

# tribologija u industriji

## sadržaj contents содержание

UVODNIK INTRODUCTION ПЕРЕДОВИЦА	M. BABIĆ, B. JEREMIĆ: Tribološka istraživanja u Institutu mehanike metalopolimernih sistema Akademije nauka Beloruske SSR - Tribological research in the Institute of mechanics of metalopolymeric systems Academy of sciences of Beloruska SSR - Трибологические исследования в Институте по механике металлокомпимерных систем Академии Белоруске ССР . . . 35
ISTRAŽIVANJA RESEARCH ИССЛЕДОВАНИЯ	B. IVKOVIĆ, S. KARALAZIĆ: Neki rezultati ispitivanja triboloških karakteristika TiN prevlaka - Some results of research of tribological characteristics of TiN coatings - Некоторые результаты исследования трибологических характеристик TiN нанесенных покрытий . . . . . 37
	M. BABIĆ: Tribološke karakteristike PVD tvrdih prevlaka - Tribological characteristics of PVD hard coatings - Трибологические особенности твердых покрытий . . . . . 40
	S. TANASIJEVIĆ, S. PAVIĆ, R. RADIVOJEVIĆ, M. ANTONLJEVIĆ, A. SAVČIĆ: Definisanje dozvoljenog površinskog pritiska pogonskih lanaca domaće proizvodnje - Determination of the allowable surface pressure in drive chains of yugoslav manufacture - Определение допустимого поверхностного давления приводных цепей отечественного производства . . . . . 44
	P. SIOCHANSI, F.A. SMIDT: Jonska implantacija kao metod oplemenjavanja površina u cilju modifikacije trenja i habanja materijala - Ion implantation asa surface treatment and wear of materials - Ионная имплантация как метод улучшения поверхностей с целью модификации трения и изнашивания материала . . . . . 50
KNJIGE I ČASOPISI BOOKS AND JOURNALS КНИГИ И ЖУРНАЛЫ	56
NAUČNI SKUPOVI SCIENTIFIC MEETINGS НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ	58
REZIMEA ABSTRACTS РЕЗЮМЕ	61

# Tribološka istraživanja u Institutu mehanike metalopolimernih sistema Akademije nauka Beloruske SSR

Na osnovu analize osnovnih tendencija razvoja tribologije u Institutu su orijentisani na šest perspektivnih oblasti istraživanja:

1. TRIBOANALIZA - Teorijske osnove tribomehanike, tribofizike, tribohemije i tribologije;
2. TRIBOLOŠKO PONAŠANJE MATERIJALA - izučavanja svojstava tribotehničkih materijala i razvoj metoda za upravljanje njihovim svojstvima;
3. TRIBOTEHNOLOGIJA - Tehnološki metodi upravljanja frikcionim svojstvima triboelemenata;
4. TRIBOTEHNIKA - Tehnička sredstva koja obezbeđuju prenos kretanja i snage a izložena su procesima trenja i habanja;
5. TRIBOMONITORING - Sredstva i metodi dijagnostike, kontrole i ispitivanja tribosistema;
6. TRIBOINFORMATIKA - Sredstva i metodi obrade, čuvanje i distribucije informacija.

Tribološka istraživanja u Institutu mehanike metalopolimernih materijala vezana su u osnovi za tribološki odjel koji angažeuje 70 saradnika od čega 6 doktora nauka i 20 magistara. Najznačajniji rezultati istraživanja odnose se na razvoj novih kompozicionih materijala.

U oblasti TRIBOMEHANIKE najinteresantniji naučni rezultati dobijeni su pri rešavanju kontaktnih problema uzimanjem u obzir subhrapavosti realnih površina. To je dozvolilo da se na novom nivou rešavaju takvi problemi kao molekularno međudejstvo, proračun kontaktnih temperatura, elektroprovodljivosti kontakta. Takvo upoznavanje uslova kontakta bliskih realnim tribomehaničkim uslovima uslovjava prelaz od opisivanja procesa frikcionog međudejstva na nivou elementarnih tribokontakata koji nastaju na stvarnoj površini kontakta.

U TRIBOFIZICI i TRIBOHEMIJI glavna pažnja posvećuje se izučavanju mehanizma trenja i habanja samopodmazujućih polimernih kompozicionih materijala. Došlo se do veoma važnog zaključka da pri frikcionom opterećenju površine struktura polimerne komponente transformiše se na svim nivoima atomsko-molekularne i nadmolekularne organizacije i veoma aktivno utiče na procese graničnog i suvog trenja. Pri tome dolazi do razaranja i rekonstrukcije pojedinih molekula i njihove asocijacije, što dovodi do izmene graničnih slojeva,

frikcionog prenosa i habanja.

Utvrđivanje zakonomernosti izmene strukturno-frikcionih svojstava materijala predstavlja osnovu razrade metoda aktivnog delovanja na procese trenja razvojem materijala zadate strukture i frikcionih svojstava i upravljanja frikcionim parametrima neposredno u procesu međudejstva. Ova istraživanja obavljaju se u Odelima za Tribološko ponašanje materijala i Tribotekhnologiju. Na osnovu njih razvijeno je nekoliko tipova novih kompozicionih tribotehničkih materijala različite namene. To su ugljoplastike, organoplastike, visokotemperaturske smeše na osnovu politetrafluoretilena, elektroprovodljivi metalopolimeri, jeftini materijali na bazi drveta otporni na abrazive.

Pored toga, stvaraju se naučne osnove konstruisanja tribotehničkih "INTELEKTUALNIH" materijala - mnogo-funkcionalnih koji adaptiraju svoju kompoziciju prema spoljašnjem dejству. Intenzivno se razvijaju i savremene tehnologije za formiranje tankih tribotehničkih polimernih i metalopolimernih prevlaka korišćenjem laserskog visokoenergetskog dejstva.

U TRIBOBIOLOGIJI pažnja se posvećuje izučavanju živih sistema, čija je visoka radna sposobnost nedovoljno jasna. U Institutu se došlo do pretpostavke da Sinovljeva tečnost sadrži specifične termootporne tečnokristalne materije. Modelska ispitivanja potvrđuju ovaku pretpostavku. Ovaka znanja obezbedilo je ne samo predlaganje puta obezbeđivanja bolesnika potrebnim poliartritima i Sinovljevom tečnošću, već i davanje niza tehničkih rešenja pri formiranju materijala i aditiva motornim uljem. Jedan od takvih aditiva dozvoljava smanjenje potrošnje goriva i smanjenje habanja kontaktnih elemenata za 5%.

U Laboratoriji za TRIBODIAGNOSTIKU intenzivno se održavaju istraživanja vezana za razvoj kompjuterskog predstavljanja i analize hrapavosti površina uz primenu metode sekundarnih elektrona. Takođe značajna oblast rada ove laboratorije odnosi se na usavršavanje metoda instrumentacije za analizu sadržaja produkata habanja u ulju.

U TRIBOINFORMATICI se danas kao najvažniji zadatak postavlja razvoj triboloških baza podataka. Kao najper-

spektivniji prilaz u rešavanju tog zadatka prihvaćeno je formiranje sistema baze podataka koji je dostupan korisnicima posredstvom mreže personalnih računara.

Medjutim, osnovni problem u formiranju baza podataka predstavlja kompatibilnost podataka do kojih se dolazi na osnovu bibliografskih izvora jer se ispitivanje najčešće izvode u veoma različitim uslovima. Zbog toga je veoma važno pitanje formiranja baza standardnih podataka - podataka do kojih se dolazi u standardizovanoj istraživačkoj proceduri.

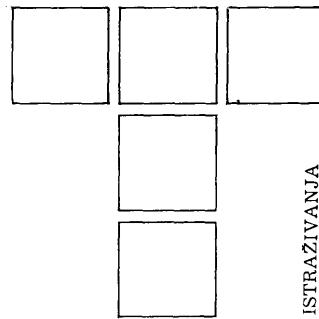
Zbog toga Institut u okviru Međunarodne organizacije za standardizaciju (ISO) učestvuje u formiranju standarda "Ispitivanje tribotehničkih svojstava ležišnih materijala na bazi plastike". U standardu se definišu: šema ispitivanja, mereni parametri opterećenja, mereni parametri habanja, uslovi okruženja, način izrade uzoraka za ispitivanje, njihov oblik i dimenzije, hrapavost kontaktnih površina. U ovom trenutku tribološka baza Instituta sadrži informacije o nekoliko desetina tribotehničkih materijala koji se primenjuju u SSSR-u.

Posebna pažnja u Institutu poklanja se usavršavanju naučnog kadra tj. izradi magistarskih i doktorskih rada u globalnoj oblasti trenja i habanja u mašinama. Pri Institutu funkcioniše redakcija svetski poznatog časopisa "TRENJE I IZNOS", koji se prevodi u USA na engleski jezik.

Institut razvija veoma intenzivnu međunarodnu saradnju u oblasti tribologije sa poznatim tribološkim centrima koji deluju u okviru Nacionalnog instituta za standardizaciju i tehnologiju USA, Univerziteta u Svonsiju (V. Britanija) i Nacionalnog centra naučnih istraživanja Francuske itd.

Poslednjih godina intenzivno se razvijaju obostrano korisni kontakti ovog Instituta i Laboratorije za obradu metala i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu.

U okviru ove saradnje na Institutu mehanike metalopolimerskih sistema organizovan je sovjetsko-jugoslovenski seminar "TRIBOTEHNIČKA SVOJSTVA POVRŠINA" od 5. do 6. juna 1989. god. na kome su sa predavanjima učestvovali Branislav Jeremić i Miroslav Babić kao predstavnici Laboratorije za obradu metala rezanjem i tribologiju Mašinskog fakulteta u Kragujevcu.



# Neki rezultati ispitivanja triboloskih karakteristika TiN - prevlaka

(Rad saopšten na internacionalnoj konferenciji o metalurškim prevlakama u San Diegu - USA 1989. god.)

## 1. UVOD

Tribološke prevlake, njihova otpornost na habanje i optimalni uslovi njihove primene predmet su istraživanja u sve većem broju naučno istraživačkih instituta i univerzitetskih laboratorijskih. Pojava reznih elemenata alata od tvrdog metala i brzoreznih čelika sa prevlakama od TiN menja u poslednje vreme ne samo brzine rezanja i produktivnost obradnih sistema već i troškove obrade.

Istraživanja izvršena u proizvodnim uslovima sa ciljem utvrđivanja veka trajanja više vrsta alata za prevlake od TiN pokazala su da u nekim uslovima rezanja alati sa prevlakama nemaju bitnu prednost nad alatima bez prevlaka dok u drugim uslovima prednosti su veoma velike.

Laboratorijskim istraživanjima izvršenim na Mašinskom fakultetu u Kragujevcu utvrđeni su otpori rezanja koji se pojavljuju pri obradi alatima sa i bez prevlaka od TiN da bi se uzrok pojavi različite postojanosti pokušao da nadje u mehanici procesa rezanja.

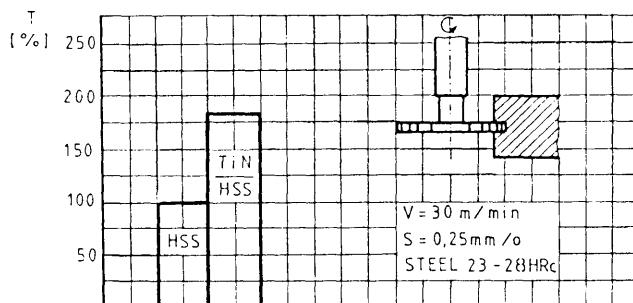
Deo rezultata istraživanja izvedenih u proizvodnim i laboratorijskim uslovima u poslednje dve godine prikazan je u ovom saopštenju.

## 2. REZULTATI ISTRAŽIVANJA U PROIZVODNIM USLOVIMA

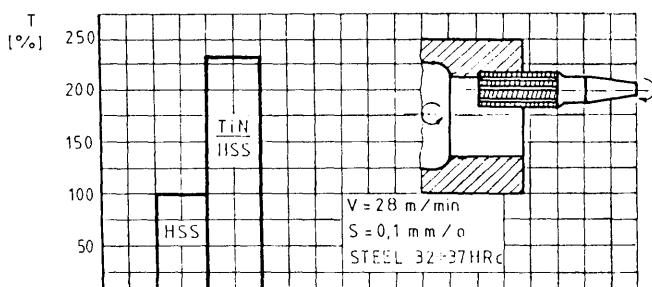
Povećanje produktivnosti obradnih sistema kroz povećanje brzine rezanja i postojanosti alata traži primenu i savremenih alata sa prevlakama od TiN. Praćenjem postojanosti alata za odvalno glodanje, glodala za žljebove, glodala za obradu navoja, vretenastih glodala i pločica od tvrdog metala sa i bez prevlaka od TiN dobijeni su rezultati koji su delimično prikazani na sl. od 1 do 6.

Očigledno je da razlike u postojanosti alata sa i bez prevlaka zavise od vrste alata odnosno vrste procesa rezanja. Drugim rečima, uslovi pod kojima se proces rezanja ostvaruje utiču na veličinu pozitivnih efekata tribološke prevlake (u ovom slučaju prevlake od TiN) na otpornost na habanje alata i njegovu postojanost.

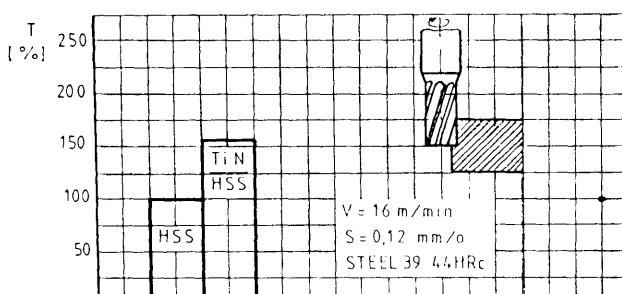
U nekim slučajevima obrade dobijeni rezultata praćenja postojanosti alata sa i bez prevlake pokazuju da pozitivnih efekata tribološke prevlake praktično nema. Rezultati



Slika 1.

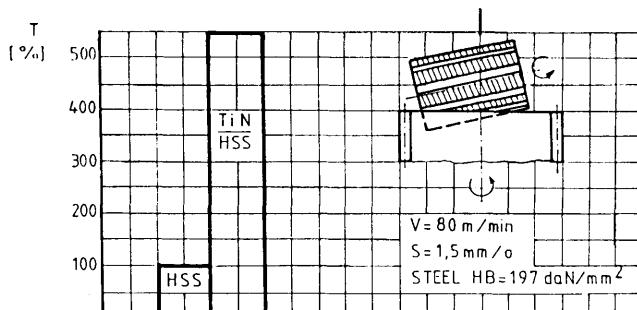


Slika 2.

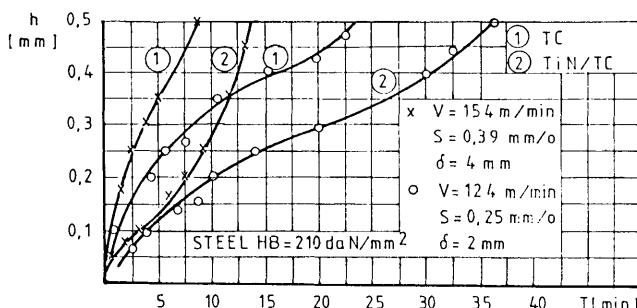


Slika 3.

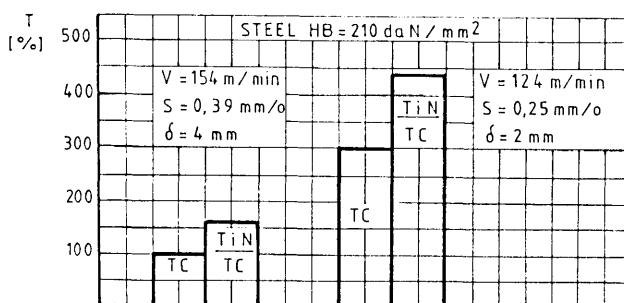
ove vrste dobijeni su pri korišćenju vretenastih glodala sa prevlakama od TiN, npr., i to pri obradi čelika povećane tvrdoće.



Slika 4.



Slika 5.



Slika 6.

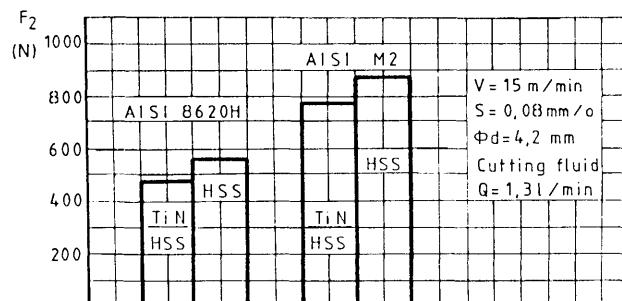
Velike razlike u doprinosu tribološke prevlake od TiN povećanju postojanosti reznih alata različitih vrsta koji su vršili obradu sa veoma različitim brzinama rezanja i različitim geometrijama obrade ukazuju na neophodnost laboratorijskih istraživanja kako u oblasti tribologije rezanja tako i u oblasti mehanike i termodinamike rezanja.

### 3. REZULTATI ISTRAŽIVANJA U LABORATORIJSKIM USLOVIMA

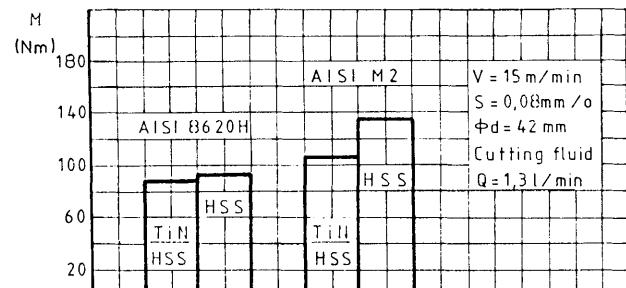
Istraživanja u proizvodnim uslovima pokazala su da u svim uslovima obrade postojanstvialata sa prevlakama od TiN su bile veće od onih koje se ostvaruju sa alatima bez prevlaka osim u manjem broju izuzetnih slučajeva. Razlike u postojanosti alata sa prevlakama od TiN i alata bez prevlaka, kretale su se od 50 - 150% a kod odvalnih glodalica do 400%.

Da bi se pronašao razlog ovoj pojavi izvršena su laboratorijska istraživanja u kojima su mereni otpori rezanja

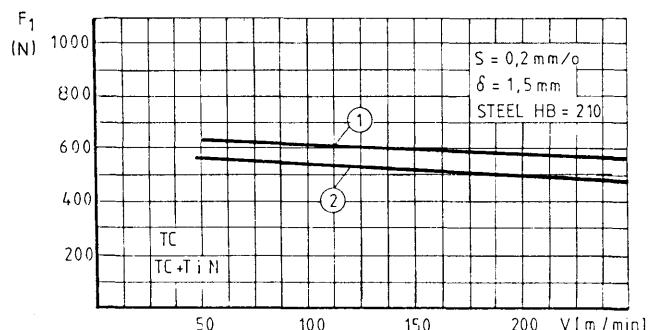
pri bušenju i struganju alatima sa i bez triboloških prevlaka od TiN. Deo rezultata ovih istraživanja prikazan je na sl. 7, 8 i 9.



Slika 7.



Slika 8.



Slika 9.

Na sl. 7 i 8 prikazani su otpori rezanja i momenti rezanja pri bušenju burgijama sa i bez tribološke prevlake od TiN. Razlike u otporima rezanja u pravcu bušenja nisu bile veće od 10%. Razlike u momentima (otpori glavnog kretanja) bile su još manje.

Na sl. 9 prikazana je funkcionalna veza između otpora rezanja  $F_1$  (glavni otpor rezanja) i dubine rezanja koja ilustruje deo empiričkog izraza oblika:

$$F_1 = C \delta^{x_f} S^{y_f} v^{z_f} \prod_{i=1}^n K_i$$

dobijenog eksperimentalnim putem pri obradi struganjem alatima sa i bez prevlaka. Razlike u veličini konstante  $C$  odnosno veličini glavnog otpora rezanja kreću se oko 10% a u nekim slučajevima su i manje.

Merjenje otpora rezanja pri obradi alatima sa i bez prevlaka od TiN pokazalo je da uzrok znatno većoj

postojanosti alata sa prevlakama od TiN ne treba tražiti samo u mehanici procesa rezanja jer doprinos tribološke prevlake smanjenju trenja u zoni kontakta nije veliki. Kako od veličine otpora rezanja zavisi i utrošena energija pri obradi odnosno razvijena količina toploće i temperatura u zoni kontakta to je očigledno da ni u termodinamici rezanja nije moguće naći objašnjenje pojave veće postojanosti alata sa prevlakama od TiN.

#### 4. ZAKLJUČCI

Tribološke prevlake od TiN na reznim elementima alata od brzoreznog čelika i tvrdog metala povećavaju njihovu otpornost na habanje i postojanost. Ovo povećanje, međutim, zavisi u velikoj meri od uslova pod kojima se proces rezanja izvodi odnosno od brzine rezanja, koraka, dubine rezanja, geometrije obrade i materijala predmeta obrade.

Kako su razlike u ceni koštanja alata sa i bez prevlake veoma velike to troškovi obrade u nekim slučajevima mogu biti veći pri obradi alatima sa tribološkim prevlakama od TiN. Ovo znači da postoje uslovi obrade u kojima al-

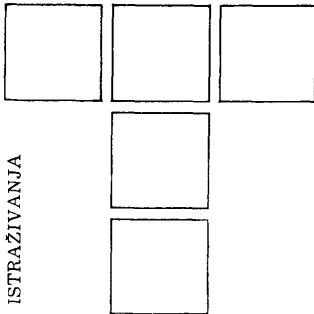
ati sa prevlakama nemaju prednost nad klasičnim alatima i ako se sa njima ostvaruje nešto veća postojanost.

Istraživanja triboloških karakteristika alata sa prevlakama različitih vrsta treba da omoguće stvaranje baze podataka u Tribološkom informacionom sistemu i o uslovima pod kojima su prednosti alata sa tribološkim prevlakama najveće.

Uzrok pojavi veće postojanosti alata sa prevlakama od TiN u odnosu na alate bez prevlaka treba, izgleda, tražiti u intenzitetu kretanja masa u zoni kontakta alata i materijala predmeta obrade. U ovom pravcu vršiće se buduća istraživanja u Laboratoriji za obradu metala i tribologiju i to primenom poznate TIA metode.

#### LITERATURA

1. B. IVKOVIĆ, Tribologija u industriji 1 (1981) 5
2. R. PANTIĆ, Tribologija u industriji 1 (1988) 16
3. B. IVKOVIĆ, Tribology international 2 (1982) 14



# Tribološke karakteristike PVD tvrdih prevlaka

## 1. UVOD

Spoznanja svih aspekata mogućih triboloških ušteda (direktnih i indirektnih), njihovo kvantificiranje pa i ekonomsko iskazivanje uslovili su ekspanziju triboloških istraživanja u svetu. Njihov osnovni cilj je tribološko unapredjenje tribomehaničkih sistema sadržanih u najrazličitijim tehničkim sistemima.

Jedan od ključnih pristupa u realizaciji ovog cilja odnosi se na poboljšanje triboloških svojstava kontaktnih slojeva. Zbog toga se poslednjih godina poseban značaj pridaje razvoju, istraživanju i primeni najraznovrsnijih postupaka modifikovanja kontaktnih površina. Tako na primer, među 215 tekućih projekata koji se u USA realizuju pod sponzorstvom 21 različite državne organizacije 8% odnosi se na prevlake [1].

U ovom trenutku još uvek je mali broj publikovanih rezultata sistematskog istraživanja triboloških svojstava prevlaka u širokom rasponu kontaktnih uslova, kao što su [2,3]. Postojeći rezultati najčešće se odnose na unapredjenje triboloških svojstava alatnih materijala. Međutim, razvoj savremenih PVD postupaka stvara šansu šire primene hard wear-resistant coatings i na različite materijale namenjene izradi tribomehaničkih elemenata.

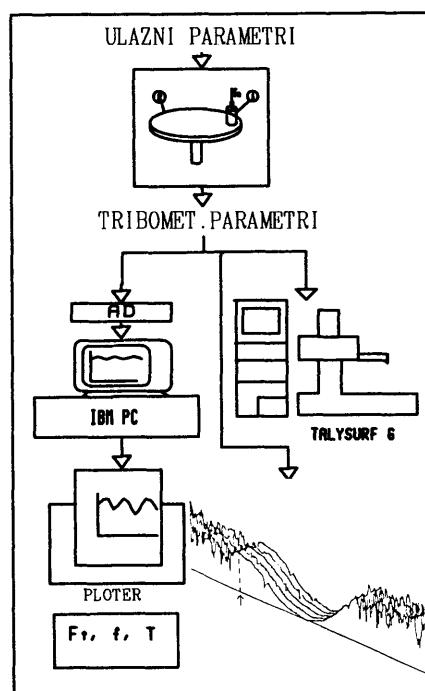
Za sada određeni primjeri iz industrijske primene i publikovani radovi, kao što su [4, 5] potvrđuju značajan tribološki potencijal šire primene ovih prevlaka.

U radu se iznose rezultati tribometrijskog ispitivanja tri savremene prevlake (TiN-ion plating coated, TiN-arc coated and TiAlN-arc coated) formirane na konstrukcijskom čeliku. Frikcionalno ponašanje kontaktnih parova na pin-on-disk mašini ispitano je u širokom rasponu kontaktnih pritisaka i brzina klizanja. Dobijeni rezultati ukazuju na razlike triboloških svojstava ispitivanih prevlaka i mogućnosti poboljšanja triboloških svojstava osnovnog materijala. Pri tome, značajan uticaj na frikcione efekte prevlaka imaju uslovi ostvarivanja kontakta.

## 2. EKSPERIMENTALNA PROCEDURA

### 2.1. Eksperimentalna oprema

Ispitivanje triboloških karakteristika modifikovanih kontaktnih slojeva obavljeno je na univerzalnom tribometru TR-3 sa pin-disk geometrijom (sl. 1).

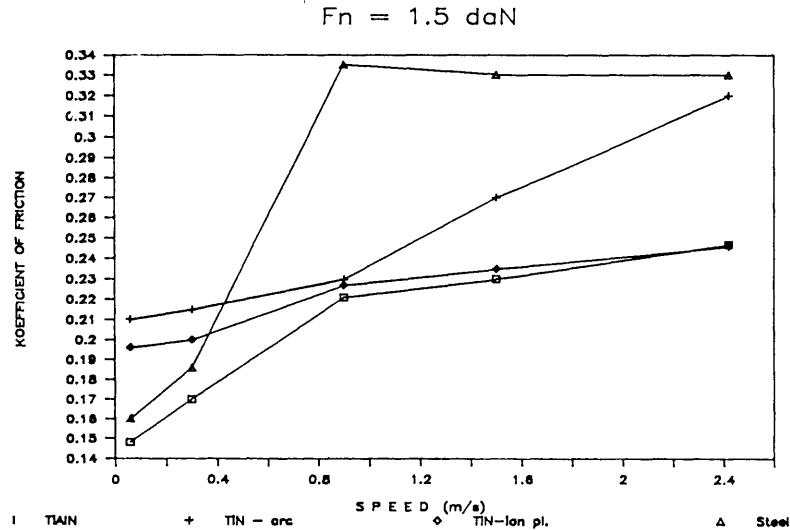


Sl. 1. - Funkcionalna blok-šema tribometra

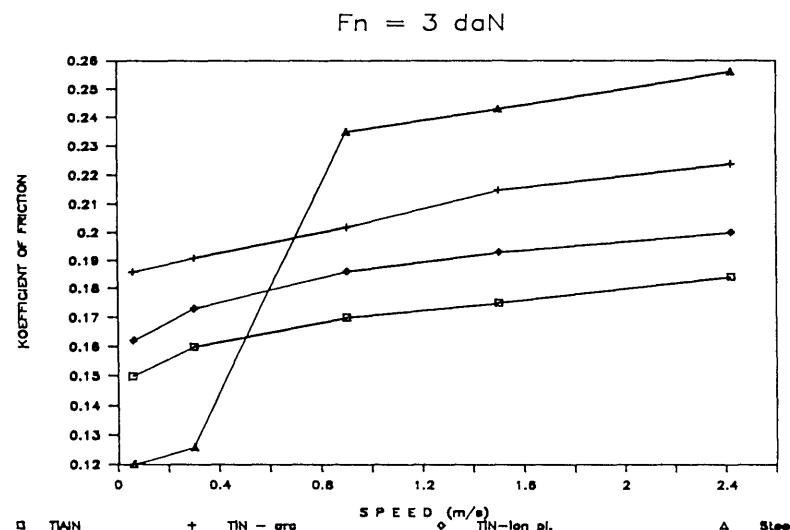
Zahvaljujući modularnoj konstrukciji tribometra premenom položaja pogonskog modula u odnosu na modul za opterećenja kontakta moguće je realizovati horizontalan i vertikalni položaj diska, bez potrebe za dodatnim modifikacijama tribometra. Na taj način tribometar TR-3 se može koristiti za ispitivanja pri različitim elementarnim geometrijskim šemama kontakta.

Kontakt elemenata (pin-a i diska) ostvaruje se u uslovima jednosmernog klizanja. Kao pogon koristi se motor jednosmerne struje uz mogućnost kontinuirane promene broja obrtaja diska u rasponu 0 - 1000 o/min.

Tribometar je deo modernog mernog sistema sa personalnim kompjuterom koji se koristi za pouzdano praćenje osnovnih tribometrijskih karakteristika (sl. 2).



Sl. 2. - Koeficijent trenja za  $F_n = 1,5 \text{ daN}$



Sl. 3. - Koeficijent trenja za  $F_n = 3 \text{ daN}$

U toku procesa trenja kontinualno se mere normalna sila ( $F_n$ ), sila trenja ( $F_t$ ) i temperatura pin-a na određenoj dužini u odnosu na kontaktну površinu. Odgovarajući davači su preko mostova pojačivača povezani sa AD konvertorom i sa računarcem za obavljanje akvizicije podataka.

U okviru input funkcije formirani su računski kanali za izračunavanje koeficijenta trenja, filtriranje podataka i njihovu statističku obradu. Odvijanje procesa trenja se prati na ekranu računara u realnom vremenu preko osnovnih tribometrijskih parametara kao što su sila trenja, koeficijent trenja i temperatura.

Po završetku faze akvizicije softver omogućuje dalju analizu podataka organizovanih u spreadsheet modu.

Pored pomenutih tribometrijskih karakteristika meri se i habanje. Za analizu promena na kontaktnoj površini kor-

isti se TalySurf 6 sistem, koji omogućava formiranje prostornih profilograma površina.

## 2.2. Kontaktne elemente

Pin-ovi prečnika 8 mm su izradjeni od konstrukcionog čelika Č4730 u poboljšanom stanju (HRC = 50), a diskovi prečnika 68 mm od čelika Č5420 u cementiranom stanju (HRC = 59).

Ispitivanjem su obuhvaćene tri vrste PVD prevlaka:

1. TiN ion-plated,
2. TiN arc deposited,
3. TiAlN arc deposited,

koje su formirane na prethodno fino brusenim čeonim površinama pin-ova.

Polažeći od istog nivoa hrapavosti površina realizovani PVD postupci rezultirali su različitim nivoima hrapavosti prevlaka. Pri tome, dok TiN - ion plating prevlaka skoro neizmenjeno reproducuje početno stanje hrapavosti površine substrata, arc evaporation prevlake odlikuje njeno povećanje (slika 4.). Ovo je posebno izrazito kod TiN prevlake, kod koje je došlo do promene klase hrapavosti i strukturnih karakteristika mikroneravnina. To je posledica random arc procesa u kome se materijal mete izbjiga na nivou rastopljenih kapljica.

Ispitivanje je obavljeno u uslovima graničnog podmazivanja. Ulje za podmazivanje (INA-POLAR 55) je dovodjeno na trac trenja u količini od 0,2 ml/min.

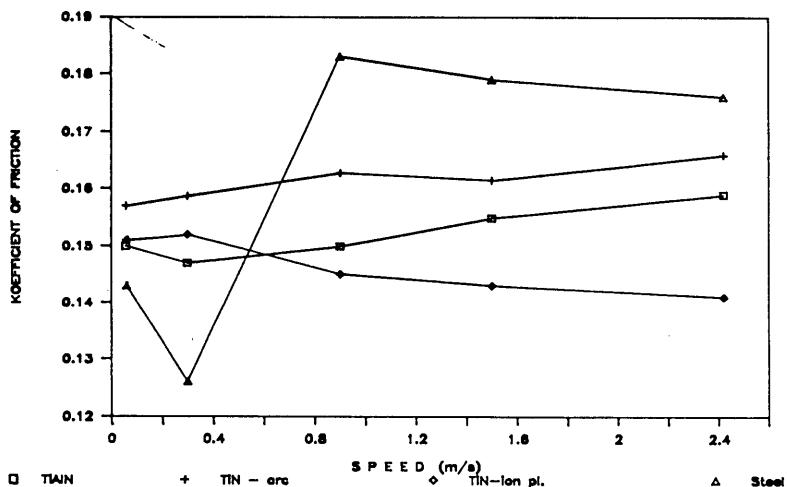
## 2.3. Organizacija eksperimenta

Eksperimentalno ispitivanje triboloških svojstava TiN prevlake realizovano je u tri faze.

U prvoj fazi obavljeno je uhodavanje kontaktnih površina i taj proces je praćen preko niza mikrogeometrijskih karakteristika. Zatim je pri stabilnom stanju kontaktne površine ostvaren program ispitivanja frikcijskih karakteristika pri različitim brzinama klizanja i normalnim opterećenjima. U trećoj fazi praćen je proces razvoja habanja kontaktnih površina uz konstantne parametre uslova kontakta.

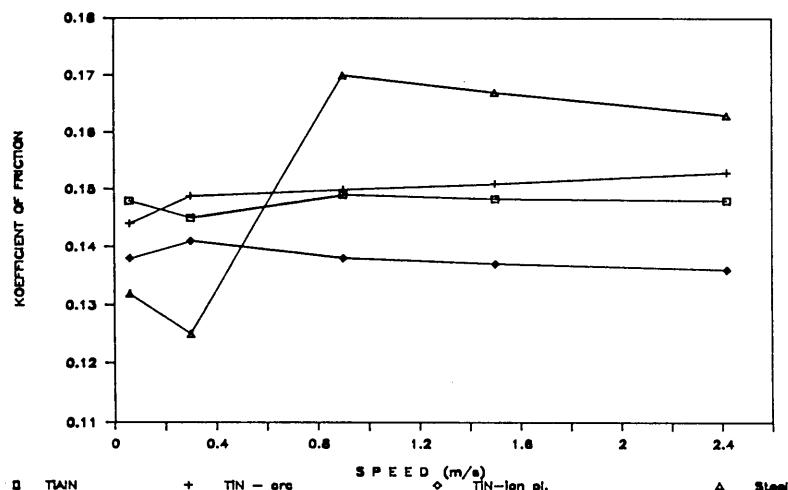
Da bi se stvorili uslovi za sagledavanje triboloških efekata TiN prevlake ispitivanje je imalo uporedni karakter. Naime, ispitivanjem pod istim uslovima obuhvaćeni su kako pin-ovi sa prevlakama, tako i pin-ovi bez nje.

$$F_n = 6.5 \text{ daN}$$



Sl. 4. - Koeficijent trenja za  $F_n = 6,5 \text{ daN}$

$$F_n = 9.5 \text{ daN}$$



Sl. 5. - Koeficijent trenja za  $F_n = 9,5 \text{ daN}$

### 3. REZULTATI EKSPERIMENTA

#### 3.1. T r e n j e

Uticaj PVD prevlaka na frikciona svojstva kontaktnih slojeva ispitivan je pri 4 opterećenju od 1,5 do 9,5 daN i 5 brzina klizanja od 0,06 do 2,4 m/s pri trajanju procesa trenja od 3 min.

Dobijene vrednosti sile trenja i koeficijenta trenja obrađeni su u automatizovanoj proceduri koju obezbeđuje softver korišćen za akviziciju i obradu podataka. Na slikama od 6 do 9 prikazane su dijagramske zavisnosti koeficijenta trenja od parametara uslova kontakta za prevučenu i neprevučenu površinu. Pri tome eksperimentalne tačke na dijagramima predstavljaju aritmetičke sredine svih diskretnih vrednosti koeficijenta trenja (diskretizacija je vršena sa frekvencijom od 10 Hz) dobijenih u 5 ponovljenih ispitivanja.

Dijagramske zavisnosti ukazuju na postojanje znatnog uticaja parametara uslova kontakta n i  $F_n$  na friкцион po- našanje ispitivanih kontaktnih parova.

Broj obrtaja (brzina klizanja) pokazuje dvojak uticaj na koeficijent trenja - izaziva povećanje koeficijenta trenja pri nižim vrednostima normalnog opterećenja i smanjenje pri višim koeficijentima trenja u funkciji brzine klizanja opada sa povećanjem kontaktnog opterećenja. Posebno izražen uticaj brzine klizanja ispoljava se u slučaju kontaktnog para bez prevlaka na kontaktnim površinama u rasponu od 0,3 do 0,9 m/s pri svim nivoima kontaktnog opterećenja.

S druge strane dobijeni rezultati ukazuju da koeficijent trenja opada sa porastom kontaktnog opterećenja i da većim brzinama klizanja odgovara manji stepen ovog uticaja.

U oblasti malih brzina klizanja (do 0,5 m/s) niži nivo koeficijenta trenja odgovara kontaktu nemodifikovanih površina, dok se pozitivni efekti prevlaka iskazuju u oblasti većih brzina klizanja.

Uočljivo je da najviše vrednosti koeficijenta trenja među ispitivanim prevlakama u celokupnoj oblasti parametara uslova trenja odgovara TiN-arc prevlaci. Ovakvo stanje uslovljeno je u prvom redu povećanom hrapavošću ove prevlake.

S druge strane, razlike u frikcionim karakteristikama TiN-ion plating i TiAlN prevlaka predstavljaju funkciju brzine klizanja i kontaktnog opterećenja. Tako u oblasti blažih uslova trenja (manji kontaktni pritisak i brzina klizanja) bolje frikcione karakteristike pokazuju TiAlN prevlaka, a u oblasti težih uslova tre - nja TiN ion plating prevlaka.

Uticaj parametara uslova kontakta na koeficijent trenja i silu trenja može se izraziti sa velikim stepenom korelacije (od 0,81 do 0,97) odgovarajućim koreacionim zavisnostima:

$$f = 0.118 n^{0,151} F_n^{-0,257} - \text{neprevučena površina}$$

$$f = 0.195 n^{0,025} F_n^{-0,276} - \text{TiN-ion plating}$$

$$f = 0.203 n^{0,051} F_n^{-0,259} - \text{TiN-arc evaporation}$$

$$f = 0.144 n^{0,043} F_n^{-0,107} - \text{TiAlN}$$

Vrednosti konstanti i eksponenata u koreacionim izrazima veoma ilustrativno iskazuju opisane uticaje parametara režima trenja na koeficijent trenja, i razlike frikcionih svojstava ispitivanih površina.

### 3.2. Habanje

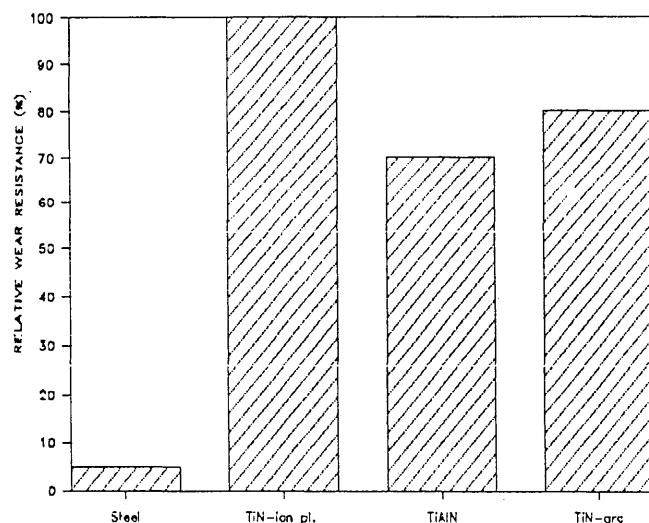
Habanje je ispitivano u uslovima početnog nominalnog linijskog kontakta (kontakt na boku diska) u konstantnim uslovima trenja:

$$n = 200 \text{ o/min} \quad (v = 0.7 \text{ m/s}),$$

$$F_n = 9.5 \text{ daN}$$

Habanje je mereno profilografisanjem traga habanja na kontaktnoj površini pin-a nakon 8 časova trajanja procesa trenja. Na osnovu širine traga habanja izračunate su odgovarajuće otpornosti na habanje i njihov relativni odnos prikazan je na sl. 10.

$F_n = 9.5 \text{ daN}, n = 200 \text{ rpm}$



Sl. 6. - Otpornost na habanje

Očigledno je da uslovima velikog specifičnog opterećenja kontaktne površine pin-a, koje uslovljava geometrija kontaktog para, neprevučenu površinu odlikuje veoma mala otpornost na habanje u odnosu na prevučenu. Među ispitivanim prevlakama najniža otpornost na habanje ima TiAlN prevlaka a najvišu TiN-ion plating prevlaka.

### 4. ZAKLJUČCI

Na osnovu rezultata modelskog tribometrijskog ispitivanja mogu se izvući sledeći osnovni zaključci:

1. Ispitivane prevlake pokazuju različita frikcionala svojstva i te razlike predstavljaju funkciju brzine i klizanja i kontaktnog opterećenja. Tako u oblasti manjih opterećenja najniži nivo koeficijenta trenja odgovara TiAlN prevlaci. Prednosti ove druge prevlake rastu sa povećanjem brzine klizanja.

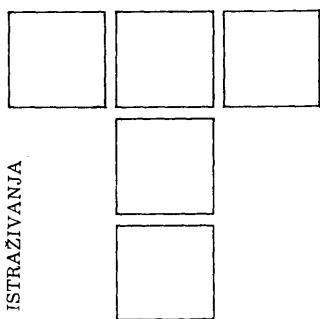
2. Uticaj na trenje ispitivanih prevlaka (TiN-ion plating, TiN-arc evaporation i TiAlN) u odnosu na neprevučene površine u širem rasponu brzina klizanja i kontaktnih opterećenja nema jednoznačan karakter. Pozitivni frikcioni efekti vezani su samo za teže uslove ostvarivanja kontakta.

3. U poređenju sa mogućim smanjenjem trenja mnogo je značajnije moguće smanjenje habanja primenom hard wear-resistant coatings.

4. Utvrđene razlike frictional and wear behavior ispitivanih prevlaka ukazuju na značajnu mogućnost optimizacije triboloških svojstava kontaktnih slojeva u određenim uslovima trenja izborom vrste i postupka formiranja hard wear-resistant coatings.

### LITERATURA

- [1] L. S. DAKE, J.A. RUSSELL, D.C. Debrot, Journal of tribology, Vol. 108 (1986) 497.
- [2] S. RAMALINGAM, in W.R Loomis (ed.), New directions in lubrication, materials, wear and surface interactions - Tribology in the 80 s, Noyes Publications, New Jersey, 1986, p. 714.
- [3] H. SUNDQUIS, A. MATTHEWS, J. VALLI, Proceedings of 4th Europien Tribology Congres Eurotrib 85, 9-12 Septembre, Lyon.
- [4] H. M. GABRIEL, F. SCHMIDT, K.H. Kloos, Influence of Additive-treated lubricants on the wearbehavior of TiN ionplated structural parts, Proceedings of 4th Europien Tribology Congres Eurotrib 85, 9-12 Septembre, Lyon.
- [5] E. BROSZEIT, K.H. KLOOS, Th. ROTH, Tribological behavior ion plated and sputtered hard, wear-resistant coatings on nodular cast iron, Proceedings of 4th Europien Tribology Congres Eurotrib 85, 9-12 Septembre, Lyon.



S. TANASIJEVIĆ, S. PAVIĆ, R. RADIVOJČEVIĆ  
M. ANTONIJEVIĆ, A. SAVČIĆ

# Definisanje dozvoljenog površinskog pritiska pogonskih lanaca domaće proizvodnje

## 1.0 UVOD

Lanci kao sastavni deo lančanih prenosnika, našli su široku primenu u mašinskoj tehnici. Danas se naročito koriste u: poljoprivrednim mašinama, gradjevinskim mašinama, dizalicama i transportnim mašinama, tekstilnim mašinama, grafičkim mašinama, opremi za bušenje nafte, biciklima, motociklima, motorima i dr.

Veliku primenu lanaca najbolje karakteriše činjenica da je naš najveći proizvodjač, Industrija "Filip Kljajić", u 1988. god. proizveo oko 6,500.000 [m] lanaca, a od toga približno 6,000.000 [m] pogonskih lanaca. Skoro 75% ukupne proizvodnje je isporučeno stranim kupcima.

Kao i svi drugi prenosnici, lanci zahtevaju neprekidna poboljšanja svojih osnovnih eksploatacijskih karakteristika, pri čemu je prisutna neprekidna težnja proizvodjачa i korisnika da se što manjim gabaritima prenesu što veća opterećenja. Posebna streljenja u razvoju eksploatacijskih karakteristika lanaca su usmerena u pravcu želja da lanac izdrži što veći površinski pritisak u jednom dužem veku eksploatacije.

U ovom radu su prezentirani neki od velikog broja rezultata dobijenih višegodišnjim ispitivanjem eksploatacijskih karakteristika pogonskih lanaca, vršenih za potrebe našeg najvećeg proizvodjača, Industriju "Filip Kljajić" u Kragujevcu. Definisanje osnovne karakteristike, dozvoljenog površinskog pritiska, ima velikog značaja ne samo za pravilan izbor lanaca, već i za dalji razvoj i povećanje kvaliteta domaće proizvodnje.

## 2.0. OSNOVNE EKSPLOATACIJSKE KARAKTERISTIKE LANACA

Radna sposobnost lančanih prenosnika koji rade u normalnim uslovima, uslovima abrazivnog zagadjenja ili uslovima oskudnog podmazivanja, ograničena je habanjem zglobova. Habanje neizostavno dovodi do povećanja koraka, smanjenja čvrstoće i ravnomernosti rada, kao i do narušavanja normalnih uslova sprezanja lanca sa lančanikom.

Proračun lančanog prenosa po specifičnom pritisku zasniva se na pretpostavci da lanac ima dovoljnu otpornost na habanje, ako specifični pritisak u zglobovu lanca u eksploataciji ne prelazi vrednost dopuštenog pritiska.

Analiza razvoja triboloških procesa, proračuna i veka trajanja lanca, pokazuje da je dozvoljeni (dopušteni) površinski pritisak osnovna eksploatacijska karakteristika lanca kojom se definiše kvalitet i vek trajanja lanca. Poznavanje dozvoljenog površinskog pritiska omogućava definisanje i drugih eksploatacijskih karakteristika: snage koja se može preneti, kao i veka trajanja lanca.

Po preporukama standarda većine zemalja (DIN, GOST, ANSI i dr.), dozvoljeni površinski pritisak u zglobovu je onaj pritisak koji nastaje pri prenošenju snage (opterećenja), a koji garantuje lancima normalnog kvaliteta i podmazivanja da se neće izdužiti više od  $\Delta h = 2\%$  posle 10.000 sati rada ili  $\Delta h = 3\%$  posle 15.000 sati.

Sprovedena razmatranja i navedene preporuke pokazuju da dozvoljena opterećenja u zglobovu moraju biti u uskoj vezi sa dopuštenim habanjem lanca. Za definisanje dozvoljenog površinskog pritiska u zglobovu lanca neophodno je ispitati uticaj opterećenja na habanje lanca i uspostaviti njihovu uzajamnu zavisnost. Logično je bilo da se ovaj problem rešava dugotrajnim eksperimentalnim ispitivanjima.

## 3.0. EKSPERIMENTALNA ISPITIVANJA

Višegodišnja eksperimentalna ispitivanja vršena su u Odjeljenju za ispitivanje lanaca Industrije "Filip Kljajić".

### 3.1 Izbor lanca

Za ispitivanje eksploatacijskih karakteristika, pre svega za ispitivanje dozvoljenog površinskog pritiska, razvoja procesa habanja i snage koja može da se prenese, izabran je lanac iz grupe pogonskih lanaca: 15,875 x 9,53 x 10,16 (5/8" ANSI).

Pri izboru tipa lanca vodjeno je računa da:

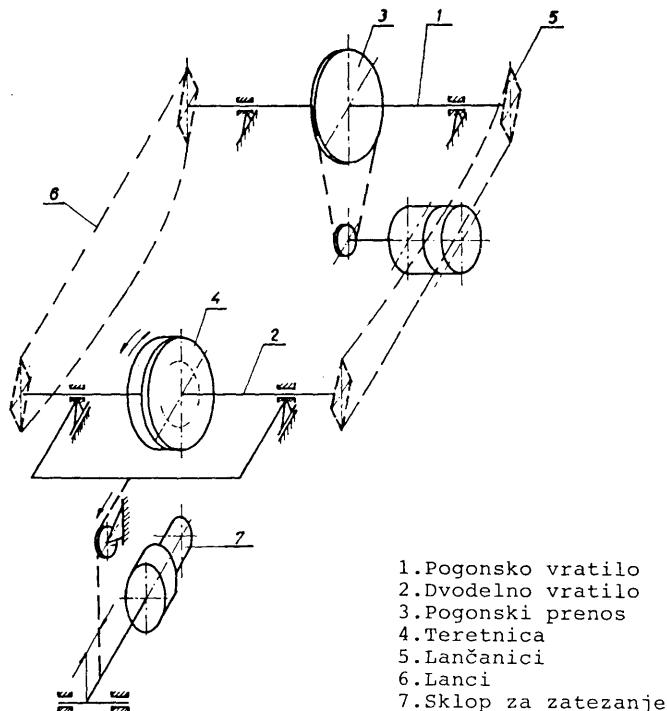
- izabrani lanac spada u grupu lanaca srednjih dimenzija,
- po količini proizvodnje spada u red lanaca koji se proizvode u većim količinama,
- po svojoj nameni pripada grupi lanaca široke pri-

mene jer se koristi u velikom broju raznorodnih konstrukcija,

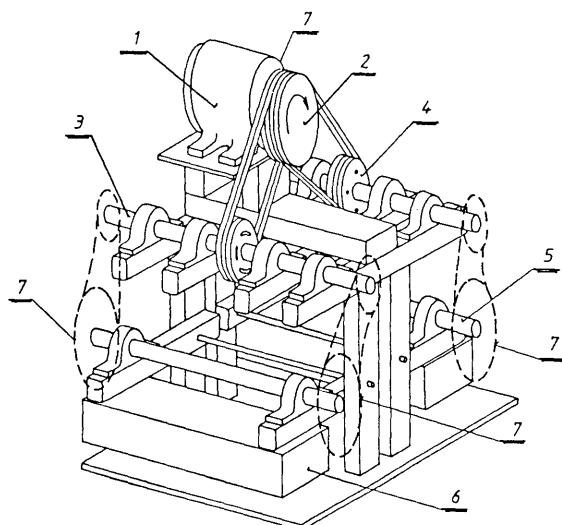
- po svojim dimenzijama pripada grupi lanaca koji se izvoze i ugradjuju i u mašine drugih standarda.

### 3.2 Uredaji za ispitivanje lanaca

Eksperimentalna ispitivanja vršena su na dva uređaja za ispitivanje lanaca (sl. 1 i sl. 2).



Sl. 1. - Uredaj za ispitivanje lanaca



1. Elektromotor-varijator  
2. Pogonski kaišni prenos  
3. Dvodelno pog.vratilo  
4. Teretnica  
5. Gonjeno vratilo  
6. Tegovi za opterećenje  
7. Lančani prenos

Sl. 2. - Uredaj za ispitivanje lanaca

Uredaj predstavljen na sl. 1. radi po principu "zatvorenog kruga snage", pri čemu se opterećenje lančanika /5/ i lanca /6/ vrši preko teretnice /4/. Opterećenje u zatvorenoj konturi se postiže zakretanjem elemenata teretnice, pri čemu moment uvijanja kruži u zatvorenom krugu, a gubici snage u ležištima i lančanom prenosu se nadoknadjuju snagom elektromotora /EM/. Karakteristike elektromotora su:  $P = 4 \text{ kW}$  i  $n = 144 \text{ min}^{-1}$ .

Uredaj predstavljen na sl. 2. je američke proizvodnje i omogućava istovremena ispitivanja dva para lanaca.

Pomoću elektromotor-varijatora moguća je promena brzine u širokom opsegu, a teretnica i tegovi za opterećenje omogućavaju promenu opterećenja bez zaustavljanja uređaja.

### 3.3 Merenje habanja

Radna sposobnost lanca je ograničena habanjem zglobova, a kao rezultat ovog procesa nastaje povećanje koraka. Usled habanja zgloba naročito se povećava korak spoljnijih članaka. To prostiće iz činjenice da se pri habanju osovine i unutrašnje površine čaure, osa čaure pomera, a time i osa valjka, odnosno lamela spoljnog članka i zato se povećava i korak.

Analizirajući razvoj triboloških procesa, odlučeno je da se praćenje radne sposobnosti vrši praćenjem povećanja koraka ispitivanih lanaca i to srednjeg koraka.

Srednji korak lana se određuje merenjem odredjene dužine lana i deljenjem te dužine brojem članaka. Izbor srednjeg koraka za identifikaciju i praćenje habanja lana je sasvim opravданo, pošto ova mera ima niz dobrih osobina, kao:

- mogućnost korišćenja relativno jednostavnih mernih instrumenata,

- mogućnost ocene i vrlo malih promena u izduženju srednjeg koraka (do  $1 \mu\text{m}$ ) i dr.

Merenja srednjeg koraka su vršena klasičnim kljunastim merilom i dodatnim komparaterom, što omogućava pouzdano očitavanje  $0,01 \text{ mm}$ . Veći broj članaka u mernom odsečku omogućava registrovanje promene srednjeg koraka reda  $1 \mu\text{m}$ .

Merenja su vršena na pomoćnom uređaju na kome je lanac postavljan i zatezan silom 1% od sile kidanja. Takođe, merenja su vršena na tri različita mesta svakog odsečka, čime je izbegнутa mogućnost slučajnog izbora odsečka intezivnijeg habanja.

### 3.4. Merenje sile u zglobu lanaca

Za definisanje dozvoljenog površinskog pritiska, neophodno je tačno poznavanje sile u lancu, odnosno maksimalne sile u zglobu.

Definisanje tačne vrednosti maksimalne sile u zglobu vršeno je posebnim postupkom tenzometrijskog merenja, čija je metodologija i postupak razradjen u okviru ovih ispitivanja. Za identifikaciju i korišćenje dobijenih signala korišćen je posebno formiran merni lanac, koji je u merenjima pokazao veoma dobre rezultate.

#### 4.0 UTICAJ OPTEREĆENJA NA HABANJE LANACA

Analiza mehanizama prenošenja opterećenja i kinematičkih odnosa elemenata lanca, pokazuje da je zglob skup tribomehaničkih sistema u kojima je dominantna vrsta kretanja klizanje sa udarom. Prisutan je relativno veći specifični pritisak pri relativno maloj brzini klizanja. Zatvorena konstrukcija zgloba čak i pri obilnom podmazivanju uslovjava polusovo trenje, tj. trenje sa nepotpunim podmazivanjem i neposrednim kontaktom spregnutih površina. Opterećenje koje se prenosi predstavlja jedan od osnovnih faktora koji utiču na habanje zgloba. Pritisak u zglobu ispoljava veliki uticaj na tribološke procese i fizičko-mehaničke karakteristike tribomehaničkih sistema. Promena specifičnog pritisaka u zglobu utiče na promenu stvarne površine kontakta, strukturu kontaktnog sloja, a takodje i na promenu inteziteta habanja.

Za iznalaženje prirode, toka habanja i uticaja opterećenja na habanje lanaca, vršena su brojna eksperimentalna ispitivanja. Dobijene krive habanja lanaca pri različitim opterećenjima, omogućile su konstruisanje dijagrama zavisnosti izduženja srednjeg koraka od pritisaka u zglobu (sl. 3).

U slučaju abrazivnih zagadjenja, zavisnost habanja od specifičnog pritisaka može se izraziti jednačinama pravih linija koje ne prolaze kroz kordinatni početak. Uočena zakonitost važi i za slučajevе veoma malih opterećenja lanaca.

Eksperimentalno dobijena zavisnost izduženja srednjeg koraka od pritisaka u zglobu je veoma vredna karakteristika pogonskih lanaca jer omogućava iznalaženje veoma važnih karakteristika pogonskih lanaca, dozvoljenog površinskog pritisaka takodje.

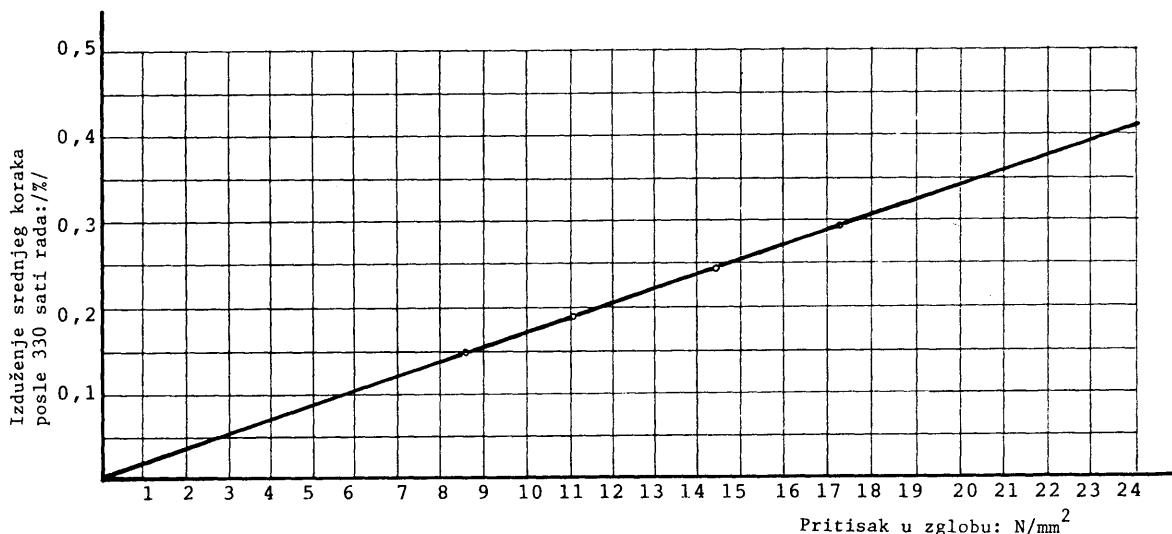
#### 5.0 DOZVOLJENI POVRŠINSKI PRITISAK

##### 5.1 Osnovni dozvoljeni površinski pritisak

Određivanje dozvoljenog površinskog pritisaka započinje definisanjem osnovnog (baznog) pritisaka. To je onaj pritisak u zglobu (sačasno DIN-u 8195 i ASA B29.1) koji garantuje lancima normalnog kvaliteta i podmazivanja da se neće izdužiti više od  $\Delta h = 2\%$  posle 10.000 sati rada, ili  $\Delta h = 3\%$  posle 15.000 sati, pri čemu prenosnik radi u sledećim uslovima:

- lančani prenos ima dva lančanika
- broj zuba pogonskog lančanika:  $Z_1 = 19$
- osno rastojanje:  $A = 40 \cdot h$ , dužina lanca veća od 100.
- prenosni odnos:  $i = 3$

Analizom velikog broja eksperimentalno dobijenih krivih habanja, pouzdano je zaključeno:



Sl. 3. - Dijagram zavisnosti izduženja srednjeg koraka od pritisaka u zglobu

Kako se sa dijagraama može učiti, pri periodičnom i dovoljnom podmazivanju, a u uslovima odsustva abrazivnog zagadjenja, habanje pogonskih lanaca u dijapazonu normalnih opterećenja i brzina je upravo proporcionalno specifičnom pritisku u zglobu.

- izduženje srednjeg koraka lanca u periodu uhođavanja za visokoopterećene lance kreće se u rasponu od 0,32-0,37 |%

- izduženje srednjeg koraka lanca od perioda uhođavanja do rada od 330 |h| kreće se u rasponu od 0,05-

-0,07 |%

- izduženje srednjeg koraka visoko-opterećenih lana-  
ca u periodu od 330 |h| do 1000 |h| rada je veoma mali i  
leži u granicama od 0,03-0,05 |%

- izduženje srednjeg koraka visoko-opterećenih lana-  
ca posle rada od 330 |h|, uključujući i period uhoodava -  
nja, kreće se u rasponu od 0,37-0,44%.

Koristeći ove generalizovane i više puta eksperi-  
mentalno potvrđene podatke, moguće je iz dijagrama zavis-  
nosti izduženja srednjeg koraka od pritiska u zglobo def-  
inisati osnovni dozvoljeni površinski pritisak u zglobo  
pri kome izduženje srednjeg koraka posle 330 |h| rada le-  
ži u granicama 0,37-0,44 |%. Iz dijagrama zavisnosti nala-  
zimo da su vrednosti ovog pritiska u granicama:  $p_b =$   
 $22,5 - 26,4 \text{ [N/mm}^2]$ .

Eksperimentalno dobijeni podaci omogućavaju i teorijsko-eksperimentalnu proveru veka trajanja lanaca koji bi radili pri ovakvim uslovima. Koristeći teorijsku krv habanje lanaca, može se izračunati da je orientaciona vrednost veka trajanja lanca koji radi pod ovakvim uslovima:  $T = 11.080 |h|$ , što zadovoljava i opštu definiciju dozvoljenog pritiska da se lanac pri ovakvom opterećenju neće izdužiti više od  $\Delta h = 2\%$  posle 10.000 sati rada.

Ovako definisani dozvoljeni osnovni površinski pritisak je nastao kao rezultat brojnih eksperimentalnih ispitivanja i provera. Takođe je uporedjivan i odgovarajućom karakteristikom lanaca drugih stranih proizvodjača, koji su ispitivani u istim uslovima kao i proizvodi FKK-a.

Za definisanje šireg opsega ove osnovne eksploracijске karakteristike treba eksperimentalno iznaći i uticaj brzine i broja zuba lančanika na dozvoljeni površinski pritisak.

## 5.2 Uticaj broja zuba lančanika na dozvoljeni površinski pritisak

Dozvoljeni površinski pritisak nesumljivo zavisi i od broja zuba lančanika. Lančanici sa manjim brojem zuba ne garantuju pouzdan rad prenosnika. Smanjenjem broja zuba pri istom koraku i snazi, raste specifični pritisak u zglobu, povećava se neravnometnost kretanja lanca i brzina udara lanca o lančanik.

Za iznalaženje uticaja broja zuba pogonskog lančanika na dozvoljeni površinski pritisak vršena su eksperimentalna ispitivanja uticaja tri para lančanika sa brojevima zuba: 16, 19 i 24 na habanje lanaca, pri čemu su ostali parametri (brzina lanca, snaga, broj članaka, mazivo, način podmazivanja, broj zuba gonjenog lančanika i ostali uslovi) zadržani isti.

TABELA 1: VREDNOSTI KOEFICIJENTA  $k_z$

$z_1$	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
$k_z$	0,93	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1	1,01	1,02	1,03	1,04	1,05	1,053	1,06	1,07

Analiza dobijenih rezultata pokazuje da se uticaj broja zuba na dozvoljeni površinski pritisak može izraziti koeficijentom:

$$k_z = 0,625 \sqrt[6]{z_1}$$

koji se zadovoljavajuće poklapa i sa preporukama koje daje DIN 8195, kao i neki poznati strani proizvodjači lanaca.

U tabeli 1 date su vrednosti koeficijenta  $k_z$  za različite vrednosti broja zuba pogonskog lančanika.

## 5.3 Uticaj lanca na dozvoljeni površinski pritisak

Osobenosti sprezanja lančanog prenosa uslovljavaju kretanje zgloba i zuba lančanika jedan ka drugom u susret određenim brzinama. Pri njihovom sprezanju dolazi do udara. Ti udari razarajuće deluju na lanac, elemente lanca, zube lančanika i uzrok su specifičnog šuma kojim je praćen rad lančanog prenosa.

Očigledno je da je jedan od prioritetnih zadataka minimizirati do granice mogućeg silu udara u zglobo. Na silu udara veliki uticaj pokazuje brzina udara koja je proporcionalna ugaonoj brzini i koraku lanca.

Nesumnjivo je da brzina lanca utiče na silu udara, habanje i konačno na dozvoljeni površinski pritisak u lancu. Istovremeno, standardi različitih zemalja pokazuju da se lanac bira za vek trajanja od 15000 sati bez obzira na brzinu pri kojoj radi. Kako je put trenja duži pri većim brzinama, očigledno je da specifični pritisak u zglobu mora biti manji pri većim brzinama, da bi vek trajanja lanca ostao isti.

Shodno prethodnim razmatranjima, dozvoljeni površinski pritisak opada sa porastom brzine, pa se uticaj brzine može definisati koeficijentom .

U opštem obliku zavisnost intenziteta habanja pogonskih lanaca od pritiska u zglobo i brzine klizanja elemenata tribomehaničkih sistema, može biti predstavljen u obliku:

$$\Delta h = k \cdot p^m v^n$$

gde su:

$\Delta h$  - izduženje koraka

$k$  - koeficijent proporcionalnosti

$p$  - specifični pritisak

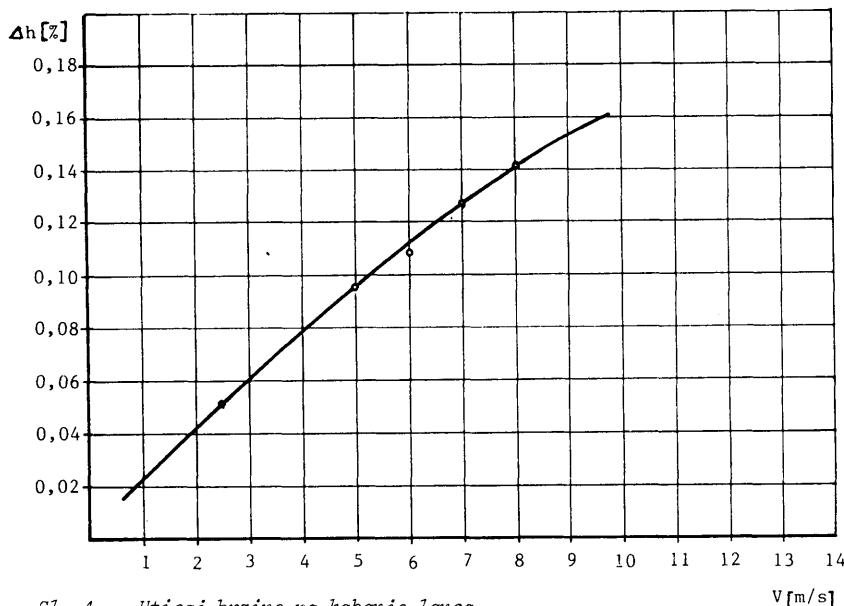
$v$  - brzina klizanja

Razvijajući dalje ovu opštu zavisnost i koristeći uslove da je vek trajanja ograničen na 15000 sati, bez obzira na broj obrtaja, odnosno brzinu klizanja, dobija se u konačnom obliku:

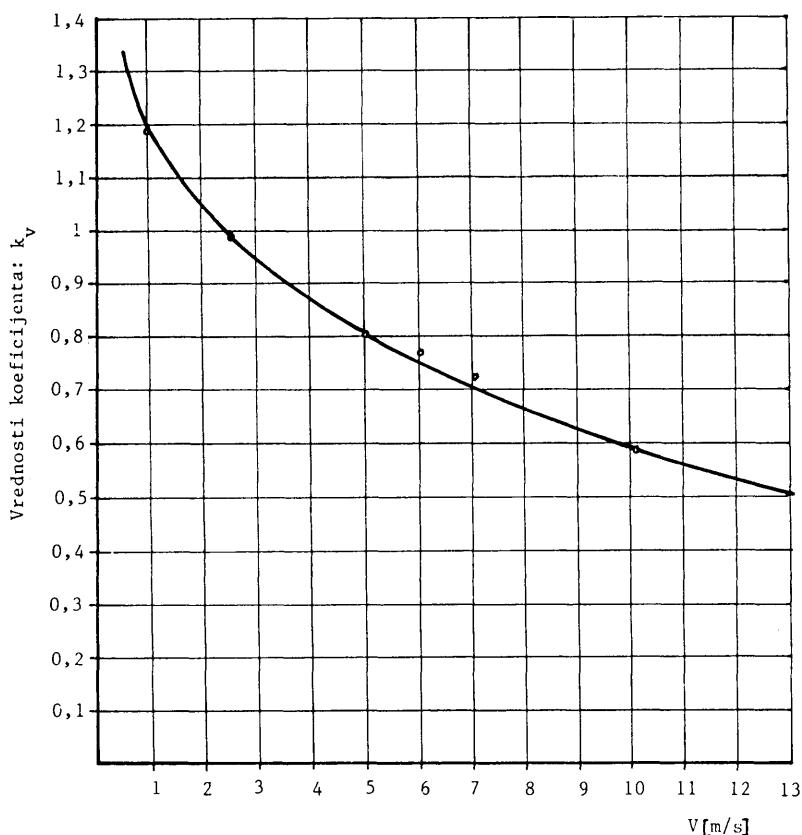
$$p_1 = p_2 \sqrt[3]{\frac{\Delta h_2}{\Delta h_1}} = p_2 \cdot k_v$$

Uticaj brzine na dozvoljeni površinski pritisak, odnosno koeficijent  $k_v$ , je odnos izduženja koraka lanca pri različitim brzinama.

enta  $k_v$  od brzine lanca (sl. 5).



Sl. 4. - Uticaj brzine na habanje lanca



Sl. 5. - Vrednosti koeficijenta  $k_v$

Za eksperimentalna određivanja vrednosti koeficijenta  $k_v$ , vršena su dugotrajna ispitivanja uticaja brzine na izduženja koraka lanca. Na osnovu ovih ispitivanja konstruisan je dijagram sl. 4, kao i dijagram zavisnosti koeficij-

#### 5.4 Definisanje dozvoljenog površinskog pritiska

Za definisanje dozvoljenog površinskog pritiska u širem opsegu broja zuba pogonskog lančanika i različitim brzinama, neophodno je osnovni pritisak ( $z_1 = 19$ ,  $v = 2,5 \text{ m/s}$ ) pomnožiti vrednostima koeficijenta broja zuba lančanika ( $k_z$ ) i koeficijenta uticaja brzine lanca ( $k_v$ ):

$$p_D = p_b \cdot k_z \cdot k_v$$

Vrednosti dozvoljenog površinskog pritiska, pogonskih lanaca Industrije "Filip Kljajić" date su u tabeli 2.

Ovako definisan dozvoljeni površinski pritisak uporedjivan je sa vrednostima pritisaka drugih proizvodjača lanaca, kao i vrednostima koje propisuju DIN. Analiza rezultata pokazuje da dozvoljeni površinski pritisak pogonskih lanaca Industrije "Filip Kljajić" leži u granicama pritisaka koje garantuju i drugi proizvodjači, a čini je kvalitet lanaca na nivou našeg proizvodjača, što je i eksperimentalno potvrđeno uporednim ispitivanjima.

**LOM T**

Laboratorija za obradu metala i tribologiju  
Mašinskog fakulteta u Kragujevcu  
34 000 KRAGUJEVAC, UL. Sestre Janjić br. 6  
Tel.: 034 67-500

**SA  
TRIBOLOGIJOM  
SE MOŽE  
VIŠE**

TABELA 2: DOZVOLJENI POVRŠINSKI PRITISAK POGONSKIH LANACA INDUSTRIJE "FILIP KLJAJIĆ":  $p_D | N/mm^2 |^*$

BRZINA LANCA $v(m/s)$	$B \ r \ o \ j \ z \ u \ b \ a \ c \ a \ z_1$														
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0,1	30,2	30,8	31,3	31,6	31,8	32,1	32,6	32,9	33,3	33,4	33,9	34,2	34,3	34,6	34,9
0,2	29,4	30,0	30,4	30,7	31,0	31,3	31,7	32,0	32,4	32,5	32,9	33,3	33,4	33,7	33,9
0,4	28,3	28,9	29,3	29,6	29,8	30,1	30,5	30,8	32,2	31,3	31,7	32,0	32,1	32,4	32,7
0,5	28,0	28,5	28,9	29,2	29,5	29,7	30,1	30,3	30,5	30,9	31,3	31,6	31,8	32,0	32,3
0,6	27,1	27,6	28,0	28,3	28,6	28,8	29,2	29,5	29,6	30,0	30,4	30,7	30,8	31,1	31,3
0,8	25,7	26,2	26,6	26,8	27,1	27,3	27,7	27,9	28,1	28,4	28,8	29,0	29,1	29,4	29,6
1,0	25,1	25,5	25,9	25,2	26,4	26,6	27,0	27,2	27,6	27,7	28,1	28,3	28,4	28,7	28,9
1,5	23,0	23,4	23,5	24,0	24,2	24,4	24,7	25,0	25,3	25,4	25,7	25,9	26,1	26,3	26,5
2,0	21,9	22,3	22,7	22,9	23,1	23,3	23,6	23,8	24,1	24,2	24,5	24,8	24,0	25,1	25,3
2,5	20,9	21,3	21,6	21,8	22,0	22,2	22,5	22,7	23,0	23,1	23,4	23,6	23,7	23,9	24,1
3,0	19,8	20,2	20,5	20,7	21,9	21,0	21,3	21,5	21,8	21,9	22,2	22,4	22,5	22,7	22,9
4,0	17,6	18,5	18,8	18,9	19,1	19,3	19,6	19,7	20,0	20,1	20,3	20,5	20,6	20,8	20,1
5,0	16,9	15,6	17,4	17,6	17,8	18,0	18,2	18,4	18,6	18,7	18,9	19,1	19,2	19,3	19,5
6,0		12,1	14,2	16,5	16,7	16,9	17,1	17,2	17,4	17,5	17,8	17,9	18,0	18,2	18,4
7,0			11,3	12,9	14,6	15,8	16,0	16,1	16,3	16,4	16,6	16,7	16,8	17,0	17,1
8,0				11,3	12,5	13,3	14,8	15,0	15,2	15,3	15,4	15,6	15,7	15,8	16,0
10,0					10,0	11,4	12,3	13,4	13,6	13,7	13,8	13,9	14,0	14,1	14,2
12,0						8,9	10,4	12,1	12,2	12,3	12,4	12,5	12,6	12,7	12,8

\* ) Istraživanja Sektora za razvoj i unapredjenje Industrije FKK u saradnji sa Mašinskim fakultetom u Kragujevcu

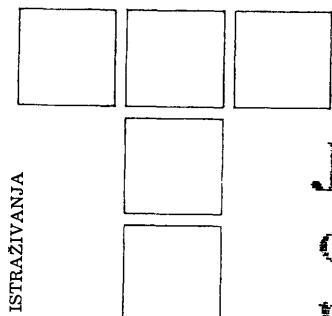
\*\*) Podvučene vrednosti po mogućtvu izbegavati.

## 6.0 ZAKLJUČAK

Višegodišnja istraživanja eksploatacijskih karakteristika pogonskih lanaca domaćeg proizvodjača, najvećim su delom bila usmerena ka definisanju osnovne eksploatacijske karakteristike, dozvoljenog površinskog pritiska. Pouzdano poznavanje ove karakteristike ima velikog značaja ne samo za pravilan izbor lanaca, već i za dalji razvoj i povećanje kvaliteta domaće proizvodnje.

## LITERATURA

- [1] ACHENBACH W.: Lebensdauerberachnung von Rollenketten, Ind. - Anz., 1968, 90, No 39, 799-804.
- [2] VOROBLJEV N.V.: Cepne peredači, Mašinostrojenie, Moskva, 1968.
- [3] DOUGHTIE L.V., VALLANCE A., KREISLE F.L.: Design of machine member, Mc Graw-Hill Book Company, New-York, San Francisko, Toronto, London, 1964.
- [4] GRUŠENKO I.P.: Osnovi projektirovanih cepnih peredač s vtulco-norolikovimi cepama, Lvov, 1964.
- [5] GLUŠENKO I.P., PETRIK A.A.: Cepne peredači, Tehnike, Kiev, 1973.
- [6] GOTOVCEV A.A., STOLBIN B.C., KOTEHOK P.N.: Projektirovanie cepnih peredač, Mašinostrojenie, Moskva, 1973.
- [7] GLEITEMANN: Auswahl und berechnung von kettentrieben, "Machinenmarkrt", 1969, 75, No 36, 756-760.
- [8] ČERNAVSKII A.C., ICKOVIĆ M.G., KISELEV A.B., BOKOV N.K., BONČOSMOLOVSKII A.M., KOZINCOV P.B.: Proektirovanie mehaničeskikh peredač, Mašinostroenie, 1976.
- [9] RACHNER G.H.: Stanlgelenkketten und kettentreibe, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 1962.
- [10] NEIMAN G.: Maschinenelemente, Sprigner-Verlag, Berlin-Berlin-New York, 1965.
- [11] VITAS D., TRBOJEVIĆ M.: Mašinski elementi III, Naučna knjiga, Beograd, 1971.
- [12] KATALOZI: - "Filip Kljajić"  
- "Köhler-Bovenkamp"  
- "JWIS"  
- "PTD DRESSER"  
- "DAIDO"  
- "JOSEF HENKENJOHANN KG"
- [13] STANDARDI: - JUS, ASA, DIN, GOST
- [14] TANASIJEVIĆ S.: Mehanički prenosnici, lančani prenosnici, kardanski prenosnici, Naučna knjiga, Beograd, 1983.
- [15] UČAEV N.P., VERPAHOVSKII J.S.: K voprosu eksperimentalnogo vpredelenija nagruženia elementov privodnoi rolikovoi ceri, Izvuz Mašinostroenie, 12, 1973.
- [16] VOROBLJEV N.V., GERASIMOV V.J.: K voprosu o vlini udeljnogog davlenija v šarnirah vtulčno-rolikovim cepi na in iznos, Izvuz Mašinostroenie, 2, 1971.



P. SIOCHANSI, F. A. SMIDT

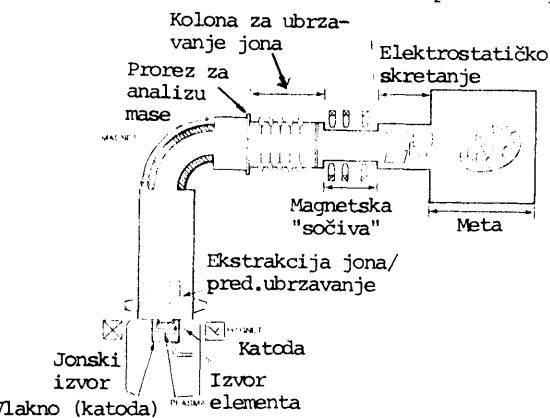
# Jonska implantacija kao metod oplemenjivanja površina u cilju modifikacije trenja i habanja materijala

(S engleskog preveo Dr Dobrivoje Ninković)

## UVOD

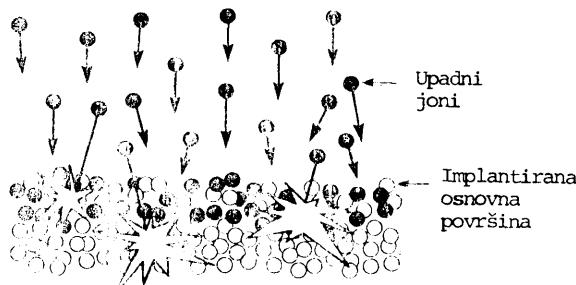
U opštem slučaju, proces jonske implantacije se sastoji od stvaranja jona odredjenog materijala, njihovog ubrzavanja, fokusiranja u mlaz i implantiranja u materijal u skladu sa željenom distribucijom. Na sl. 1. prikazana je šema ManTech jonskog implantatora. Jonski izvor pretvara atome ili molekule gase u jone, na taj način što ih bombarduje elektronskim mlazom u cilju formiranja plazme. Joni se odvode iz plazme pomoću električnog polja, fokusiraju magnetskom i elektrostatičkom "optikom" rasporedjenom duž njihove putanje, a zatim ubrzavaju do visokih energija gradijentom električnog potencijala. Najveći broj ovih uređaja koristi magnetski analizator za izdvajanje željenih jona po njihovom odnosu masa/nalelektrisanje. Glavni parametar koji određuje dubinu i distribuciju implantiranih jona je napon ubrzavanja. Što je ovaj napon viši, veća je i dubina implantacije jona u meti. Iako ima uređaja u kojima je korišćen napon od nekoliko miliona volti, praktični razlozi vezani sa cenom i gustom struje sužavaju opseg energija na 20 do 200 keV. Dubinski profil koncentracije na jednoj energiji približno je Gausovski. Superpozicijom nekoliko energija može se podesiti taj profil tako da se dobije uniformna koncentracija od površine do srednjeg nivoa jona maksimalne energije.

U procesu jonske implantacije energetski joni prodiru u osnovnu površinu i interaguju sa njenim materijalom (sl. 2), menjajući pri tom sastav i strukturu površinskog slo-



Sl. 1. - Šematski prikaz ManTech uređaja za jonsku implantaciju u korporaciji Spire

ja. Promene strukture dovode do formiranja drugih faza (karbida, nitrida) i otvrđivanja rastvora. Koliziona kaskada koju izazivaju ubrzani energetski joni istiskuje oko 1000 atoma (red veličine) iz njihovih položaja u rešetkama. U kovalentno vezanim materijalima, kao i u izvensnim opsezima sastava legura, ovaj nered se zadržava, tako da kristalna struktura površinskog regiona ostaje u veoma poremećenom amorfnom stanju. Ta struktura je analogna



Sl. 2. - Proces jonske implantacije

strukturi dobijenoj u brzo očvrnutim legurama, pri čemu se dobijaju promenjene deformacione osobine i reaktivnost površine. Ove metastabilne izmene strukture i sastava, izazvane u površinskom sloju jonskom implantacijom, često su stabilne u radnim uslovima. Prednosti jonske implantacije su:

- a) fleksibilnost, jer se bilo koji element može implantirati u bilo koju osnovu,
- b) nema termodinamičkih ograničenja, kao što su povišena temperatura (za difuziju), ili izazivanje hemijske reakcije,
- c) nema potrebe za dodatnom obradom ili termičkim postupcima, jer se jonska implantacija izvodi na sobnoj temperaturi,
- d) nema promene dimenzija dela, izmene oblika, a ni potrebe za njihovom završnom obradom, i
- e) nema diskretnog prelaza između površine i baznog materijala, jer se implantacija obavlja ispod originalne površine.

## OSNOVNI PRISTUPI POBOLJŠANJU OTPORNOSTI NA HABANJE

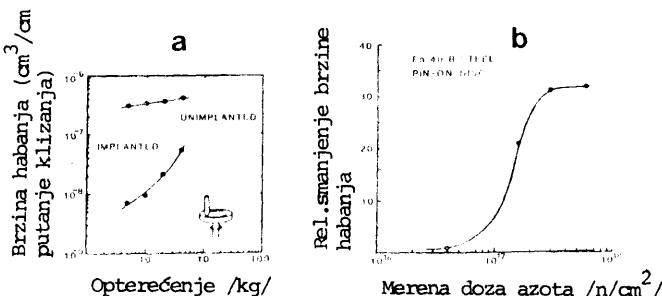
Primena jonske implantacije za poboljšanje otpornosti na habanje metala pratila je dva pristupa dobro poznata u industrijskoj praksi:

- povećanje čvrstoće (ili tvrdoće) površine, i
- smanjenje koeficijenta trenja.

Iako su ovi pristupi dobro poznati, jonska implantacija predstavlja inovativan put za njihovu primenu, koji često nije moguć konvencionalnim metodama površinske obrade, i kojim se izbegavaju problemi konvencionalnih metoda.

Prvi pristup (povećanje čvrstoće implantacijom), zasniva se na tradicionalnom metodu smanjenja habanja cementiranjem ili nitriranjem površina radi povećanja granične tečenja, i to putem očvršćivanja čvrstog rastvora, fiksiranjem dislokacija, ili disperzionim očvršćavanjem produkata implantacije. Iako dubina tretiranog sloja koja se dobija jonskom implantacijom može biti manja od one koju daje konvencionalna difuziona obrada, tretman na nižoj temperaturi ima prednosti, jer se izbegava krivljenje, naknadna temička ili završna obrada delova, dobija se bolja disperzija produkata implantacije, a štedi se i energija.

Rani eksperimenti Dearmley-a i Hartley-a [1,2], prikazani na sl. 3, ilustruju efekte otvrdnjavanja implanta-

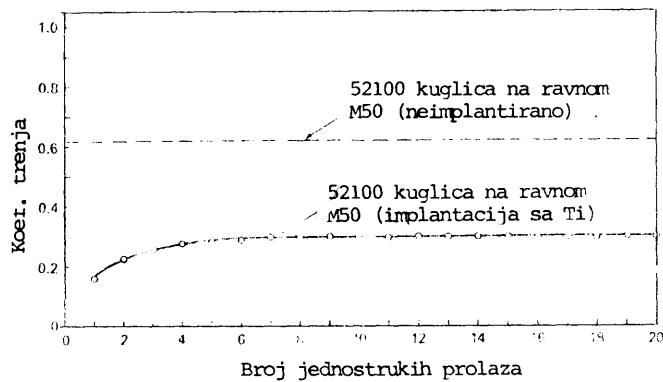


cijom  $N+$  u čelik EN40B. Iznad vrednosti praga od  $2 \times 10^{17} N+/cm^2$  na 50 keV, došlo je do bitnog smanjenja brzine habanja u testovima pin-on-disk. Poboljšanje otpornosti na habanje bilo je zavisno od opterećenja, pri čemu su najveća poboljšanja ostvarena na nižim opterećenjima. Brojni primjeri ovoga principa demonstrirani su na fero-legurama i čelicima, legurama titanijuma, berilijuma, i drugih metala. Iscrpne liste primera mogu se naći u preglednim radovima [1,3,4]. Sadašnji istraživački napor usmereni su na karakterizaciju strukture produkata formiranih tokom jonske implantacije, kao i na njihovu stabilnost kako tokom same implantacije, tako i fazi post-implantacionog poboljšanja [5,6]. Do redistribucije azota svakako dolazi na oko  $200^\circ C$  u nisko-legiranim čelicima, ali ne i u čelicima sa jakim azotnim formama.

*Tribologija u industriji*, god. XI, br. 2, 1989.

Drugi pristup (smanjenje koeficijenta trenja implantacijom) predstavlja značajan napredak u našem razumevanju kako implantacija može da se iskoristi za modifikovanje ponašanja pri habanju, kao i u našem razumevanju samog procesa habanja. U principu, radi se o smanjenju napona u pod-površinskom regionu putem smanjivanja koeficijenta trenja [7]. Primenom ovoga mehanizma, Singer [8] je objasnio kako jonska implantacija može ili da smanji habanje putem smanjenja zamornog oštećenja pri datom normalnom opterećenju, ili da povisi prag Hercovog napona pri kome počinje intenzivno habanje.

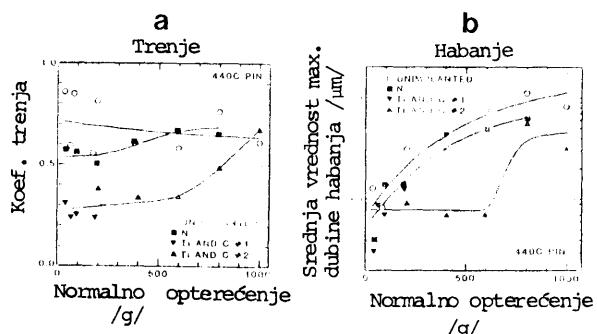
Primeri ovoga mehanizma zapaženi su u eksperimentima izvedenim u NRL, u kojima su elementi poznati po dobrom stvaranju karbida (Ti, Ta, Nb) implantirani u poboljšane čelike, kao što su 52100, M50, ili M-2. Auger analiza pokazala je da molekuli koji nose ugljenik hemijski absorbuju u vakuumskoj komori implantirani Ti, koji je nanet na površinu naprskavanjem (sputtering). Ugljenik difunduje prema osnovnom materijalu brzinom koju povećavaju koncentracije visokih defekata proizvedene implantacijom, formirajući konačno amorfni Fe-Ti-C sloj debljine 50 nm pri implantaciji na 190 keV i gustini od  $5 \times 10^{17}$  jona/cm<sup>2</sup> [9]. Analizom površine na licu mesta [10], dobijene su detaljne informacije o uslovu neophodnom za uključivanje ugljenika u površinu, a modelskim eksperimentima [11] taj uslov je doveden u vezu sa fizičkim procesima. Ustanovljeno je da se posle implantacije Ti, koeficijent trenja smanjuje od 0,6 na 0,3 (sl. 4), u testu pri početnom Hercovom kontaktnom napunu od 830 MPa i brzini klizanja od 0,1 mm/s [10]. Merenjima ultra-mikrotvrdote na uzrocima implantiranim pod sličnim uslovima nije ustavljeno povećanje površinske tvrdoće [12].



Sl. 4. - Kinetički koeficijent trenja čelika 52100, implantiranog sa  $4,6 \cdot 10^{17}$  jona/cm<sup>2</sup> titanijuma na 190 keV

Testovi habanja uzoraka implantiranih Ti jonica vršeni su u različitim uslovima Hercovog napona, brzine klizanja i podmazivanja. Skorašnji primer jednog od značajnijih eksperimenta bio je Faville-6 test koji je izvršio Ramalingam u zajednici sa NRL [13]. Ovaj test su razvili Begelinger i DeGee [14], u cilju prikazivanja prelaznih režima "scuffing" habanja pri različitim Her-

covim naponima i brzinama klizanja. U uredjaju se koristi sferični klizač opterećen pomoću rotacione podloške. Eksperimenti o kojima je reč izvedeni su na uzorcima potpuno otvrđnutog čelika M-2, implantiranog sa  $3.5 \times 10^{17}$  jona/cm<sup>2</sup> na 55 keV sa  $7 \times 10^{17}$  jona/cm<sup>2</sup> na 190 keV, koji su ispitani u opsegu brzina klizanja od 10 do 100 mm/s u uslovima podmazivanja mineralnim uljem. Prelazak na "scuffing" habanje, koji se manifestuje kao promena koeficijenta trenja tokom dvosatnog testa, zabeležen je na 815 MPa kod netretiranih uzoraka, odn. na 1625 MPa u slučaju implantacije na 55 keV. U nekim skorijim testovima izvršenim sa čelikom 9310 posle implantacije Ta ionima, u simuliranim eksploatacionim uslovima na Ryder-ovim zupčanicima, ustanovljeno je povećanje nosivosti od 30% [15]. Ovi testovi pokazuju da se metodom smanjenja koeficijenta trenja kod čelika za ležišta i alate mogu postići značajna poboljšanja otpornosti na habanje, pri vrednostima Hercovog napona i brzine klizanja koje su tipične za praksu. Još ubedljivija povećanja otpornosti na habanje postignuta su kombinovanjem metoda smanjenja trenja sa povećanjem tvrdoće pod površinskog regiona, što ilustruju dvojne implantacije Ti i C, izvršene u Sandia Laboratories, i objavljene od strane Pope-a i dr. u nizu radova. Od posebnog značaja za ovu diskusiju su pin-on-disk testovi habanja čelika 440C, implantiranog sa Ti+C, i istog čelika, implantiranog sa N [16]. U prvom slučaju (Ti+C), upotrebljen je ukupan fluks od  $2 \times 10^{17}$  jona/cm<sup>2</sup>, pri čemu je dobijen sloj debljine 75 nm sa 20 at.% Ti i 20 at.% C. Pin-on-disk testovi, izvršeni su u uslovima bez podmazivanja, pri brzini klizanja od 17 mm/s i rastućem opterećenju, u cilju praćenja koeficijenta trenja i profila zone habanja (sl. 5). U



Sl. 5. - (a) Koeficijent trenja za nepodmazani pin-on-disk test, u funkciji opterećenja, za jonski implantirani AISI 440C čelik. Titanijum je implantiran sa energijama između 90 i 180 keV, do totalne doze od  $2 \cdot 10^{17}$  Ti+/cm<sup>2</sup>, ugljenik sa 30 keV do doze od  $2 \cdot 10^{17}$  C+/cm<sup>2</sup>, a azot sa 50 keV do doze od  $4 \cdot 10^{17}$  N+/cm<sup>2</sup> (prema Pope i dr. [16]). (b) Srednja vrednost maksimalne dubine habanja u funkciji opterećenja, za uzorce čelika 440C, opisane pod (a).

slučaju 440C implantiranog sa Ti+C došlo je do smanjenja koeficijenta trenja od 0,65 (netretirani uzorak) na 0,3 pri opterećenjima sve do nivoa od 600 g. Intenzitet habanja je takođe ostao konstantan sve do 600 g, odakle sledi prag habanja od 3800 MPa, u odnosu na 1225 MPa kod netretiranog uzorka. Suprotno ovome, implantacijom azota dobijene su veoma male promene u otpornosti na habanje. Ovi testovi ukazuju na prednosti kombinovanja niskog koeficijenta trenja sa otvrdnutim, nešto dubljim površinskim slojem, kao i na relativno slabu efikasnost implantacije azota u martenzitne čelike. Nedavne studije uloge amorfog sloja dobijenog u čeliku 304 SS implantacijom sa  $2 \times 10^{17}$  Ti+ i C+/cm<sup>2</sup>, pokazale su se 30-procentno smanjenje koeficijenta trenja gubi posle rekristalizacije amorfog sloja na 650°C [17]. Međutim, otpornost na habanje je i dalje bila visoka zbog formiranja TiC produkata tokom rekristalizacionog otpuštanja.

Prema tome, jonska implantacija može da poveća otpornost na habanje ležajnih i alatnih čelika smanjenjem koeficijenta trenja na površini i stvaranjem tankog, tvrdog sloja toj površini. Treba imati u vidu i činjenicu da je implantirani region 10 do 50 puta manji od regiona u kom se oseća dejstvo Hercovog napona, pa zato otvrdnjavanje tankog površinskog regiona manje uspešno smanjuje trenje od otvrdnjavanja legiranjem. Zato je otvrdnjavanje jonskom implantacijom manje efikasno na visokim opterećenjima od prevlake nanete nekim od procesa nanošenja u pari, mada se i u tim uslovima može odložiti "zaorava-nje" površine, uvođenjem u kontakt EHD, oksida, ili graničnog sloja. Potrebna su dopunska istraživanja da bi se utvrdio optimum između debljine i plastičnosti tvrdih, tankih slojeva. Smanjenje trenja, čak iako se ne stvoriti tvrd površinski sloj, podiže prag "scuffing" habanja u uslovima podmazivanja za 30 do 100%. U ovom opsegu napona trebalo bi očekivati i povoljne efekte sa aspekta veka. Potrebna su dodatna istraživanja u cilju utvrdjivanja promenljivosti jonske implantacije za zaštitu od habanja u uslovima klizanja sa podmazivanjem pri većim brzinama (reda 100 mm/s), koji su tipični za moderne mašine.

#### ZAŠTITA OD HABAJA LEŽAJEVA I ZUPČANIKA

Dokazano je da proces jonske implantacije predstavlja atraktivan metod tretmana površina u slučaju preciznih ležajeva i zupčanika u vazduhoplovnoj industriji. Zupčanici i ležajevi predstavljaju dobre primere delova sa uskim dimenzionim tolerancijama, kod kojih je retko koji konvencionalni metod modifikacije površina promenljiv. Pored toga, opasnost delaminacije čini nanošenje prevlaka na ove komponente veoma rizičnim. Očuvanje dimenzija i kvaliteta površine kod preciznih ležajeva i zupčanika, kao i odsustvo oštrog prelaza između implantiranog sloja i osnovnog materijala, koje se postiže jonskom implantacijom, uklanja opasnost od delaminacije tvrdih prevlaka. Prema tome, jonska implantacija predstavlja idealan metod za obradu osjetljivih delova za primenu u vazduhoplovstvu i svemirskoj industriji. Primeri jonski implantiranih delova u ovim oblastima dati su u tabeli 1.

Površine implantirane titanijumom i ugljenikom pokazuju ne samo umanjeno habanje pri klizanju, već i stabilniji i predviđljiviji karakter habanja. Pored toga, nizak intenzitet habanja je nezavisan od materijala koji

Tabela 1. - Uspešni primeri jonske implantacije sa aspekta poboljšanih karakteristika habanja na polju vazduhoplovstva i kosmičke tehnike

Komponenta	Funkcija	Materijal	Joni	Rezultati
Ležajevi turbopumpi	Glavni motor Space Shuttle	Nerdjajući čelik 440C	Ti+C Cr+N	Povećana otpornost na habanje [19]
Instrumentalni ležajevi	Žiroskop	Čelik 52100 Nerdj.čelik 440C	Ti+C	Povećana otpornost na fretting [20]
Korozioni ležajevi glavnog vratila	Mlazni motor	Čelik M-50 Čelik M-50NIL	Cr Ta	Poboljšana otpornost [21]
Ležajevi glavnog vratila	Mlazni motor	Čelik M-50 Čelik M-50NIL	Ta	Poboljšan RCF [22]
Zupčanici	Prenosnik snage helikoptera	Čelik 9310	Ta	Smanjeno "scuffing" habanje [21]
Zupčanici	Kompressor mlaznog motora	Čelik 9310	Ta	" "
Klipni kompresori	Kompressori ras- hladn.uredjaja	M-2	Ti+C	Znatno smanjeno habanje [23]
Gasni ležajevi za instrumente	Žiroskop	Be	B	Smanjeno trenje Smanjeno habanje [24]

klizi po površini čelika 52100, implatiranoj titanijumom i ugljenikom. Rezultati tog istraživanja potvrđuju da se na površini implantirane komponente stvara oksidni sloj koji smanjuje direktni kontakt između metala kliznog para.

Jonska implantacija titanijuma, praćena ugljenikom, iskorišćena je od strane velikog broja istraživača u cilju povećanja otpornosti na habanje ležišnih čelika tipa 52100 i 440C. Sioshansi i Au [18] postigli su značajna poboljšanja otpornosti na habanje površina u podmazanom kliznom kontaktu sa čelikom 52100, jonski implatiranim titanijumom i ugljenikom.

Skorašnja istraživanja u oblasti preciznih ležajeva pokazuju da se implantacijom titanijuma i ugljenika bitno povećava otpornost na habanje legura 52100 i 440 C [20]. Poboljšane karakteristike ležajeva za instrumente, koje su rezultat jonske implantacije, pripisuju se eliminaciji dodira i zahvata neravnina, kao i hladnog zavarivanja između kuglica i prstena, pri graničnim uslovima podmazivanja. Uspesna primena jonske implantacije kod ležajeva za instrumente predstavlja glavni probaj ove tehnike. Zbog malih dimenzija, moguće je jonskom implantacijom lako tretirati velike količine kugličnih ležajeva. Tretmanu se mogu podvrgnuti i kuglice i prsten ležaja. Opšte je mišljenje da kuglice i prsten treba različito tretirati. Predviđa se da će se jonski implatirani ležajevi za instrumente uskoro naći u širokoj primeni.

Možda najdramatičnije dosadašnje poboljšanje kugličnih ležajeva ostvareno je u turbopumpama za oksidant u glavnom motoru raketoplana NASA (Space Shuttle) [19]. Implantacija različitih jona u kuglice i prsten dovodi do bitnog smanjenja korozivnog habanja u tim ležajevima. Konkretno, testovi habanja izvršeni u tečnom azotu sa ležajevima čije su kuglice od nerdjajućeg čelika implantirane sa Ti i C, a prsten od 440C jonica Cr i N, pokazali su da se otpornost na habanje povećava za dva reda veličine u odnosu na netretirani 440C. Od tada je jonska implantacija obavezna za pumpe oksidanata niskog pritiska u programu Space Shuttle.

Jonska implantacija u-zoraka ležajeva i zupčanika tantalom izvršena je u NRL [21], i, nezavisno, u korporaciji Spire. Tantal je posebno interesantan za tretiranje čelika za ležajeve i zupčanike jer, primjenjen na legure gvožđa, može da im poboljša i otpornost na habanje, i otpornost na koroziju. Napori NRL bili su usmereni na implantaciju tantalovih jona u zupčanike od čelika 9310 u uslovima klizanja i "scuffing" habanja. Ostvarena su značajna smanjenja trenja i habanja različitih čeličnih elemen-

ata. U korporaciji Spire, tantal je implantiran u zupčanike kompresora gasnih turbina i helikopterskih prenosnika. Preliminarni laboratorijski rezultati pokazuju da zupčanici implantirani tantalom imaju bolje karakteristike od konvencionalnih zupčanika, kao i da se, u mnogim slučajevima, "scuffing" habanje može drastično smanjiti. Eksploataciona ispitivanja zupčastih parova tretiranih titanijumom i ugljenikom pokazuju da se u kompresorskoj sekciji gasnih turbina ostvaruju veoma dobre performanse.

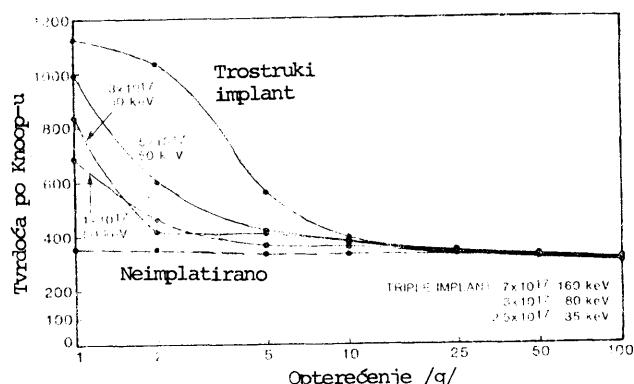
Implantacija jona bora u berilijum izvršena je 1979. godine [24]. Posle tretmana jonica bora, berilijumski gasni ležajevi znatno se manje habaju, a imaju i upadljivo manji koeficijent trenja. Slična istraživanja berilijumskih, odnosno ogledala prevučenih berilijumom, pokazuju da se procesom jonske implantacije postiže veća tvrdoća površine i povećava otpornost na abrazivno i adhezivno habanje.

#### ZAŠTITA OD HABANJA NA POLJU BIOMEDICINE

Poznato je da se jonskom implantacijom može veoma efikasno smanjiti habanje totalnih ortopedskih veštackih zglobova na bazi titanijuma [23]. Izvanredna otpornost na habanje je rezultat povišene tvrdoće titanijumske legure (Ti-6Al-4V), kao i smanjenog koeficijenta trenja, do čega dolazi usled homogenizacije dvofazne legure i formiranja nitrida, oksida i karbida na površini titanijumskih elemenata.

Nova generacija ortopedskih proteza izradjuje se od legure Ti-6Al-4V, zbog njene idealne bio-kompatibilnosti. U poređenju sa tradicionalnom legurom kobalt-hrom-molibden, ta legura ima izvanrednu otpornost na koroziju, visoku otpornost na zanor, kao i manji modul elastičnosti, što je čini povoljnijim partnerom za kost. Pri totalnoj zameni zgloba, titanijumska komponenta se oslanja na polietilensku površinu od materijala sa ultra-visokom molekulskom težinom (UHMWPE). Povećana otpo-

most na habanje legure Ti-6Al-4V je od velikoj značaja za ortopedsku struku. Jonska implantacija elemenata kao što su azot i ugljenik u komponente od Ti-6Al-4V, povećava mikro-tvrdoću ove legure [23]. Na sl. 6. prikazano je povećanje tvrdoće u funkciji opterećenja, za različite uslove implantacije. Lako se može postići trostuko povećanje mikro-tvrdoće kod ovih legura. Najnoviji rezultati istraživanja izvršenih na MIT 25 pokazuju da implantacija azota u Ti-6Al-4V menja dvo faznu mikrostrukturu (izgled alfa i beta mikropločica) Ti-6Al-4V ploča, i čini materijal nepropusnim za standardne nagrizajuće rastvore. Oliver i dr. [26] postigli su smanjenje koeficijenta trenja legure Ti-6Al-4V od 0,48 na 0,15, posle implantacije azota pri 100 keV i totalnom fluksu od  $4 \cdot 10^{17}$  jona/cm<sup>2</sup>.



Sl. 6. - Povećanje mikrotvrdoće legure Ti-6Al-4V u funkciji doze i energije jona azota

Smatra se da su povećana tvrdoća i smanjen koeficijent trenja kod titanijumskih legura razlog za smanjen intenzitet habanja površine od UHMWPE [27, 28]. Williams i Buchanan [29] su utvrdili da se, u njihovom eksperimentu, korozivno habanje para titanijum-polietilen smanjuje za 1000 puta.

Značajno smanjenje habanja sistema titanijum-UHMWPE ubedilo je proizvodjače ortopedskih proteza da uvedu proces jonske implantacije u svoji proizvodnji. Ta aplikacija je već postigla svoju tržišnu zrelosć. Utinski se jonskoj implantaciji podvrgavaju velike količine titanijumskih ortopedskih kolena i kukova, kao i manje količine zglobova šake, laktova, ručnih i nožnih prstiju. (IONGUARD je registrovan zaštitni znak Korporacije Spire za obradu titanijumski-baziranih ortopedskih pomagala).

#### ZAŠTITA OD ZAMORA

Uprkos maloj dubini koja se postiže pri jonskoj implantaciji, dokazano je da se ovim procesom postiže povećanje otpornosti na habanje različitih metalnih površina. Poboljšanje karakteristika zamora površine pripisuje se povećanoj homogenizaciji, otvrdnjavanju produkata, i jakom kompresionom naponu koji se stvara jonskom implantacijom. Proces jonske implantacije se opisuje kao mikroskopsko bombardovanje kuglicama (Shot Peening), čime se povećava površinska gustina komponenata. Dokazano je da se ovim procesom uspešno održa-

formiranje inicijalnih prskotina [33]. Od naročitog značaja za oblast ležajeva je vrsta zamornog oštećenja nazvana zamor pri kotrljanju (Rolling Contact Fatigue - RCF). Ovaj efekat predstavlja glavni kvantitativni uzrok oštećenja jako opterećenih ležajeva na glavnom vratilu gasnih turbina. Uzrok RCF je polje visokog Hercovog napona u pod površinskom regionu, pri ponavljanom opterećenju površine. Kustas, Mohan i Sioshansi [30] postigli su povećanje veka od 40% u odnosu na RCF u slučaju čelika 440C podvrgnutog implantaciji titanijuma i azota. Producen vek šipki od 440C pripisuje se distribuciji opterećenja i promenama mikroskopskog kvaliteta površine uzorka.

U nezavisnoj studiji, tim GE/Spire/MIT [22] podvrgao je implantaciji različitim elementima RCF uzorke M50 i M50 NIL, u cilju proučavanja otpornosti na koroziju. Kasnije ispitivanje RCF uzorka pokazalo je da jonska implantacija ne samo što efikasno povećava otpornost na koroziju, već i znatno produžava RCF vek čelika M50. Testovi zamora jasno su pokazali da se implantacijom tantala u elemente izložene RCF postiže trostuko povećanje Wejbulove krive, kao i različit nagib krive zamora.

Podaci o testovima zamora pri velikim amplitudama, izvršenim sa legurama titanijuma, nikla, bakra i čelika uporedjeni su od strane nekoliko autora [28, 29, 30]. Proses jonske implantacije pokazao je pozitivne efekte i u slučajevima naponskih, kao i u slučajevima deformacionih zamornih eksperimenta. Laki intersticijalni elementi, kao što su B, C i azot, uspešno su upotrebljeni u najvećem broju eksperimenta.

#### ZAKLJUČCI

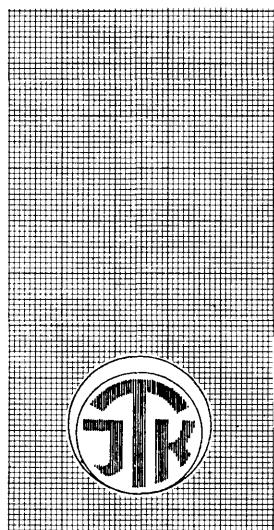
Jonska implantacija predstavlja sredstvo za postizanje željenog sastava površine i strukture površinskih slojeva. Laboratorijskim eksperimentima je dokazano da se parametri habanja u eksploatacionim uslovima mogu značajno popraviti modifikacijama koje smanjuju koeficijent trenja, ili povećavaju tvrdoću, ili oba istovremeno. Ovo važi u slučaju da tokom radnog veka elementa ne dodje do naglog uklanjanja implantiranog sloja. Studijama tehnološke primenljivosti jonski implantiranih komponenata demonstrirane su poboljšane karakteristike i ekonomska isplativost metode u primenama na poljima biomedicine i vazduhoplovne industrije. U slučaju nekoliko biomedicinskih aplikacija već je počela industrijska primena, a nekoliko vazduhoplovnih aplikacija nalaze se u fazi prototipske proizvodnje.

#### LITERATURA

1. N.E.W. HARTLEY, in Treatise on Materials Science and Technology: Vol. 18, Ion Implantation, ed. by J.K. Hirvonen, Academic Press, NY, p. 321 (1980).
2. G. DEARNALEY, in Ion Implantation Metallurgy, eds. C.M. Pearce and J.K. Hirvonen, The Metallurgical Society of AIME, pp. 1-20, 1980.

3. G.K. HUBLER, in Surface Alloying by Ion, Electron and Laser Beams, ed. by L.E. Rehn, S.T. Picraux, and H. Wiedersick, ASM, Metals Park, OH, p. 287, (1987).

4. I. L. SINGER in Ion Implantation and Ion Beam Processing of Materials, eds. G.K. Hubler, O.W. Holland, C.R. Clayton and C.W. White, North Holland New York, p. 585 (1984).



# YUTRIB '89

Prva jugoslovenska konferencija  
o t r i b o l o g i j i

- razmenom informacija iz tribologije
- prezentacijom savremenih rezultata (teorijskih, eksperimentalnih i primjenjenih istraživanja)

obezbedjuje uticaj na produktivnost proizvodnih procesa, pouzdanost funkcionalanja i vek trajanja opreme, potrošnju energije i nivo troškova proizvodnje...

Prva jugoslovenska konferencija o tribologiji održava se od 20. do 22. septembra 1989. god. u Kragujevcu.

Časopis TRIBOLOGIJA U INDUSTRII će, kao i do sada, prezentirati ova dostignuća, tražeći i načine za podizanje efikasnosti naše industrije.

S TRIBOLOGIJOM SE MOŽE VIŠE !