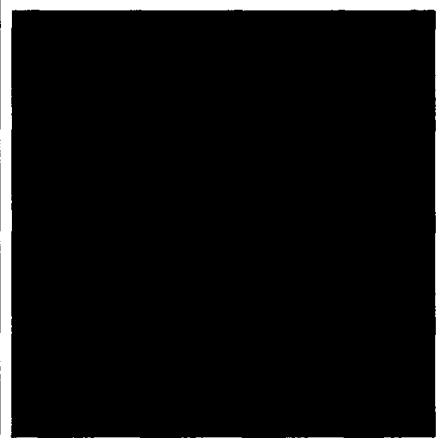
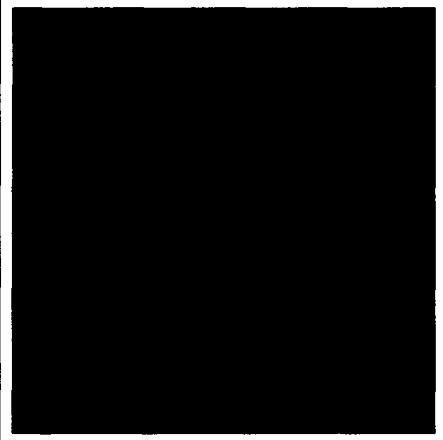
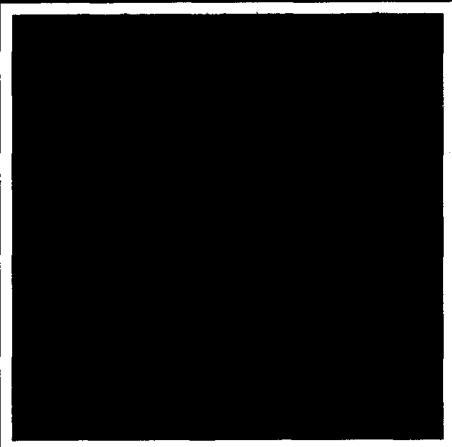
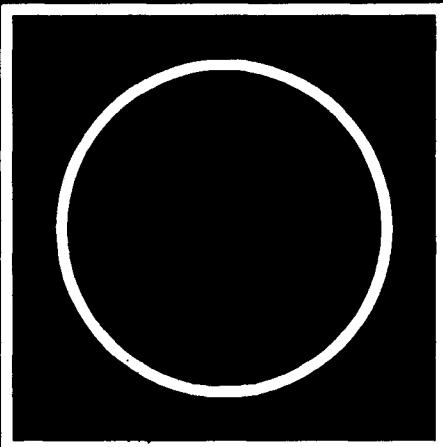
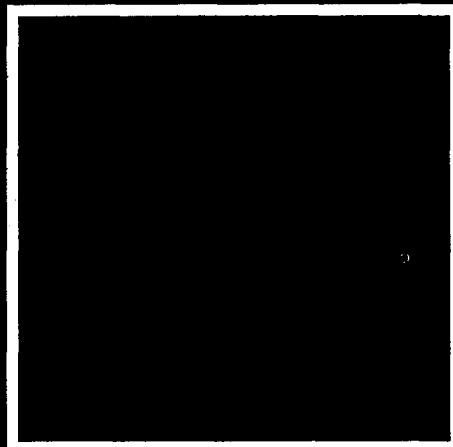


tribology in industry

tribologija u industriji

YU ISSN 0351-1642
VOLUME 18
SEPTEMBER 1996.

3



tribologija u industriji

tribology in industry ◊ трибология в промышленности

sadržaj contents содержание

UVODNIK INTRODUCTION ВВЕДЕНИЕ	K. BOUZAKIS: Druga internacionalna konferencija o tribologiji "BALKANTRIB'96 i "EUREKA Brokerage Event" ◊ Вторая международная конференция по трибологии БАЛКАНТРИБ'96 и "EUREKA Brokerage Event"	85
ISTRAŽIVANJA RESEARCH ИССЛЕДОВАНИЯ	A. RAC: Savremene tendencije u tribologiji kotrljajnih ležaja ◊ Up-to Date Tribological Consideration of Rolling Bearings ◊ Современные тенденции в трибологии подшипников качения	87
	M. BABIĆ, D. ADAMOVIĆ, B. JEREMIĆ, N. MILIĆ: Tribološke karakteristike površina bombardovanih čeličnim kuglicama ◊ Tribological Characteristics of Surfaces Machined by Shot Peening ◊ Трибологические характеристики поверхностей обрабатываемых дробеструем	93
	S. VEINOVIĆ, D. RADONJIĆ, R. PEŠIĆ, A. DAVINIĆ, Z. RADOŠEVVIĆ, M. STANOJEVIĆ, Z. GRADJIN: Analiza triboloških karakteristika domaćih motora ◊ Study of The Tribological Performances of Domestic Engines ◊ Анализ трибологических характеристик двигателей отечественного производства	98
	M. ZLATANOVIĆ, R. BELOŠEVAC, A. KUNOSIĆ: Tribologija dvostrukog sloja: prevlaka / difuziona zona ◊ Tribology of Double Layer - Coating/Diffusion Zone ◊ Трибология двойного слоя - покрытие/диффузионная зона	102
	Ž. ŽIVKOVIĆ, M. ĐURĐANOVIĆ, D. STAMENKOVIĆ, S. JOVANOVIĆ: Koeficijent prionljivosti kod uzdužno presovanih sklopova ◊ Coefficient of Friction in The Force Fit Assemblies ◊ Коэффициент прилипания у продольно штампаемых узлов	107
NOVOSTI NEWS НОВОСТИ	117
KNJIGE I ČASOPISI BOOKS AND JOURNALS КНИГИ И ЖУРНАЛЫ	118
NAUČNI SKUPOVI SCIENTIFIC MEETINGS НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ	120

Druga internacionalna konferencija o tribologiji "BALKANTRIB'96 i "EUREKA Brokerage Event" (Izveštaj o održanoj konferenciji)

Prevod izveštaja o održanoj konferenciji za izdanje časopisa na srpskom jeziku: B. Ivković

Druga balkanska konferencija o tribologiji **BALKANTRIB'96** održana je u Solunu od 5-7 Juna 1996. godine. Prva balkanska konferencija o tribologiji **BALKANTRIB'93** održana je u Sofiji tri godine ranije (1993). Za vreme njenog održavanja onovano je Balkansko Tribološko Društvo (*Balkan Tribology Association - BTA*) sa osnovnim ciljem da podrži i omogući saradnju između tribologa balkanskih zemalja i doprinese naporima za razvoj internacionalnih naučno-istraživačkih aktivnosti na ovom geografskom području. Veliki broj učesnika na Drugoj balkanskoj konferenciji o tribologiji **BALKANTRIB'96** pokazuje da je formiranje asocijacije balkanskih tribologa i organizovanje naučnih konferencija ove vrsta bilo opravdano.

Organizaciju konferencije vodio je sekretarijat sastavljen od zaposlenog osoblja Laboratorije za mašine alatke i dinamiku mašina Aristotelovog univerziteta u Solunu. predsednik organizaciono komiteta bio je Prof. dr. ing. K.Bouzakis-om, direktor ove laboratorije. Članovi naučnog komiteta bili su:

Prof. dr K. Bouzakis, Grčka
Prof. dr P. Panagiotopoulos, Grčka
Prof. dr B. Ivković, Jugoslavija
Prof. dr A. Rac, Jugoslavija,
Prof. dr M. B.Karamis, Turska
Prof. dr N. Manolov , Bugarska
Prof. dr E. Asenova, Bugarska
Prof.dr V. Pavlovski, Makedonija
Prof.dr A. Tudor, Rumunija
Prof.dr D. Pavalesku

Sponzori konferencije bili su :

- ▶ The Greek General Secretariat for Research and technology
- ▶ The Greek Ministry of Civilisation and Culture
- ▶ The Greek Ministry of macadonian and Thrace
- ▶ The Technical Chamber of Greece, Depat. of Central Macedonian
- ▶ The Research Committee of the Aristotle University of Thessaloniki
- ▶ The Thessaloniki Technology Park

Konferenciju su finansijski podržali Mobil Hellas SA i Optimol, High performance Lubricants GmbH

U radu konferencije učestvovalo je oko 140 registrovanih naučnih i stručnih radnika iz 20 zemalja sveta. Bilo je prijavljeno 150 radova od kojih su, posle obavljene recenzije primljeno za izlaganje na konferenciji 121 rad. Na konferenciji su saopšteni radovi iz brojnih oblasti tribologije:

- Tribologija u proizvodnim procesima 32 rada (rezanje 18, abrazivni procesi 7, deformisanje 4, zavarivanje 3).
- Tribološke karakteristike materijala 18 radova.
- Tvrde prevlakе 12 radova.
- Simulacija mehaničkih struktura sa gledišta trenja 15 radova.
- Tribologija ležišta 13 radova.
- Uticaj triboloških karakteristika materijala na habanje, buku i sl. 8 radova.

- Tribometrija i Tribodijagnostika 15 radova
- Maziva 10 radova.

Plenarna sednica konferencije otvorena je pozdravnim govorima Predsednika organizacionog komiteta Prof. dr K. Bouzakis-a, Rektora i Predsednika naučnog komiteta Aristotelovog univerziteta prof. dr P Ladas-a, i Predsednika CPERI prof. dr I. Vassalos-a. Pozdravno pismo Prof. dr P. Jost-a predsednika ITC pročitao je Prof. dr J. W. Bartz Direktor Tehničke Akademije u Eslingenu.

Prvo predavanje održao je Prof. dr N. Manolov pod naslovom "*Prvi koraci Balkanskog Društva za Tribologiju*" u kome su izloženi rezultati rada društva u prve tri godine postojanja.

Druge predavanje održao je Prof. dr B. Ivković pod naslovom "*Tribološki prilazi problemima obrude rezanjem*" u kome izložen osnovni stav da poznavanje teorija trenja i habanja u kliznim parovima prestavlja osnov za rešavanje problema procesa rezanja sa gledišta produktivnosti i troškova obrade.

Plenarna sednica završena je predavanjem Prof. dr. Bouzakis-a pod naslovom "*Nova metoda za predviđanje ponašanja zamornog habanja tvrdih prevlaka pri rezanju i u drugim slučajevima*".

U sledećih 18 sekcija, od srede 5. Juna do petka 7. Juna izloženi su radovi autora. Posle izlaganja rezultata istraživanja obavljena je diskusija u

kojoj su davane i dodatne informacije o obavljenim istraživanjima. u pauzama učesnici konferencije iskoristili su priliku za razmenu ideja i informacija o novim mogućim zajedničkim istraživačkim programima i poboljšanju naučne saradnje. Saopšteni rezultati triboloških istraživanja obavljenih u 20 zemalja sveta pokazali su da je Balkanska tribologija na zadovoljavajućem nivou i da su istraživanja u ovoj oblasti savremena i na visokom nivou.

Svi saopšteni radovi štampani su u posebnom Zborniku na zadovoljavajućem nivou.

Poslednjeg dana konferencije održana je i plenarna sednica "EUREKA Brokerage Event" koju je otvorio Prof. dr K. Bouzakis u svoljstvu presavnika Grčke u EUREKI u HGL (High Level Group). Na plenarnoj sednici govorili su o programima EUREKE i namerama za njihov ulazak u Balkanske zemlje Prof. dr K. Kastritis, Mr. Pol van den Bergen, direktor sekretarijata EUREKE u Brussels-u, Dr. B. Triandafyllis, direktor odelenja

za razvoj u Grčkom sekretarijatu za Istraživanje i razvoj i Dr. G. Kakourus, pretstavnik Grčke u EUREKI.

Posle izlaganja na plenarnoj sednici održana su tri Workshops-a sa temama iz oblasti podmazivanja, triboloških prevlaka i tribomaterijala.

Konferencija je završena izborom Prof. dr K. Bouzakis-a za predsednika Balkanskog društva za tribologiju za nadaljni trogodišnji period i izborom Rumunije za domaćina sledećeg BALKANTRIBA'99 koji će se održati 1999 godine.

The Second International Conference on Tribology BALKANTRIB96 and "EUREKA Brokerage Event"

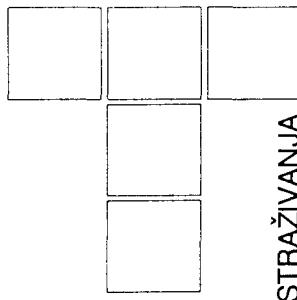
The Second International Conference on Tribology BALKANTRIB96 was held in Thessaloniki from 5 till 7 July 1996, with participation of 140 scientists from 20 countries. 120 papers were presented on conducted investigations from almost all areas of Tribology. The majority of papers were those presented were from Balkan countries (Yugoslavia, Romania, Greece, Bulgaria and Turkey).

During the last conference day the EUREKA Brokerage Event was held (Meeting about EUREKA programs in the area of industrial companies collaboration), where the programs were considered for collaboration in the area of lubrication, tribological coatings and tribomaterials.

Вторая международная конференция по трибологии БАЛКАНТРИБ'96 и "EUREKA Brokerage Event"

Вторая международная конференция по трибологии БАЛКАНТРИБ'96 состоялась в городе Салоники с 5 - 7 июня 1996. года при участии 140 научных работников из двадцати стран. Участники Конференции выступили с 120 докладами о проведенных исследованиях почти во всех областях трибологии. Наибольшее число работ поднесли специалисты балканских стран - Югославии, Румынии, Греции, Болгарии и Турции.

В последний день работы было проведено собрание о ЭУРЕКА программе в области сотрудничества трудовых организаций на которой рассматривались программы совместной работы в сфере смазок, трибологических покрытий и трибоматериалов.

**A. RAC**

Savremene tendencije u tribologiji kotrljajnih ležaja

Dug vek i visoke performanse su karakteristike današnjih kotrljajnih ležaja. Mnogobrojna poboljšanja učinjena tokom zadnje dve decenije su rezultat sveobuhvatnih istraživanja među kojima tribološka zauzimaju značajno mesto. Rad daje pregled stanja razvoja kotrljajnih ležaja posebno sa tribološkog stanovišta.

Ključne reči: kotrljajni ležaji, tribologija, pouzdanost i vek ležaja

1. UVOD

Pouzdanost mnogih mašinskih sistema zavisi od funkcionalnosti i pouzdanosti pokretnih komponenata i elemenata među kojima su kotrljajni ležaji jedni od najvažnijih. Sa porastom zahteva za što veću produktivnost mašina i sa pojmom visoko sofisticiranih sistema, neminovno se postavlja i zahtev za poboljšanjem kvaliteta kotrljajnih ležaja. Ta poboljšanja treba da obezbede [1]:

- visoku pouzdanost,
- duži vek,
- produženje intervala održavanja,
- smanjenje trenja,
- snižavanje radne temperature,
- smanjenje buke i vibracija,
- smanjenje osetljivosti na greške nepodešenosti,
- eliminaciju težih oblika habanja i zaribavanja
- i smanjenje cene.

Analizirajući date zahteve lako se može zapaziti, bez potrebe posebnog dokazivanja, da je veliki broj tih zahteva direktno ili indirektno povezan sa mogućnošću rešavanja triboloških problema kako tokom konstruisanja i proizvodnje, tako i kontrole triboloških procesa tokom rada ležaja. To daje poseban značaj tribološkim istraživanjima kod kotrljajnih ležaja.

Istorijski posmatrano razvoj kotrljajnih ležaja obuhvata relativno dug period. Prednost kotrljanja nad klizanjem kao vrstom kretanja sagledao je Leonardo da Vinci i u svom delu Codex Madrid I dao rešenja za kotrljajne ležaje koja su preteča savremenih ležaja. On je takođe zapazio potrebu razdvajanja kotrljajnih tela i tako naznačio neophodnost uvođenja kaveza. Leonardo da Vinci je kao što je poznato dao doprinos u oblasti trenja, podmazivanja i analizi karakteristika materijala za le-

žaje, pa se može konstatovati, kako je to navedeno u kapitalnom delu "Istorija tribologije" [2] da je bio pravi tribolog.

Međutim, prošlo je skoro tri veka do pojave stvarnih kotrljajnih ležaja. Razvoj automobiličke industrije doveo je do proizvodnje valjčanih ležaja, dok je bicikl bio pokretač razvoja kugličnih ležaja sa kavezom [3]. Samopodesivi ležaji javljaju se početkom ovog veka, koji se može smatrati najznačajnijim u razvoju kotrljajnih ležaja.

Istraživanja Herca koji je analizirao naponska stanja izazvana koncentrisanim opterećenjem, Rejnoldsa koji je dao teorijske osnove podmazivanja i utvrdio da pod određenim uslovima slojevi maziva male debljine mogu potpuno da razdvoje površine u kretanju, Stribeka koji je uspostavio jednačinu za distribuciju opterećenja između kotrljajnih tela i Palmgrena [4] koji je dao formule za trenje i vek kotrljajnih ležaja predstavljaju svakako osnovna istraživanja značajna za dalji razvoj tribologije kotrljajnih ležaja. Iako su rezultati pomenutih istraživača validna i danas, treba napomenuti da je nedovoljno poznavanje triboloških procesa uticalo da su mnogi fenomeni u to vreme ostali neobjašnjeni.

Kada se govori o tribologiji kotrljajnih ležaja svakako treba imati u vidu novija istraživanja vezana za EHD teoriju podmazivanja, čiji je razvoj dao objašnjenja za mnoge pojave u radu kotrljajnih ležaja, uticaj da se poboljšaju performanse i produži vek upotrebe ležaja.

2. ISO STANDARD I PERFORMANSE KOTRLJAJNIH LEŽAJA

Izbor kotrljajnih ležaja za određenu namenu prepostavlja posedovanje odgovarajućeg postupka za određivanje vrste i dimenzija ležaja i mogućnosti da se porede ležaji različitih proizvođača. Takođe se smatra potrebnim, kako za proizvodnike ležaja tako i konstruktore mašina, da se definise metodologija pomoću koje je moguće procenjivanje performansi ležaja. Veoma je ne-

Prof. Rac dr Aleksandar
Mašinski fakultet Beograd, 27 marta 80

prihvatljivo i skupo da se pogodnost pojedinih vrsta ležaja za datu namenu određuje samo ispitivanjima. Iz tih razloga su predložene analitičke metode koje su najčešće rezultat teorijskih i eksperimentalnih istraživanja.

Koncept nazivni vek i osnovna dinamička nosivost su uvedeni standardom ISO R 281 1962 godine. Taj standard sadrži danas već klasičnu jednačinu za vek kugličnih i valjčanih ležaja,

$$L_{10} = (C/P)^n,$$

gde n ima vrednost 3 za kuglične i $10/3$ za valjčane ležaje.

L_{10} je metod koji se široko koristi za izbor ležaja od strane konstruktora mašina. Data jednačina je zasnovana na eksperimentalnim radovima Lundberga i Palmgrena izvršenih 30 i 40 tih godina ovog veka i saznanja da u idealnim uslovima rada otkaz kotrljajnog ležaja nastaje kao posledica površinskog zamora materijala.

Osnovna dinamička nosivost i nazivni vek su bili i ostaju reprezentativni pri izboru materijala, načina podmazivanja i ispitivanju ležaja. Kao takve ove veličine imaju svoju aktuelnost. Međutim, poboljšanja kvaliteta u svim domenima, a posebno razvoj i primena EHD teorije podmazivanja kod kotrljajnih ležaja uslovili su proizvodnju ležaja sa znatno dužim vekom od izračunatog, što je dovelo do uvođenja novih veličina u proračun i konsekventno izmena u standardu. Nov standard je objavljen 1977. godine [5]. U tom standardu je zadržan proračun veka L_{10} , ali je ustanovljena i nova jednačina za korigovani vek ležaja,

$$L_{na} = a_1 a_2 a_3 L_{10},$$

koja sadrži tri faktora:

a_1 - faktor pouzdanosti,

a_2 - faktor materijala,

a_3 - faktor podmazivanja.

Aktuelna verzija standarda omogućuje jednostavnu korekciju kojom se uključuje stanje materijala i radni uslovi različiti od opterećenja i brzine, parametara koji se razmatraju u osnovnoj verziji standarda.

Standard iz 1977 godine sadrži preporuke za faktor pouzdanosti, ali ne daje vrednosti faktora a_2 i a_3 i to prepušta proizvođačima ležaja [6, 7].

Faktor materijala a_2 zavisi od sastava, strukture, metalurškog procesa proizvodnje i postupka termičkog tretmana čelika. Za konvencionalne materijale, čelike dobrog kvaliteta $a_2 = 1$. Poboljšanja u svojstvima čelika i čistoći dala su materijale koji omogućuju duži vek i bolje performanse nego što to daje jednačina za nazivni vek. Za takve materijale faktor a_2 prema preporukama proizvođača može imati i vrednost 2,

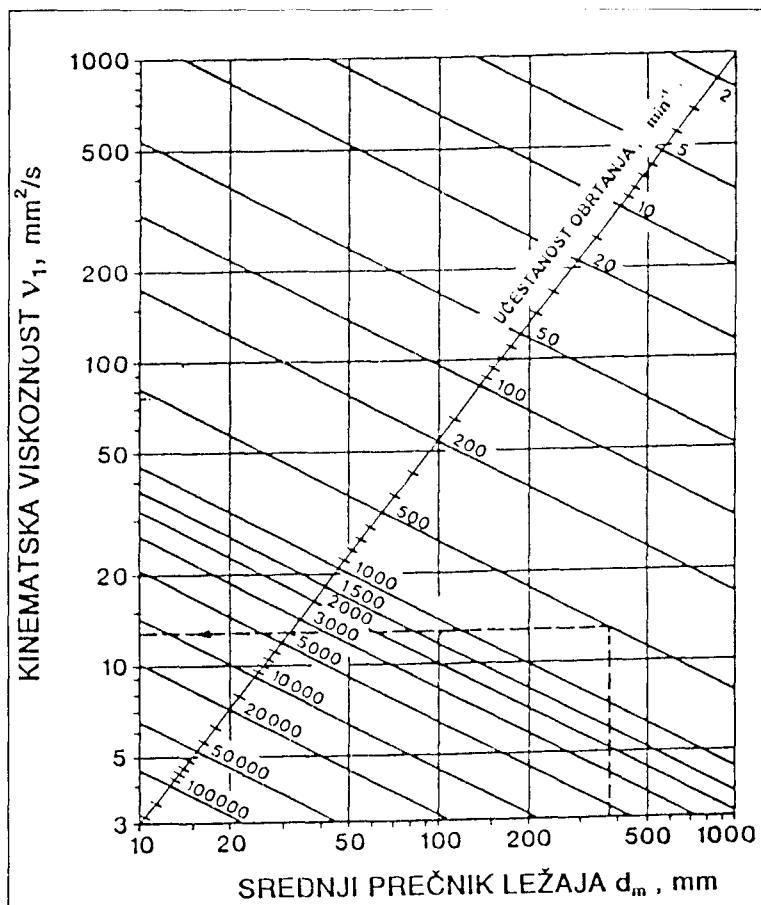
ali pod uslovom da je obezbeđeno adekvatno podmazivanje.

Faktor podmazivanja a_3 : Saznanje da su radni uslovi, pre svega ostvarena vrsta podmazivanja od uticaja na vek kotrljajnih ležaja doveli su do uvođenja faktora a_3 . Kod kotrljajnih ležaja debljina sloja maziva je funkcija srednjeg prečnika ležaja, učestanosti obrtanja i kinematske viskoznosti maziva na radnoj temperaturi, dok je uticaj opterećenja neznatan.

Vrednost faktora a_3 zavisi od količnika viskoznosti maziva ν na standardnoj temperaturi i viskoznosti ν_1 koja je neophodna za postizanje adekvatnog podmazivanja na radnoj temperaturi [8]. Ovaj odnos viskoznosti se u literaturi obično običežava sa κ . Za određivanje potrebne viskoznosti na radnoj temperaturi koristi se dijagram prikazan na slici 1. On je zasnovan delom na EHD teoriji podmazivanja a delom na iskustvu.

Kada se bira mazivo i veličina viskoznosti moraju se imati u vidu sledeće činjenice:

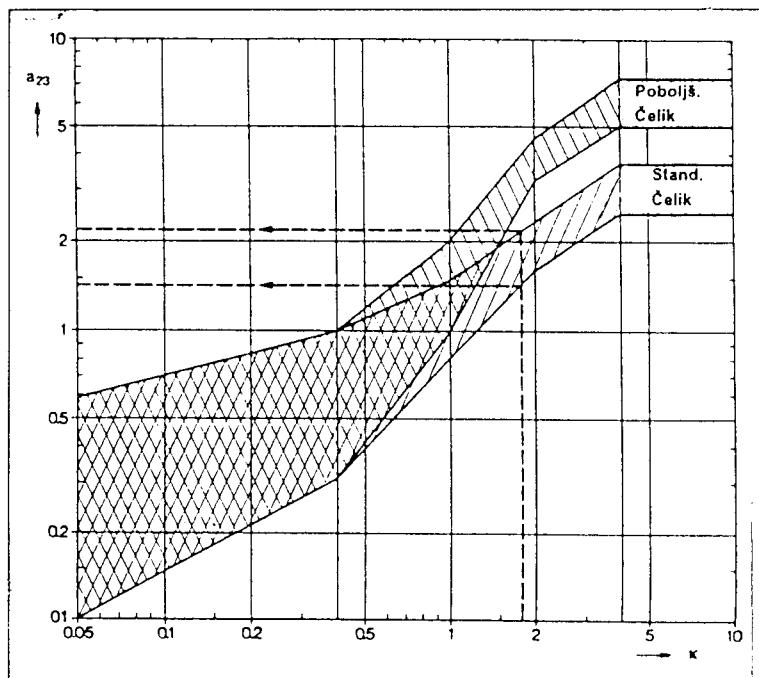
- ako je κ manje od 1 podmazivanje nije zadovoljavajuće odnosno imamo granično podmazivanje i maziva sa EP aditivima se moraju koristiti;
- maziva sa EP aditivima se takođe preporučuju za valjčane ležaje srednjih do velikih dimenzija, a



Slika 1. Zahtevana viskoznost ν_1 za adekvatno podmazivanje na radnoj temperaturi

- veličina κ treba da je veća od 1.5 kako bi se ostvarilo adekvatno podmazivanje u svim uslovima rada;
- viša viskoznost daje i veću vrednost za faktor a_{23} sve do $\kappa = 4$. Iznad te vrednosti faktor a_{23} je nezavisan od κ , pošto je uspostavljeno potpuno podmazivanje odnosno razdvajanje površina u relativnom kretanju. Zbog toga se preporučuje da se viskoznost izabere tako da je $\kappa > 4$, ali se pri tome mora voditi računa da veća viskoznost daje i veće trenje u ležaju, a time i više radne temperature.

Većina proizvođača kotrljajnih ležaja definisala je tokom 80tih godina vrednost zajedničkog faktora a_{23} svesna činjenice da samo poboljšanje materijala u uslovima neadekvatnog podmazivanja ili obratno loš materijal i dobro podmazivanje ne daju odgovarajući rezultat. Vrednost faktora a_{23} prikazana je na slici 2 u funkciji veličine κ i to za dva materijala, standardni i sa poboljšanim svojstvima. S obzirom da nije uvek moguće tačno definisati sve uticajne veličine grafički prikaz daje opseg u kome se može kretati faktor korekcije.

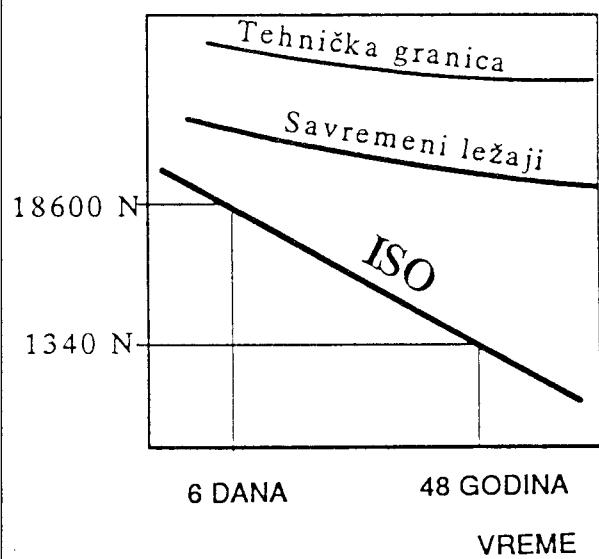


Slika 2. Dijagramski prikaz faktora a_{23}

3. AKTUELNE TENDENCIJE U RAZVOJU KOTRLJAJNIH LEŽAJA

Od vremena objavljivanja zadnje verzije ISO standarda 1977. godine prošlo je skoro dve decenije intenzivnih istraživanja u oblasti kotrljajnih ležaja. Imajući u vidu ostvarene rezultate u zadnjoj deceniji postaje očigledno da je standardni postupak određivanja veka ležaja nedovoljno reprezentativan [9], kako sa gledišta opštih karakteristika savremenih ležaja tako i uslova rada i sredine u kojoj rade. Opšti je stav da su performanse današnjih ležaja znatno iznad onih koje se dobijaju na osnovu proračuna nazivnog veka (sl. 3).

OPTEREĆENJE



Slika 3. Uporedenje veka L_{10} i rezultata testova

Razloge za takav zaključak treba tražiti u aktuelnim tendencijama koje su prisutne u razvoju ležaja, gde posebno mesto zauzima tribologija kotrljajnih ležaja. Te aktivnosti se mogu povezati sa:

- istraživanjima i poboljšanjima u oblasti materijala,
- poboljšanjem konstrukcije i tehnologije proizvodnje,
- jasnijim definisanjem radnih parametara ležaja,
- analizom uticaja sredine i
- efikasnošću zaptivavanja.

Najčešće korišćeni materijal za kotrlajne ležaje je čelik. Stribek je 1901. godine u svom izveštaju o nosivosti kugličnih ležaja formulisao i sledeće zahteve [10]:

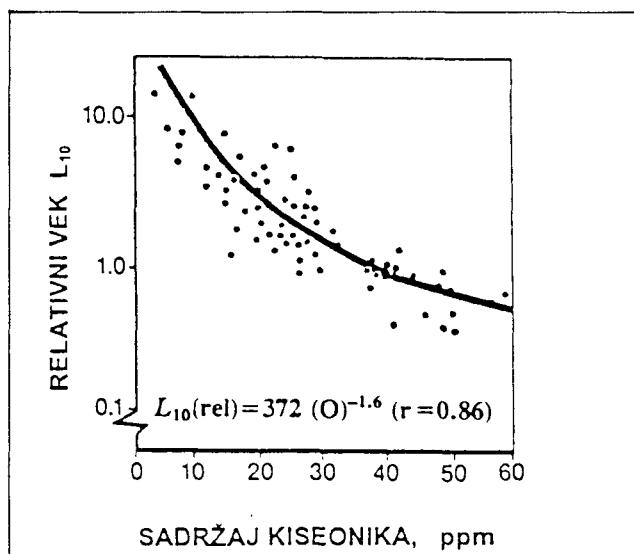
"Kuglice dobrog kvaliteta treba da imaju tvrdoću od 780 do 850 kg/mm². Pogodan čelik je ugljenični čelik koji sadrži od 0.8 do 1.0 % ugljenika i što je moguće manje nečistoća. Legirani čelici se takođe mogu uspešno koristiti. Čelik za spoljašnji i unutrašnji prsten mora takođe odgovarati najmanje istim zahtevima koji su specificirani za kuglice. Njihovi zahtevi su relativno veliki i najmanje jedna staza prstena je uvek visoko opterećena u jednoj tački".

Visoke napone kojima su tokom rada izloženi prsteni i kotrljajna tela mogu podneti samo čelici vrlo visoke čvrstoće i praktično bez grešaka u materijalu [11, 12]. Tvrdoća i čvrstoća čelika moraju biti dovoljno visoke da se obezbedi statička nosivost i otpornost na zamor pri relativ-

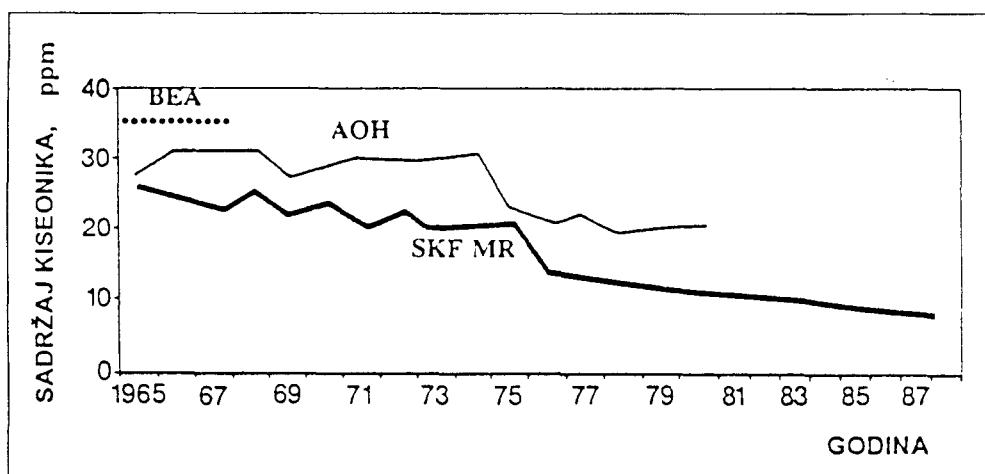
nom korištenju. Materijal mora da poseduje i određenu žilavost da bi se izbegao lom tokom montaže i rada.

Osnovna istraživanja vezana za materijal vršena su u cilju povećanja otpornosti na površinski zamor, jer se habanje usled površinskog zamora tradicionalno smatra osnovnim uzročnikom oštećenja i otkaza ležaja, mada iskustvo pokazuje da su, pored materijala i drugi činioci od uticaja kao što su geometrija kontakta, površinske i druge proizvodne greške, fizika i hemija podmazivanja, stepen klinanja i drugo.

Mogućnosti materijala prstena i kotrljajnih tela da se odupru zamoru primarno zavisi od čistoće čelika. Makro i mikro uključci i greške u materijalu utiču na pojavu površinskog zamora. Mikro uključci u obliku oksida, sulfida i nitrida su od uticaja, ali se kao najopasniji sa gledišta zamora smatraju prisutni oksidi. Vek trajanja ležaja je funkcija sadržaja kiseonika i sa porastom količine kiseonika u materijalu opada vek (sl. 4). Zbog toga je očigledna tendencija smanjenja sadržaja kisionika u čeliku (sl. 5).



Slika 4. Relativni vek u funkciji sadržaja kiseonika



Slika 5. Smanjenje sadržaja kiseonika u čelicima tokom godina

Normalno, sve čistije materijale omogućile su nove tehnologije za proizvodnju materijala i postupci termičkog tretmana.

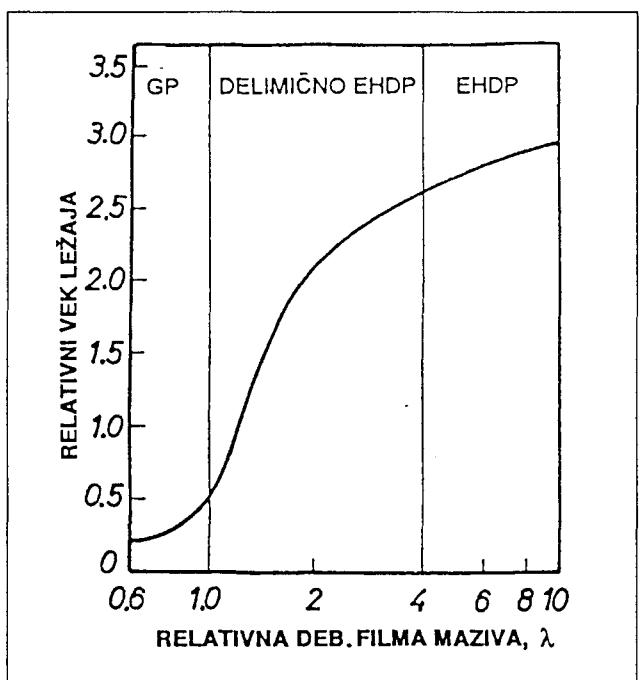
Pored čelika, za pojedine delove ležaja koriste se danas i drugi materijali. Najširu primenu su našle plastične mase u proizvodnji kaveza i keramički materijali za proizvodnju kuglica. Plastični kavezi daju niz prednosti [13, 14]: specifična svojstva materijala se mogu realizovati zavisno od zahteva, kompleksni oblici se mogu proizvesti, materijal je male gustine, visoke elastičnosti, otporan na koroziju, dobra su mu svojstva pri klizanju itd. Primena plastičnih kaveza je kod mnogih proizvođača ležaja postala standard kako za kuglične tako i pojedine vrste valjčanih ležaja.

Keramički materijali [15, 16] su sve više u upotrebi naročito kod ležaja za brzohodna vretena mašina alatki i kod gasnih turbina. Osnovne prednosti primene keramičkih kuglica su: viša dozvoljena brzina, povećana krutost ležaja, smanjeno generisanje toplove zbog manjeg trenja i bolja termička stabilnost. Kotrljajni ležaji sa keramičkim kuglicama obično se nazivaju hibridni ležaji.

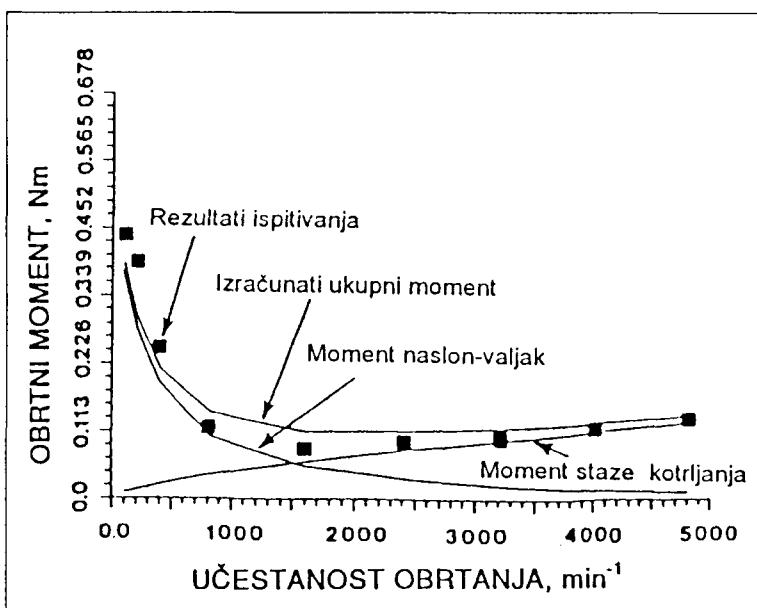
Poboljšanje konstrukcije kotrljajnih ležaja nastalo je i kao rezultat jasnijeg i tačnijeg definisanja radnih karakteristika. U tom pravcu razvoj EHD teorije podmazivanja dao je veliki doprinos. Iako je već pre 20 i više godina [17, 18] potvrđeno da uslovi podmazivanja imaju značajan uticaj na performanse ležaja i da vek zavisi od relativne debljine sloja maziva (Sl.6), tek se u zadnjoj deceniji javljaju rešenja koja uzimaju EHD teoriju podmazivanja kao model za analizu kinematskih i dinamičkih karakteristika kotrljajnih ležaja.

Na osnovu razvijenih matematičkih modela mogu da se analiziraju unutrašnja raspodela opterećenja, krutost ležaja, radni moment, veličina proklizavanja i to sve za različita opterećenja, brzine, zazore i svojstva maziva [19, 20, 21, 22]. Ovakva analiza je posebno važna pri visokim brzinama rada ležaja što je sve češći slučaj u praksi. Kao ilustracija iznetog na slici 7 je prikazan obrtni moment

kod konično valjčanih ležaja dobijen matematičkom analizom i eksperimentalnim putem [23]. Moment predstavlja meru disipacije energije usled trenja i zbog toga daje i generisanu toplotu u ležaju. Rezultati pokazuju dobro slaganje teorije i eksperimentalnih rezultata. Dobijeni rezultati su aplikativni na konstrukciju unutrašnje geometrije kotrljajnih ležaja i daju jasnu sliku rada u posmatrаниm uslovima.



Slika 6. Vek ležaja u funkciji relativne debeline sloja maziva



Slika 7. Ukupni moment trenja ležaja: računski i eksperimentalni

Svakako da je podizanju opšteg kvalitet ležaja doprinelo i poboljšanje procesa proizvodnje. Savremene tehnologije omogućuju visoku tačnost izrade delova i visok kvalitet obrađenih površina. To istovremeno omogućuje da ležaji i pri malim debljinama sloja maziva, ispod $1 \mu\text{m}$, imaju zadovoljavajuće podmazivanje.

Poboljšanja koja su učinjena reflektuju se na povećanu pouzdanost i na produžen vek upotrebe u sve težim uslovima primene ležaja, visokim brzinama i opterećenjima.

Međutim, u toku rada savremeni ležaji mogu izgubiti navedene prednosti zbog oštećenja površina staza kotrljanja i/ili kotrljajnih tela usled pojave lokalne koncen-

tracije napona u zoni kontakta. Uzrok tome su trvde čestice - kontaminanti koje nosi sa sobom mazivo [24, 25, 26]. Istraživanja pokazuju veoma visok uticaj kontaminanta na oštećenje a time i na vek kotrljajnih ležaja. Logično je pri tome zaključiti da efikasnost zaptivanja i rešavanje problema prečićavanja maziva doprinose produženju veka upotrebe ležaja.

Pošto je praksa prevazišla postojeću teoriju i standarde koji su na njoj zasnovani, nov teorijski pristup je bio neophodan kako bi se sva nova saznanja i uticajni faktori uzeli u obzir. Nov pristup za proračun veka kotrljajnih ležaja dat je strane SKF-a [27, 28]. Teoriju su prvi put objavili Ioannides i Harris na Konferenciji o tribologiji 1984. godine u San Dijegu. Nova teorija definiše faktor veka ležaja kao funkciju sledećih veličina,

$$f(\kappa, \eta_c, P_u/P),$$

gde $\kappa = \nu/\nu_1$ predstavlja debljinu sloja maziva i izračunava se na isti način kao i faktor a_{23} . P označava ekvivalentno dinamičko opterećenje a P_u je granično opterećenje na zamor. Uticaj kontaminanata je definisan veličinom η_c koja ima vrednosti između 0 i 1. Vrednost 0 odgovara jako kontaminiranom, a 1 potpuno čistom mazivu. Svakako da je izbor veličine η_c veoma kompleksan i da se mora razmatrati u funkciji čistoće maziva i korišćenog sistema podmazivanja. Analiza maziva sa gledišta količine, distribucije po veličini i sastavu kontaminanata se pokazuje kao neophodna. S obzirom da čistoća maziva ima presudan uticaj na vek savremenih ležaja, ona se mora optimizirati pri konstrukciji sklopa ležaja, izbora sistema podmazivanja i prečićavanja maziva.

4. ZAKLJUČAK

Poboljšanja koja su učinjena u oblasti kotrljajnih ležaja reflektovala su se na sve veću njihovu pouzdanost i duži vek. Međutim, dalji napredak u razvoju ležaja je limitiran tribolo-

škim barijerama. Zbog toga su aktuelna istraživanja fokusirana na rešavanje triboloških problema i to pre svega na primenu rešenja EHD teorije podmazivanja (makro i mikro), jasnije definisanje uzroka površinskog zamora materijala, kao i analizu uticaja radnih uslova i sredine na oštećenja kotrljajnih ležaja.

LITERATURA

- [1.] Markert, F.J., Market - oriented product development as exemplified by SKF TQ - line tapered roller bearings, BBJ, Special issue -89, 1989, 28-33
- [2.] Dowson, D., History of tribology, Longman, 1979

- [3.] Harris, T.A., Wedeven, L.D., **Rolling bearing tribology - Past, present and future**, Lub. Eng., 11, 1989, 673-682
- [4.] Palmgren, A., Snare, B., **Influence of load and motion on the lubrication and wear of rolling bearings**, Conference on lubrication and wear, IMechE, London, 1957
- [5.] -, **Rolling bearings - Dynamic load rating and rating life, Part I**, Calculation methods, ISO 281/1, 1977 (E)
- [6.] Fernlund, I., **Standardisation and the evolution of bearing life**, BBJ, 217, 1983, 1-4
- [7.] Kleinstein, E., **Walzlagerschmierung**, Tribologie und Schmierungstechnik, 39, 2, 1992, 65-71
- [8.] -, **Gft Arbeitsblatt 2.4.1, Walzlagerschmierung**, Gesellschaft für Tribologie, 1977
- [9.] Fernlund, I., **The interaction between strategy and technological progress**, BBJ, Special issue-89, 1989, 3-5
- [10.] Hengerer, F., **The history of SKF3**, BBJ, 231 (1), 1987
- [11.] Kroon, A., Nutzel, H., **Bearing steel development**, BBJ, Special issue-89, 1989, 40-47
- [12.] Voskamp, A. P., **Material response to rolling contact loading**, Trans. of ASME, Journal of tribology, 107, 3, 1985, 359-366
- [13.] Kunkel, H., **Plastic cages - why?**, BBJ, 191, 1977
- [14.] Kunkel, H., **Plastic cages in rolling bearings**, BBJ, 227, 1986
- [15.] Cundill, T.R., **High precision silicon nitride balls for bearings**, BBJ, 241, 1993
- [16.] Chiu, Y.P., Pearson, P.K., Dezzani, M., Daverio, H., **Fatigue life and performance testing of hybrid ceramic ball bearings**, Lub. Eng., 52, 3, 1996, 198-204
- [17.] Skurka, J.C., **Elastohydrodynamic lubrication of roller bearings**, Trans. of ASME, JOLT, 92, 2, 1970, 281-291
- [18.] Tallian, T.E., **Rolling bearing life modifying: Factor for film thickness, surface roughness and friction**, Trans. of ASME, JOLT, 103, 4, 1981, 509-520
- [19.] Chang, L., Cusano, C., Conry, T.F., **Analysis of high-speed cylindrical roller bearings using a full elastohydrodynamic lubrication model, Part I and II**, Tribology Transaction, 33, 2, 1990, 274-291
- [20.] Dalmaz, G., Tessier, J. F., Dudragne, **Friction improvement in cycloidal motion contacts: rib-roller end contact in tapered roller bearings**, Proc. 7th Leeds-Lyon Symposium on tribology, Sept. 1980, pp.VII(iii), 175-185
- [21.] Zhang, Z., Qui, X., Hong, Y., **EHL analysis of rib-roller end contact in tapered roller bearings**, Tribology Transaction, 31, 4, 1988, 461-467
- [22.] Aihara, S., **A new running torque formula for tapered roller bearings under axial load**, Trans. of ASME, Journal of tribology, 109, 3, 1987, 471-478
- [23.] Zhou, R. S., Hoeprich, M.R., **Torque of tapered roller bearing**, Trans. of ASME, Journal of tribology, 113, 3, 1991, 590-597
- [24.] Sayles, R.S., Ioannides, E., **Debris damage in rolling bearings and its effects on fatigue life**, Trans. of ASME, Journal of tribology, 110, 1, 1988, 27-31
- [25.] Ioannides, E., Beghini, E., Bergling, G., Goodall, J., Jacobson, B., **Cleanliness and its importance for bearing performance**, BBJ, 242, 1993
- [26.] Nixon, H.P., Zantopoulos, H., **Fatigue life performance comparisons of tapered roller bearings with debris-damaged raceways**, Lub. Eng., 51, 9, 1995, 732-736
- [27.] Ioannides, E., Harris, T.A., **A new fatigue life model for rolling bearings**, Trans. of ASME, Journal of tribology, 107, 1985, 367-37
- [28.] Berling, G., Ioannides, E., **Tools to simplify new life theory calculation**, BBJ, 243, 1994

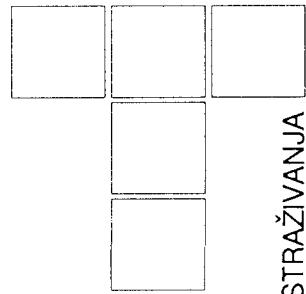
Up-to Date Tribological Consideration of Rolling Bearings

Long life and high performances are the characteristics of present day rolling bearings. Numerous improvements made in the course of last two decades are the results of comprehensive researches ,among which tribological investigations have a considerable place. The present paper provides a survey of the state of the development of rolling bearings, particularly from the tribological point of view.

Современные тенденции в трибологии подшипников качения

Современные подшипники качения характеризующие долговечность и высокое качество. За последние два десятилетия проведены многочисленные их улучшения благодаря подробным исследованиям среди которых особенно важны трибологические испытания. В работе рассматривается уровень развития подшипников качения, прежде всего с трибологической точки зрения.

M. BABIĆ, D. ADAMOVIĆ, B. JEREMIĆ, N. MILIĆ



Tribološke karakteristike površina bombardovanih čeličnim kuglicama

Za pravilan izbor završnih operacija obrade potrebno je poznavati zakonitosti ispoljavanja uticaja pojedinih vrsta obrade, kao i parametara režima i uslova njihovog izvođenja na relevantne parametre topografije površine (visina, oblik i struktura mikrogeometrije), fizičko-mehaničko stanje i zaostali naponi površinskog sloja. Rezultati laboratorijskih ispitivanja koji se izlažu i analiziraju u radu odnose se upravo na pomenute efekte korišćenja bombardovanja površina snopom čeličnih kuglica - kao završne obrade površinskim plastičnim deformisanjem, uz njihovo tribološko valorizovanje ispitivanjima na trenje i habanje.

Ključne reči: Bombardovanje čeličnim kuglicama, površina, tribološke karakteristike.

1. UVOD

Kvalitet kontaktne površine, u tribološkom smislu, predstavlja kompleks mikrogeometrijskih karakteristika, među kojima poseban značaj pripada parametrima strukture i oblika mikrogeometrije, i niza pokazatelja fizičko-mehaničkog stanja materijala u tankom površinskom sloju.

Karakteristike kontaktne površine, shvaćene na prethodni način kao karakteristike kontaktnog sloja, predstavljaju tehnološko stanje koje je rezultat procesa obrade. Naime, u interakciji alata i predmeta obrade, u operacijama obrade, osim mikrogeometrije obrađene površine stvara se i tanak granični sloj sa fizičkim, mehaničkim, pa i hemijskim karakteristikama često potpuno različitim u odnosu na osnovni materijal, kao posledica uticaja visokih specifičnih mehaničkih i termičkih dejstava na materijal. Mada u dobijanju konačnih rezultata svoje učešće iskazuje svaka tehnološka operacija, uz pojavu tzv. tehnološkog nasleđa, poseban značaj pripada izboru postupaka i uslova završne obrade.

Za pravilan izbor završnih operacija obrade potrebno je poznavati zakonitosti ispoljavanja uticaja pojedinih vrsta obrade, kao i parametara režima i uslova njihovog izvođenja na relevantne parametre topografije površine (visina, oblik i struktura mikrogeometrije), fizičko-mehaničko stanje i zaostali naponi površinskog sloja.

Upravo ovi kriterijumi idu u prilog davanja većeg značaja postupcima završne obrade na bazi površinskog plastičnog deformisanja. Naime, postupke završnih operacija površinskim plastičnim deformisanjem (baziranih na principima trenja kotrljanja, trenja klizanja ili udara) karakteriše, pre svega, pojava ojačanja sloja metala predmeta obrade u površinskom sloju obuhvaćenom plastičnim deformisanjem. Kao rezultat ojačanja dolazi do rasta svih karakteristika otpornosti na deformisanje, opadaju karakteristike plastičnosti i povećava se mikrotvrdića.

Rezultati laboratorijskih ispitivanja koji se izlažu i analiziraju u radu odnose se upravo na pomenute efekte korišćenja bombardovanja površina snopom čeličnih kuglica - kao završne obrade površinskim plastičnim deformisanjem, uz njihovo tribološko valorizovanje ispitivanjima na trenje i habanje.

Na bazi ukupnih triboloških efekata može se zaključiti da završna obrada kontaktnih površina bombardovanjem, snopom čeličnih kuglica, može doprineti unapređenju tribološkog nivoa elemenata tribomehaničkih sistema.

2. EKSPERIMENTALNA PROCEDURA

Za eksperimentalna ispitivanja izabrane su dve vrste legiranih čelika, i to čelik za poboljšanje Č.5630, domaće proizvodnje i konstrukcioni legirani čelik oznake 35NCD16T francuske proizvodnje.

Hemijski sastav ispitivanih čelika dat je u tabeli 1.

*Dr ing. Miroslav Babić, vanredni profesor,
Mr Dragan Adamović,
Dr ing. Branislav Jeremić, vanredni profesor,
Mr Nenad Milić
Mašinski fakultet Kragujevac*

Rad je nastao kao rezultat istraživanja na projektu Br. 1IMO1E1, finansiranom od strane Ministarstva za nauku i tehnologiju Republike Srbije

Mikrostruktura oba čelika sastoji se od međufazne strukture - trusit sa učešćem martenzita. Veličina austenitnog zrna određena je, prema JUS C.A3.004, metodom poređenja sa etalonima ASTM-a. Za oba materijala dobijena je veličina zrna N^o8, što spada u grupu sitnih austenitnih zrna.

Ispitivanje sadržaja nemetalnih uključaka izvršeno je u poređivanjem sa skalom iz JUS C.A3.013, metodom po Jernkontoretu. Utvrđeno je da čelik Č.5630 ima nemetalne uključke iz polja A2 (srednji indeks 0.56) i D2 (srednji indeks 1.03), a čelik 35NCD16T iz polja A1 (srednji indeks 0.43) i D2 (srednji indeks 1.25).

Mehaničke osobine termički obrađenih (poboljšanih) uzoraka čelika Č.5630 i 35NCD16T, dati su u tabeli 2.

Postupak bombardovanja uzorka izveden je na mašini za bombardovanje tipa ES-1580-1 firme PANGBORN livenim čeličnim kuglicama prečnika $d = 0.8 \text{ mm}$ (S330) i tvrdoće 48 - 55 HRC sa Almen intenzitetom 16A i potpunom ($P=98\%$) prekrivenošću.

Tvrdoća je merena na mikrotvrdomeru firme FRANK metodom po Knoopu.

Hrapavost ispitivanih površina merena je na kompjutrizovanom mernom sistemu TALYSURF 6 firme RANK TAYLOR HOBSON.

Tribometrijska uporedna istraživanja izvedena su na kompjuterski podržanom tribometru TPD-93 sa pin on disk kontaktnom geometrijom, koja obezbeđuje limijski nominalni kontakt.

S obzirom na njihovu veliku tribološku ugroženost uslovljenu izabranom geometrijom kontakta, kao nepokretni elementi (pin-ovi) korišćeni su uzorci sa kontaktnim površinama koje se ispituju (bombardovane, odnosno brušene). U svim opitnim kombinacijama kontratelo je predstavljao nekorišćen disk izrađen od čelika

Table 1. Hemijski sastav ispitivanih čelika Č.5630 i 35NCD16T.

Čelik	Procentualni sadržaj									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	W	Mo	Cu	P	S
Č.5630	0.23	0.29	0.32	1.41	4.12	1.15	-	0.14	0.021	0.02
35NCD16T	0.34	0.28	0.48	1.88	4.12	-	0.58	-	0.013	0.01

Table 2. Garantovane vrednosti mehaničkih osobina za čelike Č.5630 i 35NCD16T

Čelik	Pravac	Rp	Rm	A	Z	KU300/3
		MPa		%		J
		Najmanje				
Č.5630	-	930	1080	11	5	71*
35NCD16T	Uzdužni	1470	1780	8	35	34
	Poprečni	1470	1780	7	20	27

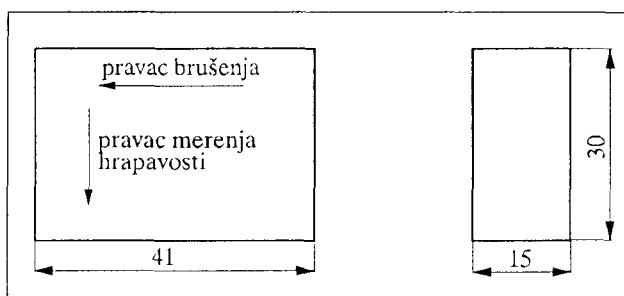
* - KU300/2

Č.4730, u cementiranom stanju (60 HRC), sa brušenom kontaktnom površinom $R_a = 0.3 \text{ mm}$.

Opitne operacije su obavljene u sledećim kontaktnim uslovima:

- Normalna kontaktna sila: $F_N = 10 \text{ daN}$,
- Brzina klizanja: $v = 1.5 \text{ m/s}$,
- Vreme trajanja kontakta: $t = 10 \text{ min}$,
- Podmazivanje: polarnim uljem, granični režim,
- Broj ponavljanja: 5.

Uzorci za tribološka ispitivanja prikazani su na slici 1.



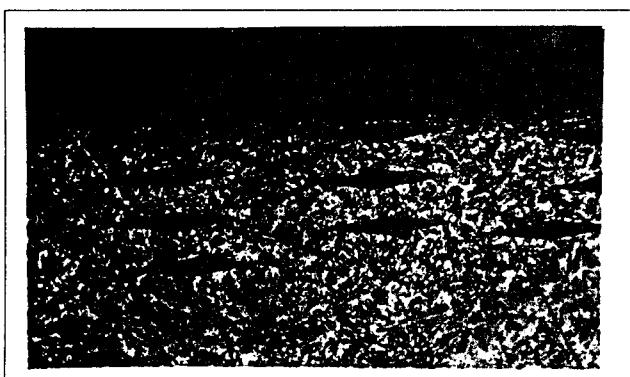
Slika 1. Uzorak za tribološka ispitivanja

3. REZULTATI I DISKUSIJA

3.1. Mikrotvrdoca i hrapavost

Metoda merenja tvrdoće po Knoop-u omogućava merenja na vrlo malim rastojanjima između otisaka i vrlo blizu površine, što nije moguće izvesti Vikers metodom. Merenje tvrdoće je izvedeno na metalografskim šlifovima napravljenim za određivanje metalografske strukture, na kojima nije izvršeno nagrizanje.

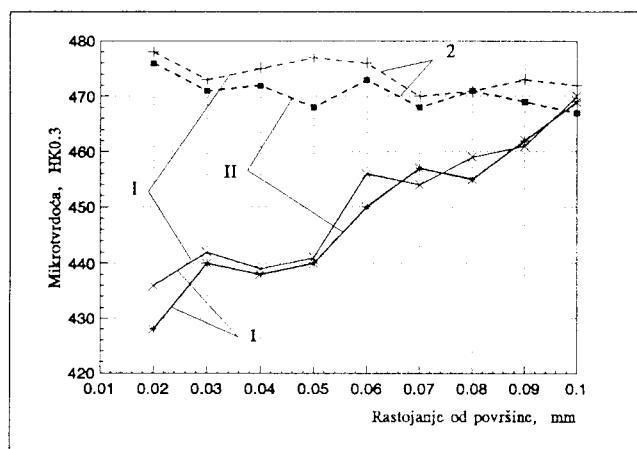
Minimalno rastojanje od površine, na kome je mogla da se izmeri tvrdoća a da ne dođe do stvaranja deformisanog otiska (zbog neizbežnog obaranja ivičnog sloja pri bru-



Slika 2. Otisci dobijeni merenjem mikrotvrdće

šenju), iznosilo je 0.02 mm . Tvrdoća je merena na rastojanjima od 0.01 mm do 0.1 mm , u tri reda, sa pomeranjem u stranu (slika 2). Na taj način je izbegnuta plastično deformisana zona u okolini prethodnog otiska. Izabrano opterećenje od $3 \text{ N} (\approx 300 \text{ p})$ omogućavalo je dobijanje otiska dovoljno velikih dimenzija za merenja veće dijagonale, uz zadovoljavajuću tačnost.

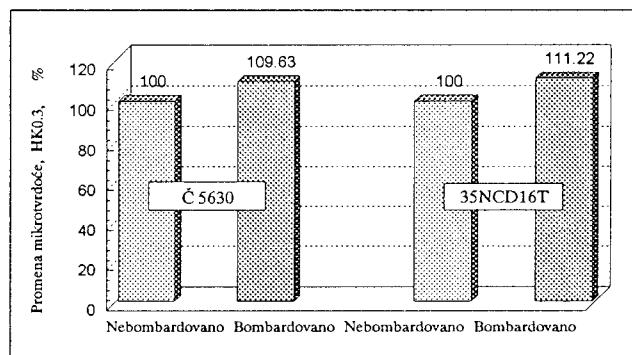
Na osnovu izmerenih vrednosti nacrtani su dijagrami koji pokazuju promenu tvrdoće u površinskom sloju (slika 3).



Slika 3. Dijagram promene mikrotvrdće u površinskom sloju:
I - uzorci od čelika Č 5630,
II - uzorci od čelika 35NCD16T;
1 - brušeno stanje ($P=0\%$),
2 - bombardovano stanje ($P=98\%$)

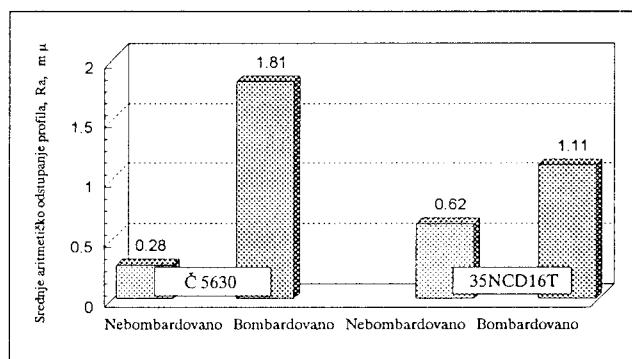
Prilikom bombardovanja došlo je do povećanja tvrdoće u površinskom sloju do dubine od oko 0.1 mm . Kod uzorka od čelika Č.5630 povećanje tvrdoće usled bombardovanja iznosilo je 9.63% , a kod čelika 35NCD16T 11.22% (slika 4).

Usled bombardovanja došlo je do veoma izraženog porasta svih visinskih parametara hrapavosti ($R_a, R_g, R_p, R_s, R_y, R_{tm}, R_{pm}$), za oba ispitivana materijala, u odnosu na početno stanje dobijeno brušenjem. Pri tome većem stepenu prekrivenosti odgovara veći stepen porasta hrapavosti. Pogoršanje visinskih parametara hrapavosti, izraženje kod Č.5630, ilustrovano je na primeru srednjeg aritmetičkog odstupanja profila R_a na slici 5.



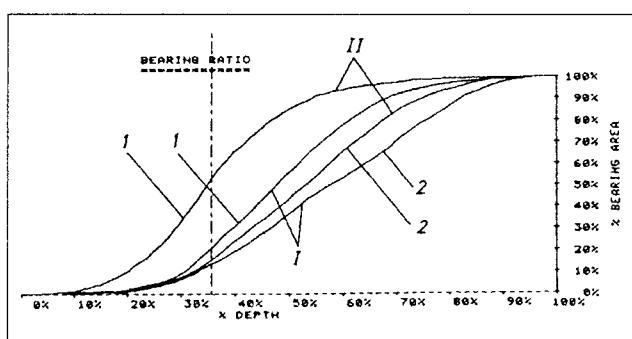
Slika 4. Procenatalna promena mikrotvrdće u površini-

Osim na porast parametara koji reprezentuju visinu mikroneravnina, obrada bombardovanjem snopom čeličnih kuglica utiče i na veliki porast parametara koraka neravnina.



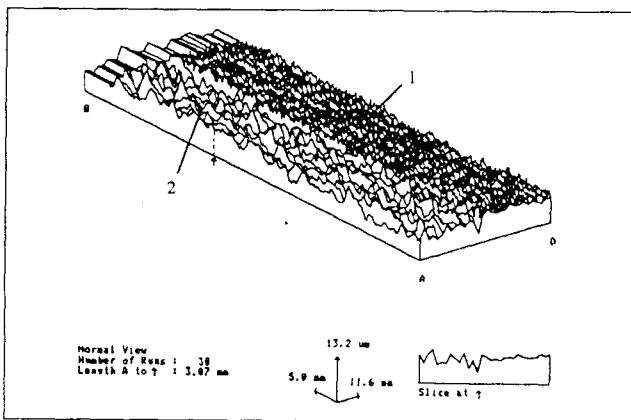
Slika 5. Promena srednjeg aritmetičkog odstupanja profila

Pomenute promene rezultantno se manifestuju kroz pogoršanje strukturnih parametara mikrogeometrije u smislu smanjenja površine nošenja po dubini profila. Ovo je iskazano promenom koeficijenta asimetrije profila R_{sk} od negativne prema pozitivnoj vrednosti, smanjenjem mera zaoštrenosti krive raspodele amplituda i, najočiglednije, promenom oblika krivih nošenja profila. Razlike u obliku krivih nošenja profila, koje odgovaraju stanju površina pre bombardovanja i nakon bombardovanja najočitije su iskazane uporednim prikazom za oba materijala na slici 6.



Slika 6. Krive nošenja profila:
I - uzorci od čelika Č 5630,
II - uzorci od čelika 35NCD16T;
1 - brušeno stanje ($P=0\%$),
2 - bombardovano stanje ($P=98\%$)

Potpuno izmenjena topografija, uzorka od čelika 35NCD16T, u pogledu visine, oblika, koraka i statistike kojom rezultira obrada bombardovanjem kuglicama ilustrovana je 3D profilogramom na slići 7.



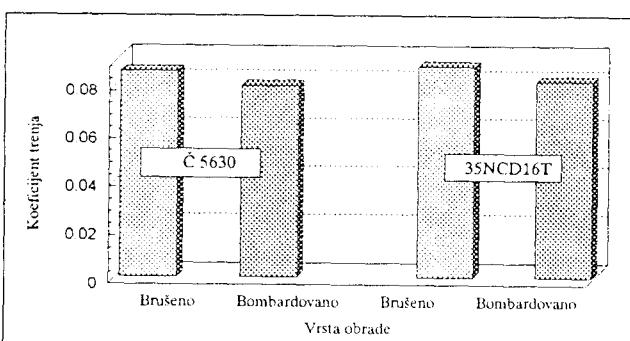
Slika 7. 3D profilogram uzorka od čelika 35NCD16T:
1 - brušena površina, 2 - bombardovana površina

Na osnovu dobijenih rezultata evidentno je da je, usled bombardovanja, došlo do pogoršanja parametara hrapavosti. Razlog tome je mala početna hrapavost koju su epruvete imale pre bombardovanja i veliki prečnik kuglica kojima je izvedeno bombardovanje.

3.2. Tribološka svojstva

U toku triboloških ispitivanja utvrđen je blag porast koeficijenta trenja. To je posledica promene kontaktnih uslova, koja nastaje porastom nominalne i realne površine kontakta, usled progresivnog razvoja procesa habanja na kontaknoj površini pin-a.

Srednje vrednosti koeficijenata trenja prikazane su na slići 8. Iako se radi o malim razlikama, vidi se da za oba ispitivana materijala nešto niži nivo srednjeg koeficijenta trenja odgovara bombardovanim u odnosu na brušene površine. Ovakva slika može izgledati nesaglasno karakteristikama mikrogeometrije, jer je ranije pokazano da bombardovane površine imaju lošije visinske i strukturne karakteristike hrapavosti. Međutim, u oceni ovih frikcionalnih rezultata treba imati u vidu da se zbog linjskog kontakta, velikog realnog kontaktnog opterećenja, velike brzine klizanja i znatno niže tvrdoće materijala pinova



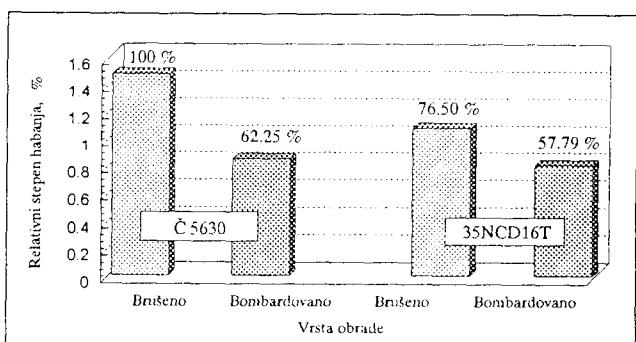
Slika 8. Promena srednjih vrednosti koeficijenta trenja

od tvrdoće materijala diskova, proces inicijalnog habanja ispitivanih površina odvija veoma intenzivno, pa u trenu učestvuju sasvim nove površine formirane u procesu habanja. U takvim uslovima na proces trenja pozitivno se iskazuje uticaj veće mikrotvrdće površinskih slojeva dobijenih površinskim plastičnim deformisanjem.

Rezultati merenja širine pojasa habanja na kontaktnim površinama pin-ova pokazuju da se znatno izraženiji efekti ojačanja kontaktnih površina bombardovanjem čeličnim kuglicama iskazuju na otpornost na habanje. To je prikazano na slići 9, preko odgovarajućeg stepena habanja (k), koji predstavlja odnos vrednosti parametra habanja (širina pojasa habanja h) i proizvoda normalnog opterećenja (F_N) i puta trenja (l):

$$k = \frac{h}{F_N \cdot l} \cdot 100 [\%], \quad (1)$$

Vidi se da porast mikrotvrdće površinskog sloja, kao i generiranih tribološki poželjnih zaostalih pritisnih napona, usled bombardovanja, obezbeđuje znatno povećanje otpornosti na habanje kod oba materijala (čak preko 35%).



Slika 9. Promena relativnog stepena habanja

4. ZAKLJUČAK

Bombardovanje pri navedenim parametrima manifestuje se pogoršanjem kako visinskih, tako i strukturalnih parametara hrapavosti u odnosu na početno stanje postignuto brušenjem. To je posledica male početne hrapavosti i nešto većeg prečnika kuglica koje su korištene u obradi bombardovanjem. Istovremeno postignuto je povećanje tvrdoće u površinskom sloju do dubine od 0.1 mm . Ovo povećanje je relativno malo, ali je i očekivano za čelike sa polaznom tvrdoćom između 40 i 50 HRC.

Iako se radi o malim razlikama koeficijenata trenja, vidi se da nešto niži nivo koeficijenta trenja odgovara bombardovanim površinama. Ovakvi odnosi su posledica dugotrajnijih ispitivanja u kojima dominantan uticaj na friкцион ponašanje nemaju parametri početne mikrogeometrije, s obzirom da se proces uhodavanja okončava u početnom periodu procesa trenja.

Smanjenje relativnog stepena habanja ukazuje na veliko unapređenje otpornosti kontaktnih površina (preko 30%) do koga dolazi postupkom obrade bombardovanja čeličnim kuglicama. Ovo je posledica, kako povećanja mikrotvrdoće materijala, tako i znatno povoljnijih pritisnih zaostalih napona u površinskom sloju.

Dakle, na bazi ukupnih triboloških efekata može se zaključiti da završna obrada kontaktnih površina bombardovanjem, snopom čeličnih kuglica, može doprineti unapređenju tribološkog nivoa elemenata tribomehaničkih sistema.

LITERATURA

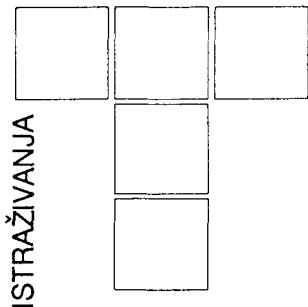
- [1.] D. Adamović, M. Babić, B. Jeremić: Uticaj bombardovanja površine snopom čeličnih kuglica na parametre hrapavosti, Tribologija u industriji No 2, 1994.
- [2.] D. Adamović: Prilog istraživanju ojačanja dinamički opterećenih elemenata metodom bombardovanja snopom čeličnih kuglica, Magistarski rad, Kragujevac, 1993.
- [3.] D. Adamović, M. Babić, B. Jeremić: Površinsko plastično deformisanje snopom kuglica, Jugoslovensko društvo za tribologiju, Kragujevac 1995.

Tribological Characteristics of Surfaces Machined by Shot Peening

For the proper choice of finishing machining operations, it is necessary to know the laws of expression of certain effects of individual types of machining, as well as parameters of the machining regime and conditions of their realization, on relevant parameters of the surface topography (height, shape and structure of micro geometry), physical - mechanical status of surfaces and the residual stresses in the surface layers. Results of laboratory investigations that are being presented and analyzed in this paper are directly related to the mentioned effects of application of the shot peening process - as the finishing machining operation, together with their tribological valorization, by the friction and wear tests.

Трибологические характеристики поверхностей обрабатываемых дробеструем

Для правильного выбора способов чистовой обработки необходимо знать закономерности проявления воздействия отдельных видов обработки параметров, режима и условий их проведения на существенные параметры поверхности (высоту, форму и структуру микрорельефа), физико-механическое состояние и остаточные напряжения поверхности слоя. Результаты лабораторных исследований, анализируемые в работе, именно посвящены приведенным эффектам дробеструйной обработки сферическими шариками, являющейся окончательной поверхностью обработкой пластическим деформированием при их трибологической оценке исследованиями на трение и изнашивание.



S. VEINOVIĆ, D. RADONJIĆ, R. PEŠIĆ, A. DAVINIĆ,
Z. RADOŠEVIĆ, M. STANOJEVIĆ, Z. GRADJIN

Analiza triboloških karakteristika domaćih motora

Zaštića okoline i napredne tehnologije su vodeće smernice za razvoj i tržišnu primenu novih rešenja na vozilima. Održanje energijske efikasnosti je strateško pitanje ne samo za proizvodjače i potrošače vozila i pogonskih materijala već u prvom redu za privredu u celini. Izmene u performansama motora i vozila kao i vrsti i kvalitetu goriva izazivaju promene u kvalitetu motornih ulja. Performanse modernih ulja su odredjene izborom baze, bilo naftnog bilo sintetičkog porekla i izborom aditiva. Ekonomičnost se može ozbiljno poboljšati putem optimizacije konstrukcije klipa. Mi smo to izveli primenom tribeloških uložaka.

Ključne reči: ekonomija, ekologija, motori sus, specifikacije ulja, tribologija, tribeloški uložak

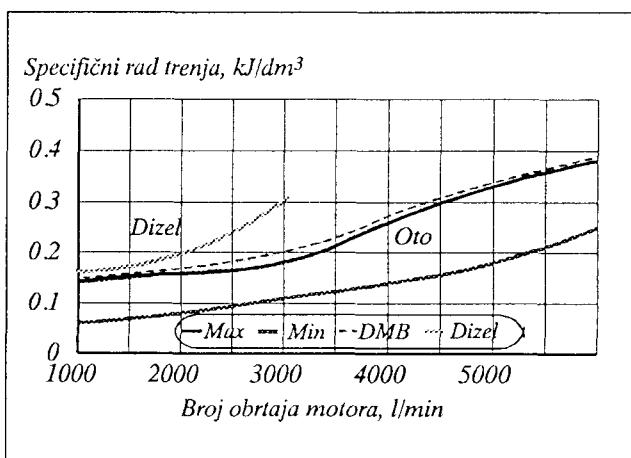
1. UVOD

Aktuelni zadaci na usavršavanju domaćih motora, kao masovnih industrijskih proizvoda, zahtevaju paralelne aktivnosti na njihovom termodinamičkom i tribološkom optimiranju. U ovome radu ćemo dati prikaz stvaračkog doprinosa triboloških znanja u oblasti proizvodnje, projektovanja i daljeg usavršavanja domaćih motora sus. Celovito sagledavanje tribologije kao inspirativne naučne oblasti dolazi do punog izražaja u njenom globalnom doprinosu očuvanju energijskih potencijala i sirovinskih resursa na našoj Planeti. Kada uzmemmo motore sus kao najbrojnije termičke izvore mehaničkog rada onda po strogim merilima njima tek predstoji tribološko optimiranje. Efektivni termodinamički stepen korisnosti serijskih motora je u proseku između 20 i 30%. Vrhunska rešenja brodskih motora imaju efektivni stepen korisnosti preko 50%. Po mehaničkom stepenu korisnosti motori su vrlo nesavršeni. Kao dokaz za takvu tvrdnju navodimo činjenicu da u njima preovlađuju granična i polu suva trenja sa povremenim i delimičnim ulaćenjem u oblast hidrodinamičkog podmazivanja [4, 6]. Mehanički stepen korisnosti [8] je u najpovoljnijim uslovima između 80 i 90%, a na niskim i delimičnim opterećenjima ispod 50%.

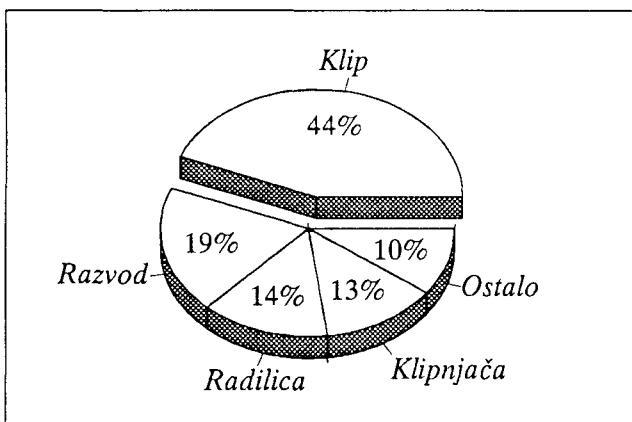
Stevan Veinović, dr inž. prof. MF Kragujevac,
Dragoljub Radonjić, dr inž. prof. MFK,
Radivoje Pešić, dr inž. docent MFK,
Aleksandar Davinić, mr inž. asistent MFK,
Zoran Radošević, dipl.inž. str. sar. MFK,
Milutin Stanojević, dipl.inž. PD Mladenovac,
Zoran Gradjin, dipl.inž. VTA Beograd

Pošto se mi bavimo tribološkim karakteristikama domaćih motora prvo ćemo navesti statističke podatke za rad trenja automobilskih oto i kamionskih dizel motora, sl. 1 [1, 2, 3, 4].

Polja Max-Min na ovoj slici su za motore evropske proizvodnje. Vrednosti za naše motore DMB su na gornjoj liniji. Izvori niskih vrednosti (kod fabrički novih motora, stanje u eksploraciji je još drastičnije na štetu naših motora!) su u tehnološkim i konstruktivnim slabostima. Sumarna slika mehaničkih gubitaka u motoru uvek ističe klipnu grupu kao dominantu po trenju, sl. 2. Inače se ti odnosi menjaju sa brojem obrtaja, opterećenjem i termičkim stanjem motora [3]. Ovo je načelna podela s tim što "klip" sadrži trenje klipnih prstenova (oko 30 - 50%), a ostalo klipna košuljica.



Slika 1. Specifični rad trenja motora sus u funkciji broja obrtaja



Slika 2. Opšta raspodela izvora trenja u motorima SUS

Motori SUS su komplikovane mašinske kompozicije koje imaju brojne hidrauličke mašine (pumpe za gorivo, mazivo i vodu, ventilatore) brojne spojnice, reduktore i multiplikatore, krivajne i bregaste mehanizme i sl. U zbirnom popravljanju triboloških kvaliteta motora svaki taj njegov element mora biti posebno u centru pažnje. Izbor maziva i svih tehničkih rešenja je usmeren na minimizaciju sila trenja i intenziteta habanja materijala. Ako se vratimo automobilskoj tehnici onda možemo konstatovati da u njoj ima mesta za primenu tribologije kao celovite naučne grane u:

- tehnologiji proizvodnje
- projektovanju motora i vozila
- formulaciji i izboru pogonskih materijala
- organizaciji eksploatacije i logistike tokom celog životnog veka vozila.

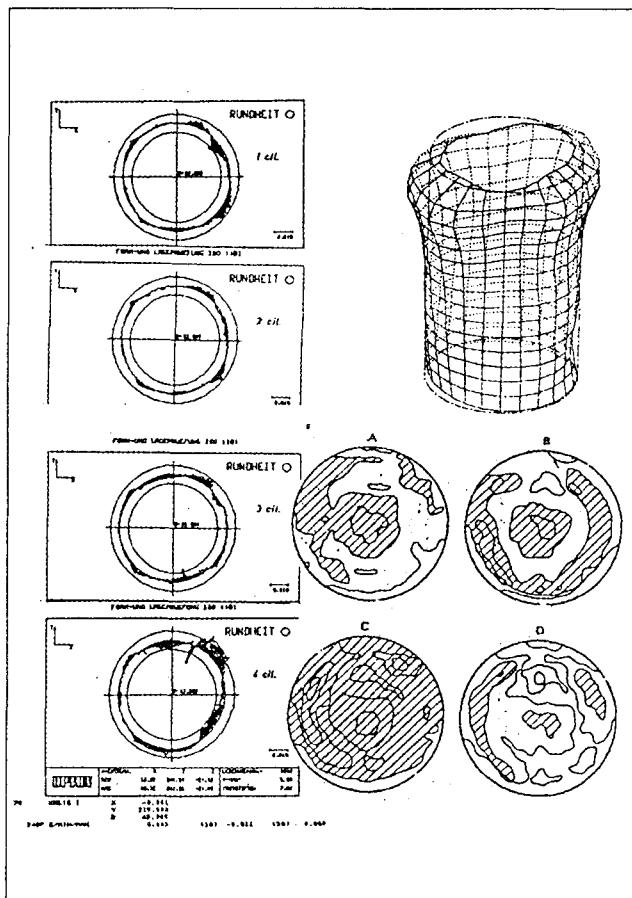
U ovom radu se nećemo baviti eksploatacijom, uslovima održavanja, vrstom niti kvalitetom maziva jer je to već obrađivano u drugim radovima [2, 7].

2. OCENA PROIZVODNIH LINIJA

Specifičnost tribološke problematike jeste u velikoj stresnosti prema tačnosti ravanske i prostorne obrade svih površina. Kako se povećava uskost tolerancija tako raste proizvodna cena motora. Jednom prilikom [8] smo detaljno analizirali kvalitete obrade bloka na proizvodnim linijama DMB i tada smo došli do zaključka da bitnija odstupanja postoje pri obradi gornje površine bloka, položaja ose otvora kućišta osnovnih ležajeva kolenastog vratila, vodećih površina za montažu poklopaca kućišta ležajeva i ekscentričnosti osnovnih rukavaca kolenastog vratila što može znatno uticati na mehaničke gubitke u motoru.

Na slici 3 (snimci zapisa na levoj strani za cilindre 1, 2, 3 i 4) imamo podatke za dubinu od 25 mm za sva četiri cilindra. Spoljašnja kružnica odgovara najvećoj, a unutrašnja najmanjoj meri prečnika cilindra za datu klasu.

Merenjem oblika otvora cilindara u bloku 4-cilindarskog motora na četiri različite dubine od gornje površine bloka i to na 25, 50, 75 i 100 mm dobili smo prostorni oblik cilindara. Stvarni oblik otvora je prikazan linijom u 1000 tačaka za svaki presek. Jedino su kod drugog cilindra nađena veća odstupanja na kotama 50 i 75 mm od propisanih, tj. otvor toga cilindra je bio koničan što je nepovoljno po kriterijumu trenja. Na sl. 3, gore desno, napravljen je kompjuterski model izgleda cilindra pre i posle istrošenja. Osnovne kružnice i bočne linije dobijaju torzionate prostorne i ravanske deformacije usled trenja i trošenja tokom rada.



Slika 3. Izmereni profili obrade (za cilindre 1, 2, 3 i 4 - leva strana slike), prostorni model cilindra (gore desno) i raspodela temperatura na celu klipa (a, b, c i d za razne sisteme hlađenja motora i klipa)

U literaturi se mogu naći ponude za nove postupke obrade koji cilindarske površine obraduju blisko idealnoj konfiguraciji opisanoj središnjom kružnicom, a sve uz odgovarajuću cenu. Po našem mišljenju prava budućnost tehnologije motora ne samo da nije u tome pravcu već jedino u funkcionalnom projektovanju i dimenzionisanju delova motora. Tehnološka i projektantska rezonovanja treba usaglasiti sa kompleksnim namenskim zahtevima.

3. PRIMENA TRIBOLOŠKIH ZNANJA U PROJEKTOVANJU

Trenje, habanje i vek delova su uzajamno povezane pojave koje konstruktor mora sagledati još u idejnom rešenju. Zato vrlo ozbiljan doprinos poboljšavanju pogonskih i upotrebnih karakteristika svih mašinskih proizvoda može dati primena triboloških spoznaja. Termička slika svih delova zavisi od režima rada. Ako dimenzije i tolerancije propišemo za najčešće režime rada u eksploataciji - a ne za hladne uslove- imaćemo najduži vek motora. Kako to izgleda na primeru cilindarskog sklopa klip-cilindar vidi se sa trećeg dela slike 3.

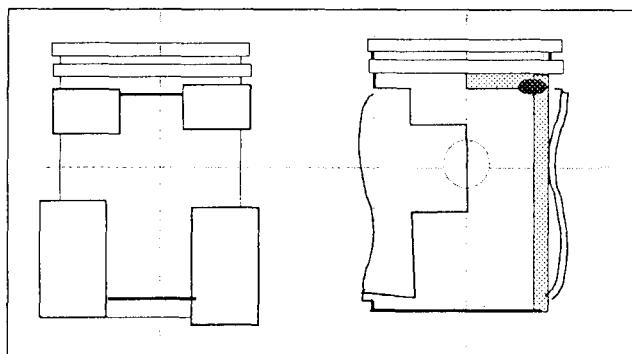
Sa A, B, C i D su šrafurom obeležena maksimalna temperaturska polja na čelu klipa za razne varijante sistema hlađenja motora i njegovih klipova.

Slika	Glava i gornji deo bloka, K	Donji deo bloka, K	Hlađenje klipa uljem	Max. temp, % od čela
A	Voda, 363	Voda, 363	Ne	42
B	Voda, 343	Ulje 388	Ne	54
C	Voda, 363	Ulje 388	Ne	89
D	Voda, 363	Ulje 388	Da	16

U slučaju "A", sl. 3 (dole desno), imamo potpunu termičku nesimetričnost na klipu. Sistemi hlađenja bloka i glave su razdvojeni, a klip se ne hlađi uljem. U varijanti "B" imamo hlađenje bloka uljem i više temperature. Termičko stanje na čelu klipa raste. Takvi će biti i njegovi zahtevi prema cilindru. Varijanta "C" ima skoro ravnomernu raspodelu maksimalnih temperatura po celom čelu pa takvi klipovi traže odgovarajuće zazore i kružan oblik cilindra. Na slici "D" je primer svih konstruktivnih mera da čelo klipa dobije ujednačenu raspodelu temperature i da se termički rastereti:

- glava se hlađi vodom
- blok se hlađi uljem
- klip se hlađi uljem

Tako nam ova slika sugerije dalji smer za usavršavanje konstrukcije motora i njegovih sistema. Odavde slede



Slika 4. Klip sa triboelastičnim ulošcima

indirekte mere za produžavanje veka motora jer za njega nisu presudne dimenzije i tolerancije u hladnim stanjima već u onim na kojima će se motor najčešće koristiti. Osnovna direktiva tribološkog optimiranja nalaže prevođenje svih slučajeva graničnog u hidrodinamičko podmazivanje. U skladu sa tim zahtevom mi smo na sl. 4 prikazali novo konstruktivno rešenje klipa sa triboelastičnim ulošcima [9, 10] koji:

- omogućuju veći protok ulja do kritičnih delova
- olakšavaju startovanje posebno u uslovima niskih temperatura, oslabljenog akumulatora i sl.
- smanjuju osetljivost na taloge i druge vrste zaprljanja ulja tipične za stani-kreni vožnje.

Ulošci imaju i dve konstruktivne uloge:

- 1) prevode istrošenja klipa na lako zamenljive uloške tako da se ubuduće remont klipne grupe svodi na zamenu istrošenih prstenova i uložaka, a klip postaje samo nosač delova koji se troše i lako zamenjuju;
- 2) triboelastični ulošci preuzimaju ulogu osigurača osovinice, pa se poboljšava cela koncepcija konstrukcije klipa: oslonci osovinice više nisu konzole sa zarezom za zegerove osigurače, zato će biti kraći, ujedno su manja dinamička naprezanja, a na račun toga se mala pesnica klipnjače slobodnije dimenzionise i sl.

Svojom elastičnošću i ležišnim slojem triboelastični ulošci daju klipu vođenje kroz cilindar što smanjuje buku, udarno i ukupno mehaničko opterećenje sklopa klip-cilindarska košuljica. Dobre tribološke osobine površine će se odraziti na duži vek cilindarskih košuljica i lakše održavanje motora.

4. ZAKLJUČCI

- ▶ Projektovanje, proizvodnja i održavanje složenih mašinskih sistema obavezuje na korišćenje vrhunskih znanja iz svih naučnih oblasti.
- ▶ Uporedno sa termodinamičkim mora se ići na tribološko optimiranje motora sus da bi se dostigle vrhunske vrednosti efektivnog stepena korisnosti.
- ▶ Svaka faza istraživanja, poboljšanja performansi, veka i pouzdanosti motora sus treba da asimilira stvaralačke doprinose tribologije.

LITERATURA

- [1.] Borak, Đ., Veselinović, B., Džigurski, O.: Približno određivanje energijskog bilansa u cilindru dizel motora, Naučno -tehnički pregled, Beograd, No.3/ 1979.
- [2.] Pasztor, E.: Madarska iskustva sa motornim uljima i aditivima, YUNG 95, Vrnjačka Banja, oktobra 1995.
- [3.] Parker, D. A. and a.: The reduction of piston friction and noise, "Automotive Technology International' 87", Published by Sterling Publishing Group PLC, 1987. 178-188.

- [4.] Petrović, S. i dr.: **Razvoj familije antitoksičnih ekonomičnih benzinskih motora**, (tema: istraživanje triboloških karakteristika elemenata i mehanizama motora sus, III faza projekta), interni izveštaj Mašinskog fakulteta u Beogradu, 1989. str. 27
- [5.] Pešić, R., Veinović, S., Davinić, A., Radošević, Z.: **Kritička slika triboloških karakteristika domaćih motora DMB**, YUNG 95, Vrnjačka Banja, oktobra 1995.g.
- [6.] Rac, A.: **Tribologija motora SUS - stanje i tendencije**, "Tribologija u industriji", časopis MFK, decembar (4/12), Kragujevac, 1994. 119-126.
- [7.] Rac, A., Kostić, Đ., Balvanlijev, A., Japundžić, Lj.: **Opšta karakterizacija sistema za podmazivanje motora SUS**, "Goriva i maziva", 27, 5/6, 1989, 235-245
- [8.] Radonjić, D.: **Poboljšanje mehaničkog stepena korisnosti** (Tehnologičnost izrade motora DMB 1000A), Interni izveštaj MFK, maja 1987.18.
- [9.] Veinović, S., Pešić, R., Građin, Z., Stanojević, M.: **Klip motora i kompresora sa triboelastičnim ulošcima**, Patentna prijava P-88/94 od 28.02.1994.
- [10.] Veinović, S., Pešić, R., Građin, Z., Stanojević, M.: **Mogućnosti poboljšanja mehaničkog stepena korisnosti motora SUS**, Osmi simpozijum MVM Kragujevac 94, Zbornik radova, Kragujevac 1994. 497-504

Study of The Tribological Performances of Domestic Engines

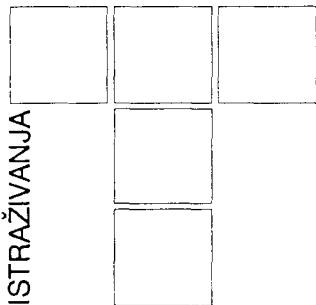
Environmental aspects and technical progress are leading to the development and rapid market introduction of new automotive technology. Maintaining the energy efficiency is a strategic issue not only for the automotive and oil manufacturers and consumers but above all for the entire economy. The modification in the engine and vehicle performance, as well as those in the kind and quality of fuel make the changes in the quality of mineral base stocks used to produce motor oil and other lubricants. Modern engine oil performance is depended upon proper lubricating oil base stock selection, either petroleum derived or synthetic, and additives. This paper give a study of the tribological efficiency due in part of improved piston design with new triboelastic pads.

Key words: ecology, economy, IC engine, oil specification, triboelastic pad, tribology

Анализ трибологических характеристик двигателей отечественного производства

Охрана окружающей среды и передовые технологические процессы предстаивают собой определяющее направляющее развитие и внедрения коммерческих решений в автомобилях. Сохранение энергетической эффективности автомобиля является стратегическим вопросом не только для изготавщиков и потребителей автомобилей и топлив, но и для народного хозяйства в целом. Изменения характеристик двигателей и автомобилей, как и качества топлива, вызывают изменение качества моторных масел.

Свойства современных масел определяются соизвестующим выбором их основы, либо нефтяного, либо синтетического происхождения, и выбором присадок. Экономичность двигателя можно в значительной мере повысить оптимизацией конструкции поршня, которой авторы работы добились внедрением трибоэластичным вкладышей.



M. ZLATANOVIĆ, R. BELOŠEVAC, A. KUNOSIĆ

Tribologija dvostrukog sloja: prevlaka / difuziona zona

U ovom radu su proučavane tribološke karakteristike TiN prevlake dobijene dupleks postupkom. Poredene su osobine slojeva dobijenih depozicijom TiN prevlaka na uzorcima od različitih materijala sa i bez prethodnog plazma nitriranja na niskom pritisku. Karakterizacija prevlaka je vršena merenjem površinske mikrotvrdće, adhezije i debljine prevlaka, kao i merenjem habanja na pin-on-disc testu i Amsler uređaju. Obavljena su i eksploraciona ispitivanja slojeva nanesenih na odvalna glodala.

Ključne reči: Tvrde prevlake, TiN, dupleks postupak

1.UVOD

Od pre nekoliko godina počelo se sa širokom primenom tvrdih prevlaka u mašinskoj industriji zbog njihovih izuzetnih mehaničkih i antikorozivnih osobina, kao i zbog visokotemperaturske postojanosti. Ove prevlake omogućuju povećanje postojanosti alata i zaštitu funkcionalnih delova od čelika koji su izloženi habanju usled klizanja, kotrljanja, abrazivnog i hemijskog nagrizanja, a koriste se i za dekorativne svrhe. Najčešće se sreću prevlake od titannitrida (TiN) koji nalazi primenu i u elektronici; kao difuziona barijera kod omskih kontakata, gejt kod MOS-tranzistora i pri izradi Šotkijeve diode. Osobina koja ograničava primenu tvrdih prevlaka je njihova adhezija sa podlogom. Kao metod za poboljšanje adhezionih karakteristika prevlake na različitim podlogama koristi se prethodno nitriranje podloge.

2.EKSPERIMENT

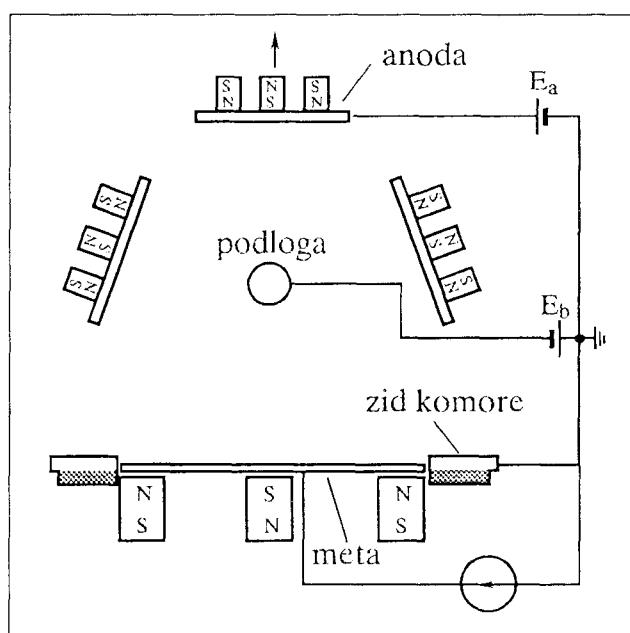
Uzorci od tri različita materijala: bzoreznog čelika Č.7680, čelika za topli rad Č.4751 i konstrukcionog čelika Č.4732 tretirani su dupleks postupkom. Pre obrade u komori, uzorci su brušeni i polirani do hrapavosti $R_a=0.2 \mu\text{m}$, a zatim odmašćivani u pari trihloretilena, čišćeni specijalnim hemikalijama u ultrazvučnim kadašima, ispirani destilovanom vodom i alkoholom i sušeni komprimovanim vazduhom. Izvršena su dva eksperimenta. U prvom je na navedene materijale deponovana TiN prevlaka, a u drugom su tri uzorka obrađena kombinacijom nitriranja na niskom pritisku i depozicije TiN,

M. Zlatanović, Elektrotehnički fakultet, Beograd
R. Beloševac, Centar za plazma tehnologije,
ETF-IMT, Beograd
A. Kunosić, Elektrotehnički fakultet, Beograd

bez prekidanja. Svi eksperimenti su rađeni u vakuumskoj komori uređaja Z-700 LH za depoziciju tvrdih prevlaka reaktivnim magnetronskim raspršivanjem (slika 1). Sistema se sastoji od jednostrukog magnetrona sa stalnim magnetima, dodatne anode postavljene iza uzorka u ravni paralelnoj meti i držača uzorka koji se može dovesti na negativan napon.

Osobine dobijenih prevlaka poređene su merenjem površinske mikrotvrdće Vickers metodom i određivanjem adhezije scratch-test metodom. Za merenje habanja korišćeni su pin-on-disc i Amsler test. Obavljena su i eksploraciona ispitivanja slojeva nanesenih na odvalna glodala.

U istom uređaju vršeno je nitriranje na niskom pritisku i depozicija TiN. Optimizacija parametara nitriranja i de-



Slika 1. Uredaj za depoziciju

pozicije, u cilju dobijanja struktura slojeva i interfejsa koji daju zadovoljavajuću adheziju prevlake, zahteva je veći broj eksperimenata.

3.REZULTATI I DISKUSIJA

Pod prevlakama se podrazumevaju površinski slojevi koji su dovoljno tanki da podloga ima uticaj na osobine trenja i habanja materijala sa prevlakom [1]. Struktura koja se sastoji od osnovnog materijala i prevlake sadrži četiri zone koje su značajne za ukupne tribološke karakteristike:

1. površina prevlake
2. prevlaka
3. granica prevlake i osnovnog materijala
4. osnovni materijal.

U zoni 3 od značaja su adhezija i otpornost na smicanje, dok su koeficijent termičkog širenja termička provodnost, žilavost, elastičnost, otpornost na lom, tvrdoća i druge osobine osnovnog materijala od značaja za ukupne tribološke karakteristike sistema prevlaka-osnovni materijal.

U opštem slučaju, tvrde prevlake su otporne na habanje, ali ako se deponuju na meku osnovu dolazi do njihovog pucanja i katastrofalnog razaranja tokom triboloških testova, usled plastične deformacije osnovnog materijala koji nije otporan na pritisak.

Izbor materijala koji se mogu zaštитiti od habanja depozicijom tvrde prevlake ograničen je na materijale otporne na plastičnu deformaciju pri dejstvu normalnog opterećenja [2]. Osim ove osobine, za ponašanje materijala pri dinamičkim tribološkim testovima, kao što su test trljanja ili test periodičnog kotrljanja kuglica po površini, značajna je i otpornost osnovnog materijala na naizmenično opterećenje (granica zamora). Izbor materijala podloge ograničen je u praksi vrednošću oba parametra, otpornosti na normalno opterećenje i granice zamora materijala.

Tabela 1

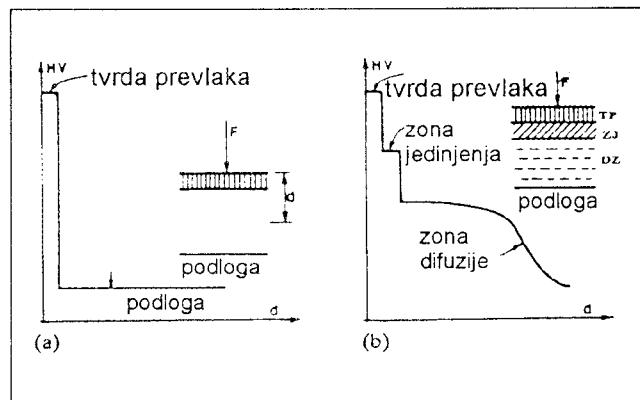
Uzorak	Sloj	$d[\mu\text{m}]$	$HV_{0.05}$	$HV_{0.03}$
Č.7680	TiN	3.40	940	2370
Č.7680	dupleks	3.45	1450	3080
Č.4751	TiN	3.45	470	2100
Č.4751	dupleks	3.95	1200	3780
Č.4732	TiN	3.70	350	1560
Č.4732	dupleks	3.90	720	1820

d - debљina prevlake; $HV_{0.05}$ - tvrdoća podloge pre depozicije; $HV_{0.03}$ - tvrdoća prevlake

U tabeli 1 dati su rezultati merenja površinske mikrotvrdoće i debljine TiN prevlaka nanesenih na podloge uz

prethodno plazma nitriranje (dupleks postupak) ili bez njega. Iz rezultata se može zaključiti da prethodno plazma nitriranje podloge na niskom pritisku dovodi do povećanja površinske tvrdoće prevlaka.

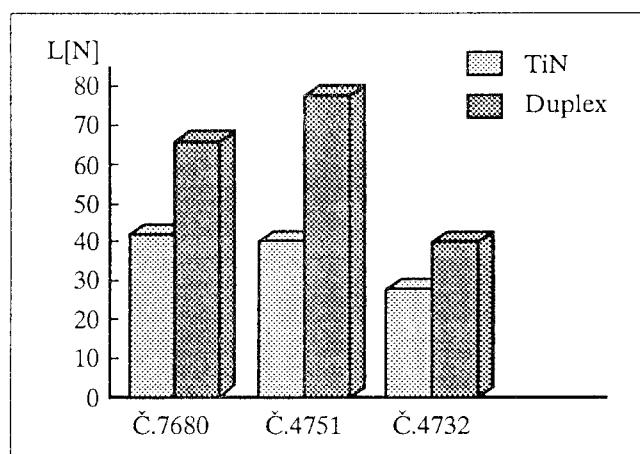
Prethodna obrada postupkom difuzije azota povećava nosivost i granicu zamora osnovnog materijala. Mehanizam povećanja nosivosti osnovnog materijala povećanjem mikrotvrdoće površinskog sloja, za uzorke obrađene sa i bez prethodnog plazma nitriranja, prikazan je na sl. 2.



Slika 2. Raspodela mikrotvrdoće: a) uzorak sa prevlakom; b) uzorak obradjen dupleks postupkom

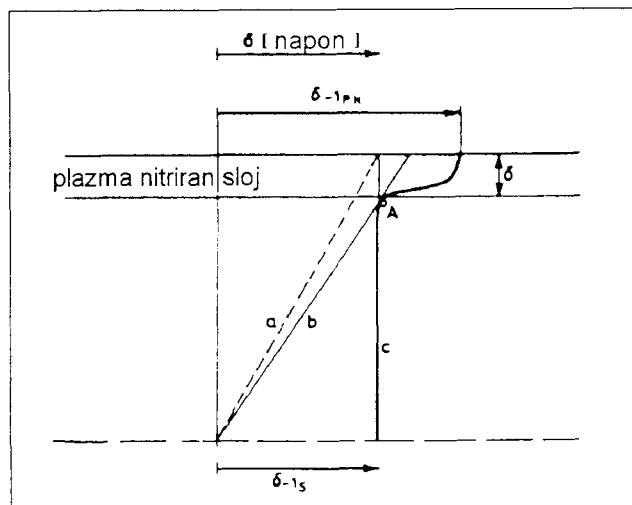
Adhezija podloge i prevlake određena je scratch-test metodom. Normalna sila preko dijamantske glave deluje na prevlaku i povećava se kontinualno, dok se istovremeno postolje sa uzorkom kreće konstantnom brzinom u ravni normalnoj na pravac normalne sile. Kao mera adhezije uzima se kritično opterećenje, odnosno normalna sila pri kojoj dolazi do pucanja prevlake.

Sa slike 3 se može videti da pri primeni dupleks postupka dolazi do povećanja adhezije između prevlake i podloge u odnosu na obradu bez prethodnog plazma nitriranja. Ovo povećanje je naročito izraženo kod čelika za topli rad Č.4751.



Slika 3. Kritično opterećenje mereno na uzorcima od različitih materijala obradenim na različite načine

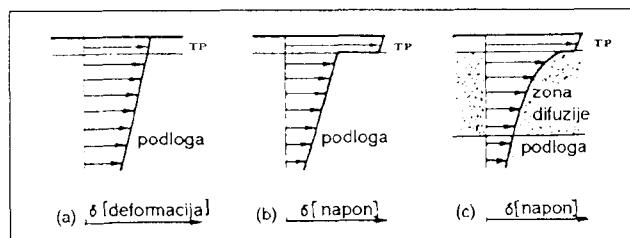
Povećanje granice zamora osnovnog materijala usled formiranja zone difuzije ilustrovano je na slici 4. Očigledno je da se povećanjem debljine nitriranog sloja poboljšava otpornost na zamor nitrirane komponente pri dejstvu naizmeničnog tangencijalnog naprezanja, pošto se kritično naprezanje ne javlja na samoj površini, već na dubini ispod površine materijala koja odgovara debljini nitriranog sloja (tačka A). Povećanje spoljašnje sile kojom se ne prekoračuje kritično naprezanje u tački A, direktno je srazmerno debljini plazma nitriranog sloja



Slika 4. Granica zamora plazma nitriranog sloja σ_{-IPN} i osnovnog materijala σ_{IS}

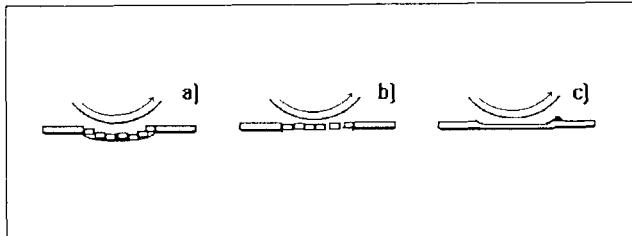
Na slici 5 data je raspodela deformacija u površini pri dejstvu tangencijalne sile i odgovarajuća raspodela napona na poprečnom preseku na uzorcima sa i bez prethodnog nitriranja. Pri deformaciji usled smicanja površinskog sloja, različite vrednosti Young-ovog modula prevlake i osnovnog materijala dovode do diskontinuiteta u raspodeli napona σ koji se smanjuje pri prethodnom nitriranju podloge [3].

Dupleks površinska obrada postupcima difuzije i depozicije kombinuje povećanu nosivost podloge, povećanu otpornost na zamor i povećanu adheziju prevlake i podloge, tako da je ukupna otpornost na habanje ovakvog uzorka određena otpornošću na habanje same prevlake.



Slika 5. Raspodela relativne deformacije (a); raspodela napona na poprečnom preseku uzorka sa prevlakom (b) i prevlakom na plazma nitriranom sloju (c)

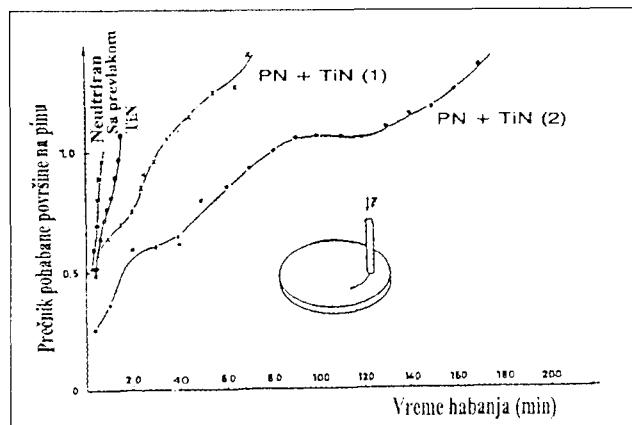
Promena mehanizma habanja usled primene dupleks postupka prikazana je na slici 6 za slučaj testa točak na ravnoj površini.



Slika 6. Destrukcija prevlake: a) meka podloga
b) podloga srednje tvrdoće; c) tvrda podloga i dobra adhezija

Na mekoj podlozi dolazi do pucanja prevlake i utiskivanja njenih delića u podlogu koja se, pri tome, razara. Na srednje tvrdoj podlozi pucanje prevlake nije intenzivno a delići se ne utiskuju u osnovni materijal. Na tvrdoj podlozi, uz dovoljno visoku adheziju, dolazi do kontinualnog habanja prevlake.

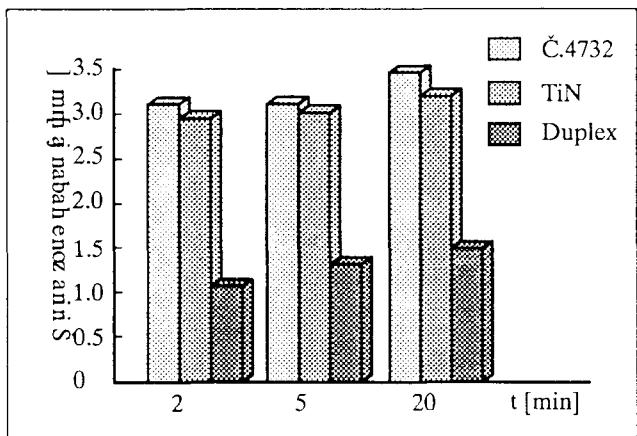
Na slici 7 prikazani su rezultati ispitivanja otpornosti na habanje kompozitne strukture, obavljenog pomoću pin-on-disc testa. Dupleks tehnologija primenjena je za površinsku obradu epruveta-pinova od Č.7680, koji su ispitivani u paru sa diskom od čelika za cementaciju tvrdoće 60HRc.



Slika 7. Intenzitet habanja pinova: neobradenog u plazmi, obradenog depozicijom TiN i obradenih dupleks metodom

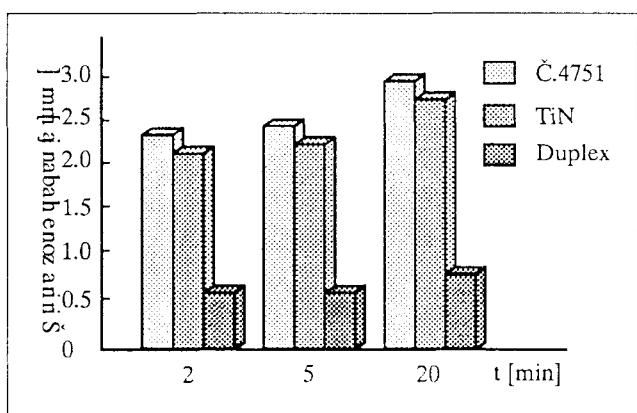
Pri relativnoj brzini klizanja od 2 m/s bez podmazivanja, habanje je računato prema promeni srednjeg prečnika habanja kalote na vrhu pina. Vidljiva je superiornost kompozitnog sloja u odnosu na TiN prevlaku deponovanu bez prethodnog nitriranja.

Uzorci sa ravnim površinom obrađeni, kako dupleks postupkom tako i samo depozicijom TiN, ispitivani su na Amsler uređaju sa rotirajućim diskom od čelika za cementaciju tvrdoće 60HRc [4]. Korišćena je metoda, koja rezultate habanja prikazuje na osnovu merenja karakterističnih dimenzija zone habanja. Ova metoda, razvijena na Institutu za proizvodno mašinstvo u Novom Sadu,



Slika 8. Zavisnost širine zone habanja od vremena za podlogu Č.4732

omogućava i dobijanje podataka o promeni morfologije odnosno mehanizma habanja, kako na samom početku, tako i nakon napredovanja zone habanja u slojeve ispod prevlaka. Rezultati ispitivanja uzorka od Č.4732 i Č.4751, obrađenih samo depozicijom i dupleks postupkom, dati su na slikama 8 i 9. Brzina klizanja je bila konstantna - 56,5m/min, pri kontaktnom opterećenju od 50N.



Slika 9. Zavisnost širine zone habanja od vremena za podlogu Č.4751

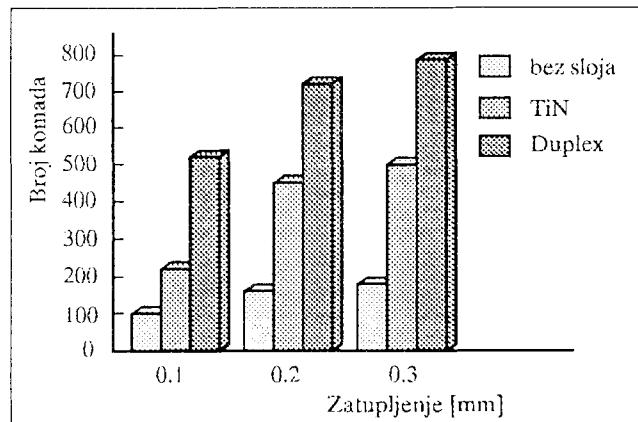
Promena širine pojasa habanja u fiji vremena habanja bitno zavisi od vrste površinskog sloja materijala pina. TiN prevlaka na oba materijala jedva da pokazuje nešto bolju otpornost na habanje od neprevučenog uzorka, što je naročito vidljivo kod Č.4732. To se može objasniti uticajem niske tvrdoće osnove (tabela 1) i relativno slabom adhezijom (slika 4). Kompozitni sloj, dobijen depozicijom TiN na plazma nitriranu podlogu, pokazuje jasno superiornu otpornost na habanje u svim prikazanim slučajevima. Ovaj efekat je izraženiji na uzorcima od Č.4751, što se može povezati sa znatnim povećanjem površinske tvrdoće i adhezije TiN sloja pri dupleks postupku.

Pored navedenih ispitivanja vršena su i eksploraciona ispitivanja odvalnih glodalaca, kako onih sa TiN prevlakom, tako i onih obrađenih dupleks postupkom, u pogonu IMT-a za proizvodnju traktorskih delova, na liniji za ozubljenje žlebastih vratila. Ispitivano je odvalno glodalo 375 909 na glodalicama SH 200, pri obradi glavnog vratila menjača od Č.4721. Pri svim ispitivanjima brzina rezanja je bila 60m/min, horizontalni posmak 0.622mm/obrtaj, vertikalni posmak 2.42mm/obrtaj i pomeranje 2.62mm.

Sa slike 10 se može videti da su odvalna glodala obrađena dupleks postupkom pokazala superiornu postojanost, kako u odnosu na glodala bez prevlake, tako i u odnosu na glodala koja su imala samo TiN prevlaku.

4. ZAKLJUČAK

Rezultati merenja površinske tvrdoće i adhezije sloja, kao i testovi habanja jasno ilustruju uticaj strukture površinskog sloja materijala na raspodelu napona i mehanizme habanja u površinskom sloju, prikazane na slikama 4,5 i 6. Vidi se da način depozicije prevlake, njen sastav i tvrdoća, kao i vrsta podloge na koju se nanosi, veoma utiču na pojave habanja kod čelika. Slojevi naneseni dupleks tehnologijom pokazali su u svim slučajevima znatno povećanje površinske tvrdoće i adhezije prevlake, uz značajno poboljšanje triboloških karakteristika. Iz ovoga se može izvući zaključak da je jedan od puteva za povećanje otpornosti na habanje nanošenje kompozitnih struktura koje se sastoje od difuzione zone dobijene plazma nitriranjem i tvrde prevlake, kao što je TiN. Unutrašni difuzioni sloj smanjuje intenzitet lokalne plastične deformacije zahvaljujući povećanoj otpornosti na opterećenje, dok tvrda prevlaka smanjuje trenje i adhezivno odnošenje materijala sa površine.



Slika 10. Histogramski prikaz postojanosti odvalnih glodalaca obrađenih različitim postupcima

LITERATURA

- [1.] Holmberg, K. and Matthews, A., **Coating Tribology**, Elsevier, 1994
- [2.] Zlatanović, M., **Deposition of (TiAl)N Coatings on PlasmaNitrided Steel**, Surf & Coat. Technol. 48(1991), pp.19-24
- [3.] Zlatanović, M. i Kakaš, D., **Plazma depozicija zaštитnih prevlaka**, Nauka, Beograd, 1994
- [4.] Zlatanović, M. i Kakaš, D., Mažibrada, Lj., Kunosić, A. and Munz, W. D., **Influence of Plasma Nitriding on Wear Performance Of TiN Coating**, Surf. & Coat. Technol. 64(1994), pp.173-181

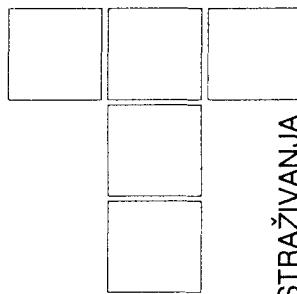
Tribology of Double Layer - Coating/Diffusion Zone

In this paper were studied the tribological characteristics of the TiN coating obtained by the duplex procedure. The properties of layers obtained by the TiN coating deposition were compared on samples made of different materials with and without prior plasma nitriding at the low pressure. Characterization of coatings was done by measurement of the surface micro hardness, adhesion and coating thickness, as well as by measurement of wear on the pin - on - disc test and Amsler device. The exploitational tests were also done of the layers deposited on the back milling tools.

Key words: Hard coating, TiN, duplex procedure.

Трибология двойного слоя - покрытие/диффузионная зона

Авторами работы проведены исследования трибологических свойств TiN покрытия, нанесенного двойным способом. При этом сравнивались свойства слоев, полученных "накалением" TiN покрытий на образцах из различных материалов, при предварительном лазменном нитрировании на низком давлении. Свойства покрытий определялись измерением поверхности микротвердости, адгезии и толщины вместе с наблюдением за изнашиванием, использованием пин-он-диск метода и Амслер установки. Проведены также и эксплуатационные исследования слоев, нанесенных на червячные фрезы.



**Ž. ŽIVKOVIĆ, M. ĐURĐANOVIĆ, D. STAMENKOVIĆ,
S. JOVANOVIĆ**

Koeficijent prionljivosti kod uzdužno presovanih sklopova

ISTRAŽIVANJA

Poznato je da moć nošenja i pouzdanost presovanih sklopova zavise od velikog broja parametara kao što su: priroda i svojstva materijala elemenata koji se spajaju, vrsta i kvalitet obrade kontaktnih površina, način formiranja spoja, vrsta i svojstva maziva, karakteristika opterećenja, itd. Vrednost koeficijenta prionljivosti direktno utiče na veličinu sile otpora razdvajanja presovanog sklopa. U ovom radu su izložene preporuke nekih autora za izbor koeficijenta prionljivosti koje se mogu koristiti u proračunu nosivosti presovanih sklopova. Vrednost koeficijenta prionljivosti se može višestruko uvećati nanošenjem specijalnih prevlaka na kontaktne površine elemenata sklopa.

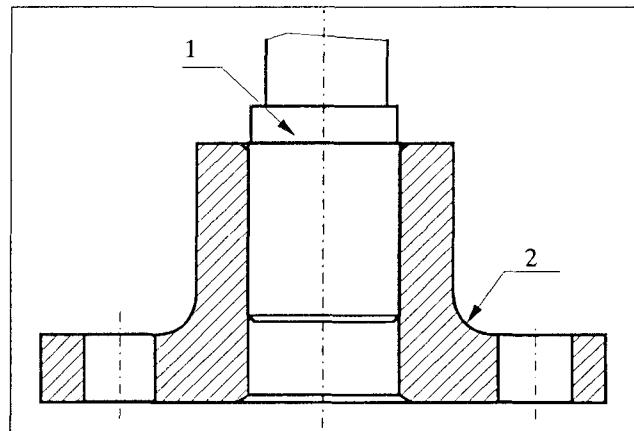
Eksperimentalno istraživanje izvedeno na Mašinskom fakultetu u Nišu imalo je za cilj da ispita uticaj maziva na moć nošenja presovanog sklopa. U eksperimentu su korišćena sledeća maziva: loj, MoS_2 i Loctite Wheel Mount. Jedan deo uzorka je upresavan bez podmazivanja. Na osnovu ispitivanja velikog broja uzoraka utvrđene su vrednosti koeficijenta prionljivosti pri upresavanju, aksijalnom ispresavanju i pri uvijanju uz korišćenje različitih maziva. Pored toga, utvrđene su vrednosti koeficijenta prionljivosti ostvarene u ponovljrenom upresavanju i ispresavanju. Na osnovu dobijenih rezultata može se generalno zaključiti da je uticaj maziva, na nosivost presovanog sklopa, veoma veliki. U slučaju izabranog modela, od svih korišćenih maziva kao najpouzdanoće se pokazalo Loctite Wheel Mount. Zaključeno je da je pri projektovanju odgovornih uzdužno presovanih sklopova neophodno uzeti u obzir i rezultate eksperimentalne provere za konkretni slučaj.

Ključne reči: Presovan sklop, koeficijent prionljivosti, opterećenje, podmazivanje, kontaktna površina.

1. UVOD

Osnovna funkcija presovanih sklopova je prenošenje opterećenja i oni su, zbog izuzetno široke primene, predmet razmatranja u mnogim radovima [1-8]. S druge strane, i teorijske analize i eksperimentalna istraživanja svedoče o veoma velikoj složenosti ove problematike jer dobijanje kvalitetnog presovanog sklopa zavisi od brojnih parametara koji su i međusobno funkcionalno povezani. Eksperimentalno istraživanje uzdužno presovanog sklopa, koji je šematski prikazan na slici 1, sprovedeno na Mašinskom fakultetu u Nišu, imalo je za cilj ispitivanje uticaja brzine presovanja, podmazivanja, kvaliteta obrade dodirnih površina i razdvajanja odnosno ponovnog spajanja sklopa na njegovu moć nošenja kao najvažniju karakteristiku. U ovom radu, međutim, biće analiziran uticaj razdvajanja i ponovnog spajanja elemenata presovanog sklopa na moć nošenja samo sa aspekta korišćenog maziva.

Dr. Života Živković, red. prof
Dr. Miroslav Đurđanović, docent
Mr. Slobodan Jovanović, asistent
Mašinski fakultet Univerziteta u Nišu
Mr. Dušan Stamenković,
MIN H.C. DD "Lokomotiva", Niš



Slika 1. Presovani sklop, 1-vratilo, 2-čaura

Ovaj aspekt problema ima poseban značaj u Mašinskoj industriji u Nišu gde se vrši remont šinskih vozila u okviru koga je značajan uticaj razdvajanja i ponovnog spajanja presovanog sklopa točka lokomotive i njegove pogonske osovine, na moć nošenja. Moć nošenja tog presovanog sklopa direktno utiče na bezbednost u železničkom transportu, pa je zato ovom problemu posvećena posebna pažnja.

2. OPŠTA RAZMATRANJA

Sposobnost presovanog sklopa da prenosi određeno opterećenje, to jest njegova moć nošenja, ogleda se s jedne strane u sigurnosti od proklizavanja, a sa druge strane u radnoj čvrstoći sastavnih elemenata. Stvarna moć nošenja, međutim, može se utvrditi jedino opterećivanjem sklopa do razdvajanja njegovih elemenata i ona se razlikuje od moći nošenja koja se određuje teorijskim putem - proračunom. Razlika nastaje, pre svega, zbog nesigurnosti u utvrđivanju veličine stvarnog preklopa spoja, u izračunavanju dodirnog pritiska i izboru koeficijenta trenja, tj. koeficijenta prionljivosti. S druge strane, stvarna moć nošenja presovanog sklopa u takozvanom radnom stanju, odnosno u realnim uslovima, razlikuje se od moći nošenja koju sklop ima odmah nakon formiranja. Šta više, ona se menja tokom vremena i najčešće opada zbog delovanja različitih faktora koji se javljaju u eksploraciji kao što su centrifugalne sile, neuravnotežene mase, toplotni uticaji, udari, naknadne deformacije i tako dalje.

Nosivost, pouzdanost i vek trajanja presovanog sklopa zavise, osim od navedenih, i od mnogih drugih parametara koji direktno ili indirektno utiču na njegove karakteristike. Tako, sigurnost spoja zavisi od geometrijskih faktora, odnosno od oblika i dimenzija elemenata, zatim od veličine preklopa i kvaliteta obrade kontaktnih površina, od uslova spajanja u koje spadaju brzina presovanja, vrsta i svojstva maziva, temperatura formiranja spoja i tako dalje.

Postupak proračuna uzdužno i poprečno presovanih sklopova u elastičnom i elasto-plastičnom deformacionom stanju poznat je u literaturi [2, 3, 4]. Kod takvog proračuna se polazi od modela mehanički čvrstog tela i, uz predpostavku o idealnom obliku elemenata sklopa i tačno određenim svojstvima materijala, izračunava se vrednost kontaktnog pritiska koji će se javiti pri koničnom formiranju sklopa. Pri tome se uobičajeno smatra da, ukoliko je veći preklop u spoju, veći je i dodirni pritisak a time i moć nošenja sklopa. Što se tiče koeficijenta prionljivosti, njegova vrednost se može izračunavati, ali se u praksi zbog sigurnosti, ona ipak usvaja na osnovu preporuka iz standarda koji tretiraju ovu problematiku, iako se te vrednosti kreću u veoma širokim granicama.

U cilju utvrđivanja adekvatnog postupka proračuna, radi dobijanja što kvalitetnijeg presovanog sklopa, vršena su brojna teorijska i eksperimentalna istraživanja. Tako je Grupa za mašinske konstrukcije na Tehničkom univerzitetu u Berlinu sprovedla obimna eksperimentalna ispitivanja poprečno presovanih sklopova analizirajući ponašanje koeficijenta prionljivosti pri razdvajanju spojeva statičkim opterećenjem aksijalnom silom i obrtnim momentom sa i bez preopterećenja savijanjem i promenljivom torzijom, a takođe i trajnu čvrstoću pri promenljivo

vom savijanju i torziji [7]. Utvrđeno je da se povećanje koeficijenta prionljivosti, a time i moći nošenja sklopa, može ostvariti adekvatnim postupcima obrade dodirnih površina elemenata koji se spajaju ili pak nanošenjem prevlaka od hroma, nikla, bakra i sličnog materijala. Ako se, međutim, pre spajanja elemenata na njihovu dodirnu površinu nanesu čestice od tvrdog materijala (kao što su na primer silicijumkarbid, borkarbid, dijamant), koeficijent prionljivosti se može povećati i do četri puta [8]. Takođe je eksperimentalnim istraživanjima utvrđeno da je prognoza nosivosti uzdužno presovanih sklopova tačnija ako se vrši na osnovu ostvarene sile presovanja nego samo na osnovu proračuna i bez eksperimentalne podrške [9]. U svakom slučaju, može se zaključiti da su mogućnosti proračuna presovanih sklopova ograničene pre svega nivoom saznanja o koeficijentu prionljivosti pa je zbog toga, pri njihovoj realizaciji neophodno uključiti i eksperimentalna istraživanja.

3. KOEFICIJENT PRIONLJIVOSTI

Maksimalno dozvoljeno opterećenje, koje može da prenese presovani sklop, ograničeno je veličinom sile trenja koja nastaje na dodirnoj površini spojenih elemenata. Proračun presovanih sklopova upravo se zasniva na određivanju vrednosti koeficijenta trenja između kontaktnih površina, odnosno vrednosti koeficijenta prionljivosti. Koeficijent prionljivosti predstavlja parametar koji direktno utiče na veličinu sile otpora razdvajanja sklopa tj. njegovu nosivost. On, kao koeficijent trenja između elemenata sklopa, zavisi od velikog broja činilaca, kao što su priroda i svojstva materijala elemenata koji se spajaju, od vrste i kvaliteta obrade kontaktnih površina, zatim od načina formiranja spoja i karakteristike opterećenja, od podmazivanja i svojstva maziva koje se koristi, itd.

Koeficijent prionljivosti kod presovanih sklopova osnovi simetričnih cilindričnih delova, kao bezdimenzionalna veličina može se izračunati prema izrazu:

$$\mu = \frac{F}{p \cdot \pi \cdot D \cdot l} \quad (1)$$

gde su: F - sila upresavanja ili ispresavanja,
 p - dodirni pritisak na kontaktu elemenata,
 $\pi \cdot D \cdot l$ - dodirna površina

Određivanje koeficijenta prionljivosti u praksi se izvodi tako što se eksperimentalno meri sila upresavanja, razdvajanja i klizanja, a zatim se koeficijent prionljivosti računava prema izrazu (1). Početna aksijalna sila pri ispresavanju, to jest početna tangencijalna sila pri zakretanju, ne može biti merilo za moć nošenja sklopa pošto su, u realnim uslovima, sile kojima su izloženi elementi mašina gotovo uvek promenljivog karaktera i one mogu izazvati razdvajanje elemenata kada njihova vrednost dostigne veličinu sile klizanja. Iz tog razloga se smatra da

je sila klizanja istovremeno i moć nošenja sklopa [4]. To znači da mora da bude ispunjen uslov:

$$F_x \leq F_{ka} \quad (2)$$

odnosno

$$F_t = 2M_t/D \leq F_{kt} \quad (3)$$

gde je: F_x - radna aksijalna sila kojoj je izložen presovani sklop,

F_{ka} - aksijalna sila klizanja pri ispresavanju,

F_t - radna tangencijalna sila,

M_t - radni obrtni moment koji opterećuje presovani sklop u eksploraciji,

F_{kt} - tangencijalna sila klizanja pri uvijanju.

Za formiranje uzdužnog presovanog sklopa potrebno je obezbediti uzdužnu silu kojom će biti savladani otpori koji se javljaju na kontaktu elemenata koji se upresavaju. Otpor, koji se javlja u toku upresavanja unutrašnjeg u otvor spoljašnjeg elementa, stalno raste sa dužinom pređenog puta jer raste i vrednost površine kontakta, a menja se i vrednost koeficijenta trenja pri upresavanju μ_p .

Prilikom razdvajanja sklopova (pri ispresavanju) pod dejstvom aksijalne sile, najveći otpor protiv klizanja, to jest najveća sila trenja, nastaje u početnom trenutku razdvajanja. Koeficijent trenja u tom trenutku je statički koeficijent prionljivosti μ_{ra} , a u slučaju da na sklop deluje obrtni moment, biće to statički koeficijent prionljivosti u tangencijalnom pravcu μ_r . Posle početnog razdvajanja elemenata, nastupa klizanje između njih i ono traje do konačnog razdvajanja a koeficijent trenja u tom intervalu je μ_{ka} - za slučaj dejstva aksijalne sile i μ_{kt} - za slučaj dejstva obrtnog momenta (tangencijalne sile). Vrednosti ova dva koeficijenta trenja imaju kinematički karakter i manji su od analognih statičkih veličina.

Razdvajanjem aksijalno presovanih sklopova, eksperimentalno su dobijene vrednosti koeficijenta prionljivosti

pri razdvajaju μ_r u veoma širokim granicama $\mu_r = 0.05-0.30$ [4], dok kod poprečno presovanih sklopova njegova vrednost može biti i veća. Kada se prilikom upresavanja upotrebi prah od kaborunduma, može se ostvariti čak i $\mu_r > 0.6$. Pored toga, na osnovu eksperimentalnih istraživanja, autori zaključuju da je koeficijent prionljivosti u tangencijalnom pravcu veći nego u aksijalnom, odnosno $\mu_t > \mu_a$.

Uticaj dodirnog pritiska na koeficijent prionljivosti je ispitivan u okviru eksperimenta gde su presovani skloovi naprezani elastično i elasto-plastično. Koeficijent prionljivosti je ispitana kod sile upresavanja pri uzdužnom presovanju, kod sile razdvajanja i klizanja [5]. Pored uzdužno presovanih, razmatrani su i poprečno presovani skloovi, a rezultati ispitivanja su prikazani u obliku dijagrama na slici 2.

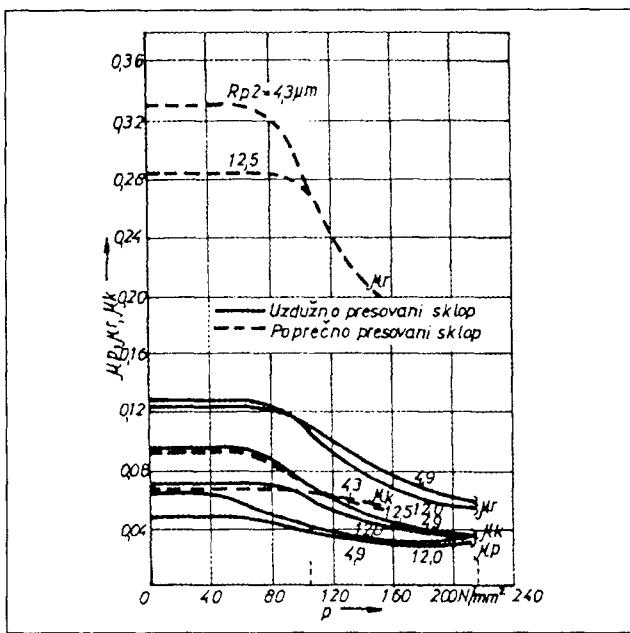
U fazi konstruisanja presovanih sklopova vrednost koeficijenta prionljivosti može se uzeti iz preporuka koji se daju u standardima i udžbenicima. Ove empirijske vrednosti ustanovljene su za određene vrste materijala unutrašnjeg i spoljašnjeg elementa, za vrstu mazivnog sredstva i za način spajanja. U tabeli 1. date su vrednosti koeficijenta prionljivosti kod uzdužno presovanih sklopova po Klingelnberg-u [2].

Tabela 1. Koeficijent prionljivosti kod uzdužno presovanih sklopova

Unutrašnji deo	Č0545		
	Č0545	SL	Mg-Al
Spoljašnji deo			
Sredstvo za podmazivanje	Mašinsko ulje	Mašinsko ulje	Suvo
μ_{ra}, μ_r	0.08-0.25	0.09-0.17	0.03-0.09
μ_{ka}, μ_{kt}	0.04-0.17	0.07-0.12	0.02-0.06
μ_p	0.05-0.22	0.07-0.13	0.02-0.08

Tabela 2. Srednje vrednosti koeficijenta prionljivosti pri ispresavanju

Prečnik [mm]	Dužina [mm]	Srednji preklop [mm]	Materijal		Dodirni pritisak [dan/cm ²]	Spajanje izvršeno			
			Čaura	Vratilo		Presom podmazivano mašinskim uljem	Presom bez podmazivanja	Zagrevanjem bez podmazivanja	Hlađenjem bez podmazivanja
140 100	80	0.07-0.08 0.09-0.11	Сталь 30 HB 174	Сталь 40 HB174	-	0.15 0.15	-	0.34 0.32	0.37 0.28
40	50	0.027-0.033	Сталь 40 HB192	Bronza HB138	329	0.11	-	-	0.27
50	60	0.025-0.035	Сталь 50	Сталь 50	383	0.18	-	-	0.35
Sa prevlakom μ_m									
			Zn, h=15 Cd, h=15 Ni, h=10 Cr, h=10		388 389 391 384	- - - -	0.53 0.43 0.73 0.82	- - - -	0.69 0.50 0.51 0.45



Slika 2. Koeficijent prionljivosti za upresavanje, za razdvajanje i za klizanje u zavisnosti od dodirnog pritiska u spoju kod uzdužno i poprečno presovanih sklopova [5]

U tabeli 2 date su srednje vrednosti koeficijenta prionljivosti pri ispresavanju, pri čemu su dodirne površine uzoraka obrađene sa hrapavošću $R_a = 0.63$ do $1.25 \mu\text{m}$ [1].

U svakom slučaju, ove vrednosti koeficijenta prionljivosti za presovane sklopove su orientacione i kao takve one mogu poslužiti za sprovođenje proračuna, ali za sklopove koji su odgovorniji i gde se traže tačnije, pouzdanije vrednosti, neophodno je da se eksperimentalno utvrdi vrednost koeficijenta prionljivosti uzimajući u obzir specifičnosti konkretnog spoja kao što su materijal elemenata, način spajanja, mazivno sredstvo i dr..

4. POSTUPCI ZA POVEĆANJE KOEFICIJENTA PRIONLJIVOSTI

Povećana sposobnost prenošenja opterećenja kao osnovni zahtev kod presovanih sklopova može se, u principu, postići na dva načina: povećanjem preklopa i povećanjem koeficijenta prionljivosti. Povećanje preklopa je, međutim, ograničeno čvrstoćom materijala sastavnih delova i u tom pogledu su mogućnosti sasvim ograničene ali koeficijent prionljivosti može da se poveća izborom materijala za elemente sklopa, otvrđnjavanjem dodirnih površina određenim termičkim postupcima i njihovim kvalitetom obrade.

Međutim, bitno povećanje koeficijenta prionljivosti može se postići nanošenjem specijalnih prevlaka na kontaktne površine elemenata. Kao veoma efikasno sredstvo za povećanje čvrstoće presovanog sklopa često se koriste galvanske prevlake (hrom, nikl, bakar), dok se kod presovanih sklopova sa fosfatiziranim dodirnim površinama ostvaruje i dvostruko veći

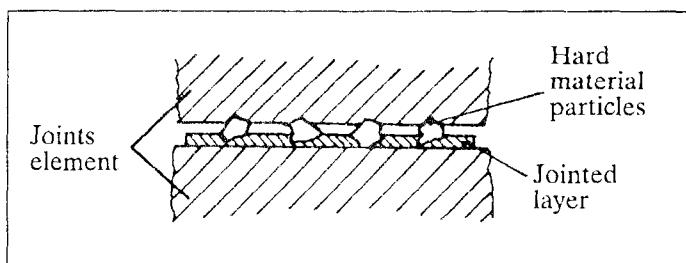
koeficijent prionljivosti. Pored toga, prevlake na bazi fosfora osiguravaju spoj protiv korozije kao posledice lokalnog klizanja i eliminišući je, pogoduju dinamički napregnutim sklopovima. Presovani sklopovi sa metaliziranim kontaktним površinama obezbeđuju jaču vezu sastavnih elemenata zbog visoke sklonosti takve prevlake prema formiranju adhezije veze. U tom smislu prikladni materijali za spajanje su čelik-cink, čelik-bakar, čelik-nikl, bakar-cink, bakar-bakar. Ovakvi sklopovi, međutim, nisu podesni za ponovno sastavljanje nakon rastavljanja.

Presovani sklopovi sa prevlakom od lepljivog materijala su danas u širokoj primeni. Kombinacija presovanja i lepljenja je posebno pogodna za poprečno presovane sklopove. U poređenju sa lepljenim spojevima i čisto presovanim sklopovima, lepljeni presovani sklopovi pokazuju veću čvrstoću spoja odnosno sposobnost prenošenja opterećenja.

Povećanje čvrstoće presovanih sklopova tj. povećanje koeficijenta prionljivosti, može se ostvariti čišćenjem dodirnih površina od različitih kontaminanata pri čemu su termički i ultrazvučni postupci čišćenja efikasniji od hemijskih. Višestruko uvećanje koeficijenta prionljivosti može se ostvariti nanosenjem sitnih čestica od tvrdog materijala [8]. Pri tome se, najpre se na dodirnu površinu unutrašnjeg ili spoljašnjeg elementa nanese sloj od nikla debljine nekoliko μm . Ovaj film nikla mora da bude precizno ujednačene debljine što se najbolje ostvaruje elektrohemimskim postupkom. Zatim se na taj sloj nikla nanesu čestice tvrdog materijala (silicijumkarbid, borkarbid, dijamant) u granulaciji ne većoj od $12 \mu\text{m}$ tako da one jednim delom budu uronjene u sloj nikla kao što je prikazano na slici 3.

Nakon nanošenja čestica od tvrdog materijala vrši se zagrevanje na temperaturu do 350°C čime se obezbeđuje da se te čestice čvrsto drže u sloju nikla. Na ovako pripremljenu površinu poprečnim presovanjem se dovedi drugi element presovanog sklopa pa se tako postiže čvrst spoj jer čestice tvrdog materijala zadiru u spojni element čime se ostvaruje još veća stezna sila.

U eksperimentima koji su izvedeni na ovako pripremljenim sklopovima nakon razdvajanja spojeva i izračunavanja koeficijenta prionljivosti utvrđeno je da se kod ovih spojeva ostvaruje 2 do 4 puta veći koeficijent prionljivosti [8].



Slika 3. Model spajanja dve površine pomoću stranih čestica

4. REZULTATI EKSPERIMENTALNOG ISTRAŽIVANJA

Cilj sprovedenog eksperimenta, u ovom slučaju, bio je da se utvrdi uticaj mazivnog sredstva na nosivost uzdužno presovanog sklopa i nađu povoljna tehnološka rešenja za poboljšanje njegovih karakteristika. Osim utvrđivanja geometrijskih mera uzoraka, merenja hrapavosti dodirnih površina elemenata i merenja površinske tvrdoće koja su izvedena pre eksperimenta, u toku njegovog izvođenja merene su i registrovane sledeće veličine: aksijalna sila u toku upresavanja i ispresavanja, hod elemenata u toku upresavanja i ispresavanja, vreme trajanja procesa i obrtni moment u toku uvijanja presovanog sklopa. Šematski prikaz mernog aparature dat je na slici 4.

Uzorak presovanog sklopa koji je korišćen u eksperimentu prikazan je na slici 1. Nominalni prečnik presovanog sklopa je 36 mm sa preklonom elemenata od $48\text{ do }74\text{ mm}$; dužina presovanog sklopa je 30 mm ; unutrašnji element - vratilo izrađen je od Č3130 koji je poboljšan, a za materijal spoljašnjeg elementa - čaura, izabran je Č1530. U tabeli 3. dat je hemijski sastav i mehaničke karakteristike materijala uzoraka dobijene ispitivanjem.

Kontaktne površine vratila i čaura su brušene i ostvarena je klasa hrapavosti N6. Radi ilustracije na slici 5. prikazan je tipičan izgled rezultata merenja hrapavosti na jednom

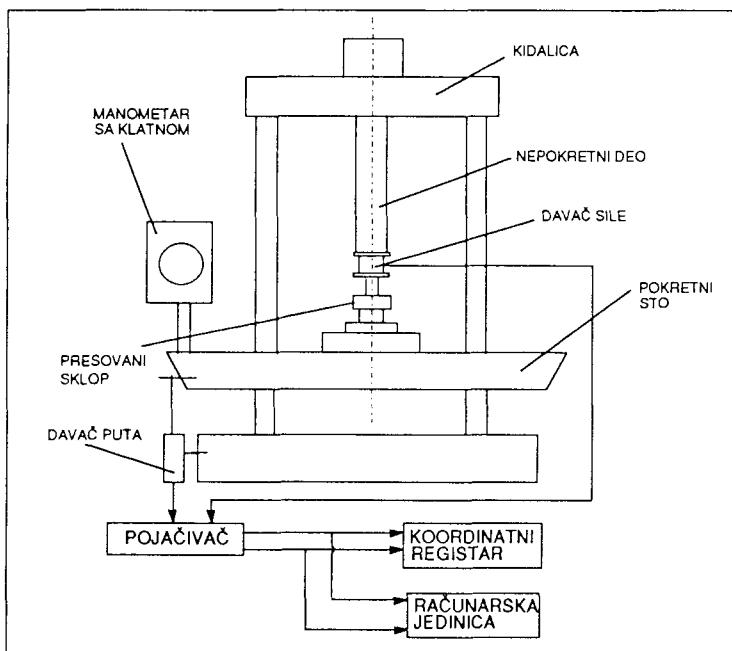
od uzoraka, na dva merna mesta. Jedna grupa uzoraka podmazivana je lojem, druga grupa molibdendisulfidom (MoS_2), treća grupa sredstvom Loctite Wheel Mount, dok je četvrta grupa uzoraka upresavana bez podmazivanja dodirnih površine tj. na suvo.

Eksperiment je izведен na Mašinskom fakultetu u Nišu. U toku realizacije eksperimenta urađeno je ukupno sto proba upresavanja, ispresavanja i uvijanja presovanih sklopova i pri tome su merene veličine aksijalne sile, hoda, obrtnog momenta kao i vremena trajanja procesa. Podaci o ovim veličinama registrovani su u vidu dijagrama na koordinatnom registratoru a takođe su registrovani i na računaru HP 310.

U tabeli 4. prikazano je 16 tipičnih dijagrama sila-hod kod prvog upresavanja (1), prvog ispresavanja (2), ponovljenog upresavanja (3) i ponovljenog ispresavanja (4), pri čemu su dijagrami koji se odnose na sklopove podmazivane lojem označeni sa a, dijagrami koji se odnose na sklopove podmazivane sa MoS_2 označeni sa b, dijagrami koji se odnose na sklopove podmazivane sa Loctite Wheel Mount označeni su sa c dok se dijagrami označeni sa d odnose na sklopove upresavane bez podmazivanja. Vrednosti sile nanešene su na ordinatama sa korakom od po 20 kN , a na apscisama veličina hoda koja kod svih proba iznosi oko 30 mm .

Kako se sa ovih dijagrama vidi, tokovi sila upresavanja i ispresavanja nisu kontinuirani u celokupnom procesu, a kod proba sa različitim sredstvima za podmazivanje oni se bitno razlikuju. Pri prvom, kao i pri ponovljenom upresavanju (dijagrami 1a-1d i 3a-3d) uočava se kontinualan, linearan porast sile upresavanja osim kod prvog upresavanja sklopova podmazivanih molibdendisulfidom gde je njena vrednost za sve vreme konstantna (1b). Pored toga, njihove vrednosti na kraju hoda pri ponovljenom upresavanju, po pravilu su veće nego pri prvom. U slučaju podmazivanja sa Loctite Wheel Mount (1c i 3c), kao i pri upresavanju bez maziva (1d i 3d), nagibi pravih su mnogo veći i završne vrednosti sila su višestruko veće u odnosu na sklopove podmazivane lojem i molibdendisulfidom.

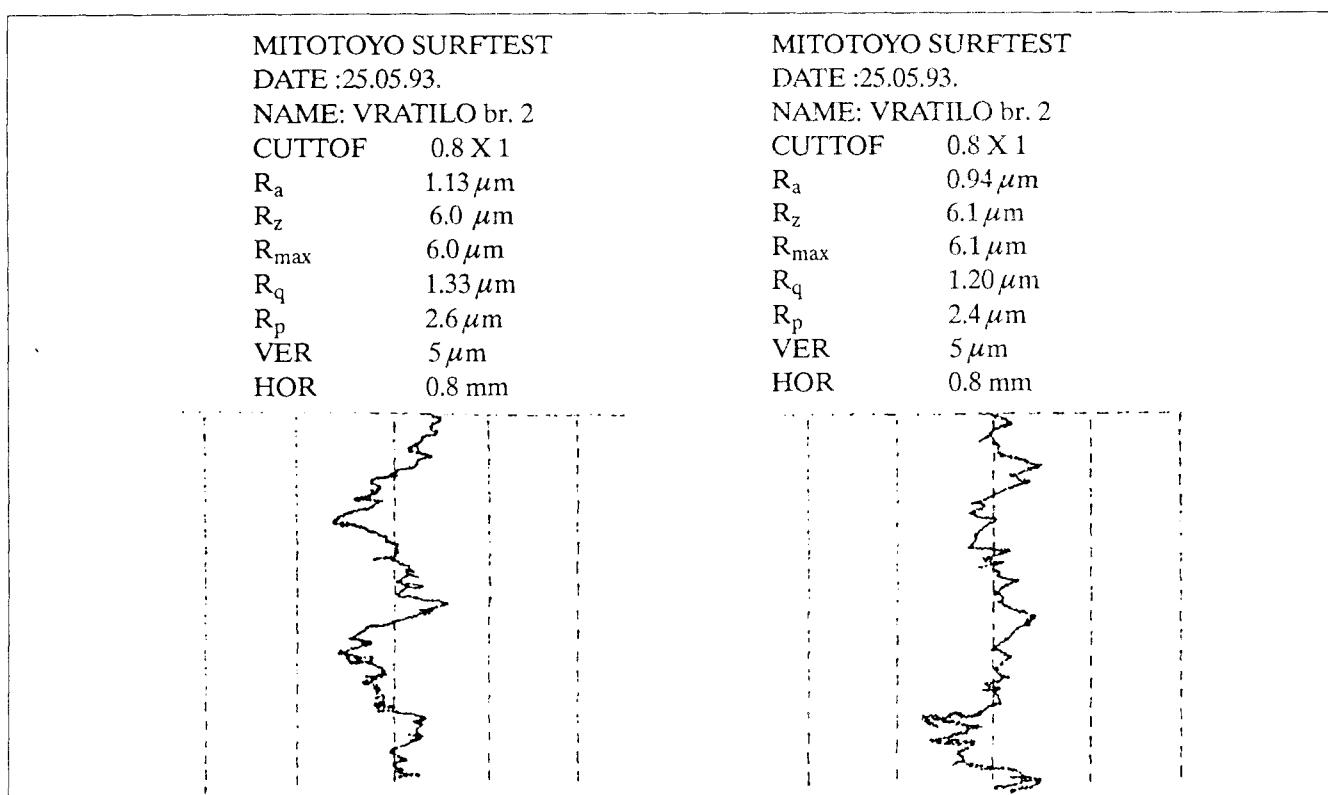
Osnovna karakteristika promene sile ispresavanja za sklopove podmazivane lojem i molibdendisulfidom (2a, 2b i 4a, 4b) jeste nagli skok na početku razdvajanja i odmah zatim nagli pad nje-



Slika 4. Šematski prikaz mernog mesta za proces upresavanja i ispresavanja

Tabela 3. Hemijski sastav i mehaničke karakteristike materijala elemenata presovanog sklopa

Element	Materijal	Hemijski sastav %				Napon tečenja Rp [N/mm ²]	Zatezna čvrstoća Rm [N/mm ²]	Izduženje A [%]	Suženje Z [%]	Tvrdoća HV
		C	Si	Mn	S					
Vratilo	Č3130	0.37	0.16	1.00	0.035	462	660	26	60	270-275
Čaura	Č1530	0.47	0.24	0.55	0.020	320	555	26	50	165-170



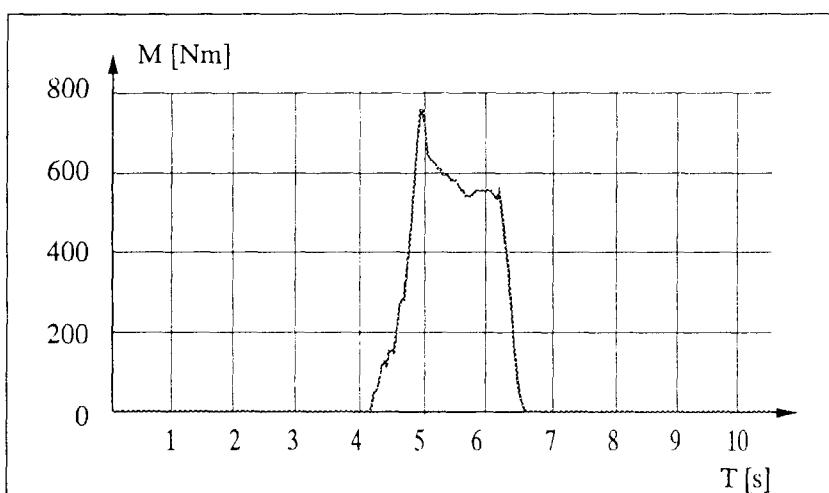
Slika 5. Hrapavost uzorka izmerena na dva merna mesta

ne vrednosti na veličinu sile klizanja. Iza toga ona skoro asimptotski teži nuli do kraja procesa. Početne vrednosti sila pri ponovljenom ispresavanju su znatno veće nego pri prvom. Kod sklopova podmazivanih sa Loctite Wheel Mount (2c i 4c), međutim, vrednosti sile razdvajanja i sile klizanja su vrlo bliske, nema naglih promena, pa u toku celog procesa ispresavanja one pravilno, gotovo linearno, opadaju. Početne vrednosti sila su u ovom slučaju mnogo veće nego kod prethodnih i skoro su iste vrednosti i kod prvog i kod ponovljenog ispresavanja.

Pri ispresavanju nepodmazivanih sklopova uočava se izrazito velika sila početnog razdvajanja i mala, ali vidljiva, razlika između nje i sile klizanja (2d i 4d). Za oba slučaja, kao i za promenu sile ponovnog upresavanja (3d), veoma

je karakteristično naglašeno oscilovanje njihovih vrednosti. To ukazuje na pojavu kratkotrajnih i učestalih lokalnih zavarenih spojeva na kontaktnim površinama usled izrazito pojačanog delovanja adhezije komponente sile trenja. Ta pojava se na uzorcima manifestovala u obliku veoma velikih, gotovo havarijskih oštećenja kontaktnih površina.

Uvijanje sklopova je izvedeno opterećivanjem vratila obrtnim momentom do njegovog zaokretanja u čauri. Tokovi dijagrama momenata uvijanja su, po obliku, vrlo slični kod svih proba bez obrira na mazivo sredstvo. Radi ilustracije na slici 6. prikazan je dijagram obrtni moment-vreme registrovan u toku uvijanja sklopa podmazivanog lojem.

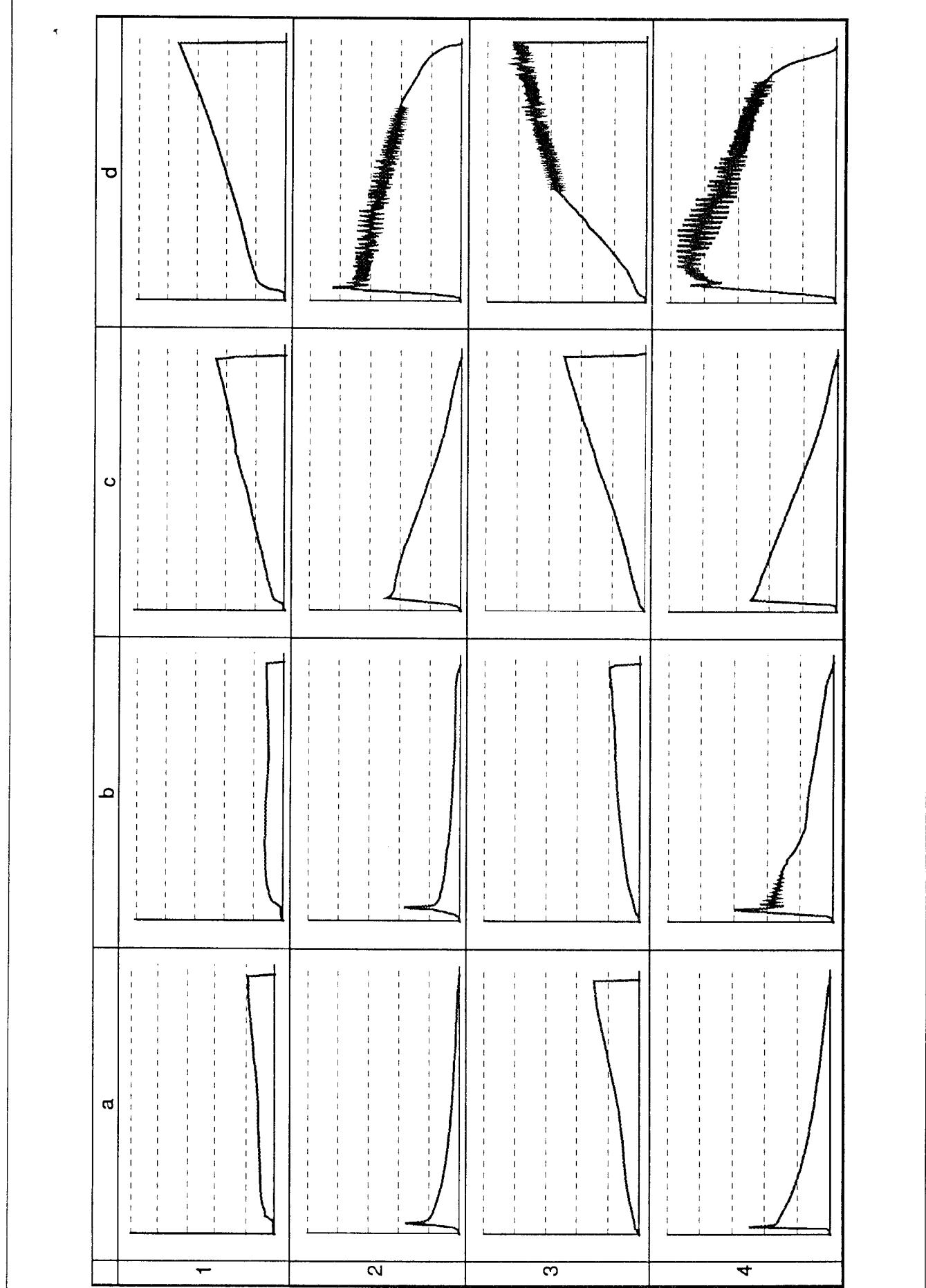


Slika 6. Tipični dijagram momenta uvijanja

Bez obzira što su veličine preklopa u velikoj meri ujednačene, vrednosti završnih sila pri presovanju i sila početnog razdvajanja pri ispresavanju imaju znatna odstupanja kod presovanih sklopova podmazivanih različitim mazivnim sredstvima. Na slici 7. dat je uporedni prikaz srednjih vrednosti završnih sila upresavanja i sila početnog razdvajanja kod sklopova podmazivanih različitim mazivnim sredstvima u slučaju prvog presovanja a na slici 8. u slučaju ponovljenog presovanja.

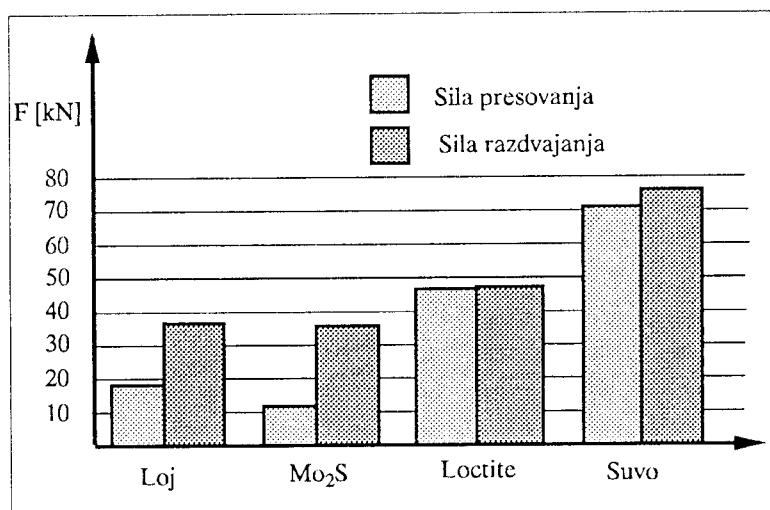
Kod presovanih sklopova koji su podmazivani lojem sile presovanja su u odnosu

Tabela 4. Tipični tokovi sila u procesu upresavanja i ispresavanja

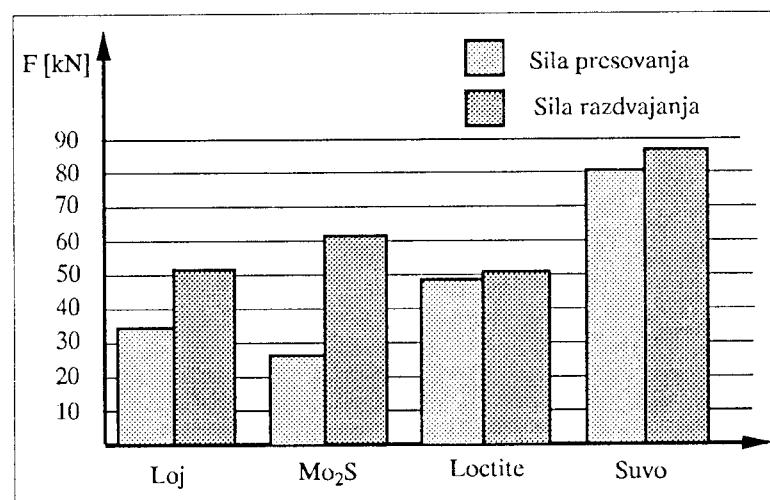


na sile razdvajanja i sile klizanja manje i taj odnos je veoma promenljiv kod različitih uzoraka. Odstupanja vrednosti sila su još izraženija kod uzoraka podmazivanih molibdendisulfidom (MoS_2). Kod ovih uzoraka se javljaju najmanje sile presovanja a sile razdvajanja su znatno veće. Ovo može da bude povoljna karakteristika molibdendisufida kao mazivnog sredstva ali postoji veliko "rasipanje" vrednosti sila pa je zato nezahvalno izvoditi zaključak i uopšteno utvrđivati odnos tih sila. Loctite Wheel Mount je mazivno sredstvo koje je pokazalo najstabilnije karakteristike u izvedenom eksperimentu. Kako se vidi sa slika 7. i 8., kod uzoraka podmazivanih sa Loctite nema velikog odstupanja u ostvarenim vrednostima sila presovanja i sila razdvajanja. Pošto su, kod ovih uzoraka, vrednosti sila klizanja bliske a često i jednake silama razdvajanja to se, u ovom slučaju, vrlo pouzdano može utvrditi nosivost sklopa na osnovu ostvarene sile presovanja.

Jedan broj presovanih sklopova je opterećivan obrtnim momentom do pojave zaokretanja vratila u čauri. Najveće vrednosti obrtnih momenata na početku zaokretanja vratila u čauri ostvarene su kod sklopova podmazivanih sa Loctite, nešto manje vrednosti su kod proba sa MoS_2 i znatno manje kod proba sa lojem. Ovo važi za uzorce koji su uvijani posle prvog upresavanja. Kod uzoraka koje su uvijani posle ponovljenog upresavanja, međutim, najveće vrednosti početnog momenta zaokretanja ostvarene su kod proba sa MoS_2 a manje kod proba sa Loctite i sa lojem. Na slici 9. prikazan je odnos srednjih vrednosti obrtnih momenata na početku zaokretanja vratila u čauri kod uvijanja posle prvog i posle ponovljenog presovanja za



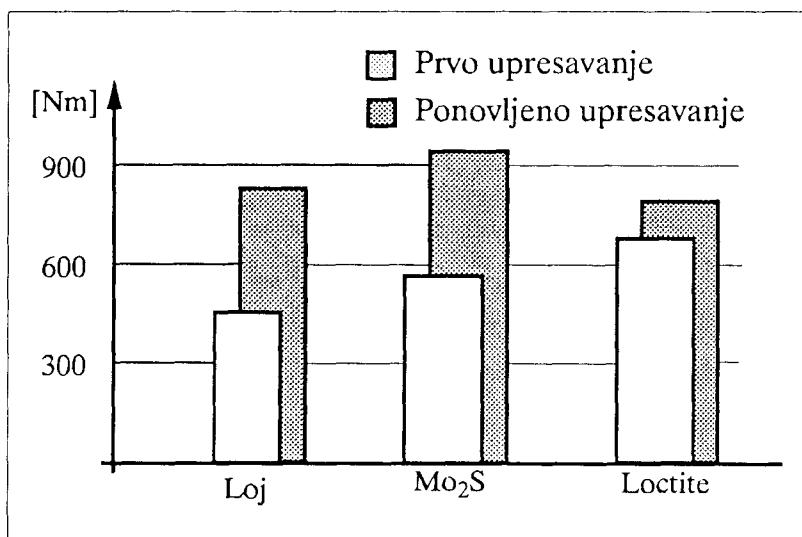
Slika 7. Odnos završnih sila upresavanja i sila razdvajanja kod presovanih sklopova podmazivanih različitim mazivnim sredstvima kod prvog presovanja



Slika 8. Odnos završnih sila upresavanja i sila razdvajanja kod presovanih sklopova podmazivanih različitim mazivnim sredstvima kod ponovljenog presovanja

Tabela 5 Vrednosti koeficijenta prionljivosti dobijene u realizovanom eksperimentu

MAZIVNO SREDSTVO					
		Loj	Mo_2S	Loctite	Suvo
Prvo presovanje	μ_p	0,038-0,051	0,022-0,040	0,082-0,138	0,160-0,255
	μ_r	0,047-0,155	0,058-0,157	0,110-0,132	0,184-0,246
	μ_k	0,036-0,090.	0,026-0,065	0,097-0,122	0,164-0,234
	μ_{rt}	0,053-0,067	0,046-0,117	0,080-0,129	-
	μ_{kt}	0,039-0,047	0,046-0,107	0,076-0,122	-
Drugo presovanje	μ_p	0,069-0,931	0,044-0,066	0,095-0,129	0,223-0,238
	μ_r	0,121-0,131	0,137-0,172	0,113-0,141	0,227-0,259
	μ_k	0,078-0,100	0,087-0,103	0,102-0,122	0,193-0,224
	μ_{rt}	0,096-0,115	0,106-0,157	0,096-0,131	-
	μ_{kt}	0,068-0,094	0,101-0,149	0,096-0,114	-



Slika 9. Odnos obrtnih momenata kod uvijanja posle prvog i posle ponovljenog upresavanja

različita mazivna sredstva. Uvijanje nije vršeno kod sklopova koji su presovani bez podmazivanja.

Izbor koeficijenta prionljivosti, u fazi konstruisanja presovanih sklopova, je presudan za proračun veličine sile, tj. momenta, koji presovani sklop može da prenese. U tabeli 5. date su vrednosti koeficijenta prionljivosti koje su dobijene u realizovanom eksperimentu sa opisanim uzorcima vratila od Č3130 i čaura od Č1530. Brzina presovanja je za podmazivane uzorke bila 30 [mm/min] i 70 [mm/min] a za uzorke bez podmazivanja 15 [mm/min]. Brzina ispresavanja za sve uzorke je bila 15 [mm/min].

5. ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata eksperimenta može se generalno zaključiti da je uticaj mazivnog sredstva na nosivost presovanih sklopova veoma veliki. Kod sklopova koji su upresavani bez podmazivanja javljaju se velike sile presovanja a pri ispresavanju još veće sile razdvajanja, pri čemu je veliki broj uzoraka imao znatna oštećenja na dodirnim površinama posle ispresavanja, pa se, upravo zbog toga, može zaključiti da u praksi treba izbegavati formiranje presovanih sklopova bez podmazivanja.

Kod presovanih sklopova podmazivanih lojem i molibdendisulfidom koeficijent prionljivost pri presovanju je znatno manji od koeficijanta prionljivosti pri razdvajaju, tj. pri klizanju. Pored toga su vrednosti koeficijenata prionljivosti čak dvostruko veće u ponovljenom presovanju nego u prvom. Ovi odnosi su, međutim, veoma promenljivi jer se javlja veliko rasipanje vrednosti, te iz

tih razloga, sa aspekta pouzdanosti, pri upotrebi ovih maziva treba biti oprezan.

Loctite Wheel Mount je mazivno sredstvo koje je pokazalo najstabilnije karakteristike. Pri korišćenju ovog sredstva nema velikog odstupanja u koeficijentima prionljivosti pri presovanju i pri razdvajaju, tj. klizanju, a takođe su vrednosti bliske kod prvog i ponovljenog presovanja. Iz tog razloga, a i na osnovu registrovane sile upresavanja, pri upotrebi Loctite Wheel Mount, sa zadovoljavajućom pouzdanošću se može prognozirati nosivost presovanog sklopa.

S obzirom na veliki broj parametara koji utiču na koeficijent prionljivosti, odnosno nosivost presovanog sklopa, i ovo istraživanje upućuje na ispravnost tvrdnje da za odgovorne presovane sklopove (velikoseansijske ili visokoopterećene) treba izvršiti eksperimentalnu proveru, odnosno, utvrđivanje koeficijenta prionljivosti spoja i time utvrditi konkretne konstruktivne i tehničke parametre koje treba dosledno poštovati u serijskoj izradi.

LITERATURA

- [1] И. В. Кра́гельски: Трение изнашивание и смазка - справочник - книга 2, Москва, Машиностроение, 1979.
- [2] Niemann, G: Maschinenelemente Band 1 2. Auflage, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York, 1975.
- [3] Krause, W.: Konstruktionselemente der Feinmechanik, VEB Verlag Technik, Berlin 1989
- [4] Vitas, D.: Osnovi mašinskih konstrukcija I, Naučna knjiga, Beograd 1989.
- [5] Haase, K.: Haftbeiwerte für einfache zylindrische Pressverbindungen, Maschinenbautechnik 27 (10) str.443-445, 1978.
- [6] Haase, K.: Übermassverluste und Haftbeiwerte bei Pressverbindungen, Maschinenbautechnik 37 (10) str.441-443, 1988.
- [7] Beitz W., Galle G., Tragfähigkeit von Querpressverbänden bei statischer und dynamischer Belastung, Konstruktion 34 (11) str.429-435, 1982.
- [8] Peeken H., Lukschandl, J., Paulick, G., Oberflächenschichten für kraftschlüssige Momentübertragung, Antriebstechnik 20 (1/2) str.39-43, 1981.
- [9] Stamenković D., Istraživanje novih metoda za utvrđivanje nosivosti presovanog sklopa, Magistarski rad, Mašinski fakultet Niš, 1993.

Coefficient of Friction in The Force Fit Assemblies

It is well known that the strength and reliability of the force fit assemblies depend on a number of parameters, such as: the nature and material properties of the parts being joined, the type and quality of contact surfaces finish, mode of parts joining, types and properties of lubricant, loading, etc. The coefficient of friction directly influences the reactive forces during the force fit assembly detaching. This paper presents several authors' recommendations referring to the selection of the coefficient of friction which could be used in force fit strength calculations. The coefficient of friction value could be multiplied several times by applying special coatings on to the contact surfaces of the parts being joined together.

The experimental researches carried out at the Mechanical Engineering Faculty in Niš were intended to examine the lubricant influence on the force fit strength. During the experiments the following lubricants were used: suet, MoS₂ and Loctite Wheel Mount. A number of samples were pressed-in without lubricant application. Examining a large number of samples applying different types of lubricant it was possible to establish the coefficient of friction occurring during the operation of pressing-in, pressing-out and twisting. Besides, the coefficient of friction in repeated pressing-in and pressing-out operations were established. On the grounds of the results obtained, it could be concluded generally that the lubricant influence on the force fit strength is great. In case of the chosen model it is shown that the most reliable lubricant among those used was Loctite Wheel Mount. It is concluded that it is necessary to take into account the results obtained by experimental testing of the given assembly in the force fit designing phase.

Коэффициент прилипания у продольно штампемых узлов

Известно, что несущая способность и надёжность узлов, получаемых штамповкой, определяется многими параметрами каковы например, сорт и свойства соединяемых материалов, вид и качество обработки конишактирующих поверхностей, способ формирования соединения, вид и свойства смазки, характеристики нагрузки и тд. Значение коэффициента прилипания оказывает прямое воздействие на величину силы сопротивления разъёму прессового соединения.

В настоящей работе представлены рекомендации некоторых авторов для выбора коэффициента прилипания, которые можно использовать при расчёте несущей способности прессовых узлов. Коэффициент прилипания можно в несколько раз увеличить нанесением специальных покрытий на конишактные поверхности деталей узлов.

Целью экспериментальных исследований, проведённых на Машиностроительном факультете в городе Ниш, было установление влияния смазки на несущую способность штампемых узлов. При исследовании использовали следующие смазки: сало, MoS₂ и Loctite Wheel Mount. Некоторые образцы штамповали без применения смазки. На основании проведённых исследований большого числа образцов установлены значения коэффициентов прилипания при прессовании, осевой выпрессовке и скручивании, с использованием разного рода смазок.

Наряду с этим установлены и значения коэффициентов прилипания, полученные при горизонтальном прессовании и выпрессовке. Полученные результаты исследований показывают, что применение смазок оказывает большое влияние на несущую способность штампемых узлов. При испытаниях лучшую эффективность показала смазка Loctite Wheel Mount. На основании всего можно заключить, что при проектировании отдельных продольно штампемых соединений необходимо учсть и результаты опытной проверки для каждого конкретного случая.