROHRER H., GRRBER Ch., WEIBEL E., Tunneling Through A Controllable Vacuumdap, Applied Physics Letters, 1982, Vol. 40, No 2, P.178-180.

|3| BINNIG G., ROHRER H., Scanning Tunneling Microscopy, Helvetica Physica Acta, 1982, Vol. 55, No 1-2, P.726-735.

|4| BINNIG G., ROHRER H., Scanning Tunneling Microscopy, Surface Science, 1983, Vol.125, No 1-3,P.236-244.

|5| BINNIG G., ROHRER H., GERBER Ch, Surface Science, 1983, Vol. 131, No 1, P.379-384.

|6| ВАЛПЕ В.В., ВАЙДЕР В.К., Высокостабильный растровый туннельный микроскоп, Приборы для научных исследований, 1985, Но 8, с. 75.

|7| WARNIER F., MAYANI N., RASIGNI G., at. al., Study dethe surface rougness for fhin films of lif and As., Surface ce Science, 1987, Vol. 188, No 4,P-107-122.

|8| WEHBI D., ROGUES-CARMES C., Phisical Limitations of Optical Defocusing Technigues, Wear, 1986, Vol.109, No 2, P.287-295.

|9| ГОУЛДСТЕЙНА Дж. и вт., Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ, В.2т, М., 1984.

|10| GOGENEPOIN J.J., ROGUES-CARMES C.R., Fractal Approach to Twodimensional, And Therce-Dimensional Surface Rougness, Wear, 1986, Vol.106, No 2,P. 119-126.

|11| ДЕМКИН Н.Б., РЫЖОВ Э.В., Качество поверхности и контакт деталей машин, М., 1981.

|12| DEKKER A.I., Seconder Electron Emission, Solid State Phys., 1958, No 6, P. 251-311.

|13| ДОБЫЧИН М.Н., Трение и износ, 1980, Т.I,Но 2, с. 341-349.

|14| ЕГОРОВ В.А., Оптические и щуповые поиборы для определения шероховатости поверхности, М., 1961.

|15| ENNOS A.E., VIRDEE M.S., Precision Measurement of Surface Form By Laser Profilometry, Wear, 1986, Vol. 109, No 2, P. 275-286.

|16| КЕРАЛИН В.М., РАУ Э.И., СПИВАК Г.В., Анализ микротопографии при помощи парносимметричного детектора в растровом электронном микроскопи, Изв. АН СССР,1977, Т. 47, Но 5, с. 921-927.

|17| KHOLODILOV O.V., GRIGORYEV Ya., MYSHIN N.K., Reconstruction of True Topographies of Solid surfaces in Scanning Electron Microscopes Using Secondary Electrons Scanning, 1987, Vol. 9, No 9, P. 156-161.

|18| КРЫЛОВ М.В., СУРИС П.А., О разрешающей способности туннелвного микроскопа. Поверхноств. физика, хемия, механика, 1986, Но 10, с. 96.

|19| КАРАЛИК Р.М., Статистический и структурный подходы к описанию текстур, ТИИЭР, 1979, Т.67,Но 5,с.98-120.

|20| ЛИННИК Д.В., ХУСУ А.П., Математичко-статистическое описание поверхностей, Инженерный сборник, М.,1954.

|21| LANE W.C., Proc. iii Ann Stereoscan Coll, Morton Grave, Kent, 1973, P. 83-85.

|22| LEBIEDZIK J., An Automatic Topographical Surface Reconstruction in the Sem. Scanning, 1979, Vol. 2, No 4, P. 230-237.

|23| MILLER H.O., Die Abhangigkeit Der Se Einoger Metalle Vom Einfallswinkel Des Primaren, Z. Phys, 1937, Vol. 104, P. 475-481.

|24| MAURIN J.K., ALLRED R.E., Height Measurements of Surface Features With the Scanning Electron Microscope, Metallography, 1977, No 10, P. 161-169.

|25| МЫШКИН Н.К., ПЕТРОКОВЕЦ М.И., ЧИЖИК С.А., и др. Трение и износ, 1983, Т. 4, Но. 5, с. 845-853.

|26| MILEHAM A.R., HORVEY S.J., STOUT K.J., The characterizatien of eleczrjchemically machined surfaces, Wear, 1986, Vol. 109, No 2, P. 207-214.

|27| MANDELBROT B.B., Fractals Form Chapee and Dimension, San Francisco, Frecman, 1977.

|28| НАЙАК, П.П., Применение модели случайного поля для исследования случайных поверхностей, Проблемы трения и смазки, 1971, Но 3, с. 85-95.

|29| HANNAJA S., MING J.L., Hamp Suh, Wear, 1984, Vol. 100, No 2, P. 77-105.

|30| HANKIVELL J.F., Brit. J. Appl., 1962, Vol. 13,No 1.

|31| ПИЛЯНКЕВИЧ А.Н., Просвечивающая электронная микроскопия, Киев, 1975.

|32| REIMER L., POPPER W., KROCKER W., Experiments With Asmall Solid Angle Detector For Bse. Scanning,1978, Vol. 1, N. 12, P. 705-713.

|33| SAYLES R.S., THOMAS T.R., Surface topography asa nonstacionary raindom process., Nature, 1978, Vol. 271, No 2, P. 431-434.

|34| САЙЛС Р.С., ТОМАС Т.Р., Измерение статистических характеристик микрогеометрии поверхностей, встречающихся в технике, Проблемы трения и смазки, 1979, Т. 101, Но 4, с. 207-214.

|35| СЕМЕНЭК Н.Ф., СИРЕНКО Г.А., описание топографии с с помощью модели случайного поля, Трение и износ, 1980,Е.1, Но. 5, с. 815-823.

|37| SCOTT P.G., Surface Metodology: a New Philosophical, Wear, 1986, Vol. 109, No 2, P. 276-274.

|38| STOLL E., Surface Science, 1984, V. 143,No 2, P.411.

|39| TERSOFF J., HAMMAN D.K., Phys. Rev., 1985, Vol.31, No 2, P. 805-816.

|40| ЖУСУ А.П., ВИТЕНБЕРГ Ю. Р., ПАДЬМОВ В.А., Шероховатость поверхностей /теоретико-вероятностный подход/, М., 1975.

|41| ХОЛОДИЛОВ О.В., МЫШКИН Н.К., ГРИГОРЬЕВ, А.Я., Трение и износ, 1985, Т. 6, Но 4, с. 740-744.

|42| ХОЛОДИЛОВ О.В., КАЧАНОВИЧ Ю.Г., ГРИГОРЬЕВ А.Я., Использование растровой просвечивающей электронной микроскопии для оценки статистических параметров шероховатых поверхностей, Всесоюз, симп. по растр. электр. микроскопии и аналит. методам исследования твердых тел, Тез. докл., М., 1981, с. 76.

|43| HERSENER J., RICKER Th., Eine Automatische Focussierand-Seiprichtung fur Rasterelectronen Mikroskope, Bedo, 1972, No 5, P. 377-387.

|44| CARLSEN I.S., Reconstruction of True Surface-Topographics in Scanning Electron Microscopes Using Backscattered Electrons Scanning, 1985, Vol. 7, No 4, P. 169-177.

|45| CORNEFERT, G. An Automatic Focusing System for Resolving Height Information at the SEM: Masters Thesis, Pennsylvania State Univ, 1975.

|46| ЧИЖИК С.А., Расчет характеристик контактного взаимодействия поверхностей трения с учетом сдбшероховатости, Дис. канд. техн. наук, Гомель, 1987.

|47| ШНЕЙДЕР Ю. Г., Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства, Л.1972.

UDK 621.9.042.922

M. JANKOVIĆ

Istraživanje trenja poroznih radijalnih kliznih ležišta od kalajne bronze

UVOD

Pod samopodmazujućim kliznim ležištima podrazumevaju se:

- ležišta koja rade u oblasti suvog trenja (na osnovu politetrafluoretilena (PTFE), molibden-disulfida (MoS2), grafita i drugih tvrdih mazivih materijala);
- ležišta koja sadrže tečno mazivo ili u metalnoj poroznoj matrici ili u specijalnim džepovima za ulje |1|.

Posebno interesovanje za istraživanje i merenje veličina trenja samopodmazujućih kliznih ležišta, u toku izrade rada |2|, pre 12 godina i kasnije dovela je do konstrukcije i realizacije uredjaja USL 1 (uredjaj za istraživanje samopodmazujućih ležišta) 1986. godine, kada se stvaraju uslovi za eksperimentalna istraživanja u radu |3|.

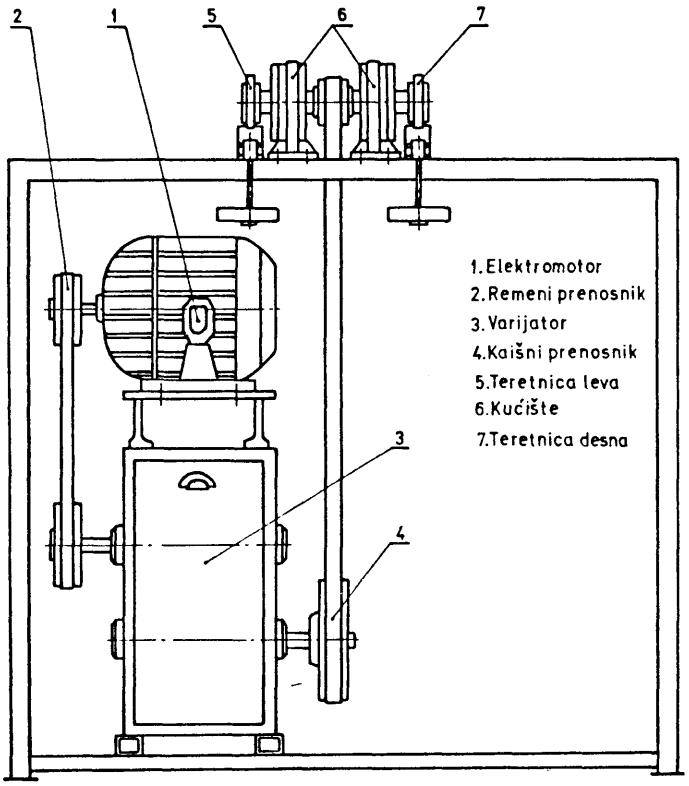
1. ISTRAŽIVANJE TRENJA KLIZANJA

Eksperimentalna istraživanja realizovana su u laboratoriji za Mašinske elemente Mašinskog fakulteta u Beogradu na pomenutom uredjaju, čija je principijelna shema prikazana na sl. 1, a izgled na fotografijama sl. 2.

1.1. Struktura sistema

Strukturu sistema u ovom istraživanju čine:

- čaura poroznog sinterovanog ležišta od kalajne bronze CuSn10, domaće proizvodnje, prema fotografiji,sl.3, sa geometrijskim merama prema sl. 4,
- rukavac od legiranog čelika za cementaciju Č.4320, cementiran i kaljen HR_C = 60 i
- sintetičko ulje (FAMGEN KL-3), otporno prema starenju, sa kojim su impregnisana porozna sinterovana ležišta, kinematske viskoznosti: 29,5 mm^2/s na 40°C i 6,6 mm^2/s na 100°C, sa intervalom primene (-40...220)°C.

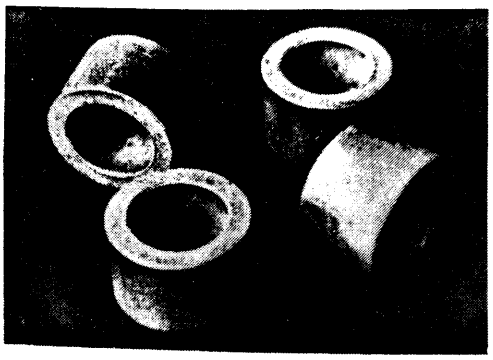


Slika - 1.

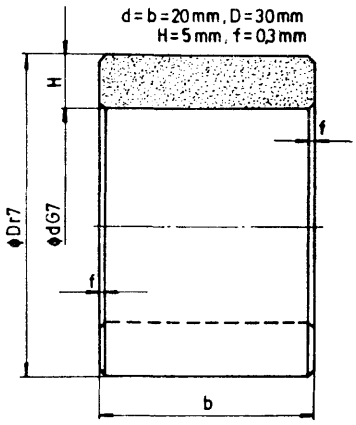
1.2. Probni uzorci

Za eksperimentalna istraživanja u radu |3| realizovane su tri različite serije poroznih sinterovanih ležišta, prema tehnologiji domaćeg proizvodjača, sa otvorenom poroznošću u optimalnim granicama (20...25)%.

Na fotografijama sl. 5 i sl. 6 prikazan je raspored pora i mikrostruktura za seriju-1 poroznih ležišta,čija se otvorena poroznost nalazi u granicama (22,45...23,17)%

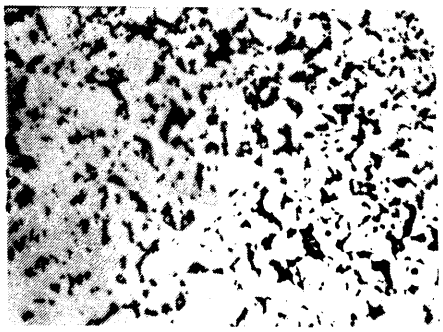


Slika - 2.



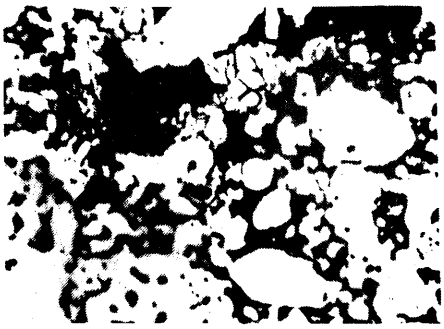
Slika - 3.

Raspored pora (100 x)



Slika - 4.

Mikrostruktura (250 x)



Slika - 5.

Tablica 1

Uzorak	Broj	b	ϕd/mm			Kružn.	Cilind.	Zazor	N.o		μ_s	μ	T
		mm	Kraj-a	Sred.-b	Kraj-c	o, mm	∆, mm	mm	I	II	-	-	°C
Rukavac	DB	-	19,995	19,994	19,994	0,0026	0,001	-	o	o	-	-	-
Čaura	1.09	20,05	20,014	20,014	20,015	0,0023	0,001	0,020	o		0,140	0,034	57
	1.08	20,05	20,014	20,015	20,015	0,0027	0,001	0,020		o	0,193	0,054	66
Čaura	2.08	20,08	20,013	20,014	20,014	0,0028	0,001	0,019	o		0,140	0,033	55
	2.10	20,04	20,013	20,014	20,014	0,0025	0,001	0,019		o	0,193	0,050	66
Čaura	3.08	19,98	20,014	20,015	20,015	0,0026	0,001	0,020	o		0,140	0,035	63
	3.09	19,97	20,014	20,013	20,013	0,0051	0,001	0,019		o	0,193	0,064	78
Rukavac	LC	-	19,993	19,995	19,997	0,0019	0,004	-	•	•	-	-	-
Čaura	1.01	20,02	20,014	20,013	20,013	0,0039	0,001	0,018	•		0,140	0,036	60
	1.10	20,04	20,013	20,012	20,012	0,0026	0,001	0,017		•	0,184	0,063	79
Čaura	2.04	20,07	20,013	20,013	20,014	0,0026	0,001	0,018	•		0,154	0,034	59
	2.09	20,07	20,013	20,013	20,014	0,0037	0,001	0,018		•	0,204	0,065	82
Čaura	3.05	19,96	20,014	20,013	20,013	0,0020	0,001	0,018	•		0,154	0,039	68
	3.07	19,99	20,014	20,013	20,013	0,0026	0,001	0,018		•	0,184	0,070	85

Napomena: b - širina čaure, d - unutarnja mera čaure (spoljna mera rukavca), μ - koeficijent trenja, T - radna temperatura (T_0=20±1°C)

N.o (nivo opterećenja) - I: W=610 N, p=1,525 N/mm², n=16 s⁻¹, v=1 m/s, pv=1,525 W/mm²
II: W=210 N, p=0,525 N/mm², n=48 s⁻¹, v=3 m/s, pv=1,575 W/mm²

sa najvećim brojem finih pora na posmatranoj površini od oca 0,36 mm^2.

1.3. Moment trenja klizanja

Moment trenja klizanja je reaktivni moment koji se suprostavlja klizanju obrtnog rukavca u čauri ležišta, koje je opterećeno radijalnom silom i miruje.

$$T_\mu = F_\mu r; \; F_\mu = \mu W, \text{ odn. } \mu = \frac{F_\mu}{W}.$$

T_μ - moment trenja klizanja,
F_μ - sila trenja klizanja,
W - opterećenje ležišta (radijalna sila),
r - poluprečnik rukavca vratila,
μ - koeficijent trenja klizanja.

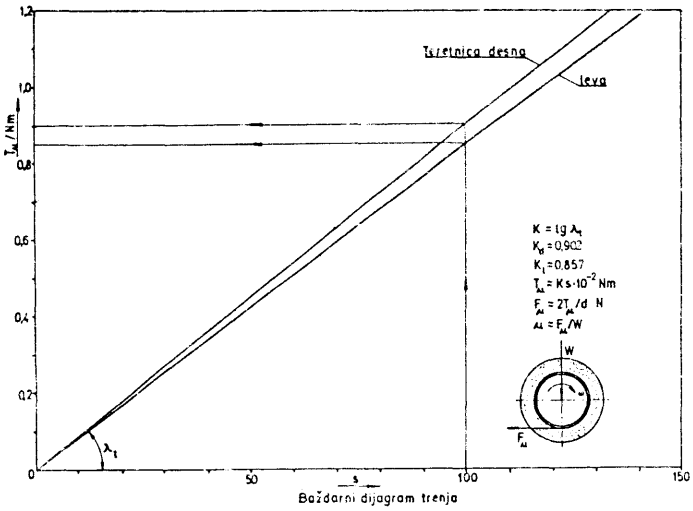
Moment trenja klizanja za svako ležište meren je prilikom startovanja uredjaja, u ustaljenom režimu rada i za vreme zaustavljanja, u svakom od 15 uključenja.

Rezultati merenja preračunati su pomoću baždarnih dijagrama sl. 7 na veličine koeficijenata trenja. Na apscisi dijagrama je sretanje kazaljke (s) instrumenta, šestokanalnog mernog mosta "KYOWA" DPM-E, dok je na ordinati moment trenja T_μ.

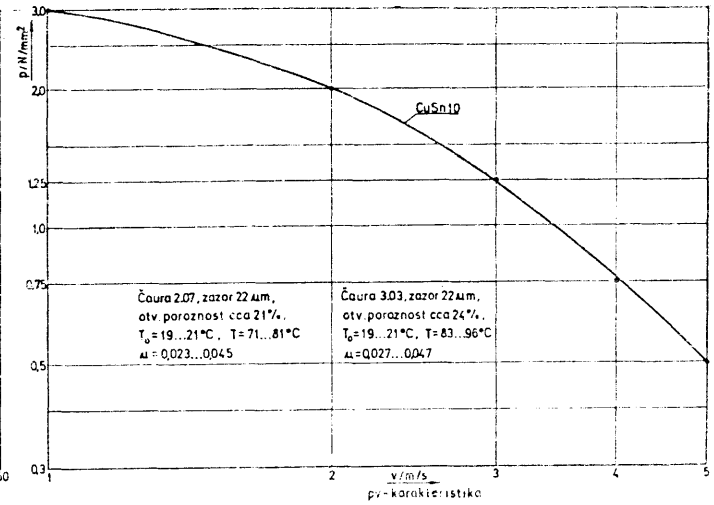
1.4. Koeficijent trenja klizanja

U tablici 1, pored makrogeometrije poroznih ležišta iz tri serije i rukavaca, prikazani su relevantni radni pokazatelji na dva nivoa opterećenja i sa dve brzine klizanja, pri istoj pv-karakteristici.

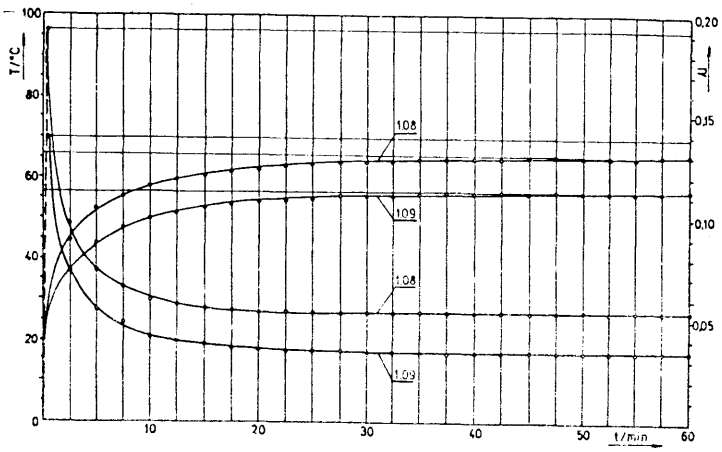
Dati su koeficijenti trenja (μ_s) koji odgovara najvećem startnom momentu trenja izmedju 15 uključenja uredjaja, kao i prosečna vrednost koeficijenta trenja (μ) u



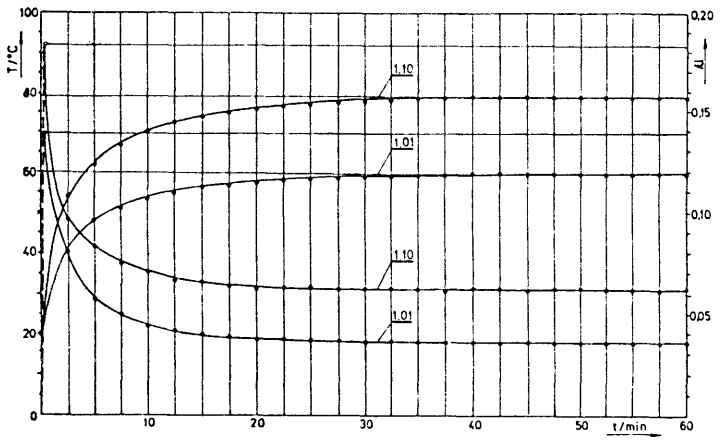
Slika - 6.



Slika - 9.



Slika - 7.



Slika - 8.

ustaljenom režimu rada za svih 15 merenja.

Koeficijent trenja pri zaustavljanju uredjaja iznosio je $(0,5...0,7)\mu_s$.

Pored koeficijenta trenja (μ_s) i (μ), u tablici 1, date su i veličine radne temperature (μ) koja je izmerena u zoni najviše opterećenog dela čaure ležišta, pomoću digitalnog termomera "ISKRA" na principu termoparova, posle 15 uključenja i 165 časova rada, pri temperaturi okoline $T_0 = 20 \pm 1^{o}C$.

Promena koeficijenta trenja (μ) i radne temperature (T) u zavisnosti od vremena (t) prikana je na sl. 8 i sl. 9 za porozna ležišta iz serije - 1, prema tablici 1.

Na sl. 10 prikazana je pv - karakteristika tj. zavisnost radnog pritiska u ležištu od brzine klizanja. Dati su rezultati za uzorke iz serije - 2, najniže i iz serije - 3, najviše vrednosti otvorene poroznosti, sa većom vrednošću početnog (monotažnog) zazora u odnosu na čaure poroznih ležišta iz tablice - 1.

ZAKLJUČCI

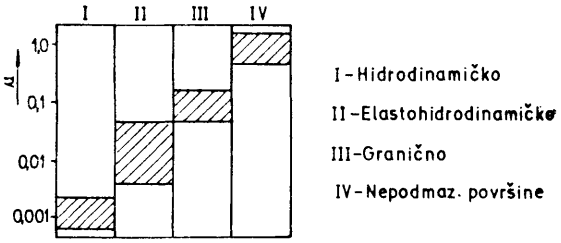
- S obzirom na radne uslove i veličinu vrednosti koeficijenata trenja, istraživanja su izvedena u režimima graničnog i mešovitog (elastohidrodinamičkog) podmazivanja (sl. 10).

- Kako su istraživanja izvedena sa uzorcima poroznih ležišta čija se otvorena poroznost nalazi u uskim optimalnim granicama (20...25)%, značajan uticaj na trenje klizanja i radnu temperaturu imaju

veličina, oblik i broj pora na posmatranoj površini (sl. 5).

U ovom pogledu porozna ležišta iz serije-1 i serije-2 imaju prednost u odnosu na seriju-3 (sl. 10).

- Za istu vrednost *pv* - karakteristike niže vrednosti koeficijenta trenja i radne temperature postižu se pri višim vrednostima pritiska i nižim vrednostima brzine klizanja.



Sl. - 10.

Ukoliko se brzina klizanja smanji, a pritisak poveća tri puta, koeficijent trenja prilikom startovanja i radna temperatura smanjiće se za oko (20...40)%, a koeficijent trenja u stacionarnom stanju za oko (50...90)% (sl. 7, sl. 8 i tablica 1).

LITERATURA

|1| EVANS, D.C.: Self-lubricating bearings, Industrial Lubrication and Tribology, 1981., 13 No 4, 132-138.

|2| JANKOVIĆ, M.: Eksploatacione karakteristike radijalnih kliznih ležišta od plastične mase domaće proizvodnje, Magistarski rad, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1976.

|3| JANKOVIĆ, M.: Istraživanje uticaja poroznosti na radne karakteristike samopodmazujućih sinterovanih radijalnih kliznih ležišta, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 1988.

Obaveštenje

pretplatnicima

Prinudjeni smo da izvestimo naše cenjene pretplatnike da je materijalno-finansijska situacija časopisa "Tribologija u industriji" veoma teška. Razlozi su, svakako poznati, jer ne čine nikakvu specifičnost koja bi se odnosila samo na naš i vaš časopis. Ipak, treba treći da su, kao što vam je poznato i iz vaše poslovne prakse, svi ulazni troškovi rasli mnogo brže nego što smo očekivali i veći su nego što su planirani. To nas, u interesu daljeg izlaženja časopisa, prisiljava da za 1989. godinu podignemo cenu, što znači da će godišnja pretplata za radne organizacije iznositi 60.000, a za pojedince 30.000 dinara. Pretplata za inostranstvo ostaje nepromenjena.

Nadamo se da ćete uvećanje godišnje pretplate uvažiti, tim pre što je diktirana razlozima izvan redakcije časopisa.

Redakcija časopisa
Tribologija u industriji

DESETOGODIŠNJI PREGLED ISTRAŽIVAČKIH I STRUČNIH RADOVA ČASOPISA

Tribologija u industriji

1979.

1. M. Nedeljković, V. Djokić: Faktori trošenja bokova zubaca sa analizom naponskog stanja u procesu habanja.
2. M. Babić: Tribološke karakteristike sredstava za hladjenje i podmazivanje u obradi struganjem alatima od tvrdog metala.
3. S. St. Sekulić: Troškovi alata i ukupni troškovi obrade u funkciji pouzdanosti alata kod protočnih automatskih linija.
4. Z. Palunčić: Razvoj metode za praćenje triboloških procesa kod kotrljajnih ležajeva alatnih mašina.
5. V. Ivušić: F e r o g r a f i j a - metoda za proučavanje procesa trošenja zatvorenih sustava.
6. Z. Nikić: Topografija i veličina kontakta površine trenja u obradi urezivanjem navoja.
7. Dž. Osmanoski: Topografija površine obradjene obimnim glodanjem.
8. Ю. В. Скорынин, Ю. К. Наследышевъ Osobenosti procesa habanja kliznih vodjica pri stepenasto izmenljivom opterećenju.
9. B. Jeremić: Tribološki procesi na kliznim vodjicama alatnih mašina u zavisnosti od vrste materijala i ulja za podmazivanje.
10. M. Voljevica, F. Pavlović: Tribološki procesi na upravljačkom mehanizmu.
11. M. Nedeljković, M. Velimirović, A. Vulić: Odredjivanje temperature maziva i graničnog opterećenja pužnog prenosnika primenom metode višefaktornog planiranja eksperimenta.
12. M. Lazić: Vrednost obrade u funkciji koncentracije polusintetičkih emulgirajućih ulja u sredstvu za hladjenje i podmazivanje.
13. S. Mahović: Uticaj hrapavosti površine na prionljivost maziva.
14. S. Arsovski: Analiza mogućnosti adaptivnog upravljanja alatnim mašinama na osnovu merenja intenziteta habanja reznih elemenata alata.
15. M. Stupuišek: Primena skening mikroskopa i elektronskog mikroanalizatora u tribološkim istraživanjima.
16. R. Mitrović, G. Živković, D. Nešić: Tribološke pojave na domaćim alatima za hladno valjanje ozubljenih elemenata.
17. M. Milošević: Ispitivanje uticaja pojedinih faktora na razvoj procesa habanja alata za provlačenje i odredjivanje optimalnih uslova obrade pri provlačenju.
18. D. Mihailović: Tribološki procesi kod kliznog ležišta.
19. V. Ivušić: Utjecaj strukturnog stanja legiranog bijelog lijeva na lomnu žilavost i otpornost abrazije.

1980.

1. S. St. Sekulić: Rad trenja pri ortogonalnom rezanju - odnosi radova trenja na kontaktnim površinama alata i strugotine i obradjene površine.
2. B. Vasiljević: Produktivnost i ekonomičnost u funkciji vrste i kvaliteta savremenih tvrdih metala.
3. S. Tanasijević: Topografija i izmena topografije aktivnih površina zuba zupčanika kao funkcija razvoja procesa habanja.
4. R. Pantić: Tribološke karakteristike više vrsta alata od tvrdog metala u obradi struganjem.
5. D. Milikić: Odredjivanje karaktera i veličina habanja na grudnoj i ledjnoj površini alata metodom otisaka.

6. П. И. Ящерицын, Ю В. Скорынин: Vek trajanja mašina u funkciji uslova obrade osnovnih elemenata (prvi deo).
7. Z. Palunčić: Uticaj sredstava za hladjenje i podmazivanje na vrednost obrade.
8. S. Arsovski, M. Perović: Primena kompjutera u upravljanju proizvodnjom kao uslova za povećanje proizvodnosti u uslovima maloserijske i serijske proizvodnje.
9. П. И. Ящерицын, Ю. В. Скорынин: Vek trajanja mašina u funkciji uslova obrade osnovnih elemenata (drugi deo).
10. M. Kokić: Problemi primene sredstava za hladjenje i podmazivanje u obradi provlačenjem.
11. S. Joković: Razvoj procesa habanja brega i podizača bregastog mehanizma u funkciji brzine brega.
12. M. Milošević: Uticaj sredstava za hladjenje i podmazivanje na povećanje proizvodnosti procesa odvalnog glodanja.
13. B. Jeremić, R. Milić, D. Radovanović: Izbor optimalnog sredstva za hladjenje i podmazivanje sa tribološkog i ekonomskog aspekta.

1981.

1. B. Ivković: Tribološke karakteristike elemenata tribo-mehaničkog sistema u obradi metala rezanjem.
2. R. Mitrović, D. Nešić, M. Bogdanović: Tribološke pojave na domaćim alatima za duboko bušenje.
3. V. Stanojević: Aktuelni problemi pri elektroerozionoj obradi.
4. В. А. Белый, А. И. Свириденок, О.В. Холодилов, И. В. Крагельский: O mehanizmu obrazovanja slojeva pri prenosu masa kod polimera.
5. Ž. Kneževič, S. Arsovski: Obradivost sivog liva u funkciji uslova livenja, hemijskog sastava i modificiranja pri obradi struganjem.
6. P. Blašković, K. Stronski, P. Schwab, Š. Lesnak: Prilog proučavanju osobina kontaktnih površina pri trenju metala po metalu.
7. S. Tanasijević: Uticaj režima završne obrade brušenjem na brzinu širenja pitinga i dubinu razorene površine cilindričnih evolventnih zupčanika.
8. I. Katanović: Abrazivno trošenje i tvrdoća karbidnog gvoždja.
9. M. J. Nedeljković, V. Dj. Miltenović, V. M. Velimirović: Prognoziranje pouzdanosti zupčastih parova.
10. Lin Fu Sheng, V. Ivušić, M. Javor: Utjecaj kriterija na adhezijsko trošenje kod pokusa s 4 kuglice.
11. K. Bouzakis: Faze stvaranja strugotine i njihov uticaj na habanje alata u obradi odvalnim rendisanjem cilindričnih zupčanika.
12. P. Nikšić: Identifikacija tribomehaničkih sistema kod jednovretenih i viševretenih automata.
13. M. Babić: Uticaj SHP na toplotno opterećenje predmeta obrade i hrapavost površine u obradi metala ravnim brušenjem.

1982.

1. H. P. Džost, Dž. Skofild: Štednja energije pomoću tribologije - tehnoekonomska studija.
2. N. Orlić: Neophodni ugovorni uslovi i zahtevi u pogledu tehničke dokumentacije o podmazivanju pri kupovini alatnih mašina.
3. M. Kokić: Trošenje alata pri obradi odlivaka u serijskoj proizvodnji većeg obima.
4. V. Volčanšek: Uticaj kvaliteta i hemijskog sastava površine alata na otpore isticanja pri istiskivanju aluminijuma.
5. S. Tanasijević: Promena fizičko-mehaničkih karakteristika površinskog sloja u periodu razornog habanja zuba zupčanika.
6. S. Karalazić, B. Jeremić: Tribo-mehanički sistem u obradi dubokim bušenjem.
7. Z. Haduch: Neke tribološke osobine sivog liva u teoriji i praksi.
8. B. Vasiljević, S. Arsovski: Primena polusintetičkih i mineralnih emulgirajućih SHP u procesu urezivanja navoja.
9. M. Lazić: Prilog optimalnom izboru sredstava za podmazivanje zupčastih parova sa tribološkog aspekta.
10. V. Volčanšek: Uticaj termičko hemijske obrade površina alata na trošenje alata za istiskivanje aluminijuma.
11. F. Pavlović, E. Kazazić: Istraživanje razvoja zazora na upravljačkom mehanizmu.

1983.

1. Ю. В. Скорынин, П. А. Удовидчик, Ю. К. Наследышев: Ispitivanja kardanskih zglobova na probnom stolu.
2. N. Repčić: Tribološki pristup koeficijentu tečnog trenja kod radijalnih kliznih ležišta.
3. О. В. Берестнев, М. П. Бирюков: Teorija i metode prognoziranja radne sposobnosti mehaničkih sistema.

4. S. Živanović, Z. Knežević: Prilog analizi uticajnih faktora kod podmazivanja pri obradi prosjeca - njem i probijanjem.
5. M. Babić: Razvoj tribometra za istraživanje uticaja uslova obrade kontaktnih površina na vek trajanja elemenata tribo-mehaničkih sistema.
6. O. B. Берестнев: Konstruisanje, proračun i ispitivanje samo-podešljivih zupčanika.
7. M. Kokić, D. Djordjević: Razvoj procesa habanja viljuški menjača putničkih vozila u eksploataciji.
8. И. В. Коновалов, Н. Т. Минченя, Ю. В. Скорынин: Konstrukcijske metode povećanja tačnosti i veka njenog očuvanja kod vreteništa velike tačnosti.
9. P. Ivanović, R. Pantić: Matematičko modeliranje hiper prostora obradnog procesa pri obradi metala bušenjem i mogućnost povećanja tehno-ekonomskih efekata.
10. B. Sovilj: Uticaj brzine rezanja na postojanost odvalnog glodala.
11. T. Mang, A. Tweebeeke: Ekonomska procena primene sredstava za hladjenje i podmazivanje.
12. E. Silajev: Primena staklenih premaza pri kovanju u alatu.

1984.

1. N. Repčić: Analiza tribometrijskih parametara kod radijalnih kliznih ležišta.
2. M. Babić: Uticaj uslova obrade ravnim brušenjem na tribološka svojstva kontaktnih površina.
3. S. Djekić: Identifikacija tribomehaničkih sistema sadržanih u hidrauličnim amortizerima putničkih vozila.
4. V. Timotijević, Lj. Janković, D. Kostić: Jednovodni programski sistem za centralno podmazivanje uljem ili tečnom mašću.
5. P. Ivanović, M. Ivanović: Topografija obradjene površine struganjem u funkciji ulaznih i poremećajnih faktora obradnog sistema i mogućnost upravljanja procesom.
6. V. G. Golovatenko, Yu. V. Skorinjin: Kontrola tačnosti obrtanja vratila rotora elektro-pogonskog sistema.
7. S. Tanasijević, F. Pavlović, E. Kazazić: Uticaj tehnološkog nasledja na tribološke procese i vek trajanja cilindričnih zupčanika.
8. B. Jeremić: Uticaj dinamičkog opterećenja i vibracija na uslove ostvarivanja kontakta.
9. W. Rapp: Izbor sredstava za hladjenje i podmazivanje.
10. S. Djekić: Otpornost na habanje klipnjača hidrauličnih amortizera u funkciji režima brušenja.
11. S. St. Sekulić: Maksimalna hrapavost obradjene površine na strugu u zavisnosti od brzine rezanja za dve vrste čelika.
12. P. Blašković, A. Kopčaja, M. Mosny: Matematičko-logično modeliranje problema habajućih slojeva i njihova optimizacija.
13. B. Batora: Tribološke karakteristike obradjene površine i njihov uticaj.
14. E. Kazazić, F. Pavlović: Neki rezultati istraživanja procesa habanja teleskopa kardanskih vratila.

1985.

1. M. Djurdjanović, M. Nedeljković: Prilog razmatranju primene frikcionog zavarivanja.
2. R. Rakić: Prilaz odredjivanju triboloških svojstava maziva kod alatnih mašina na osnovu poznavanja njihovih fizičko-hemijskih karakteristika.
3. M. Stefanović: Odredjivanje koeficijenta trenja pri dubokom izvlačenju.
4. S. Tanasijević, S. Pavić: Materijal i termička obrada kao faktori habanja pogonskih valjkastih lanaca.
5. V. Ivušević, F. Kovačiček, P. Dukić: Ocjena relativne otpornosti materijala abrazijskom mehanizmu trošenja na temelju analize mikrostrukture.
6. S. Djekić: Neke karakteristike habanja gumenih zaptivki hidrauličnih uredjaja.
7. R. M. Matvejevskij, I. A. Bajanovskij, V. L. Loši, G. I. Šor, A. B. Vipper: Kinetika i termodinamika podmazujućeg dejstva.
8. Č. Kajdas: Mehanizam podmazivanja negativnih jona radikala iz komponenata mazivih ulja.
9. V. Savić: Sistemi za kontinuirano podmazivanje (prvi deo).
10. G. Fleischer: O energetskom nivou tarućih parova.
11. V. Savić: Sistemi kontinuirano podmazivanje (drugi deo).

1986.

1. S. Sekulić, P. Kovač: Korelacija izmedju najveće visine neravnina i srednjeg aritmetičkog odstupanja profila od srednje linije obradjene površine.
2. V. Volčanšek: Istraživanje zavisnosti trenja pripremaka o zid recipijenta pri promeni temperature i brzine istiskivanja.
3. F. Pavlović, S. Tanasijević, E. Kazazić: Neke mogućnosti poboljšanja triboloških svojstava teleskopa kardanskih vratila.

4. B. Jeremić: Proces trenja pri dinamičkom opterećenju tribomehaničkog sistema.
5. R. Cebalo: Korelacija izmedju hrapavosti brušene površine kod različitih postupaka brušenja.
6. B. Kršljak: Učinak tocila i vreme obrade brzoreznih čelika.
7. M. Lazić: Tribološki aspekt projektovanja i konstrukcija mašina alatki.
8. B. M. Medovar, O. V. Berestnev, V. I. Moisenko: Novi konstrukcioni materijal - armirani kvazimonolitni (AKM) čelik za mašinogradnju.
9. M. Stefanović: Ispitivanje maziva postupkom razvlačenja - novi pokazatelji i kriterijumi.
10. M. Lazić: Tribološki aspekt projektovanja i konstruisanja mašina alatki - tribološka banka podataka.
11. M. Cichowicz, B. Nowicki: Ispitivanje uticaja hrapavosti površine na njene kontaktne deformacije.
12. B. Kršljak: Postojanost tocila različitih karakteristika.

1987.

1. R. Mitrović, M. Lazić, Dj. Radivojević: Tribološki procesi na osnovnim elementima postrojenja za proizvodnju cementa.
2. A. Jankov: Pneumo-hidraulična provodljivost kontakta u uslovima normalnih dinamičkih opterećenja.
3. M. Lazić: Tribološki aspekt projektovanja i konstruisanja mašina alatki - tribološki sipravna konstrukcija.
4. B. Jeremić: Proces trenja pri dinamičkom opterećenju tribomehaničkog sistema (prvi deo).
5. R. Cebalo: Korelacija izmedju hrapavosti brušene površine kod različitih postupaka brušenja.
6. B. Kršljak: Učinak tocila i vreme obrade brzoreznih čelika.
7. R. M. Matvejevski: Metod ocene temperaturske postojanosti sredstava za podmazivanje.
8. B. Jeremić: Proces trenja pri dinamičkom opterećenju tribomehaničkog sistema (drugi deo).
9. Lju Vej-Sin, Džan Ke: Dinamičko ispitivanje deformacije zuba zupčaniak primenom radio-mernog sistema.
10. A. Rac: Prognoziranje veličine habanja.
11. B. J. Griffiths: Tehnologija obradjene površine kao deo tehničkih informacija proizvodne strategije.
12. B. Kršljak: Brušenje alatnog čelika sa povećanim sadržajem ugljenika - troškovi brušenja.

1988.

1. B. Sovilj: Identifikacija triboloških procesa na reznim elementima odvalnog glodala u modelskim uslovima.
2. R. Pantić: Tribološke karakteristike okretnih pločica sa prevlakom TiN.
3. N. Milić, B. Jeremić, M. Mayer: Neki rezultati uporednih ispitivanja oplemenjenih kontaktnih slojeva.
4. Y. Li, R. L. Huston: Proračun i analiza dvostruko kružnog lučnog profila spiralnih koničnih zupčanika.
5. S. Sekulić, P. Kovač: Korelacija izmedju pojedinih parametara hrapavosti pri čeonom glodanju.
6. B. Navinšek, A. Žabkar: Uticaj parametara pripreme podloge na kvalitet tvrde prevlake TiN (PVD).
7. B. Tadić, M. Babić: Pojam i metode definisanja obradivosti metala rezanjem.
8. M. Lazić, D. Ranković: Poboljšanje uslova rada kod izbor sredstava za hladjenje i podmazivanje u obradi odvalnim glodanjem.
9. O. V. Holodilov; A.A. Grigorev., N.K. Niškin: Novi aspekti istraživanja hrapavosti površina u tribologiji.
10. M. Janković: Istraživanje trenja poroznih radijalnih kliznih ležišta od kalajne bronze.

SVE BROJEVE NAŠEG ČASOPISA MOŽETE NABAVITI UKOLIKO SE OBRATITE SEKRETARIJATU REDAKCIJE.