

Povećanje otpornosti na trošenje kotrljajućih ležaja primjenom triboloških prevlaka

Biruš, Leonardo

Undergraduate thesis / Završni rad

2025

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:235:986341>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Student:

Leonardo Biruš

Zagreb, 2025.

Izjava

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

Zahvaljujem prof. dr. sc. Darku Landeku i asistentu Josipu Cerovečkom na pomoći i korisnim savjetima prilikom analize dobivenih rezultata i na pruženoj literaturi.

Veliko hvala mojoj obitelji i svima ostalima koju su na neki način sudjelovali u ovoj fazi studija.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 25 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 25 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Leonardo Biruš** JMBAG: **0130350052**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Povećanje otpornosti na trošenje kotrljajućih ležaja primjenom triboloških prevlaka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Increasing the wear resistance of rolling bearings by applying tribological coatings**

Opis zadatka:

Dijelovi kotrljajućih ležajeva izloženi su u radu statičkim i dinamičkim naprezanjima, kontaktnim pritiscima, trošenju i koroziji. Njihova trajnost u određenim uvjetima uporabe može se dodatno povećati prevlačenjem površine unutrašnjeg prstena ležaja i primjenom odgovarajućeg maziva. U radu treba opisati vrste i svojstva triboloških prevlaka prikladnih za primjenu na kotrljajućim ležajima te metode ispitivanja vibracija kotrljajućih ležaja.

U eksperimentalnom dijelu rada treba provesti prevlačenje unutrašnjeg prstena igličastog ležaja izrađenog od čelika 100Cr6 prevlakama PACVD TiCN/TiN, PACVD TiN/TiCN i PVD TiN. Na prevučeni i ne prevučeni igličasti ležajima, uz primjenu istog maziva provesti snimanje vibracija i analizu trošenja površina unutrašnjeg prstena. Iz rezultata ispitivanja zaključiti o utjecaju prevlake i postupka prevlačenja na parametre vibracija i trošenje ležaja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć

Zadatak zadan:

30. 11. 2024.

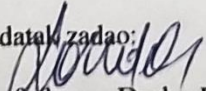
Datum predaje rada:

1. rok: 20. i 21. 2. 2025.
2. rok: 10. i 11. 7. 2025.
3. rok: 18. i 19. 9. 2025.

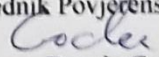
Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 24. 2. – 28. 2. 2025.
2. rok: 15. 7. – 18. 7. 2025.
3. rok: 22. 9. – 26. 9. 2025.

Zadatak zadao:


Prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS KRATICA.....	VII
SAŽETAK	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD	1
2. TROŠENJE	3
2.1. Mehanizmi trošenja	3
2.1.1. Abrazijsko trošenje	4
2.1.2. Adhezijsko trošenje	6
2.1.3. Umor površine.....	7
2.1.4. Tribokorozija	8
3. Inženjerstvo površina	10
3.1. Projektiranje površinskog sloja	11
3.1.1. Vrste i struktura triboloških prevlaka	14
3.2. Postupci prevlačenja.....	16
3.2.1. Prevlačenja u parnoj fazi	17
4. Kotrljajući ležaji.....	23
4.1. Igličasti ležaji	23
4.2. Trošenje kotrljajućih ležaja	25
4.3. Oblici trošenja karakteristični za kotrljajuće ležaje	25
4.4. Tribološke prevlake za primjenu na kotrljajućim ležajima	29
4.5. Vibracije i buka u radu kotrljajućih ležaja.....	31
4.6. Hrapavost površine.....	33
4.7. Zagrijavanje ležaja u radu	33
5. Priprema ispitnih uzoraka i provedba ispitivanja	36
5.1. Ispitni uzorci.....	36
5.1.1. Parametri prevlačenja	37
5.1.2. Provedba ispitivanja	39
6. Rezultati ispitivanja.....	40
6.1. Pomak vibracija.....	40
6.2. Akceleracija vibracija.....	45

6.3. Frekvencije vibracija	49
6.4. Analiza buke ležaja.....	53
6.5. Ispitivanje zagrijavanja ležaja	56
6.6. Ispitivanje hrapavosti površine unutrašnjih prstena ležaja.....	57
6.7. Analiza trošenja unutrašnjih prstena ležaja	62
6.8. Diskusija rezultata	65
7. Zaključak.....	69
8. Literatura.....	70

POPIS SLIKA

Slika 1. Opći oblik procesa trošenja [3]	3
Slika 2. Jedinični događaj abrazije [5]	4
Slika 3. Mikromehanizmi abrazije [5].....	5
Slika 4. Utjecaj tvrdoće na abrazijsku otpornost prema mikromehanizmima abrazije [2]	6
Slika 5. Jedinični događaj adhezije [5].....	6
Slika 6. Jedinični događaj umora površine [5].....	7
Slika 7. Izgled površine oštećene umorom [5].....	8
Slika 8. Jedinični događaj tribokorozije [5]	9
Slika 9. Tribokorozijski produkti na bregastoj osovinu od čelika 16MnCr5 [5]	9
Slika 10. Tvrdoća prevlaka nanesenih PVD postupkom na HSS i CWS [7]	11
Slika 11. Shematski prikaz površinskog sloja [4]	12
Slika 12. Svojstva tribosustava značajna za izbor površinskog sloja otpornog na trošenje [4]	12
Slika 13. Tribološki važna svojstva u različitim zonama površinskog sloja [3]	14
Slika 14. Podjela triboloških prevlaka prema strukturi [7]	15
Slika 15. Prikaz temperatura i dobivenih debljina prevlaka za različite postupke prevlačenja [11]	17
Slika 16. Pojednostavljeni prikaz CVD postupka [5]	19
Slika 17. Pojednostavljeni prikazi različitih metoda PVD postupaka [5]	21
Slika 18. Pojednostavljeni prikaz PACVD postupka [5].....	22
Slika 19. Igliačasti ležaj s vanjskim i unutarnjim prstenom [16].....	24
Slika 20. Igliačasti ležaj bez unutarnjeg prstena [17]	24
Slika 21. False brinellig kod igličastog ležaja [21]	26
Slika 22. Različiti oblici trošenja kotrljajućih ležaja [22].....	28
Slika 23. Uzorci unutrašnjeg prstena ležaja prije ispitivanja	36
Slika 24. Mjerni postav za ispitivanje vibracija ležaja u praznom hodu.....	40
Slika 25. Srednje vrijednosti pomaka nepodmazanih ležaja pri brzini 945 min ⁻¹	41
Slika 26. Srednje vrijednosti pomaka nepodmazanih ležaja pri brzini 1025 min ⁻¹	41
Slika 27. Srednje vrijednosti pomaka nepodmazanih ležaja pri brzini 1215 min ⁻¹	42
Slika 28. Postupak podmazivanja L3 ležaja.....	43
Slika 29. Srednje vrijednosti pomaka podmazanih ležaja pri brzini 945 min ⁻¹	43
Slika 30. Srednje vrijednosti pomaka podmazanih ležaja pri brzini 1025 min ⁻¹	44
Slika 31. Srednje vrijednosti pomaka podmazanih ležaja pri brzini 1215 min ⁻¹	45
Slika 32. Srednje vrijednosti akceleracije nepodmazanih ležaja pri brzini 945 min ⁻¹	46
Slika 33. Srednje vrijednosti akceleracije nepodmazanih ležaja pri brzini 1025 min ⁻¹	46
Slika 34. Srednje vrijednosti akceleracije nepodmazanih ležaja pri brzini 1215 min ⁻¹	47
Slika 35. Srednje vrijednosti akceleracije podmazanih ležaja pri brzini 945 min ⁻¹	47
Slika 36. Srednje vrijednosti akceleracije podmazanih ležaja pri brzini 1025 min ⁻¹	48
Slika 37. Srednje vrijednosti akceleracije podmazanih ležaja pri brzini 1215 min ⁻¹	49
Slika 38. Raspodjela frekvencija pri 945 min ⁻¹ (nepodmazano)	50
Slika 39. Raspodjela frekvencija pri 1025 min ⁻¹ (nepodmazano)	50
Slika 40. Raspodjela frekvencija pri 1215 min ⁻¹ (nepodmazano)	51
Slika 41. Raspodjela frekvencija pri 945 min ⁻¹ (podmazano)	52
Slika 42. Raspodjela frekvencija pri 1025 min ⁻¹ (podmazano)	52
Slika 43. Raspodjela frekvencija pri 1215 min ⁻¹ (podmazano).....	53
Slika 44. Analizirani zvučni zapis ležaja L3 pri 1025 min ⁻¹ s istaknutim frekvencijama	55

Slika 45. Uređaj UT-320D za mjerenje temperature ležaja.....	56
Slika 46. Mjerni postav za ispitivanje hrapavosti površine.....	57
Slika 47. Hrapavost površine L0 uzorka prije trošenja	58
Slika 48. Hrapavost površine L0 uzorka nakon trošenja.....	58
Slika 49. Hrapavost površine L1 uzorka prije trošenja	59
Slika 50. Hrapavost površine L1 uzorka nakon trošenja.....	59
Slika 51. Hrapavost površine L2 uzorka prije trošenja	60
Slika 52. Hrapavost površine L2 uzorka nakon trošenja.....	60
Slika 53. Hrapavost površine L3 uzorka prije trošenja	61
Slika 54. Hrapavost površine L3 uzorka nakon trošenja.....	61
Slika 55. Mjerni postav za analizu površine unutrašnjih prstenova	62
Slika 56. Površina prstena L0 nakon ispitivanja	63
Slika 57. Površina prstena L1 nakon ispitivanja	64
Slika 58. Površina prstena L2 nakon ispitivanja	64
Slika 59. Površina prstena L3 nakon ispitivanja	65
Slika 60. Čestice trošenja na sondi vibrometra nakon ispitivanja uzorka L3	68

POPIS TABLICA

Tablica 1. Parametri prevlačenja TiCN/TiN ležajnog prstena (L1) postupkom PACVD.....	37
Tablica 2. Parametri prevlačenja TiN/TiCN ležajnog prstena (L2) postupkom PACVD.....	38
Tablica 3. Parametri prevlačenja TiN ležajnog prstena (L3) postupkom PVD	39
Tablica 4. Specifične frekvencije ležaja pri različitim brzinama	54
Tablica 5. Usporedba temperatura ležaja prije i nakon ispitivanja.....	57
Tablica 6. Vrijednosti parametara hrapavosti ispitanih uzoraka.....	62

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ΔV_g	mm ³	Granično istrošenje
t_P	h	Projektirana trajnost
F_N	N	Normalna komponenta sile
F_t	N	Tangencijalna komponenta sile
(č)	-	Odvojena čestica
v	m/s	Brzina gibanja
-	HV	Tvrdoća materijala dobivena mjerenjem <i>Vickers</i> metodom
R_a	μm	Srednje aritmetičko odstupanje profila
R_z	μm	Srednja visina neravnina
R_{max}	μm	Najveća visina profila
N_B	-	Broj kotrljajućih tijela ležaja
RPM	min ⁻¹	Brzina vrtnje ležaja
BD	mm	Promjer kotrljajućih tijela
PD	mm	Udaljenost između centara rotacije dviju nasuprotnih kotrljajućih tijela

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
HSS	<i>High Speed Steel</i> – brzorezni čelik
CWS	<i>Cold Work Steel</i> – hladno oblikovani čeliki
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i> – fizikalno prevlačenje (taloženje) iz parne faze
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i> – kemijsko prevlačenje (taloženje) iz parne faze
HTCVD	<i>High Temperature Chemical Vapour Deposition</i> – visokotemperaturno kemijsko prevlačenje (taloženje) iz parne faze
MTCVD	<i>Moderate Temperature Chemical Vapour Deposition</i> – srednjetemperaturno kemijsko prevlačenje (taloženje) iz parne faze
PACVD	<i>Plasma Assisted (Activated) Chemical Vapour Deposition</i> – plazmo potpomognuto kemijsko prevlačenje (taloženje) iz parne faze
DLC	<i>Diamond-Like Carbon</i> – dijamantu sličan ugljik
FFT	<i>Fast Fourier Transformation</i> – metoda brze Fourierova transformacije
BPFO	<i>Ball Pass Frequency Outer</i> – frekvencija oštećenja valjne staze vanjskog prstena
BPFI	<i>Ball Pass Frquency Inner</i> – frekvencija oštećenja valjne staze unutrašnjeg prstena
FTF	<i>Fundamental Train Frequency</i> – frekvencija oštećenja kaveza
BSF	<i>Ball Spin Frequency</i> – frekvencija oštećenja kotrljajućeg elementa

SAŽETAK

Kotrljajući ležaji u svom su radu izloženi brojnim faktorima koji utječu na njihovo ponašanje tijekom eksploatacije te na njihovu trajnost. Jedan od tih faktora je i trošenje koje se uvijek nastoji svesti na minimum. To se, prije svega, postiže izborom optimalnog materijala te pravilno provedene toplinske obrade. Uz to, u tu se svrhu sve češće dodatno primjenjuju znanja iz inženjerstva površina, najčešće u vidu prevlačenja pojedinih elemenata kotrljajućih ležaja različitim vrstama triboloških prevlaka.

U teorijskom dijelu pobliže je razrađen sveprisutan problem trošenja te je dan detaljan prikaz kako se ono efektivno smanjuje primjenom triboloških prevlaka. Također, dana je obuhvatna tribološka analiza kotrljajućih ležaja.

U eksperimentalnom dijelu provedena su ispitivanja na prevučenim i neprevučenim igličastim kotrljajućim ležajima izrađenih od čelika 100Cr6 te su analizom rezultata izvedeni su zaključci o utjecaju triboloških prevlaka na trošenje kotrljajućih ležaja.

Ključne riječi: trošenje, tribološke prevlake, kotrljajući ležaji, vibracije

SUMMARY

During their operation rolling bearings are exposed to different factors that affect their exploitation behaviour and work life. One of these factors is material wear which is always tried to be minimized. In the first place, this is accomplished by optimal material choice and proper heat treatment. Beside mentioned, for this purpose it is getting more common to use knowledge from surface engineering, most often in the form of applying different types of tribological coatings on rolling bearings elements.

In theoretical part, widespread wear problem is explained and detailed view of how it can be effectively reduced by applying tribological coatings is given. Furthermore, comprehensive tribological analysis of rolling bearings is also given.

In experimental part, testings of coated and uncoated needle rolling bearings made of 100Cr6 steel were conducted and conclusions about the effect of tribological coatings on wear of rolling bearings are given on the basis of results analysis.

Keywords: wear, tribological coatings, rolling bearings, vibrations

1. UVOD

Trošenje materijala podrazumijeva postupan gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama [1]. Iako postoje primjeri u kojima je proces trošenja poželjna pojava pa čak i procesi koji se temelje na trošenju (npr. obrada odvajanjem čestica), u eksploataciji elemenata strojeva i konstrukcija mnogo je češći slučaj u kojem se trošenje pojavljuje kao negativna pojava. Tako istraživanja pokazuju kako je oko 50 % zastoja strojarskih sustava izazvano upravo trošenjem njihovih pokretnih dijelova [2]. Ono smanjuje vijek trajanja radnih sustava, smanjuje njihovu efikasnost, pouzdanost i sigurnost te u konačnici povećava troškove. Shodno tome, jasno je kako se trošenje nastoji svesti na najnižu moguću razinu (nikada se ne može u potpunosti izbjeći) te se u tu svrhu, ovisno o tribosustavu¹, primjenjuju razne tribološke i konstrukcijske mjere: podmazivanje, optimalan izbor materijala, optimalna izvedba određene konstrukcije i niz drugih [3].

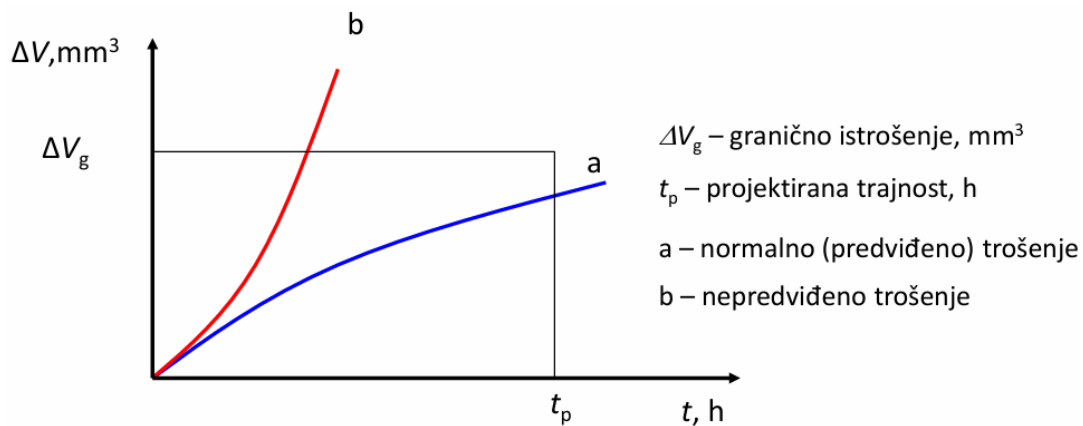
S istim je ciljem, tijekom vremena, došlo i do razvoja potpuno nove znanstvene discipline koja se bavi oplemenjivanjem površine materijala u svrhu njene zaštite, a koja se naziva - inženjerstvo površina. Inženjerstvo površina je relativno novo područje koje kombinira primjenu tradicionalnih i inovativnih tehnologija za stvaranje sustava „površinski sloj – osnovni materijal“, sa svojstvima koji ne može dati ni sam osnovni materijal ni sam površinski sloj. Pritom ta svojstva moraju garantirati dobre eksploatacijske karakteristike. Ovo se područje u suštini bazira na prevlačenju osnovnog materijala izuzetno tankom prevlakom kojom se žele postići željena svojstva poput otpornosti na trošenje, otpornosti na visoke temperature, samopodmazivosti i mnoga druga [4]. Upravo primjena postupaka inženjerstva površina i njihov utjecaj na trošenje kotrljajućih ležaja, kao strojnih dijelova kod kojih intenzitet trošenja predstavlja izuzetno važan faktor, predstavljaju okosnicu ovog rada.

¹ Tribosustav čine funkcionalni dijelovi s međusredstvom između njih te zajedno s okolinom i radnim uvjetima kojima su izloženi.

TEORIJSKI DIO

2. TROŠENJE

Kao što je već i spomenuto, trošenje predstavlja nezaobilaznu pojavu u eksploataciji strojnih dijelova i konstrukcija. Ono izaziva postupan gubitak materijala te, u ekstremnijim slučajevima, može dovesti do havarija s katastrofalnim posljedicama. Stoga je samo po sebi razumljivo kako se ono nastoji držati pod kontrolom, odnosno nastoji se primjenom odgovarajućih triboloških i drugih mjera mjera postići funkcioniranje tribosustava u režimu tzv. normalnog trošenja koje je unaprijed predviđeno (krivulja *a* na Slici 1). U slučaju da tijekom eksploatacije dođe do trošenja intenziteta koji premašuje trošenje predviđeno proračunom, dolazi do skraćivanja radnog vijeka dijela koje može biti manje ili više izraženo [3].



Slika 1. Opći oblik procesa trošenja [3]

Brzinu trošenja materijala povećava prisutnost mehaničkog djelovanja stranih tijela te kemijska agresivnost okoline u kojoj se materijal nalazi. Ovdje valja naglasiti kako prisutnost korozivnog medija u uvjetima trošenja može značajno povećati intenzitet trošenja [2].

2.1. Mehanizmi trošenja

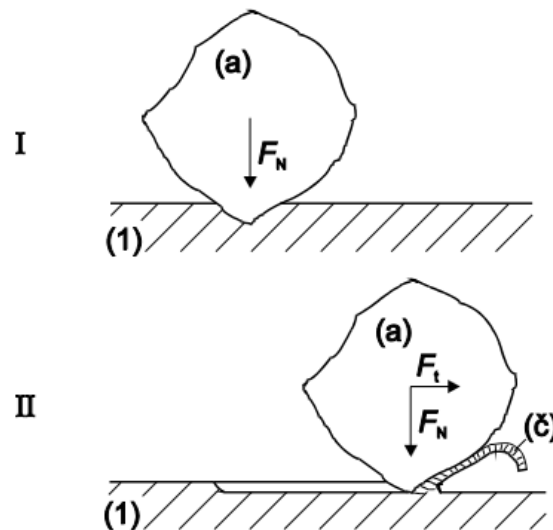
Uslijed uspostavljanja kontakta između dvaju tijela u relativnom gibanju, ovisno o značajkama tribosustava, može doći do sljedeća četiri mehanizma trošenja:

- Abrazija
- Adhezija
- Umor površine
- Tribokorozija.

Svaki se realni proces sastoji od jednog, dvaju ili više mehanizama trošenja koji mogu djelovati u vremenskom slijedu ili istovremeno. Svaki se od tih mehanizama opisuje jediničnim događajem koji predstavlja slijed zbivanja koji dovode do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine [3].

2.1.1. Abrazijsko trošenje

Pod abrazijskim trošenjem podrazumijevamo istiskivanje materijala uslijed djelovanja čestica ili izbočina veće tvrdoće od tvrdoće same površine materijala. Drugim riječima, do abrazijskog trošenja dolazi u slučaju kada je mekši materijal izložen djelovanju tvrdog materijala u uvjetima njihovog relativnog gibanja [5].

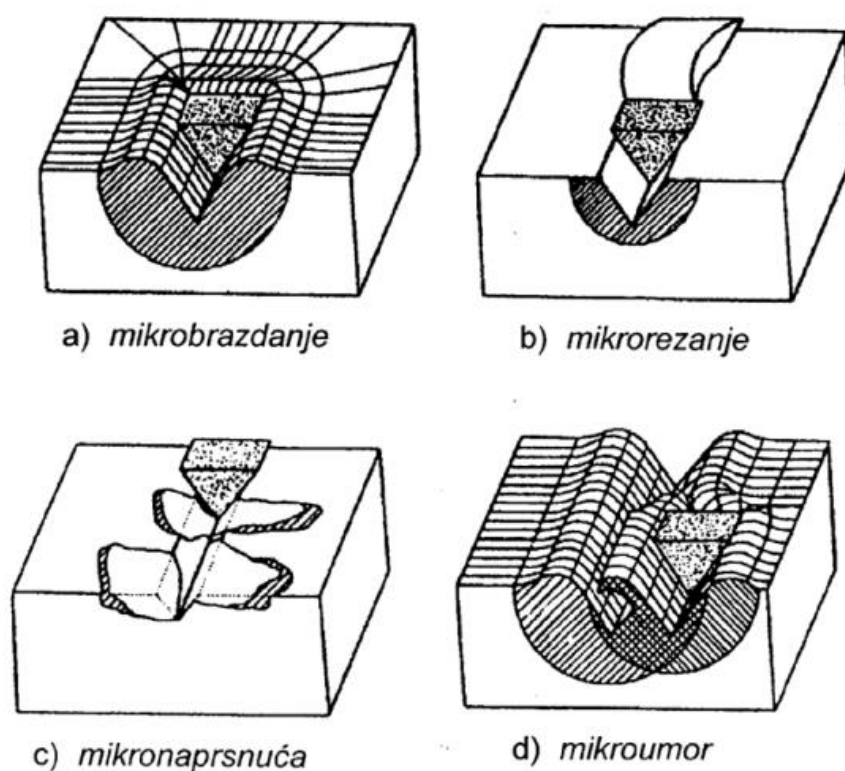


Slika 2. Jedinični događaj abrazijske [5]

Slika 2. prikazuje jedinični događaj abrazijskog trošenja koji se, kako je i na slici prikazano, sastoji od dva stadija. U prvom stadiju abraziv prodire u površinu materijala, dok u drugom stadiju, uslijed njihova relativnog gibanja i postojećih sila u tribosustavu dolazi do istiskivanja materijala [5].

Sama abrazija također nije jednoznačan mehanizam trošenja, već u sklopu nje razlikujemo nekoliko, uvjetno rečeno, mikromehanizama kao što su: mikrobrazdanje, mikrorezanje, mikronaprskuća i mikroumor. Svaki se od njih razlikuje po načinu nastanka čestica trošenja. Prilikom mikrobrazdanja dolazi do plastične deformacije (stvaranja bočnih brazdi) uslijed jednog prolaska abrazijske čestice, a odnošenje materijala u proporcionalnom je odnosu s volumenom nastale brazde. Kod mikrorezanja je odnošenje materijala jednako volumenu

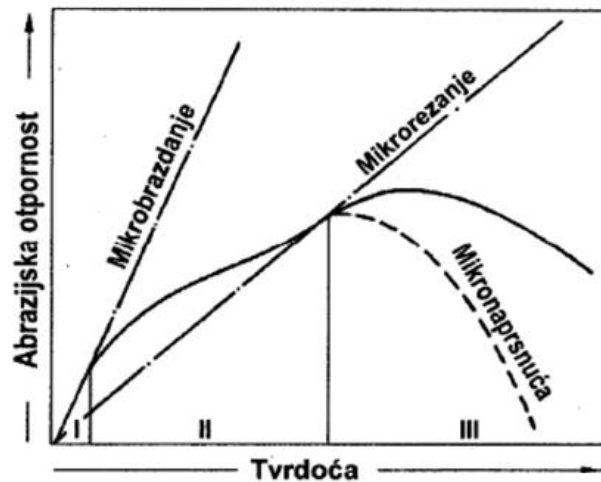
zreza nastalog prolaskom abrazivne čestice. Mikronaprsnuća su karakteristična za krhke površine sklone nastanku mikropukotna koje se vremenom šire i pritom izazivaju odnošenje materijala. Nešto drugačiji jest mehanizam mikroumora kod kojeg je odnošenje materijala izazvano čestim izlaganjem koncentriranom izmjeničnom opterećenju. Ovdje dolazi do formiranja mikropukotina čijim širenjem u konačnici dolazi do gubitka materijala. Osim toga, mikroumor može biti izazvan i frekventnim mikrobrazdanjem [5]. Mikromehanizmi abrazije shematski su prikazani na Slici 3.



Slika 3. Mikromehanizmi abrazije [5]

Abrazijsko trošenje najzastupljenije je od svih drugih mehanizama trošenja te otprilike polovina svih slučajeva trošenja otpada na taj mehanizam [2]. Otpornost materijala na abraziju u osnovi je funkcija tvrdoće. Želimo li izbjeći ili barem smanjiti abrazijsko trošenje materijala potrebno je primijeniti materijal čija je tvrdoća veća od tvrdoće abraziva koji to trošenje izaziva. U projektiranju dijelova za koje je predviđeno izlaganje abrazijskom trošenju u eksploataciji teži se prema postizanju tzv. „nulte“ abrazije, odnosno stanja u kojem je cijela abradirana površina tvrđa od protutijela, odnosno abraziva. „Nulta“ abrazija najčešće se javlja na površinskim slojevima dobivenim različitim metodama inženjerstva

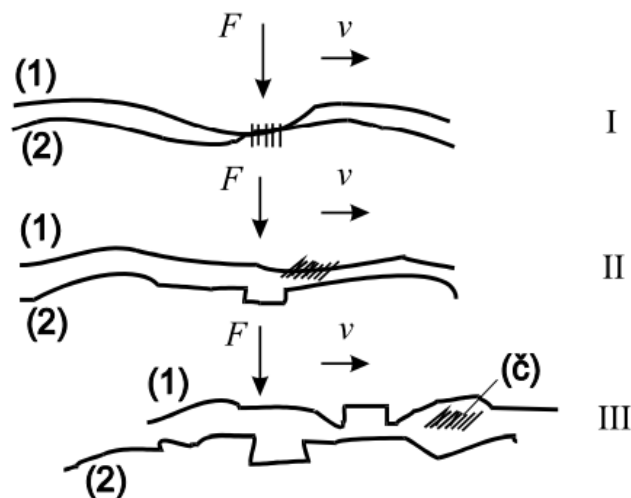
površine (boriranje, CVD, PVD, vanadiranje, PACVD i sl.) o kojim će više riječi biti u nastavku [5]. U svrhu smanjenja abrazijskog trošenja primjenjuju se i neke druge mjere, kao što su izbor odgovarajućeg materijala, konstrukcijske mjere i sl.



Slika 4. Utjecaj tvrdoće na abrazijsku otpornost prema mikromehanizmima abrazije [2]

2.1.2. Adhezijsko trošenje

Adhezijsko trošenje je posljedica djelovanja međuatomnih ili međumolekulnih sila u točkama dodira dvaju tijela pri čemu nastaju mikrozavari koji se uslijed međusobnog gibanja tijela raskidaju. Raskidanjem mikrozavara dolazi do preraspodjele materijala, tj. dolazi do prijelaza materijala s jedne klizne plohe na drugu. Tako na jednom tijelu dolazi do gubitka materijala (čestica trošenja), dok analogno tome, na drugom tijelu dolazi do naljepljivanja materijala s prvog tijela. Vremenom, može doći do otkidanja te čestice s drugog tijela [5].

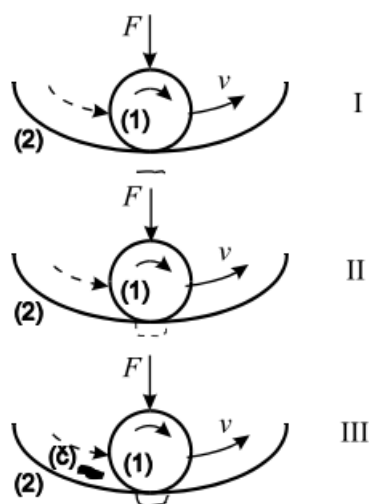


Slika 5. Jedinični događaj adhezije [5]

Moglo bi se reći da ono što kod abrazije predstavlja tvrdoća, kod adhezije predstavlja tzv. tribološka kompatibilnost. Tribološku kompatibilnost može se definirati kao prikladnost za rad u kliznom paru. Drugim riječima, tribološki kompatibilnim materijalima smatraju se oni neskloni stvaranju mikrozavarenih spojeva. Osim pravilnog izbora materijala, za funkcionalan i optimalan rad kliznog para uz minimalno adhezijsko trošenje potrebno je definirati odgovarajuće uhadavanje u početnoj fazi rada te odabrati odgovarajuću vrstu maziva i prikladni režim podmazivanja [5]. Uz to, i ovdje svoju primjenu imaju postupci inženjerstva površina.

2.1.3. Umor površine

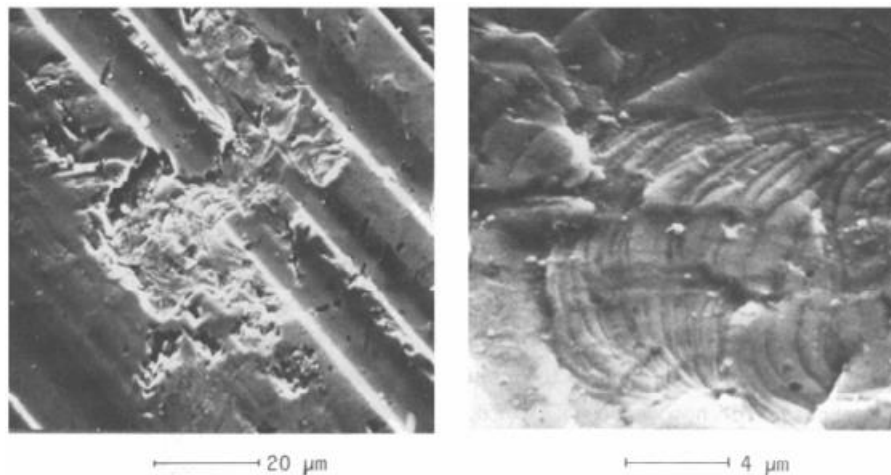
S aspekta trošenja kotrljajućih ležaja, ovaj mehanizam trošenja možda je i najvažniji. Do njega dolazi uslijed cikličke promjene naprezanja koje rezultira odvajanjem čestice s površine materijala. Jedinični događaj započinje stvaranjem inicijalne pukotine na mjestu najvećeg smičnog naprezanja (tzv. Hertzovo naprezanje) koje se prema teoriji koncentriranog dodira nalazi ispod površine. Ovo se naziva fazom inkubacije tijekom koje čestica trošenja još nije formirana. U drugoj se fazi ta podpovršinska pukotina, uslijed čestih, ponavljajućih i promjenjivih naprezanja počinje širiti i konačno izbija na površinu, a iz nje počinju ispadati sitne čestice trošenja. Konačno, u trećoj fazi, dolazi do odvajanja veće čestice trošenja oblika iverka, dok na površini ostaje oštećenje u obliku rupica [5].



Slika 6. Jedinični događaj umora površine [5]

Ovaj mehanizam trošenja poprilično je nezgodan jer se dio njegova tijeka odvija ispod površine te ga ne možemo vizualno uočiti sve dok ne dođe do površinskih oštećenja.

Također, raspon faktora koji utječu na sklonost umoru površine je širok i može varirati od površinskih pogrešaka (uključci, slučajna udubljenja i ogrebotine i sl.), preko površinskih oštećenja (prisutnost zaostalih naprezanja, topografija i tekstura, mikrostruktura i sl.) pa sve do nekih faktora koji zadiru u konstrukcijske pogreške (odstupanje od linije dodira, međusobna neprilagođenost dijelova ležajeva, unutrašnja zračnost itd.). Do stvaranja inicijalne pukotine dolazi u prisutnosti koncentrata naprezanja što mogu biti svi navedeni faktori (uz još mnogobrojne druge). Otpornost na umor površine naziva se dinamička izdržljivost površine [5].

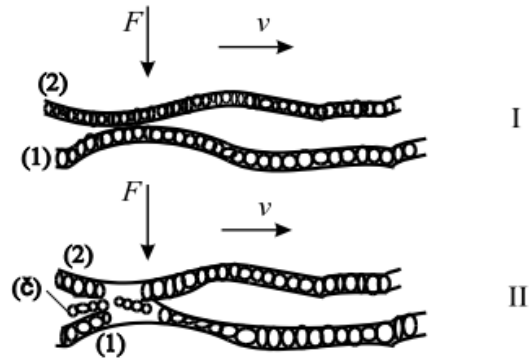


Slika 7. Izgled površine oštećene umorom [5]

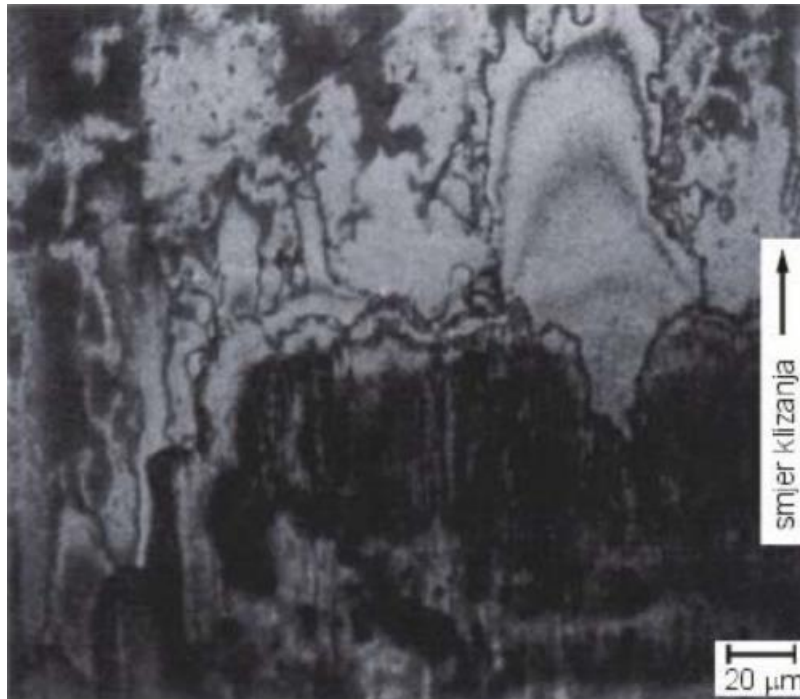
2.1.4. Tribokorozija

Tribokorozija ili tribokemijsko trošenje je mehanizam trošenja pri kojem do trošenja dolazi sinergijskim djelovanjem elektrokemijskih i kemijskih procesa te tribološkog djelovanja. Naime, uslijed reakcije materijala s okolišem dolazi do oksidacije i stvaranja oksidacijskih produkata na njegovoj površini (stadij I na Slici 8). Kako su ti produkti slabo povezani s površinom, njihov dodir s drugom površinom rezultira odnošenjem materijala (stadij II na Slici 8). Nakon toga, taj se proces može ponavljati u ciklusima što u konačnici dovodi do veoma štetnog korozijskog djelovanja i može dovesti do značajne degradacije materijala [6].

Da bi se izbjegao mehanizam tribokorozije nužno je izabrati materijal koji je kemijski pasivan u određenom mediju [5].



Slika 8. Jedinični događaj tribokorozije [5]



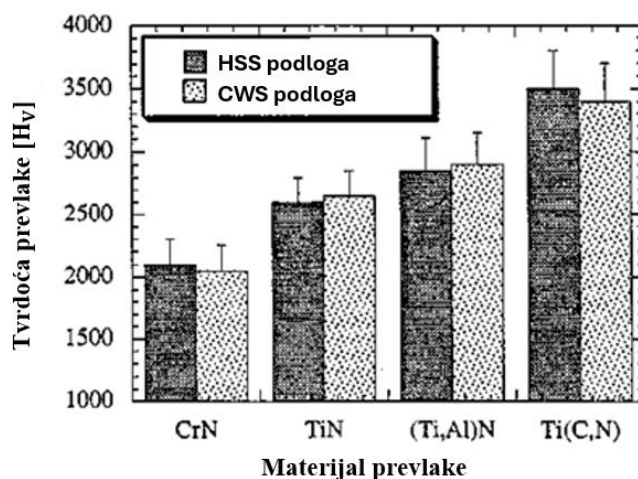
Slika 9. Tribokorozijski produkti na bregastoj osovini od čelika 16MnCr5 [5]

3. Inženjerstvo površina

U zadnjih nekoliko desetljeća došlo je do znatnih promjena glede eksploatacijskih zahtjeva koji se stavljaju pred proizvod. Naglasak se sve više pomiče prema uštedi energije i materijala te u smjeru smanjenja otpada i onečišćenja, a sve to s ciljem postizanja održive proizvodnje. S druge strane, težnja za što većom efikasnošću, produktivnošću i funkcionalnošću te za što boljom estetikom i dalje je prisutna. Kako se sve navedeno nerijetko nalazi u proturječju, za njihovo je ostvarenje nužna inovacija. S tribološkog aspekta, ta je inovacija došla u obliku inženjerstva površina kao znanstvene discipline koja se fokusira na izučavanje površinskih slojeva različitih materijala te na modificiranje i/ili prevlačenje istih u svrhu postizanja željenih svojstava [7].

Iako daleko od univerzalnog rješenja, primjenom postupaka iz područja inženjerstva površina mogu se postići zaista izvanredni rezultati ovisno o primjeni. Stoga i ne čudi što je razvoj ovog područja izuzetno intenzivan, a raznorazni postupci oplemenjivanja površine ulaze u sve širu primjenu. Dakako, budući da se radi o relativno novoj znanstvenoj disciplini, možemo reći kako se i dalje nalazimo u fazi učenja te se, posljedično, još mnoge stvari tek trebaju otkriti, a mnogi su problemi i dalje nerješivi [7].

Kako god, primjenom znanja koje pruža inženjerstvo površina napravljen je veliki napredak na polju elektronike, optike, pohrane podataka te, pogotovo, tribologije (u vidu redukcije trošenja). To je ostvareno zahvaljujući širokom rasponu spojeva (različite vrste nitrida, karbida, oksida, borida, dijamantu slični spojevi itd.) koji se određenim postupcima mogu taložiti na osnovni materijal u obliku prevlake [8]. Primjenom tvrdih prevlaka kao što su TiN, CrN, TiCN itd. mogu se postići tvrdoće preko 2000 HV čime se izbjegava abrazija čak i u izuzetno abrazijski agresivnim uvjetima, kao što je obrada odvajanjem čestica. Stoga su rezni alati, alati za hladno oblikovanje, alati za injekcijsko prešanje i ostali redovito prevučeni nekom od prevlaka visoke tvrdoće. Na taj se način produljuje njihov radni vijek, povećava se broj mogućih ciklusa koji alat može odraditi te se postižu proizvodi veće kvalitete u vidu bolje dimenzijske stabilnosti i finije površine ili pak proizvodi većeg stupnja deformacije. Primjenom prevlaka također se smanjuju troškovi proizvodnje i potreba za podmazivanjem [7]. Navedene prevlake, izuzev visoke tvrdoće, najčešće posjeduju i neka druga, s tribološkog aspekta povoljna svojstva, poput niskog faktora trenja i/ili dobre kemijske postojanosti. Uz to, one pospješuju estetski izgled proizvoda, a u nekim slučajevima primjene mogu imati isključivo dekorativnu ulogu [8].

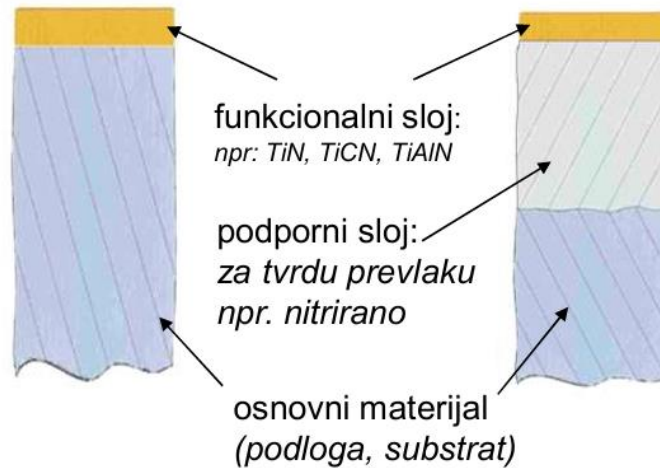


Slika 10. Tvrdoća prevlaka nanesenih PVD postupkom na HSS i CWS [7]

Izuzev gore spomenutih, tzv. triboloških prevlaka kojima je primarna zadaća povećanje otpornosti na trošenje, postoje prevlake koje se ističu svojim specifičnim svojstvima, a koje se ne mogu postići konvencionalnim postupcima. Neke od takvih su biokompatibilne prevlake, nereflektirajuće prevlake, fotoluminiscentne prevlake, toplinske barijere, prevlake koje imaju ulogu električnog izolatora i sl. [4].

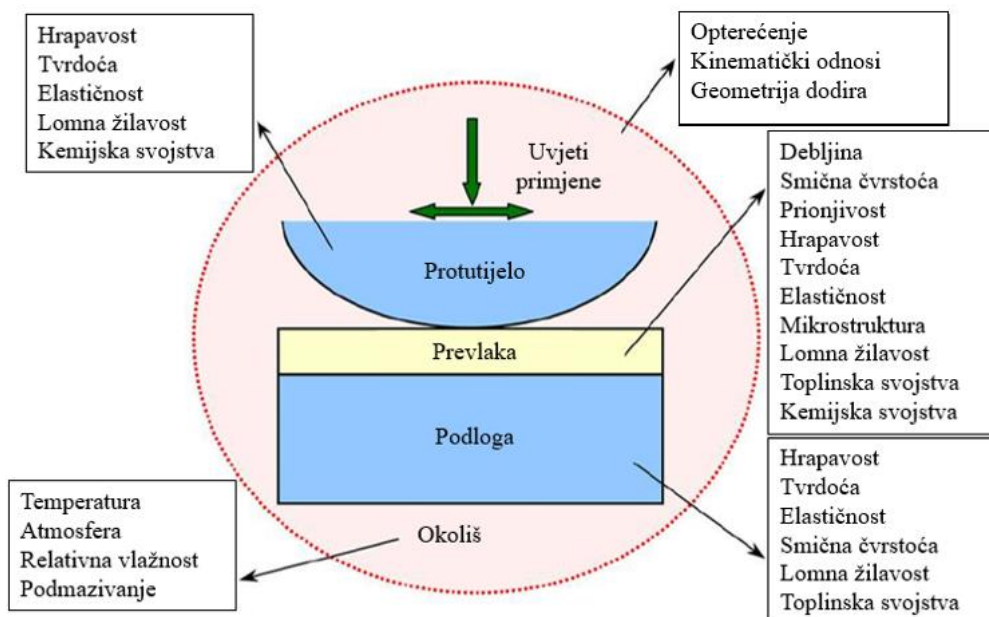
3.1. Projektiranje površinskog sloja

Pod pojmom površinskog sloja u inženjerstvu površina podrazumijevamo tanak sloj na površini nekog strojnog ili konstrukcijskog dijela koji obuhvaća dio osnovnog materijala (substrat, podloga) te na njega nanesenu prevlaku (Slika 11. lijevo). Ipak, vremenom se došlo do zaključka kako se svojstva površinskog sloja poboljšavaju modificiranjem osnovnog materijala (npr. nitriranjem, cementiranjem, boriranjem i dr.) koji u tom slučaju ima ulogu potpornog sloja na koji se zatim nanosi određena prevlaka. Takav pristup stvaranju površinskog sloja naziva se duplex postupak (Slika 11. desno) i njegova je primjena sve učestalija te se polako počinje smatrati standardnim postupkom stvaranja površinskog sloja. U tom se slučaju površinski sloj sastoji od osnovnog materijala koji služi kao podloga, modificiranog sloja osnovnog materijala koji se naziva potpornim slojem te prevlake koja predstavlja funkcionalni sloj i obavlja namijenjenu ulogu (smanjenje trošenja, samopodmazivanje, zaštita od korozije, toplinska ili električna izolacija i tomu slično) [4].



Slika 11. Shematski prikaz površinskog sloja [4]

Postupak nanošenja prevlake na površinu osnovnog materijala kompleksan je proces koji zahtijeva detaljnu analizu i tehnološku pripremu. Ona, između ostaloga, obuhvaća analizu tribosustava u kojem će prevlaka biti primijenjena, izbor kompatibilne kombinacije osnovnog materijala i materijala prevlake koji zadovoljavaju eksploatacijske zahtjeve (uz prihvatljivu cijenu), izbor vrste, debljine i rasporeda slojeva prevlake (kod višeslojnih prevlaka), izbor temperature i načina nanošenja, potencijalno modificiranje osnovnog materijala na koji se prevlaka nanosi i dr. [4].



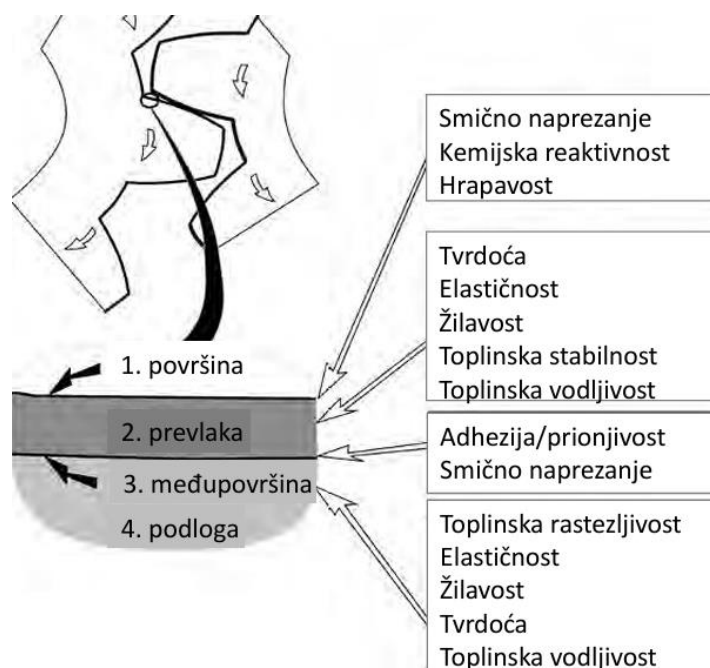
Slika 12. Svojstva tribosustava značajna za izbor površinskog sloja otpornog na trošenje [4]

U svrhu što kvalitetnijeg projektiranja površinskog sloja sve se češće upotrebljavaju razne simulacije kojima se dobivaju informacije o ponašanju određenog sustava osnovni materijal-prevlaka. Te se simulacije mogu podijeliti na: simulacije procesa, simulacije svojstava i simulacije ponašanja površinskog sloja u eksploataciji [9].

Simulacije procesa pružaju korisne tehničke informacije o strukturnim promjenama koje izazivaju pojedini procesi čime se sužava izbor adekvatnih postupaka projektiranja površinskog sloja za unaprijed definiranu primjenu. Za izradu potrebnog modela potrebno je poznavanje određenih fizikalnih, kemijskih i metalurških reakcija koje dovode do formiranja određene strukture. Daljnji razvoj ovog područja usmjeren je na simulacije ostalih elemenata koji se tiču samog procesa stvaranja površinskog sloja, kao što je simuliranje debljine i jednoličnosti prevlaka koje se postižu određenim procesima. Nadalje, simulacije svojstava podrazumijevaju izradu modela na temelju kojeg se mogu definirati određena svojstva (mehanička, kemijska, tribološka, fizikalna) površinskog sloja. Dakako, različiti procesi dovode do različitih svojstava što je posljedica strukturnih obilježja, hrapavosti površine, preferirane orijentacije, okoliša i ostalih karakteristika koji su svojstveni svako površinskom sloju. Svojstva poput tvrdoće ili prisutnosti zaostalih naprezanja (kao jednih od najvažnijih svojstava prevlaka) nemoguće je predvidjeti proračunom, već se mogu utvrditi samo eksperimentalno. Takvo što je poprilično neekonomično pa se danas sve više nastoje simulirati modeli na temelju kojih se ta svojstva, sa većom ili manjom sigurnošću, ipak uspijevaju predvidjeti već i prije same proizvodnje. I na kraju dolazimo do simulacija ponašanja površinskog sloja u eksploataciji kojima se različiti modeli površinskog sloja izlažu uvjetima koji, u što je većoj mjeri moguće, oponašaju realne radne uvjete. Proučavanjem ponašanja modela tijekom simulacije dobivaju se korisni tehnički podaci koji se mogu iskoristiti za daljnje unapređenje i optimizaciju cjelokupnog postupka projektiranja površinskog sloja [9].

U kontekstu projektiranja površinskog sloja posebno treba izdvojiti odnos između osnovnog materijala i same prevlake. Taj odnos umnogome počiva na njihovoj kompatibilnosti, a o toj kompatibilnosti u konačnici ovise i sama svojstva površinskog sloja. Adhezija, odnosno prijanjanje između osnovnog materijala i prevlake, u tome ima ključnu ulogu. Dobra adhezija između ta dva elementa sustava nužan je preduvjet kako bi površinski sloj uopće mogli stvoriti. Koliko je to svojstvo adhezivnosti važno u inženjerstvu površina toliko je i problematično jer je njegovo ispitivanje poprilično izazovno budući da se temelji na uspostavljanju međuatomskih veza na mjestu kontakta prevlake i osnovnog materijala što je vidljivo jedino na mikroskopskoj razini. Ipak, danas postoje i neke mehaničke metode

ispitivanja kojima se ta adhezivnost barem ugrubo može odrediti [7]. S aspekta kompatibilnosti traži se da pojedina svojstva prevlake budu što sličnija svojstvima osnovnog materijala. Tako je poželjno da svojstva se poput modula elastičnosti, koeficijenta toplinske istezljivosti, žilavosti i sl. ne razlikuju previše [4]. Time se sprečava ili, češće, umanjuje pojava (zaostalih) vlačnih ili tlačnih naprezanja u prevlaci koja može dovesti do pojave pukotina, a u konačnici i do njenog loma [7].



Slika 13. Tribološki važna svojstva u različitim zonama površinskog sloja [3]

3.1.1. Vrste i struktura triboloških prevlaka

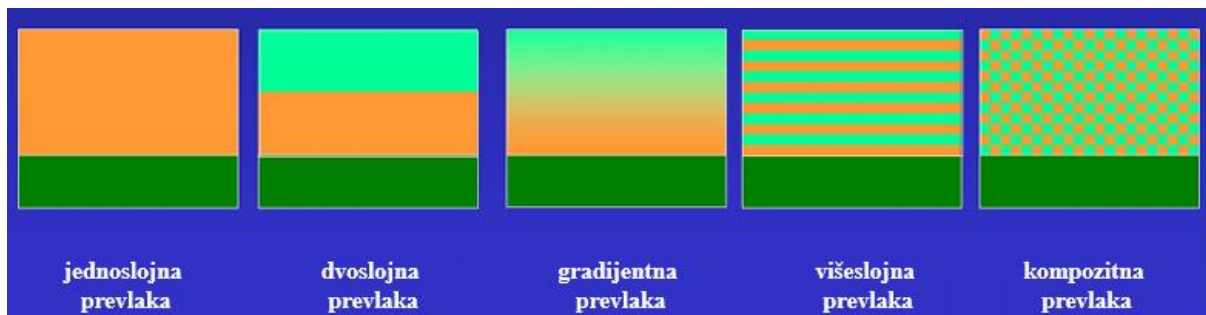
Tribološke prevlake obuhvaćaju širok raspon prevlaka različitog kemijskog sastava, strukture i svojstava, a sve ih veže osnovna zadaća minimalizacije trošenja. Posljedično, postoji i nekoliko načina na koje se prevlake mogu podijeliti. Jedan od način na koji se prevlake mogu podijeliti je podjela prema tvrdoći, odnosno podjela na tvrde i meke prevlake. Pri tome, skupini mekih prevlaka pripadaju polimerne prevlake, lamelarne krute prevlake i prevlake od metala niže tvrdoće na bazi olova, srebra, zlata, nikla itd. S druge strane, tvrdim prevlakama pripadaju sve vrste oksidnih, karbidnih, nitridnih, boridnih i tvrdih ugljičnih (dijamantnih i dijamantu sličnih) prevlaka [5].

Druga istaknuta podjela jest ona prema strukturi i obliku nanesenih prevlaka. Naime, od triboloških se prevlaka u velikoj većini slučajeva traži kombinacija različitih svojstava, koja

nerijetko znaju biti proturječna. Primjerice, drži se da je visoka tvrdoća primarno svojstvo triboloških prevlaka. S druge strane, duktilnost prevlake, odnosno njezina sposobnost da podnese plastičnu deformaciju bez loma, također je od velike važnosti. Samo je po sebi razumljivo kako pucanje prevlake uslijed malih vrijednosti istežanja nikako nije poželjna karakteristika. Glavni problem je u tome što su tvrdoća i duktilnost dva oprečna svojstva, odnosno što povećanjem jednoga, smanjujemo ono drugo. Ipak, u višeslojnim prevlakama, istovremeno se može postići visoka tvrdoća i dobra duktilnost [7].

Uslijed težnje prema prevlakama sa što boljom kombinacijom svojstava, došlo je do razvoja nekoliko strukturnih oblika prevlaka [7].:

- jednoslojne prevlake
- dvoslojne prevlake
- višeslojne prevlake
- gradijentne prevlake
- kompozitne prevlake



Slika 14. Podjela triboloških prevlaka prema strukturi [7]

Jednoslojne jednokomponentne prevlake predstavljaju prvu generaciju uspješnih tvrdih prevlaka. One su građene od tvrdih binarnih spojeva (npr. TiN ili TiC) koji, kako je već i spomenuto, znatno povišuju tvrdoću proizvoda (poboljšavaju i neka druga svojstva, poput korozijske postojanosti). Daljnji je napredak postignut legiranjem binarnih spojeva različitim elementima čime su dobivene jednoslojne višekomponentne prevlake, koje, ovisno o uvjetima primjene, imaju poboljšana tribološka, toplinska, kemijska i dr. svojstva u odnosu na jednokomponentne. U ovu skupinu najčešće pripadaju razni karbonitridi (npr. TiCN) i prevlake s aluminijem (npr. TiAlN). Razvojem novih rješenja u upotrebu ulazi sve više različitih elemenata sa specifičnom ulogom u funkcionalnosti prevlake. Tako se

dodatkom molibdenovih (MoS_2) ili volframovih spojeva (WC/C) dobivaju prevlake sa sposobnošću samopodmazivanja [8].

Daljnji razvoj uslijedio je inovacijom u obliku već spomenutih višeslojnih prevlaka koje funkcioniraju na principu da svaki sloj preuzima određenu funkciju i nadopunjuje funkcije ostalih slojeva [4]. Kako je već rečeno, primjenom dvoslojnih i višeslojnih prevlaka napravljen je veliki napredak na polju kombinacije različitih svojstava prevlaka. Tako npr. Ti/TiN prevlaka ima dva sloja od kojih svaki ima svoju zadaću. Međusloj titanija, nataložen na osnovni materijal pospješuje adheziju između osnovnog materijala i sloja TiN nataloženog povrhnjega. Upravo taj sloj TiN smatramo funkcionalnim slojem koji povisuje tvrdoću proizvoda i time obavlja primarnu funkciju povećanja otpornosti na trošenje [8]. Jedno od najaktualnijih postignuća na polju triboloških prevlaka predstavljaju tzv. superčelijaste prevlake. One, zapravo, predstavljaju posebnu skupinu višeslojnih prevlaka koje se sastoje od materijala slične kristalne strukture te od periodično posloženih slojeva izuzetno malih debljina [7]. Tako se debljina slojeva nalazi u rasponu od nekoliko nanometara do oko 100 nm. Primjenom superčelijastih prevlaka postiže povećanje tvrdoće površinskog sloja u usporedbi s drugim strukturnima oblicima [8].

Za razliku od višeslojnih, kod gradijentnih se prevlaka promjena svojstava odvija sukladno promjeni kemijskog sastava od osnovnog materijala do same površine. Drugim riječima, kod njih nema jasno odvojenih slojeva, već se kemijski sastav kontinuirano mijenja po presjeku prevlake, a samim time kontinuirano se mijenjaju i svojstva. Takav se ishod postiže točno određenim kemijskim sastavom u kombinaciji s prevlačenjem i (najčešće) naknadnom toplinskom obradom [4].

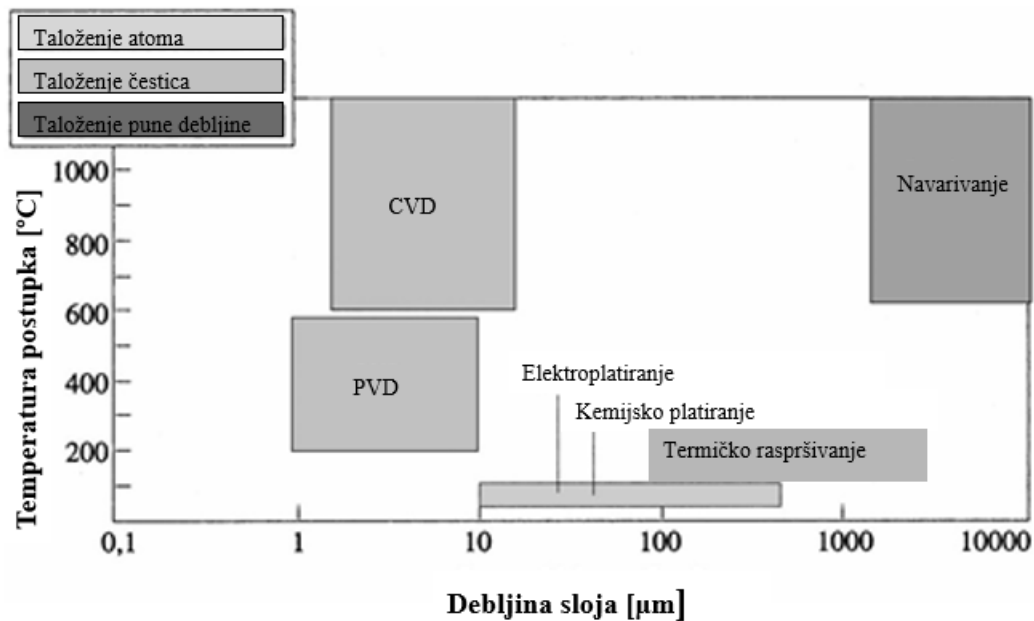
Naposljetku postoje i kompozitne te nanokompozitne prevlake čija se struktura postiže nanošenjem više slojeva ili istovremenim nanošenjem matrice i ojačala istovremenim postupcima na potporni sloj na osnovnom materijalu. Svojim se povoljnim karakteristikama posebno ističu nanokompozitne prevlake koje se međusobno razlikuju prema udjelu i rasporedu nanokristala ojačala te prema obliku i veličini nanokristala [4].

3.2. Postupci prevlačenja

Spomenuto je kako svojstva dobivenog površinskog sloja umnogome ovise o odabranom postupku nanošenja prevlake na osnovni materijal. Općenito se postupci prevlačenja mogu podijeliti na:

- toplinska prevlačenja
- mehanička prevlačenja
- toplinsko-mehanička prevlačenja
- kemijska prevlačenja
- elektrokemijska prevlačenja
- prevlačenja u parnoj fazi [10].

Za ovaj rad važna su nam samo ova potonja te ćemo njih detaljnije opisati.



Slika 15. Prikaz temperatura i dobivenih debljina prevlaka za različite postupke prevlačenja [11]

3.2.1. Prevlačenja u parnoj fazi

Postupci prevlačenja u parnoj fazi podrazumijevaju tehnologije u kojima materijal prevlake kojim se površina oplemenjuje prolazi kroz parnu fazu prije nanošenja na osnovni materijal [5]. U upotrebi su sljedeća tri postupka:

- kemijsko taloženje (prevlačenje) iz parne faze (engl. CVD – Chemical vapour deposition)
- fizikalno taloženje (prevlačenje) iz parne faze (engl. PVD – Physical vapour deposition)
- plazmom aktivirano (potpomognuto) kemijsko taloženje (prevlačenje) iz parne faze (engl. PACVD – Plasma assisted (activated) chemical vapour deposition),

koji se međusobno razlikuju po temperaturi, načinu izvedbe, konačnim rezultatima i mogućoj primjeni prevučenog proizvoda [4]. Razvoj CVD i PVD postupaka počeo je praktički istovremeno. Tako je prva tribološka CVD prevlaka (TiC) patentirana i primijenjena još 1969. godine, a prva PVD tribološka prevlaka (TiN) samo nekoliko godina kasnije, krajem 70-ih godina prošlog stoljeća. Zanimljivo je da se te prevlake i dalje svrstavaju u red najboljih triboloških prevlaka usprkos tome što su nastale prije nekoliko desetljeća. PACVD postupak nešto je recentniji i predstavlja svojevrsnu prilagodbu CVD postupka te se sve češće primjenjuje. Osnovna prednost ovih postupaka leži visokoj fleksibilnosti u kemijskom sastavu i strukturi prevlaka zahvaljujući kojoj se njima može prevući izuzetno širok spektar strojnih dijelova. Najčešće prevlake dobivene ovim postupcima su različiti nitridi (TiN, CrN), karbidi (TiC, CrC, W₂C, WC/C itd.), oksidi (npr. Al₂O₃) te spojevi koji se ne mogu klasificirati niti u jednu od spomenutih grupa, kao što su MoS₂, dijamantu sličan ugljik (DLC) i dr. Većina komercijalnih CVD i PVD prevlaka je jednoslojna i jednokomponentna, no, ovisno o potrebi, ovim je postupcima moguće stvoriti i višeslojne te gradijentne prevlake [11].

CVD postupak prevlačenja

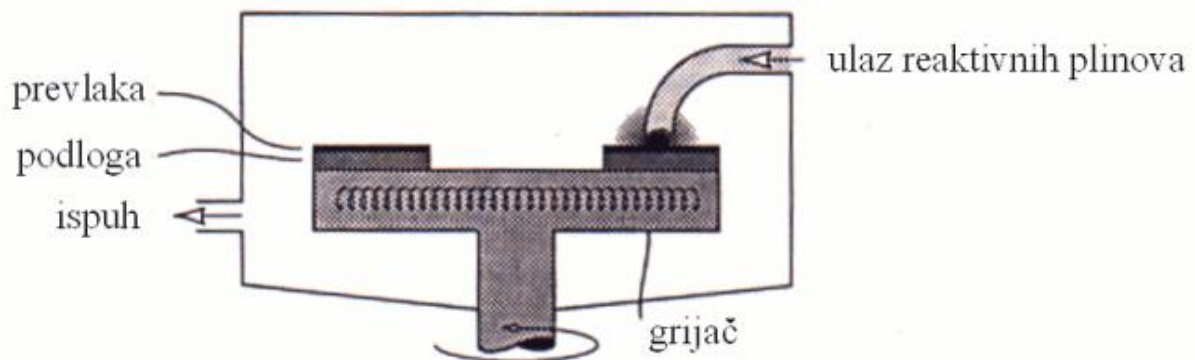
Kod CVD postupaka materijal prevlake, ako već nije u parnom stanju, formira se isparavanjem iz tekućeg ili krutog izvora materijala (tzv. prekursora), a tečenje tih para omogućeno je razlikom tlaka ili upotrebom nosivog plina koji ih usmjerava prema površini podloge. Nerijetko se pritom dodaje i aktivni plin koji reagira s parama metala iz prekursora uslijed čega dolazi do stvaranja prevlake traženog kemijskog sastava. Tako, primjerice, uvođenjem dušika za vrijeme isparavanja prekursora titanijeva (IV) klorida dolazi do stvaranja prevlake titanijeva nitrida – TiN. Sama prevlaka nastaje toplinskim rastvaranjem ili kemijskom reakcijom pare prekursora i aktivnog plina na tlaku nižem od atmosferskog. Pritom je bitno da su temperatura podloge i pare podjednake kako bi se izbjegla kondenzacija materijala buduće prevlake što se postiže grijanjem podloge [5]. CVD postupak prevlačenja najčešće se provodi pri visokim temperaturama u rasponu od 700 °C do 1100 °C [4].

Zbog visokih temperatura potrebnih za uspješno prevlačenje, ovaj je postupak ograničen na materijal podloge koji može podnijeti visoke temperature. Tako se, primjerice, HTCVD postupkom (engl. High temperature chemical vapour deposition, tj. CVD postupak koji se provodi na temperaturama od 900 °C – 1100 °C) prevlače gotovo isključivo alati od sinteriranog tvrdog metala. Nadalje, HTCVD postupak karakteriziraju veće debljine

prevlaka te njihovo grublje zrno, a dolazi i do pada žilavosti osnovnog materijala. U slučaju da je podloga čelik, nakon prevlačenja neophodno je provođenje naknadne toplinske obrade. Ovaj postupak karakterizira i velika opasnost od toplinskih deformacija. S druge strane, prevlake nanese ovim putem dobro prijanjaju na podlogu, talože se velikom brzinom, a sam postupak zahtijeva male troškove prethodnog čišćenja podloge [5].

U skladu s težnjom za smanjenjem temperature došlo je do razvoja MTCVD varijante CVD postupka. MTCVD (engl. Moderate temperature chemical vapour deposition) postupkom prevlake se na podlogu nanose pri temperaturama između 700 °C i 900 °C čime se negativni utjecaji prisutni pri HTCVD postupku djelomično ublažavaju [5]. Također, razvojem ove varijante stvorena je mogućnost za CVD prevlačenje jednoslojnim, višeslojnim ili gradijentnim TiCN prevlakama poboljšane otpornosti na trošenje [12].

Glavne karakteristike CVD postupaka jesu visoke temperature prevlačenja s prevlakama debljine do 10 μm. Prevlake koje se mogu postići su različiti karbidi (TiC, SiC, VC itd.), nitridi (TiN, ZrN, BN), karbonitridi (TiCN) te keramički spojevi (Al₂O₃). Materijali podloge mogu biti visokotemperaturni alatni čelici, legure na bazi nikla i kobalta (superlegure) i tvrdi metali [4].



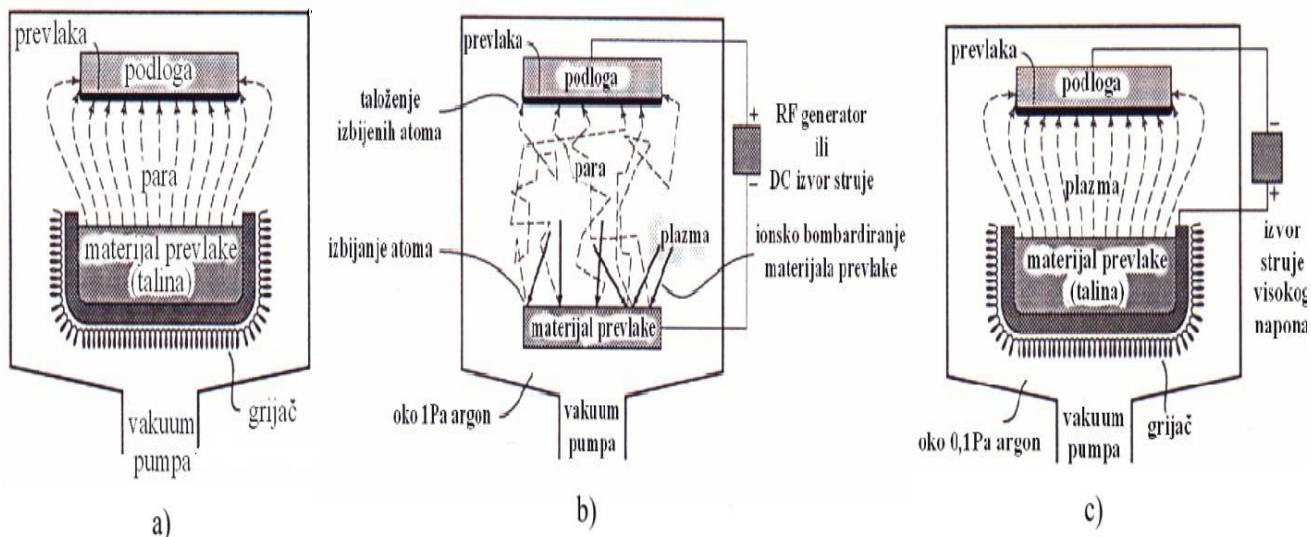
Slika 16. Pojednostavljeni prikaz CVD postupka [5]

PVD postupak prevlačenja

Za razliku od CVD postupka gdje se kondenzacija nastoji izbjeći, kod PVD postupka prevlaka nastaje upravo kondenzacijom parom nanesenog materijala u vakuumu. Kao

materijal prevlake može poslužiti većina metala, keramika, intermetalnih spojeva i dr., a isto tako oni mogu biti nanoseni na bilo koji materijal podloge (u obzir dolaze čak i polimeri i papir). To je djelomično moguće iz razloga što se PVD postupci provode pri mnogo nižim temperaturama od CVD postupaka [5]. Tako je PVD postupcima moguće nanijeti prevlaku na temperaturama nižim od 200 °C [13]. Iz istog je razloga prijelaz između prevlake i osnovnog materijala znatno oštrije kod PVD prevlaka. Također, PVD postupak je fleksibilniji u kontroliranju debljina prevlake pa su ovdje debljine nešto manje nego kod CVD postupka. Brzina taloženja još je veća nego kod CVD postupka, a prionjivost je podjednako dobra zahvaljujući inertnoj atmosferi u vakuumskoj komori i izboju struje [5].

PVD postupci mogu se podijeliti prema metodi korištenoj za taloženje materijala prevlake i okolini podloge na: isparivanje (engl. evaporation), raspršivanje (engl. sputtering) i ionsko platiranje (engl. ion plating). Kod isparivanja (Slika 17.a), izvor materijala prevlake prevodi se u parno stanje zagrijavanjem električnim otporom, vrtložnom strujom, elektronskim snopom ili nekom sličnom metodom. Uslijed zagrijavanja, na određenoj temperaturi dolazi do isparivanja te atomi u obliku pare putuju u ravnim linijama od izvora prevlake do podloge (koja je također prethodno zagrijana), udaraju u nju te kondenziraju. Kinetička energija atoma dobivena isparivanjem poprilično je mala što rezultira slabijom prionjivošću prevlake na podlogu. Također, ravne putanje atoma imaju za posljedicu tzv. efekt sjene za površine koje nisu direktno izložene njihovom djelovanju, a problemi se javljaju i pri prevlačenju kugli, ventila, ležaja i sl. Nasuprot tome, kod tehnike raspršivanja (Slika 17.b) materijal prevlake se ne zagrijava, već se bombardira ionima visoke energije (najčešće ioni argona). Podloga, smještena nasuprot materijala prevlake, zaustavlja struju izbačenih atoma koji vrlo brzo kondenziraju pod egzaktno definiranim uvjetima čime se postiže željena kvaliteta same prevlake. Zagrijavanje podloge pritom je najčešće nevažno. Ionsko platiranje (Slika 17.c) se također temelji na električnom izboju, odnosno na uvođenju napona između elektrode izvora prevlake i elektrode podloge uronjene u plinu smanjenog tlaka. Korištenjem dovoljno visokog napona, materijal prevlake može biti prenesen s elektrode izvora na elektrodu podloge. Materijal prevlake uslijed visokog napona isparava, ta se para ionizira uslijed jakog električnog polja i prisustva ioniziranog plina (najčešće argona), tj. plazme i pritom poprima veliku kinetičku energiju kojom udara u podlogu. To u konačnici rezultira „umetanjem“ materijala prevlake u podlogu, pa za razliku od tehnike isparivanja i raspršivanja, ovdje nema jasne granice između prevlake i podloge. Uz to, prije samog ionskog platiranja, podloga je izložena bombardiranju ionima visoke energije (argon) koji „čiste“ površinu i na taj način pospješuju konačnu prionjivost [5].



Slika 17. Pojednostavljeni prikazi različitih metoda PVD postupaka [5]

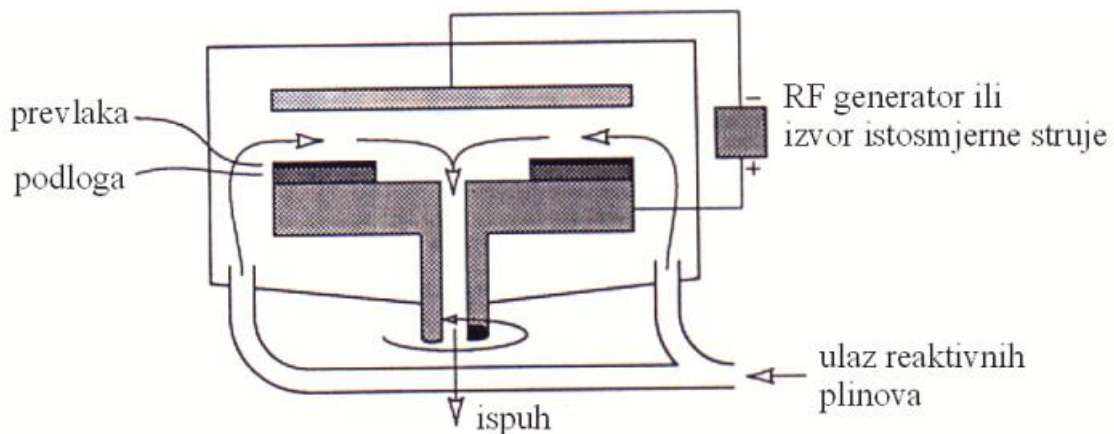
Svim je PVD postupcima zajedničko da se taloženje prevlake temelji na fizikalnim metodama i da je temperatura znatno niža nego kod CVD postupaka. Ovim je postupcima moguće prevlačiti alate izrađene od brzoreznih i alatnih čelika za topli rad koji su prethodno kaljeni i popušteni (iznad 500 °C) te obrađeni na konačne dimenzije [14]. Najčešće prevlake koje se nanose ovim postupcima jesu različiti karbidi, nitridi i oksidi, te dijamant i dijamantu slični slojevi (DLC). Čest je i slučaj nanošenja kubičnog borovog nitrida (CBN) kao jedne od najtvrdih prevlaka koje se mogu naći u primjeni. Debljina PVD prevlaka nešto je manja od CVD prevlaka te se kreće u iznosima do 5 μm [4]. Prisutnost PVD prevlaka vrlo je široka, od triboloških primjena, preko mikroelektronike, elektrike, optike do čisto dekorativnih primjena [5].

PACVD postupak prevlačenja

PACVD postupak predstavlja zasebnu varijantu CVD postupka kod kojeg je temperatura prevlačenja znatno snižena te se, ovisno o vrsti prevlake, kreće u rasponu od 100 do 600 °C [5]. Sniženje temperature posljedica je djelovanja kemijski vrlo reaktivnih iona i radikala koji nastaju kao produkti plazme [13]. Drugim riječima, za razliku od konvencionalnog (toplinskog) CVD postupka gdje se kemijske reakcije iniciraju visokim temperaturama, ovdje se iste iniciraju izbojem struje pri tlaku od 1 do 500 Pa koje dovodi do taloženja materijala prevlake na podlogu. Cjelokupni mehanizam zapravo se temelji na elektronima

visoke energije koji kidaju kemijske veze i tako pospješuju kemijske reakcije. Slično kao i kod nekih PVD postupaka, i ovdje se podloga prethodno bombardira energetskim česticama čime se postiže mikrostrukturna čistoća, a posljedično i bolja fizikalna svojstva poput prionjivosti [5]. Otklanjanjem problema visokih temperatura, ovim se postupkom mogu prevlačiti razni materijali koji se ne mogu lako prevlačiti CVD postupkom, poput alatnih čelika niske otpornosti na popuštanje [14].

Kao izvor materijala mogu biti korišteni praktički svi materijali [5]. Prevlake koje se najčešće nanose ovim postupkom su ponovno one klasične tvrde prevlake na bazi oksida, karbida, nitrida, karbonitrída i sl. Za razliku od CVD postupaka, PACVD omogućuje i prevlačenje podloge DLC prevlaka pri temperaturama od 150 do 250 °C [4]. U odnosu na CVD postupak, PACVD postupkom postižu se bolja prionjivost prevlake na podlogu, njena sitnozrnatija struktura, izuzetno glatka površina te mali iznos tlačnih zaostalih napreznja. Ovaj je postupak nešto mlađi od prethodna dva te se intenzivno razvija i broj njegovih varijanti konstantno raste sukladno zahtjevu za zadovoljavanjem sve specifičnijih karakteristika prevlaka [5].



Slika 18. Pojednostavljeni prikaz PACVD postupka [5]

4. Kotrljajući ležaji

Ležaji su strojni elementi bez kojih je rad automobila, zrakoplova, obradnih strojeva, kućanskih aparata i sl. naprosto neizvediv. Oni se općenito koriste kao oslonci za osovine i vratila i njihov se rad temelji na smanjenju trenja između pokretnih dijelova u strojevima. Primarno se dijele na klizne i kotrljajuće (valjne) ležajeve. Nadalje razlikujemo nosive (radijalne) ležaje koji preuzimaju poprečne sile te uporne ili potporne (aksijalne) ležaje za preuzimanje uzdužnih sila [15].

Kotrljajući ležaji najčešće se sastoje od dva čelična prstena ili dvije ploče između kojih se gibaju valjna tijela. Materijal od kojih su ti elementi izrađeni je poseban čelik legiran kromom, a valjna tijela i valjne staze po kojima se ta tijela gibaju zahtijevaju posebnu obradu: kaljenje i popuštanje, brušenje i poliranje čime se nastoji smanjiti trenje i trošenje u što je većoj mjeri moguće. Kako je trenje kotrljanja ionako manje od trenja klizanja koje dominira kod kliznih ležaja, ove ležaje karakterizira manje zagrijavanje, odnosno manji gubitak energije. Sukladno potonjoj činjenici ovi ležaji zahtijevaju i manje sredstva za podmazivanje, a proces uhodavanja na početku njihovog radnog vijeka nije potreban. Uz sve navedeno ti ležaji rade i s manjim zračnostima od kliznih te su točniji u svom radu. U većini slučajeva, osim spomenutih dijelova, u ležajima se nalazi kavez koji sprečava međusoban kontakt valjnih tijela [15].

S druge strane, kotrljajući su ležaji osjetljiviji na udarna opterećenja i mehaničke vibracije, Generalno govoreći, ovi su ležaji kompliciraniji za izradu, montažu i demontažu, a za samu su njihovu izradu potrebne veoma uske tolerancije što pridonosi i njihovoj nešto višoj cijeni [15].

4.1. Igličasti ležaji

Kotrljajući se ležaji, s obzirom na oblik tijela koje se giba po valjnoj stazi, dijele na: valjkaste, kuglične, bačvaste, stožaste i iglične [15]. U ovom ćemo radu detaljnije razraditi upravo potonje.

Kod igličastih ležaja valjna tijela su iglice (valjci malog promjera u odnosu na duljinu), najčešće smještene između vanjskog i unutarnjeg prstena koji su međusobno uzdužno pokretljivi. Postoje i izvedbe bez unutarnjeg prstena gdje se iglice gibaju neposredno po rukavcu (osovine ili vratila) koje je kaljeno, popušteno, brušeno i polirano. Također, u

nekim se iznimnim slučajevima primjenjuju igličasti ležaji kod kojih nema ni vanjskog ni unutarnjeg prstena [15].



Slika 19. Igličasti ležaj s vanjskim i unutarnjim prstenom [16]



Slika 20. Igličasti ležaj bez unutarnjeg prstena [17]

Igličasti se ležaji upotrebljavaju kad je prostor za montažu ležaja u poprečnom smjeru ograničen. Ne mogu preuzeti uzdužne sile te se uobičajeno upotrebljavaju kao radijalni ležaji. Ipak, postoje specijalne izvedbe igličastih ležaja u kombinaciji s kugličnim ležajima koje mogu preuzeti i uzdužna opterećenja. Usprkos nešto manjem poprečnom presjeku, igličasti ležaji mogu podnijeti relativno visoka opterećenja te se primjenjuju za oslanjanje vratila električnih motora, zupčanika u alatnim strojevima, klipnjača visokoturažnih benzinskih motora i sličnih elemenata konstrukcija [15].

4.2. Trošenje kotrljajućih ležaja

Shodno relativnom gibanju između valjnih tijela i prstenova na kojem se bazira njihova funkcija, kotrljajući su ležaji tijekom svoje eksploatacije izloženi više ili manje izraženom trošenju. Uslijed opterećenja kojem je ležaj podvrgnut dolazi do pojave trenja i trošenja čiji intenzitet ovisi o brojnim faktorima. Trošenje pojedinih elemenata ležaja, poput valjnih tijela ili staze unutarnjeg ili vanjskog prstena, nemoguće je izbjeći. Ipak, postoje načini kojima se ono svodi na prihvatljivu razinu.

Prvi način smanjenja trenja i trošenja kod kotrljajućih ležaja je primjena odgovarajućeg maziva i režima podmazivanja. Maziva mora biti dovoljno kako bi se spriječio direktan kontakt između dijelova ležaja, a prilikom njegova odabira treba paziti kako njegova upotreba ne bi narušila korozivnu postojanost materijala od kojeg je ležaj napravljen. Osim smanjenja trenja i trošenja te sprečavanja korozije, pravilnim se podmazivanjem smanjuju kontaktni pritisci i opasnost od pojave umora materijala, reducira se buka, a eliminira se i zagrijavanje nastalo trenjem koje također može rezultirati neželjenim efektima. Kao sredstvo za podmazivanje mogu se koristiti maziva ulja, kruta maziva, no u primjeni su najčešće različite masti. Pritom je važno provesti temeljitu analizu jer pravilnim odabirom maziva možemo izbjeći prijevremeno i neplanirano oštećenje ležaja koje može dovesti do velikih i izuzetno skupih kvarova [18].

Drugi način smanjenja trenja i trošenja kod kotrljajućih ležaja je primjena odgovarajućih triboloških prevlaka. Te prevlake, ovisno o primjeni, mogu biti od čistog metala, metalnih oksida, sulfida ili nitrida dobivenih difuzijskim procesima modificiranja površina ili postupcima prevlačenja taloženjem iz parne faze. Od prevlaka za ležaje traže se istovremeno visoka tvrdoća i što niži faktor trenja [19]. Oplemenjivanjem površine mogu se postići različiti pozitivni efekti koji se ne mogu postići obradom i modificiranjem materijala od kojih je proizveden kotrljajući ležaj (najčešće je to kromom legiran čelik). Pritom, različite prevlake imaju specifična svojstva kojima se neutralizira djelovanje različitih mehanizama trošenja.

4.3. Oblici trošenja karakteristični za kotrljajuće ležaje

Tribološka analiza kotrljajućih ležaja poprilično je kompleksna jer postoji više različitih procesa njihova trošenja koji se nerijetko isprepliću, a nastaju kao posljedica brojnih utjecajnih faktora. U principu, sve polazi od već opisanih mehanizama trošenja – abrazije, adhezije, umora površine i tribokorozije. No, uslijed specifičnih pojava tijekom rada

kotrljajućih ležaja (vrsta i intenzitet opterećenja, brzina vrtnja, vibracije itd.) ovi se mehanizmi međusobno prožimaju i u konačnici rezultiraju oblicima trošenja karakterističnim za kotrljajuće ležaje. Pod tim se najprije misli na tzv. *fretting* (izjedanje) kao proces trošenja koji nastaje uslijed relativnog kretanja između dviju površina u kontaktu oscilacijama malih amplituda. Eklatantan primjer za to predstavlja odnos između valjnih tijela i staza po kojima se ista gibaju u uvjetima vibracija. Kod *frettinga* su zastupljeni svi mehanizmi trošenja koji se međusobno isprepliću, a njegov se učinak može drastično smanjiti povećanjem tvrdoće, primjenom prevlaka, smanjenjem radne temperature te odgovarajućim podmazivanjem [18]. Igličasti ležaji ponekad podliježu fenomenu tzv. lažnog utiskivanja valjnih tijela (engl. *false brinelling*) kao specifičnoj varijanti *frettinga*. Taj fenomen posljedica je vibracija iglica između prstenova u fazi mirovanja ležaja (prilikom transporta ili uslijed vibracija koje dolaze od drugih strojeva). Vibracije iglica uzrokuju izbacivanje maziva iz područja dodira te na taj način dolazi do direktnog kontakta između iglica i valjnih staza što u konačnici rezultira njihovim lokaliziranim trošenjem [20].



Slika 21. *False brinellig* kod igličastog ležaja [21]

Kao što je već i rečeno, tijekom rada kotrljajućih ležaja prisutni su svi mehanizmi trošenja. Doduše, sukladno prirodi njihova rada, neki od mehanizama su ipak dominantniji od drugih. Tako u radu kotrljajućih ležaja najveća opasnost prijeti od umora površine. Uslijed repetitivnog gibanja valjnih tijela po valjnim stazama i čestih promjena opterećenja postoji velika mogućnost od stvaranja inicijalne pod površinske pukotine, njenog napredovanja i konačnog izbijanja na površinu te konačnog stvaranja čestice trošenja. Ovaj mehanizam trošenja neizbježan je čak i uz dobro podmazivanje [18]. Vremenom, umor površine može

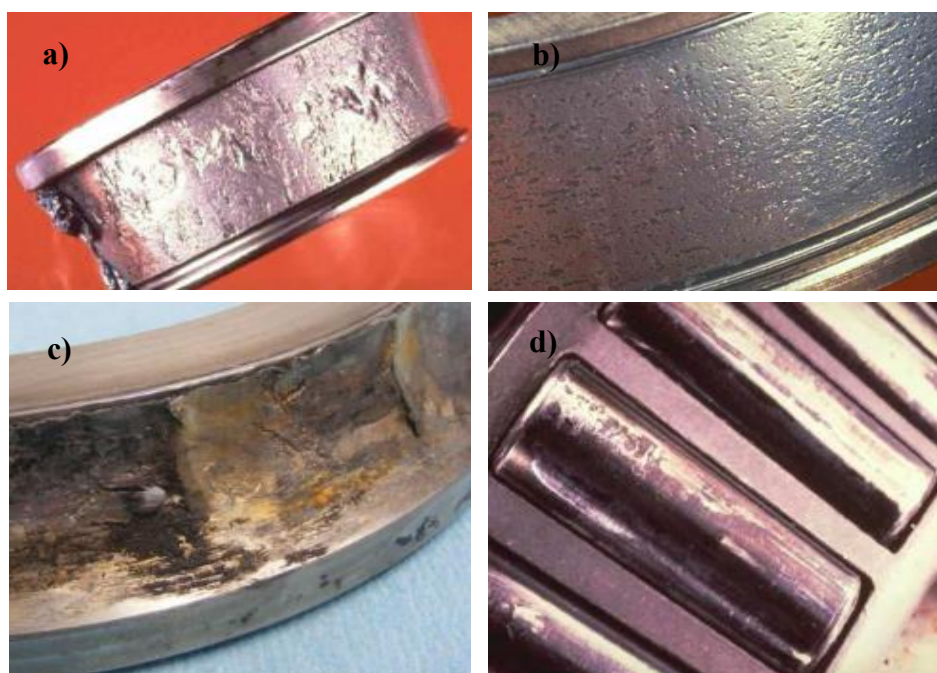
rezultirati izraženim rupičenjem (engl. *pitting*), a u ekstremnijim slučajevima i ljuštenjem (engl. *spalling*) valjnih tijela ili valjnih staza u kojem je gubitak materijala značajan te uzrokuje veću količinu buke i vibracija, a u ekstremnim slučajevima može dovesti i do zakazivanja cjelokupnog ležaja [20]. Na pojavu površinskog umora utječu faktori poput opterećenja, nepravilnog poravnanja elemenata, hrapavosti površine, podmazivanja te svojstava samog materijala [22]. Glede hrapavosti, poželjno je da površina bude što finija te je jedan od zahtjeva koji se postavlja na valjne staze i valjna tijela upravo da oni budu brušeni i polirani [15]. Što se tiče karakteristike materijala, iznimno je važno da on bude metalurški homogen, bez uključaka koji bi imali ulogu koncentratora naprezanja. Osim toga, ti čelici od koji se rade ležaji moraju biti zakaljeni, a debljina modificiranog sloja (u slučaju cementiranja) trebala bi biti veća od dubine stvaranja inicijalne (podpovršinske) pukotine. Valja napomenuti kako razlika u tvrdoći između otvrdnutog i neotvrdnutog sloja ne smije biti prevelika [18]. Slika 22.a prikazuje površinu unutarnjeg prstena zahvaćenu umorom površine (engl. *pitting*).

S druge strane, mehanizmi adhezije, abrazije i tribokorozije također su prisutni kod kotrljajućih ležaja, ali u manjoj mjeri negoli je to slučaj s umorom površine. Abrazija, inače najzastupljeniji mehanizam trošenja, kod kotrljajućih ležaja nije primaran mehanizam budući da njihov rad nije izložen djelovanju tvrdih, abrazivnih čestica (barem ne unutar same njegove konstrukcije). Ipak, ako su ležajevi dio nekog stroja koji radi u abrazivnoj sredini (strojevi za obradu odvajanjem čestica, strojevi za bušenje naftnih bušotina i dr.) određena količina čestica neminovno će se naći i unutar samog ležaja. Isto tako, postoji mogućnost zaostajanja čestica kao posljedica izrade ležaja. Čestice trošenja nastale mehanizmom umora površine još su jedna varijanta izvora abraziva. Ako su pritom te čestice veće od debljine filma mazivog sredstva nastupit će abrazivno trošenje valjnih tijela te valjnih staza vanjskog i unutarnjeg prstena po kojim se ta tijela gibaju [23]. Takav oblik abrazije, čiji se tribosustav sastoji od dva funkcionalna dijela (tijela i staze) te međutijela (abrazivne čestice) koje se gibaju slobodno među njih, naziva se abrazijom u dodiru tri tijela [5]. Moguća je i pojava oblika abrazije u dodiru dva tijela koji se odvija uslijed struganja jednog ležajnog elementa u drugi [22]. Slika 22.b prikazuje površinu unutarnjeg prstena zahvaćenu abrazijom.

Do adhezijskog trošenja kod kotrljajućih ležaja dolazi uslijed primjene neodgovarajućih režima podmazivanja (granično i mješovito podmazivanje), odnosno podmazivanja u kojem kontaktne površine nisu u potpunosti odvojene mazivim filmom. U takvim okolnostima, na mjestu kontakata neravnina dolazi do mikrozavarivanja te prenošenja materijala s jednog

na drugo tijelo i eventualnog kasnijeg otkidanja tog materijala u obliku čestice trošenja. Ipak, kako se adhezija primarno veže uz klizanje pretpostavke za pojavu adhezije u kotrljajućim ležajima su specifične. Tako kod njih do adhezijskog trošenja dolazi u područjima s visokim omjerom klizanja spram kotrljanja kao što su kontakti valjnih tijela s kavezom. Visoki omjer klizanja i kotrljanja također je posljedica naglog ubrzanja valjnih elemenata prilikom opterećenja što može dovesti do adhezije i na samim valjnim stazama ležajnih prstenova. Ovisno o faktorima (intenzitet opterećenja, temperatura, režim podmazivanja i sl.) adhezija može varirati od one niskog intenziteta koja se manifestira u vidu tragova koji nalikuju tragovima brisanja uz moguću promjenu boje pa do one visokog intenziteta kod koje dolazi do izraženije plastične deformacije, promjene boje pa čak i do izraženog zavarivanja trošenih površina što je vidljivo na Slici 22.c [22].

Mehanizam tribokorozije kod kotrljajućih se ležaja vrlo često pojavljuje kao glavni „sudionik“ u procesu *frettinga* između unutrašnjeg prstena i osovine ili vanjskog prstena i kućišta. Naime, u korozivski agresivnoj okolini dolazi do stvaranja produkata korozije, a uslijed mikrogibanja (vibracija) između površina u kontaktu kasnije dolazi do njihova uklanjanja s kontaktne površine. Nakon nekog vremena ciklus se ponavlja. Osim kod *frettinga* proces nastajanja slojeva korozivskih produkata i njihova uklanjanja moguć je i kod relativnog gibanje veće amplitude, primjerice uslijed standardnog kotrljajućeg gibanja valjnih elemenata po valjnim stazama u prisutnosti agresivnog medija. Taj proces u konačnici rezultira karakterističnim obezbojenim zonama koje se pojavljuju po tim elementima [22]. Isto je vidljivo na površini valjaka na Slici 22.d.



Slika 22. Različiti oblici trošenja kotrljajućih ležaja [22]

4.4. Tribološke prevlake za primjenu na kotrljajućim ležajima

Primjenom triboloških prevlaka moguće je postići pozitivan utjecaj na trošenje kotrljajućih ležaja povećanjem tvrdoće površinskog sloja, povećanjem otpornosti na umor površine i smanjenjem faktora trenja. Te se prevlake nanose raznim metodama, a od posebnog su nam interesa tvrde prevlake dobivene PVD i PACVD postupcima. Ovim je postupcima moguće nanijeti vrlo tanke prevlake (debljine nekoliko μm) izvrsnih mehaničkih i triboloških svojstava, a budući da se prevlačenje odvija pri relativno niskim temperaturama, ono nema značajnijeg utjecaja na strukturu i svojstva osnovnog materijala. Stoga, sukladno visokim temperaturama prevlačenja, CVD postupak nije najpogodnije rješenje. Uz sve navedeno, općenita karakteristika PVD postupka je da u prevlaci nakon nanošenja ostaju prisutna tlačna zaostala naprezanja koja su u slučaju kotrljajućih ležaja poželjna radi povećanja tvrdoće i otpornosti na umor [7].

Primjena određene prevlake u kotrljajućim ležajima ovisi o brojnim faktorima kao što su dominantni mehanizmi trošenja, prisustvo korozivnog medija, temperatura, režim podmazivanja i tomu slično. No, uzmu li se u obzir svi dosada objašnjeni aspekti kotrljajućih ležaja osnovni zahtjevi koji se stavljaju pred tribološke prevlake kojima se isti prevlače mogu se svesti na to da one moraju biti tanke, tvrde i niskog faktora trenja. Osnovna zadaća tih prevlaka je prevencija umora površine, kao glavnog i najčešćeg uzročnika neispravnog rada ovih ležaja, uzrokovanog opetovanim kotrljanjem valjnih tijela duž valjnih staza u prisutnosti dinamičkog opterećenja. Dakako, poželjno je da one iskazuju i dobru postojanost prema drugim mehanizmima trošenja, a svakako je poželjna i njihova korozijska postojanost [19].

Testiranja prevlaka na bazi titanija (TiN, TiCN i TiAlN) nanesenih na alatni čelik PVD postupkom pokazala su značajno smanjenje trošenja, a testiranje istih prevlaka nanešenih na prethodno plazmom nitrirani sloj (duplex postupak) polučilo je još bolje rezultate. Uspoređujući netretirani čelik, TiN prevlakom prevučeni čelik, plazmom nitrirani čelik te duplex postupkom obrađeni čelik možemo izvući sljedeći zaključak: najbolju otpornost na trošenje polučio je potonji slučaj, nakon njega slijedi plazmom nitrirani čelik, a tek nakon njega čelik prevučeni TiN prevlakom. Dakako, najlošiju otpornost prema trošenju pokazao je netretirani čelik. Pomalo iznenađuje relativno loš rezultat TiN prevlake, no problem leži u velikom jazu između odličnih svojstava prevlake i osrednjih svojstava osnovnog materijala. Taj se problem rješava stvaranjem prijelaznog, nitriranjem ili nekim drugim postupkom modificiranog sloja. Osim tvrdoće prevlake i projektiranja površinskog sloja,

značajan faktor je i debljina same prevlake. Ispitivanjem prevlaka TiN (isto vrijedi i za prevlake CrC, TiC itd.) raznih debljina na čeliku za ležaje dobiveni su pomalo začuđujući rezultati. Naime, ispostavilo se da veću otpornost na umor površine pružaju tanje prevlake. Razlog tome leži u činjenici da kod debljih prevlaka često dolazi do delaminacije kojima se životni vijek materijala skraćuje [24].

Grupa tankih i tvrdih prevlaka niskog faktora trenja na bazi kroma nanesenih na kaljene valjke od čelika 100Cr6 (čelik s približno 1 % ugljika te 1,5 % kroma, čelik za ležaje) pružila je još jednu potvrdu o prednostima koje pružaju prevlake kod kotrljajućih ležaja, ali i problemima koji se pritom mogu javiti. Valjci prevučeni prevlakama Cr_2N , $\text{CrN}+n\text{C}$ ($n\text{C}$ označava nano/mikrometarsku veličinu karbidnih čestica uronjenih u CrN matricu) i $\text{Cr}+\text{W}-\text{C}:\text{H}$ uspoređeni su s neprevučeni valjcima od istog materijala u uvjetima kotrljanja po stazama napravljenim također od čelika 100Cr6 čime se simulirao rad kotrljajućih ležaja. U slučaju neprevučeni valjaka prvotno je došlo do trošenja u vidu zaglađivanja (poliranja) njihove, a nakon velikog broja ciklusa došlo je i do pojave *pittinga* uslijed umora površine. Kod prevučeni valjaka ti su efekti manje izraženi. Glavni utjecajni faktor na ponašanje prevlaka predstavljalo je sredstvo za podmazivanje jer su različite prevlake pokazale različita svojstva u prisutnosti različitih maziva. Generalno govoreći, najbolja je svojstva pokazala prevlaka $\text{Cr}+\text{W}-\text{C}:\text{H}$, a najlošija $\text{CrN}+n\text{C}$ prevlaka, no valja napomenuti kako, zapravo, nijedna od ovih prevlaka nije ostvarila u potpunosti zadovoljavajuća svojstva. Također, pojavio se i problem delaminacije prevlake od podloge (pogotovo kod $\text{CrN}+n\text{C}$ prevlake), čime je dokazano da tvrdoća prevlake ne znači previše u slučaju njene slabe prionjivosti na podlogu [19].

Osim tvrdih prevlaka, postoji i opcija primjene mekih prevlaka kao što su DLC, Mo_2S i WS_2 . To su redom prevlake niskog faktora trenja čija je primarna uloga smanjenje trenja, a samim time i trošenja između površina u interakciji [24].

4.5. Vibracije i buka u radu kotrljajućih ležaja

Prema definiciji, vibracije su periodička ili ciklička gibanja malih amplituda oko ravnotežnog položaja prouzročena vanjskom periodičkom silom ili odklonom iz ravnotežnog položaja [25]. Vibracijsko djelovanje uobičajeno je za sve pokretne mehaničke sustave pa tako i za kotrljajuće ležaje. Dapače, njihova je uloga kod kotrljajućih ležaja značajna i redovito štetna te može dovesti do različitih nepoželjnih posljedica u vidu stvaranja neželjene buke, pojave trošenja, a u pojedinim slučajevima i do njihovog mehaničkog zakazivanja. Tako se, primjerice, pojava *frettinga*, kao vrlo čestog oblika trošenja kod kotrljajućih ležaja, zasniva upravo na vibracijskom djelovanju [18]. No, osim što vibracije mogu biti uzrokom pojedinih štetnih procesa, one mogu biti i njihova posljedica. U tom slučaju, analizom vibracija može se utvrditi stanje ležaja. Naime, tijekom eksploatacije dolazi do raznih defekata u vidu trošenja, konstrukcijskih nepravilnosti, mehaničkih lomova i sl. koji, ukoliko nisu otkriveni na vrijeme, mogu dovesti do katastrofalnih posljedica po čitav mehanički sustav. Pravovremenim otkrivanjem tih defekata to je moguće spriječiti zamjenom ležaja koja je relativno jeftina u usporedbi s mogućim troškovima kvara cjelokupnog sustava. Ukoliko se vibracije uoči i analizira dovoljno rano, moguće je čak i otkloniti uzrok njihova nastanka, bilo da se radi o neadekvatnom podmazivanju, preopterećenju i sličnim fenomenima [26]. U tu se svrhu provode različite metode koje se u osnovi mogu podijeliti na: mjerenja temperaturnih karakteristika, analizu čestica trošenja te na vibracijska i akustična mjerenja. Pritom se ova potonja najčešće primjenjuju [27].

Za potrebe mjerenja vibracijskih i akustičnih karakteristika kotrljajućih ležaja razvijeno je nekoliko različitih tehnika: vibracijsko ispitivanje u vremenskom i frekvencijskom području, metoda udarnog impulsa, tehnike zvučnog pritiska i intenziteta i metoda akustičke emisije itd. Kotrljajući ležaji proizvode određenu količinu buke i vibracija i u savršenim uvjetima, no prisutnost neke nepravilnosti rezultira njihovim naglašenim porastom. Te su nepravilnosti najčešće u obliku povećane hrapavosti i/ili valovitosti površine, neusklađenih valjnih staza, nedovoljnog podmazivanja, pogrešaka prilikom montaže ili pak u obliku trošenja pojedinih elemenata. Kao primjer mogu poslužiti lokalna oštećenja nastala uslijed umora površine (*pitting* ili *spalling*). Kada takvo oštećenje nastalo na određenom elementu kotrljajućeg ležaja dođe u interakciju s drugim elementom ležaja (odnos valjno tijelo – valjna staza) to rezultira naglim promjenama u kontaktnim naprezanjima na mjestu njihova dodira što pak generira kratak impuls. Taj impuls u konačnici stvara vibracije i buku [27].

Spektar vibracija dobiven od nekog strojnog dijela (u ovom slučaju kotrljajućih igličastih ležaja) poprilično je kompleksan zbog prisutnosti brojnih izvora vibracija te se mora „filtrirati“ kako bi se otklonile nepotrebne informacije. Izdvajanje specifičnog vibracijskog spektra izuzetno je zahtjevno u vremenskoj domeni te se analiza vibracija i zvuka stoga češće provodi u frekvencijskom području. U tu se svrhu izdvajaju osnovne frekvencije koje se pojavljuju u spektru i njihovi viši harmonici [28]. Analizom vibracija i buke ležaja u frekvencijskoj domeni mogu se izdvojiti specifične frekvencije koje se ne podudaraju s uobičajenim vibracijama samog ležaja, već dolaze od vanjskih izvora (kao što su bučna okolina ili pogonski sustavi). Time se omogućuje lakše prepoznavanje i filtriranje tih smetnji u analizi, što pomaže u točnijem dijagnosticiranju stanja ležaja. Pojave oštećenja tijekom rada ležaja rezultiraju promjenama u njegovim vibracijama i buci koje se opažaju u pojavi određenih frekvencija specifičnih za oštećenje pojedinog elementa ležaja. Specifične frekvencije oštećenja ležaja ovise o konstrukciji ležaja i brzini rotacije, a njihove oznake su sljedeće: BPFO za specifičnu frekvenciju oštećenja vanjskog prstena, BPFI za specifičnu frekvenciju oštećenja unutarnjeg prstena, FTF za specifičnu frekvenciju oštećenja kaveza te BSF za specifičnu frekvenciju oštećenja kotrljajućeg elementa. Formule za njihovo izračunavanje navedene su u eksperimentalnom dijelu rada [29].

Među instrumentima za vibracijsku i analizu zvuka kotrljajućih ležaja posebno se korisnim smatra tzv. FFT (engl. Fast Fourier Transformation) metoda. FFT metoda, uporabom trigonometrijskih funkcija, pretvara signal (npr. zvučni) iz vremenskog u frekvencijsko područje u intervalu od 10 Hz do 22 kHz. U analizi zvuka i vibracijskih frekvencija, eliminiranjem utjecaja okolnih vibracijsko-zvučnih signala dobiva se grafički prikaz na kojem se izdvajaju vršne vrijednosti („peakovi“) koji predstavljaju gore spomenute specifične frekvencije koje mogu ukazati na potencijalna oštećenja pojedinih elemenata ležaja. Drugim riječima, FFT metoda omogućuje koncentriranje na specifične frekvencije unutar složenog signala kojima se mogu prepoznati kvarovi koji su teško uočljivi u vremenskom području [29].

Glavni parametri koji se prate senzorima (akcelerometrima) tijekom vibracijske analize su pomak, brzina i akceleracija. Osim toga, prigodna je i analiza frekvencijskog raspona u kojem ležaj vibrira [28]. Na temelju kvalitetne analize i interpretacije dobivenih rezultata u konačnici se mogu izvesti zaključci o tribološkom stanju ispitivanog ležaja, a shodno tome mogu se i poduzeti potrebni koraci za sprečavanje nepoželjne štete.

4.6. Hrapavost površine

Hrapavost površine tribološki je element koji se opisuje kao mikrogeometrijska nepravilnost površine koja najčešće nastaje tijekom raznih postupaka obrade. O njoj ovise razna mehanička, kemijska, fizikalna i ostala svojstva, a u strojarskoj se praksi ona najčešće želi svesti na što nižu razinu [5]. Hrapavost površine karakterizira se preko više različitih parametara, a za potrebe ovog rada koristit ćemo samo tri vertikalna parametra: R_a , R_z i R_{max} .

Parametar R_a označava srednje aritmetičko odstupanje profila koje je jednako aritmetičkoj sredini apsolutnih vrijednosti profila y u granicama referentne duljine l :

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l y(x) dx \quad [\mu m]. \quad (1)$$

Parametar R_z predstavlja prosječnu visinu neravnina, odnosno srednju vrijednost apsolutnih vrijednosti visine 5 najviših izbočina y_{pi} i 5 najdubljih udubina y_{vi} u granicama referentne duljine l :

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|}{5} \quad [\mu m]. \quad (2)$$

Parametar R_{max} predstavlja najveću visinu profila, odnosno razliku između najveće visine izbočine R_p i najveće dubine izbočine profila R_m .

$$R_{max} = R_p + R_m \quad [\mu m]. \quad (3)$$

Na temelju hrapavosti mogu se izvesti zaključci o trošenju površine.

4.7. Zagrijavanje ležaja u radu

Praćenje temperature ležajeva od ključne je važnosti za očuvanje funkcionalnosti i performansi strojeva. Kontrola temperature ležajeva u stvarnom vremenu omogućava pravovremeno otkrivanje potencijalnih problema, čime se mogu prevenirati ozbiljni kvarovi. Faktori koji mogu izazvati povećanje temperature ležajeva uključuju nepravilno poravnavanje osi ležaja i osovine, nedovoljno ili neprikladno podmazivanje, te prekomjerno opterećenje. Povišene temperature mogu uzrokovati širenje komponenti ležaja, povećano trenje, pogoršanje kvalitete

maziva, a na kraju mogu dovesti i do kvara ležaja. Stoga je implementacija učinkovitog sustava za praćenje temperature ležajeva ključna za sprečavanje skupih zastoja i oštećenja opreme [30].

Do zagrijavanja ležajeva može doći zbog različitih razloga, kao što su: nedovoljna količina ili previše maziva, neispravna ugradnja ležajeva, neprikladna vrsta maziva, povećano trenje te preopterećenje ležaja. Porast temperature ležajeva tijekom rada česta je pojava, no postoji prihvatljiv raspon u kojem se temperatura može povećati. Obično temperatura ležaja raste pri pokretanju, a zatim se stabilizira na nižoj razini nakon određenog vremena. Preporučena temperatura ležajeva obično je ispod 100 °C. Vrijeme potrebno za stabilizaciju temperature ovisi o više faktora te može trajati od 20 minuta do nekoliko sati [30].

EKSPERIMENTALNI DIO

5. Priprema ispitnih uzoraka i provedba ispitivanja

U eksperimentalnom dijelu rada provedena je analiza trošenja unutrašnjeg prstena igličastih ležaja od čelika 100Cr6. Pritom je unutrašnji prsten u jednom slučaju bio neprevučen, dok je u ostala tri slučaja bio prevučen prevlakama koje su se međusobno razlikovale po sastavu, rasporedu slojeva te postupku nanošenja. U svrhu analize trošenja provedena su ispitivanja hrapavosti površine, ispitivanja porasta temperature kotrljajućih ležaja tijekom rada te ispitivanja vibracija i buke.

5.1. Ispitni uzorci

Za potrebe ovog ispitivanja korišteni su igličasti ležaji NK 35/20 RCT proizvođača NTN Corporation. Pritom su korištena četiri unutrašnja prstena koja se međusobno razlikuju po načinu obrade njihove površine (Slika 23.). Jedan je prsten bio neprevučen (oznaka L0), drugi je prevučen dvoslojnom prevlakom TiCN/TiN postupkom PACVD (oznaka L1), treći također prevučen dvoslojnom, PACVD postupkom nanesenom TiN/TiCN prevlakom (oznaka L2), a četvrti je unutrašnji prsten prevučen jednoslojnom prevlakom TiN, ali postupkom PVD (oznaka L3). Izabrani prsteni su ugrađeni u preostali dio ležaja (vanjski prsten s kavezom i iglicama) koji je bio isti za sva ispitivanja.



Slika 23. Uzorci unutrašnjeg prstena ležaja prije ispitivanja

5.1.1. Parametri prevlačenja

Izabrani unutrašnji prsteni (L1, L2 i L3) prevučeni su različitim prevlakama. Primijenjena su dva različita postupka prevlačenja: PVD i PACVD s parametrima navedenim u tablicama 1 do 3.

U tablici 1. navedeni su parametri PACVD prevlačenja dvoslojnom TiCN/TiN prevlakom. Prevlačenje je provedeno u vakuumskoj peći Rübige PC 70/90.

Tablica 1. Parametri prevlačenja TiCN/TiN ležajnog prstena (L1) postupkom PACVD

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
Napon plazme	490 V
Snaga plazme	1650 W
Trajanje hlađenja komore do 20 °C	6 h

U tablici 2. navedeni su parametri PACVD prevlačenja dvoslojnom TiN/TiCN prevlakom. Prevlačenje je također provedeno u vakuumskoj peći Rübiger PC 70/90.

Tablica 2. Parametri prevlačenja TiN/TiCN ležajnog prstena (L2) postupkom PACVD

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
Napon plazme	490 V
Snaga plazme	1650 W
Trajanje hlađenja komore do 20 °C	6 h

PVD prevlačenje provedeno je u uređaju za prevlačenje Metaplas Ionon MZR – 304, prevlakom TiN prema parametrima navedenim u tablici 3.

Tablica 3. Parametri prevlačenja TiN ležajnog prstena (L3) postupkom PVD

Parametri postupka	Vrijednost parametra
Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona	0,5 h
Temperatura prevlačenja	500 °C
Trajanje prevlačenja	0,55 h
Tlak u vakuumskoj komori	3 mbar
Trajanje hlađenja komore do 20 °C	0,55 h

5.1.2. Provedba ispitivanja

Na igličastim ležajima NK 35/20 RCT s prevučenim i neprevučenim unutrašnjim prstenom provedena su ispitivanja hrapavosti površine (u polaznom stanju i nakon trošenja) i mjerenje vibracija, buke i zagrijavanja tijekom rada ležaja u praznom hodu s i bez podmazivanja.

Tijekom ispitivanja simuliran je rad igličastog ležaja u praznom hodu. U tu je svrhu, prije ispitivanja pojedinog unutrašnjeg ležaja (L0, L1, L2, L3), na osovinu izrađenu tehnikom 3D printanja učvršćen ispitivani unutrašnji prsten, na koji je montiran vanjski prsten s iglicama. Vanjski prsten učvršćen je u napravi pomoću četiri oslonca. Rotaciju osovine ostvarili smo njenim povezivanjem s glavnim vretenom bušilice Proxxon Micromot BFB 40/E s podesivom brzinom vrtnje, koja je pogodna za provođenje eksperimenta zbog svog mirnog i tihog rada čime smo nastojali minimalizirati vanjski unos vibracija i buke. Za potrebe mjerenja vibracija korišten je vibrometar Schut VM – 6360. Piezoelktrični senzor vibrometra magnetom je pričvršćen na vanjski prsten igličastog ležaja. Vibrometar je povezan s prijenosnim računalom i računalnim programom za zapis podataka o pomaku, akceleraciji i frekvenciji vibracija. Početna brzina vrtnje osovine iznosila je 945 min^{-1} i trajala je minutu, zatim je brzina vrtnje povećana na 1025 min^{-1} također u trajanju od minute te je u trećoj minuti ispitivanja brzina vrtnje iznosila 1215 min^{-1} . Ciklus trošenja s tri navedene brzine vrtnje u ukupnom trajanju od tri minute proveden je za rad ležaja bez podmazivanja i s podmazivanjem motornim uljem SAE 5W 30. Količina ulja dodanog na unutrašnji prstena

ležaja iznosila je 25 mL. Valja napomenuti kako su eksperimenti provedeni s ležajem koji je radio u praznom hodu, tj. bez nametnutog vanjskog opterećenja.

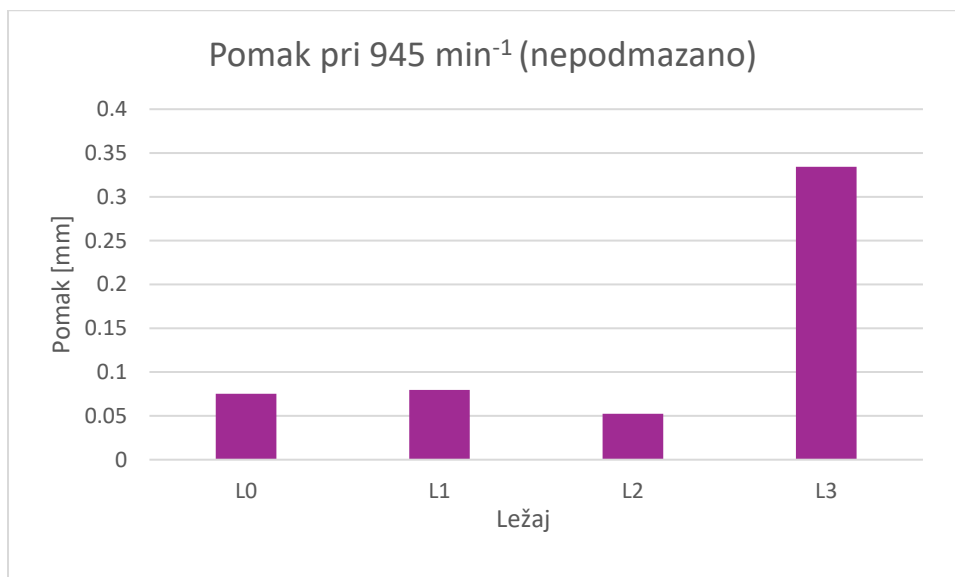


Slika 24. Mjerni postav za ispitivanje vibracija ležaja u praznom hodu.

6. Rezultati ispitivanja

6.1. Pomak vibracija

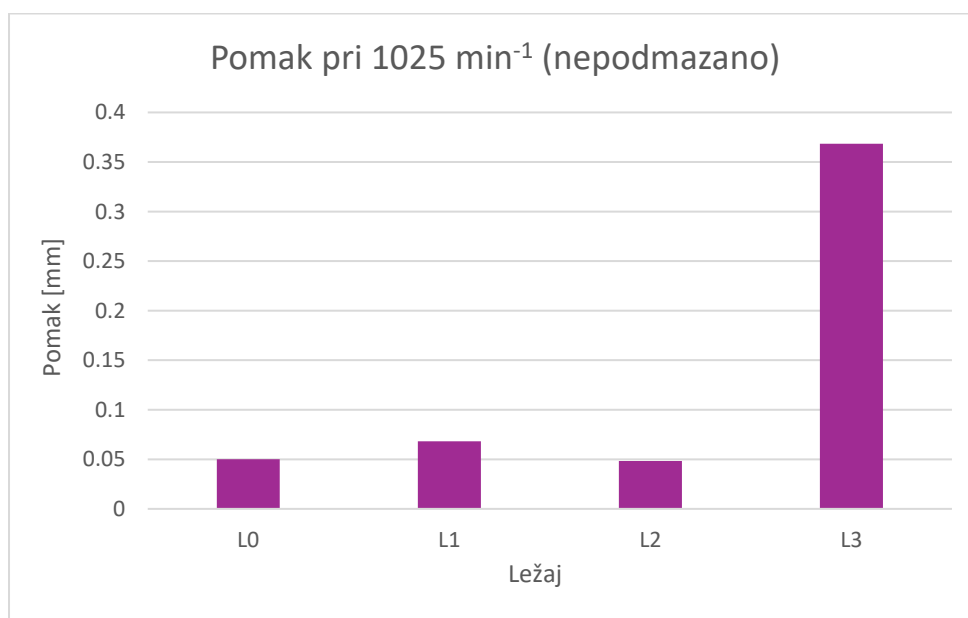
Vibracijski pomak podrazumijeva udaljenost koju objekt ili čestica prijeđe kao rezultat vibracije u odnosu na ravnotežni položaj. Na Slici 25. dan je grafički prikaz srednjeg pomaka za nepodmazane igličaste ležaje pri brzini vrtnje od 945 min^{-1} .



Slika 25. Srednje vrijednosti pomaka nepodmazanih ležaja pri brzini 945 min^{-1}

Pri brzini vrtnje od 945 min^{-1} uvjerljivo najveći srednji pomak, u iznosu od 0,334 mm, pojavio se kod ležaja L3, dok je najmanji pomak zabilježen kod ležaja L2 (0,052 mm). Zanimljivo je i da je ležaj s neprevučeniim prstenom imao manji srednji pomak od L1.

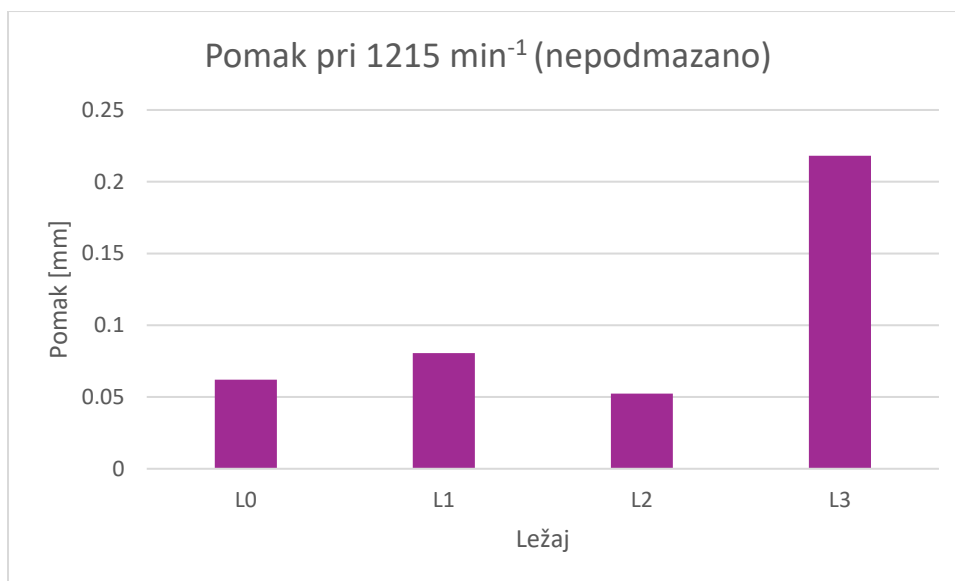
Na Slici 26. dan je grafički prikaz srednjeg pomaka za pojedini nepodmazani ležaj pri brzini vrtnje od 1025 min^{-1} .



Slika 26. Srednje vrijednosti pomaka nepodmazanih ležaja pri brzini 1025 min^{-1}

I u ovom slučaju daleko najveću vrijednost srednjeg pomaka zabilježena je kod prstena L3 s time da je vrijednost nešto veća negoli pri 945 min^{-1} te iznosi $0,368 \text{ mm}$. Najmanju vrijednost srednjeg pomaka ponovno je imao ležaj L2 i to u nešto manjem iznosu ($0,048 \text{ mm}$), a odnos preostala dva ležaja je jednak kao i u prvom slučaju (srednji pomak je veći kod ležaja L1 nego kod L0)

Na Slici 27. dan je grafički prikaz srednjeg pomaka za pojedini nepodmazani ležaj pri brzini vrtnje od 1215 min^{-1} .



Slika 27. Srednje vrijednosti pomaka nepodmazanih ležaja pri brzini 1215 min^{-1}

Odnos srednjih vrijednosti pomaka između ležaja isti je kao i u prethodno dva slučaja (najveći pomak L3, najmanji L2, $L1 > L0$). Zanimljivo je da je kod ležaja L3 došlo do značajnijeg smanjenja pomaka te njegova srednja vrijednost pri brzini 1215 min^{-1} iznosi $0,218 \text{ mm}$.

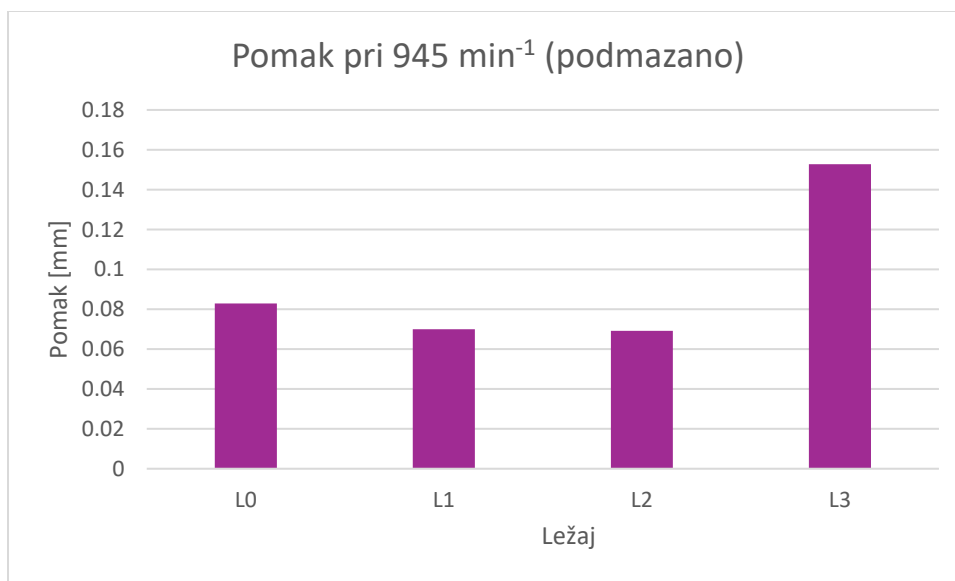
Usporedbom srednjih vrijednosti pomaka dobivenih pomoću vibrometra za nepodmazane ležaje može se uočiti obrazac prema kojem najmanji pomak bilježimo kod ležaja L2, a daleko najveći kod ležaja L3. Zanimljivo je i da ležaj s neprevučeni unutarnjim prstenom (L0) tokom cijelog ispitivanja pokazuje manji srednji pomak od ležaja L1.

Ispitivanja ležaja u podmazanom stanju provedena su dodavanjem 25 ml motornog ulja SAE 5W-30 na unutrašnji prsten ležaja prije početka ispitivanja, kako je prikazano na donjoj Slici 28.



Slika 28. Postupak podmazivanja L3 ležaja

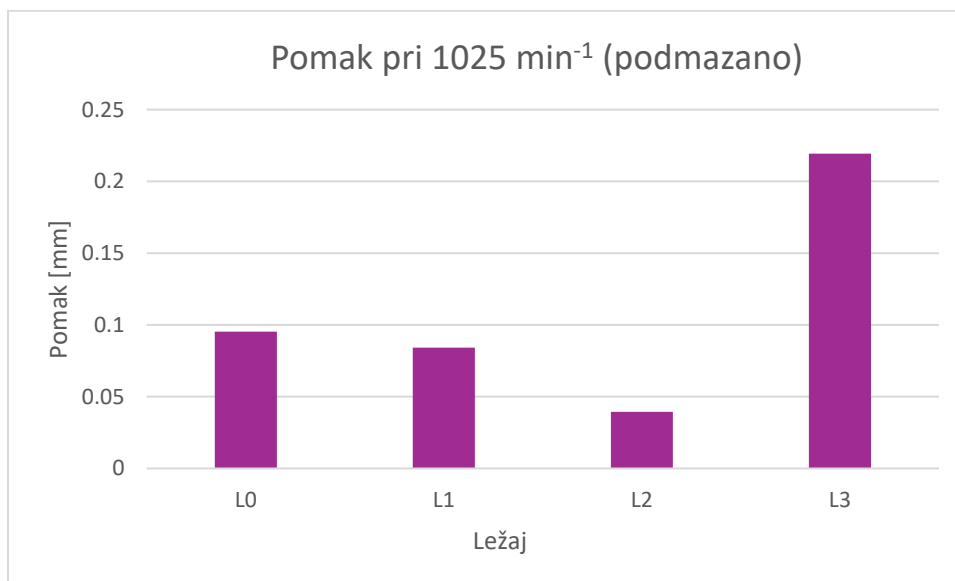
Na Slici 29. dan je grafički prikaz srednjeg pomaka za pojedini podmazani ležaj pri brzini vrtnje od 945 min^{-1} .



Slika 29. Srednje vrijednosti pomaka podmazanih ležaja pri brzini 945 min^{-1}

U prisustvu maziva pri brzini od 945 min^{-1} ponovno je najveći srednji vibracijski pomak zabilježen kod ležaja L3 (0,1527 mm). Doduše, ovdje je taj pomak značajno manji negoli u slučaju bez maziva pri istoj brzini. U slučaju ostalih ležaja, vrijednost srednjeg pomaka kreće se od L0 (0,0829 mm), preko L1 (0,07 mm) do L2 s ponovno najnižom vrijednošću srednjeg pomaka (0,0692 mm). Ipak, zanimljivo je da je srednji pomak kod podmazanih L0 i L2 veći negoli u slučaju ispitivanja nepodmazanih pri istoj brzini.

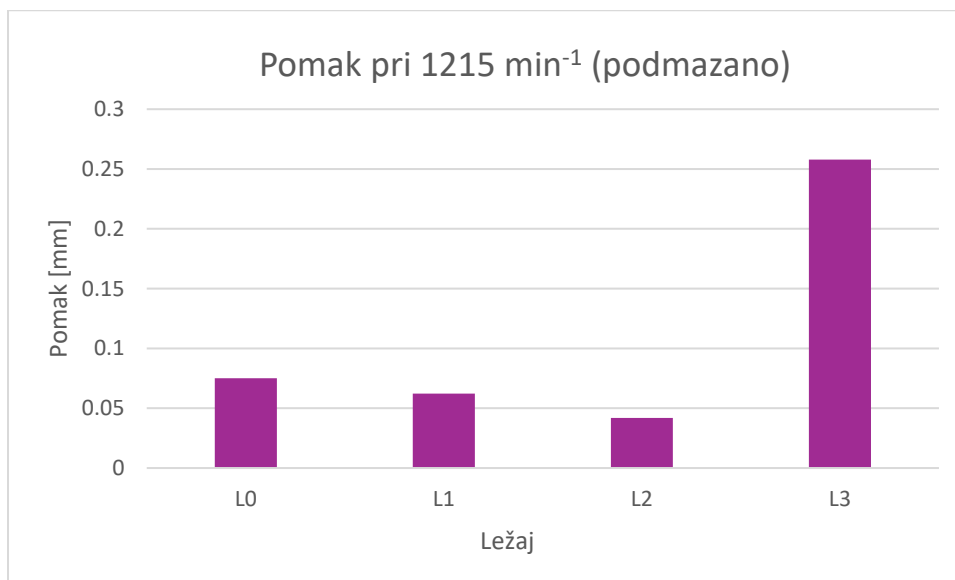
Srednji pomak podmazanih ležaja pri brzini vrtnje od 1025 min^{-1} grafički je prikazan na Slici 30.



Slika 30. Srednje vrijednosti pomaka podmazanih ležaja pri brzini 1025 min^{-1}

Odnos srednjih vrijednosti vibracijskog pomaka za ovaj je slučaj jednak je prethodnom slučaju ($L3 > L0 > L1 > L2$). Pritom je kod ležaja L0 (0,0954 mm) i L1 (0,0842 mm) došlo do povećanja istih u odnosu na nepodmazano stanje, dok je kod L2 (0,0395 mm) i L3 (0,2193 mm) došlo do smanjenja. S aspekta brzine vrtnje, kod svih podmazanih ležaja, osim kod L2, došlo je do povećanja pomaka u odnosu na pomake registrirane kod 945 min^{-1} .

Srednji pomak podmazanih ležaja pri brzini vrtnje od 1215 min^{-1} grafički je prikazan na Slici 31.



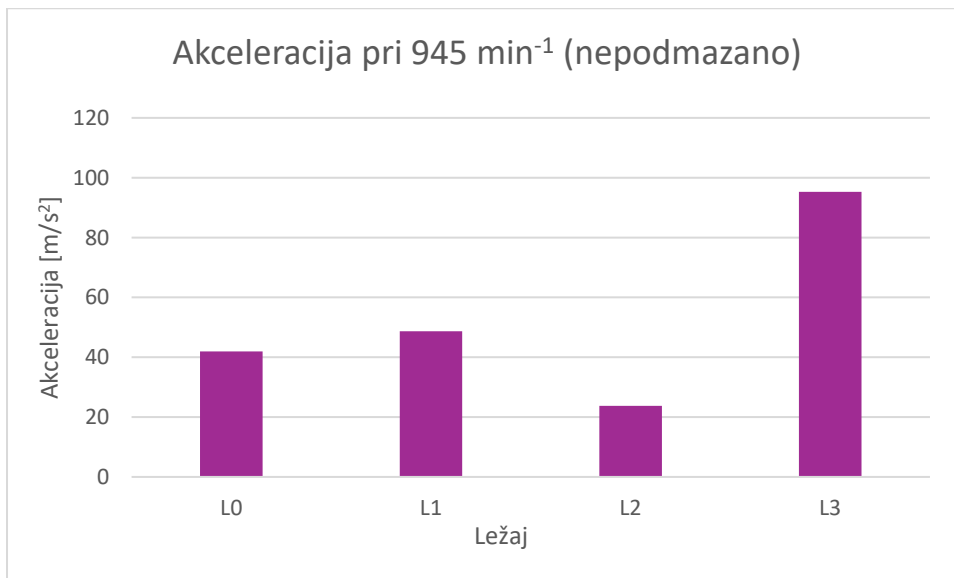
Slika 31. Srednje vrijednosti pomaka podmazanih ležaja pri brzini 1215 min⁻¹

U ovom je slučaju ponovno zabilježen jednak međusobni odnos srednjih vrijednosti pomaka kao i u prethodna dva slučaja ($L3 > L0 > L1 > L2$). U odnosu na nepodmazano stanje pri istoj brzini, L0 i L3 ležaji bilježi porast srednje vrijednosti pomaka, dok L1 i L2 bilježe smanjenje.

Uspoređujući srednje vrijednosti pomaka dolazimo do zaključka kako najmanji pomak u svim ispitivanjima ima ležaj L2. Što se tiče odnosa pomaka i brzine rotacije unutrašnjeg ležaja ne možemo ništa jednoznačno odrediti jer u nekim slučajevima povećanjem brzine ne dolazi do očekivanog povećanja srednjeg pomaka. Upravo suprotno, u nekoliko je navrata došlo do smanjenja istog. Sličan zaključak vrijedi i za odnos rezultata za podmazane i nepodmazane ležaje – iako je očekivanje bilo da će se pomak smanjiti dodatkom maziva to se nije uvijek dogodilo. Jedino što možemo zamijetiti je da određeni ležaji dobro reagiraju na podmazivanje (ponajprije L2 i L3), dok je zanimljivost da kod L0 u svim slučajevima bilježimo povećanje srednjeg pomaka u odnosu na ispitivanje bez podmazivanja.

6.2. Akceleracija vibracija

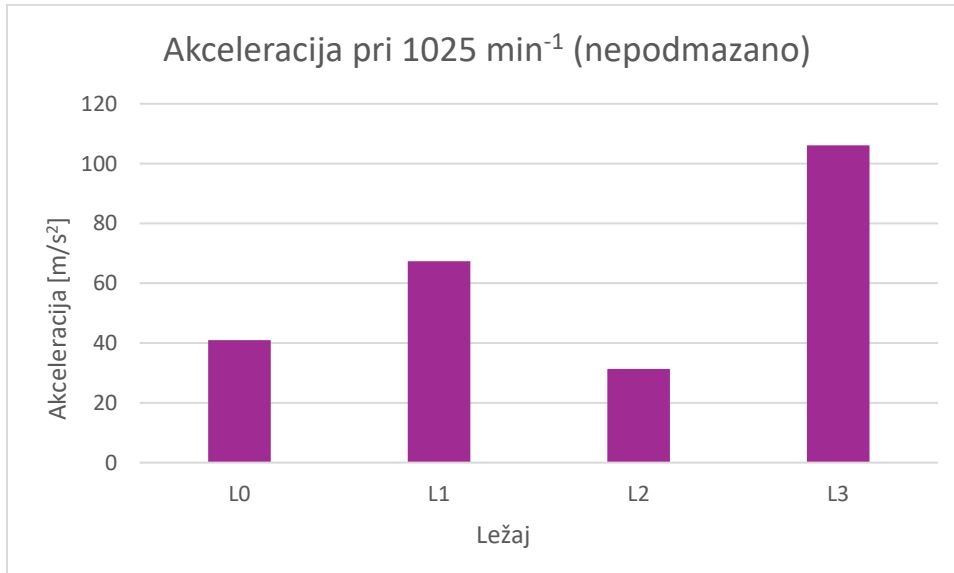
U kontekstu mehaničkih vibracija, akceleracija se mjeri kao promjena brzine oscilacije u vremenu i izražava se u jedinicama m/s^2 . Na Slici 32. dan je grafički prikaz srednjih vrijednosti akceleracija za pojedini nepodmazani ležaj pri brzini vrtnje od 945 min⁻¹.



Slika 32. Srednje vrijednosti akceleracije nepodmazanih ležaja pri brzini 945 min⁻¹

Pri brzini od 945 min⁻¹ najveću srednju vrijednost akceleracije imao je ležaj L3 (95,27 m/s²), a najmanju ležaj L2 (23,73 m/s²). Također, kod L1 ležaja zabilježena je veća akceleracija (48,67 m/s²), negoli kod L0 (41,92 m/s²).

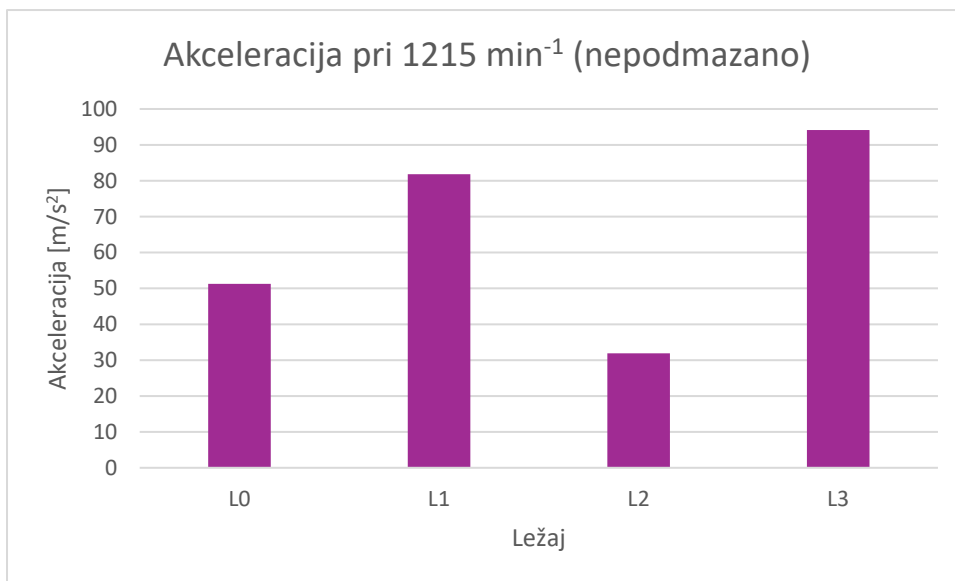
Slika 33. daje grafički prikaz srednjih vrijednost akceleracije za nepodmazane ležaje pri brzini vrtnje od 1025 min⁻¹.



Slika 33. Srednje vrijednosti akceleracije nepodmazanih ležaja pri brzini 1025 min⁻¹

Povećanjem brzine došlo je i do povećanja srednje vrijednosti akceleracije vibracija kod svih ležaja izuzev kod L0 (neznatno se smanjila: 40,97 m/s²). Odnos vrijednosti ostao je jednak: L3 > L1 > L0 > L2.

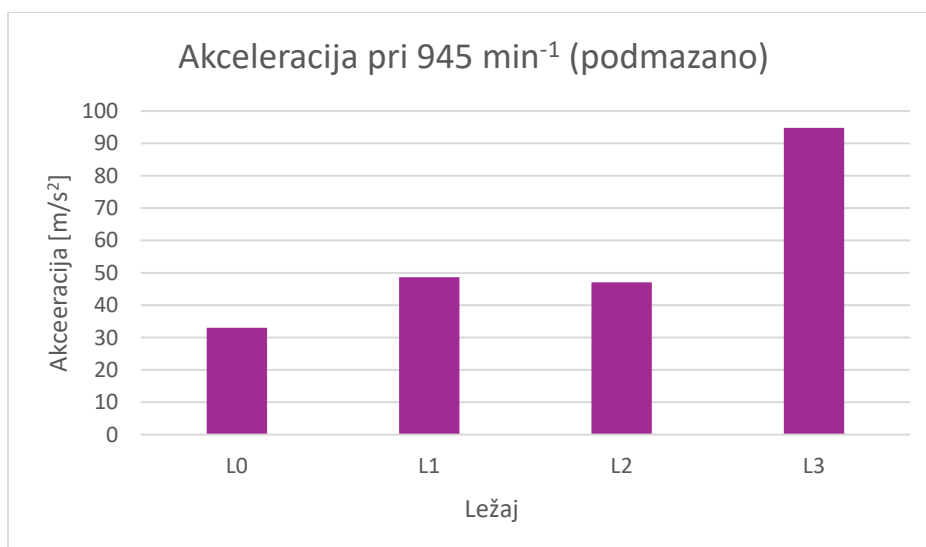
Slika 34. daje grafički prikaz srednjih vrijednosti akceleracije za nepodmazane ležaje pri brzini vrtnje od 1215 min^{-1} .



Slika 34. Srednje vrijednosti akceleracije nepodmazanih ležaja pri brzini 1215 min^{-1}

Povećanjem brzine nastavljen je trend porasta akceleracije ispitivanih ležaja. Izuzetak ovaj put predstavlja L3 ležaj kod kojeg je došlo do pada prosječne akceleracije. S druge strane, kod ležaja L1 došlo je do njenog izraženijeg porasta, a poprilično je porasla akceleracija kod L0. Na L2 porast brzine nije značajnije utjecao (blagi porast). Odnos vrijednosti ostao je jednak: $L3 > L1 > L0 > L2$.

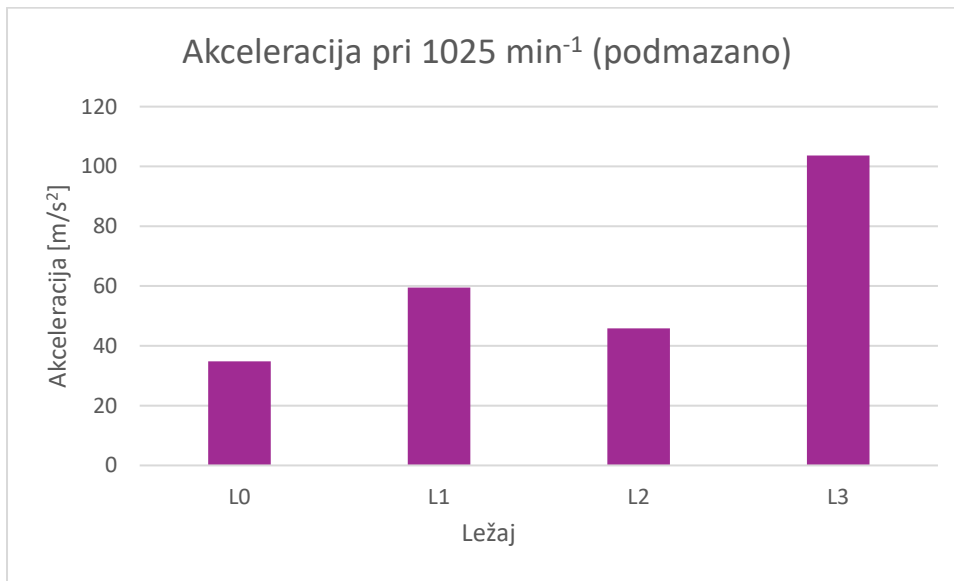
Na Slici 35. dan je grafički prikaz srednjih vrijednosti akceleracija za pojedini podmazani ležaj pri brzini vrtnje od 945 min^{-1} .



Slika 35. Srednje vrijednosti akceleracije podmazanih ležaja pri brzini 945 min^{-1}

Analizom grafičkog prikaza može se uočiti kako kod podmazanih ležaja pri 945 min^{-1} najmanju vrijednost srednje akceleracije bilježimo kod ležaja L0 kod kojeg je došlo do pada njezine vrijednosti u odnosu na nepodmazano stanje. To je ujedno i prvi put da L2 ima veću vrijednost određene vibracijske karakteristike od ležaja L0. Dapače, kod L2 bilježimo i znatan porast srednje akceleracije u prisustvu maziva ($48,65 \text{ m/s}^2$). Najveću vrijednost i dalje ima ležaj L3, a slijedi ga L1. Pritom su oba ležaja zadržala otprilike istu vrijednost srednje akceleracije kao i u nepodmazanom stanju.

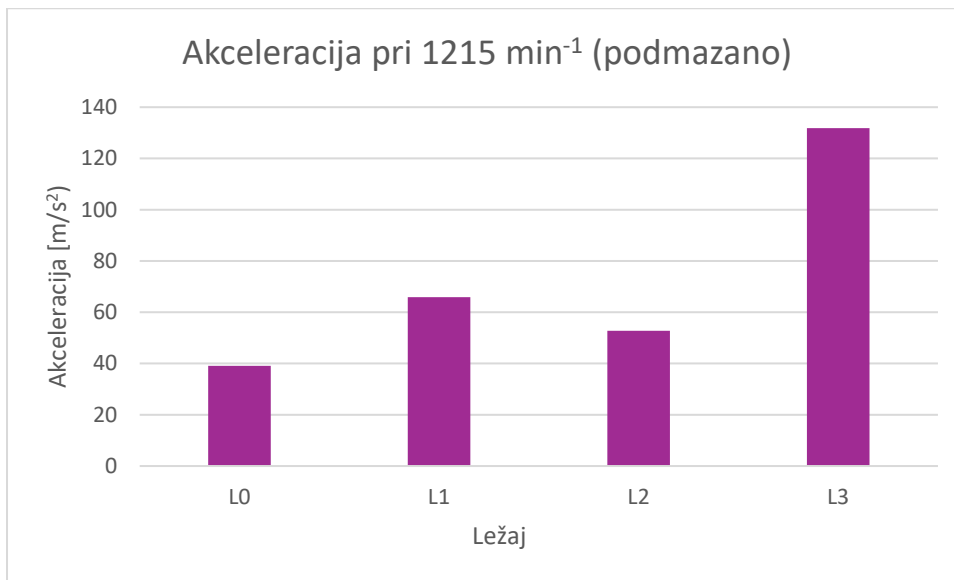
Slika 36. prikazuje srednje vrijednosti akceleracije podmazanih ležaja pri 1025 min^{-1} .



Slika 36. Srednje vrijednosti akceleracije podmazanih ležaja pri brzini 1025 min^{-1}

U principu sve rečeno za Sliku 35. vrijedi i ovdje. Pritom valja napomenuti kako je ovdje kod ležaja L1 zabilježen nešto izraženiji pad srednje akceleracije u odnosu na nepodmazano stanje. Uslijed povećanja brzine došlo je i do povećanja srednjih vrijednosti akceleracija (osim kod L2 gdje zabilježen blagi pad).

Srednja akceleracija podmazanih ležaja pri brzini vrtnje od 1215 min^{-1} grafički je prikazana na Slici 37.



Slika 37. Srednje vrijednosti akceleracije podmazanih ležaja pri brzini 1215 min⁻¹

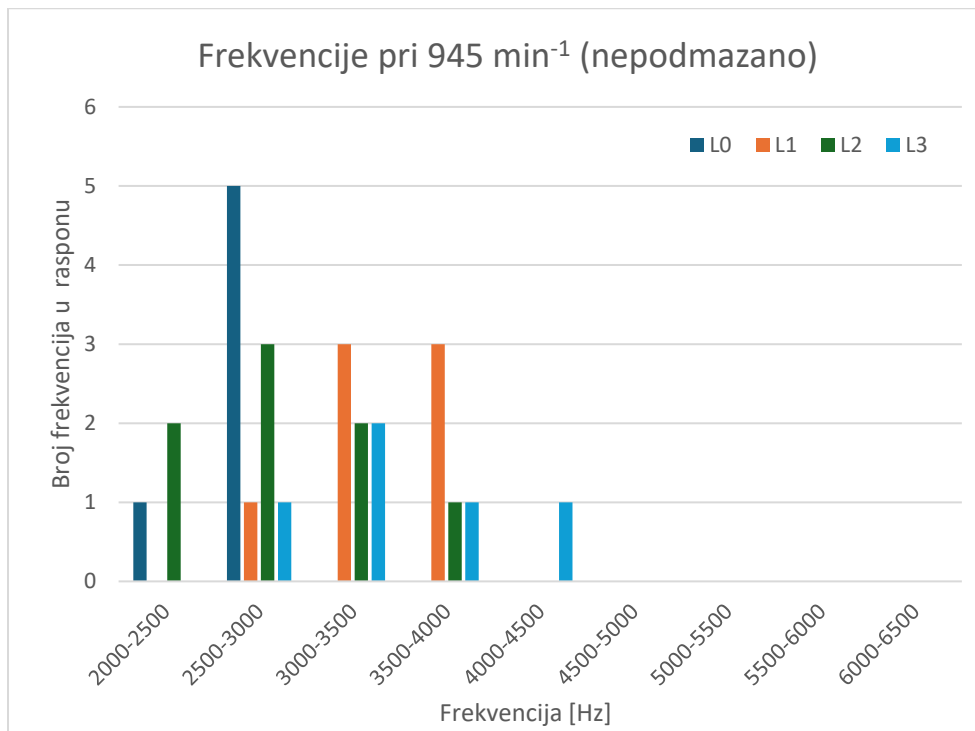
Kvalitativni međuodnos vrijednosti srednjih akceleracija ostao je isti i pri brzini od 1215 min⁻¹ (L3 > L1 > L2 > L0). Kod svih ležaja ubrzanjem s 1025 min⁻¹ na 1215 min⁻¹ zabilježen je porast akceleracije. U odnosu na nepodmazano stanje pri ovoj brzini, ležaji L0 i L1 bilježe pad, a ležaji L2 i L3 intenzivan porast srednje akceleracije.

Iz ispitivanja akceleracija možemo iščitati kako u odsustvu maziva najbolje rezultate (odnosno najnižu prosječnu akceleraciju) daje ležaj L2, dok je u podmazanom stanju najbolje rezultate dao ležaj L0. Razloge tomu možda treba tražiti u nekompatibilnosti prevlake TiCN, koja predstavlja gornji sloj na unutrašnjem prstenu ležaja L2, s odabranim mazivom. Najlošije rezultate i u podmazanom i u nepodmazanom stanju dao je ležaj L3. Što se tiče utjecaja brzine vrtnje na akceleraciju vibracija možemo zaključiti kako u većini ispitivanja povećanjem brzine dolazi i do povećanja akceleracije.

6.3. Frekvencije vibracija

Osim pomaka i akceleracije senzor smješten na ležaju zabilježio je i frekvencije kojima je ležaj vibrirao tokom rada. Pomoću FFT metode vibrometar je transformirao signal iz vremenskog u frekvencijsko područje u intervalu od 10 Hz do 22 kHz što je u provedenim ispitivanjima omogućilo detekciju frekvencija vibracija ležaja u svakoj sekundi rada. Također, eliminirane su frekvencije „izvana“ (npr. one koje proizlaze od rotacije vretena bušilice).

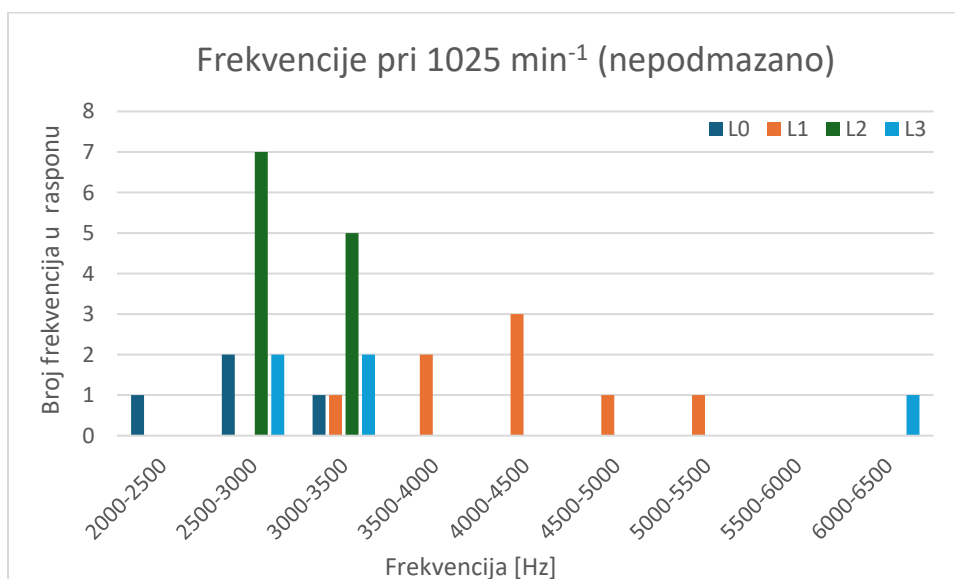
Na Slici 38. grafički je prikazana raspodjela frekvencija u rasponu od 2500 do 6500 Hz pri 945 min⁻¹ u nepodmazanom stanju.



Slika 38. Raspodjela frekvencija pri 945 min⁻¹ (nepodmazano)

Pri brzini od 945 min⁻¹ sve frekvencije vibracija ležaja L0 bile su u rasponu od 2000-3000 Hz. Kod ležaja L1 najviše ih je u rasponu od 3000-4000 Hz. Kod ležaja L2 najčešće su frekvencije u rasponu od 2000-3500 Hz, dok su za L3 sve u rasponu od 2500-4500 Hz.

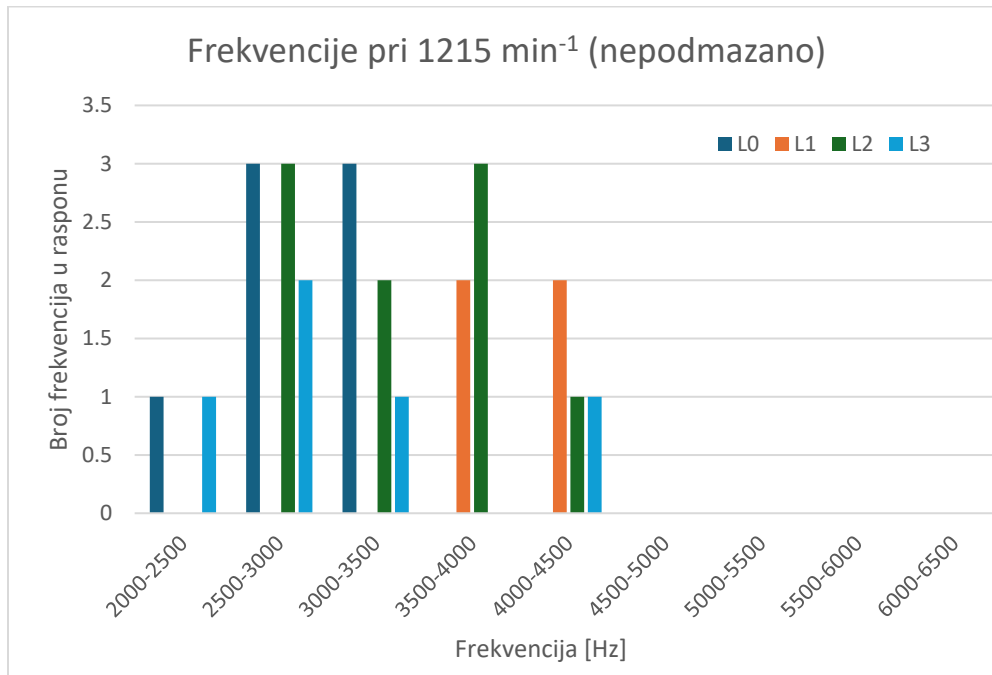
Na Slici 39. grafički je prikazana raspodjela frekvencija u rasponu od 2500 do 6500 Hz pri 1025 min⁻¹ u nepodmazanom stanju.



Slika 39. Raspodjela frekvencija pri 1025 min⁻¹ (nepodmazano)

Pri brzini od 1025 min^{-1} frekvencije vibracija ležaja L0 bile su u rasponu od 2000-3500 Hz. Kod ležaja L1 došlo je do njihovog nešto većeg rasipanja, no najviše ih ima u rasponu od 3500-4500 Hz. Kod ležaja L2 sve su frekvencije u rasponu od 2500-3500 Hz, a u istom rasponu prevladavaju i frekvencije ležaja L3. Kod L3 ležaja u ovom se slučaju pojavljuje i jedna frekvencija iz raspona 6000-6500 Hz.

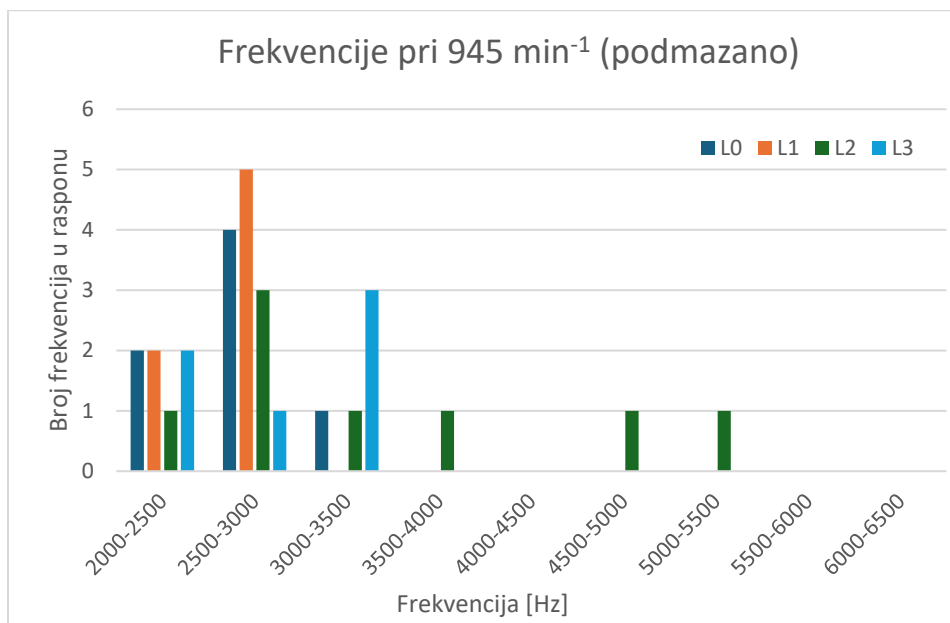
Na Slici 40. grafički je prikazana raspodjela frekvencija u rasponu od 2500 do 6500 Hz pri 1215 min^{-1} u nepodmazanom stanju.



Slika 40. Raspodjela frekvencija pri 1215 min^{-1} (nepodmazano)

U ovom slučaju ležaj L0 ima najviše frekvencija u rasponu od 2500-3500 Hz, ležaj L1 ima sve frekvencije u rasponu od 3500-4500 Hz, kod ležaja L2 frekvencije su najčešće od 2500-4000 Hz, a kod ležaja L3 najčešće su frekvencije od 2500-3000 Hz (iako ih ima i u rasponu od 2000-3000 Hz te od 4000-4500 Hz).

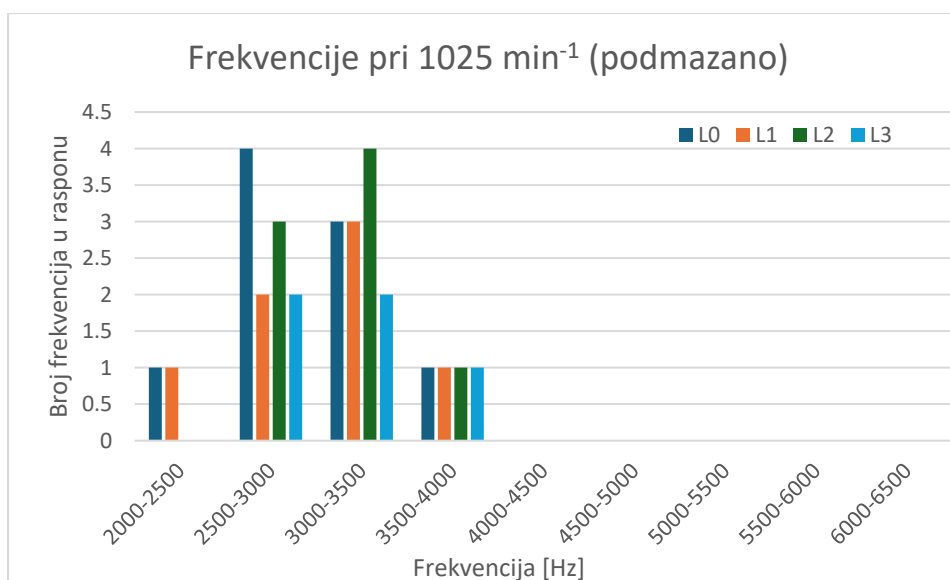
Rezultati ispitivanja frekvencija vibracija podmazanih ležaja pri različitim brzinama dani su grafičkim prikazom na Slikama 41. – 43. Na Slici 41. dan je grafički prikaz raspodjele frekvencija u rasponu od 2500 do 6500 Hz pri 945 min^{-1} u podmazanom stanju.



Slika 41. Raspodjela frekvencija pri 945 min⁻¹ (podmazano)

Frekvencije ležaja L0 kreću se u rasponu od 2000-3500 Hz (najčešće u području od 2500 do 3000 Hz). Frekvencije ležaja L1 pripadaju rasponu od 2000 do 3000 Hz, dok kod ležaja L2 imamo poprilično rasipanje vrijednosti, no ipak se najčešće pojavljuju u rasponu od 2500-3000 Hz. L3 ležaj vibrirao je frekvencijama u rasponu od 2000-3500 Hz.

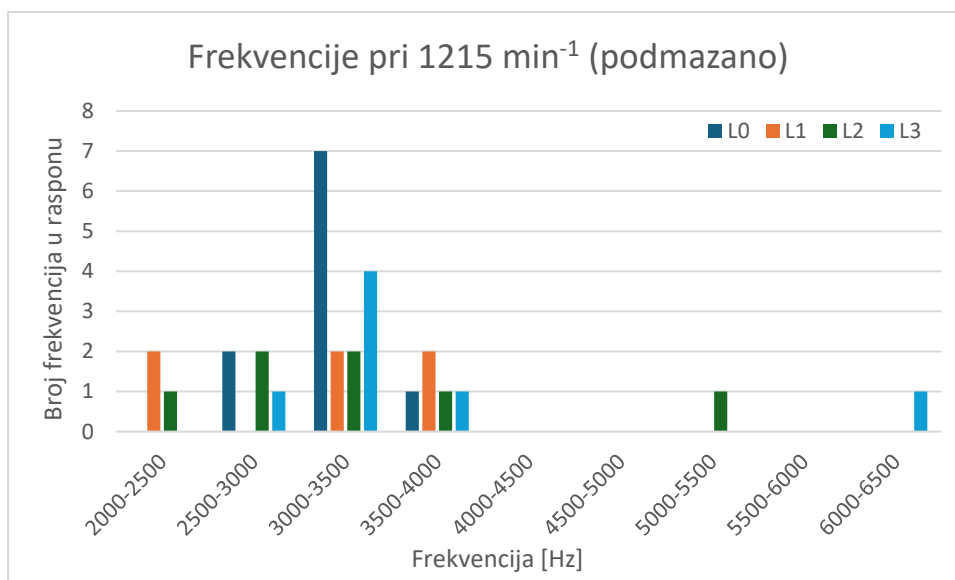
Na Slici 42. dan je grafički prikaz raspodjele frekvencija u rasponu od 2500 do 6500 Hz pri 1025 min⁻¹ u podmazanom stanju.



Slika 42. Raspodjela frekvencija pri 1025 min⁻¹ (podmazano)

Podmazani ležaj L0 vibrira frekvencijama u rasponu od 2000-4000 Hz, najčešće u rasponu od 2500-3500 Hz. Isto vrijedi za ležaj L1. S druge strane, ležaji L2 i L3 vibriraju frekvencijama iz raspona 2500-4000 Hz, pritom najčešće u rasponu 2500-3500 Hz.

Na Slici 43. dan je grafički prikaz raspodjele frekvencija u rasponu od 2500 do 6500 Hz pri 1215 min⁻¹ u podmazanom stanju.



Slika 43. Raspodjela frekvencija pri 1215 min⁻¹ (podmazano)

Ležaj L0 pri 1215 min⁻¹ vibrira frekvencijom iz raspona 2500-4000 Hz, s najvećom učestalosti od 3000-3500 Hz. Ležaj L1 vibrira u području od 2000-2500 Hz te u području od 3000-4000 Hz. Frekvencije ležaja L2 i L3 poprilično su rasipane. Pritom ležaj L2 vibrira u području od 2000-4000 Hz te od 5000-5500 Hz, dok L3 vibrira u području od 2500-4000 Hz, a kod njega se još jednom pojavljuje i jedna frekvencija iz područja 6000-6500 Hz.

6.4. Analiza buke ležaja

Za potrebe analize buke primijenjen je isti uređaj kao i za analizu vibracija (Schut VM – 6360) koji je opremljen mikrofonom ugrađenim u senzor vibracija. Akustički izlaz iz vibrometra spojen je na vanjsku USB zvučnu karticu iz koje se snima buka ležaja u računalnom programu Audacity. Spektar buke ispitivanih ležaja sniman je istovremeno s vibracijama ležaja za tri različite brzine (945 min⁻¹, 1025 min⁻¹, 1215 min⁻¹) u trajanju od minute za svaku brzinu. Time je omogućena eliminacija utjecaja vanjskih izvora zvuka te je jedini izvor zvuka upravo rad pojedinog igličastog ležaja. Osnovna namjera ovog ispitivanja bila je detekcija potencijalnih oštećenja na pojedinom elementu igličastog ležaja na način da se prvo izračunaju specifične frekvencije ispitivanih ležaja (BPFO, BPFI, FTF i BSF – vidi poglavlje 4.5.) te da se iste povežu s frekvencijama zvučnog zapisa analiziranog u računalnom programu Audacity.

Dakle, prvo smo izračunali specifične frekvencije za naš ležaj pri zadanim brzinama prema izrazima od (4) do (7):

$$BPFO = \frac{N_B \times RPM}{2} \times \left(1 - \frac{BD}{PD} \times \cos \beta\right), \quad (4)$$

$$BPFI = \frac{N_B \times RPM}{2} \times \left(1 + \frac{BD}{PD} \times \cos \beta\right), \quad (5)$$

$$FTF = \frac{RPM}{2} \times \left(1 - \frac{BD}{PD} \times \cos \beta\right), \quad (6)$$

$$BSF = \frac{PD \times RPM}{BD} \times \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \times \cos \beta\right)^2\right], \quad (7)$$

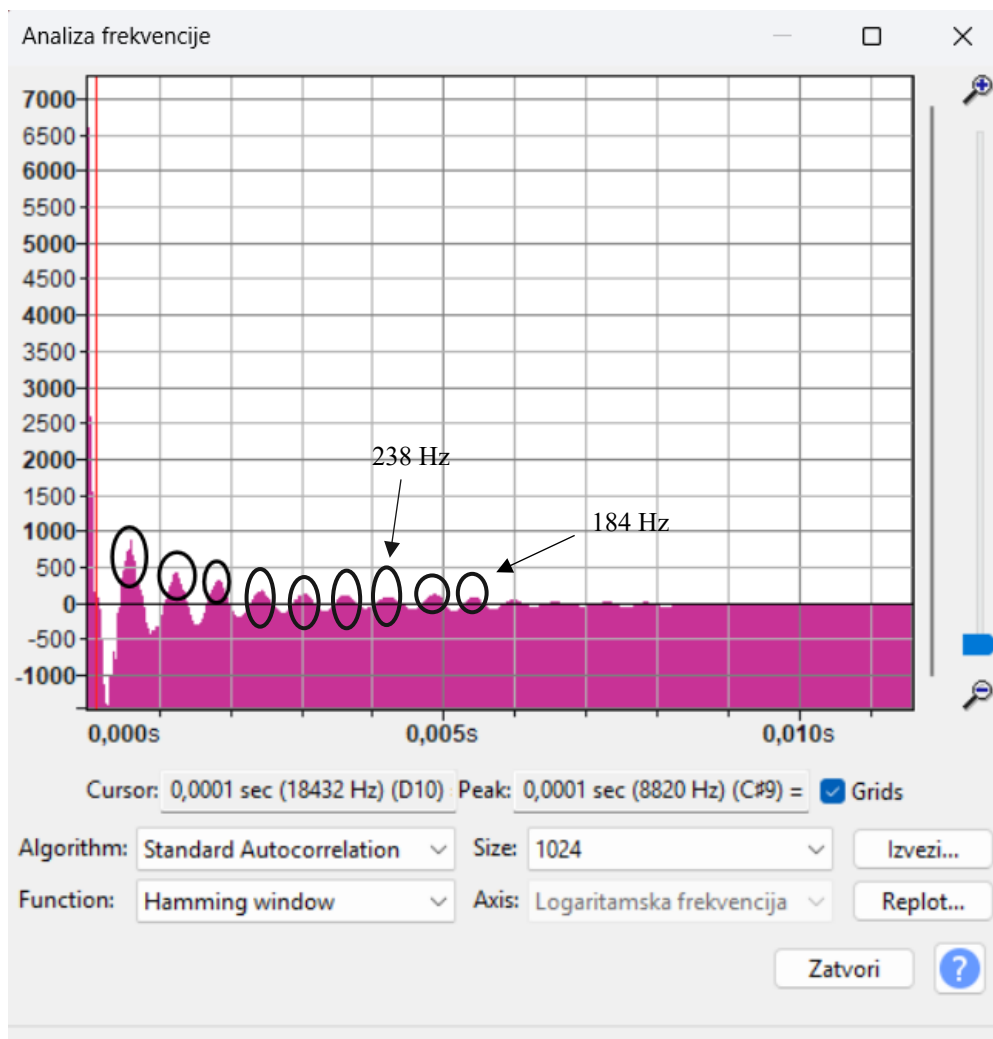
gdje N_B predstavlja broj kotrljajućih tijela (iglica) kojih za naš ležaj ima 24, RPM brzinu vrtnje ležaja, BD promjer kotrljajućih tijela (iglice su promjera 8 mm), a PD predstavlja udaljenost između centara rotacije dviju nasuprotnih kotrljajućih tijela (39 mm). Umjesto vrijednosti $\cos \beta$ za potrebe ovog rada uvrštavan je broj 1. Izračunate vrijednosti specifičnih frekvencija prema gornjim izrazima treba podijeliti sa 60 kako bi se izračunao iznos specifične frekvencije u Hz. Vrijednosti specifičnih frekvencija za ležaj NK 35/20 RCT u nepodmazanom stanju pri različitim brzinama vrtnje navedene su u tablici 4.

Tablica 4. Specifične frekvencije ležaja pri različitim brzinama

	945 min ⁻¹	1025 min ⁻¹	1215 min ⁻¹
BPFO [Hz]	150	163	193
BPFI [Hz]	228	247	293
FTF [Hz]	6	7	8
BSF [Hz]	74	80	95

Specifične frekvencije ukazuju da je na pojedinom elementu ležaja prisutno oštećenje. Pritom se oštećenje elementa ležaja može indicirati ako je odstupanje neke frekvencije, određene mjerenjem ili računski, manje ili jednako od ± 30 Hz. Frekvencije iz tablice 4. uspoređivane su s frekvencijama iz zvučnog zapisa. Drugim riječima, iz buke ležaja indiciraju se ponavljajuće frekvencije koje se podudaraju sa pojedinim specifičnim frekvencijama. Primjerice, na Slici 44. prikazan je zvučni zapis vrtnje ležaja L3 pri brzini od 1025 min⁻¹ u nepodmazanom stanju. Zvučni je zapis analiziran pomoću programa Audacity koji nam daje grafički prikaz na kojem se izdvajaju tzv. *peakovi* (zaokružena područja na slici) koji, zapravo, predstavljaju frekvencije koje se ponavljaju češće od ostalih. Ako se među tim frekvencijama nalaze frekvencije koje se, za zadanu brzinu vrtnje, u potpunosti ili u dopuštenim odstupanjima podudaraju s pojedinom specifičnom

frekvencijom ležaja, tada možemo govoriti kako postoji mogućnost oštećenja određenog elementa. Kod ležaja L3 u nepodmazanom stanju pri 1025 min^{-1} uočavaju se brojne ponavljajuće frekvencije: 1702 Hz, 808 Hz, 545 Hz, 410 Hz, 330 Hz, 279 Hz, 238 Hz, 206 Hz te 184 Hz (*peakovi*). Frekvencija od 239 Hz približna je vrijednost BPFI frekvencije za tu brzinu (247 Hz) što sugerira moguće oštećenje na valjnoj stazi unutrašnjeg prstena. Također, vrijednost 184 Hz nalazi se u granicama prihvatljivog odstupanja u odnosu na BPFO frekvenciju (163 Hz) što pak indicira mogućnost oštećenja valjne staze vanjskog prstena.



Slika 44. Analizirani zvučni zapis ležaja L3 pri 1025 min^{-1} s istaknutim frekvencijama

Ležaj L3 pokazao je približno podudaranje s BPFI i pri 945 min^{-1} (220 Hz), ali i pri 1215 min^{-1} (283 Hz) oba puta u nepodmazanom stanju. Pri 1215 min^{-1} (nepodmazano) pokazao je i podudaranje s BPFO (217 Hz). Do podudaranja s BPFI je došlo i u podmazanom stanju pri 1025 min^{-1} (233 Hz) te pri 1215 min^{-1} (284 Hz). Ta podudaranja nas upućuju na zaključak

kako je gotovo sigurno došlo do oštećenja unutrašnjeg prstena, a potencijalno i od pojave defekata na vanjskom prstenu. Kod ostalih ležaja nije došlo do podudaranja.

6.5. Ispitivanje zagrijavanja ležaja

Istovremeno s mjerenjem vibracija i buke mjerena je promjena temperatura uređajem UT-320D (Slika 45.). Jedan termoelement mjerila temperature bio je pričvršćen aluminijevom ljepljivom trakom na vanjski (nepomični) prsten igličastog ležaja, a drugi je mjerio temperaturu okoline. Prije svakog ispitivanja izmjerena je temperatura okoline (i samog ležaja), a nakon tri minute rada očitana je temperatura ležaja.



Slika 45. Uređaj UT-320D za mjerenje temperature ležaja

Rezultati mjerenja navedeni su u tablici 5. Usporedbom rezultata može se uvidjeti kako se ne može donijeti jednoznačan zaključak o prednosti jednog ležaja nad. To je posljedica u teorijskom dijelu spomenute činjenice kako ponašanje ležaja u radu ovisi o više faktora (stanje površine, režim i sredstvo podmazivanja, opterećenje itd.) koji se moraju detaljno istražiti kako bi bili kompatibilni, a samim time efikasni. Neprikladnom primjenom neke od mjera kojom bi se trošenje ili trenje prema pravilu trebalo smanjiti zapravo se postiže kontraefekt. To je vidljivo na primjeru ležaja L0 kod kojeg je podmazivanjem umjesto smanjenja temperature u odnosu na nepodmazano stanje došlo do njena višestrukog povećanja. Povećanje temperature u podmazanom stanju zabilježeno je i kod L1 ležaja, no ovdje ta razlika nije toliko drastična. Kod ležaja L2 i L3 podmazivanje je zaista smanjilo zagrijavanje u odnosu na nepodmazano stanje. Nadalje, prevlake koje su korištene za prevlačenje unutrašnjeg prstena (TiN, TiCN) niskog su faktora trenja te bi sukladno tome trebale uzrokovati manje zagrijavanje od netretirane površine (L0). No, usporedimo li zagrijavanje nepodmazanih ležaja L0, L2 i L3 vidimo kako je kod ležaja L2 i L3

zagrijavanje zapravo veće negoli kod L0. Ipak, analizom rezultata možemo zaključiti kako je kod ležaja L1 došlo do najmanjeg zagrijavanja. Veoma dobre rezultate dao je i ležaj L2 u danom režimu podmazivanja.

Tablica 5. Usporedba temperatura ležaja prije i nakon ispitivanja

Ležaj	Stanje	Temperatura ležaja, °C		Zagrijavanje ležaja, °C
		Početna	Nakon ispitivanja	
L0	Nepodmazano	13,3	15,6	2,3
	Podmazano	12,5	22,8	10,3
L1	Nepodmazano	13,2	14,0	0,8
	Podmazano	13,4	15,5	2,1
L2	Nepodmazano	13,4	16,8	3,4
	Podmazano	14,7	16,2	1,5
L3	Nepodmazano	13,7	18,0	4,3
	Podmazano	14,9	18,2	3,3

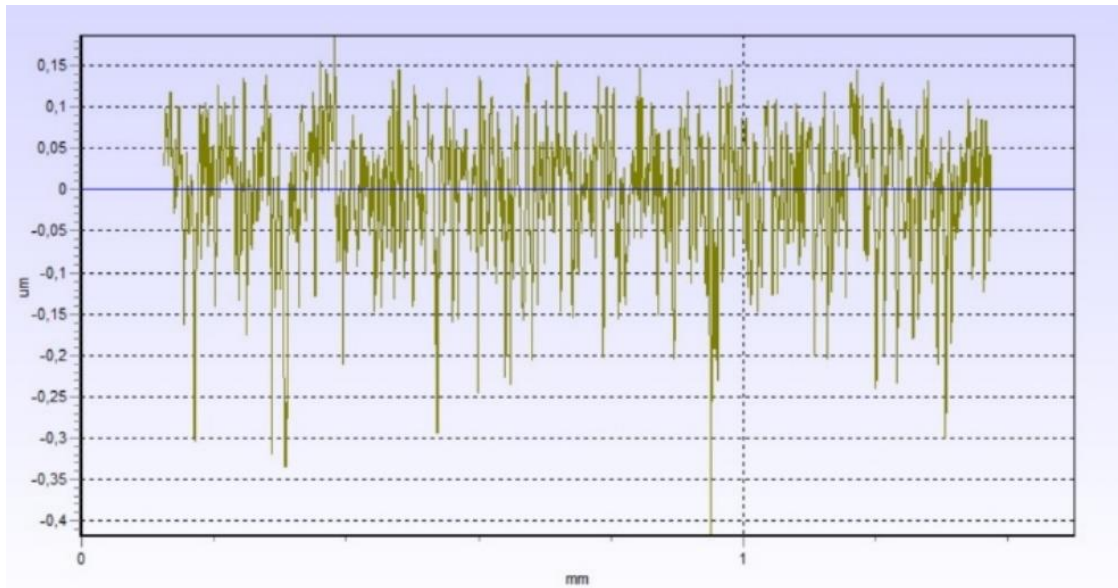
6.6. Ispitivanje hrapavosti površine unutrašnjih prstena ležaja

Mjerenja hrapavosti površine unutrašnjih prstena provedena su prije i nakon simulacije rada igličastih ležaja. Mjerni postav (vidi Sliku 46.) sastoji se od mjernog uređaja, škripca za pridržavanje unutrašnjeg prstena, koordinatnog stola, prijenosnog računala s kojim je mjerni uređaj spojen te samog ispitnog uzorka. Mjerenje je provedeno uređajem TIME 3202 Surface Roughness Tester. Taj uređaj bilježi vertikalni pomak igle koja se kreće duž referentne duljine na uzorku, a zatim rezultate šalje na prijenosno računalo koje ih obrađuje pomoću softvera te ih prikazuje u tabličnom i grafičkom obliku.

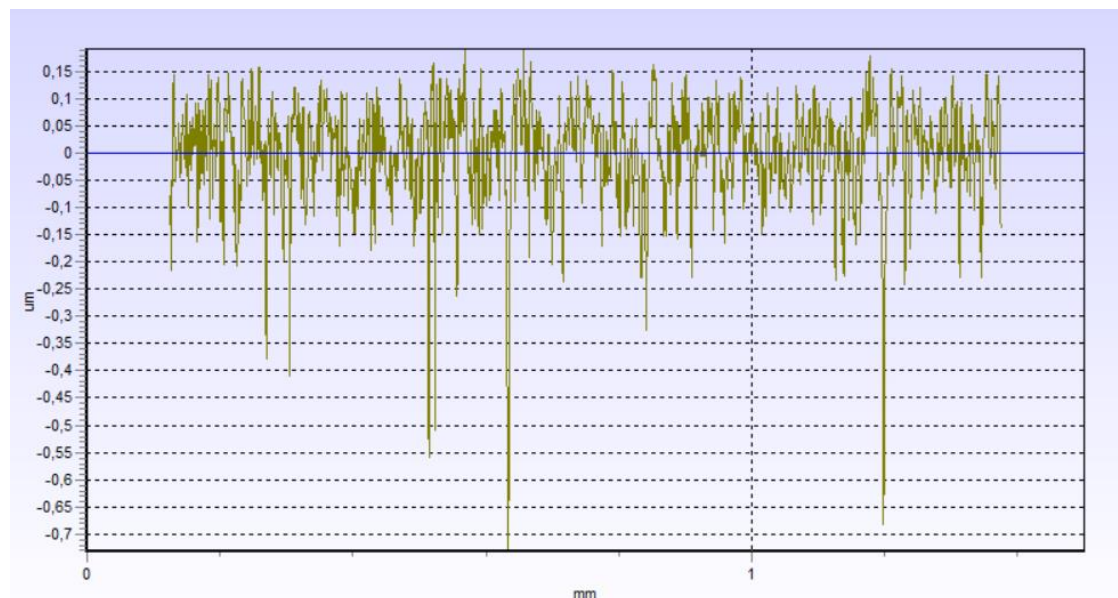


Slika 46. Mjerni postav za ispitivanje hrapavosti površine

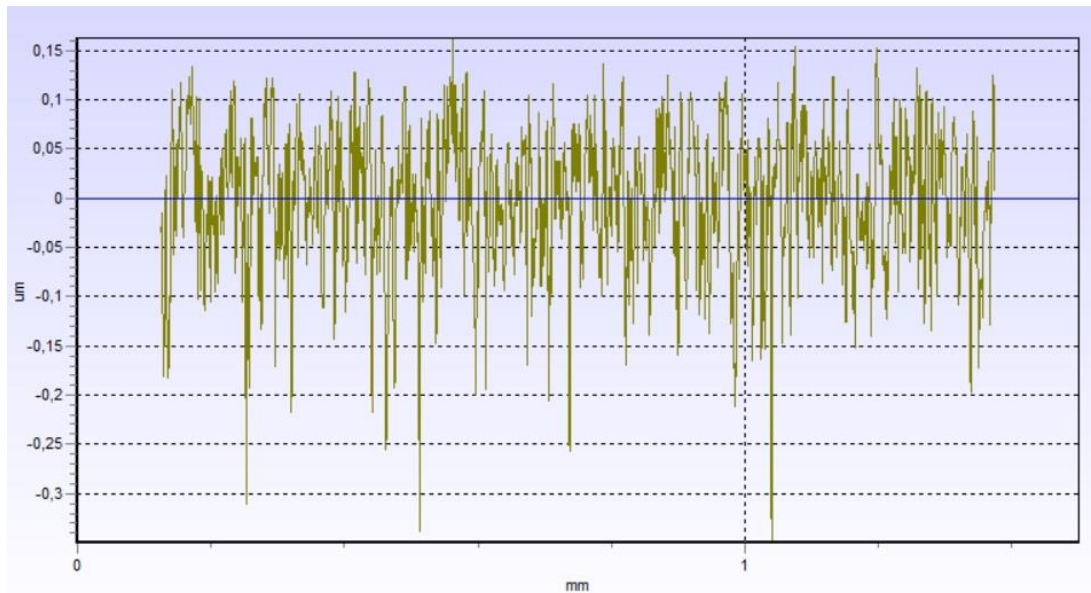
Na Slikama 47 – 54. može se vidjeti grafički prikaz hrapavosti površine unutrašnjih prstena L0, L1, L2 te L3 prije i nakon trošenja.



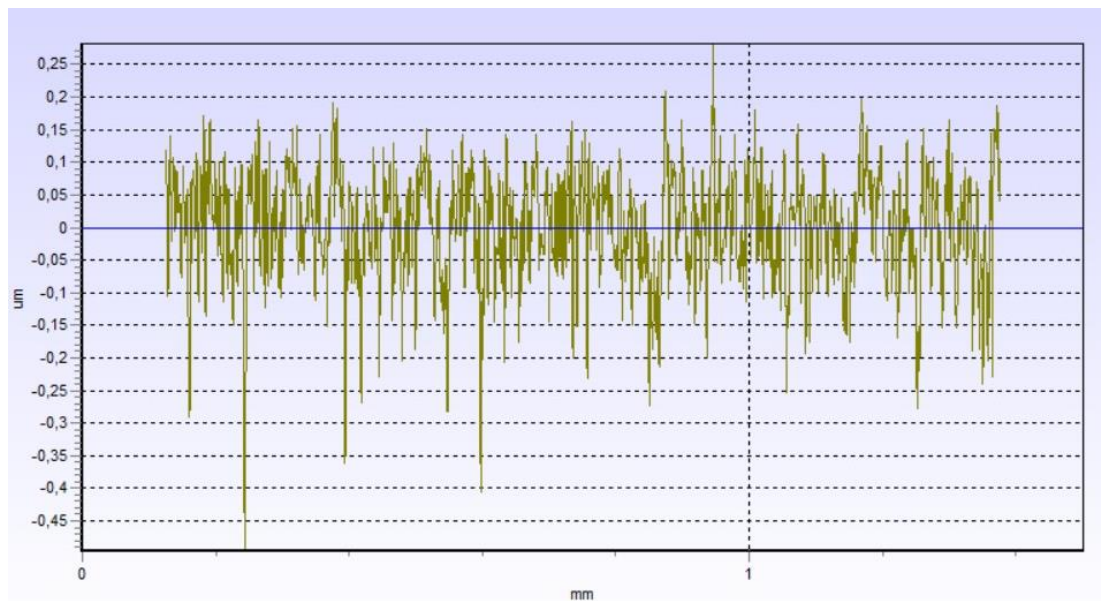
Slika 47. Hrapavost površine L0 uzorka prije trošenja



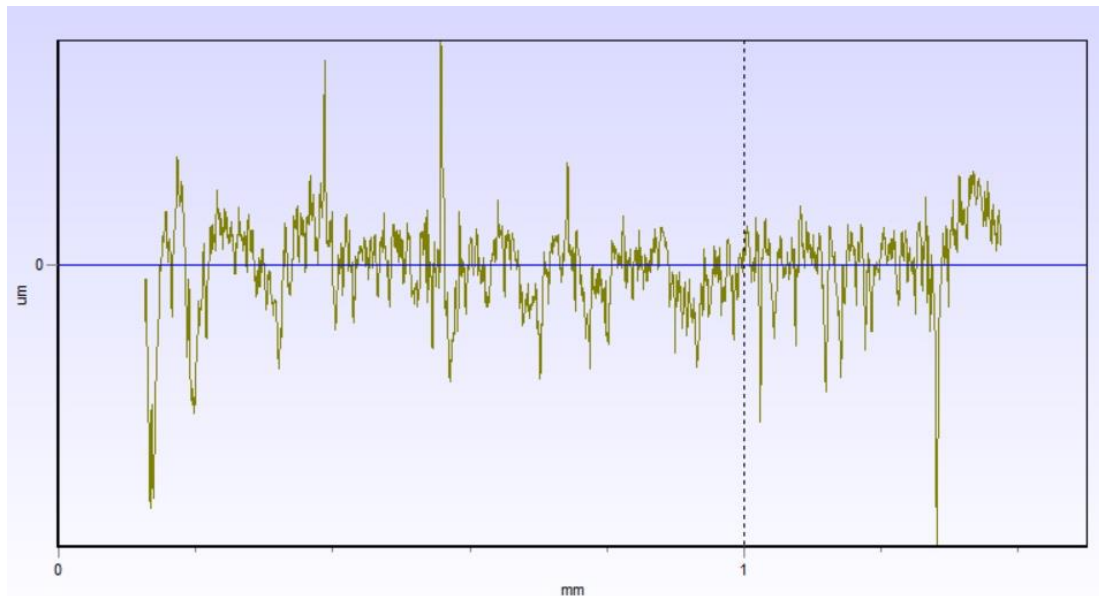
Slika 48. Hrapavost površine L0 uzorka nakon trošenja



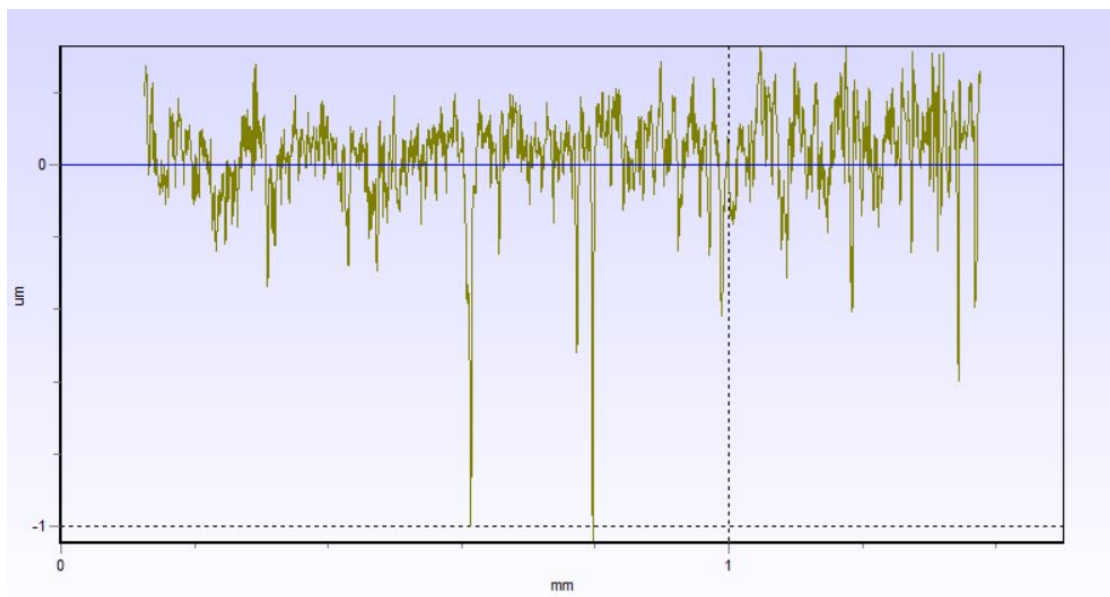
Slika 49. Hrapavost površine L1 uzorka prije trošenja



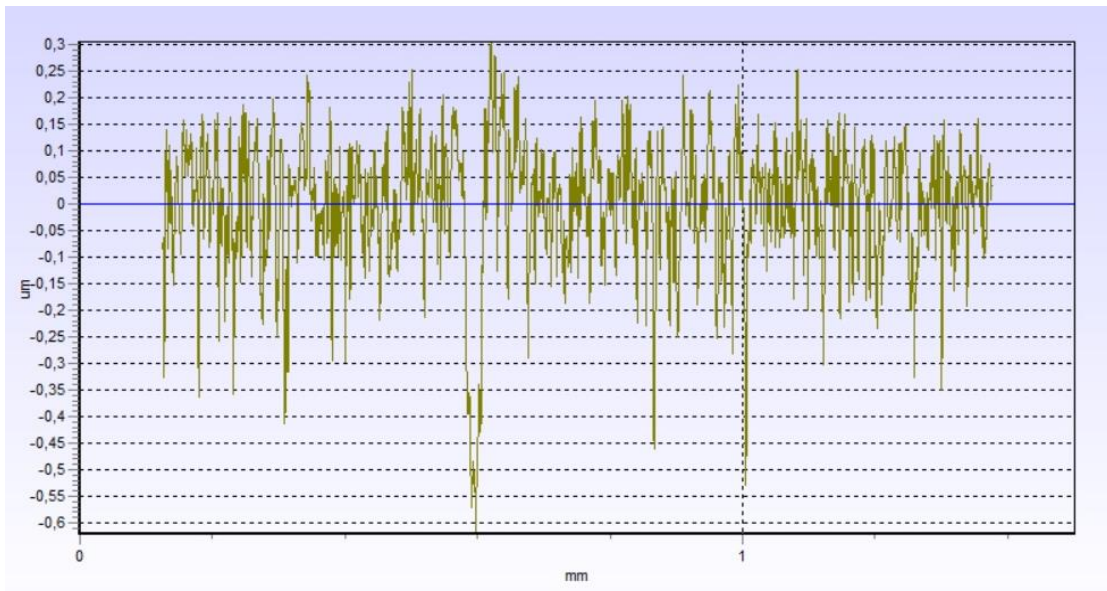
Slika 50. Hrapavost površine L1 uzorka nakon trošenja



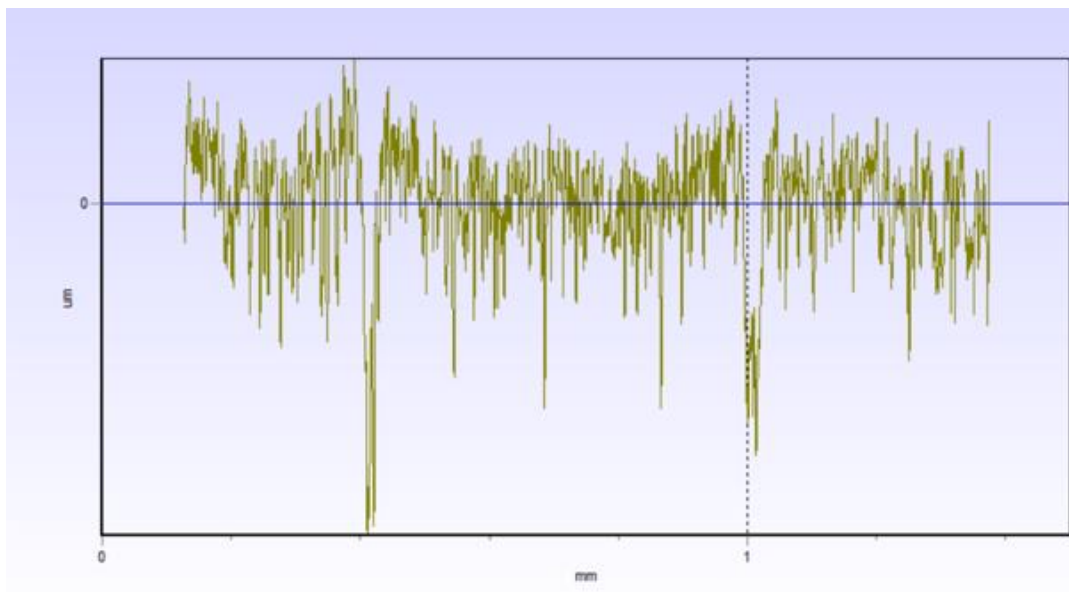
Slika 51. Hrapavost površine L2 uzorka prije trošenja



Slika 52. Hrapavost površine L2 uzorka nakon trošenja



Slika 53. Hrapavost površine L3 uzorka prije trošenja



Slika 54. Hrapavost površine L3 uzorka nakon trošenja

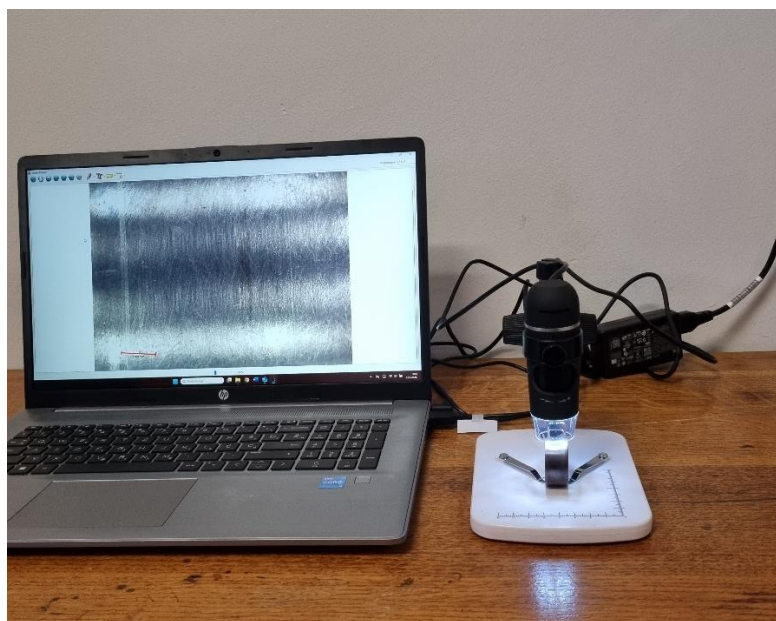
Tablica 6. Vrijednosti parametara hrapavosti ispitanih uzoraka

Stanje	L0		L1		L2		L3	
	Polazno	Trošeno	Polazno	Trošeno	Polazno	Trošeno	Polazno	Trošeno
R_a [μm]	0,056	0,065	0,053	0,065	0,090	0,096	0,085	0,095
R_z [μm]	0,460	0,693	0,435	0,531	0,777	0,947	0,707	0,712
R_{max} [μm]	0,605	0,917	0,507	0,771	1,425	1,367	0,927	1,044

Iz tablice 6. može se uočiti da prstenovi L2 i L3 imaju veću hrapavost u polaznom stanju negoli neprevučeni L0 prsten. S druge strane, površina L1 prstena u polaznom stanju nešto je glađa od površine prstena L0. Što se tiče hrapavosti površine nakon trošenja, možemo vidjeti kako su parametri hrapavosti doživjeli najveći porast kod L0 prstena, dok je u slučaju prevučenih prstena hrapavost također porasla, ali u nešto manjoj mjeri (doduše R_a je u slučaju ležaja L1 i L3 porastao čak i više negoli kod L0, no ostali parametri znatno manje). To nas upućuje na zaključak kako je kod L0 ležaja trošenje izraženije, a da su prevučeni ležaji ipak nešto otporniji na isto, usprkos tome što im je početna hrapavost možda nešto veća.

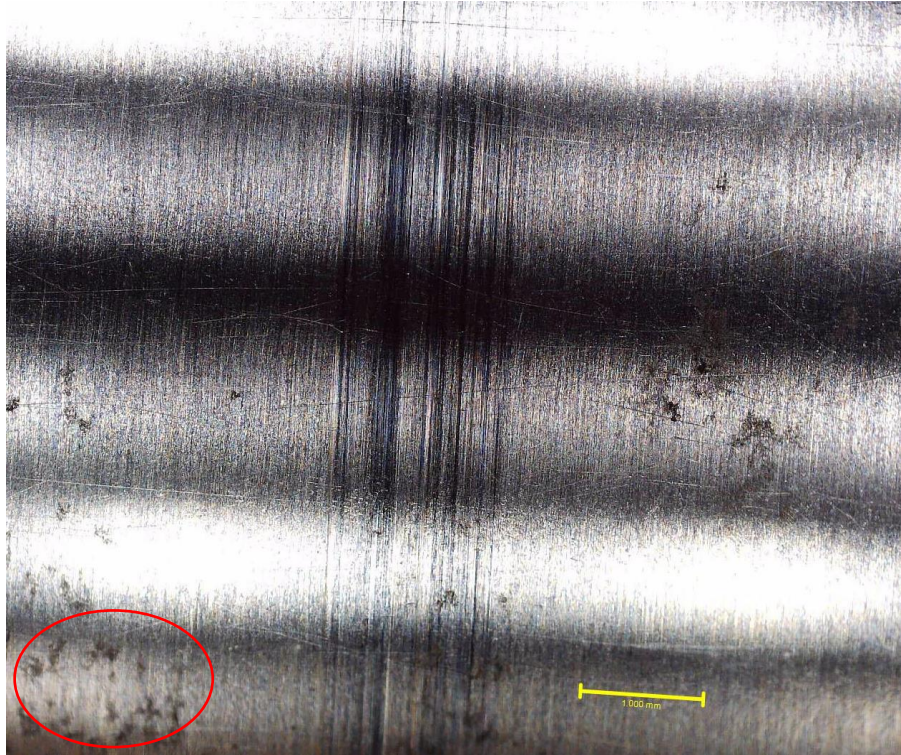
6.7. Analiza trošenja unutrašnjih prstena ležaja

Nakon analize vibracija, zvuka, temperature i hrapavosti pristupljeno je vizualnoj kontroli unutrašnjih prstena u svrhu analize njihova trošenja. Površina prstena analizirana je pomoću USB svjetlosnog mikroskopa s kamerom Toolcraft Digimicro Profi koji je bio spojen na prijenosno računalo. Na računalu je površina fotografirana pomoću računalnog programa Micro Capture Plus.



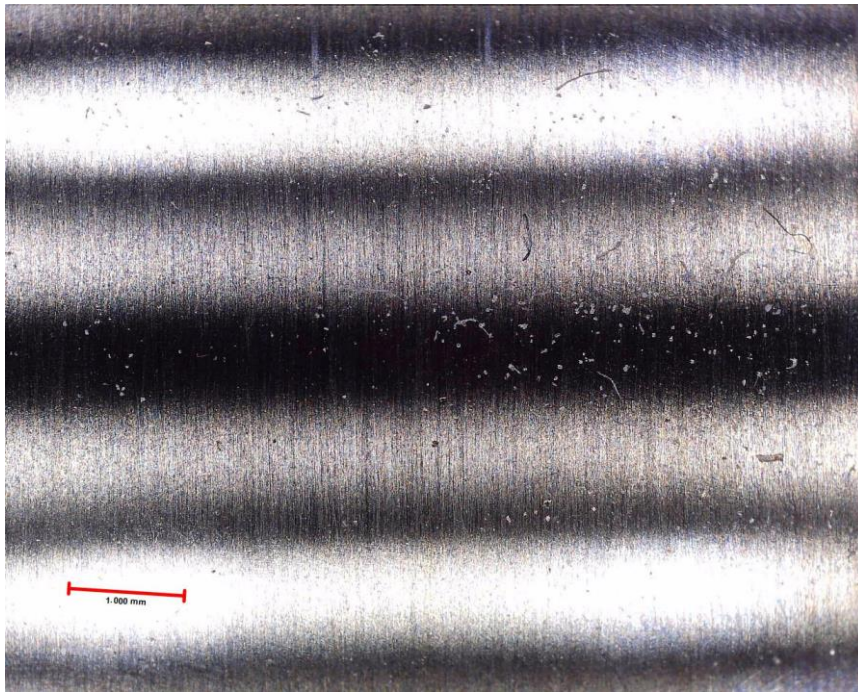
Slika 55. Mjerni postav za analizu površine unutrašnjih prstenova

Prvo je analizirano trošenje neprevučenog (L0) ležaja. Na Slici 56. jasno su vidljivi tragovi uznapredovale adhezije kao posljedice klizanja iglica po prstenu u režimu bez podmazivanja. Također, vidljiva je i pojava jamica, tj. *pittinga* po čitavoj površini prstena (označeno elipsom na slici) što nas upućuje na zaključak kako je ovaj prsten zahvaćen i umorom površine.



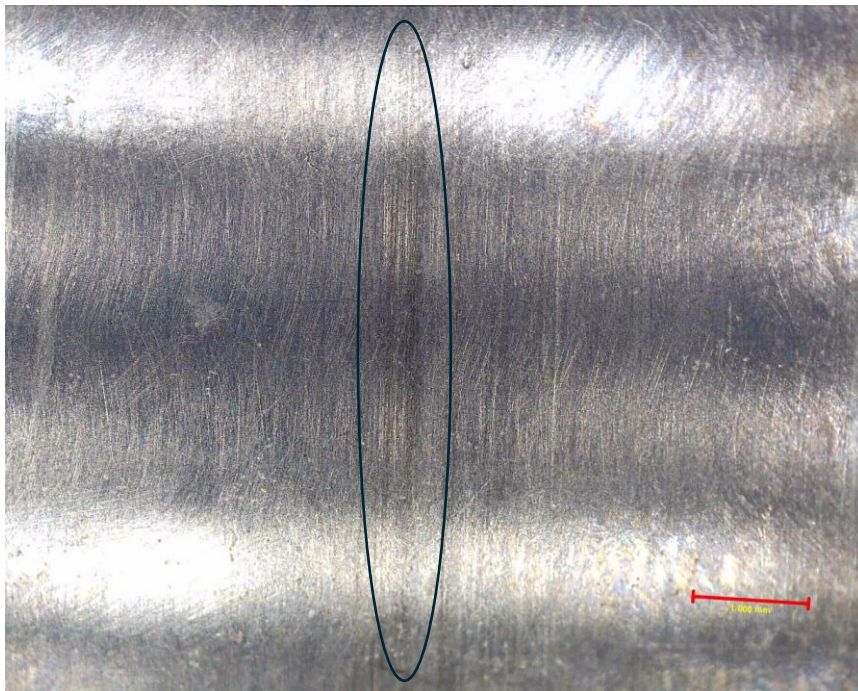
Slika 56. Površina prstena L0 nakon ispitivanja

Na Slici 57. prikazana je površina prstena L1 (TiCN/TiN). Kod njega su također vidljivi tragovi umora površine, no jamice, iako prisutne po cijeloj površini, ovdje su manje negoli kod prstena L0. Tragovi drugih mehanizama trošenja poput adhezije ili abrazije nisu uočeni. Ulogu u tome definitivno ima i prevlaka niskog faktora trenja i visoke tvrdoće.



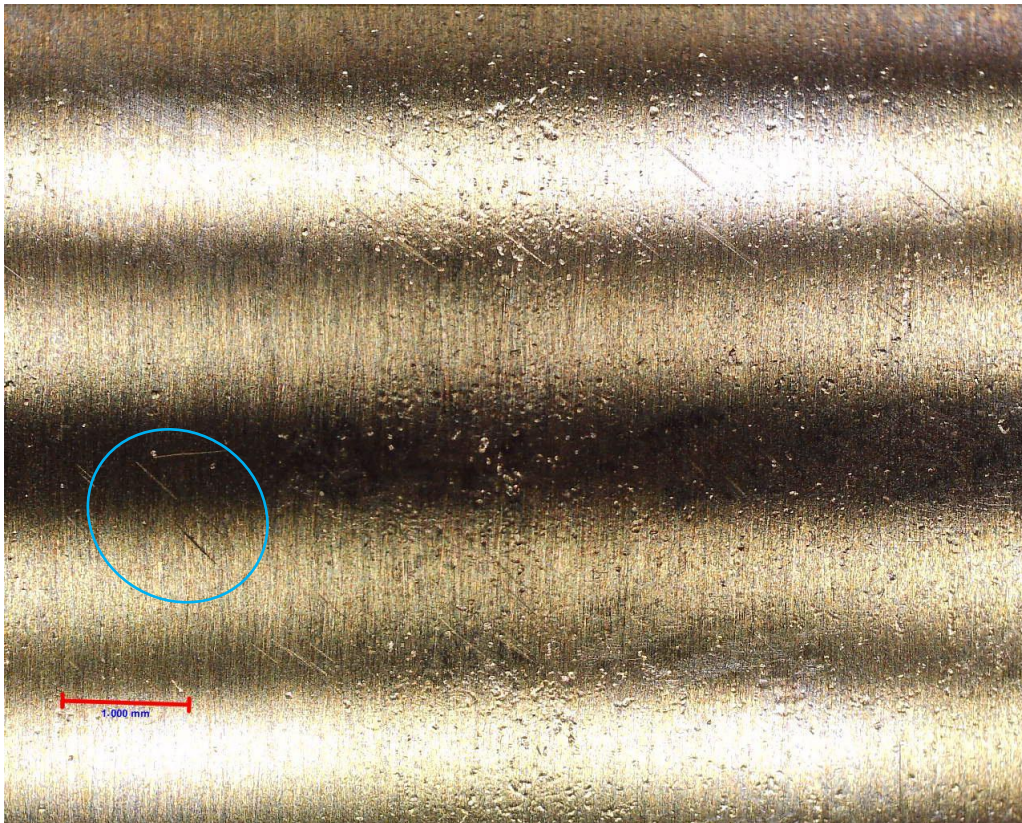
Slika 57. Površina prstena L1 nakon ispitivanja

Nakon toga je analizirana površina prstena L2 (s prevlakom TiN/TiCN). Ovdje je kao i kod L0 prisutan trag adhezije (označen elipsom), koji je prouzročen klizanjem između iglica i prstena, no u ovom slučaju adhezija nije toliko izražena kao kod L0. Umor površine je zahvatio i ovaj prsten, no ponovno znatno manje negoli prsten L1, a pogotovo manje od prstena L0.



Slika 58. Površina prstena L2 nakon ispitivanja

Posljednji u nizu analiziran je prsten L3 (sloj TiN nanešen PVD postupkom). Iako prevučen tvrdom tribološkom prevlakom, analiza površine ovog prstena ukazuje na njegovo intenzivno trošenje. Na snimkama je vidljiva gusta mreža jamica diljem površine što nam ukazuje na umor površine većeg razmjera negoli kod drugih prevučenih prstena, u rangu prstena L0. Osim toga vidljivi su i tragovi abrazije (označeno elipsom na Slici 59.) koja je također poprimila široke razmjere. Na ovu svojevrsnu anomaliju u vidu većeg trošenja prevučenog prstena još ću se osvrnuti u nastavku.



Slika 59. Površina prstena L3 nakon ispitivanja

6.8. Diskusija rezultata

Provedena ispitivanja dala su mnoštvo podataka o ponašanju igličastih ležaja tijekom rada. No, ti podaci nikako nisu jednoznačni, ne definiraju uvijek precizno pojedine ispitne uzorke kao nužno bolje ni nužno lošije u uvjetima trošenja, a neki od njih su čak i pomalo kontradiktorni u odnosu na ono rečeno u teoriji.

Tako nas rezultati vibracijske analize navode na sljedeće: najmanji vibracijski pomak pri svim brzinama i za oba stanja (podmazano/nepodmazano) pokazao je ležaj L2 (unutrašnji

prsten prevučen TiN/TiCN prevlakom), dok je uvjerljivo najveći pomak, zanimljivo, zabilježio ležaj L3 (unutrašnji prsten prevučen TiN prevlakom postupkom PVD). Zanimljivo je i da je u nepodmazanom stanju ležaj L0 (neprevučeni unutrašnji prsten) uvijek imao manji pomak od ležaja L1 (unutrašnji prsten prevučen TiCN/TiN prevlakom). U podmazanom stanju bilo je obrnuto: L0 je redovito imao veći pomak od L1. Ipak, valja napomenuti kako se pomak podmazivanjem nije nužno smanjio. Tako je, primjerice, kod ležaja L0 u svakom podmazanom slučaju došlo do njegova povećanja u odnosu na nepodmazano stanje. S druge strane, mogli bismo zaključiti kako ležaji L2 i L3 s aspekta smanjenja vibracijskog pomaka dobro reagiraju na podmazivanje. U sklopu vibracijske analize ležaje smo također karakterizirali prema vrijednostima srednje akceleracije njihovih vibracija. Ovdje su se rezultati dosta razlikovali u ovisnosti o tome jesu li podmazani ili ne. Tako je u nepodmazanom stanju najmanju vrijednost akceleracije imao ležaj L2, dok je L3 ponovno imao najveću vrijednost, a L1 ležaj je pak imao veću akceleraciju spram ležaja L0. Dodatak maziva to je stanje malo promijenio te je u podmazanom stanju, najbolje rezultate, odnosno najmanju akceleraciju imao ležaj L0, dok je akceleracija ležaja L2 znatno narasla. Ono što je ostalo isto je da je L3 i dalje svojim vrijednostima podosta odskakao od ostalih ležaja. Posljednje što smo proučavali kod vibracijske analize bila je raspodjela frekvencija vibracija. U nepodmazanom stanju, pri brzinama 915 min^{-1} i 1025 min^{-1} ležaji L0 i L2 bilježili su nešto niže frekvencije od ležaja L1, a pogotovo od ležaja L3 kod kojeg pri 1025 min^{-1} bilježimo i frekvenciju iz raspona 6000-6500 Hz (6405 Hz). Pri 1215 min^{-1} i L0 i L2 češće vibriraju nešto višim frekvencijama u usporedbi s prethodnim brzinama (raspon od 2500 do 4000 Hz), L1 i dalje ima nešto više frekvencije od spomenutih dok za L3 vidimo koncentraciju frekvencija u nešto nižem rasponu nego za prethodne brzine. U podmazanom stanju kod L0 pri svim brzinama dominiraju frekvencije iz raspona 2500-3500 Hz, a isto vrijedi i za L1. Frekvencija za L2 su nešto raspršenije i razlikuju se u ovisnosti o brzini, a zanimljivo je da se pri 945 min^{-1} i 1215 min^{-1} pojavljuju i visoke frekvencije iz od 4500 Hz do 5500 Hz, dok pri 1025 min^{-1} prevladavaju frekvencije u rasponu od 2500 do 3500 Hz. Frekvencije ležaja L3 u podmazanom stanju slične su onima u nepodmazanom stanju. Pritom se pri 1215 min^{-1} i ovdje pojavljuje jedna frekvencija iznad 6000 Hz (6235 Hz). U principu, pojavljivanje viših frekvencija trebalo bi ukazivati na pojavu adhezijskog ili abrazijskog mehanizma trošenja, dok niže frekvencije upućuju na udarce i buku kao produkte kotrljanja valjnih tijela po valjnim stazama.

Kod analize zvuka uspoređene su izračunate specifične frekvencije ležaja (BPFO, BPFI, FTF, BSF) s frekvencijama iz snimljene buke rada ležaja s namjerom otkrivanja

potencijalnih oštećenja na pojedinom ležajnom elementu. Uz prihvatljivo odstupanje od ± 30 Hz, rezultati su nas uputili na zaključak kako su vanjski i unutarnji prsten ležaja L3 potencijalna mjesta oštećenja, dok za ostale ležaje nije uočeno podudaranje specifičnih i analiziranih frekvencija.

Na isto mjernom postavu ispitano je i zagrijavanje nepodmazanih i podmazanih ležaja. Rezultati tog ispitivanja su sljedeći: najmanje zagrijavanje ($\Delta T = 0,8$ °C) zabilježeno je kod ležaja L1 u nepodmazanom stanju, dok je daleko najveće zagrijavanje ($\Delta T = 10,3$ °C) zabilježeno kod ležaja L0 uz podmazivanje. Zanimljivo je da je u nekim slučajevima (L0 i L1) kod podmazivanja došlo do većeg zagrijavanja negoli kod nepodmazanog stanja. Razlog tomu vjerojatno leži u nekompatibilnosti ležaja s danim mazivom (SAE 5W-30) koje ometa odvođenje topline. S druge strane, ležaji L2 i L3 dobro su reagirali na podmazivanje. Uzimajući sve u obzir, najbolje rezultate zagrijavanja dali su ležaji L1 i L2.

Prije i nakon ispitivanja vibracija, buke i temperature provedeno je ispitivanje hrapavosti površine. Ispitivanje unutrašnjih prstena prije trošenja ukazalo je na to kako se prevlačenjem površine može povećati hrapavost koju uzorak ima prije prevlačenja (uslijed taloženja prevlake). S druge strane, ovim se ispitivanjem dokazalo da je nakon trošenja došlo do većeg povećanja hrapavosti kod neprevučenog, L0 ležaja, dok su prevučeni prstenovi također većinom zabilježili porast hrapavosti, no on je manje izražen u odnosu na L0 prsten (izuzev R_a koji se kod L1 i L3 čak povećao i više negoli kod L0).

Naposljetku je provedena vizualna analiza stanja površine prstenova primjenom svjetlosne mikroskopije. Najviše oštećenja prisutno je na ležajima L0 i L3, gdje je došlo intenzivnog umora površine. Nadalje, kod L0 jasno je uočljiv i trag adhezijskog trošenja, dok se kod L3 jasno mogu vidjeti tragovi abrazije. Analizirajući površinu, možemo vidjeti kako je umor površine prisutan kod svih uzoraka, no kod L0 i L3 on je značajno izraženiji negoli kod L1 i L2 prstena. Kod L2 vidljiv je trag adhezije, no u blažem obliku negoli je to slučaj kod prstena L0.

Iz rezultata provedenih ispitivanja treba posebno izdvojiti ponašanje ležaja L3, odnosno ležaja čiji je unutrašnji prsten prevučen PVD TiN prevlakom. Naime, tijekom cijelog ispitivanja ovaj je ležaj pokazivao određeni stupanj odudaranja od svega rečenog o prednostima prevlačenja u teorijskom dijelu. Iako prevučen, on je u tijekom rada pokazivao daleko najveći vibracijski pomak i akceleraciju, frekvencija vibracija mu je bila nešto viša od ostalih, a analiza buke ustvrdila je kako kod tog ležaja postoje indikacije o oštećenju unutrašnjeg i vanjskog prstena. Pritom se i bez opreme uvidjelo da je ovaj ležaj u radu bio

dosta bučniji od ostalih ispitnih uzoraka. U nepodmazanom stanju njegovo je zagrijavanje bilo najveće, dok se podmazivanjem ono nešto smanjilo i u tom ga je pogledu nadmašio jedino neprevučeni L0 ležaj. U pogledu hrapavosti njegovi se rezultati nisu razlikovali previše od ostalih prevučenih ležaja. Sve indikacije o većem trošenju ovog ležaja od ostalih u konačnici su potvrđene vizualnom kontrolom gdje se jasno mogu vidjeti tragovi trošenja u obliku jamica i brazdi prisutnih diljem površine prstena. Dakle, iako prevučen, ovaj je unutrašnji prsten, suprotno očekivanjima, nakon trošenja dao rezultate u rangu neprevučenog L0 prstena (ako ne i lošije). Razlog tomu vjerojatno treba tražiti u dotrajalosti ostalih elemenata ležaja. Naime, budući da je ostatak konstrukcije ležaja (u koji se naizmjenice montiralo četiri različita unutrašnja prstena) prethodno bio korišten velik broj ciklusa, došlo je do oštećenja njegovih dijelova, prvenstveno valjne staze vanjskog prstena. Da je do oštećenja iste došlo, upućuje i rezultat analize buke za uzorak L3 gdje je došlo do djelomičnog podudaranja specifične frekvencije za oštećenje vanjskog prstena (BPFO) s frekvencijama iz zvučnog zapisa. Osim toga, nakon provedenog ispitivanja rada ležaja L3 sonda vibrometra bila je puna odvojenih čestica trošenja koje je „uhvatila“ svojim magnetom (Slika 60.) što nam ju konačnici dalo i konačnu potvrdu kako je ostatak ležaja neadekvatan za daljnju uporabu. Osim toga, uznapredovalo je i trošenje iglica ležaja što je također neupitno pridonijelo lošijim rezultatima prsten L3.



Slika 60. Čestice trošenja na sondi vibrometra nakon ispitivanja uzorka L3

7. Zaključak

Provedena ispitivanja djelomično su nam potvrdila ulogu koju tribološke prevlake imaju u povećanju otpornosti na trošenje kotrljajućih ležaja. Generalno govoreći, mogli bismo reći kako su prevučeni ležaji L1, a pogotovo L2 pokazali najbolje rezultate u ispitivanjima, iako ne u svim segmentima, no gledajući širu sliku, ležaji s tim unutrašnjim prstenovima pokazali su se boljima od ležaja s prstenom bez prevlake (L0). S druge strane, ispitivanje nam je dalo i kuriozitet u obliku ležaja L3 s unutrašnjim prstenom prevučenim TiN prevlakom postupkom PVD čiji su rezultati bili nerijetko i mnogo gori od L0.

U konačnici, iako prevlačenje neupitno ima svoju funkcionalnu primjenu u smanjenju trošenja i poboljšanja performansi ležaja, na temelju eksperimentalnog dijela ovog rada možemo zaključiti kako je ponašanje ležaja zapravo produkt sinergije mnogobrojnih faktora koji se međusobno nadopunjuju i isključuju. Tako različito tretirane površine različito reagiraju na brzinu vrtnje i režim podmazivanja, ali i na opterećenje koje u ovom radu nije uzimano u obzir. Ako neka prevlaka nije kompatibilna s odabranim sredstvom ili režimom podmazivanja ona ne samo da neće smanjiti trošenje, već ga može i povećati. S druge strane, neke prevlake će bolje rezultate dati pri većim brzinama vrtnje, dok će druge biti funkcionalnije pri nižim. O tome kolika je uloga tribosustava u utjecaju na trošenje najbolje se može vidjeti na primjeru ležaja s prstenom L3, koji iako prevučen tvrdom prevlakom niskog faktora trenja (L3) nije polučio očekivane rezultate. Razloge tomu vjerojatno treba tražiti u dotrajalosti ostalih elemenata ležaja.

Kako god, primjena triboloških prevlaka u kotrljajućim ležajima definitivno je zanimljiva i praktična ideja koja je sve češće podvrgnuta brojnim sveobuhvatnim istraživanjima. To je ujedno i poprilično novo područje koje još nije ušlo u širu primjenu, što zbog svoje nedovoljne istraženosti, što zbog cijene proizvodnje. No, u svijetu u kojem se sve više teži prema što efikasnijim proizvodima sa što je manje moguće gubitaka, primjena triboloških prevlaka u kotrljajućim ležajima zasigurno će u jednom trenutku postati predmetom razmatranja kao jedno od potencijalnih rješenja koje tom cilju može pridonijeti.

8. Literatura

- [1] <http://struna.ihjj.hr/naziv/trosenje/4424/> (pristup 13.1.2025.)
- [2] Lukšić, H.: Konstrukcijski čelici poboljšane otpornosti na abrazijsko trošenje, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020.
- [3] Jakovljević, S.: Tribologija, Podloge za predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2024.
- [4] Landek, D.: Inženjerstvo površina, Podloge za predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2024.
- [5] Grilec, K., Ivušić, V.: Tribologija, Autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [6] Dadić, Z.: Tribološki principi i mjere za smanjenje trošenja alata kod obrade odvajanjem čestica, International conference “Mechanical Technologies and Structural Materials”, Split, 2013.
(http://bib.irb.hr/datoteka/651766.Zvonimir_Dadic_Triboloski_principi.pdf, pristup 13.1.2025.)
- [7] Paskvale, S.: Properties of PVD hard coatings, Faculty of Mathematics and Physics, University of Ljubljana, 2007.
- [8] Jehn, H.A.: Multicomponent and multiphase hard coatings for tribological applications, Surface and Coatings Technology 131 (2000), Elsevier, 433-440.
- [9] Bell, T., Mao, K., Sun, Y.: Surface engineering design: modelling surface engineering systems for improved tribological performance, Surface and Coatings Technology 108–109 (1998), Elsevier, 360-368.
- [10] Landek, D, Matijević, B.: Podloge za predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2023.
- [11] Hogmark, S., Jacobson, S., Larsson, Mats.: Design and evaluation of tribological coatings, Wear 246 (2000), Elsevier, 20-33.
- [12] Bull, S.J., Bhat, D.G., Staia, M.H.: Properties and performance of commercial TiCN coatings. Part 2: tribological performance, Surface and Coatings Technology 163–164 (2003), Elsevier, 507-514.
- [13] Mogensen, K.S., Thomsen, N.B., Eskildsen, S.S., Mathiasen, C., Böttiger, J.: A parametric study of the microstructural, mechanical and tribological properties of PACVD TN coatings, Surface and Coatings Technology 99 (1998), Elsevier, 140-146.
- [14] Stupnišek, M., Matijević, B.: Pregled postupaka modificiranja i prevlačenja metala (<https://www.feliksmetal.hr/download/literature1.pdf>, pristup 14.1.2025.)
- [15] Decker, K.-H.: Elementi strojeva, Golden marketing – Tehnička knjiga, Zagreb, 2006.

- [16] <https://strojopromet-webshop.com/proizvod/iglicasti-lezaj-nk-20-20> (pristup 13.1.2025.)
- [17] <https://strojopromet-webshop.com/proizvod/iglicasti-lezaj-nao-20x35x17> (pristup 13.1.2025.)
- [18] Qiu, M., Chen, L., Li, Y., Yan, J.: Bearing Tribology: Principles and Applications, National Defense Industry Press, Beijing, China and Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2017.
- [19] Yonekura, D., Chittenden, R.J., Dearnley, P.A.: Wear mechanisms of steel roller bearings protected by thin, hard and low friction coatings, *Wear* 259 (1998), Elsevier, 779-788.
- [20] Bearing failure prevention guide, Ingersoll Rand, Torrington.
- [21] <https://ludeca.com/blog/vibration-analysis/11210/what-is-the-difference-between-brinelling-and-false-brinelling/> (pristup 14.1.2025.)
- [22] Vencel, A., Gašić, V., Stojanović, B.: Fault tree analysis of most common rolling bearing tribological failures, *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 174, 2017 (<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/174/1/012048/pdf>, pristup 14.1.2025.)
- [23] Dwyer-Joyce, R.S.: Predicting the abrasive wear of ball bearings by lubricant debris, *Wear* 233-235 (1999), Elsevier, 692-701.
- [24] Borgaonkar, A.V., Syed, I.: Effect of coatings on rolling contact fatigue and tribological parameters of rolling/sliding contacts under dry/lubricated conditions: a review, *Sadhana* 45 (2020), 1-16. (<https://doi.org/10.1007/s12046-020-1266-y>, pristup 14.1.2025.)
- [25] <https://www.enciklopedija.hr/clanak/vibracije> (pristup 14.1.2025.)
- [26] Vibration Diagnostic Guide, SKF Reliability Systems.
- [27] Tandon, N., Choudhury, A.: A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings, *Tribology International* 32 (1999), 469-480.
- [28] Rukavina, L.: Primjena funkcionalnih prevlaka na valjnim ležajima, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2024.
- [29] Landek, D., Cerovečki, J., Čorić, Z.: The influence of nitriding of inner ring on the acoustic and vibration characteristics of a needle roller bearing. 13th International Conference „Mechanical Technologies and Structural Materials 2024“, Split 2024.
- [30] Brkić, I.: Određivanje vibracija i zagrijavanja nitriranog igličastog ležaja, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2024.