Trošenje prstena kliznog ležaja prevučenog prevlakama TiN i TiCN u uvjetima mješovitog trenja

Martinez, Matteo

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:395844

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Matteo Martinez

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Darko Landek, dipl. ing. Matteo Martinez

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem mentoru prof. dr.sc. Darku Landeku za svu pomoć i pristupačnost tijekom pisanja ovoga rada.

Ovaj rad, kao i svoje studiranje, posvećujem mojoj majci Ines i posebno mojoj baki Ljubici, koja je preminula u travnju 2020. godine, za svu ljubav, toplinu i podršku pružanu tijekom mog života i obrazovanja.

Matteo Martinez

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-04/21-6/1	
Ur. broj: 15-1703-21	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MATTEO MARTINEZ** Mat. br.: 0035211523

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Trošenje prstena kliznog ležaja prevučenog prevlakama TiN i TiCN u uvjetima mješovitog trenja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Wear of sliding bearing ring coated with TiN and TiCN coatings under mixed friction conditions**

Opis zadatka:

Prsteni ležaja izloženi su u radu dinamičkim naprezanjima, kontaktnim pritiscima, trošenju i koroziji. Primjenom nitriranja ili prevlačenja površina moguće je značajno povisiti otpornost na koroziju i trošenje te smanjiti trenje u ležajevima. Smanjenje trenja između rukavca osovine i prstena kliznog ležaja posebno je značajno u uvjetima mješovitog trenja pri pokretanju i zaustavljanju ležaja, dok se još nisu uspostavili uvjeti hidrodinamičkog podmazivanja. U teorijskom dijelu rada treba opisati zahtjeve na klizne ležajeve i relevantna svojstva metalnih materijala, posebnosti toplinske obrade čelika za ležajeve i tribološka svojstva modificiranih i prevučenih površina ležajeva.

U eksperimentalnom dijelu rada treba planirati i provesti nitriranje u plazmi i prevlačenja prstena kliznog ležaja od čelika EN DIN 100Cr6 prevlakama TiN i TiCN. Na nitriranim i prevučenim uzorcima provesti ispitivanja:
- hrapavosti i tvrdoće površine
- adhezivnosti i debljine prevlaka
- adhezijskog trošenja prstena i prizme od ležajne bronce u uvjetima mješovitog trenja.

Na temelju rezultata ispitivanja predložiti toplinsku obradu prstena kliznog ležaja koja će omogućiti najbolju otpornost na adhezijsko trošenje u kliznom kontaktu s ležajnom broncom.

Navesti u radu korištenu literaturu i stručnu pomoć.

Zadatak zadan:
6. svibnja 2021.

Rok predaje rada:
8. srpnja 2021.

Predviđeni datum obrane:
12. srpnja do 16. srpnja 2021.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA IV
POPIS OZNAKA V
POPIS KRATICA VI
SAŽETAK VII
SUMMARY VIII
1. UVOD 1
2. KLIZNI LEŽAJEVI 3
2.1. Osnovna podjela i podmazivanje kliznih ležajeva 3
2.2. Zahtjevi na materijale za klizne ležajeve 5
2.3. Materijali za izradbu kliznih ležajeva 5
2.4. Toplinska obrada i svojstva čelika EN DIN 100Cr6 9
3. MODIFICIRANJE I PREVLAČENJE METALNIH LEŽAJEVA 15
3.1. Fizikalno prevlačenje iz parne faze 15
3.2. Kemijsko prevlačenje iz parne faze 16
3.3. Plazmom potpomognuto prevlačenje iz parne faze 17
4. KARAKTERIZACIJA POVRŠINE MATERIJALA 19
4.1. Ispitivanje hrapavosti površine 19
4.2. Ispitivanje prionjivosti prevlake 21
4.3. Debljina prevlake 23
4.4. Otpornost na adhezijsko trošenje 26
5. PRIPREMA I PROVEDBA ISPITIVANJA 29
5.1. Materijal i toplinska obrada uzoraka 29
5.2. Ispitivanje prionjivosti prevlake 33
5.3. Ispitivanje adhezijskog trošenja 34
6. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA 38
6.1. Prionjivost PVD i PACVD prevlaka 38
6.2. Debljina PVD i PACVD prevlaka 39
6.3. Hrapavost površine 41
6.4. Adhezijsko trošenje 43
7. ZAKLJUČAK 54
LITERATURA 55
PRILOZI 56

POPIS SLIKA

Slika 1. Stribeckova krivulja i načini podmazivanja kliznog ležaja [2] 4
Slika 2. Mikrostruktura čelika EN DIN 100Cr6 (ASTM 52100) u toplom valjanom stanju [4] 8
Slika 3. Mikrostruktura čelika EN DIN 100Cr6 (ASTM 52100) nakon sferoidizacijskoga žarenja [4] 9
Slika 4. Dinamička izdržljivost čelika EN DIN 100Cr6 u ovisnosti o količini kisika [7].. 11
Slika 5. Kontinuirani TTT dijagram za čelik ASTM 52100 (EN DIN 100Cr6) [4] 11
Slika 6. Kontinuirani TTT dijagram za čelik EN DIN 100Cr6 [8] 12
Slika 7. Dijagram popuštanja za čelik EN DIN 100Cr6 [8] 13
Slika 8. Dijagram postupka toplinske obrade za čelik EN DIN 100Cr6 14
Slika 9. Shema uređaja za PVD postupak [10] 16
Slika 10. Shema uređaja za CVD postupak [11] 17
Slika 11. Shema uređaja za PACVD postupak [11] 18
Slika 12. Procjenjivanje hrapavosti površine koristeći srednju aritmetičku sredinu R_a [2].. 20
Slika 13. Procjenjivanje hrapavosti površine određivanjem maksimalne visine profila R_z [2] 20
Slika 14. Postupak ispitivanja prionjivosti prevlake [12] 21
Slika 15. Vrste kvarova kod ispitivanja prionjivosti prevlake [12] 22
Slika 16. Oštećenja prevlake nakon utiskivanja indentora [12] 23
Slika 17. Uređaj Kalotester [13] 23
Slika 18. Postupak ispitivanja debljine prevlake [13] 24
Slika 19. Postavljanje loptice i vretena s obzirom na rotacijsku os [13] 25
Slika 20. Princip ispitivanja metodom prizma po prstenu [14] 27
Slika 21. Prsten ležaja od čelika 100Cr6 29
Slika 22. PACVD uređaj 30
Slika 23. PVD uređaj 30
Slika 24. Izgled prstenova nakon prevlačenja i ispitnih uzoraka od ležajne bronce nakon pokusa trošenja 33
Slika 25. Ispitivanje prionjivosti prevlake dijamantnim indentorom 34
Slika 26. Uređaj za ispitivanje adhezijskog trošenja 35
Slika 27. Uzorak postavljen na držač uzorka i osiguran vijkom 35
Slika 28. Uteg na držaču utega 36
Slika 29. Ispitivanje adhezijskog trošenja 37
Slika 30. Mjesto ispitivanja prionjivosti prevlake na prstenu P2 38
Slika 31. Mjesto ispitivanja prionjivosti prevlake na prstenu P3 38
Slika 32. Mjesto ispitivanja prionjivosti prevlake na prstenu P4 39
Slika 33. Mjesto ispitivanja prstena P2 kalotestom 40
Slika 34. Profil hrapavosti za ležajnu broncu Cu-Pb 41
Slika 35. Profil hrapavosti za neprevučeni prsten 100Cr6 41
Slika 36. Profil hrapavosti za prsten nitriran u plazmi 42
Slika 37. Profil hrapavosti za prsten s prevlakom PACVD TiCN/TiN 42
Slika 38. Profil hrapavosti za prsten s prevlakom PVD TiN 42
Slika 39. Profil hrapavosti za prsten s prevlakom PACVD TiN/TiCN 42
Slika 40. Promjena sile trenja u vremenu za ispitni par P0/B0-00 44
Slika 41. Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P0/B0-00 44
Slika 42. Promjena sile trenja u vremenu za ispitni par P0/B0-11 45
Slika 43. Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P0/B0-11 45
Slika 44. Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P1/B1-0 46

Slika 45. Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P1/B1-1 46
Slika 46. Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P2/B2-00 47
Slika 47. Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P2/B2-11 47
Slika 48. Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P3/B3-0 48
Slika 49. Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P3/B3-1 48
Slika 50 Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P4/B4-0 49
Slika 51. Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P4/B4-1 49
Slika 52. Mjerenje traga trošenja za P0/B0-0 51
Slika 53. Mjerenje traga trošenja za P0/B0-1 52

POPIS TABLICA

Tablica 1. Zahtjevi na materijale za klizne ležajeve [3] ... 6
Tablica 2. Usporedba svojstava materijala za klizne ležajeve [3] ... 6
Tablica 3. Kemijski sastavi najčešće korištenih čelika za izradu kliznih ležajeva [4] ... 8
Tablica 4. Kemijski sastav čelika EN DIN 100Cr6 u % [5] ... 9
Tablica 5. Parametri kaljenja za čelik EN DIN 100Cr6 [5] ... 10
Tablica 6. Parametri popuštanja za čelik EN DIN 100Cr6 [5] ... 13
Tablica 7. Parametri postupka nitriranja u plazmi ... 31
Tablica 8. Parametri PACVD postupka za prevlaku TiCN/TiN ... 31
Tablica 9. Parametri PACVD postupka za prevlaku TiN/TiCN ... 32
Tablica 10. Vrijednosti debljine prevlake za prstenove P2, P3 i P4 ... 40
Tablica 11. Vrijednosti parametra hrapavosti za ležajnu broncu i ispitivane prstene ... 41
Tablica 12. Karakteristične vrijednosti sile trenja ... 50
Tablica 13. Karakteristične vrijednosti faktora trenja ... 50
Tablica 14. Srednja vrijednost tragova trošenja. ... 52

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
D	µm	vanjski promjer udubljenja
d	µm	unutarnji promjer udubljenja
e	µm	debljina prevlake
F_N	N	normalna sila
F_{tr}	N	sila trenja
g	m^2/s	gravitacija Zemlje
h	m	udaljenost dviju površina na mjestu x
R	µm	polumjer kuglice
R_a	µm	srednje aritmetičko odstupanje profila
R_t (R_{max})	µm	ukupna visina profila
R_z	µm	maksimalna visina profila
ln	µm	referentna duljina (duljina uzorka)
lr	µm	duljina vrednovanja
m	kg	masa
n	µm	broj točaka za procjenjivanje visine profila uzduž l
η	MPa · s	dinamička viskoznost maziva
t	s, min, h	vrijeme
ϑ	°C	temperatura
p_{sr}	N/mm^2	srednji pritisak u ležaju
S	mm	udaljenost mete od senzora
S_{max}	mm	maksimalna udaljenost mete od senzora
$S_{trenutni}$	mm	trenutna udaljenost mete od senzora
U	V	napon
u	mm	pomak
μ	N/N	faktor trenja
v	m/s	relativna brzina klizanja između dviju površina
$y(x)$, y_i	µm	visina profila hrapavosti s obzirom na srednju referentnu crtu
y_{pi}	µm	visina i-tog najvišeg vrha
y_{vi}	µm	udubina i-te najniže udoline
x	µm	dužina uzduž mjerne duljine

POPIS KRATICA

Kratica	**Opis**
BDP	Bruto domaći proizvod
CVD	*Chemical Vapour Deposition* – kemijsko prevlačenje parom
FSB	Fakultet strojarstva i brodogradnje
HRC	*Hardness by Rockwell* – tvrdoća po Rockwell-u
NRC	*National Research Center* – nacionalni centar za istraživanje
PACVD	*Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition* – kemijsko prevlačenje parom uz pomoć plazme
PC	*Physical Coating* – prevlačenje fizikalnim putem
PVD	*Physical Vapour Deposition* – fizikalno prevlačenje parom
SKF	*Svenska Kullagerfabriken* – Švedska tvornica za proizvodnju kugličnih ležajeva

SAŽETAK

Trošenje materijala je jedan od najvećih uzroka troškova u u industrijskoj proizvodnji i eksploataciji proizvoda i opreme. Iako nije moguće ukloniti trošenje, moguće ga je smanjiti određenim postupcima i metodama, što je glavna tematika ovoga rada.

U teorijskom dijelu rada su opisani klizni ležajevi i zahtjevi na klizne ležajeve, postupci toplinske obrade materijala za klizne ležajeve, postupci modificiranja i prevlačenja površine kliznih ležajeva te ispitivanje svojstava. U eksperimentalnom dijelu provedena su ispitivanja hrapavosti površina, prionjivosti i debljine PVD i PACVD prevlaka te ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje i određivanje faktora trenja u tribo paru ležajna bronca – prevučeni prsten s i bez podmazivanja. Najmanji faktor trenja pokazao je tribopar ležajna bronca- prsten nitriran u plazmi uz podmazivanje.

Ključne riječi: klizni ležaj, toplinska obrada, modificiranje, prevlačenje, hrapavost, prionjivost, debljina prevlake, adhezijsko trošenje.

SUMMARY

Wear is one of the biggest expenses in industrialized countries. Although it's impossible to remove wear, it is possible to decrease it with various procedures and methods, which is the main theme of this paper.

The theoretical part of this paper describes plain bearings and its requirements, heat treatment procedures of plain bearings, methods of surface modifying and coating of plain bearings and characterization of the properties of plain bearings. The experimental part of this paper describes the preparation, procedure, results and discussion of the results of surface roughness, adhesion and thickness of PVD and PACVD coatings as well as adhesion wear and coefficient of friction in tribo-pair bearing bronze – coated ring, with or without lubrication. The tribo-pair plasma nitrided ring – bearing bronze exhibits the lowest coefficient of friction.

Key words: plain bearing, heat treatment, modifying, coating, roughness, adhesion, coat thickness, adhesion wear.

1. UVOD

Trošenje je postepeno i razarajuće uklanjanje ili deformacija materijala na njegovoj površini. Uzroci trošenja mogu biti mehanički, kemijski, korozijski, toplinski ili drugi procesi na površini materijala. Znanost koja se bavi proučavanjem svih vrsta trošenja se naziva tribologija.

Trošenje metala nastaje zbog plastične deformacije površine materijala ili zbog kidanja čestica s površine materijala. U svim slučajevima trošenja može se prepoznati djelovanje jednog ili više osnovnih mehanizama trošenja: abrazija, adhezija, umor površine i tribokorozija.

Iako se trošenje strojnih dijelova, konstrukcija i alata ne može potpuno ukloniti, moguće ga je smanjiti izborom odgovarajućih materijala u triboparu, otvrdnjavanjem materijala, modificiranjem i prevlačenjem površina, podmazivanjem i djelovanjem na smanjenje štetnih utjecaja iz okoliša. [1]

U radu se analiziraju zahtjevi na svojstva materijala, toplinska obrada, te postupci modificiranja i prevlačenja kliznih ležajeva. U provedenim ispitivanjima određuje se faktor trenja i adhezijsko trošenje kliznog ležaja sastavljenog od ležajne bronce i prstena nitriranog u plazmi ili prevučenog prevlakama TiN, TIN/TICN i TiCN/TiN, u uvjetima suhog i mješovitog trenja.

TEORIJSKI DIO

2. KLIZNI LEŽAJEVI

2.1. Osnovna podjela i podmazivanje kliznih ležajeva

Klizni ležajevi su strojni elementi koji omogućuju navođenje pokretnih strojnih dijelova (vratila, osovine i slično) i prijenos opterećenja s rukavca na blazinicu ležaja. Također postoje i klizni ležajevi, koji služe samo za vođenje vratila ili osovine, bez prijenosa vanjskog opterećenja. Klizne površine ležaja mogu biti podmazane uljem, mašću ili krutim sredstvom za podmazivanje. Prema načinu djelovanja opterećenja razlikuju se: aksijalni i radijalni klizni ležajevi.

Prednosti primjene kliznih ležajeva su sljedeće [2]:

- jednostavna izradba
- jeftiniji od valjnih ležajeva
- prigušuju šumove, udarce i vibracije
- pogodni za prenošenje udarnih opterećenja
- mogu se izraditi u dijeljenoj izvedbi
- miran i tihi rad
- neograničen vijek trajanja uz dobro podmazivanje
- omogućuju velike brzine vrtnje
- otporni su na prašinu.

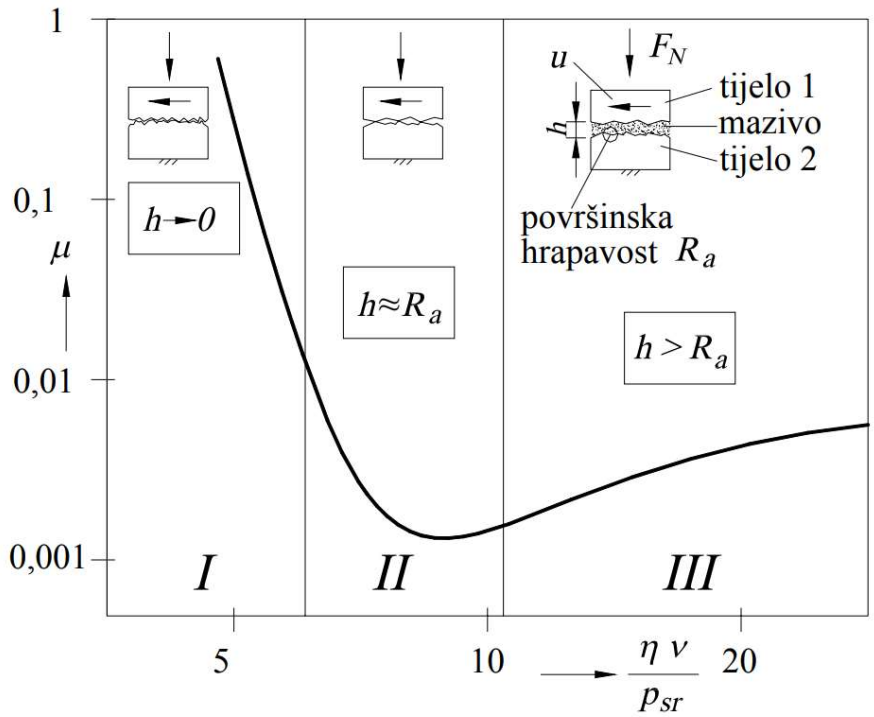
Nedostatci kliznih ležajeva su sljedeći [2]:

- materijal i toplinska obrada rukavaca osovine ili vratila utječe na kvalitetu ležaja
- osjetljivi bez podmazivanja
- treba redovito održavati
- veliko trenje kod malih brzina vrtnje i pokretanja
- neprecizno pozicioniranje pokretnih strojnih dijelova.

Osnovna namjena kliznih ležajeva je smanjenje trošenja (trenja), smanjenje gubitka snage, smanjenje zagrijavanja i povećanje vijeka trajanja ležaja. To se ostvaruje dobrim podmazivanjem gdje su površina blazinice i rukavca razdvojene tankim slojem ulja. Iako je nemoguće izraditi idealan klizni ležaj u kojem nema trošenja, kvalitetno konstruiran izrađeni

ležaj, pod povoljnim radnim uvjetima, može postići dugotrajan rad bez vidljivih tragova trošenja.

Na slici 1 je prikazana Stribeckova krivulja koja opisuje pojave u sloju maziva između dviju kliznih površina. Na faktor trenja μ utječu srednji pritisak p_{sr} u ležaju, dinamička viskoznost sredstva za podmazivanje η i kutna brzina rukavca ω. Na slici su također prikazana tri osnovna načina podmazivanja: granično podmazivanje (*I*), mješovito podmazivanje (*II*) i hidrodinamičko podmazivanje (*III*).



Slika 1. Stribeckova krivulja i načini podmazivanja kliznog ležaja [2]

Granično podmazivanje (*I*) nastaje kada se površine materijala, koje na sebi imaju granični sloj vlage, maziva, nečistoća ili oksida, dodiruju u pojedinačnim točkama površinskih neravnina, gdje je probijen granični sloj. Poseban slučaj kod graničnog podmazivanja je podmazivanje pri pokretanju, kada dolazi do probijanja graničnog sloja na velikom broju točaka površinskih neravnina. Između površina kliznog ležaja bez podmazivanja djeluje suho trenje. Miješano podmazivanje (*II*) nastaje kada se površine materijala djelomice dodiruju klizanjem preko graničnih slojeva. Rezultat takvoga labilnog podmazivanja je smanjenje trenja koje se može nepredviđeno povećati ponovnom pojavom graničnoga podmazivanja. Zbog navedenog, mješovito podmazivanje nije poželjno. Hidrodinamičko podmazivanje (*III*) nastaje kada su

površine materijala odvojene stabilnim slojem maziva. Viskoznost maziva stvara tekuće trenje koje, zbog turbulencije, raste s povećanjem brzine rada ili vrtnje kliznog ležaja. [2]

2.2. Zahtjevi na materijale za klizne ležajeve

Za pravilnu izradbu kliznih ležajeva, tribološki sustav „rukavac - ležajna blazinica“ treba imati sljedeća svojstva [2]:

- otpornost na trošenje
- otpornost na nagrizanje površina
- otpornost na utiskivanje čestica trošenja u kliznu površinu
- otpornost na kontaktne pritiske
- povišena dinamička izdržljivost
- dobra toplinska vodljivost
- otpornost na bubrenje i izotropnost toplinske dilatacije pri povišenim temperaturama
- dobro vezanje ležajnog materijala za podlogu
- prilagodljivost elastičnim i plastičnim i deformacijama
- dobra prionjivost ulja i maziva
- recikličnost
- izbjegavanje pojave zaribavanja pri suhom radu
- međusobno zaglađivanje površine rukavca osovine i blazinice.

Navedenim zahtjevima nije moguće u potpunosti udovoljiti. Zato treba odabrati odgovarajuće materijale za izradu kliznog ležaja i optimalno sredstvo podmazivanja za zadano mehaničko opterećenje, brzinu vrtnje, vrstu pogona i eksploatacijske uvjete.

2.3. Materijali za izradbu kliznih ležajeva

U tablicama 1 i 2 su prikazani zahtjevi i svojstva materijala za izradbu kliznih ležajeva. U tablici 2 navedena su svojstva materijala za blazinicu kliznih ležajeva poput ležajnih legura, bakrenih i aluminijskih legura.

Tablica 1. Zahtjevi na materijale za klizne ležajeve [3]

Svojstvo	Primjena svojstva
Dinamička izdržljivost	Izdržati dinamičko opterećenje pri radnim temperaturama.
Tlačna čvrstoća	Podržati jednosmjerno opterećenje bez ekstruzije i promjene dimenzija i oblika.
Prionjivost maziva	Sposobnost kliznog ležaja da upije sredstvo za podmazivanje na svojoj površini.
Prilagodljivost oblika	Sposobnost elastoplastične deformacije za postizanje ujednačene zračnosti između rukavca i blazinice ili prstena ležaja pod nazivnim opterećenjem.
Tribološka kompatibilnost	Sposobnost osiguravanja optimalnog tribološkog ponašanja u tribološkom sustavu.
Otpornost na koroziju	Sposobnost da se materijal kliznog ležaja odupre napadu vode, hladnog sredstva, kiselih, uljnih i oksidirajućih produkata.

Tablica 2. Usporedba svojstava materijala za klizne ležajeve [3]

Svojstva	Ležajne legure (bijela slitina)	Bakrene legure (ležajne bronce)	Aluminijske legure
Dinamička izdržljivost Tlačna čvrstoća	Pogodan za mnoge primjene, ali nepogodan pri porastu temperature ležaja.	Dostupne za različite iznose čvrstoće, ovisno o odabiru legure.	Isto kao i kod bakrenih legura.
Prionjivost maziva	Izvrsna svojstva – najbolja od svih materijala za izradbu kliznih ležajeva.	Lošije za razliku od ležajnih legura. Mekše legure, s komponentama koje imaju malu temperaturu tališta,	Lošije za razliku od ležajnih legura. Legure s velikim udjelom legirnih elemenata koji imaju malu temperaturu
Prilagodljivost oblika			
Tribološka kompatibilnost			

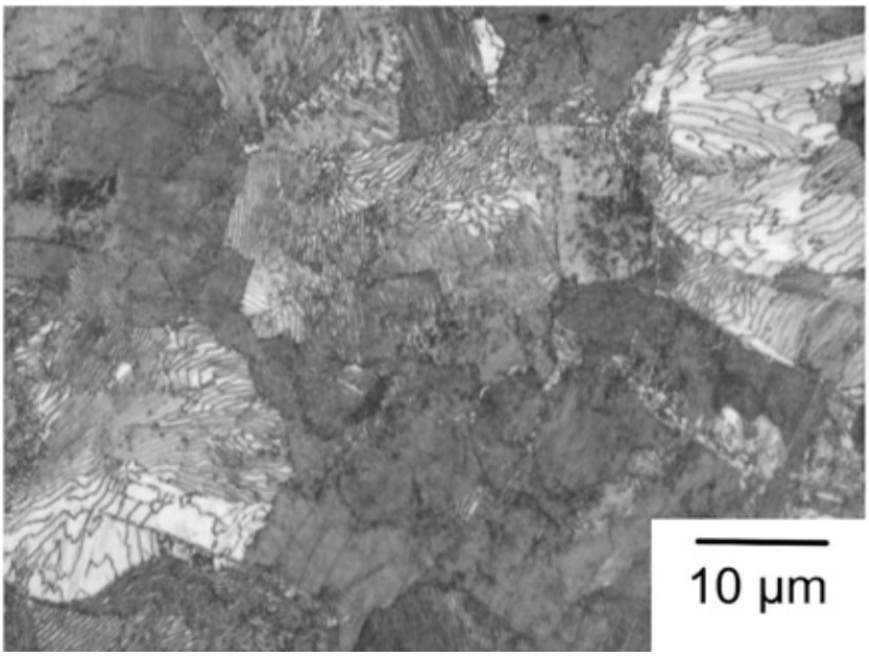
		su bolje od čvrstih i tvrđih legura u ovoj kategoriji. Ova svojstva se mogu poboljšati legirnim elementima, koristeći kombinacije poput olova i kositra ili olova i indija, na površini ležajeva.	tališta, poput kositra ili kadmija, su bolje od bakrenih legura iste čvrstoće. Preklapanjem, u određenim slučajevima, se mogu poboljšati navedena svojstva.
Otpornost na koroziju	Ležajne legure, na bazi kositra, imaju izvrsnu otpornost kada nisu u prisustvu morske vode. Ležajne legure, na bazi olova, nisu otporne na korozijske produkte.	Više su skloni koroziji ukoliko je olovo prisutno u kemijskom sastavu. Otpornost je pojačana legirnim elementima poput olova, kositra ili bronce.	Dobra otpornost na koroziju.

Osim bijelog metala, ležajnih bronci i aluminijskih legura za klizne ležajeve primjenjuju se legirani čelici koji imaju udio ugljika između 0,8 % i 1,1 % te udio dodatnih legirajućih elemenata manje od 3 %.. Tipični predstavnik čelika za ležajeve je visokougljični čelik s 1,5 % kroma oznake EN DIN 100Cr6 (ASTM 52100). Takvi čelici mogu biti obrađeni različitim postupcima toplinske obrade kako bi se ostvarili zahtjevi traženi za rad kliznih ležajeva. [3] U tablici 3 je prikazan kemijski sastav najčešće korištenih čelika za klizne ležajeve.

Tablica 3. Kemijski sastavi najčešće korištenih čelika za izradu kliznih ležajeva [4]

Čelik	C, %	Mn, %	Si, %	Cr, %	S, %	P, %
100Cr2 (W1)	0,9 – 1,05	0,25 – 0,45	0,15 – 0,35	0,4 – 0,6	≤0,025	0,03
100Cr4 (W2)	1,0 – 1,1	0,25 – 0,45	0,15 – 0,35	0,9 – 1,15	≤0,025	0,03
100Cr6 (W3)	0,9 – 1,05	0,25 – 0,45	0,15 – 0,35	1,40 – 1,65	≤0,025	0,03
100CrMn6 (W4)	0,9 – 1,05	1,00 – 1,20	0,50 – 0,70	1,40 – 1,65	≤0,025	0,03

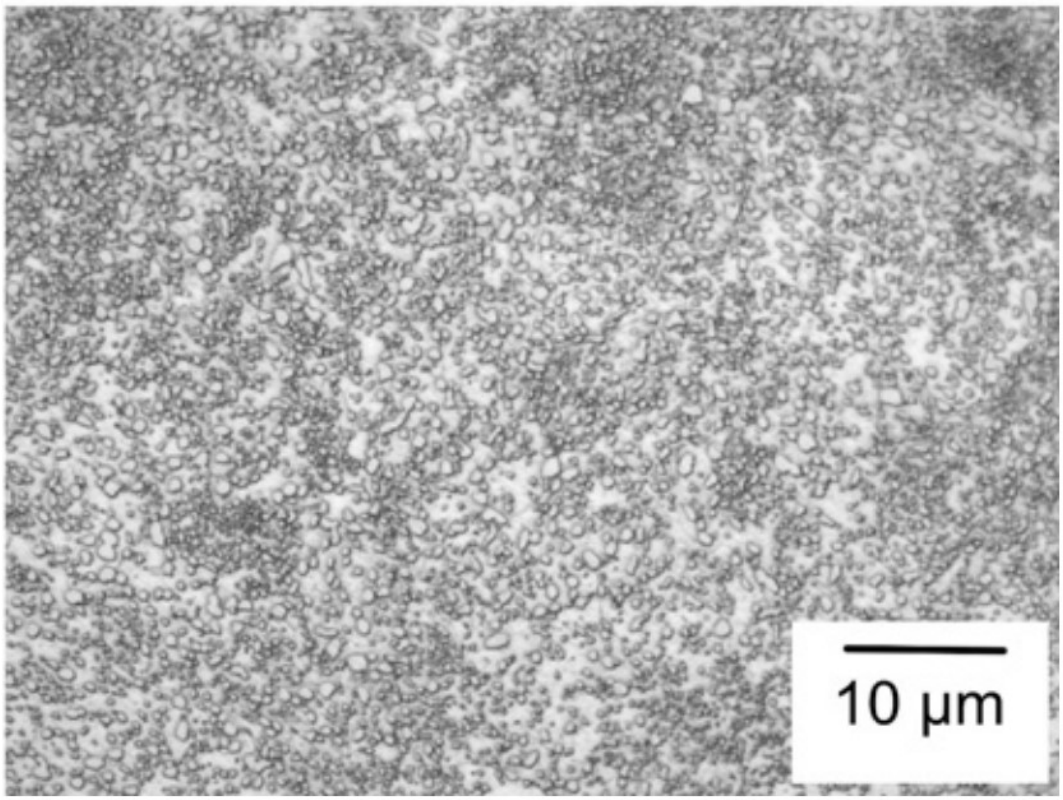
Uobičajeno je da se čelik dostavi u toplo valjanom stanju s perlitnom mikrostrukturom koja također sadrži neotopljene karbide (legirani cementit i karbide kroma), kao što je prikazano na slici 2. Bitno je istaknuti da je čelik sličnog kemijskog sastava kao i 100Cr6 (W3).



Slika 2. Mikrostruktura čelika EN DIN 100Cr6 (ASTM 52100) u toplom valjanom stanju [4]

Polazna perlitno cementitna struktura čelika za ležajeve nije pogodna za obradu odvajanjem čestica i obrade deformacijom već se uobičajeno prije ovih obrada provodi

sferodizacijsko žarenje. [4] Na slici 3 je prikazana mikrostruktura čelika EN DIN 100Cr6 nakon sferoidizacijskoga žarenja sastavljena od feritne matrice s kuglicama karbida.



Slika 3. Mikrostruktura čelika EN DIN 100Cr6 (ASTM 52100) nakon sferoidizacijskoga žarenja [4]

2.4. Toplinska obrada i svojstva čelika EN DIN 100Cr6

Kako bi se ostvarili zahtjevi za klizne ležajeve, potrebno je provesti postupak toplinske obrade. Koraci za toplinsku obradu čelika EN DIN 100Cr6, kemijskog sastava, prikazan u tablici 4, su:

- predgrijavanje
- kaljenje
- duboko hlađenje
- popuštanje.

Tablica 4. Kemijski sastav čelika EN DIN 100Cr6 u % [5]

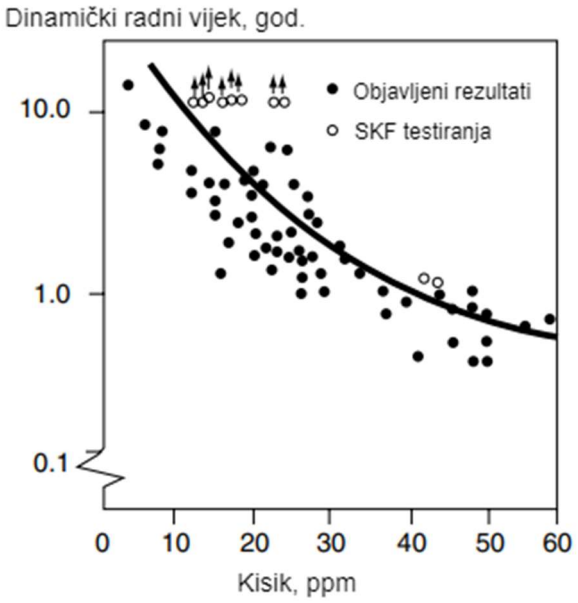
C	Si	Mn	Cr
1,00	0,25	0,35	1,50

Kaljenje je korak toplinske obrade u kojem se čelik zagrije na temperaturu austenitizacije i gasi sa sredstvom za gašenje poput ulja, vode i slično. Gašenje se izvodi najduže u roku od nekoliko minuta, radi dobivanja što veće martenzitne strukture koja poboljšava tvrdoću i žilavost materijala i radi izbjegavanja stvaranja bainitne i perlitne faze iz zaostalog austenita koje negativno utječu na tvrdoću i žilavost. U tablici 4 su prikazani parametri kaljenja za čelik EN DIN 100Cr6. Preporučuje se korištenje ulja, zbog malih dimenzija prstenova koji će se koristiti tijekom ispitivanja. Nakon kaljenja čelik postiže veliku tvrdoću i dobru žilavost. Također postiže veću otpornost na trošenje i veću otpornost protiv velikog pritiska. [5]

Tablica 5. Parametri kaljenja za čelik EN DIN 100Cr6 [5]

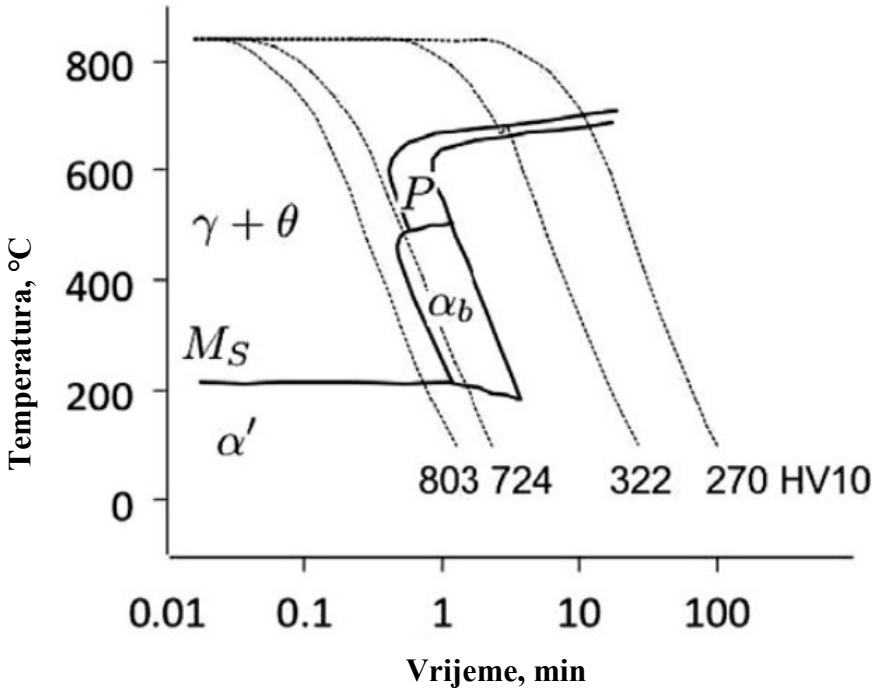
Temperatura austenitizacije	Sredstvo za gašenje	Tvrdoća nakon kaljenja
790 °C – 820 °C	voda	63 HRC – 67 HRC
820 °C – 860 °C	ulje	63 HRC – 66 HRC

Prije kaljenja se izvodi i predgrijavanje, zbog visokog udjela ugljika, za sprječavanje puknuća čelika tijekom zagrijavanja na temperaturu austenitizacije. Tijekom gašenja je moguće koristiti plinove poput helija, dušika i argona radi sprječavanja oksidacije i razugljičenja čelika. Predgrijavanje se uobičajeno izvodi pri temperaturama između 450 °C – 500 °C. [6] Na slici 4 je prikazan dijagram dinamičke izdržljivosti čelika u ovisnosti o količini kisika u čeliku. Iz dijagrama je vidljivo, da što je veća količina kisika u čeliku to će biti manja dinamička izdržljivost čelika.

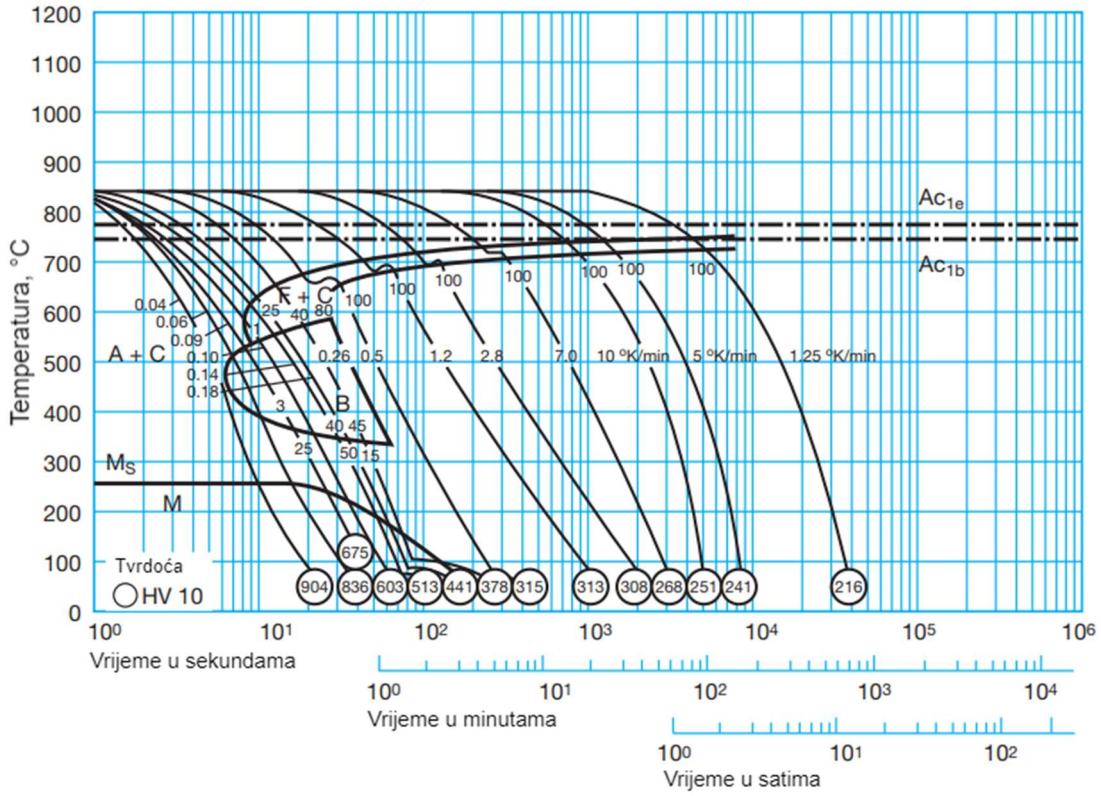


Slika 4. Dinamička izdržljivost čelika EN DIN 100Cr6 u ovisnosti o količini kisika [7]

Na slici 5 i 6 su prikazani dijagrami kontinuirane temperaturne transformacije za ležajni čelik EN DIN 100Cr6. Iz dijagrama je vidljivo, da što je veća brzina gašenja to će biti i veća tvrdoća materijala nakon kaljenja.



Slika 5. Kontinuirani TTT dijagram za čelik ASTM 52100 (EN DIN 100Cr6) [4]



Slika 6. Kontinuirani TTT dijagram za čelik EN DIN 100Cr6 [8]

Nakon kaljenja se primjenjuje korak dubokog hlađenja pri temperaturi ispod –70 °C koristeći smjesu suhog leda i tekućeg dušika ili pare tekućeg dušika. Duboko hlađenje se provodi radi:

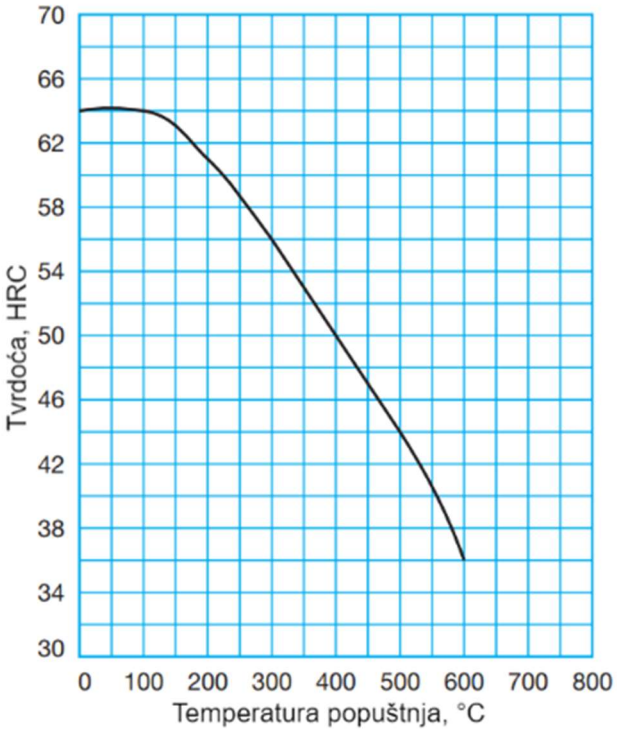
- povećanja radnog vijeka materijala
- povećanja otpornosti na trošenje
- povećanja tvrdoće
- povećanja čvrstoće
- smanjenja vibracija
- lakše strojna obrada
- ostvarivanja dimenzijske stabilnosti i slično.

Završni korak toplinske obrade je popuštanje, u kojem se materijal zagrijava i zadržava na određenu temperaturu radi smanjenja zaostalog naprezanja. U tablici 5 i slici 7 su prikazani parametri i dijagram popuštanja za čelik EN DIN 100Cr6. Kod čelika EN DIN 100Cr6 najbolje

je primijeniti niskotemperaturno popuštanje zbog ostvarivanja što veće tvrdoće i otpornosti na trošenje.

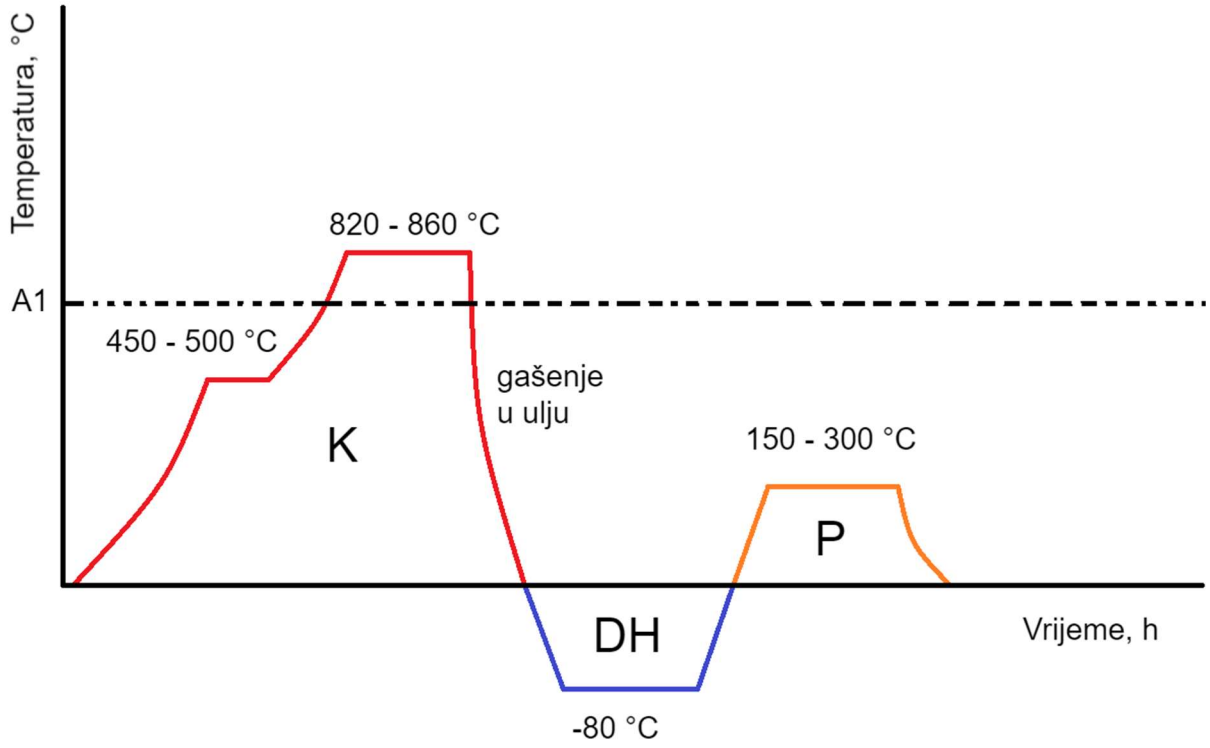
Tablica 6. Parametri popuštanja za čelik EN DIN 100Cr6 [5]

Temperatura popuštanja	Radna tvrdoća EN DIN 100Cr6
150 °C – 300 °C	65 HRC – 56 HRC



Slika 7. Dijagram popuštanja za čelik EN DIN 100Cr6 [8]

Dijagram, cjelokupnog postupka toplinske obrade čelika EN DIN 100Cr6, je prikazan slikom 8. Pri gašenju u vodi koriste se temperature austenitizacije od 790 °C do 820 °C, ali ostale faze postupka su slične.



Slika 8. Dijagram postupka toplinske obrade za čelik EN DIN 100Cr6

3. MODIFICIRANJE I PREVLAČENJE METALNIH LEŽAJEVA

Prevlačenjem površine metalnih materijala za klizne ležajeve, proizvode se tribološke prevlake povišene otpornosti na trošenje, smanjenog faktora trenja, bolje otpornosti na koroziju i poboljšanih drugih svojstava u odnosu na neprevučenu površinu. U radu će se usporediti svojstva površine čelika za ležajeve EN DIN 100Cr6 prevučenog sljedećim postupcima:

- fizikalno prevlačenje iz parne faze (PVD, engl. *physical vapour deposition*)
- kemijsko prevlačenje iz parne faze CVD, engl. *chemical vapour deposition*)
- plazmom potpomognuto prevlačenje iz parne faze (PACVD, engl. *plasma assisted chemical vapour deposition*).

3.1. Fizikalno prevlačenje iz parne faze

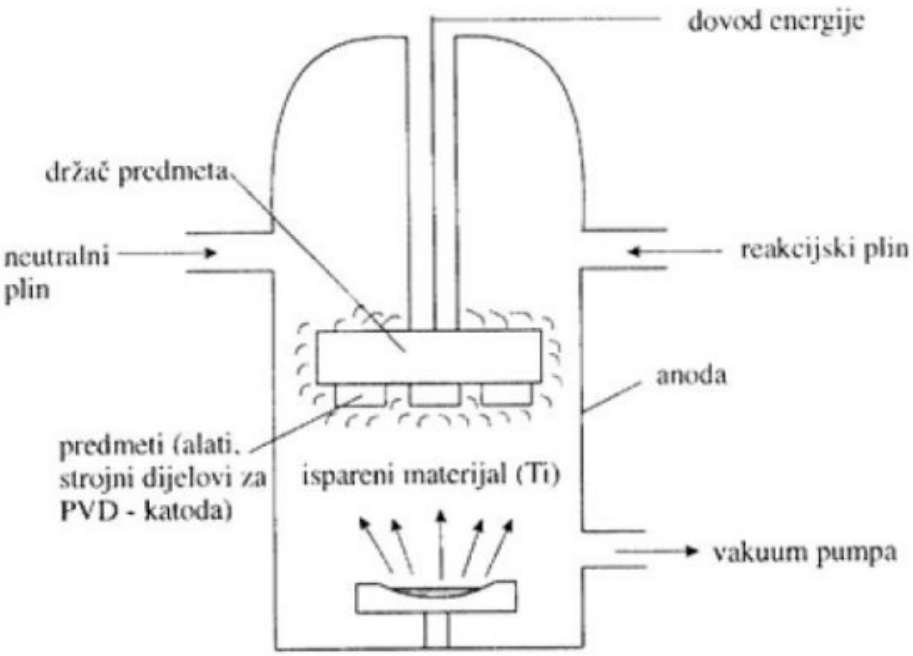
Fizikalno prevlačenje iz parne faze (PVD) je postupak inženjerstva površina koji zahtijeva isparivanje materijala prevlake u vakuumu i potom kondenzaciju metalnih para na površini obratka. Provodi se na temperaturama od 200 °C do 500 °C što čini postupak pogodnim za prevlačenje niza metalnih materijala sa stabilnom mikrostrukturom na temperaturama prevlačenja. [9] Nanošenje prevlake PVD postupkom provodi se kroz sljedeća tri procesa :

- isparivanje materijala prevlake iz radne elektrode u visokom vakuumu zagrijavanjem elektrootpornim, električnim lukom, snopom elektrona, laserskim snopom ili bombardiranjem ionima iz ionskog topa

- prijenos para prevlake od radne elektrode do površine obratka bez usmjeravanja ili s usmjeravanjem magnetskim poljem. Tijekom prijenosa para mogu se provoditi i kemijske reakcije metala i plinova u kojima nastaju kristali kemijskog spoja ili intermetalni kristali prevlake

- taloženje i kondenzacija metalnih para, odnosno kristala prevlake na površinu obratka i rast prevlake.

Na slici 9 je prikazana shema uređaja za provedbu PVD postupka. Za ravnomjerno nanošenje prevlake između radne elektrode i površine obratka mora postojati optički vidljiva linija.



Slika 9. Shema uređaja za PVD postupak [10]

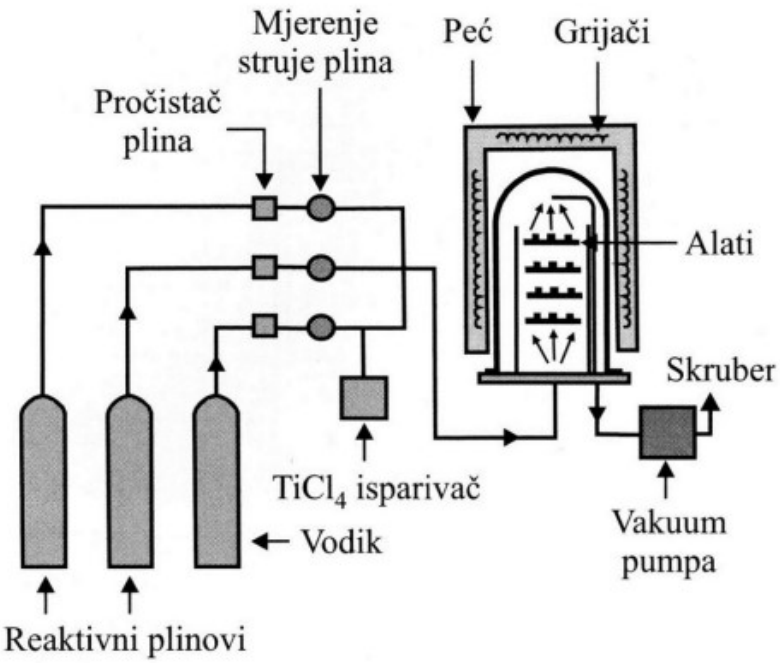
3.2. Kemijsko prevlačenje iz parne faze

Kemijsko prevlačenje iz parne faze provodi se na temperaturama od 800 °C do 1000 °C. Visoke temperature su potrebne za ostvarivanje iste količine energije kao i kod PVD postupka, tj. energija potrebna za taloženje materijala na površinu obratka. Posljedica korištenja visokih temperatura kod prevlačenja čeličnih materijala je potreba za naknadnom toplinskom obradom. Postoje razne kemijske reakcije koje se mogu pojaviti tijekom CVD postupaka poput pirolize, redukcije, i stvaranje spojeva. Nanošenje prevlake CVD postupkom provodi se kroz sljedeće procese:

- sparivanje i dovođenje prekursora iz spremnika u vakuumsku komoru
- kemijske reakcije raspada prekursora potaknute visokom temperaturom u kojima se oslobađaju metalne pare prevlake
- kemijske reakcije metalnih para i toplinski ioniziranih plinova u kojima nastaju kapljice intermetalnih spojeva ili ionski kristali prevlake
- difuzija metalnih para i kapljica prevlake kroz hidrodinamički granični sloj prema površini obratka

- kemijska i fizikalna apsorpcija para prevlake na površinu obratka
- nukleacija i rast kristalnih zrna prevlake
- desorpcija nusprodukata s površine obratka difuzijom i strujanje plina
- uklanjanje plinovitih produkata iz reaktora.

Na slici 10 je prikazana shema uređaja za provedbu CVD postupka. Ovaj postupak ne zahtijeva direktnu vidljivost prevučene površine i mjesta ulaska prekursora u vakuumsku komoru te omogućava prevlačenje npr. dubokih rupa i provrta.

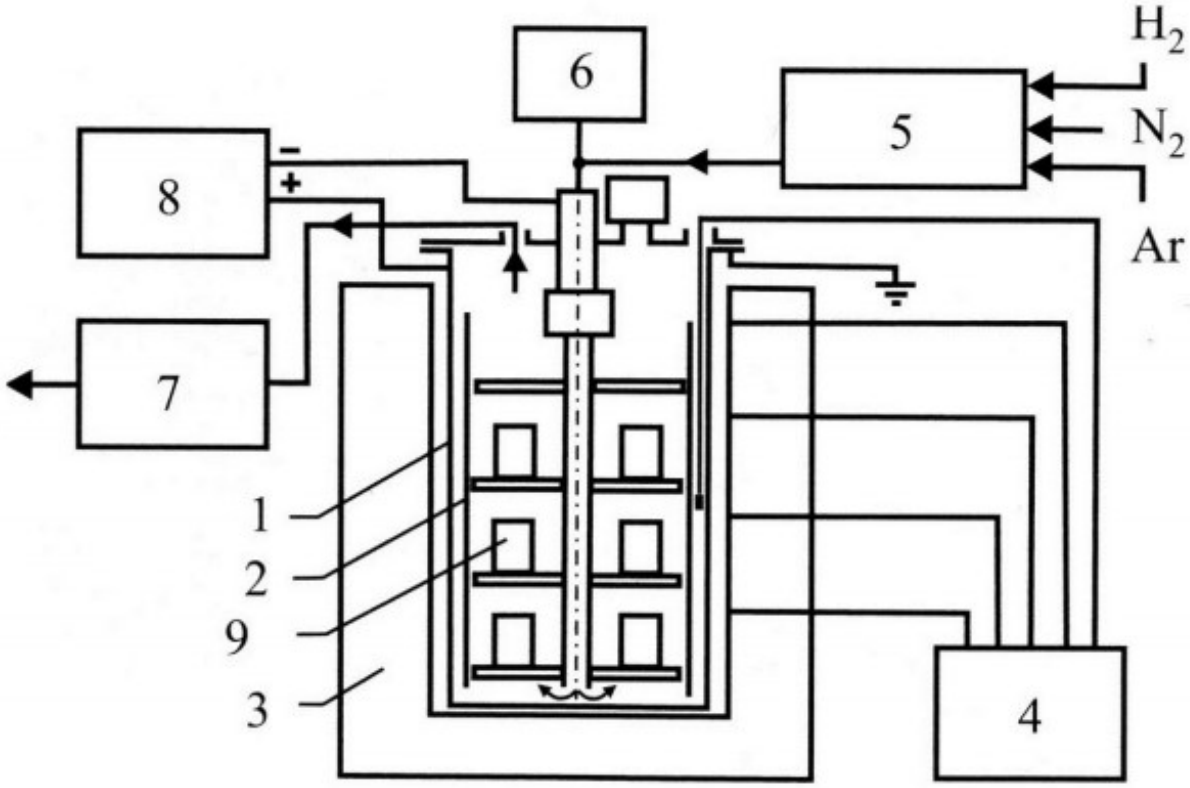


Slika 10. Shema uređaja za CVD postupak [11]

3.3. Plazmom potpomognuto prevlačenje iz parne faze

Plazmom potpomognuto prevlačenje iz parne faze (PACVD) je postupak u kojem se potrebna energija za raspad prekursora i stvaranje prevlake dovodi uspostavljanjem pulsirajuće plazme između obratka (katode) i stijenke vakumske komore (anode) Primjenom plazme, radne temperature prevlačenja su snižene u područje između 450 °C i 650 °C. S time je moguće primijeniti postupak i na alatne čelike za hladni rad, koji inače imaju slabu otpornost na popuštanje, te se zbog toga popuštaju pri nižim temperaturama. Na slici 11 je prikazana shema

uređaja za PACVD postupak. Uređaj se sastoji od reakcijske komore (1), unutarnje kontrolne jedinice (2), elektrootporne zagrijavane peći (3), sustava za mjerenje i stabilizaciju temperature (4), sustava za kontrolu plina (5), mjerne jedinice za kontrolu nastalog spoja (6), vakuumskog sustava (7), napajanja naponskom jedinicom (8) i osnovnoga materijala (9).



Slika 11. Shema uređaja za PACVD postupak [11]

4. KARAKTERIZACIJA POVRŠINE MATERIJALA

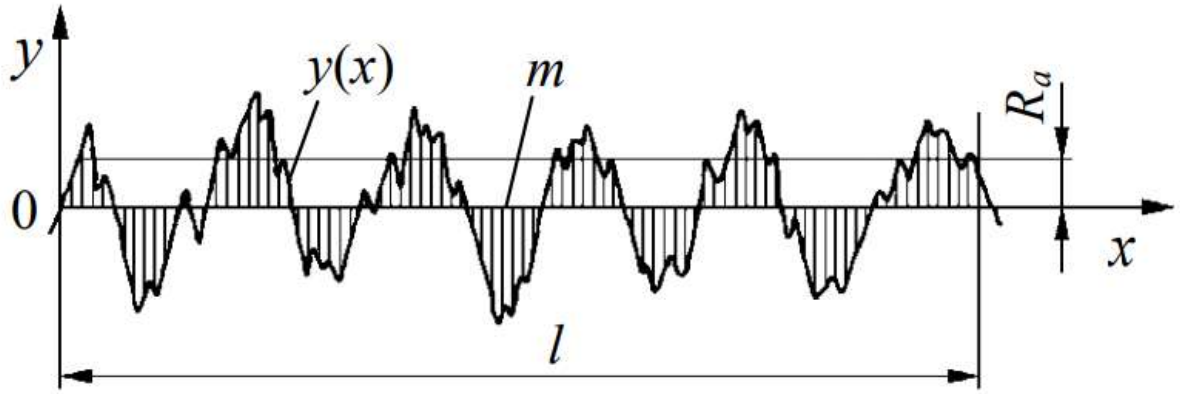
Karakterizacija površina materijala je naziv za skupinu aktivnosti koje se provode radi dobivanja kvalitativnih i kvantitativnih vrijednosti svojstava površine materijala. Budući da se karakterizacija površine materijala može provesti za veliki broj svojstava, potrebno je unaprijed znati koja su svojstva najbitnija za površinu materijala koji analiziramo. Najbitnija svojstva se određuju prema zahtjevima zadanih na proizvod i prema općeprihvaćenim uvjetima uporabe materijala. Svojstva površine materijala koja se mogu karakterizirati su:

- mehanička
- optička
- magnetska
- kemijska
- toplinska
- tehnološka
- električna i slično.

U eksperimentalnim ispitivanjima u radu, provest će se ispitivanje hrapavosti površine te određivanje prionjivosti i debljine prevlake.

4.1. Ispitivanje hrapavosti površine

Hrapavost površine je "mikrogeometrijska nepravilnost površine koja nastaje tijekom postupaka obrade ili drugih utjecaja". Hrapavost bitno utječe na svojstva materijala, posebno na mjestima međusobnih spojeva pojedinih elemenata gdje se javljaju trenje, zračnost, podmazivanje i slično. Strojni dijelovi s manjom hrapavošću imaju bolja svojstva poput boljeg prenošenja topline, veće korozijske otpornosti, veće dinamičke izdržljivosti i slično. Za ostvarivanje manje hrapavosti potrebno je koristiti skuplje postupke obrade, što povećava cijenu obrađenih strojnih dijelova. Na slici 12 je prikazano procjenjivanje hrapavosti površine koristeći srednje aritmetičko odstupanje profila R_a. Veličina hrapavosti se mjeri s obzirom na srednju referentnu crtu profila neravnine *m*, koja dijeli profil tako da je unutar referentne duljine *lr* (na slici 12 je *lr* označen s *l*) veličina svih kvadrata odstupanja profila od te crte najmanja. Referentna duljina *lr* ovisi o vrsti i kvaliteti obrade te o metodi mjerenja.



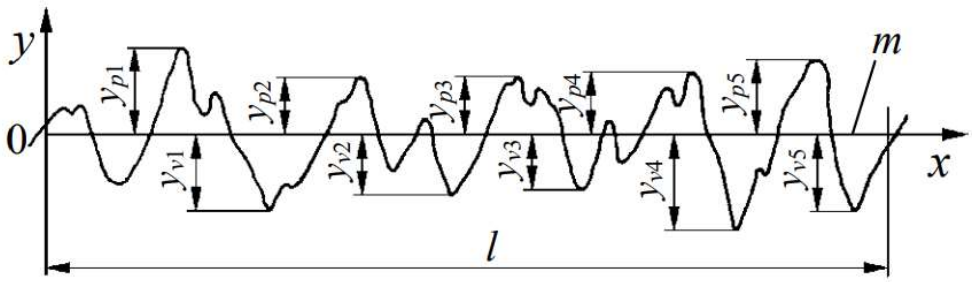
Slika 12. Procjenjivanje hrapavosti površine koristeći srednju aritmetičku sredinu R_a [2]

R_a se najčešće rabi za procjenjivanje hrapavosti površine. R_a je "jednak srednjoj aritmetičkoj vrijednosti apsolutnih vrijednosti visine profila neravnina na referentnoj duljini *lr*".

$$R_a = \frac{1}{lr}\int_0^l |y(x)|\, dx \approx \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |y_i| \qquad (1)$$

- R_a – srednje aritmetičko odstupanje profila, µm
- *lr* – referentna duljina (duljina uzorka), µm
- $y(x)$, y_i – visina profila hrapavosti s obzirom na srednju referentnu crtu, µm
- *x* – dužina uzduž mjerne duljine, µm
- *n* – broj točaka za procjenjivanje visine profila uzduž *l*

Osim R_a, također se rabi i maksimalna visina profila R_z, koja je "jednaka zbroju duljine najveće visine vrha profila i najveće dubine udolina na referentnoj duljini *lr*". Na slici 13 je prikazano procjenjivanje hrapavosti površine određivanjem srednje visine neravnine R_z. Na slici 13 je *lr* označen s *l*.



Slika 13. Procjenjivanje hrapavosti površine određivanjem maksimalne visine profila R_z [2]

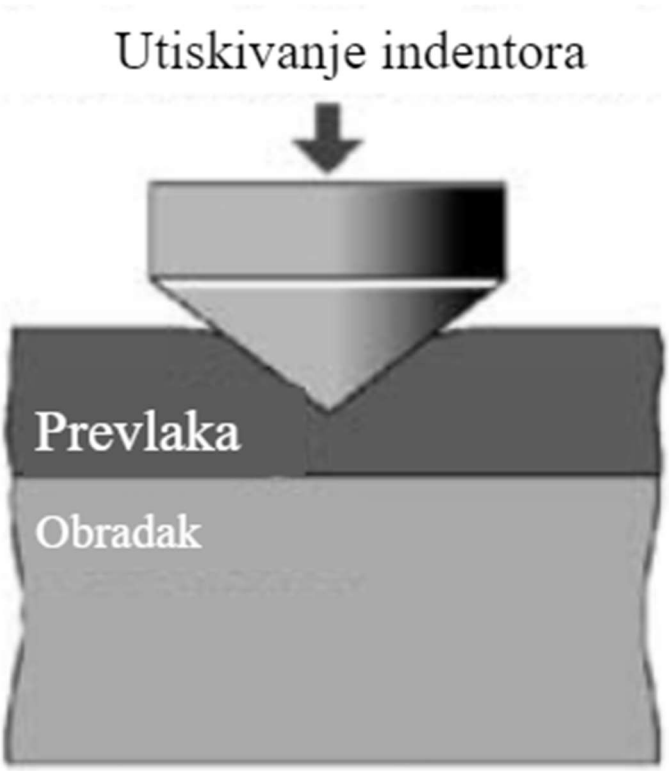
$$R_z = y_{pi} + y_{vi} \tag{2}$$

- R_z – maksimalna visina profila, µm
- y_{pi} – visina i-tog najvišeg vrha, µm
- y_{vi} – udubina i-te najniže udoline, µm

Još jedan važan parametar hrapavosti je ukupna visina profila R_t (R_{max}) koja je jednaka zbroju duljine najveće visine vrha profila i najveće dubine udolina na duljini vrednovanja *ln*. Približno je R_t = 6,4 R_a. [2]

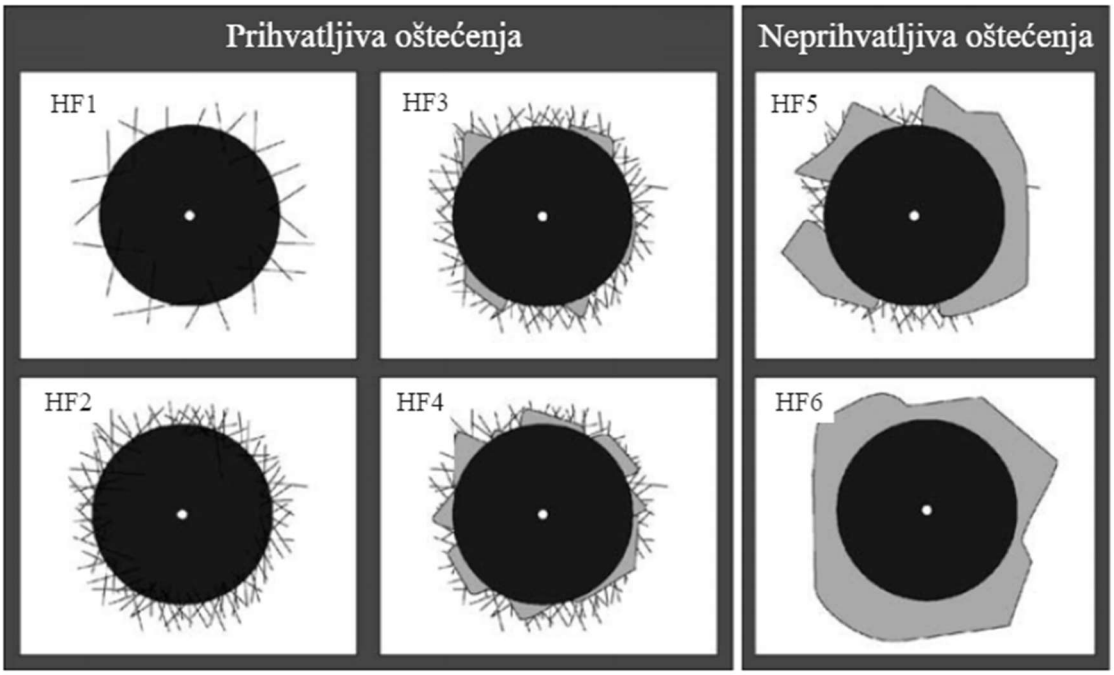
4.2. Ispitivanje prionjivosti prevlake

Ispitivanje prionjivosti prevlake se provodi uz pomoć razornog Rockwell C ispitivanja utiskivanjem, norma VDI 3198. Konični dijamantni indentor se utiskuje u površinu prevlake, kao što je prikazano na slici 14, i stvara veliku plastičnu deformaciju u prevlaci i eventualno puknuće prevlake. Debljina prevlake mora biti barem deset puta veća od dubine prodiranja indentora.



Slika 14. Postupak ispitivanja prionjivosti prevlake [12]

Pravilo, koje se primjenjuje za svako ispitivanje utiskivanjem, je da debljina prevlake mora biti barem deset puta veća od debljine utiskivanja indentora. Utiskivanjem indentora nastaju oštećenja prevlake prikazana na slici 15 i 16 Oštećenja prevlake se dijele na mikropukotine i raslojavanje.. Prihvatljiva oštećenja, ocijenjena stupnjevima HF1 do HF4 prikazana na slici 11, znače postojanje jake veze između prevlake i podloge koja može podnijeti veliku količinu smičnog naprezanja tijekom ispitivanja. Kod neprihvatljivih oštećenja oicjenjenih stupnjevima HF5 i HF6 nastaju mikropukotine i raslojavanje prevlake oko mjesta utiskivanja indentora. [12]



Slika 15. Vrste kvarova kod ispitivanja prionjivosti prevlake [12]

Slika 16. Oštećenja prevlake nakon utiskivanja indentora [12]

4.3. Debljina prevlake

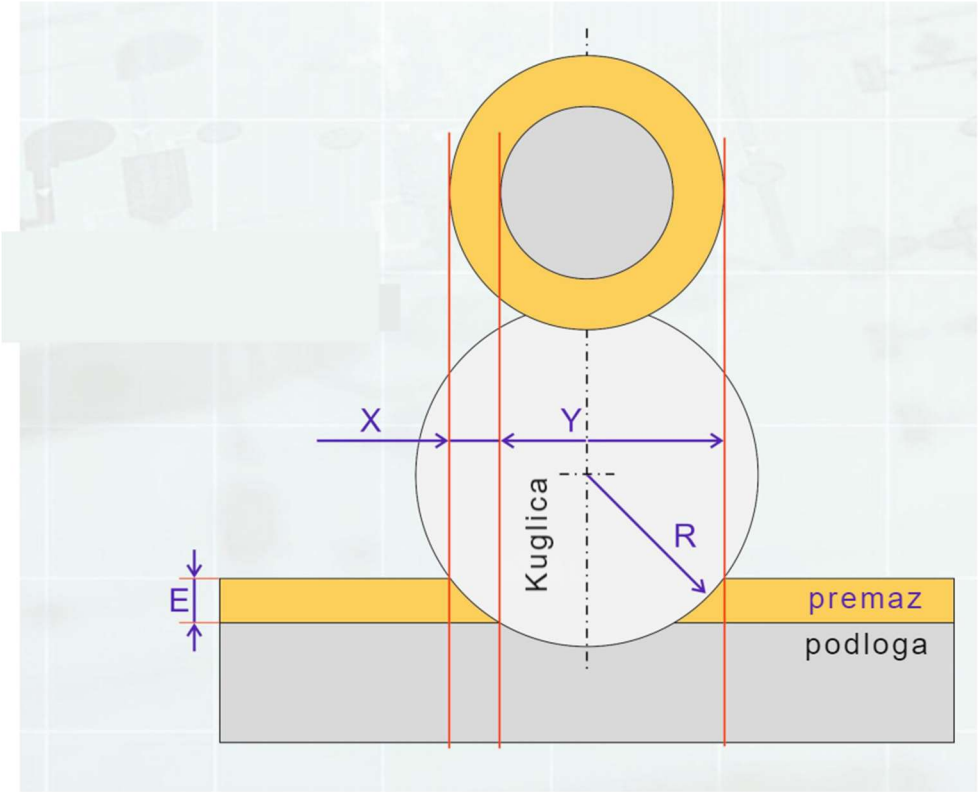
Debljina prevlake se odnosi na visinu prevlake koja je nanošena na materijal kemijskim ili fizikalnim putem. Ispitivanja debljine prevlake u radu je provedeno kalotestom. Na slici 17 prikazan je uređaj za ispitivanje debljine prevlake, kalotester (engl. *Calotester*) Uređaj se sastoji od sljedećih dijelova: čelične kuglice, servomotora, mikroprocesora, držača uzorka i lupe za očitanje dimenzija kratera nastalog nakon abrazijskog trošenja prevlake.

Slika 17. Uređaj Kalotester [13]

Preciznost (rezolucija) mjerenja ovisi o:

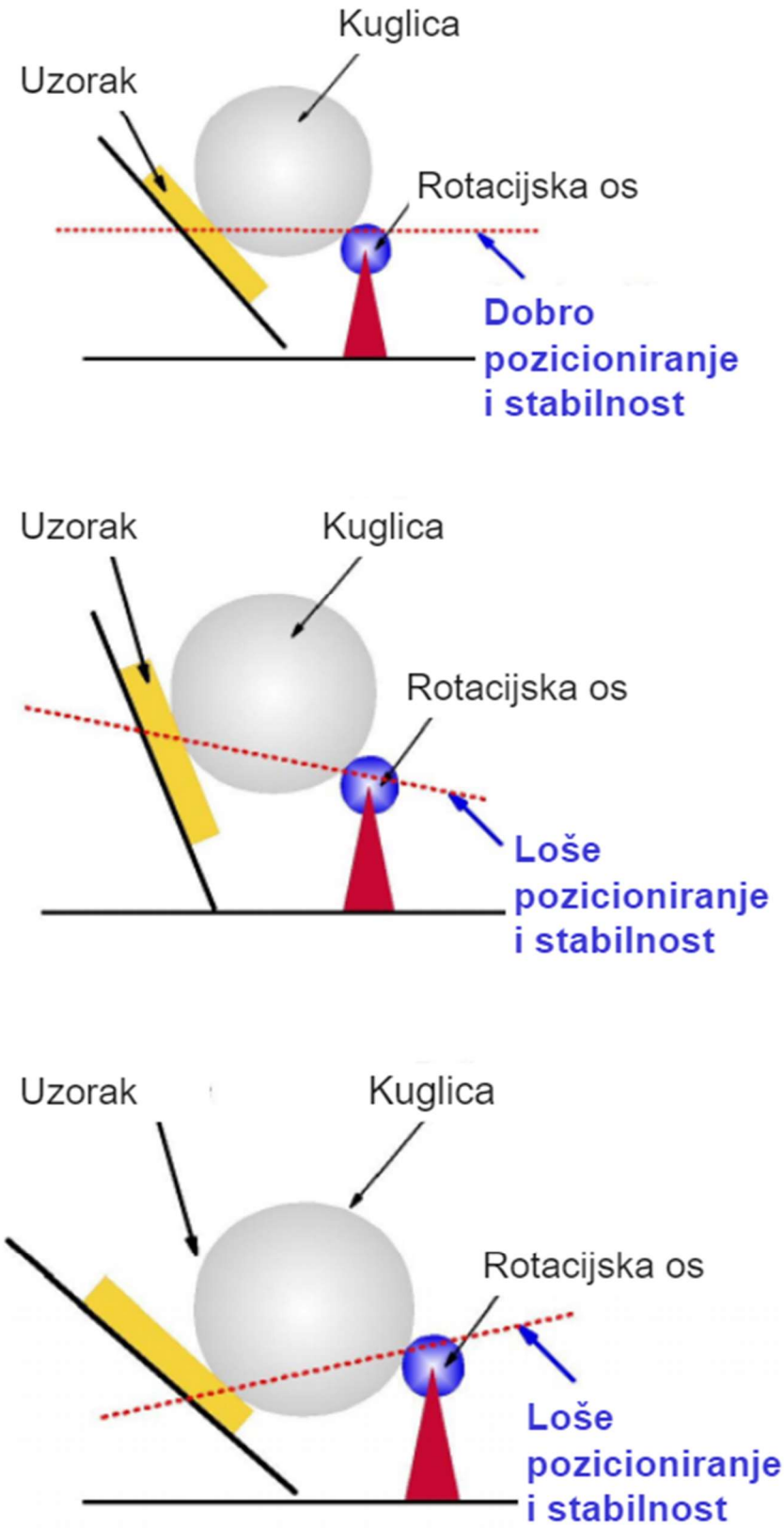
- hrapavosti površine
- kontrastu slojeva
- svojstvima mjerne lupe
- veličini kuglice.

Za provedbu ispitivanja rabi se čelična kuglica, premazana abrazivnom pastom, koja se naslanja na uzorak i rotira određeno vrijeme, što je prikazano na slici 18.



Slika 18. Postupak ispitivanja debljine prevlake [13]

Za ispravno mjerenje, potrebno je postaviti kuglicu i uzorak na način da rotacijska os, između lopte i vretena, bude kompletno horizontalna, kao što je prikazano na slici 19. U slučaju da je rotacijska os nepravilno orijentirana, uređaj će dati netočne rezultate.



Slika 19. Postavljanje loptice i vretena s obzirom na rotacijsku os [13]

Uzorak se pričvrsti na držač uzorka i nanese se nekoliko kapi dijamantne abrazivne emulzije na kuglicu. Ovisno o debljini prevlake, moguće je rabiti više kuglica istih promjera. Za optimalno provedeno ispitivanje, *Y* dimenzija mora biti pet puta veća od *X* dimenzije. Dimenzije *X* i *Y* se mjere lupom ili optičkim mikroskopom.

Debljina prevlake, kada je površina otiska kružnog, odnosno eliptičnog oblika, određuje se prema jednadžbama:

$$e = \frac{1}{2}\left(\sqrt{4R^2 - d^2} - \sqrt{4R^2 - D^2}\right) \tag{3}$$

- *e* – debljina prevlake, µm
- *R* – polumjer kuglice, µm
- *D* – vanjski promjer udubljenja – prevlaka, µm
- *d* – unutarnji promjer udubljenja – podloga, µm

$$e = \frac{xy}{2R} \tag{4}$$

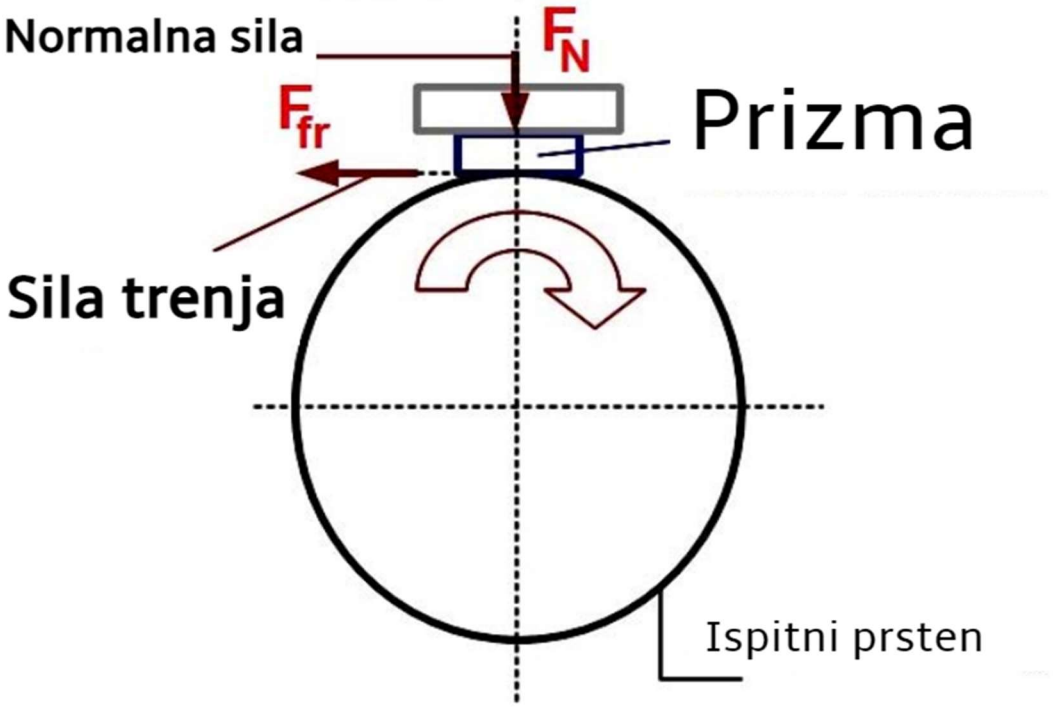
- *e* – debljina prevlake, µm
- *x* – *x* dimenzija ispitanog uzorka, µm
- *y* – *y* dimenzija ispitanog uzorka, µm

Formula 4 se koristi kada je *d* manji ili jednak *R*. Kada je *d* veći od *R*, koristi se formula 3. [13]

4.4. Otpornost na adhezijsko trošenje

Otpornost na adhezijsko trošenje se ispituje uz pomoć metode prizma po prstenu (engl. *block on ring*). Ispitni prsten je kontinuirano pritisnut s prizmom određenoga materijala pod kutom od 90°, relativno rotacijskoj osi prstena, kao što je prikazano na slici 20. Normalna sila

prizme po prstenu stvara trenje, između prizme i prstena, što uzrokuje trošenje oba materijala. [14]



Slika 20. Princip ispitivanja metodom prizma po prstenu [14]

EKSPERIMENTALNI DIO

5. PRIPREMA I PROVEDBA ISPITIVANJA

5.1. Materijal i toplinska obrada uzoraka

Za provedbu ispitivanja nabavljeni su ležajni prstenovi, proizvođača NTN dimenzije 30x35x17mm od čelika EN DIN 100Cr6 prikazani na slici 21.

Slika 21. Prsten ležaja od čelika 100Cr6

Tri prstena su obrađena u PACVD PC 70/90 uređaju u Laboratoriju za inženjerstvo površina, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, četvrti prsten je prevučen postupkom PVD u institutu National Research Center (NRC) of Canada. Peti prsten se nije prevlačio i služio je kao referentni prsten za poredbu vrijednosti i svojstava neprevučenog i prevučenih prstenova.

Na slici 22 prikazan je uređaj za nitriranje u plazmi i PACVD postupke instaliran u Laboratoriju za inženjerstvo površina na FSB-u. Na slici 23 prikazan je uređaj za PVD postupak instaliran u institutu NRC.

Slika 22. PACVD uređaj

Slika 23. PVD uređaj

Ispitni uzorci su označeni kako slijedi:

- P0 – neprevučeni 100Cr6 prsten
- P1 – prsten nitriran u plazmi
- P2 – prsten prevučen PACVD postupkom – prevlaka TiCN/TiN
- P3 – prsten prevučen PVD postupkom – prevlaka TiN
- P4 – prsten prevučen PACVD postupkom – prevlaka TiN/TiCN.

U tablicama 7 do 9 su prikazani parametri nitriranja u plazmi i prevlačenja za ispitne uzorke P1, P2 i P4 zasebno. Parametri PVD prevlačenja ispitnog uzorka P3 poslovna su tajna proizvođača. Prevlačenje PVD postupkom provedeno je s ciljem stvaranja TiN prevlake debljine od 2 μm do 3 μm.

Tablica 7. Parametri postupka nitriranja u plazmi

Parametri postupka	Vrijednost parametra
Temperatura čišćenja površine otprašivanjem iona	600 °C
Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona	2 h
Temperatura nitriranja	600 °C
Trajanje nitriranja u plazmi	9 h
Sastav plinske smjese	63% H_2, 32% N_2, 5% Ar
Tlak u vakuumskoj komori	2 mbar (200 Pa)
Napon plazme	560 V
Snaga izvora plazme	1000 W

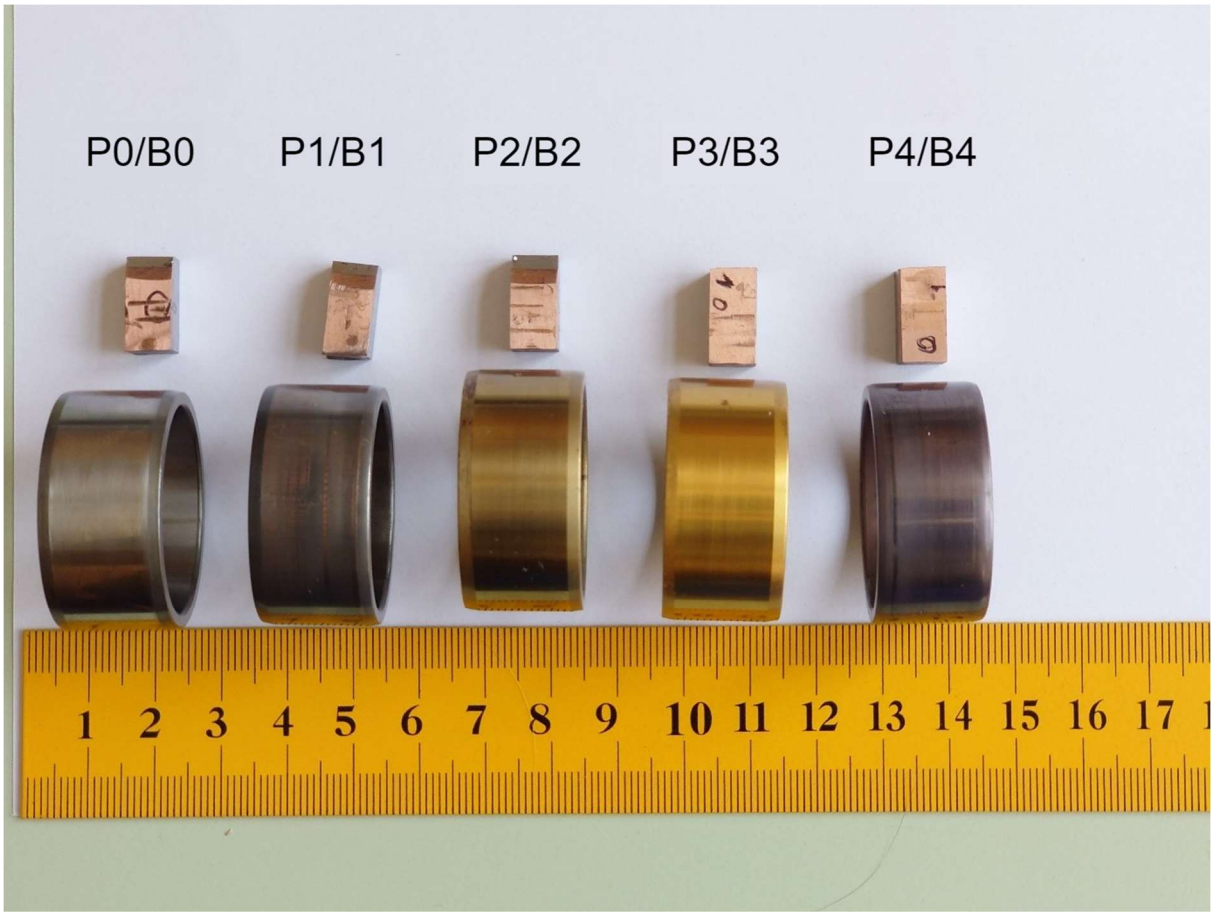
Tablica 8. Parametri PACVD postupka za prevlaku TiCN/TiN

Parametri postupka	Vrijednost parametra
Temperatura čišćenja površine otprašivanjem iona	450 °C
Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona	2 h
Temperatura prevlačenja	500 °C
Trajanje prevlačenja prevlakom TiN	2 h
Protok plinske smjese za prevlaku TiN	140 l/h H_2, 15 l/h N_2, 10 l/h Ar
Protok plinske smjese za prevlaku TiCN	140 l/h H_2, 15 l/h N_2, 10 l/h Ar; 4 l/h CH_4
Protok prekursora $TiCl_4$	3 l/h
Trajanje prevlačenja prevlakom TiCN	6 h
Tlak u vakuumskoj komori	2 mbar (200 Pa)
Napon plazme	490 V
Snaga plazme	1650 W
Trajanje hlađenja komore do 20 °C	6 h

Tablica 9. Parametri PACVD postupka za prevlaku TiN/TiCN

Parametri postupka	Vrijednost parametra
Temperatura čišćenja površine otprašivanjem iona	500 °C
Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona	2 h
Temperatura prevlačenja	500 °C
Trajanje prevlačenja prevlakom TiCN	3,5 h
Protok plinske smjese za prevlaku TiCN	140 l/h H_2, 13 l/h N_2, 10 l/h Ar; 4 l/h CH_4
Protok plinske smjese za prevlaku TiN	140 l/h H_2, 15 l/h N_2, 10 l/h Ar;
Protok prekursora $TiCl_4$	3 l/h
Trajanje prevlačenja prevlakom TiN	1,5 h
Tlak u vakuumskoj komori	2 mbar (200 Pa)
Napon plazme	490 V
Snaga plazme	1650 W
Trajanje hlađenja komore do 20 °C	6 h

Izgled ispitnih uzoraka je prikazan na slici 24. Poredak prstenova, s lijeva na desno, je P0, P1, P2, P3, P4. Osim prstenova, također su prikazani i uzorci ležajne bronce Cu-Sn-Pb koji su se koristili za ispitivanje adhezijskog trošenja. Njihove oznake, s lijeva na desno, su B0, B1, B2, B3, B4.



Slika 24. Izgled prstenova nakon prevlačenja i ispitnih uzoraka od ležajne bronce nakon pokusa trošenja

5.2. Ispitivanje prionjivosti prevlake

Ispitivanje prionjivosti prevlaka provedeno je na tvrdomjeru Insize, koristeći dijamantni indentor za metodu Rockwell C, kao što je prikazano na slici 25. Opterećenje indentora je iznosilo 1471 N.

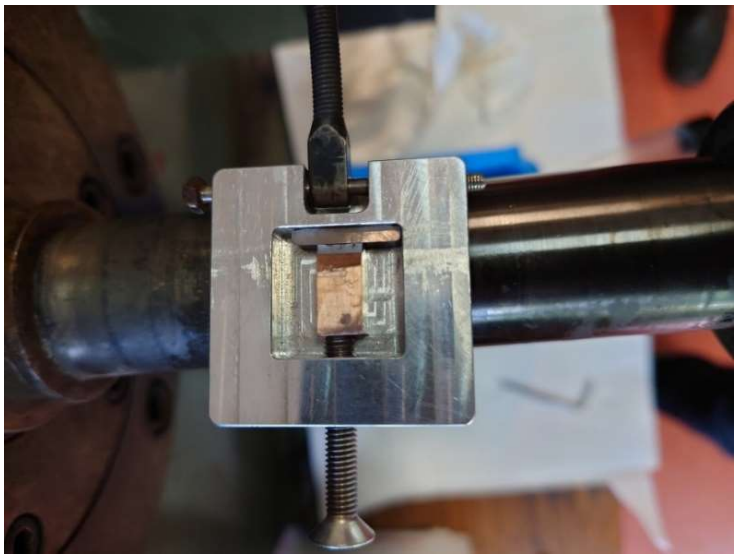
Slika 25. Ispitivanje prionjivosti prevlake dijamantnim indentorom

5.3. Ispitivanje adhezijskog trošenja

Ispitivanje adhezijskog trošenja prstenova provedeno je u Laboratoriju za tribologiju, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Ispitivanje se provelo metodom klizanja prizme po prstenu na uređaju prikazanom na slici 26. Uređaj se sastoji od induktivnog senzora II5917 tvrtke IFM, digitalnog Wi-Fi osciloskop, remenskog prijenosa, rotirajuće osovine, mete s ticalom, napajanja senzora, poluge s držačem utega i kontrolne jedinice.

Slika 26. Uređaj za ispitivanje adhezijskog trošenja

Prije ispitivanja, uzorak ležajne bronce dimenzija 7x14x7,2 mm bio je izbrušen brusnim papirom gradacije P500 i P2000. Ispitni uzorak od ležajne bronce je postavljen na držač uzorka, kao što je prikazano na slici 27.



Slika 27. Uzorak postavljen na držač uzorka i osiguran vijkom

Uteg mase 1,5 kg ili 2,0 kg je postavljen na držač utega što je prikazano na slici 28. Uteg preko poluge djeluje na ispitni uzorak od ležajne bronce normalnom silom F_N .

Slika 28. Uteg na držaču utega

Normalna sila F_N, na ispitni uzorak je određena prema jednadžbis:

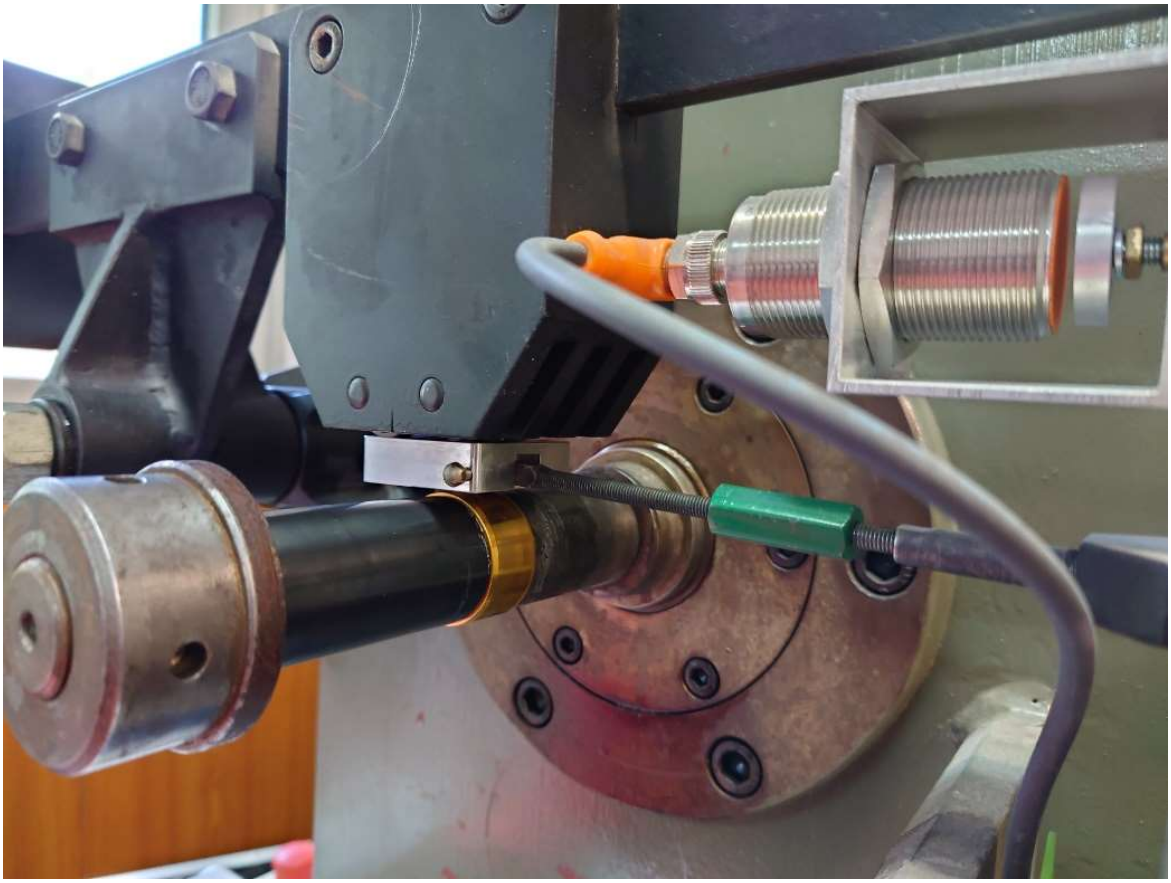
$$F_N = m \cdot g \cdot k = 75 \text{ N } ili \text{ } 100 \text{ N} \tag{5}$$

- m – masa utega (kg), 1,5 kg za P0/B0, 2 kg za sve ostale prstenove
- g – gravitacija Zemlje (m^2/s) ≈ 10 m^2/s
- k – krak djelovanja, 5.

Prije početka ispitivanja, postavljen je induktivni senzor i meta povezana za savojnu oprugu. Savojna opruga povezana je s prizmom i na nju se prenosi djelovanje sile trenja uspostavljene između prizme i prstena. Analogni signal s induktivnog senzora preuzima se u računalnom programu i pretvara u digitalni zapis s iznosom napona senzora koji je očitan svake 0.1 s. Vrijeme trošenja je za sva ispitivanja trajalo minimalno 3 minute (185 sekundi) i za svako ispitivanje je snimljeno 1850 podataka. Raspon u kojem je senzor detektirao podatke je od 0 do 10 mm te za svaki milimetar napon se mijenjao za 1,111 V.

Za svaki prsten su provedena dva ispitivanja adhezijskog trošenja, jedan bez podmazivanja prstena (oznaka 0) i drugi sa podmazivanjem prstena (oznaka 1). Za podmazivanje prstena se koristilo motorno dizelsko ulje 5AE 5W – 30. Tijekom ispitivanja ulje je, uz pomoć četkice,

kontinuirano nanošeno na prsten. Na slici 29 je prikazana je provedba ispitivanja adhezijskog trošenja sa suhim trenjem (bez podmazivanja).

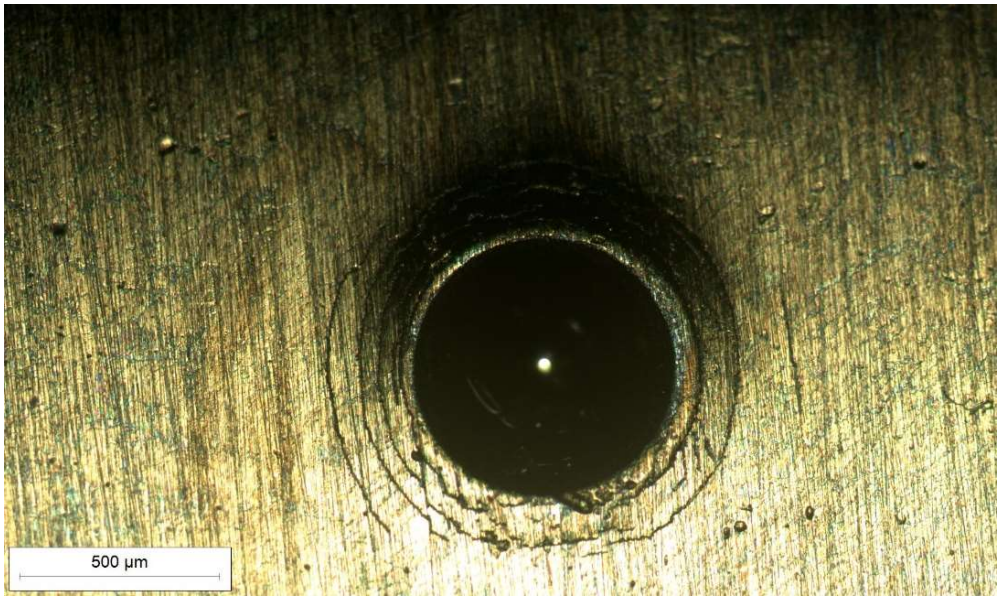


Slika 29. Ispitivanje adhezijskog trošenja

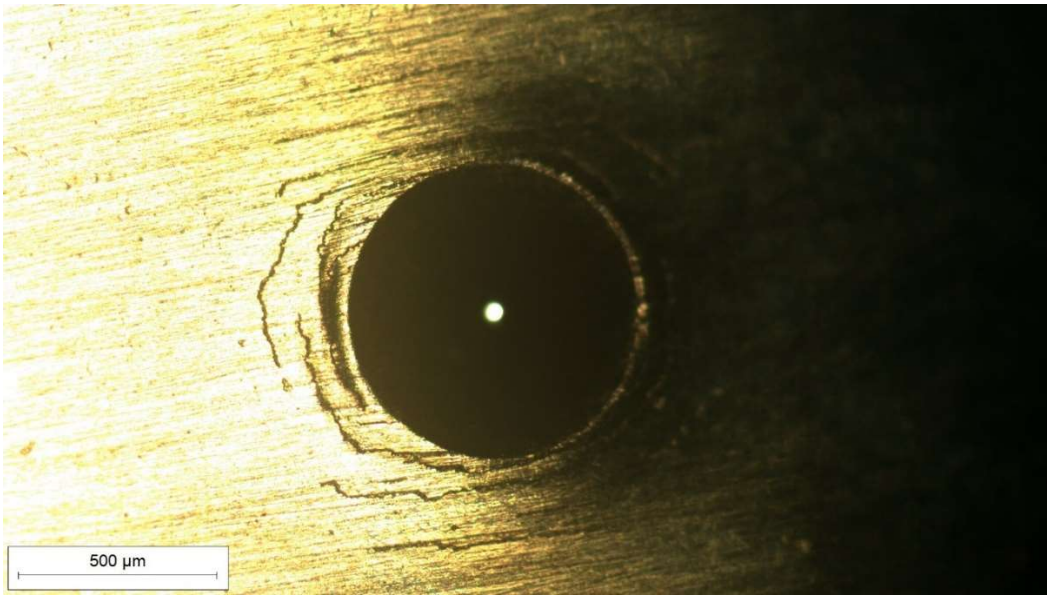
6. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA

6.1. Prionjivost PVD i PACVD prevlaka

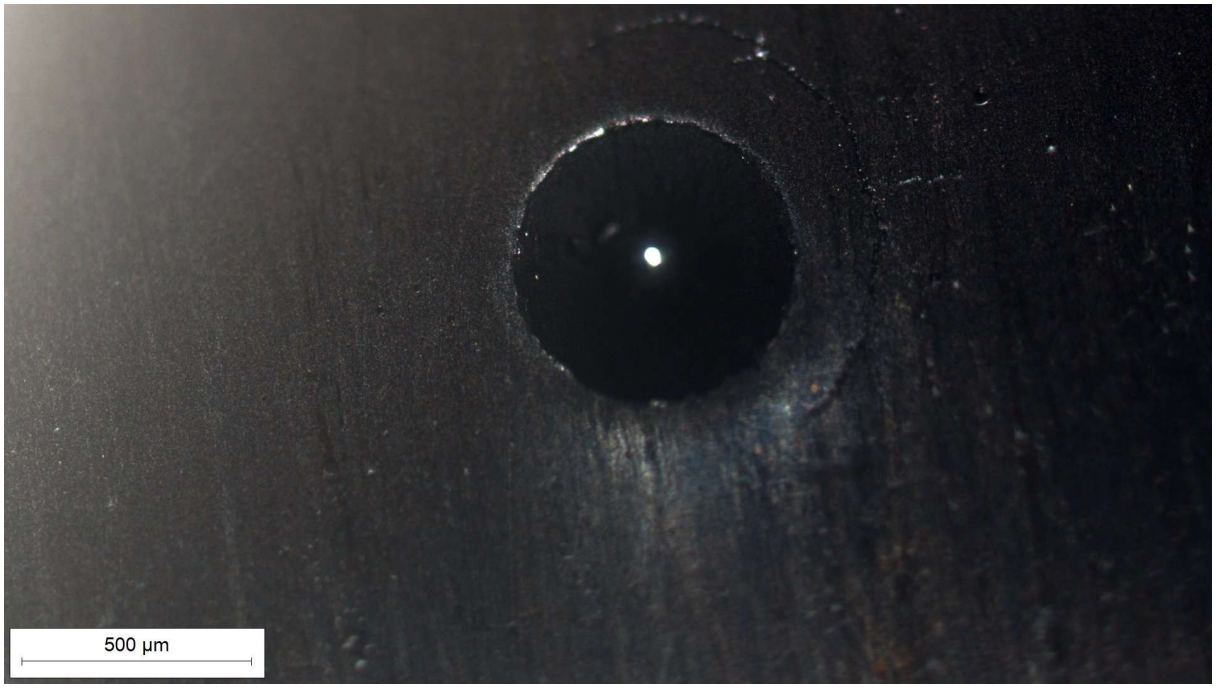
Na slikama 30 do 32 su prikazana mjesta ispitivanja prionjivosti prevlaka prema metodi VDI 3198.



Slika 30. Mjesto ispitivanja prionjivosti prevlake na prstenu P2



Slika 31. Mjesto ispitivanja prionjivosti prevlake na prstenu P3



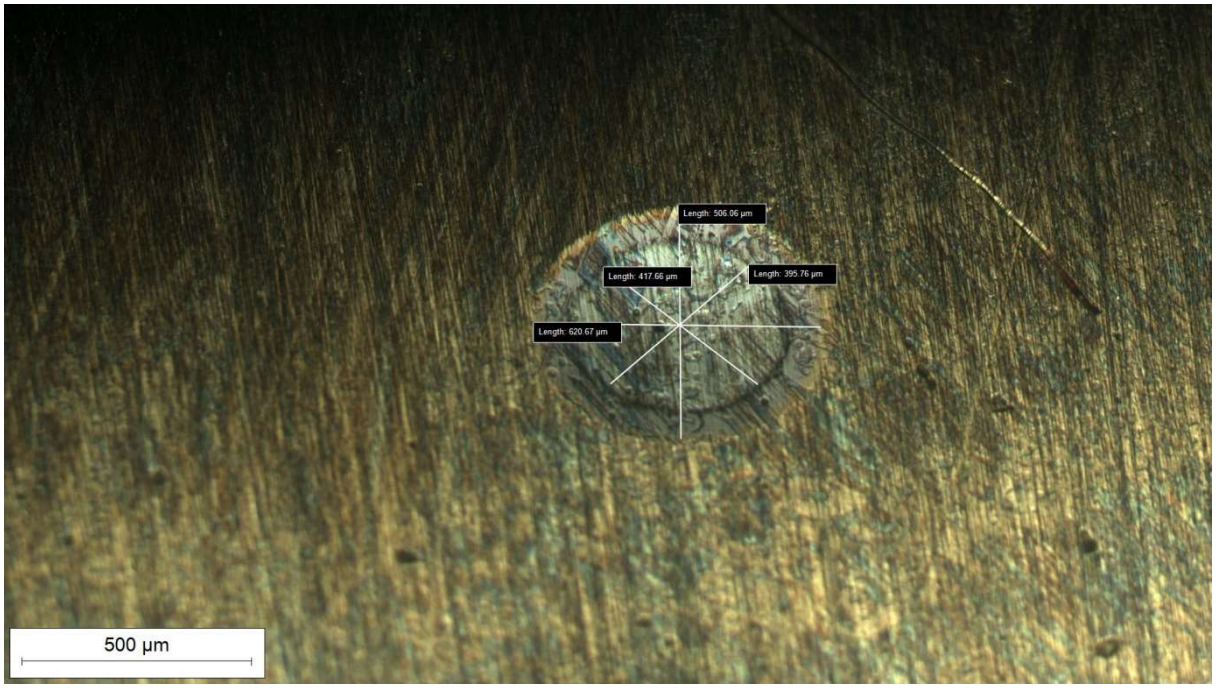
Slika 32. Mjesto ispitivanja prionjivosti prevlake na prstenu P4

Kao što je vidljivo na slikama, prionjivost prevlaka na prstenima je uglavnom dobra iako postoje tragovi mikropukotina i raslojavanja. Prsten P2 ima ujednačeno oštećenje prevlake oko mjesta utiskivanja indentora. Prsten P3 pokazao je trag raslojavanja na lijevoj strani ispitnog mjesta i graniči sa neprihvatljivim oštećenjem. Prsten P4 ima najmanje vidljive tragove oštećenja što znači da ima najbolju prionjivost prevlake.

6.2. Debljina PVD i PACVD prevlaka

Izračunavanje debljine prevlake je provedeno kalotestom, računalnim programom i optičkim mikroskopom. Uzorak se postavlja na sredini postolja mikroskopa, gdje svjetlo udara površinu uzorka, i uz pomoću računalnog programa dobijemo vizualnu sliku površine prstena.

Uz pomoć računalnog programa i mikroskopa određen je vanjski i unutarnji promjer kratera što je prikazano na slici 33.



Slika 33. Mjesto ispitivanja prstena P2 kalotestom

U tablici 10 su prikazane vrijednosti debljine prevlake za prstenove P2, P3 i P4. Budući da ima više tragova trošenja, uzima se srednja vrijednost svih mjerenja za pojedine prstenove.

Tablica 10. Vrijednosti debljine prevlake za prstenove P2, P3 i P4

Debljina prevlake	e_1, µm	e_2, µm	e_3, µm	e_{sr}, µm
P2	2	1	1	1,33
P3	2	2	2	2
P4	3	2	2	2,33

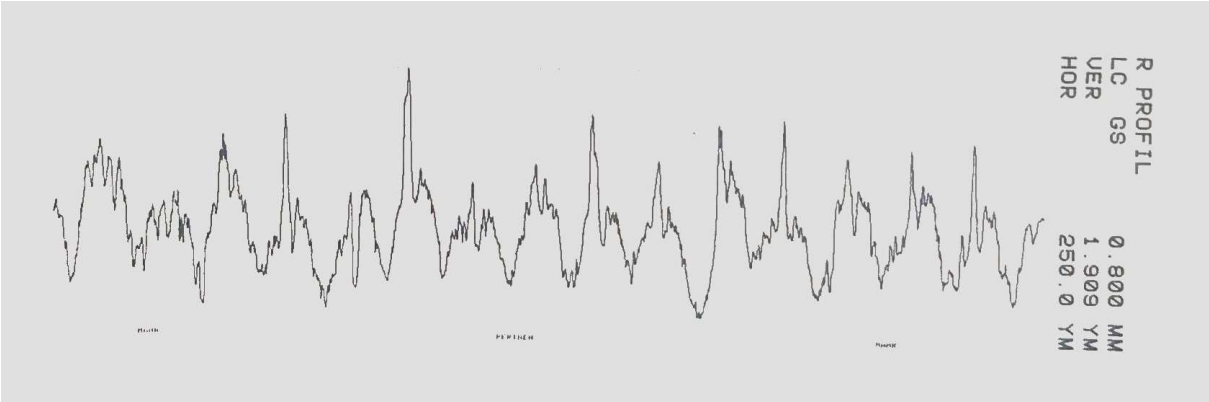
Iz tablice 10 je vidljiva razlika u debljini prevlake za sva tri ispitana prstena, ali ta razlika je jako malena s obzirom da se radi o mikrometarskoj veličini. Prema podatcima, najbolji izbor prstena, prema debljini prevlake, bi bio P4, ali zbog jako malene razlike u debljinama prevlaka, nije bitno koji će se prsten odabrati.

6.3. Hrapavost površine

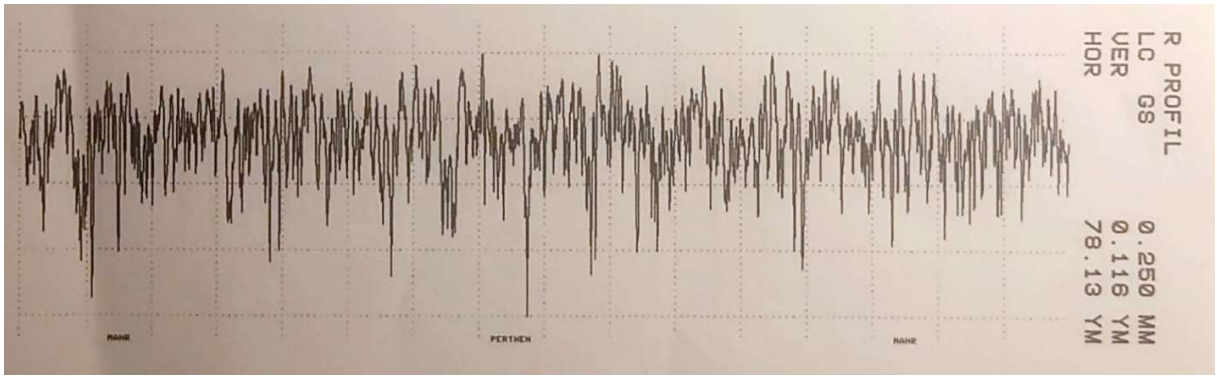
Prije ispitivanja adhezijskog trošenja, je provedeno i ispitivanje hrapavosti u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. S obzirom da je hrapavost proporcionalna sili i faktoru trenja, dovoljno je samo prikazati parametre hrapavosti. Parametri i profili hrapavosti su prikazani s tablicom 11 i slikama 34 do 39.

Tablica 11. Vrijednosti parametra hrapavosti za ležajnu broncu i ispitivane prstene

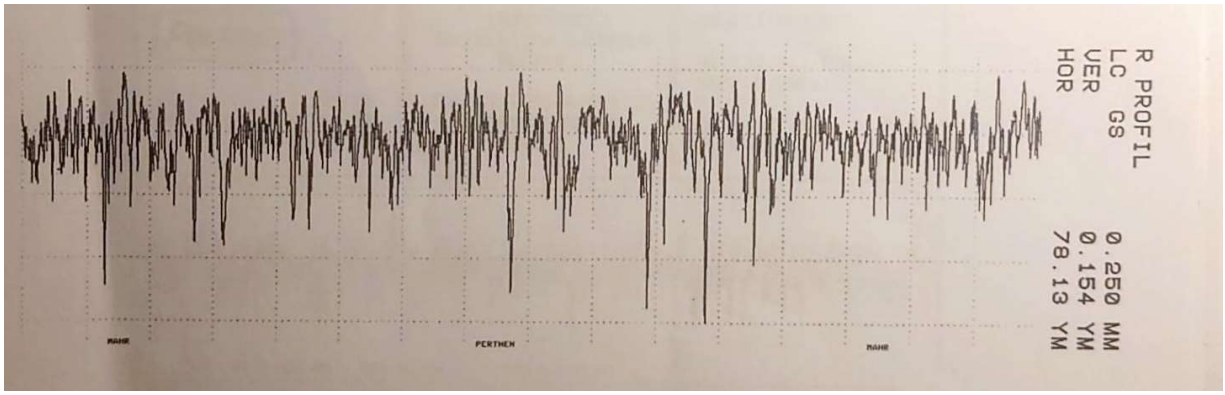
Naziv	Bronca	P0	P1	P2	P3	P4
R_{max}, µm	8,724	0,470	0,513	0,474	1,021	1,526
R_z, µm	6,847	0,400	0,418	0,369	0,717	1,106
R_a, µm	1,133	0,050	0,052	0,045	0,068	0,104



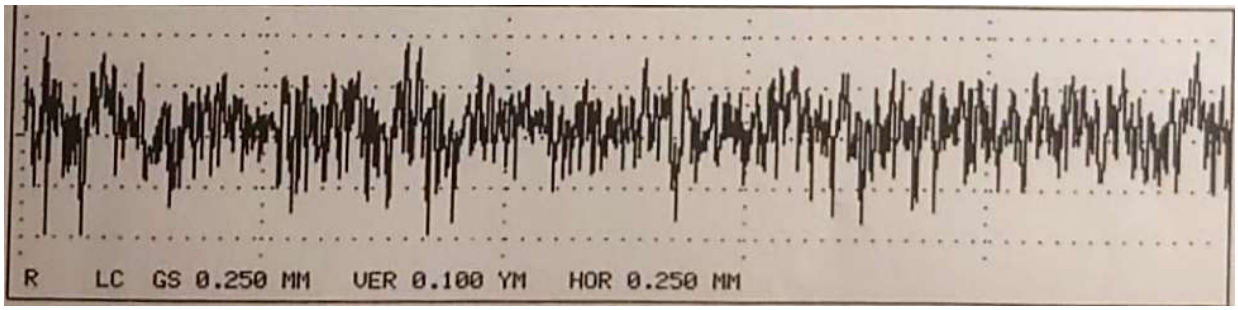
Slika 34. Profil hrapavosti za ležajnu broncu Cu-Pb



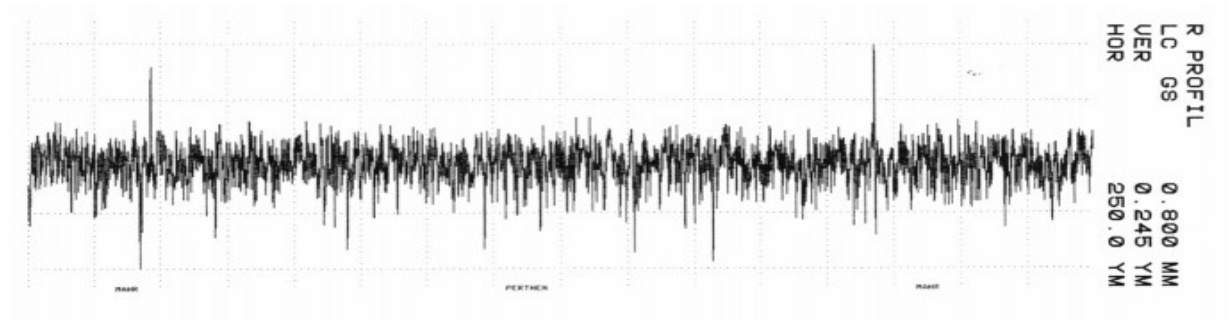
Slika 35. Profil hrapavosti za neprevučeni prsten 100Cr6



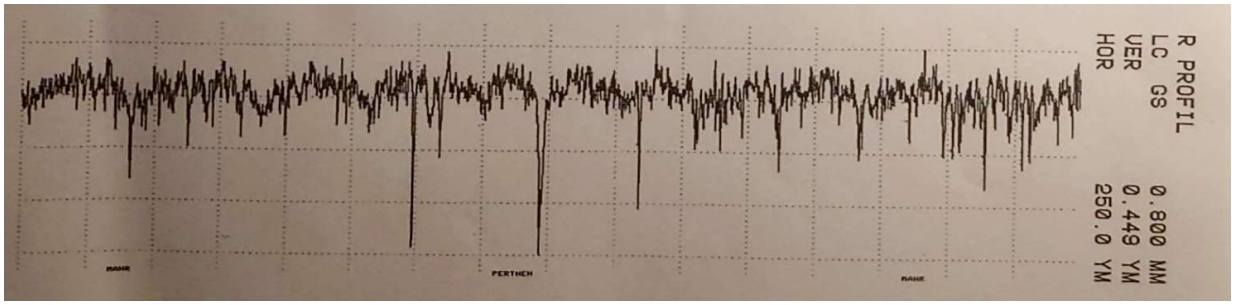
Slika 36. Profil hrapavosti za prsten nitriran u plazmi



Slika 37. Profil hrapavosti za prsten s prevlakom PACVD TiCN/TiN



Slika 38. Profil hrapavosti za prsten s prevlakom PVD TiN



Slika 39. Profil hrapavosti za prsten s prevlakom PACVD TiN/TiCN

6.4. Adhezijsko trošenje

Nakon ispitivanja adhezijskog trošenja, dobiveni podatci iz *Excel* tablice su izračunati sa sljedećim formulama:

$$S = \frac{U}{1{,}111} \tag{6}$$

- S – udaljenost mete od senzora, mm
- U – napon, V
- 1,111 – konstanta napona po jednom mm udaljenosti, V/mm

Nakon izračunate udaljenosti, za svaki iznos napona, bilo je potrebno pronaći maksimalnu udaljenost mete od senzora S_{max} jer je to zapravo referentni položaj za sva ostala mjerenja. Kada je udaljenost maksimalna tada je djelovanje mete na magnetsko polje senzora najslabije pa je zbog toga napon najveći pri maksimalnoj udaljenosti. Kako bi se izračunala sila trenja, potrebna za dobivanje faktora trenja, bilo je potrebno izračunati pomak korištenjem jednadžbe:

$$u = S_{\text{max}} - S_{\text{trenutni}} \tag{7}$$

- u – pomak, mm
- S_{max} – maksimalna udaljenost mete od senzora, mm
- $S_{trenutni}$ – trenutna udaljenost mete od senzora, mm

Pomoću pomaka se izračuna sila trenja F_{tr}:

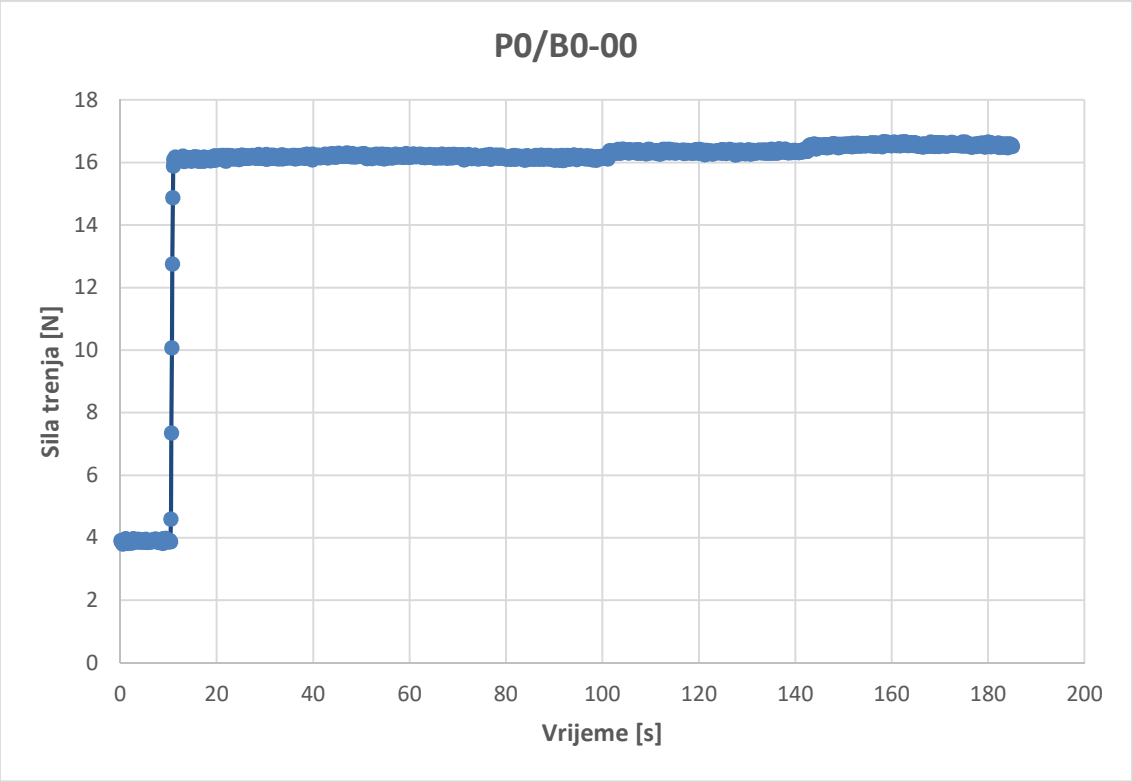
$$F_{\text{tr}} = u \cdot c + 0{,}0321 \tag{8}$$

- F_{tr} – sila trenja, N
- u – pomak, mm
- c – konstanta opruge (c = 5,7965)

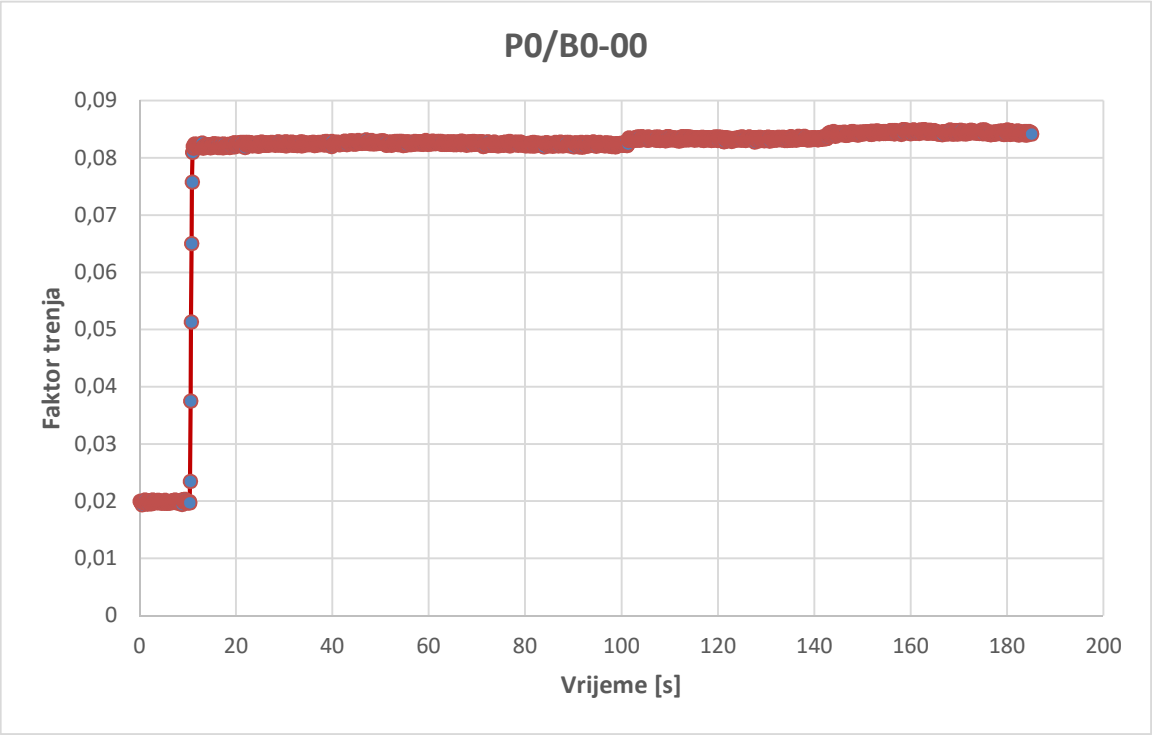
Faktor trenja μ se računao dijeljenjem sile trenja F_{tr} s normalnom komponentom F_N:

$$\mu = \frac{F_{\text{tr}}}{F_{\text{N}}} \tag{9}$$

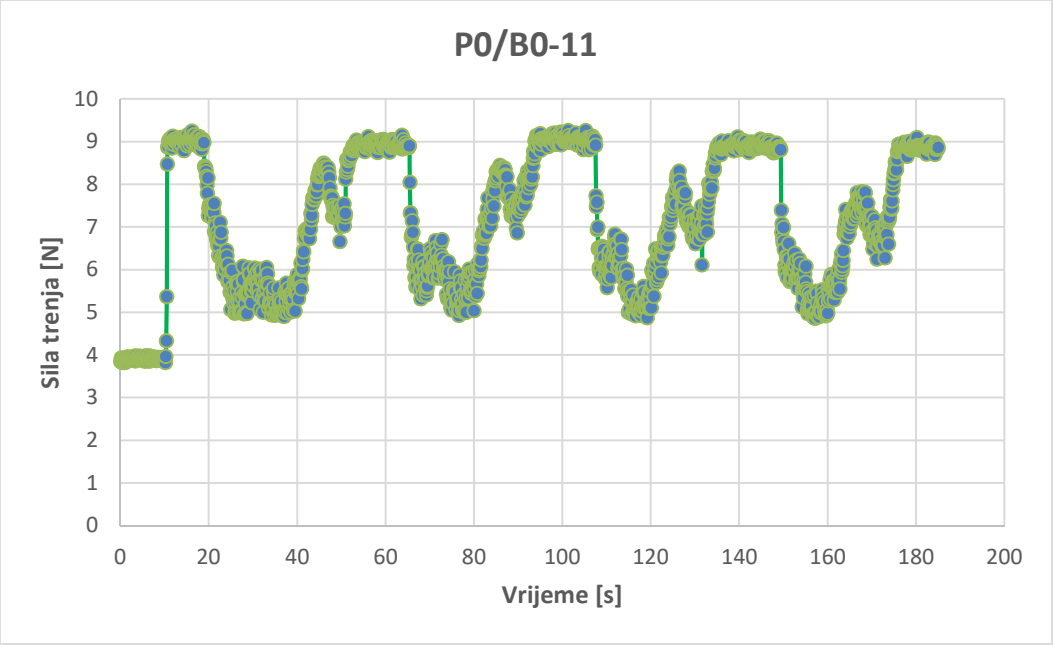
Dobiveni podatci o sili trenja i faktoru trenja grafički su predočeni slikama 40 do 51. Broj 00 označava da se provelo drugo ispitivanje bez podmazivanja, a broj 11 da se provelo drugo ispitivanje s podmazivanjem. Budući da je faktor trenja proporcionalan sili trenja, krivulje na slikama su kvalitativno istog oblika za silu trenja i faktor trenja.



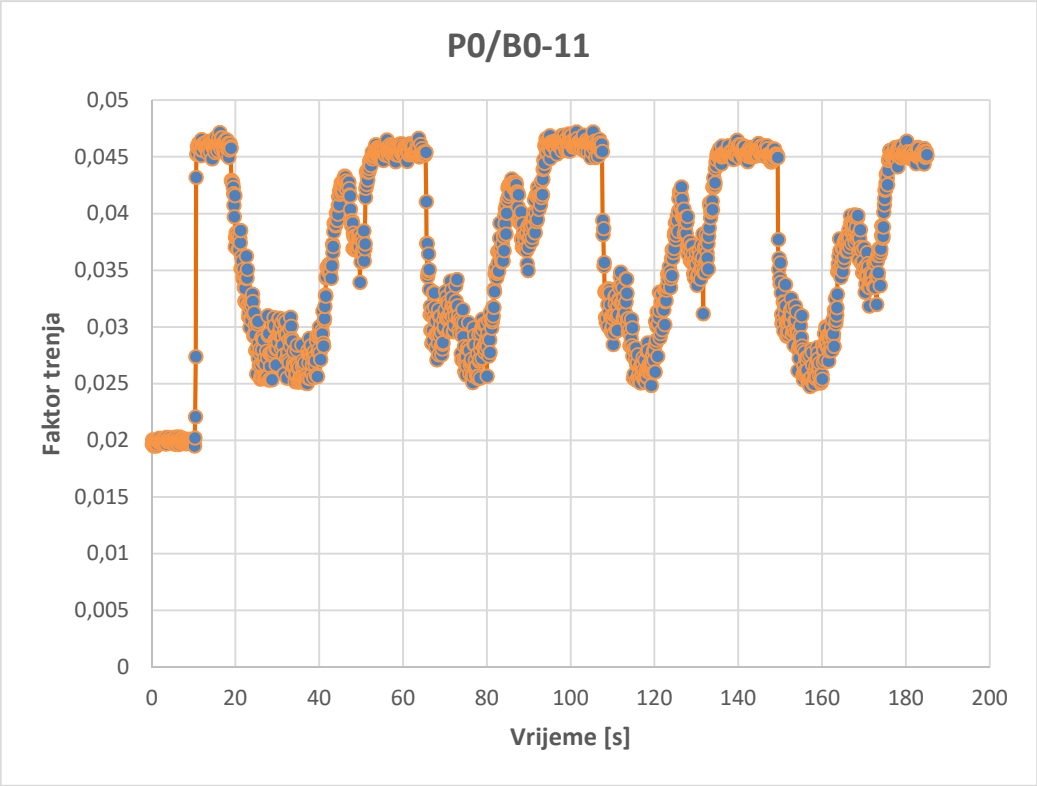
Slika 40. Promjena sile trenja u vremenu za ispitni par P0/B0-00



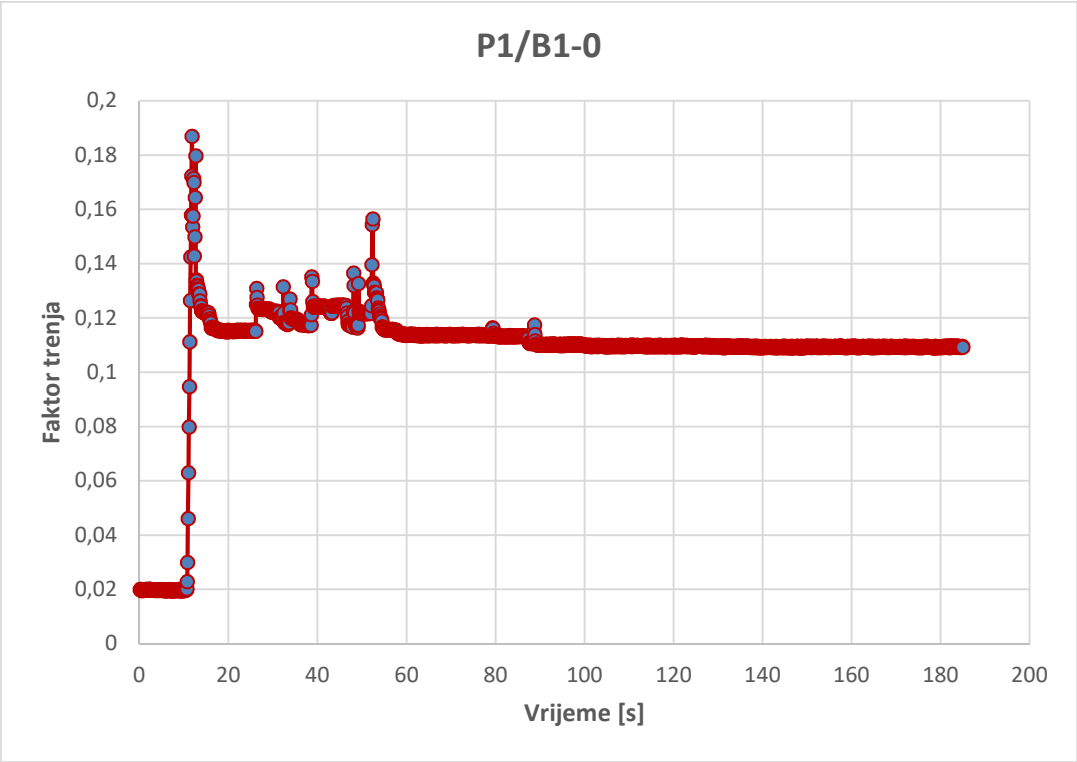
Slika 41. Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P0/B0-00



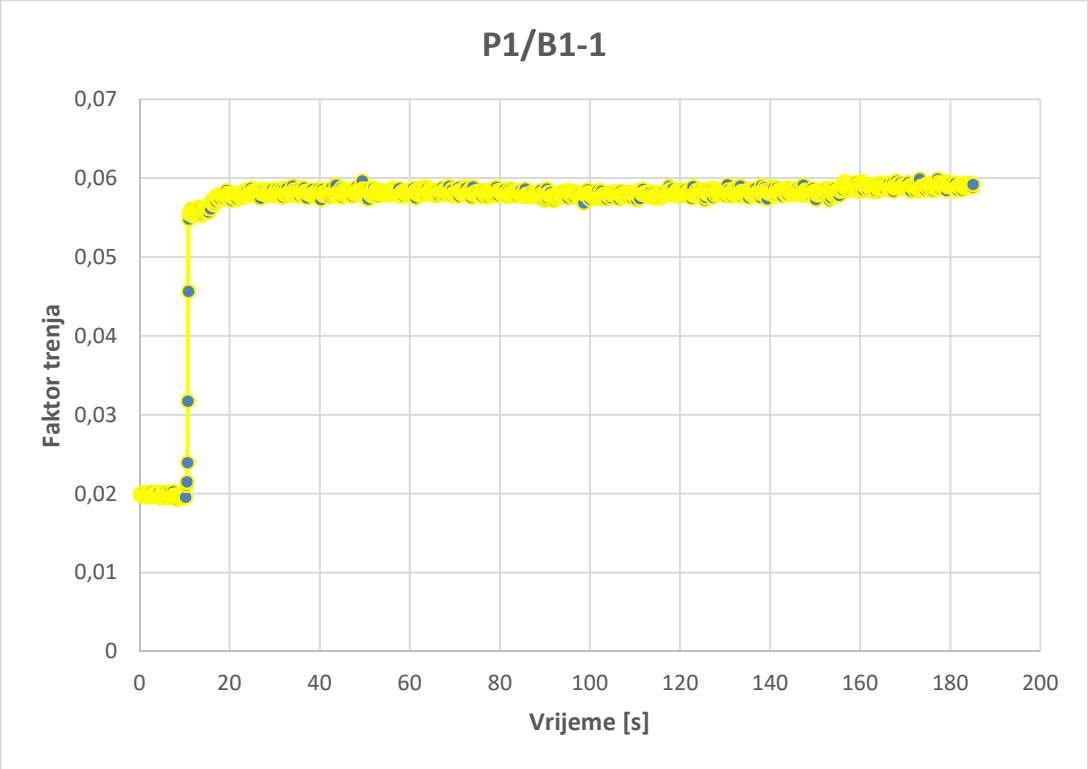
Slika 42. Promjena sile trenja u vremenu za ispitni par P0/B0-11



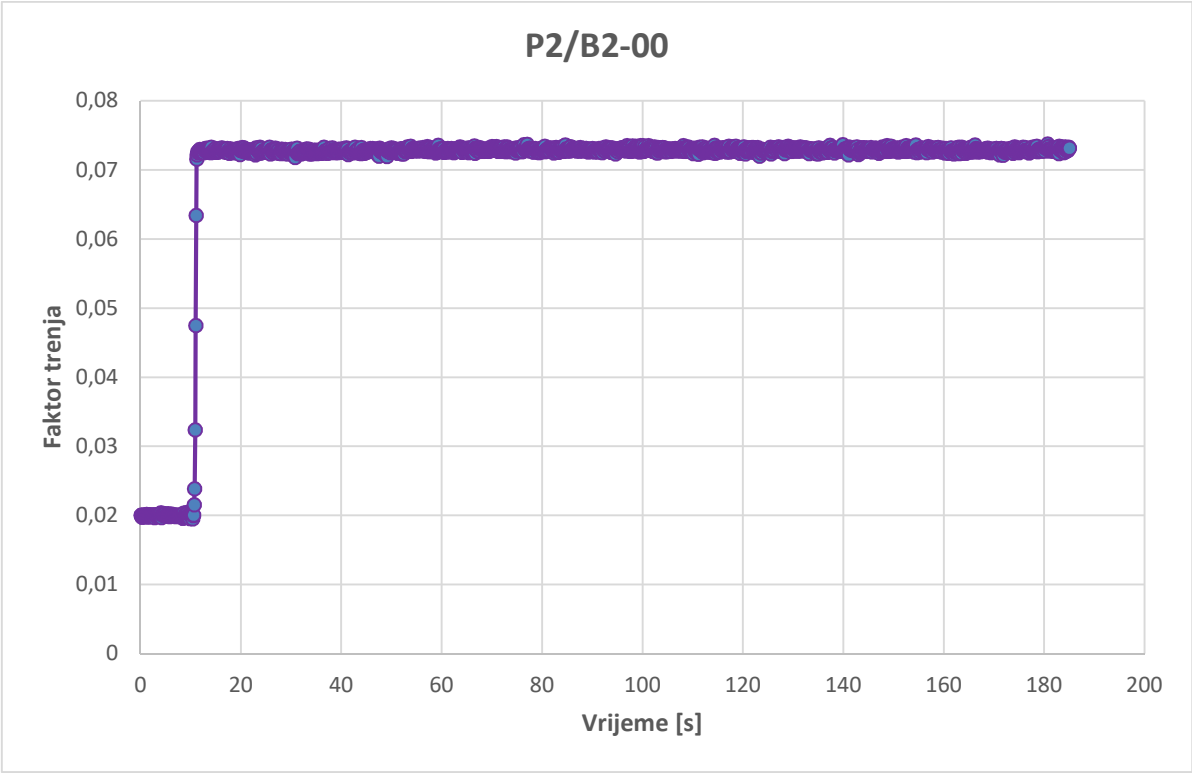
Slika 43. Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P0/B0-11



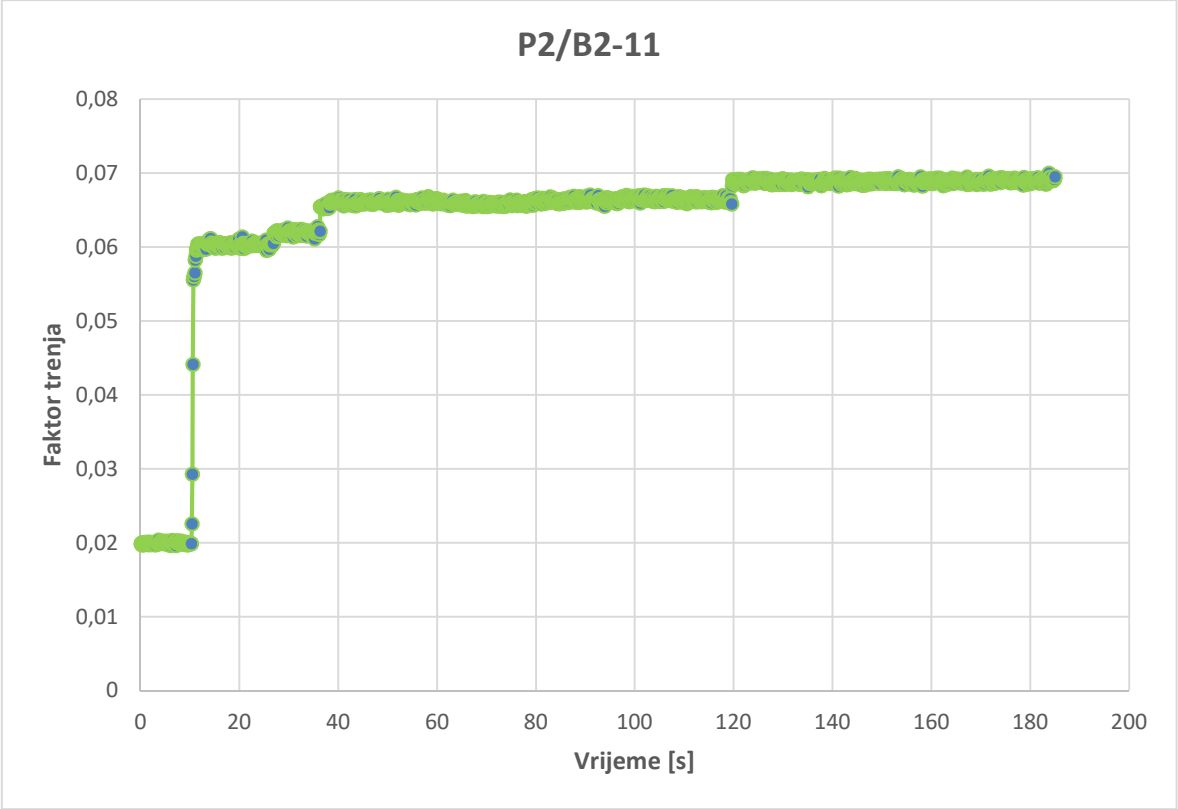
Slika 44. Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P1/B1-0



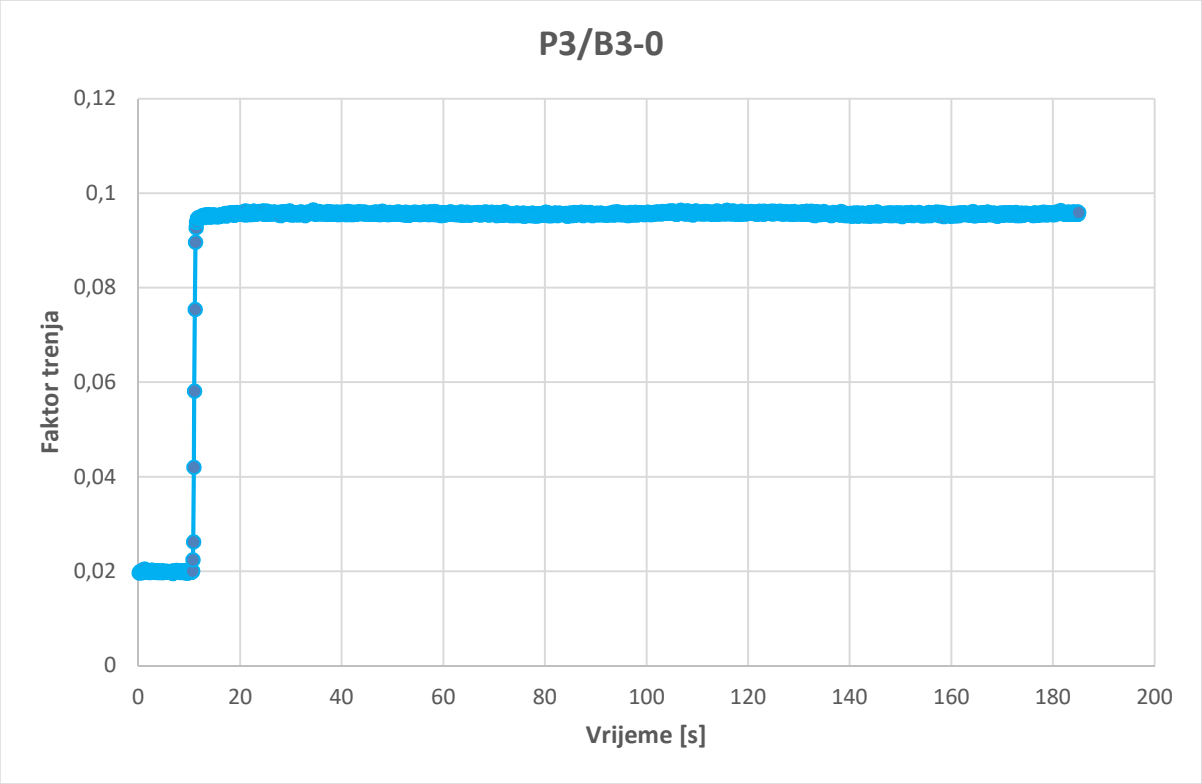
Slika 45. Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P1/B1-1



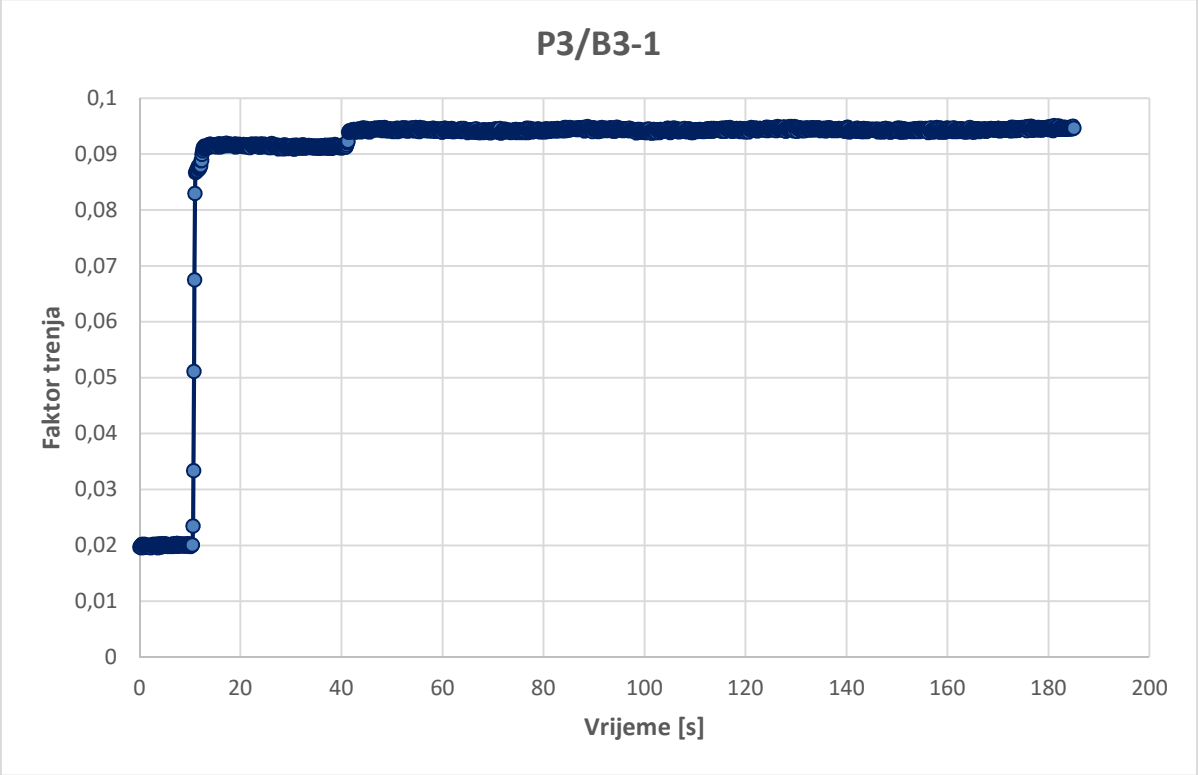
Slika 46. Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P2/B2-00



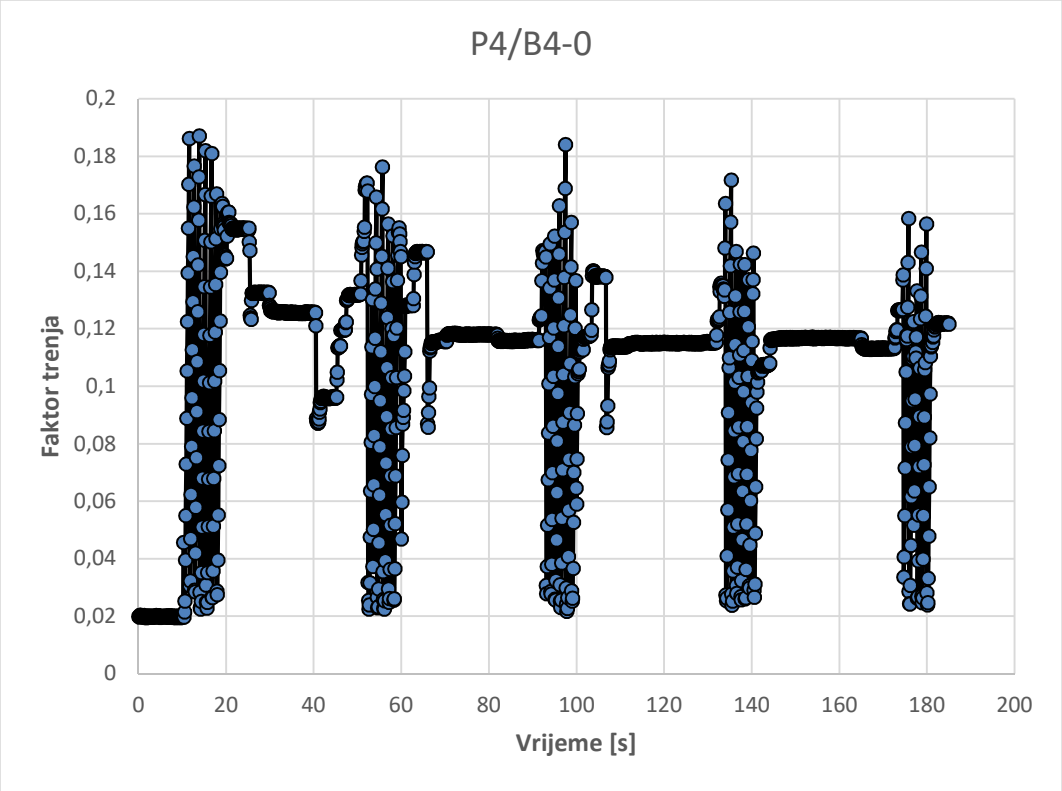
Slika 47. Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P2/B2-11



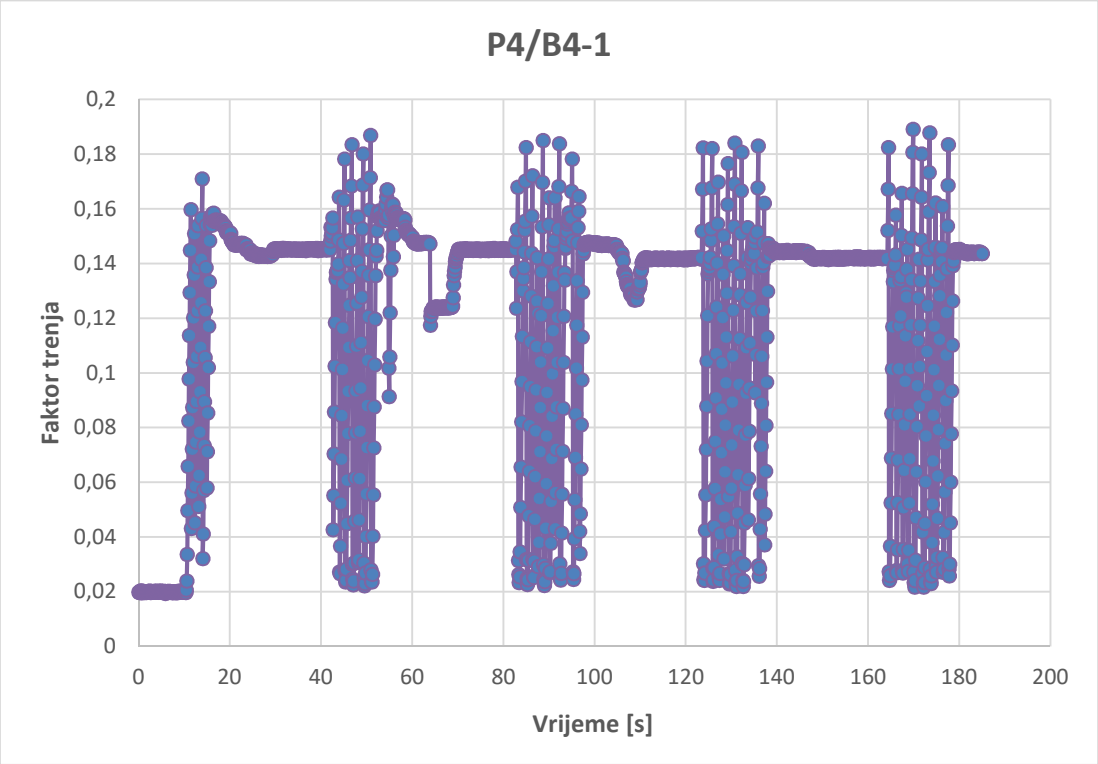
Slika 48. Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P3/B3-0



Slika 49. Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P3/B3-1



Slika 50 Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P4/B4-0



Slika 51. Promjena faktora trenja u vremenu za ispitni par P4/B4-1

Tablice 12 i 13 predočavaju statistički obrađene rezultate koji uključuju najmanji i najveći iznos sile trenja/faktora trenja, njihovu srednju vrijednost i standardno odstupanje.

Tablica 12. Karakteristične vrijednosti sile trenja

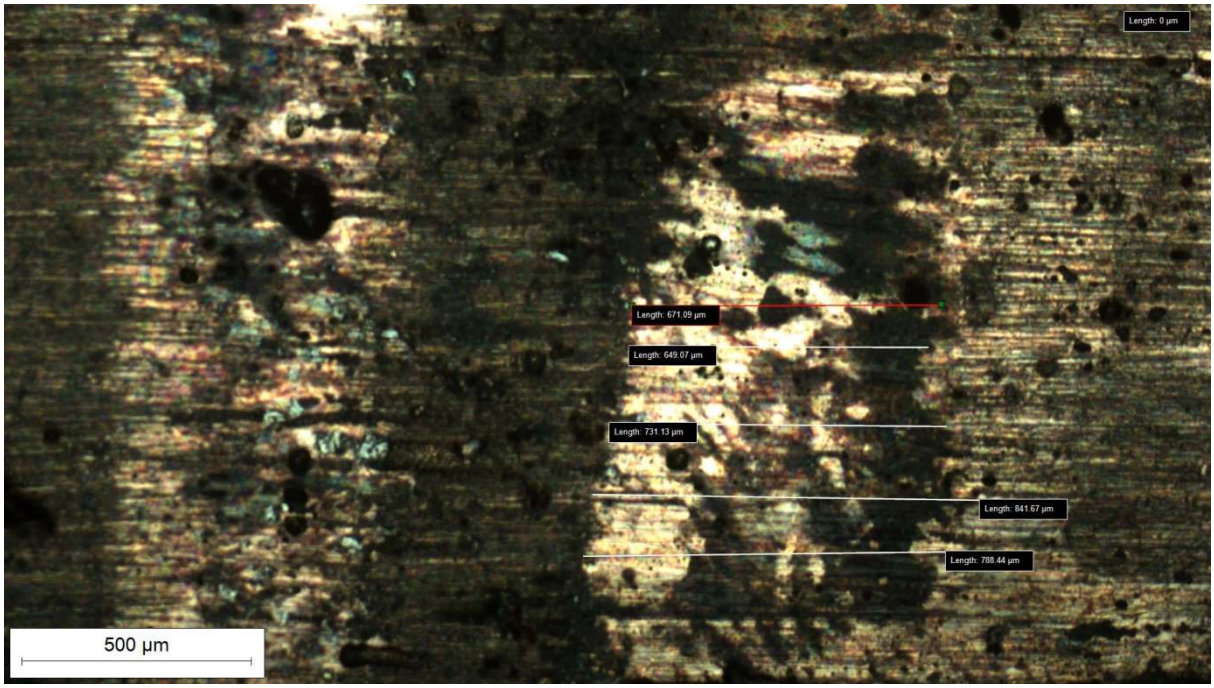
Prsten	P0	P1	P2	P3	P4
Minimalna sila trenja, N	3,835 – 0 3,811 – 00 3,870 – 1 3,829 – 11	3,793 – 0 3,785 – 1	3,843 – 0 3,829 – 00 3,858 – 1 3,858 – 11	3,833 – 0 3,836 – 1 3,813 – 11	3,813 – 0 3,814 – 1
Maksimalna sila trenja, N	12,411 – 0 16,678 – 00 10,447 – 1 9,266 – 11	36,674 – 0 11,749 – 1	17,256 – 0 14,467 – 00 13,739 – 1 13,739 – 11	18,933 – 0 18,660 – 1 19,048 – 11	36,699 – 0 37,117 – 1
Srednja vrijednost sile trenja, N	11,162 – 0 15,606 – 00 8,978 – 1 7,143 – 11	21,174 – 0 10,977 – 1	16,360 – 0 13,682 – 00 12,518 – 1 12,518 – 11	17,895 – 0 17,565 – 1 17,829 – 11	21,112 – 0 23,832 – 1
Standardno odstupanje, N	1,837 – 0 2,909 – 00 1,573 – 1 1,614 – 11	4,539 – 0 1,772 – 1	3,093 – 0 2,459 – 00 2,186 – 1 2,186 – 11	3,519 – 0 3,414 – 1 3,543 – 11	6,935 – 0 8,670 – 1

Tablica 13. Karakteristične vrijednosti faktora trenja

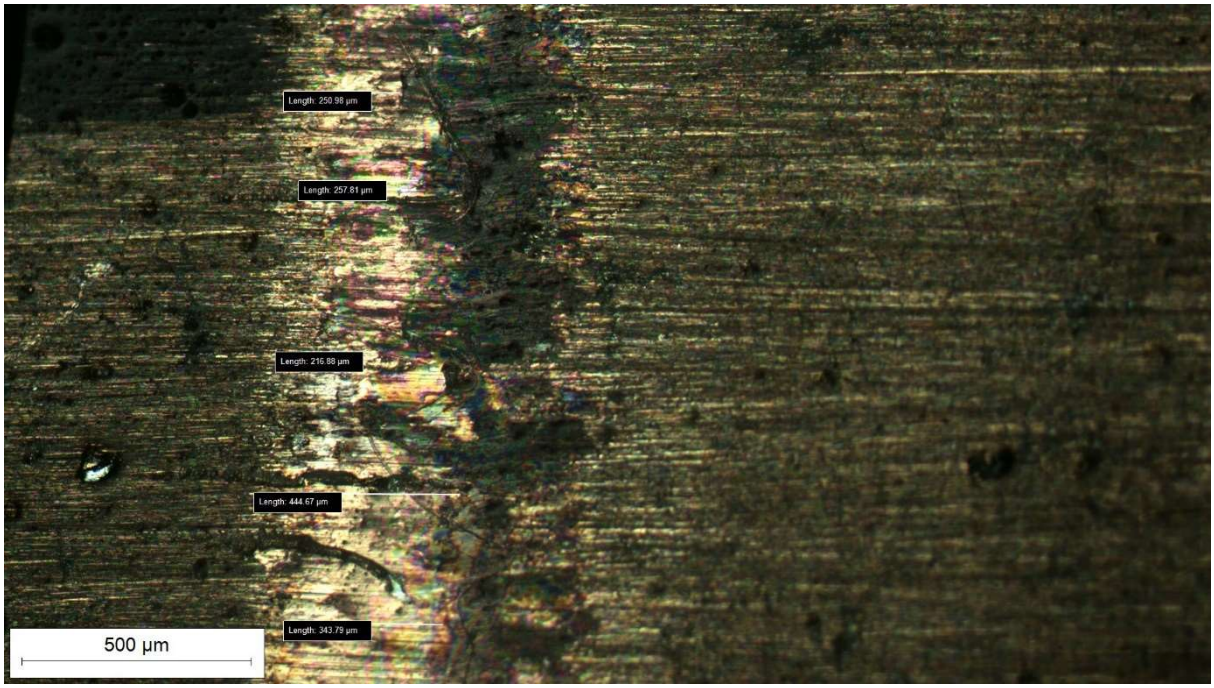
Prsten	P0	P1	P2	P3	P4
Minimalni faktor trenja	0,020 – 0 0,019 – 00 0,020 – 1 0,019 – 11	0,019 – 0 0,019 – 0	0,020 – 0 0,020 – 00 0,020 – 1 0,020 – 11	0,020 – 0 0,020 – 1 0,019 – 11	0,019 – 0 0,019 – 1
Maksimalni faktor trenja	0,063 – 0	0,187 – 0	0,088 – 0	0,096 – 0	0,187 – 0

	0,085 – 00 0,053 – 1 0,047 – 11	0,060 – 1	0,074 – 00 0,070 – 1 0,070 – 11	0,095 – 1 0,097 – 11	0,189 – 1
Srednja vrijednost faktora trenja	0,057 – 0 0,080 – 00 0,046 – 1 0,036 – 11	0,108 – 0 0,056 – 1	0,083 – 0 0,070 – 00 0,064 – 1 0,064 – 11	0,091 – 0 0,090 – 1 0,091 – 11	0,108 – 0 0,121 – 1
Standardno odstupanje	0,009 – 0 0,015 – 00 0,008 – 1 0,008 – 11	0,023 – 0 0,009 – 1	0,016 – 0 0,013 – 00 0,011 – 1 0,011 – 11	0,018 – 0 0,017 – 1 0,018 – 11	0,035 – 0 0,044 – 1

Uz pomoć računalnoga programa i mikroskopa izračunao se trag trošenja za svaki prsten. Na mjestu trošenja uzelo se pet crta, od početka do kraja traga trošenja, i izračunala srednja vrijednost tih crta, kao što je prikazano na slici 52 i 53.



Slika 52. Mjerenje traga trošenja za P0/B0-0



Slika 53. Mjerenje traga trošenja za P0/B0-1

U tablici 14 je prikazana srednja vrijednost traga trošenja za svaki prsten. Ponovljena ispitivanja (00 i 11) nisu prikazana u ovoj tablici zbog poteškoće razlikovanja traga trošenja s prvim ispitivanjem (0 i 1). Pretpostavlja se da su tragovi trošenja kod ponovljenih ispitivanja slični vrijednostima prvih ispitivanja. Prsten P4 nema vidljive tragove trošenja.

Tablica 14. Srednja vrijednost tragova trošenja.

Prsten	P0	P1	P2	P3
Srednja vrijednost traga trošenja bez podmazivanja (0), µm	736	1 219	631	911
Srednja vrijednost traga trošenja s podmazivanjem (1), µm	303	1 441	538	539

Prema svim dobivenim podatcima, nije lako odabrati najbolji prsten s obzirom na otpornost na adhezijsko trošenje. Prsten P1 ima najveće smanjenje sile i faktora trenja koristeći podmazivanje, ali trag trošenja se povećava s podmazivanjem što je jako upitno. Prsten P3 ima

slične vrijednosti sile i faktora trenja za podmazivanje i bez toga ima najmanje smanjenje traga trošenja. Prsten P4 ima blago povećanje sile i faktora trenja, ali nema vidljivi trag trošenja. Jedini prstenovi koji iskazuju normalan odnos sile i faktora trenja te traga trošenja, su prstenovi P0 i P2 gdje se sila i faktor trenja te trag trošenja smanjuje podmazivanjem. Ipak, iako je upitno, najbolji izbor je P1 (nitriran u plazmi – TiN) zbog najvećeg smanjenja sile i faktora trenja. Iako je trag trošenja veći s podmazivanjem, to se može zanemariti jer estetika nije zahtjev na materijale za klizne ležajeve. Također je moguće da se podmazivanje nije dobro upilo u materijal, što bi objasnilo dobivene rezultate. Bitno je da materijal može izdržati opterećenje i trenje tijekom kontinuiranoga rada.

7. ZAKLJUČAK

Trošenje je utjecajan trošak na današnja gospodarstva industrijaliziranih zemalja. Imaju bitan učinak na BDP i standard življenja. Iako nije moguće kompletno eliminirati trošenje, moguće ga je smanjiti različitim postupcima i metodama poput toplinske obrade ili modificiranjem i prevlačenjem površina materijala. Ti postupci su jako bitni kod izrade kliznih ležajeva koji se primarno rabe za navođenje pokretnih strojnih dijelova i prijenosa opterećenja s rukavca na blazinicu ležaja. Kod kliznih ležajeva jako su bitni zahtjevi za otpornost na trošenje i hrapavost površine.

Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu su provedena ispitivanja tvrdoće, otpornosti na adhezivno trošenje i debljine prevlake. Pet prstena kemijskog sastava 100Cr6, od kojih su četiri obrađena različitim postupcima prevlačenja, su rabljeni tijekom ovih ispitivanja. Rabeći razne uređaje i računalne programe za ispitivanje, dobivene su razne vrijednosti za svaki traženi zahtjev na klizne ležajeve.

S obzirom na rezultate, najbolji odabir prstena za klizne ležajeve je prsten nitriran u plazmi. Ovaj prsten je pokazao najveće smanjenje sile i faktora trenja pri adhezijskom trošenju iako se trag trošenja povećao tijekom podmazivanja, što je jako upitno, ali i pojašnjeno. Bitno je samo da materijal zadovoljava zahtjeve otpornosti na adhezijsko trošenje i hrapavosti površine, a širina traga trošenja nije presudna za izbor prevlake.

U budućnosti se izbor materijala može promijeniti zbog promjene tehnologije i stvaranja novih materijala. Bit će potrebno provesti ispitivanja, ali je značajno da se zna kojim postupcima i kako je to potrebno napraviti.

LITERATURA

[1] Swain B, Bhuyan S, Behera R, Mohapatra SS, Behera A. *Wear: A Serious Problem in Industry.* Tribology in Materials and Manufacturing - Wear, Friction and Lubrication. IntechOpen; 2020. Dostupno na: https://www.intechopen.com/books/tribology-in-materials-and-manufacturing-wear-friction-and-lubrication/wear-a-serious-problem-in-industry. doi: 10.5772/intechopen.94211., 27.05.2021.

[2] Jelaska D. Elementi strojeva : skripta za studente Industrijskog inženjerstva. Split: Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje (FESB), Sveučilište u Splitu; 2005.

[3] Neale MJ. *Bearings.* Oxford: Butterworth-Heinemann; 1993.

[4] Bhadeshia HKDH. *Steels for bearings*. Prog Mater Sci. 2012 Feb;57(2):268–435. doi: 10.1016/j.pmatsci.2011.06.002.

[5] LEGIRANI ALATNI ČELICI ZA RAD U HLADNOM STANJU. Jugoslavija: ŽELEZARNA RAVNE; 1983.

[6] *Nitrogen Quenching – What Is Gas Quenching.* GENERON [Internet]. Dostupno na: https://www.generon.com/nitrogen-quenching-system/., 30.06.2021.

[7] Harris TA, Kotzalas MN. *Rolling bearing analysis*. 5th ed. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis; 2007. 2 p.

[8] C*old-work tool steels*. https://www.dew-stahl.com/en/products/tool-steels/cold-work-steels, 07.07.2021.,

[9] Stupnišek M, Matijevi B. PREGLED POSTUPAKA MODIFICIRANJA I PREVLAČENJA METALA MODIFICATION AND COATING OF METAL SURFACE. :11.

[10] Landek D. Podloge za vježbu iz kolegija "Proizvodne tehnologije", dio Toplinska obrada. Zagreb, Fakultet strojrastva i brodogradnje; 2013., 25.06.2021.

[11] Gojić M. Površinska obradba materijala. Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu; 2010., 25.06.2021.

[12] Vidakis N, Antoniadis A, Bilalis N. *The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds.* J Mater Process Technol. 2003 Dec;143–144:481–5. doi: 10.1016/S0924-0136(03)00300-5.

[13] *User's guide - Calotester.* TRIBOtechnic;

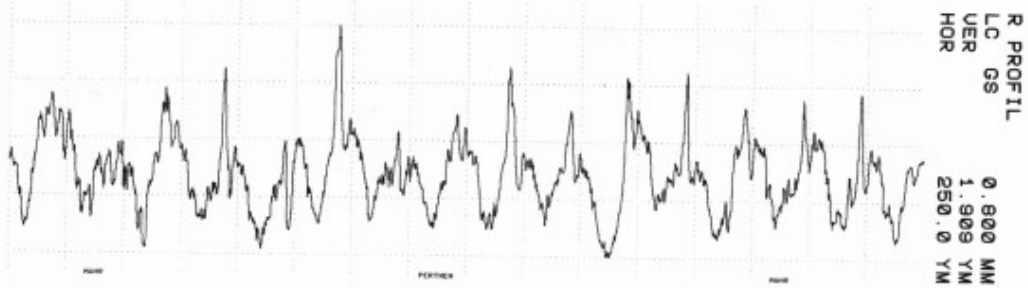
[14] Zavos A, Nikolakopoulos P. *Tribological Characterization of Smooth and Artificially Textured Coated Surfaces Using Block-on-Ring Tests.* FME Trans. 2015 May 14;43:191–7. doi: 10.5937/fmet1503191Z.

PRILOZI

perthometer S8P 4.5

Perthen LT 5.600 MM LM 4.000 MM VB 12.50 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:UNUTARNJI NR.:28.01.2021. NAME:G.BARSIC MESS.-NR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6

	KENNWERT		STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.800 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	8.724	1.442	3.948	11.34	7.392		
2	RZ	YM	6.047	0.818	1.839	7.693	5.855		
3	RA	YM	1.133	0.191	0.513	1.467	0.954		
4	RP	YM	5.383	0.873	2.435	6.944	4.509		
5	RPM	YM	4.118	0.585	1.347	4.781	3.434		
6	WT	YM	5.331	2.543	6.367	9.580	3.213		
7	RT	YM	8.824	1.406	3.948	11.34	7.392		
8	PT	YM	12.81	2.936	7.851	17.40	9.554		



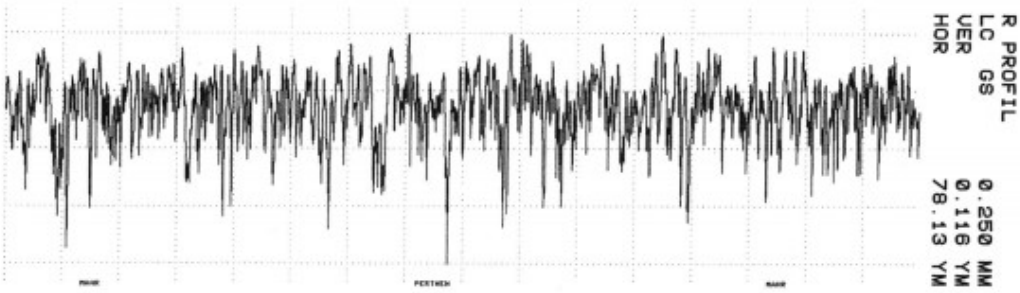
P1. Ispitivanje hrapavosti za ležajnu broncu Cu-Pb

perthometer S8P 4.5

Perthen

LT 1.750 MM LM 1.250 MM VB 12.50 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:UZORAK 0 NR.:18.2.2019. NAME:G.BARSIC MESS.-NR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6

KENNWERT			STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.470	0.059	0.167	0.535	0.368		
2	RZ	YM	0.400	0.039	0.098	0.451	0.353		
3	RA	YM	0.050	0.003	0.008	0.053	0.046		
4	RP	YM	0.150	0.003	0.008	0.154	0.146		
5	RPM	YM	0.138	0.007	0.019	0.146	0.127		
6	WT	YM	0.051	0.023	0.068	0.095	0.034		
7	RT	YM	0.478	0.048	0.135	0.542	0.407		
8	PT	YM	0.498	0.038	0.092	0.556	0.464		

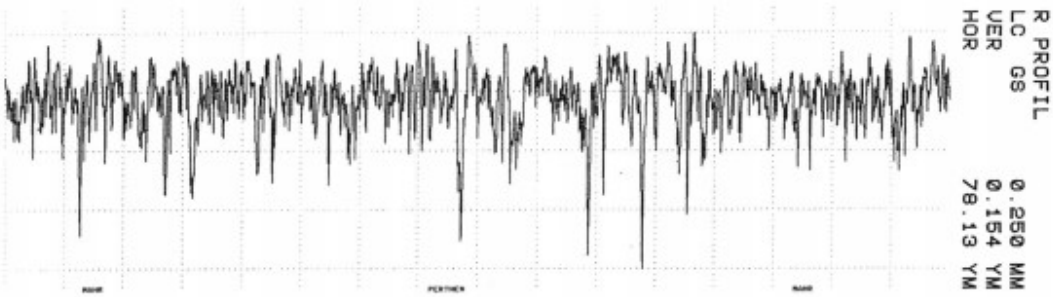


P2. Ispitivanje hrapavosti za neprevučeni prsten 100Cr6

perthometer S8P 4.5

Perthen LT 1.750 MM LM 1.250 MM VB 12.50 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:UZORAK 3 NR.:18.2.2019. NAME:G.BARSIC MESS.-NR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6

	KENNWERT		STATISTIK N = 6						
	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.513	0.075	0.168	0.615	0.447		
2	RZ	YM	0.418	0.056	0.133	0.497	0.365		
3	RA	YM	0.052	0.003	0.005	0.055	0.050		
4	RP	YM	0.167	0.014	0.044	0.190	0.146		
5	RPM	YM	0.143	0.012	0.031	0.153	0.122		
6	WT	YM	0.093	0.005	0.225	0.265	0.040		
7	RT	YM	0.523	0.072	0.168	0.615	0.447		
8	PT	YM	0.571	0.105	0.256	0.698	0.443		



P3. Ispitivanje hrapavosti za prsten nitriran u plazmi

perthometer S8P 4.5

Perthen

LT	1.750 MM
LM	1.250 MM
VB	12.50 YM

LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:VANJSKI

NR.:28.01.2021.
NAME:G.BARSIC

MESS.-NR.: 6
T1 RHT 6-50 50 6

KENNWERT — STATISTIK N = 6

	LC GS 0.250 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	0.474	0.126	0.336	0.727	0.391		
2	RZ	YM	0.369	0.036	0.101	0.438	0.336		
3	RA	YM	0.045	0.002	0.005	0.048	0.043		
4	RP	YM	0.181	0.025	0.076	0.227	0.151		
5	RPM	YM	0.142	0.016	0.050	0.169	0.119		
6	WT	YM	0.051	0.007	0.020	0.060	0.040		
7	RT	YM	0.481	0.123	0.336	0.727	0.391		
8	PT	YM	0.495	0.116	0.314	0.723	0.409		

PROG: perthometer S8P 4.5

Perthen

LT	1.750 MM
LM	1.250 MM
VB	12.50 YM

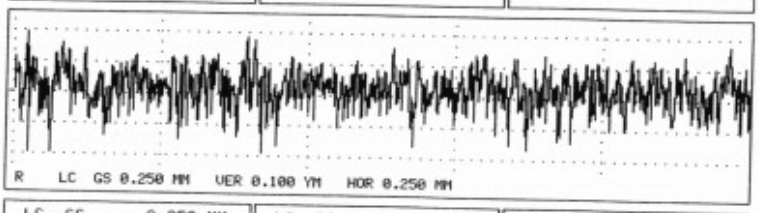
LABORATORIJ
ZA PRECIZNA MJERENJA
DUZINA

FAKULTET STROJARSTVA
I BRODOGRADNJE
ZAGREB

OBJEKT:VANJSKI

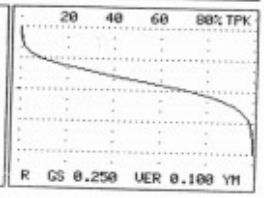
NR.:28.01.2021.
NAME:G.BARSIC

MESS.-NR.: 6
T1 RHT 6-50 50 6



LC GS	0.250 MM
> RMAX	0.391 YM
RZ	0.336 YM
RA	0.043 YM
RP	0.169 YM
RPM	0.146 YM
WT	0.046 YM
RT	0.391 YM
PT	0.409 YM

LC GS	0.250 MM
RMAX	0.391 YM
RZ	0.336 YM
RZS	0.046 YM
RZ1	0.391 YM
RZ2	0.378 YM
RZ3	0.322 YM
RZ4	0.309 YM
RZ5	0.283 YM

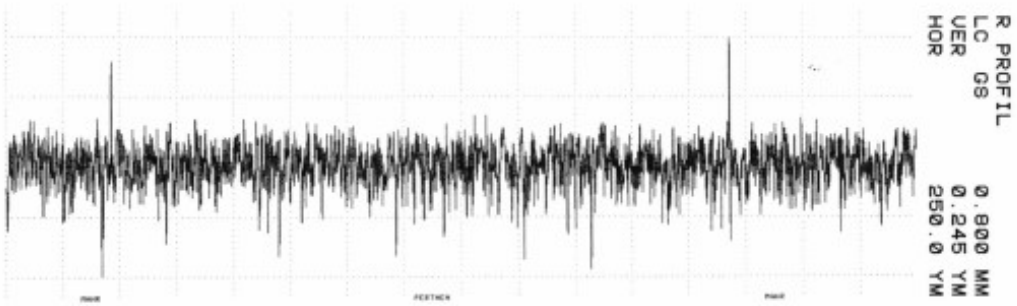


P4. Ispitivanje hrapavosti za prsten s prevlakom PACVD TiCN/TiN

perthometer S8P 4.5

Perthen LT 5.600 MM LM 4.000 MM VB 12.50 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:PRSTEN TIN NR.:15.06.2021. NAME:G.BARSIC MESS.-NR.: 5 TI RHT 6-50 50 6

	KENNWERT		STATISTIK N = 5						
	LC GS 0.800 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	1.021	0.300	0.800	1.434	0.634		
2	RZ	YM	0.717	0.095	0.243	0.809	0.567		
3	RA	YM	0.068	0.008	0.018	0.081	0.063		
4	RP	YM	0.454	0.197	0.529	0.749	0.220		
5	RPM	YM	0.298	0.066	0.175	0.378	0.203		
6	WT	YM	0.202	0.149	0.372	0.464	0.092		
7	RT	YM	1.099	0.329	0.801	1.461	0.660		
8	PT	YM	1.153	0.297	0.744	1.453	0.709		

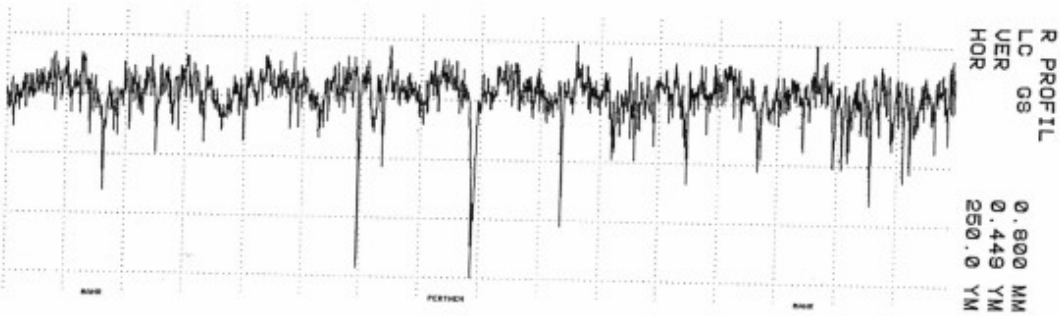


P5. Ispitivanje hrapavosti za prsten s prevlakom PVD TiN

perthometer S8P 4.5

Mahr Perthen LT 5.600 MM LM 4.000 MM VB 12.50 YM	LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB	OBJEKT:CILINDAR S PREVLAKOM NR.: NAME:G.BARSIC MESS.-NR.: 5 TI RHT 6-50 50 6

KENNWERT			STATISTIK N = 5						
	LC GS 0.800 MM		X	S	R	MAX	MIN	NN	TN
1	RMAX	YM	1.526	0.377	0.931	2.072	1.141		
2	RZ	YM	1.106	0.215	0.522	1.329	0.807		
3	RA	YM	0.104	0.018	0.050	0.127	0.076		
4	RP	YM	0.462	0.090	0.228	0.683	0.375		
5	RPM	YM	0.368	0.050	0.132	0.453	0.321		
6	WT	YM	0.421	0.197	0.480	0.729	0.249		
7	RT	YM	1.629	0.358	0.863	2.163	1.300		
8	PT	YM	1.783	0.219	0.578	2.138	1.560		



P6. Ispitivanje hrapavosti za prsten s prevlakom PACVD TiN/TiCN