

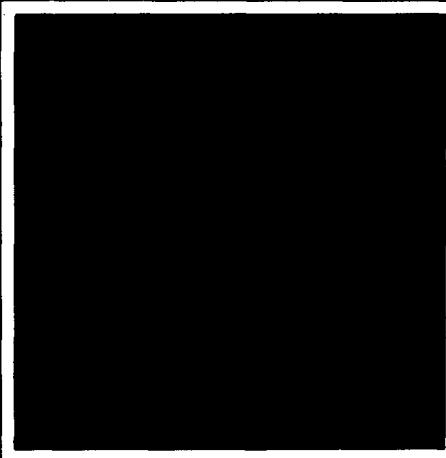
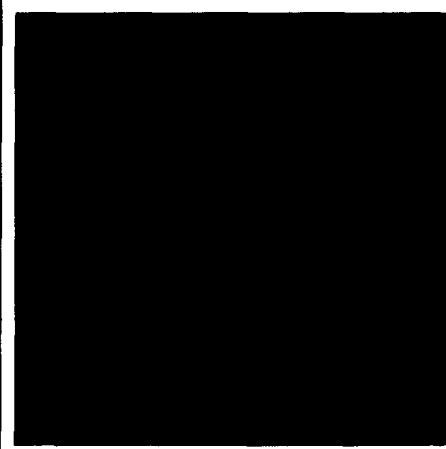
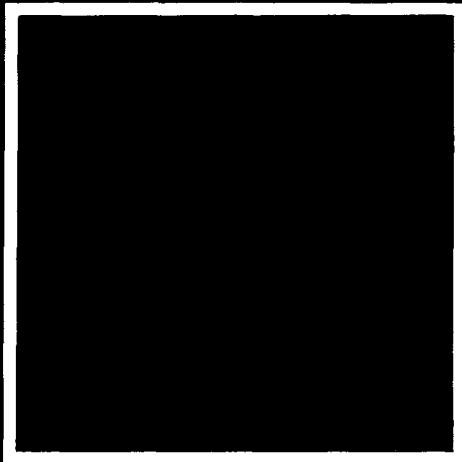
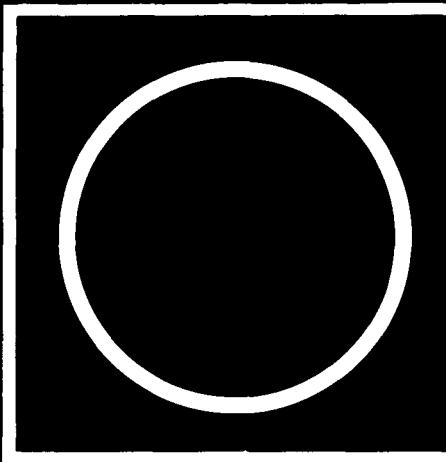
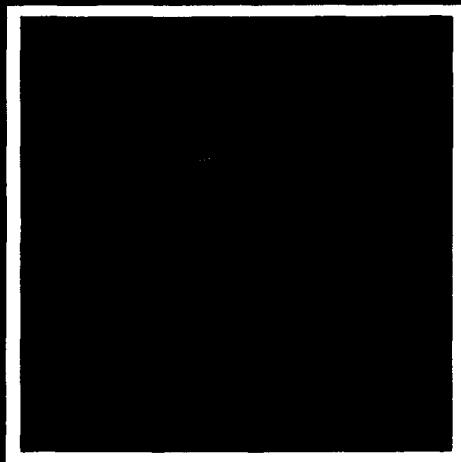
tribologija u industriji

YU ISSN 03551-1642

GODINA IX

MART '87.

1



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

tribologija u industriji

sadržaj contents содержание

UVODNIK INTRODUCTION ПЕРЕДОВИЦА	S. TANASIJEVIĆ: Tribometrija - značaj njene funkcije u tribologiji - Tribometry - Importance of its Function in Tribology - Трибометрия - участие ее функции в трибологии	3
ISTRAŽIVANJA RESEARCH ИССЛЕДОВАНИЯ	R. MITROVIĆ, M. LAZIĆ, ĐJ. RADIVOJEVIĆ: Tribološki procesi na osnovnim elementima postrojenja za proizvodnju cementa - Tribological processes on main elements of cement production machinery - Трибологические процессы на основных элементах сооружения для производства цемента	5
	A. JANKOV: Pneumo-hidraulična provodljivost kontakta u uslovima normalnih dinamičkih opterećenja - Pneumohydraulic contact in flow in normal dynamic loadings - Пневмогидравлическая проводимость контакта в условиях нормальных динамических нагрузок	12
	M. LAZIĆ: Tribološki aspekt projektovanja i konstruisanja mašina alatki - tribološki ispravna konstrukcija - Tribological aspect of the machine tool design - tribologically correct design - Трибологический аспект проектирования и конструирования металлообрабатывающих станков - трибологически правильная конструкция	16
ZA NEPOSREDNU PRAKSU FOR DIRECT PRACTICE ДЛЯ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ПРАКТИКУ	M. BABIĆ: Savremeni postupci modifikovanja površina	22
NOVOSTI NEWS ИЗВЕСТИЯ	Zlatna medalja za tribologiju	26
KNJIGE I ČASOPISI BOOKS AND JOURNALS КНИГИ И ЖУРНАЛЫ	28
NAUČNI SKUPOVNI SCIENTIFIC MEETINGS НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ	30
REZIMEA ABSTRACTS РЕЗЮМЕ	31

S.TANASIJEVIĆ

Tribometrija – značaj njene funkcije u tribologiji

Svakodnevno, u svim oblastima nauke i tehnike, u praktičnom radu i životu, čovek dolazi u dodir i živi sa problemima merenja. Svakoga dana meri vreme, masu, dužinu, zapreminu i druge veličine. Merenjem se eksperimentalno konstatuju kvantitativne informacije, identificuje i utvrđuje zakonomernost stanja, karakteristika i ponašanja pojava. Merenjem se utvrđuju veličine i procesi realnog fizičkog, odnosno tehničkog, sistema kao mernog objekta.

Tribologija, kao relativno nova i po svojoj suštini interdisciplinarna nauka, mnoga svoja saznanja zasnovala je i zasniva na eksperimentu i merenju. Merenje je uvek prisutno u tribologiji i ima svoj poseban značaj.

Tribometrija je posebna grana tribologije koja izučava metode izvodjenja eksperimentata i ispitivanja trenja i habanja, kao i načine obezbeđenja jedinstva merenja. U oblasti izučavanja tribometrije su izučavanja i razvoj opreme za merenje osnovnih izlaznih veličina iz tribomehaničkih sistema, projektovanje i konstrukcija uređaja za ispitivanja triboloških procesa, registrujući pribori i uređaji trenja i habanja, kao i davači ulaznih veličina. Istovremeno, tribometrija je i proučavanje teorije grešaka merenja, metoda statističke kontrole, metoda matematičke obrade rezultata eksperimentalnih merenja u tribologiji. Ona obuhvata sva merenja triboloških karakteristika počev od sredstava za hladjenje i podmazivanje, preko materijala elemenata tribomehaničkog sistema do ispitivanja pouzdanosti pojedinih mašinskih sistema i mašina u celini.

Široki spektar izučavanja koji tribometrija obuhvata svrstavaju je u najvažnije grane tribologije.

Pravci današnjeg razvoja tribometrije dobrim delom su usmereni ka identifikaciji i izučavanju topografije kontaktnih površina. U procesu eksploatacije početna topografija kontaktnih površina se korenito menja i prelazi u eksploatacionu topografiju koja se karakteriše nastajanjem novih slučajnih funkcija.

Zahvaljujući naglom razvoju teorije slučajnih procesa i najnovijim generacijama mernih instrumenata moćna je seriozna identifikacija statističkih karakteristika kontaktnih površina.

Proširivanje saznanja u ovoj oblasti verovatno će stvoriti nove mogućnosti u produžavanju veka i pouzdanoći tribomehaničkih sistema.

U ovom trenutku, moguće je govoriti o planiranju topografije kontaktnih površina koja će smanjiti habanje. Drugi pravac je svakako modeliranje novih oblika alata sa ciljem da se dobije željena topografija.

Tribometrija je uvek, pa i danas, posebnu pažnju po klanjala problemima identifikacije procesa habanja. Ispравna i tačna ocena i merenje habanja tribomehaničkih sistema je uvek složen postupak koji se pred istraživača postavlja svaki put kao nov i delikatan problem. Rešavanjem ovog problema je vezano za detaljnju analizu ispitivanog sistema, uređaja za ispitivanje i odgovarajuću mernu instrumentaciju.

Merenje habanja tribomehaničkih sistema je vezano za merenje veličina reda desetih delova mikrometra, za merenje teško pristupačnih mesta, kao i za blagovremenu registraciju veoma malih promena.

Danas se u praksi koriste različite metode: počev od klasičnih (merenje habanja mernim sredstvima), preko odredjivanja habanja po gubitku radne sposobnosti, pa sve do primene radioaktivnih indikatora i ozračivanja tankog sloja, odnosno površinske aktivacije. Sve veća primena laserske tehnike nalazi svoje mesto i u tribometriji.

Prednost u upotrebi imaju one metode koje omogućavaju merenja pri ispitivanju i za koje nije neophodno demontirati pojedine elemente sistema. Celishodnija je primena diferencijalnih metoda koje omogućavaju merenje habanja jedne ili više različitih oblasti ispitivane površine tribomehaničkog sistema. Prednost imaju i direktnе metode kod kojih je kvantificiranje informacija dire-

ktno za razliku od indirektnih metoda kod kojih je za ocenu i merenje habanja neophodno uporedjivanje sa odgovarajućim etalonima i prethodno definisanim odnosima.

Danas je ponovo prisutna tendencija korišćenja radioaktivnih izotopa u identifikaciji veličina habanja, mada sve veću primenu nalaze i metode zasnovane na osobinama profilometra.

Često se u naučnoj javnosti pojavljuju nove patentirane metode merenja habanja koje sa više ili manje osetljivosti ili tačnosti identifikuju osnovne parametre. I pored brojnih metoda merenja habanja, sa današnjeg aspekta posmatrano, čini se da će razvoj novih metoda za identifikaciju veličina habanja biti i nadalje atraktivan i aktuelan.

Želja za svestranijim proučavanjem triboloških procesa dovela je do pojave i sve većeg korišćenja ferografa i ferografije. Danas se njima analiziraju i definišu oblici pohabanih čestica, definišu periodi habanja, ukazuju na predstojeća teška oštećenja (pojava svernih čestica pre konačne propagacije pukotine od zamora), analiziraju oksidne čestice nastale kao rezultat neadekvatnog podmazivanja, itd.

U svestranim proučanjima triboloških procesa, svoje mesto su našle i brojne vrste mikroskopa. Danas sa uspeham koristimo bikromatski i SEM (scanning elektronski mikroskop), za proučavanje triboloških procesa i fizičko-mehaničkih karakteristika materijala. Veliki značaj im je što omogućavaju i praćenje razvoja triboloških procesa u kontaktnim slojevima elemenata tribomehaničkih sistema.

Današnji stepen razvoja tribometrije karakteriše i sve veća primena tribometrijskih uredjaja i instrumentata za modelska ispitivanja. Posle kraćeg vremenskog zastoja ovakvih ispitivanja, primetne su u naučnom svetu i nove tendencije u ispitivanjima ove vrste pri čemu se realan tribomehanički sistem sve uspešnije zamjenjuje adekvatnim modelima. Nove vrste davača sila i nove generacije dinamometra uspešno i precizno identifikuju silu i koeficijent trenja. Istovremeno, na ovakvim tribometrima identifikuju se i druge veličine koje prate trenje i habanje: temperatura, intenzitet habanja, otpornost na habanje, buka, vibracija, promena topografije, itd. O velikim mogućnostima tribometra i modelskih ispitivanja svedoče i brojna različita izvodjenja ovakvih uredjaja (234 različita tribometra ASLE-a) i njihova današnja primena.

I ovako kratak i delimičan pregled oblasti izučavanja tribometrije ukazuje na njenu važnost i značaj.

Sve strožiji i obimniji zahtevi koji se postavljaju u svim oblastima nauke i tehnike, za povećanje kvaliteta, veka trajanja i pouzdanosti proizvoda umnožavaju i

daju sve veći značaj i tribometriju. Istraživački i razvojni rad u laboratorijskim, proizvodnim i eksploatacijsko-pogonskim uslovima postao je osnova daljeg napretka.

Savremena streljenja konstruktora: smanjenje gabarita i mase a povećanje brzihodnosti mašina, uređaja, transportnih i drugih sredstava, uslovljavaju sve strožije zahteve ka svestranom proučavanju triboloških procesa i njihove identifikacije. Kao obaveza nameću se sve brojnija i složenija merenja. Sa druge strane, prisutna je i težnja ka redukciji i racionalizaciji merenja, uslovljene ekonomskim faktorima, što nesumnjivo predstavlja kompromis. Detaljna razrada plana izvodjenja eksperimenta i težnja da se minimalnim brojem mernih veličina dobiju potrebne i dovoljne informacije o identifikaciji i ponasanju triboloških procesa, moraju prethoditi svakom ispitivanju. Pravilan izbor mernih veličina, njihovih tolerancija, radnih uslova, odgovarajućih metoda, projektovanje uređaja, mernog instrumentarija i pomoćnih pribora je zadatak svakog istraživača. Zadatak je obiman, složen i odgovoran istovremeno.

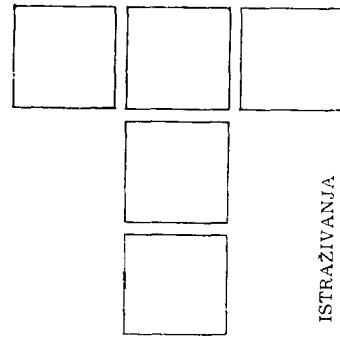
Veliki značaj tribometrije na razvoj tribologije uopšte dobro je poznat i Jugoslovenskom komitetu za tribologiju koji je među prvim sekcijama konstituisao i Sekciju za tribometriju.

Plan i program rada ove sekcije je u pripremi, ali je skoro sigurno da će ona između ostalog:

- pripremati sistematski prikaz trenutnog stanja u oblasti tribometrije u zemlji i inostranstvu,
- ukazati na nepotrebno dupliranje istraživačkih kapaciteta i istraživačkih programa,
- pomoći u razmeni korišćenja veoma skupe opreme i mernih instrumentacija između pojedinih članova Komiteta,
- podržavati razvoj naučno-istraživačkog rada u oblasti tribometrije u godinama koje dolaze,
- aktivno učestvovati u naučno-istraživačkom radu pojedinih članova Komiteta koji iskažu potrebu za njeno uključivanje,
- doprinositi aktualizaciji i podizanju nivoa naučno-istraživačkog rada u oblasti tribometrije i njene primene u tribologiji,
- organizovati tematske sastanke od interesa za industriju i društvo u celini,
- pomoći u podizanju nivoa znanja iz tribometrije kroz organizovanje raznih vidova permanentnog obrazovanja i dr.

Poštujući sebi postavljene ciljeve i zadatke a uvažavajući značaj i mogućnosti tribometrije, Jugoslovenski komitet za tribologiju priprema Internacionalnu školu sa temom: TRIBOMETRIJA - savremeni pristup problemima merenja triboloških karakteristika elemenata tribomehaničkih sistema. (Šira informacija o Internacionalnoj školi na str. 30).

R.MITROVIĆ,M.LAZIĆ,Dj.RADIVOJEVIĆ



Tribološki procesi na osnovnim elementima postrojenja za proizvodnju cementa

1. UVOD

Industrijsko postrojenje za proizvodnju portland - cementa, kapaciteta 2.000 t klinkera na dan, predstavlja složeni proizvodni sistem sa hiljadama potencijalnih mogućnosti koje vrebaju da sistem izbace iz eksploatacije. Olakšavajuća je okolnost što se sistem sastoji od pet podsistema koji u vremenskom intervalu, diktiranom zalihamu materijala, mogu da funkcionišu kao nezavisne celine. Otuda manji kvarovi, čije otklanjanje traje nekoliko časova, ne prouzrokuju zastoj celog sistema. Inače, uz roci pojave kvarova ovakvog sistema se mogu razvrstati u veći broj grupa od kojih svaka ima svoje specifičnosti.

Radom se razmatraju oštećenja nastala kao rezultat triboloških procesa na osnovnim tribomehaničkim sistemima (TMS), procesa izazvanih abrazivnim habanjem pod dejstvom abrazivnih komponenti koje se koriste u proizvodnji portland-cementa. Upoznavanje ove grupe oštećenja ima za cilj iniciranje izgradnje tribološke banke podataka, kao nosioca informacija o pouzdanosti rada, kako pojedinih podsistema tako i kompletног postrojenja (proizvodnog sistema).

2. OSNOVNE KARAKTERISTIKE POSTROJENJA

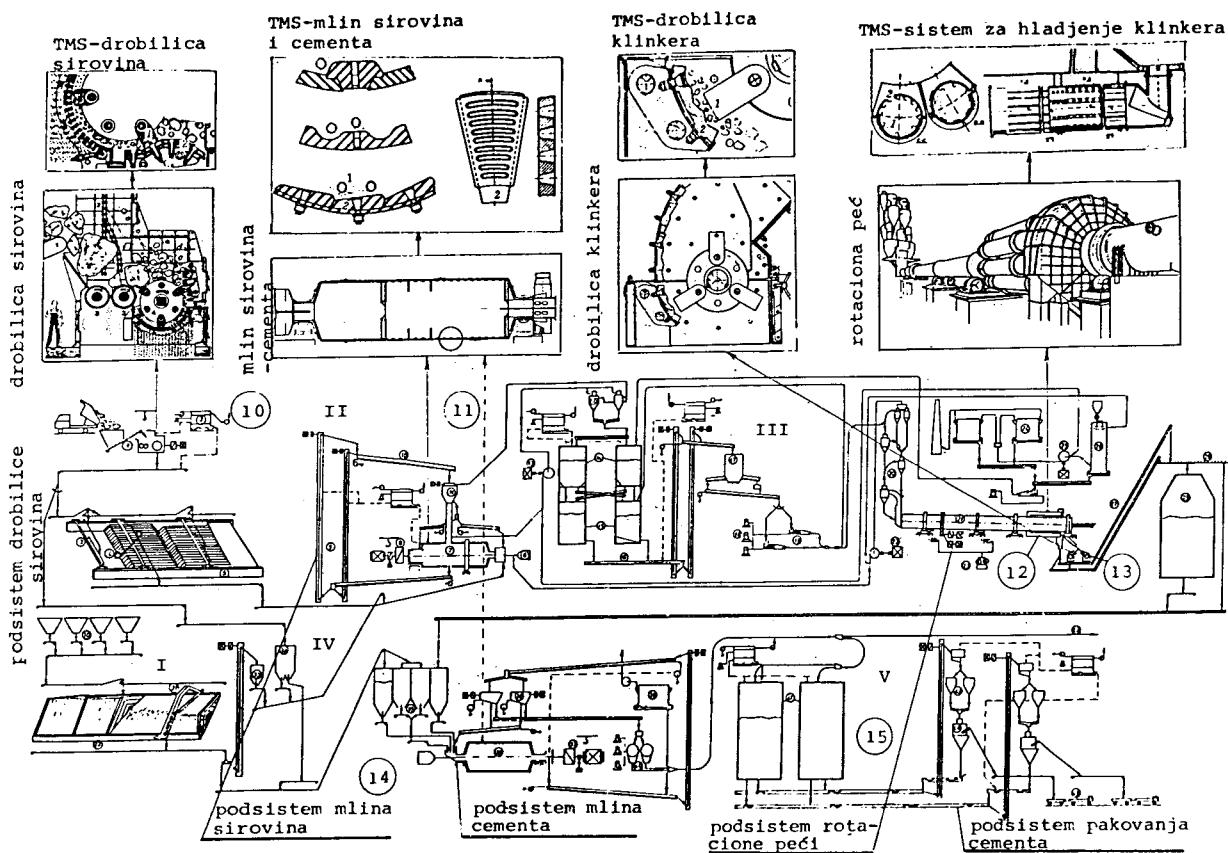
Osnovne sirovine za proizvodnju portland-cementa su krečnjak, laporac, gips, poculan, šljaka i pesak. Proces proizvodnje se odvija u pet karakterističnih faza (sl.1). U prvoj se izvodi drobljenje, transport, predhomogenizacija i uskladištenje sirovine, faza I. Pripremljena sirovina se, u drugoj fazi (II), transportuje i melje u granulat veličine 0,06 mm (sirovinsko brašno). Separacijom, transportom, homogenizacijom i uskladištenjem sirovog brašna završava se druga faza. Daljim transportom, predgrevanjem i pečenjem sirovog brašna formira se, u trećoj fazi (III), klinker, koji se podvrgava hladjenju, drobljenju, transportu i skladištenju. U četvrtoj fazi (IV) se

dodaju odgovarajući dodaci (gips, pesak, poculan i sl.) i izvodi mlevenje cementa. Separacijom, transportom i uskladištenjem cementa završava se četvrta faza i započinje peta (V), u kojoj se izvodi transport, pakovanje i isporuka cementa.

Očigledno je da se kompletan proizvodni sistem sastoji od pet funkcionalno nezavisnih podsistema sa karakterističnim elementima, kao što su: drobilica sirovina (10), mlin sirovina (11), rotaciona peć (12) sa drobilicom klinkera (13), mlin cementa (14) i podsistem pakovanja cementa (15). Sve komponente, neophodne za proizvodnju cementa, poseduju abrazivna svojstva koja u tribomehaničkom sistemu, kroz pojavu trenja i habanja, prouzrokuju rasipanje i mase i energije. To znači, da pored mnogo drugih mogućnosti i razloga ispadanja pojedinih podsistema iz proizvodnje, značajno mesto zauzimaju i zastoji karakteristični za bazne TMS izložene abrazivnom habanju.

Identifikacija osnovnih tribomehaničkih sistema, karakteristika i uslova rada njihovih elemenata (tabela 1) predstavlja osnovu za adekvatno proučavanje triboloških procesa u uslovima abrazivnog habanja, izgradnju tribološke banke podataka i projektovanje optimalnih uslova eksploatacije i održavanja, kao i mera i postupaka povećanja pouzdanosti rada i veka trajanja postrojenja u celiini.

Medutim, treba naglasiti da pored navedenih, baznih, TMS postrojenje karakteriše i niz drugih TMS, manje ili više značajnih. Među njima su, na primer: krune bušilica za sirovine, zupci bagera, zupci svih kofičastih elevatora, cirkulacioni levkovi, transporteri, cevi i mlaznice za transport fluidiziranog brašna i cementa i sl. Sve su to TMS sa manje ili više izraženim abrazivnim i drugim vidovima habanja, TMS koji zahtevaju potpuniju i kompleksniju analizu. Upravo zato je i neophodna izgradnja odgovarajuće tribološke banke podataka.



Sl. 1. - Proces proizvodnje portland-cementata sa izdvojenim baznim TMS

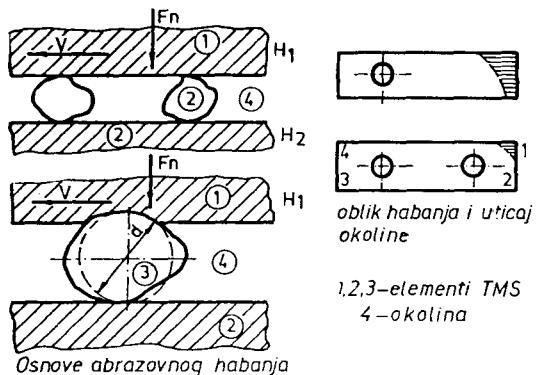
TABELA 1. Osnovne karakteristike baznih TMS postrojenja za proizvodnju cementata

1.DROBILICA KREČNJAKA I LAPORCA
TIP: EV 200x200; proizvodjač: F.L.Smith-Kopenhagen; kapacitet 475 t/h; ulaz: kameni blokovi do 1 m ³ i dužine do 1,25 m; izlaz: granulat 0-30 mm; potrošnja energije 0,9-1,1 kWh/t ELEMENTI TMS: čekić (1) i obložne ploče (2) prema sl.1 KARAKTERISTIKE: čekić: masa 91,5 kg, broj 48, obimna brzina 38 m/s; materijali čekića i obložnih ploča sadrže (1-1,4)%C, (0,4-1)%Si, (12-14)%Mn, 0,06%P
2.MLIN SIROVINA
TIP: dvokorni mlin sa kuglama DUODAN; proizvodjač: F.L.Smith-Kopenhagen; dimenzijske bubenja DxL=8,3x4,8 m; ulaz: granulat 0-30 mm; izlaz: granulat 0,06 mm (sirovinsko brašno); radna zapremina 150 m ³ ; kapacitet 37,5 m ³ ; potrošnja energije 23,7 kWh/t ELEMENTI TMS: čelične kugle (1), obložna (2) i pregradna ploča (2) prema sl.1 KARAKTERISTIKE: čelične kugle: prečnik 15-90 mm, potrebna količina za jedno punjenje 172 t, materijal: ugljenični čelik sa (0,45-0,55)%C, (0,5-0,9)%Mn, 0,05%P, 0,05%S i max 0,3%Si tvrdće 56-58 HRC; materijal elemenata 2: liveni čelik sa (0,65-0,75)%C, (0,55-0,85)%Mn, (0,25-0,45)%Si, (0,8-1)%Cr, 1%Ni, 0,04%S i 0,05%P
3.PLANETNI HLADNJAK
PODACI: Broj bubenjeva (cevi) za hladjenje 10; DxL=1,95x19,8 m; ulaz: klinker; kapacitet 2.000 t/dan; utrošak toplote 3265,7 J/kg ELEMENTI TMS: lopatice i unutrašnji omotač (1) i klinker (2) prema sl.1 KARAKTERISTIKE: materijal elemenata TMS je vatro-otporni nerđajući čelik i čelik otporan na habanje
4.DROBILICA KLINKERA
ELEMENTI TMS: čekić (1) i obložne rešetke (2) prema sl.1 KARAKTERISTIKE: čekić: masa 19,5 kg, broj 36
5.MLIN CEMENTATA
TIP: UNIDAN; D x L = 4,8 x 13,9 m; kapacitet 118 t/h ELEMENTI TMS: kugle (1) i obložne i pregradne ploče (2) prema sl.1 KARAKTERISTIKE: kugle: prečnik 15-90 mm, potrebna količina za jedno punjenje 318 t

3. NEKE KARAKTERISTIKE MEHANIZMA ABRAZIVNOG HABANJA

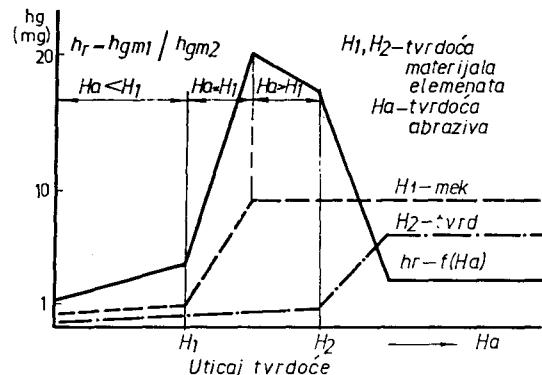
Pod abrazivnim habanjem (sl. 2 i 3 i tabela 2 se podrazumevaju različiti vidovi razaranja površinskih slojeva elemenata TMS, razaranja izazvanog dejstvom abrazivnih čestica. Naime, u kontaktu sa površinskim (kontaktnim) slojem abrazivne čestice dovode do:

- formiranja širokog spektra kontaktnih naprezanja, čija vrednost i karakter raspodele zavise od mehaničkih osobina elemenata TMS, kao i tvrdoće, oblika i dimenzija abrazivnih čestica i uslova njihovog dejstva na kontaktne površine elemenata TMS,
- intenziviranja i drugih mehanizama habanja (atherzijono, difuziono, trib-hemijsko i sl.) karakterističnih za niža kontaktna naprezanja i sl.



Analiza rezultata ispitivanja pokazuje da otpornost na habanje elemenata TMS zavisi, u najvećoj meri, od odnosa tvrdoće materijala elemenata TMS (H) i abraziva (Ha). Za $H/Ha > 0,8$ otpornost na habanje raste, pa se ova zona naziva zonom "mekog abrazivnog habanja". Međutim, pri $H/Ha < 0,8$ opada otpornost na habanje materijala elemenata TMS i nastaje zona "tvrdog abrazivnog habanja". Pri tome se povećanje otpornosti na habanje može postići povećanjem tvrdoće elemenata TMS za najviše 30% iznad tvrdoće abraziva. Dalje povećanje ne obezbeđuje željeni efekat zbog dejstva niza manje ili više složenih procesa.

I ovaj kratak prikaz nekih karakteristika mehanizma abrazivnog habanja ukazuje na svu složenost problematike i neophodnost izgradnje odgovarajuće metodologije labo-



Sl. 2: - TMS u uslovima abrazivnog habanja, oblik habanja i uticaj tvrdoće abraziva na habanje elemenata TMS

TABELA 2: Osnovni vidovi abrazivnog habanja kod baznih i drugih TMS postrojenja za proizvodnju portland cementa

KONTAKTNO-ABRAZIVNO HABANJE	HABANJE U MASI ABRAZIVNIH ČESTICA I ČELIČNIH KUGLI	PNEUMO-ABRAZIVNO HABANJE
kontakt elemenata drobilice sirovina i drbilice klinkera	kontakt elemenata mlini sirovina i mlini cementa, kao i planetnog hladnjaka bez prisustva kugli	kontakt elemenata cevi i mlinica za transport fluidizirano brašna i sl.

Ispitivanja mehanizma abrazivnog habanja, posebno udara i prodiranja abrazivnog zrna u površinske slojeve sa jedne i njihovog kretanja po i kroz površinske slojeve elemenata TMS sa druge strane, pokazala su da nivo kontaktnih naprezanja, kinematske osobenosti trenja i habanja, karakteristike razaranja površinskih slojeva i otpornost materijala elemenata TMS na habanje, zavise od uslova dejstva abrazivnih zrna, tvrdoće elemenata TMS (H_1 i H_2) i karakteristika abraziva (sl. 2 i 4).

ratorijskih i eksploracionih ispitivanja. To tim prešto vek trajanja, pouzdanost rada i druge tehnno-ekonomske karakteristike rada postrojenja u celini (sl. 5) zavise 60-70% od otpornosti na habanje, odnosno triboloških karakteristika elemenata TMS, posebno otpornosti na abrazivno habanje.

Veliki broj parametara uticajnih na uslove ostvarivanja kontakta osnovnih TMS postrojenja, elemenata TMS, osobine elemenata TMS, niz karakterističnih pojava i

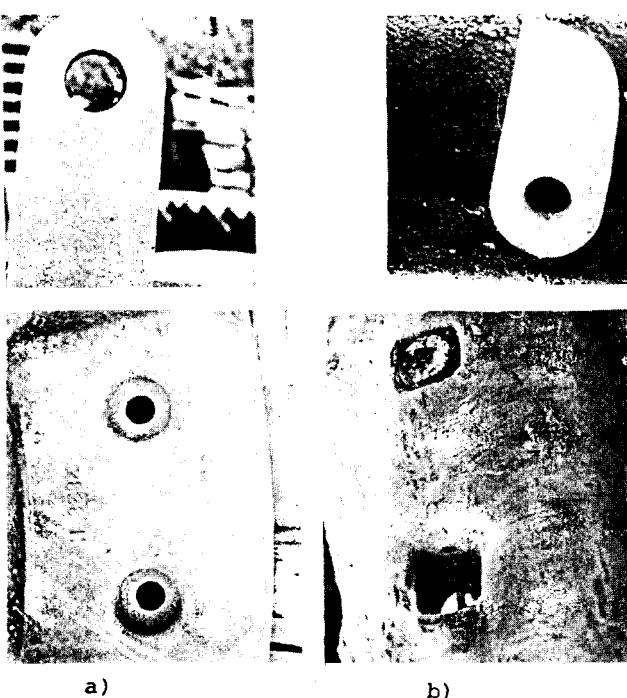
triboloških procesa, poboljšanje triboloških karakteristika elemenata TMS, upravljanje tribološkim procesima, itd.

4. TRIBOLOŠKA BANKA PODATAKA

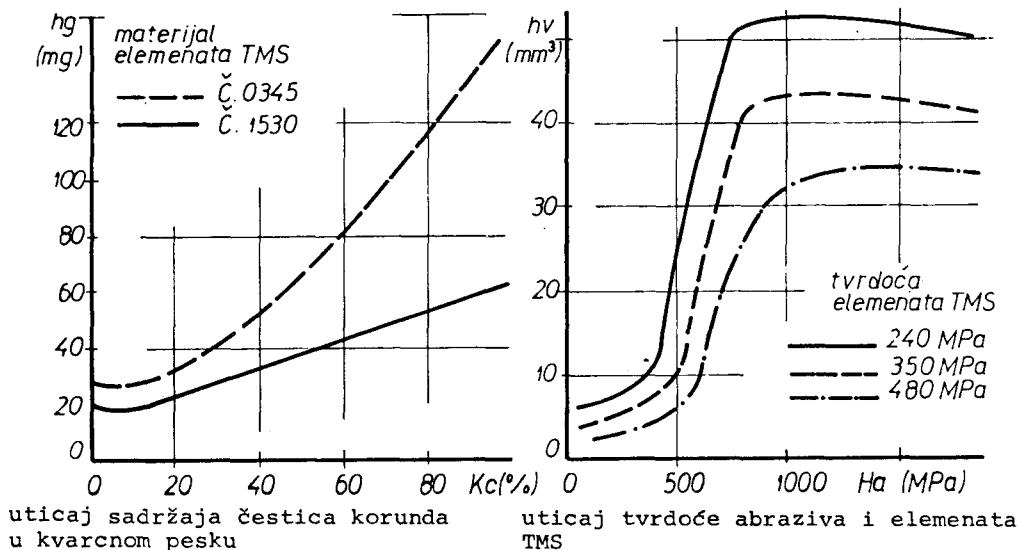
Izgradnja tribološke banke podataka, u uslovima abrazivnog i drugih vidova i mehanizama habanja TMS postrojenja za proizvodnju cementa, podrazumeva (sl. 6) identifikaciju svih relevantnih parametara, proučavanje triboloških procesa (posebno mehanizma abrazivnog habanja), definisanje triboloških karakteristika elemenata TMS i oblikovanje odgovarajuće dokumentacije za prikupljanje (snimanje), smeštaj i čuvanje, inoviranje (izmenu), dogradnju i prikazivanje (korišćenje) podataka (tabela 3).

Projektovanjem metodologije ispitivanja, praćenja i analize abrazivnog habanja i izgradnjom banke triboloških podataka stvaraju se uslovi za optimalno praćenje, upravljanje i kontrolu, održavanje postrojenja i realizaciju niza drugih relevantnih aktivnosti. To tim prešto je moguće formirati niz različitih pregleda i dokumentata značajnih za optimalnu eksploataciju postrojenja za proizvodnju cementa (tabele 4 i 5). Poseban značaj imena projektovanje dokumentacije neophodne za projektovanje uslova održavanja i svih aktivnosti vezanih za održavanje postrojenja (sl. 7).

Očigledno je da razvoj tribološke banke podataka, potrebnih za analizu i praćenje rada postrojenja za proizvodnju cementa, zahteva celovitu, kompleksnu i potpunu analizu procesa kontakta u uslovima abrazivnog habanja (triboloških procesa), razradu odgovarajuće metodologije modelskih, laboratorijskih i eksploatacionih ispitivanja i sl.



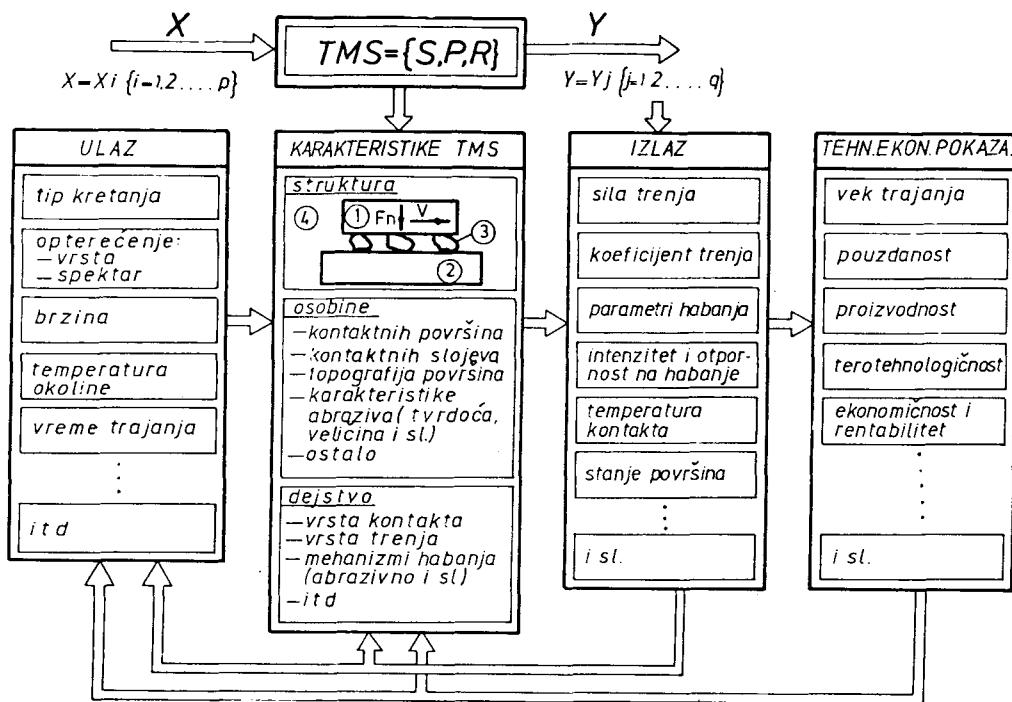
Sl. 3. - Izgled nekih elemenata TMS postrojenja-novih (a) i pohabanih (b)



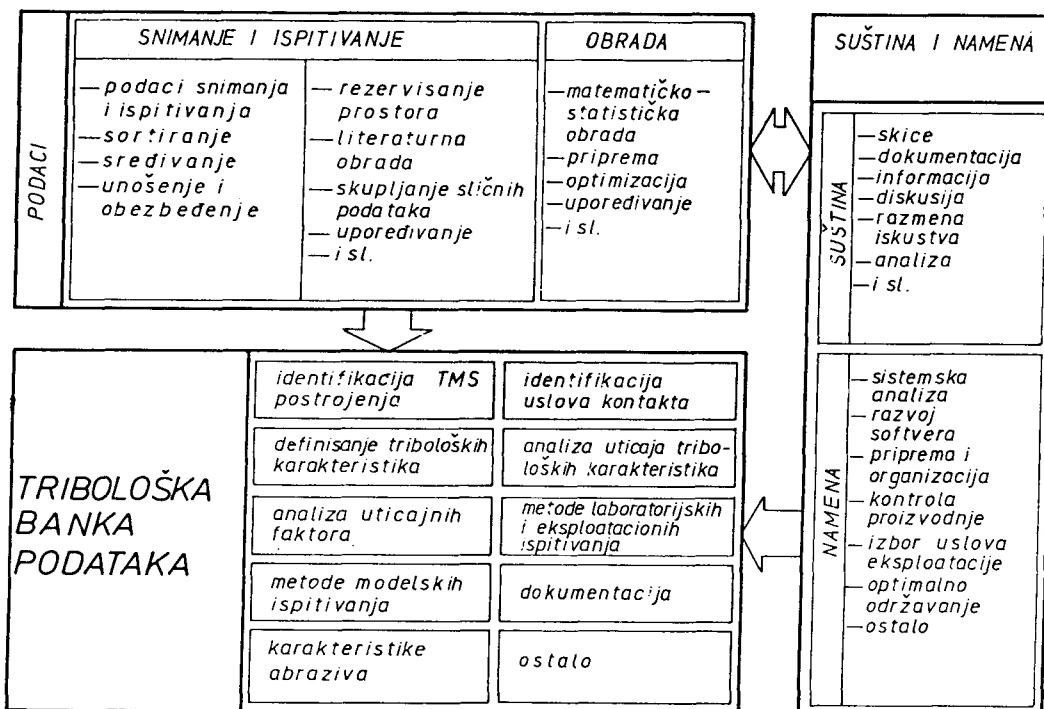
Sl. 4. - Uticaj nekih karakteristika na abrazivno habanje 5

procesa, kao i niz izlaznih relevantnih parametara (triboloških karakteristika elemenata TMS), čini razjašnjenje triboloških procesa u TMS postrojenja za proizvodnju cementa veoma složenim i kompleksnim. Identifikacija ponutnih faktora i parametara podrazumeva niz aktivnosti usmerenih ka: razvoju metoda identifikacije TMS i njihovih karakteristika, metoda i postupaka istraživanja

**S tribologijom se
može više**



Sl. 5. - Šema medjuzavisnosti tehno-ekonomskih pokazatelia rada postrojenja od ulaznih i izlaznih parametara i karakteristika elemenata TMS



Sl. 6. - Šema tribološke banke podataka

TABELA 3: Mogući sadržaj dokumenta TMS

TMS: DROBILICA SIROVINA Šema TMS RADIONIČKI CRTEŽ		list listova	
Element 1: čekić		Element 2: Obložna ploča	
K A R A K T E R I S T I K E E L E M E N T A			
	element 1 čekić	element 2 obložna ploča	element 3 abraziv
-materijal heminski sastav			-vrsta materijal oznaka
tvrdoca			-oblik dimenzije
žilavost			-karakteristike tvrdoca čvrstoča i sl.
-kontaktna površina hrapavost			...
kriva nošenja profila			NAPOMENE:
i sl.			
-kontaktni sloj struktura			
tvrdoca			
i sl.			
-uslovi formiranja sloja			
vrsta obrade			
režim obrade			
i sl.			
...			



Sl. 7. - Osnovne aktivnosti održavanja postrojenja

TABFLA 4: Intenzitet razvoja triboloških procesa na elementima TMS

red. br.	TMS	elementi TMS	oznaka	abrazivno habanje		
				podaci iz literature	modelska ispitivanja	eksploracija
1.	drobilica sirovina	čekić obloga				

TABELA 5: Parametri vezani za održavanje elemenata TMS

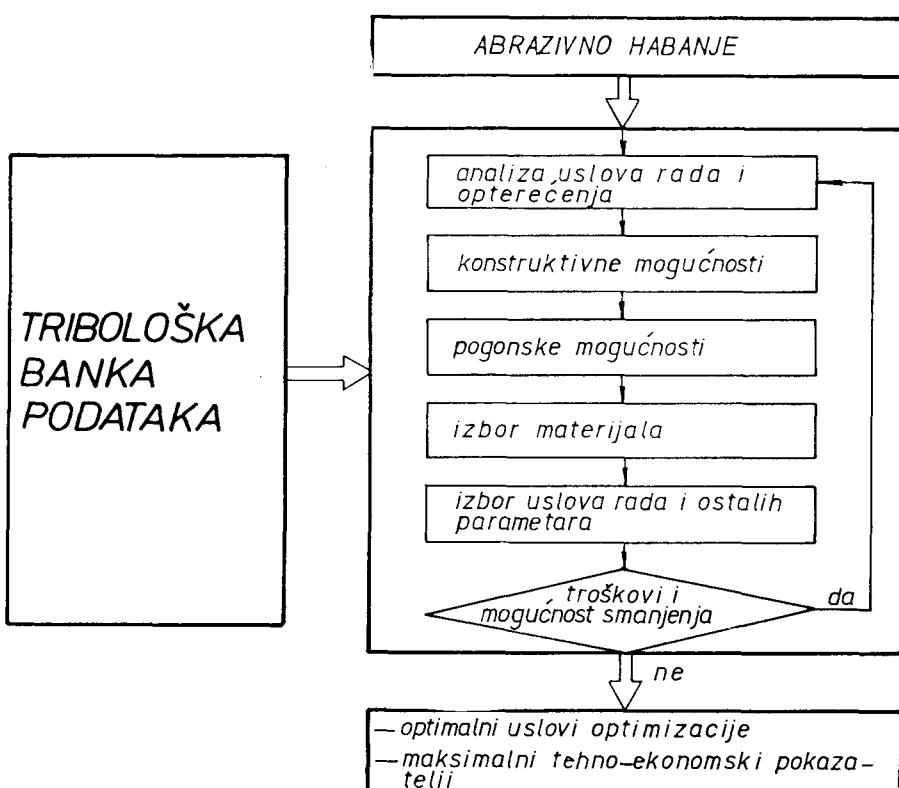
red. br.	TMS	elementi TMS	ukupno habanje	otpornost na habanje	vek trajanja	zamena	
						potrebna kolicina	vreme
1.	drobilica sirovina	čekić obloga					

5. ZAKLJUČCI

Problematika eksploatacije, upravljanja i održava - nja postrojenja za proizvodnju portland cementa je slo - žena i kompleksna. Njeno rešavanje zahteva adekvatna pro - učavanja i ispitivanja ne samo triboloških procesa koji se razvijaju u uslovima abrazivnog habanja, već i niza drugih manje ili više relevantnih parametara i procesa.

Jedino tako je moguće stvoriti neophodne preuslove za optimalno korišćenje postrojenja, povećanje vrednosti tehnico-ekonomskih pokazatelia i postizanje maksimalne pro - izvodnosti i rentabilnosti postrojenja (sl. 8).

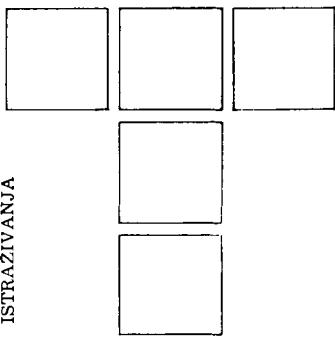
Polazeći od prikazanih analiza i sagledavanja, oček - uje se u narednom periodu izgradnja tribološke banke po - dataka i stvaranje osnovnih preuslova za optimalno up - ravljanje postrojenjem.



Sl. 8: - Moguća šema izbora optimalnih uslova eksploracije i postizanja maksimalnih tehno-ekonomskih efekata u eksploraciji postrojenja za proizvodnju portland cementa

6. LITERATURA

- [1] ADAMOVIĆ Ž., Osnovna koncepcija upravljanja održavanjem pomoću računara, Časopis ZASTAVA, No 13, Kragujevac, 1986.
- [2] DUDA W., Cement-data-Book, Bou-verlag GmbH Wiesbaden und Berlin, 2. Aufgabe, 1974.
- [3] IVKOVIĆ B., Osnovi tribologije u industriji prerađe metala, Građevinska knjiga, Beograd, 1983.
- [4] LAZIĆ M., Tribološki aspekt projektovanja i konstruisanja mašina alatki-tribološka banka podataka, Tribologija u industriji, No 4, Kragujevac, 1986.
- [5] TENENBAUM M.M., Soprotivlenie abrazivnomu iznašivaniju, Mašinostroenie, Moskva, 1976.
- [6] WAHL W., Gezielter Verschleis-schutz in der Zementindustrie, ZKG, No. 11, 1982.



A.JANKOV

Pneumo-hidraulična provodljivost kontakta u uslovima normalnih dinamičkih opterećenja

(S bugarskog preveo: SLAVKO ARSOVSKI)

UVOD

Ispitivanje stanja kontakta pomoću fluidnog toka osnovni je pneumo-hidraulični metod, koji poslednjih godina nalazi sve više primenu u tribologiji [1]. Suština ovog metoda se sastoji u mogućnosti određivanja: naprezanja, deformacija, habanja, temperatura, zazora, itd. u kontaktu, posredstvom gasova ili tečnosti [1,2,3,10,11].

TEORIJSKE OSNOVE

Zavisnost fluidne provodljivosti od statičkog normalnog opterećenja izražena je teorijski i eksperimentalno u širokom dijapazonu kontaktne naleganja [1,2,3]. Ulazi normalnih i tangencijalnih opterećenja u kontaktu posvećen je veliki broj radova vezanih za samopobudne oscilacije i sniženje sile trenja [4,5,6,9], sa ostvarenjem dinamičke kontaktne elastičnosti [7] i fretting-korozije [9]. Pri izučavanju normalnih primudnih oscilacija u kontaktu koristi se dinamički model, kod kojeg se razmatra uzajamno dejstvo kontaktne mase (m) po glatkoj površini, opterećenoj silom $N = N_1 + F$. Statička komponenta (N_1) veća je od dinamičke $F = N_2 \cos \omega t$, i sa njom se onemogućava potpuno rasterećenje kontakta pri oscilacijama. Sila (F) se izražava nelinearnom zavisnošću oblika $N = k_1 x + k_2 x^2 - k_3 x^3$ dok se otporne sile uzimaju u zavisnosti od viskoznog trenja. Za zakon prinudnog krutanja uzorka preporučena je [6,7] zavisnost oblika:

$$x(t) = A_o + \sum_{i=1}^3 A_i \cos i(\omega t + \delta), \quad (1)$$

gde je: A_i – amplituda i -tog harmonika, dok se A_o određuje iz izraza:

$$A_o = -\frac{\alpha}{2} \frac{H_o^2}{[(w_o^2 - w^2)^2 + 4\lambda w^2]w_o^2} \quad (2)$$

gde je: $w_o = \sqrt{\frac{k_1}{m}}$ sopstvena učestanost kontakta. Pri tome su: $\alpha = \frac{k_2}{m}$, $H_o = \frac{N_2}{m}$, λ je linearni koeficijent viskoznog trenja. Negativni znak u formuli (2) sledi iz usvojenog smera koordinatne ose na dole (+ x – zbližavanje kontakta).

Veličina A_o zavisi od kvadrata amplitude oscilacija, od nelinearnog zakona elastičnih deformacija i ima rezonantan karakter s obzirom na ugaone učestanosti w_o i w . Postojanje A_o u zakonu kretanja [1] čijašnjava se sa nelinearnim karakterom pomeranja kontakta i ono određuje podizanje uzorka pri oscilacijama prema položaju statičke ravnoteže. Ovo utiče na položaj uzorka, kao i na inercijalne sile, čime se objašnjava opadanje sile trenja u uslovima normalnih dinamičkih opterećenja [4,5,6].

U opštem slučaju fluidna provodljivost kontakta (G) se može izraziti u obliku:

$$G = B(L_i) C(p) h^3 \quad (3)$$

gde je: $B(L_i)$ veličina zavisna od forme i veličine kontaktne površine,

$C(p)$ je funkcija pritiska

(h) redukovani kontaktni zazor.

Ako sa (G_o) i (h_o) označimo provodljivost i zazor pri normalnom statičkom opterećenju, a sa (G) $I(h)$ pri normalnom dinamičkom opterećenju, a promenu zazora pri dinamičkom opterećenju sa (Δh) sledi zavisnost:

$$h = h_o \pm \Delta h \quad (4)$$

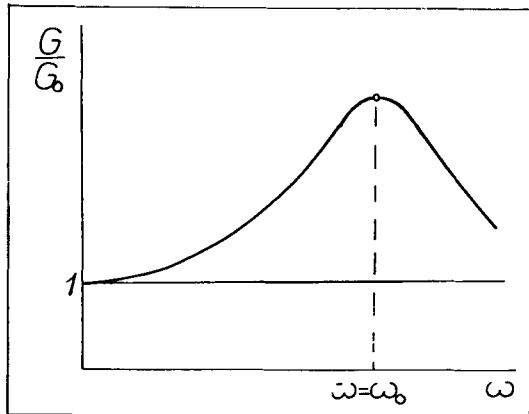
Iz (3) i (4) se dobija odnos $\frac{G}{G_o}$

$$\frac{G}{G_o} = \left(\frac{h_o}{h} \right)^3 = (1 \pm \frac{\Delta h}{h_o})^3 \approx (1 \pm 3 \frac{\Delta h}{h_o}) \quad (5)$$

Promena zazora (Δh) za period $T = \frac{2\pi}{\omega}$ iznosi:

$$\Delta h = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (6)$$

Iz (6) i (1) sledi da porast kontaktnog zazora pri dina-



Sl. 1. - Rezonantna promena pneumo-hidraulične provodljivosti kontakta

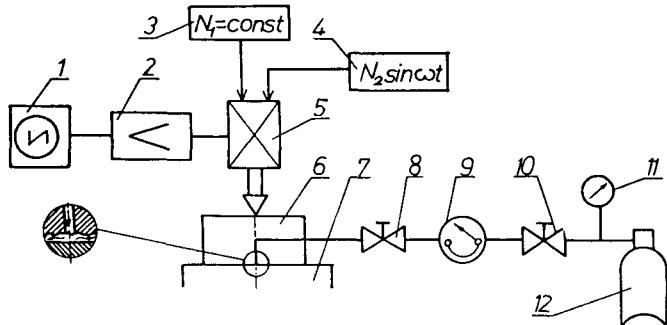
mičkom opterećenju zavisi od A_0 . Ovo iziskuje ispitivanje odnosa G/G_0 u širokom dijapazonu promene učestanosti amplituda i deformacionih karakteristika kontakta. Trebalo bi očekivati rezonantan karakter zavisnosti

$$\frac{G}{G_0} = f_1(\omega)$$

kao na slici 1.

EKSPERIMENTALNI REZULTATI

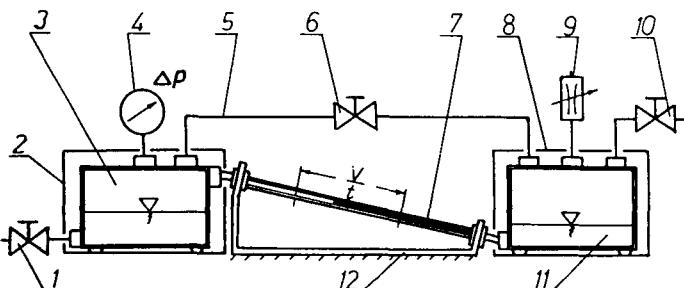
Eksperimentalno ispitivanje provodljivosti pneumo-hidrauličnog kontakta u uslovima normalnih dinamičkih opterećenja obavljeno je u Laboratoriji za obradu metala i



Sl. 2. - Šema merne instrumentacije

tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu. Instrumentacija koja je korišćena za eksperiment se sastoji od tribometra i pneumo-hidrauličnih elemenata, slika 2.

Tribometar je snabdeven mehanizmom (3) za opterećivanje statičkom silom N_1 do 20 daN i centrifugalnim oscilatorom (4) za postizanje normalne dinamičke sile sa amplitudom do $N_2 = 8$ daN pri učestanosti $f = (10 \div 100)$ Hz kod nepokretnog kontaktnog para. Brzine kretanja su $40 \div 500$ mm/min (9). Opterećenje se sa dinamometra (5) prenosi na pojačivač (2) (HBM/KWS) i očitava na osciloskopu (1) (422 TEKTRONIX - HOLLAND). Pri eksperimentu je ispitivan nepokretni kontaktni par poz. 6 i 7. Na ispitivanom uzorku izradjen je otvor kroz koji se u kontaktu ostvaruje pad pritiska fluida Δp . Pneumo-hidraulični sistem sadrži merač protoka (9) smešten između ventila (8) i (10) i povezan sa vazduhom iz suda (12). Šema merača protoka prikazana je na sl. 3. Njegovi osnovni elementi su komore (3) i (11) povezane vodom (5) na kome se nalazi ventil (6) i kapilar (7). Komora (3) se puni vazduhom ili tečnošću do određenog nivoa i povezuje se kontaktnim parom. U komori (11) se nalazi merljiva tečnost (alkohol) pod pritiskom Δp . Pritisak se reguliše regulatorom pritiska (9) i meri manometrom (4). Izolaciona komora (2) i (8) eliminise uticaj promene temperature okoline. Postupak rada sa meračem protoka je sledeći: pri zatvorenom ventilu (1), slika 3, i otvorenim ventilima (6) i (10) u komorama se stvara pritisak malo veći od željenog Δp . Zatvara se ventil (10) a korišćenjem regulatora pritiska (9) i očitavanjem na manometru (4) tačno se reguliše veličina Δp . Otvara se ventil (1) i merač protoka se pove-



Sl. 3. - Šema merača protoka

zuje sa kontaktnim parom, koji je prethodno opterećen normalnom silom. Merenje počinje zatvaranjem ventila (6). Zbog isticanja fluida u zoni kontakta, pritisak u komori (3) počinje da pada što prouzrokuje kretanje merene tečnosti u kapilarnoj cevi. Kontaktna otpornost (R) i provodljivost (G) određuju se iz formule:

$$R = \frac{I}{G} = \frac{\Delta p}{Q} = \frac{\Delta p}{V} t \quad (7)$$

gde je: Q - protok fluida kroz kontakt,

V - izmerena zapremina na kapilarnoj cevi,

t - vreme za koje se u kapilarnoj cevi popuni odredjena zapremina (V).

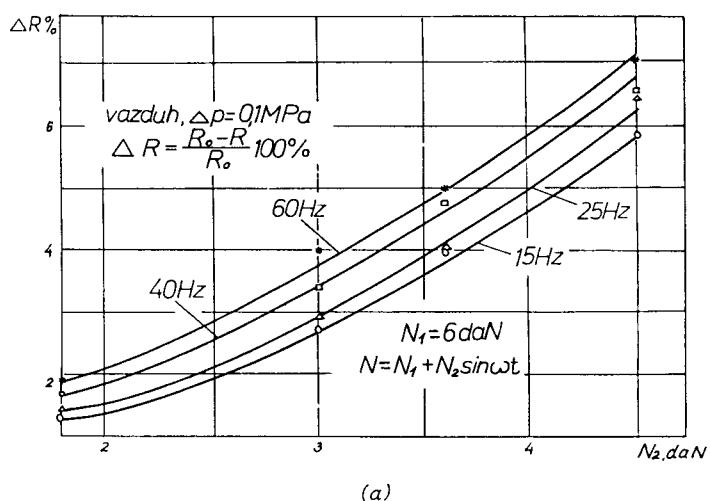
Kada tečnost dostigne gornji kraj na kapilarnoj cevi ventil (6) treba otvoriti, pri čemu se pritisak u komorama uravnotežava. Tečnost se vraća na prethodni nivo i merenje može da se ponovi. Okolina i hermetičnost sistema imaju veliki uticaj na tačnost merenja. Neophodno je da pri zatvorenim ventilima (1), (6) i (10) i pritisku Δp , položaj tečnosti u kapilarnoj cevi ostane nepromenjen. Na sl. 4 prikazani su rezultati ispitivanja zavisnosti relativne promene fluidne otpornosti (ΔR) od amplitudu dinamičke sile (N_2), dok je na sl. 5 data zavisnost iste od u-

čestanosti (f). Relativna fluidna otpornost data je izrazom:

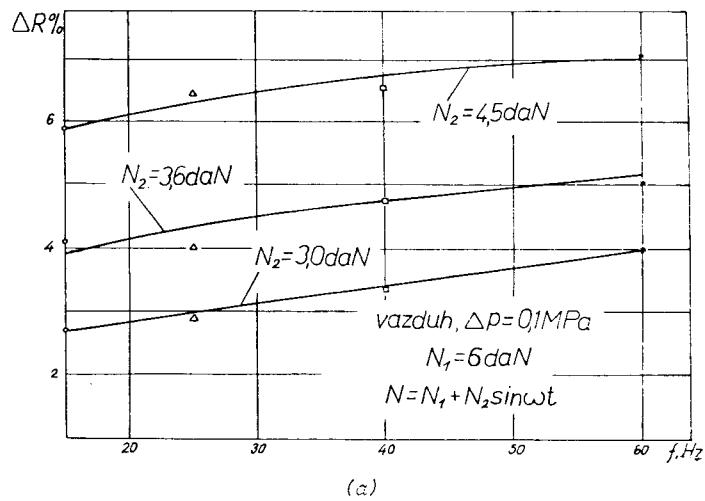
$$\Delta R = \frac{R_o - R}{R_o} 100\% \quad (8)$$

R_o i R su otpornosti izmerene pri statičkom (N_1) i dinamičkom opterećenju $N = N_1 + N_2 \sin \omega t$.

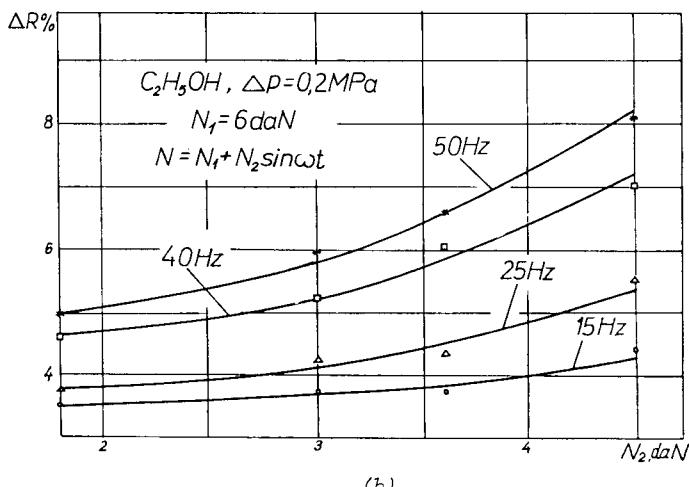
Na sl. 4a i 5a su prikazani rezultati eksperimenata izvedeni sa vazduhom pri $\Delta p = 0,1$ MPa, a na sl. 4b i 5b rezultati su dobijeni sa fluidom - etil alkoholom (C_2H_5OH) pri $\Delta p = 0,2$ MPa. Kod oba eksperimenta korišćen je kontaktni par od livenog gvožđa i čelika Č.1730 sa nominalnom površinom 1 cm^2 . Mikrogeometrija je bila izotropna sa hrapavošću $R_a = 2,1 \pm 0,4 \mu\text{m}$, dobijena trenjem sa abrazivnim prahovima. Kontaktni par je prethodno ciklično opterećivan statičkim opterećenjem $N_1 = 6 \text{ daN}$, sa ciljem eliminisanja uticaja vremenskog faktora [3], dok



(a)

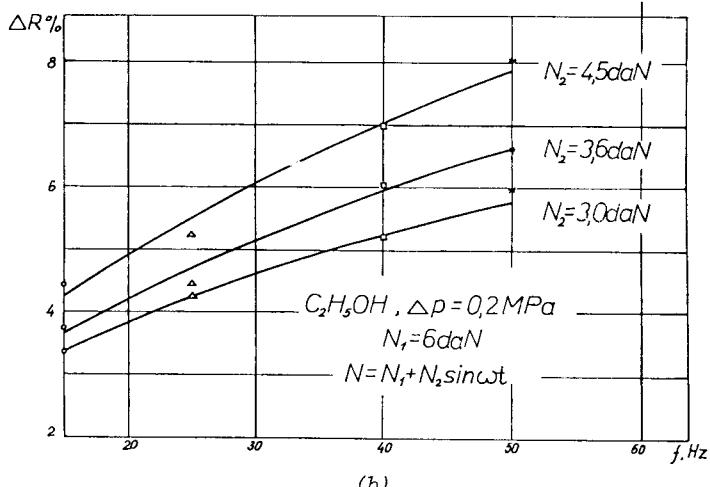


(a)



(b)

Sl. 4: - Zavisnost relativne otpornosti ΔR od amplitudu dinamičke sile N_2 za vazduh (4a) i alkohol (4b)



(b)

Sl. 5: - Zavisnost relativne otpornosti ΔR od učestanosti (f) dinamičke sile sa vazduhom (5a) i alkoholom (5b)

je prethodno dinamičko opterećenje vršeno sa probnim uzorkom.

ZAKLJUČAK

1. Utvrđeno je da se povećava pneumohidraulična provodljivost nepokretnog kontaktnog para u uslovima normalnih dinamičkih opterećenja, što je još jedna potvrda o razdvojenosti kontaktnih površina pri vibracijama - oscilacijama.

2. Dobijene eksperimentalne zavisnosti promenom pneumohidraulične otpornosti pri normalnim dinamičkim opterećenjima (sa učestanostu 15 do 60 Hz i amplitudom do 0,75 od statičke sile) ukazuju na veći uticaj amplitude od učestanosti.

3. Neophodno je vršiti ispitivanje sa pokretnim kontaktnim parom sa učestanostu do nekoliko KHz i paralelno pratiti na osciloskopu oscilacije kontaktnog para. Utvrdila bi se rezonantna promena fluidne provodljivosti, što bi dalo nove podatke o ponašanju kontaktnih elemenata u dinamičkim uslovima. Ovo je od posebnog značaja za pneumohidrauličnu provodljivost sa aspekta hermetičnosti sklopova i efektivnosti procesa hladjenja i podmazivanja kontakta.

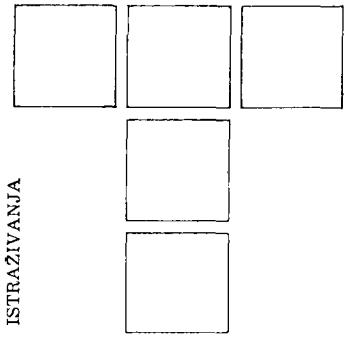
LITERATURA

- [1] МАНОЛОВ Н.: Пневмоидравличният метод в трибологията, Автореф. на докт. дис., София, 1984 г.
- [2] МАНОЛОВ Н.: Пневматический метод исследования контакта твердых тел, Сб. Стандартизация и унификация средств и метод испытания на трение и износостойкость, т. 2, Москва, 1975 г.
- [3] ЯНКОВ А. Пневматично съпротивление на контакта на твърди тела, Автореф. на канд. дис., София, 1978 г.
- [4] ТОЛСТОЙ Д. Н.: Собственные колебания ползуна, зависящие от контактной жесткости и их влияние на трение, Докл. АН СССР, 1963 г., т. 153, № 4.
- [5] БУНДАНОВ Б.В.: Кудинов В.А., Толстой Д.Н., Взаимосвязь трения и колебаний, Трение и износ, 1980, т. I, № 1
- [6] ИВЛЕВ В.И.: О влиянии нормальных колебаний на величину силы трения, Машиностроение, 1981, № 3.
- [7] ИВЛЕВ В.И., ДМИТРИЕВ Н.И.: Динамический метод определения жесткости контакта, Метрология, № 10.
- [8] МАНОЛОВ Н., ГЪРКОВА А.: Динамика на фретинг-корозия Год. на ВУЗ "Техническа механика", т. 18, кн. 2, София, 1983.
- [9] JEREMIĆ B.: Uticaj dinamičkog opterećenja i vibracija na uslove ostvarivanja kontakta, Tribologija u industriji, br. 3. 1984, Kragujevac.
- [10] MANOLOV N.: The Pneumatic Method in Tribomery, 3 rd Int. Tribology Congress "EUROTRIB" 81.Warsawa.
- [11] MANOLOV N., JANKOV A.: et al., Pneumohydraulic solid contact conductance, II Symposium INTERTRIBO' 84, ČSSR.

JANKOV ALEKSANDAR, naučni saradnik u Centralnoj laboratoriji VMEI - Lenin u Sofiji



Rodjen 1949. godine u Sofiji. Završio VMEI-Lenin u Sofiji 1972. godine, na smjeru "Tehnologija mašinogradnje i alatne mašine". Radio je kao tehnolog u Institutu za alatne mašine. Od 1975. godine radi u Centralnoj laboratoriji za tribologiju VMEI-Lenin u Sofiji. Disertaciju o problemima pneumatičke provodljivosti kontakta završio je 1978. god. Bavi se ispitivanjima, proračunima i optimizacijom hermetičnosti kontakta.



Tribološki aspekt projektovanja i konstruisanja mašina alatki -tribološki ispravna konstrukcija-

1. UVOD

Problematika formiranja tribološki ispravne konstrukcije (konstrukcije maksimalnih tehnico-ekonomskih efekata sa minimalnim utroškom raspoloživih resursa) uključuje, pored sistemskog prilaza i izgradnje tribološke banke podataka [5,6], i kompleksno sagledavanje uticaja konstruktivnog oblikovanja elemenata na tribološke karakteristike elemenata tribomehaničkih sistema (TMS) i tehnico-ekonomiske pokazatelje rada konstrukcije. To tim pre što neprekidan razvoj nauke, tehnike, tehnologije i proizvod - nje zahteva sve strožije uslove rada elemenata TMS (povećanje brzina, opterećenja, temperatura i sl.), uz stalno prisutnu tendenciju smanjenja gabarita i mase konstrukcije.

Formiranje tribološki ispravne konstrukcije pretpostavlja takvo oblikovanje elemenata TMS, koje će obezbiti minimalno mogući intenzitet razvoja triboloških procesa, u uslovima realizacije predviđene i zadate funkcije TMS. Međutim, to ne znači da treba eliminisati trenje i habanje, već treba obezbediti usporavanje triboloških procesa i stvoriti mogućnost za njihovo kontrolisanje i upravljanje. Time se ne ugrožava funkcija TMS, sigurnost i pouzdanost njegovog rada.

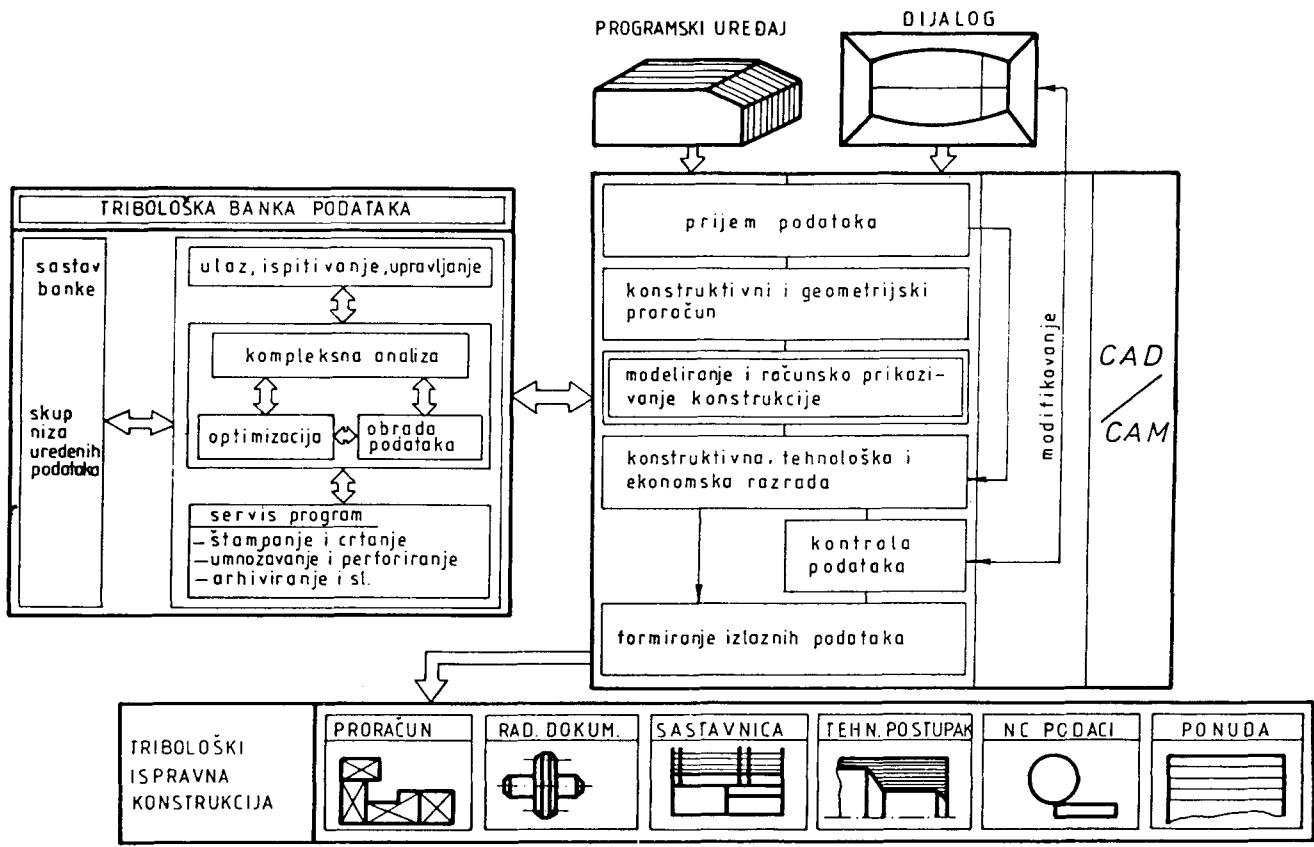
2. OSNOVE PROJEKTOVANJA TRIBOLOŠKI ISPRAVNE KONSTRUKCIJE

Razvoj sistema automatskog projektovanja, konstruisanja i tehnološke razrade proizvoda (CAD/CAM sistema - sl. 1), metoda određivanja triboloških karakteristika elemenata TMS, metoda i postupaka analize relevantnih parametara uticajnih na konstruktivno oblikovanje, nauke, tehnike i tehnologije, obezbedjuje i stvaranje uslova za tribološki ispravno oblikovanje elemenata TMS i konstrukcija u celini. Osnovu razvoja tribološki ispravne konstrukcije čini kompleksna analiza svih relevantnih parame-

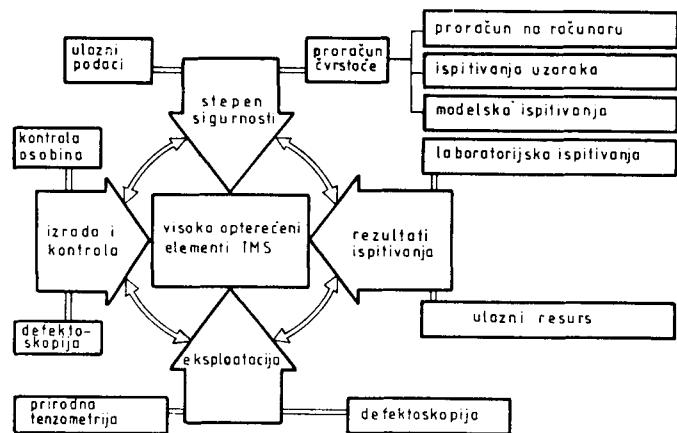
tara uticajnih na oblikovanje i analizu uticaja konstruktivnog oblikovanja, pre svega, elemenata TMS na tribološke karakteristike elemenata TMS i tehnico-ekonomске pokazatelje rada TMS i konstrukcije u celini. Samo na bazi celovite analize rezultata teorijskih i eksperimentalnih istraživanja (sl. 2) formira se niz podataka značajnih i neophodnih za oblikovanje konstrukcija odgovarajućih karakteristika.

Polazeći od činjenice da konstruktivno oblikovanje elemenata, podsklopova i sklopova konstrukcije ima veliki uticaj na koncentraciju i raspodelu kontaktnih opterećenja, pojavu dinamičkih opterećenja i vibracija, kontaktna pomeranja, geometriju zazora, elastična i plastična deformisanja kontaktnih slojeva elemenata TMS i druge karakteristike uslova rada, očigledan je i uticaj oblikovanja elemenata TMS na intenzitet razvoja i triboloških procesa (trenje, habanje i sl.). U praksi se ovoj činjenici poklanja relativno mala pažnja, što je, verovatno, povezano sa nedovoljnim teorijskim i eksperimentalnim istraživanjima u oblasti tribologije. Ovo tim pre što se problematika povećanja veka trajanja i pouzdanosti rada (otpornosti na habanje elemenata TMS), korekcije i ispravke grešaka konstrukcije ne može rešavati samo izborom jednog od elemenata TMS (sredstva za podmazivanje). Međutim, treba naglasiti da neke karakteristike kontakta ne moraju, uvek, imati negativan efekat. Tako, na primer, efekat kontaktnih pomeranja, kod pravilnog oblikovanja i konstruisanja elemenata TMS, može biti i pozitivan i dovesti do ravnomernije raspodele kontaktnih pritisaka, smanjenja ili potpunog gašenja vibracija.

Problematika razvoja tribološki ispravnih konstrukcija zahteva analizu i sagledavanje niza relevantnih parametara vezanih kako za razvoj triboloških procesa, tako i za niz drugih karakterističnih procesa, direktno ili indirektno, uticajnih na pouzdanost rada, vek trajanja i



Sl. 1. - Principijelna struktura CAD/CAM sistema projektovanja, konstruisanja i tehnološke razrade novog proizvoda



Sl. 2. - Moguće aktivnosti u procesu formiranja tribološki ispravne oblikovanih elemenata TMS

druge tehno-ekonomske pokazatelje rada. Osnovne konstruktivne mogućnosti uticajne na oblikovanje i formiranje tribološki ispravne konstrukcije, između ostalog, su:

- adekvatno oblikovanje podsklopova i sklopova kons-

trukcije,

- iznalaženje optimalnog oblika i dimenzija elemenata TMS,
- optimalno definisanje osnovnih karakteristika kontakta elemenata TMS (oblik i dimenzije zazora, mogućnost njegovog automatskog podešavanja i sl.),
- maksimalna primena elemenata kod kojih se ostvaruje trenje kotrljanja,
- optimizacija uslova kontakta (izbegavanje otvorenih TMS, obilno podmazivanje, sprečavanje zagadjenja pojave tvrdih čestica u kontaktu, primena savremenih zapitivki, kao što su labirintske koje obezbeđuju povećanje veka trajanja za 3-4 puta ili brisači vodjica alatnih mašina sa povećanjem veka trajanja i do 1,5 puta),
- oblikovanje elemenata koji mogu dovesti do poboljšanja uslova rada elemenata TMS (elementi koji obezbeđuju poništenje aksijalnih sile, rasterećenje i ravnomerniju raspodelu kontaktnih opterećenja),
- adekvatno definisanje mikrogeometrije kontaktnih površina elemenata TMS (kod hidrodinamičkog podmaziva - nja noseća sposobnost i pouzdanost rada se suštinski povećavaju sa porastom hrapavosti kontaktnih površina),

- obezbeđenje ravnomernog habanja elemenata TMS o-tvrdnjavanjem delova kontaktnih površina koji se brže habaju (indukcionim kaljenjem, nanošenjem prevlaka i sl.),

- maksimalna primena lako izmenjivih elemenata TMS sa vekom trajanja koji odgovara periodu između dva remonta,

- oblikovanje kontaktnih površina u skladu sa pojmom habanja (na primer, zubi zupčanika prof. Novikova) i iznalaženje postupaka kompenzacije habanja,

- prenošenje habanja na elemente ili površine manje uticajne na tehn.-ekonomske pokazatelje rada konstrukcija,

- obezbeđenje kompenzacije radikalnih i aksijalnih temperaturnih dilatacija, itd.

Sve su to elementi koji su manje ili više uticajni na tribološki ispravno oblikovanje i koje treba imati u vidu kod razvoja novih konstrukcija. Njihovom detaljnom analizom mogu se obezbediti maksimalni tehn.-ekonomski efekti.

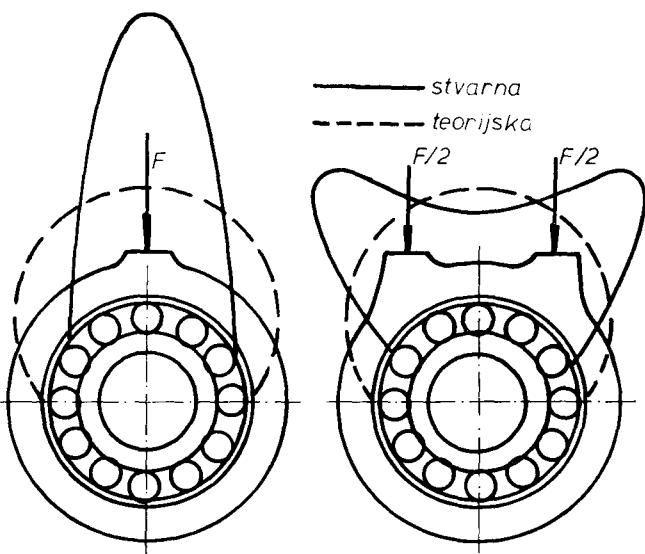
3. UTICAJ KONSTRUKTIVNOG OBLIKOVANJA

Već je istaknut značaj konstruktivnog oblikovanja i njegov uticaj na osnovne karakteristike kontakta elemenata TMS. Bez dublje analize navedenih mogućnosti, treba posebno podvući neke elemente vezane za oblik i dimenzije elemenata TMS i mikrogeometriju kontaktnih površina.

Od oblika, dimenzija i konstruktivnog rešenja TMS i njegovih elemenata zavisi, pre svega, raspodela kontaktnih opterećenja. Tako, na primer, izgradnjom kućišta valjkastih ležajeva (sl. 3) sa dva naslona smanjuju se stvarna opterećenja i stvaraju mogućnosti za povećanje tehn.-ekonomskih efekata rada ležišta.

Dimenzije elemenata su takođe jedan od značajnih parametara. Klizno ležište (sl. 4) treba da je tako oblikovano da obezbedi, pod dejstvom opterećenja, optimalno prilagodjavanje rukavcu vratila. Nedovoljno sagledana i neadekvatno oblikovana konstrukcija ležišta (kako u pogledu oblika, tako i u pogledu dimenzija) može dovesti do toga da deformacije ležišta ne prate deformacije rukavca. Posledice su, i pored određenog prilagodjavanja u fazi uhodavanja, negativne sa aspekta smanjenja intenziteta razvoja triboloških procesa. Rešenje ovog problema, pored optimalnog oblikovanja i izbora odgovarajućih dimenzija, je moguće i izgradnjom podešljivih kliznih ležišta (sl. 5). Ona obezbeđuju prilagodjavanje ležišta rukavcu i međusobno praćenje deformacija (elastičnih i plastičnih, pod uticajem mehaničkih i topotnih opterećenja).

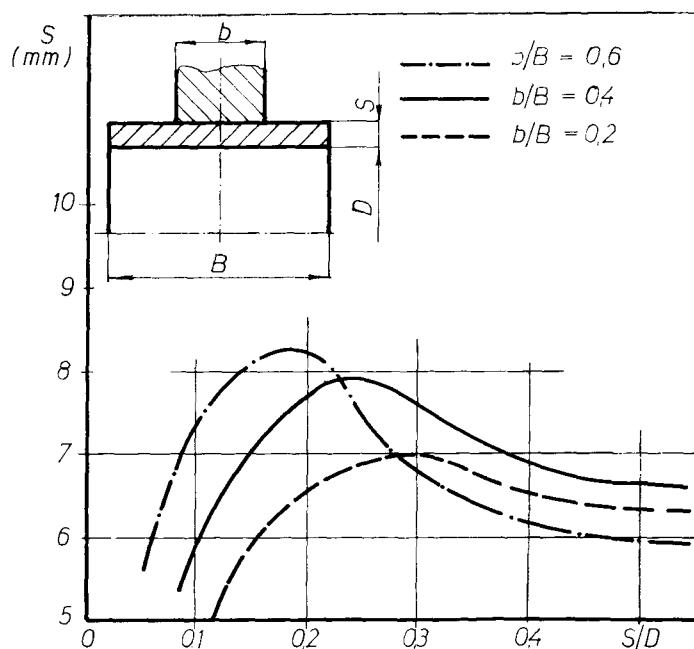
Sa aspekta mikro-geometrije, odnosno karakteristika kontakta (sl. 6), poseban značaj ima veličina zazora



Kućište sa jednim naslonom

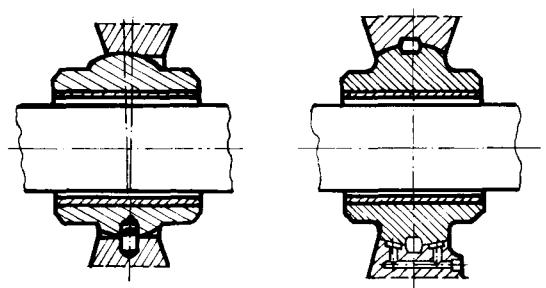
Kućište sa dva naslona

Sl. 3. - Teorijska i stvarna raspodela opterećenja valjkastog ležišta prema E. Weissenbergeru



Sl. 4. - Optimalna debљina zidova kliznog ležišta sa naslonom na sredini

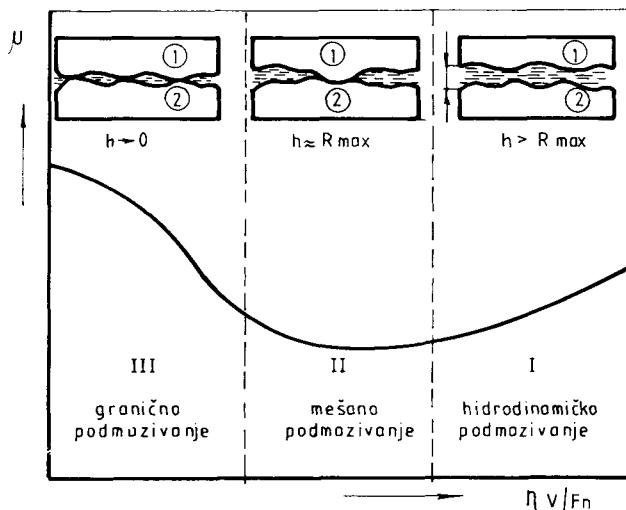
(h) i hrapavost kontaktnih površina (maksimalna visina neravnina R_{max}). Tako, na primer, rad. kliznog ležišta



Sa podešljivim oslanjanjem

Oslanjanje na hidraulično ležište

Sl. 5. - Podešljivo klizno ležište



Sl. 6. - Moguća područja rada kliznog ležišta (Stribekova kriva)

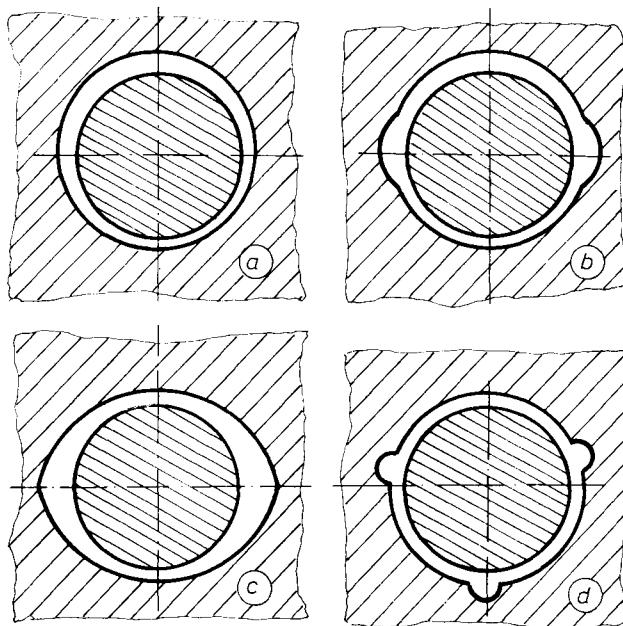
u blizini područja minimalnog trenja ne predstavlja opasnost za rad ležišta i obezbeđuje povećanje otpornosti na habanje elemenata TMS. Međutim, i neznatnim povećanjem opterećenja i temperature, ležište ulazi u nestabilno područje Stribekove krive. Rad ležišta postaje ugrožen. Smanjenje koeficijenta trenja ne sme biti prevashodni zadatak po svaku cenu, već samo rezultat odgovarajuće analize pogonske sigurnosti rada elemenata TMS.

4. NEKI PRIMERI TRIBOLOŠKI ISPRAVNOG OBLIKOVANJA

Mogućnosti tribološki ispravnog oblikovanja su značajne i raznovrsne. Njihovo sagledavanje može dovesti do niza interesantnih zaključaka, koji ukazuju na moguće pravce povećanja tehnico-ekonomske karakteristike konstrukcija. Nekoliko sledećih primera može ukazati i na pravac razmišljanja, rešavanja i daljeg usavršavanja triboloških procesa.

loški ispravnog oblikovanja.

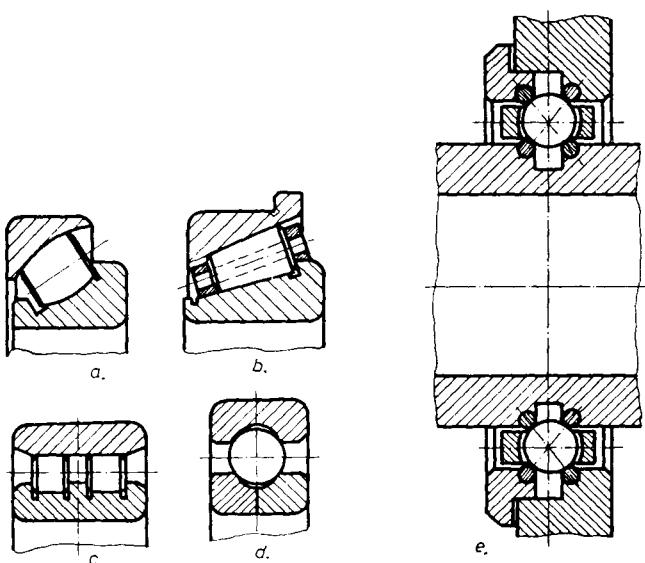
Kada je reč o kliznim ležištima, pored iznetih mogućnosti, treba naglasiti da je najuniverzalniji, najekonomičniji i najpouzdaniji način povećanja tehnico-ekonomskih pokazatelja rada, rad u uslovima hidrodinamičkog podmazivanja. Njega karakteriše klinasti oblik zazora, do-



Sl. 7. - Primeri oblikovanja kontaktnih površina kliznog ležišta

vod dovoljne količine sredstava za podmazivanje i dovoljna brzina klizanja. Konstruktivnim oblikovanjem oblika zazora (sl. 7) stvaraju se uslovi za dalje povećanje otpornosti na habanje. Cilindričan oblik kontaktne površine (sl. 7a) nije optimalan, jer pod uticajem opterećenja i generisane toplote (kada ne postoji specijalni uređaji za hladjenje), dolazi do naglog pada viskoznosti sredstava za podmazivanje i pogoršanja uslova rada ležišta. Povećanje noseće sposobnosti (moć nošenja) ležišta i pouzdanosti rada može se ostvariti oblikovanjem kontaktnih površina necilindričnog oblika (sa uljnim klinovima - sl. 7b, c i d). Time se obezbeđuje funkcionalnost ležišta (tačnost obrtanja i prenošenje opterećenja) i smanjenje sile trenja i usporavanje triboloških procesa.

Kod kugličnih, valjkastih i koničnih ležajeva, takođe se posebna pažnja posvećuje oblikovanju elemenata TMS (sl. 8). Novije, tribološki ispravne konstrukcije, omogućuju uspostavljanje razvoja triboloških procesa, ali su tehnički složenije. Tako se za konična ležišta koriste sferno-konični valjci (sl. 8a) ili visoko-precizni šuplji



Sl. 8. - Neke mogućnosti tribološki ispravnog oblikovanja koničnih, valjkastih i kugličnih ležišta

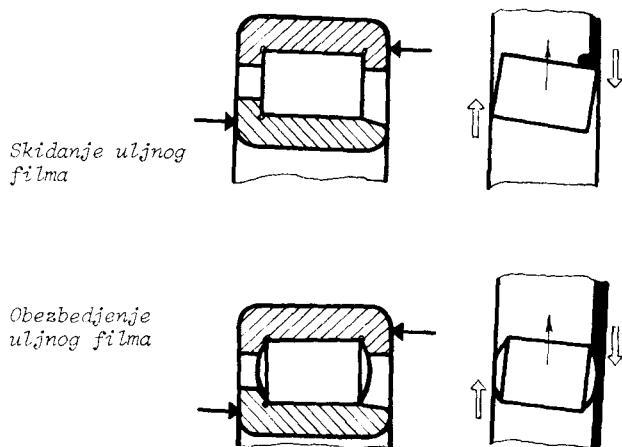
konični valjci sa masivnim separatorom oslonjenim na unutrašnji prsten (sl. 8b) i veoma malim radijalnim bacanjem.

Za obezbeđenje visoke tačnosti obrtanja ležišta treba da su tehnološki što jednostavnija i sa što većim brojem obrtnih tela. Time se postiže potrebna krutost, sprečavaju neželjene vibracije i ostvaruju željeni uslovi kontakta (dvoredna ležišta sa cilindričnim valjčićima raspoređenim u šahovskom rasporedu, kod kojih je dužina jednak prečniku - sl. 8c).

Kod kugličnih ležišta poboljšanje triboloških karakteristika se postiže oblikovanjem spoljašnjeg i unutrašnjeg prstena, tako da se kontakt ostvara u četiri tačke (sl. 8d). To omogućuje povećanje radikalne moći nošenja i do 1,5 puta u odnosu na klasična.

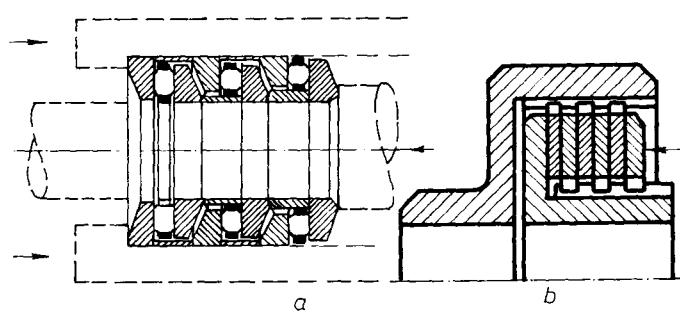
Izrada prstena ležišta većih dimenzija je tehnološki veoma teška. Zato se koriste tzv. ležišta sa žičanim elementima kao kontaktnim elementima (sl. 8e). Klizni prstenovi su zamenjeni sa dva para žica između kojih se kreću kuglice, uz značajno smanjenje kontaktne površine sa jedne i olakšanje izrade ležišta sa druge strane.

Očigledno je, iz ovih primera, da se posebna pažnja posvećuje obliku kontaktnih površina. Oblik uslovjava i način, celishodnost i kompleksnost formiranja uljnog (nosećeg) filma. Tako, na primer, kod valjkastih ležišta, u zavisnosti od oblika čeonih površina valjčića (sa ili bez sfernog valjčića - sl. 9) može doći do uklanjanja uljnog filma i stvaranja veoma nepovoljnih uslova rada. Treba napomenuti da ovakvih primera tribološki ispravnog oblikovanja elemenata TMS ima veliki broj (kao



Sl. 9. - Uticaj oblikovanja čeone površine valjčića na formiranje nosećeg - uljnog filma

što su, na primer, i kaskadno ležište sa ravnomernom preraspadom opterećenja - sl. 10a, frikciona spojnica sa većim brojem diskova za, takodje, raspodelu opterećenja - sl. 10b, itd.). Međutim, i izneti primjeri mogu



Sl. 10. - Neke mogućnosti raspodele ukupnog opterećenja

jasno ukazati na pravce i mogućnosti poboljšanja različitih konstruktivnih rešenja i izgradnje tribološki ispravnih elemenata TMS, podsklopova, sklopova i konstrukcija u celini. Sve te mogućnosti zahtevaju i odgovarajuća istraživanja (i teorijska i eksperimentalna) kako bi se identifikovao uticaj mnoštva parametara na oblikovanje i oblikovanja na tehnno-ekonomske pokazatelje konstrukcije.

LOM T

Laboratorijska obrada metala i tribologija
Mašinskog fakulteta u Kragujevcu

5. ZAKLJUČCI

Iznete analize i primeri tribološki ispravnog oblikovanja pokazuju da konstruktivno oblikovanje i elemenata TMS, podsklopova i sklopova ima značajan uticaj na intenzitet razvoja triboloških procesa, otpornost na hanbanje elemenata TMS, pouzdanost rada i vek trajanja, kao i druge tehnico-ekonomiske pokazatelje rada konstrukcije.

Višestruki i sve veći zahtevi koji se postavljaju u fazi razvoja novih konstrukcija (smanjenje gabarita i povećanje tehnico-ekonomskih mogućnosti) se mogu riješiti samo ako se i tribološki ispravnom oblikovanju i tribološki ispravnoj konstrukciji posveti dužna pažnja. To podrazumeva dalje usavršavanje metoda i postupaka identifikacije triboloških procesa i sve širi i veću primenu saznanja koja pruža tribologija, kao relativno mlada naučna disciplina.

6. LITERATURA

- [1] EHRIENSPIEL K., und zweite, Anwendungsmöglichkeiten für die mathematische Optimierung der Konstruktionspraxis, Konstruktion, No 11, 1982.
- [2] ФРОЛОВ К.В., Методы совершенствования машин и современные проблемы машиноведения, Машиностроение, Москва, 1984.
- [3] IVKOVIC B., Osnovi tribologije u industriji prerađe metalja, Gradjevinska knjiga, Beograd, 1984.
- [4] KOLLER R., Beispiele und Richtlinien Kostenreduzierung des Konstruierens, Industrie Anzeiger, No 97, 1985.
- [5] LAZIĆ M., Tribološki aspekt projektovanja i konstruisanja mašina alatki-časne sistemske postupka, Tribologija u industriji, No 3, 1986.
- [6] LAZIĆ M., Tribološki aspekt projektovanja i konstruisanja mašina alatki-tribološka banka podataka, Tribologija u industriji, No 4, 1986.
- [7] РЕМЕТОВ Д.Н., Работоспособность и надежность деталей машин, Высшая школа, Москва, 1974.
- [8] SPUR G., KRAUSE F.L., Aufbau und Einordnung von CAD-systemen, VDI-Bericht, No 413, 1981.