

Sinergijski utjecaj nitriranja površine i podmazivanja na smanjenje kinetičkog trenja igličastog ležaja

Cerovečki, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:235:019093>

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

DIPLOMSKI RAD

Josip Cerovečki

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Darko Landek dipl. ing.

Student:

Josip Cerovečki

Zagreb, 2022.

Izjavljujem da sam ovaj diplomski rad izradio samostalno uz stručnu pomoć dr. sc. Darka Landeka, dipl. ing., koristeći znanja stečena tijekom preddiplomskog i diplomskog studija te navedenu literaturu i rezultate dobivene ispitivanjima u eksperimentalnom dijelu.

Zahvaljujem se svima koji su mi pomagali prilikom izrade ovog rada, a posebno se zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Darku Landeku, dipl. ing., na savjetima, strpljenju i pruženoj stručnoj pomoći tijekom pisanja teorijskog dijela rada, te prilikom provedbe eksperimentalnog dijela.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, a pogotovo roditeljima Snježani i Srećku, bratu Filipu, te baki Milki koji su mi ljubavju i podrškom tijekom trajanja studija omogućili da dođem do ovog uspjeha u svojem životu. Zahvaljujem se prijateljima i kolegama, te djevojci Sofiji koji su mi pružali podršku i pomoć tijekom studija.

Josip Cerovečki



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa: 602-14/22-6/1	
Ur. broj: 15-1703-22-	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **JOSIP CEROVEČKI** Mat. br.: 0035212536

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Sinergijski utjecaj nitriranja površine i podmazivanja na smanjenje kinetičkog trenja igličastog ležaja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Synergistic effect of surface nitriding and lubrication on reducing kinetic friction of the needle bearing**

Opis zadatka:

Prstenovi i valjna tijela igličastih ležajeva izloženi su u radu dinamičkim naprezanjima, kontaktnim pritiscima, trošenju i koroziji. Njihova trajnost u određenim uvjetima uporabe može se dodatno povećati prethodnim modificiranjem ili prevlačenjem površine i primjenom odgovarajućeg maziva.

U radu treba opisati konstrukcijske karakteristike igličastih ležaja, hidrodinamičke pojave u njihovom podmazivanju te metode ispitivanja maziva, vibracija, buke i zagrijavanja ležaja.

U eksperimentalnom dijelu rada provesti nitriranje unutrašnjeg prstena igličastog ležaja izrađenog od čelika 100Cr6 sa stvaranjem i bez stvaranja sloja željeznih nitrida na površini. Primjenom metode klizanja prizme po prstenu ispitati utjecaj nitriranja površine, brzine vrtnje prstena te vrste i količine maziva na kinetičko trenje, trošenje i zagrijavanje prstena. U izboru maziva obuhvatiti mineralna i biljna ulja. Na temelju rezultata ispitivanja predložiti optimalno podmazivanje igličastih ležaja s nitriranim unutrašnjim prstenom.

Navesti u radu korištenu literaturu i stručnu pomoć.

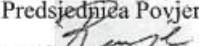
Zadatak zadan:
5. svibnja 2022.

Rok predaje rada:
7. srpnja 2022.

Predviđeni datum obrane:
18. srpnja do 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao:

 prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:

 prof. dr. sc. Biserka Runje

Sadržaj

Sadržaj	I
Popis slika	III
Popis tablica	VI
Popis oznaka.....	VII
Sažetak	VIII
Summary	IX
1. Uvod	1
TEORIJSKI DIO	2
2. Materijali za valjne ležaje.....	3
2.1. Kotrljajući (valjni) ležajevi.....	3
2.2. Igličasti ležajevi.....	5
2.3. Komponentne igličastog ležaja.....	6
2.4. Proračun radnog vijeka ležaja	9
2.5. Materijali kotrljajuće ležaje.....	11
2.5.1. Visokouglični čelici legirani kromom.....	12
2.5.2. Srednjeuglični čelici	13
2.5.3. Čelici za cementiranje	14
2.5.4. Čelici za rad pri povišenim temperaturama.....	15
2.5.5. Nehrđajući čelici za ležajeve	15
2.5.5.1. Austenitni nehrđajući čelik.....	16
2.5.5.2. Martenzitni nehrđajući čelici.....	16
2.5.5.3. Precipitacijski očvrnuti nehrđajući čelici.....	17
2.5.6. Ostali materijali za izradu kotrljajućih ležajeva	18
2.5.6.1. Metalne legure i keramički materijali dobiveni metalurgijom praha	18
2.5.6.2. Polimerni materijali.....	18
2.6. Postupci nitriranja materijala za ležaje	19
2.6.1. Usporedba postupaka nitriranja.....	19
2.6.2. Postupak nitriranja u plazmi.....	22
2.6.3. Ispitivanja nitriranog sloja.....	25
3. Sredstva za podmazivanje	30
3.1. Polučvrsta maziva (masti) za podmazivanje strojnih dijelova	31
3.1.1. Sastav polučvrstih maziva	32
3.1.1.1. Bazna ulja	33
3.1.1.2. Zgušnjivači	34
3.1.1.3. Aditivi.....	34
3.1.2. Utjecaj radne temperature na viskoznost polučvrstih maziva (masti).....	35

3.2. Tekuća maziva.....	35
3.2.1. Parafinska ulja	36
3.2.2. Polialfaolefinska ulja	37
3.2.3. Ulja na biljnoj bazi	38
4. Ispitivanje karakteristika maziva i ležajeva u eksploataciji.....	39
4.1. Ispitivanja karakteristika maziva	39
4.2. Mehaničko dinamička ispitivanja	41
4.3. Postupak pojednostavljenja tribosustava	43
4.4. Ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje metodom klizanja prizme po prstenu	45
4.5. Prednosti i troškovi triboloških ispitivanja.....	46
4.6. Ispitivanja svojstava masti i ulja.....	48
4.6.1. Ispitivanje stabilnosti podmazivanja valjka u cilindru	48
4.6.2. Reichertov test trošenja ležaja	50
4.6.3. FE-8 ispitivanje maziva za kotrljajuće ležajeve	51
4.7. Praćenje ležajeva u eksploataciji	52
4.7.1. Vibracije	52
4.7.2. Senzori za mjerenje vibracija	53
4.7.3. Metode mjerenja, prikazivanja i analize signala vibracija	55
4.7.3.1. Fourierove transformacije	56
4.7.3.2. Filtriranje niskih frekvencija	57
4.7.3.3. Tehnologija spektralno emitirane energije	58
4.7.4. Specifične vibracije oštećenja ležaja	59
EKSPERIMENTALNI DIO.....	62
5. Plan i provedba ispitivanja	63
5.1. Plan ispitivanja	63
5.2. Provedba nitiranja	68
6. Rezultati ispitivanja i diskusija rezultata	69
6.1. Ispitivanje hrapavosti površine	69
6.2. Tvrdoća površine	71
6.3. Ispitivanje prosječne širine traga trošenja, faktora trenja i buke metodom prizme po prstenu	73
6.4. Diskusija rezultata	88
7. Zaključak	91
8. Literatura	92

Popis slika

Slika 1. a) Klizni ležaj, b) Kotrljajući ležaj [1]	3
Slika 2. Trenje kotrljanja kod valjnog tijela [4]	4
Slika 3. a) Kuglični ležaj, b) Valjkasti ležaj c) Igličasti ležaj [5].....	4
Slika 4 Podjela igličastih ležajeva [6]	5
Slika 5. Unutarnji prsten igličastog ležaja [6]	6
Slika 6. Vanjski prsten a) Nerastavljivi sklop proizveden dubokim vučenjem, b) Rastavljivi sklop proizveden postupcima odvajanjem čestica [6].....	7
Slika 7. a) Igljice (valjna tijela), b) Kavez s ugrađenim iglicama [6]	8
Slika 8. a) Uskočni prstenovi, b) Brtve [6]	8
Slika 9. Ljuskanje valjnog tijela i unutarnjeg prstena uslijed umora materijala [7].....	9
Slika 10. Oštećenja nastala tijekom rada ležaja [8].....	9
Slika 11. Utjecaj radne temperature na faktor α_3 [6]	11
Slika 12. Postupak toplinske obrade čelika EN DIN 100Cr6 [10].....	12
Slika 13. Mehanička svojstva čelika DIN 100Cr6 ovisno o temperaturi popuštanja [11].....	13
Slika 14. Utjecaj temperature popuštanja na tvrdoću srednjeugličnih čelika DIN 41Cr4 i DIN 42CrMo4 [12].....	14
Slika 15. Utjecaj vremena pougljičavanja na mikrotvrdoću čelika za pougljičavanje [13].....	15
Slika 16. Tvrdoća nehrđajućih austenitnih čelika ovisno o vrsti toplinske obrade [14]	16
Slika 17. Ovisnost tvrdoće o temperaturi austenitizacije martenzitnih nehrđajućih čelika [8]	17
Slika 18. Utjecaj temperature austenitizacije na tvrdoću čelika DIN X5CrNiCuNb16-4 [15]	17
Slika 19. Podjela postupaka modificiranja i prevlačenja [17].....	19
Slika 20. Prikaz nitrirane površine i promjene tvrdoće [18]	20
Slika 21. Mehanizmi nitriranja čelika [19].....	21
Slika 22. Shematski prikaz nitriranja u plazmi [18].....	23
Slika 23. Različite površine obradaka nitriranih u plazmi pri različitim parametrima [20].....	23
Slika 24. Shematski prikaz sustava za nitriranje u plazmi [21]	24
Slika 25. Komponente teksture površine [24]	27
Slika 26. Prikaz profila hrapavosti [25]	27
Slika 27. Nitrirani uzorak s pukotinama nastalim tijekom pripreme pod povećanjem x1000 [26]	28
Slika 28. Graf krivulja korozivskih potencijala [27].....	29
Slika 29. Slana komora [29]	30
Slika 30. Prikaz polučvrstih maziva s različitim pigmentima [31]	32
Slika 31. Sastav i udjeli komponenti u polučvrstim mazivima [32]	33
Slika 32. Načini podmazivanja uljem: a) uljna kupka, b) kap po kap, c) zapljuskivanjem, d) kružno, e) maglica ulja [6]	36
Slika 33. Struktura molekula mineralnih ulja [30]	37
Slika 34. Prikaz molekule triglicerida [33]	39
Slika 35. Prva kategorija ispitivanja (terenska ispitivanja) [34]	41
Slika 36. Druga kategorija ispitivanja [34]	41
Slika 37. Treća kategorija ispitivanja (ispitivanje komponenti) [34].....	42
Slika 38. Shematski prikaz četvrte kategorije ispitivanja [34].....	42
Slika 39. Shematski prikaz pojednostavljenja u petoj kategoriji ispitivanja [34]	42
Slika 40. Shematski prikaz pojednostavljenja u petoj kategoriji ispitivanja [34]	43
Slika 41. Primjer pojednostavljenja sustava [34]	44
Slika 42. Prikaz triobolškog sustava [34].....	44
Slika 43. Shematski prikaz ispitivanja metodom prizme po prstenu [35].....	45
Slika 44. Djelovanje adhezivnog trošenja [35]	46

Slika 45. Prikaz valjaka za ispitivanje maziva [34].....	49
Slika 46. Uređaj za ispitivanje [34].....	50
Slika 47. Princip ispitivanja [34].....	50
Slika 48. Prikaz postavljanja kugličnog ležaja u uređaj [34]	51
Slika 49. Uređaji za ispitivanje a) masti, b) ulja [34].....	52
Slika 50. Princip vibracija [36]	53
Slika 51. Razne glave senzora za mjerenja ubrzanja [38].....	54
Slika 52. Prikaz rezultata mjerenja vibracija [37]	55
Slika 53. Utjecaj različitih dijelova stroja na signal vibracija razdvojeni korištenjem fourierovih transformacija [37]	56
Slika 54. a) Spektra fourierovih transformacija, b) Snimljeni signal [37]	56
Slika 55. Oštećenje vanjskog prstena ležaja [37]	57
Slika 56. a) Nefiltrirani signal, b) Signal s filtriranim niskim frekvencijama [37]	58
Slika 57. Snimljeni signal akustične emisije [39]	59
Slika 58. Amplitude vibracija ovisne o broju okretaja ležaja karakteristične za oštećenje kaveza ležaja [37].....	59
Slika 59. Amplitude vibracija ovisne o broju okretaja ležaja karakteristične za oštećenje vanjskog prstena ležaja [37]	60
Slika 60. Amplitude vibracija ovisne o broju okretaja ležaja karakteristične za oštećenje unutarnjeg prstena ležaja [37]	61
Slika 61. Nemodificirani EN DIN 100Cr6 prsten	63
Slika 62. Nitrirani prstenovi	63
Slika 63. Uzorak ležajne bronce.....	64
Slika 64. Uređaj za ispitivanje tvrdoće.....	65
Slika 65. Uređaj za ispitivanje metodom prizme po prstenu.....	65
Slika 66. Tahometar UT373	66
Slika 67. Senzor zvuka UT353.....	67
Slika 68. Uređaj PC 70/90 tvrtke Rübige.....	68
Slika 69. Profili hrapavosti svih uzoraka	70
Slika 70. Histogram vrijednosti parametara	71
Slika 71. Ispitivanje tvrdoće površine	72
Slika 72. Histogram srednjih vrijednosti tvrdoća površine.....	72
Slika 73. Histogram prosječnih vrijednosti širina traga trošenja u ispitivanju bez podmazivanja	73
Slika 74. Prstenovi nakon provedbe ispitivanja bez podmazivanja	74
Slika 75. Histogram prosječnih vrijednosti širina traga trošenja u ispitivanju s podmazivanjem suncokretovim uljem	75
Slika 76. Prstenovi nakon provedbe ispitivanja s podmazivanjem suncokretovim uljem	75
Slika 77. Histogram prosječnih vrijednosti širina traga trošenja u ispitivanju s podmazivanjem uljem SAE 5W-30	76
Slika 78. Prstenovi nakon provedbe ispitivanja s podmazivanjem uljem SAE 5W-30	76
Slika 79. Promjena temperature površine prizme od ležajne bronce tijekom ispitivanja bez podmazivanja	77
Slika 80. Promjena temperature površine prizme od ležajne bronce tijekom ispitivanja s podmazivanjem suncokretovim uljem	78
Slika 81. Promjena temperature površine prizme od ležajne bronce tijekom ispitivanja s podmazivanjem uljem SAE 5W-30.....	78
Slika 82. Prosječna vrijednost faktora trenja u ispitivanjima bez podmazivanja.....	80
Slika 83. Prosječna vrijednost faktora trenja u ispitivanjima s podmazivanjem suncokretovim uljem.....	80

Slika 84. Prosječna vrijednost faktora trenja u ispitivanjima s podmazivanjem uljem SAE 5W-30.....	81
Slika 85. Analiza buke praznog hoda (bez opterećenja)	82
Slika 86. Analiza buke pri 1200 okretaja u minuti bez podmazivanja.....	83
Slika 87. Analiza buke pri 1740 okretaja u minuti bez podmazivanja.....	83
Slika 88. Analiza buke pri 2500 okretaja u minuti bez podmazivanja.....	84
Slika 89. Analiza buke pri 1200 okretaja u minuti u ispitivanjima s podmazivanjem suncokretovim uljem	85
Slika 90. Analiza buke pri 1740 okretaja u minuti u ispitivanjima s podmazivanjem suncokretovim uljem	85
Slika 91. Analiza buke pri 2500 okretaja u minuti u ispitivanjima s podmazivanjem suncokretovim uljem	86
Slika 92. Analiza buke pri 1200 okretaja u minuti u ispitivanjima s podmazivanjem uljem SAE 5W-30	86
Slika 93. Analiza buke pri 1740 okretaja u minuti u ispitivanjima s podmazivanjem uljem SAE 5W-30	87
Slika 94. Analiza buke pri 2500 okretaja u minuti u ispitivanjima s podmazivanjem uljem SAE 5W-30	87

Popis tablica

Tablica 1. Prednosti i nedostaci nitriranja u plazmi [16]	25
Tablica 2. Svrha i metode laboratorijskih ispitivanja nitriranog sloja [22].....	26
Tablica 3. Ispitivana svojstva masti za podmazivanje [34].....	40
Tablica 4. Ispitivana svojstva ulja za podmazivanje [34]	40
Tablica 5. Prednosti i nedostaci kategorija ispitivanja [34]	47
Tablica 6. Ispitivanja (oprema za ispitivanje) svojstava maziva u različitim uvjetima [34]....	48
Tablica 7. Izmjerene vrijednosti brzine vrtnje.....	66
Tablica 8. Izmjerena glasnoća rada uređaja	67
Tablica 9. Izmjerene mase dijelova uređaja i utaga	67
Tablica 10. Parametri nitriranja za prsten PN500	68
Tablica 11. Parametri nitriranja za prsten PN480	68
Tablica 12. Srednje vrijednosti parametara hrapavosti	69
Tablica 13. Vrijednosti tvrdoće površine uzoraka	72

Popis oznaka

Oznaka	Veličina	Značenje
L_{10}	10^6 rotacija	Osnovni radni vijek ležaja
C	N	Osnovna ocjena dinaičkog opterećenja
P	N	Radno opterećenje ležaja
L_{10h}	h	Osnovni radni vijek ležaja
f_h	-	Faktor radnog vijeka
f_n	-	Faktor brzine
n	r/min	Brzina vrtnje
α_1	-	Faktor prilagodbe prema zahtjevanoj sigurnosti
α_2	-	Faktor prilagodbe prema materijalu ležaja
α_3	-	Faktor prilagodbe prema radnim uvjetima
Q	J	Toplinska energija
m_{sr}	kg	Srednja masa uzorka
c_{sr}	kJ/kg*K	Srednji specifični toplinski koeficijent uzorka
ΔT	K	Promjena temperature tijekom ispitivanja
F_N	N	Normalna sila
s	m	Prijeđeni put tijekom ispitivanja
F_{tr}	N	Sila trenja
W_{Ftr}	J	Rad sile trenja
r	m	Vanjski radijus prstena
μ	-	Faktor trenja

Sažetak

U teorijskom dijelu rada opisane su konstrukcijske karakteristike igličastih ležaja, hidrodinamičke pojave u njihovom podmazivanju te metode ispitivanja maziva, vibracija, buke i zagrijavanja. U eksperimentalnom dijelu provedeno je nitriranje unutarnjeg ležaja igličastog ležaja izrađenog od čelika EN DIN 100Cr6 postupcima TENIFER i plazma nitriranje. Različitim postupcima nitriranja dobivene su površine sa i bez sloja željeznih nitrida. Nakon nitriranja provedena su ispitivanja hrapavosti površine, tvrdoće površine, te ispitivanje metodom klizanja prizme po prstenu. Metodom klizanja prizme po prstenu ispitani su utjecaji nitriranja površine, brzina vrtnje i dodavanja maziva na pojavu traga trošenja, promjenu kinetičkog trenja i zagrijavanja, te pojavu buke i vibracija. Za provedbu ispitivanja korišteno je suncokretno ulje i sintetičko motorno ulje SAE 5W-30. Iz provedenih ispitivanja utvrđeno je da je do pojave najmanje prosječne širine traga trošenja došlo u uvjetima podmazivanja uljem SAE 5W-30 kod tribopara „PN480 – ležajna bronca“. Do pojave najmanje prosječne vrijednosti faktora trenja došlo je u uvjetima podmazivanja suncokretovim uljem. Pri manjim brzinama kod tribopara „PN480 – ležajna bronca“, a pri većim brzinama kod tribopara „EN DIN 100Cr6 – ležajna bronca“. Analiziranje buke tijekom ispitivanja utvrđeno je da korištenjem podmazivanja dolazi do smanjenja buke i ujednačenijeg rada.

Ključne riječi: unutarnji prsten igličastog ležaja, EN DIN 100Cr6, postupak TENIFER, nitriranje u plazmi, podmazivanje, trenje, trošenje, buka

Summary

The theoretical part of the paper describes the structural characteristics of the needle bearings, hydrodynamic phenomena in their lubrication and methods of testing lubricants, vibrations, noise and temperature changes. In the experimental part, nitriding of the inner ring of the needle bearing made of EN DIN 100Cr6 steel was carried out using TENIFER and plasma nitriding processes. Various nitriding processes were used to obtain the surface with and without the formation of a layer of iron nitrides. After nitriding, tests of surface roughness, surface hardness and block on ring test method were conducted. Using the block on ring method the effects of surface nitriding, speed of the rotation and addition of the lubricant on the appearance of wear marks, changes in kinetic friction and temperature changes with the appearance of noise and vibrations were tested. Sunflower oil and synthetic motor oil SAE 5W-30 were used for the lubrication during the tests. From the conducted tests, it was determined that the appearance of the smallest average width of the wear marks occurred under the conditions of lubrication with the SAE 5W-30 oil in the tribopair „PN480 – bearing bronze“. The lowest average value of the friction factor occurred under the conditions of lubrication with the sunflower oil. It occurred at the lower speeds in the tribopair „PN480 – bearing bronze“ and at a higher speed in the tribopair „EN DIN 100Cr6 – bearing bronze“. Analyzing the noise during the tests, it was determined that the use of the lubrication leads to a reduction of noise and uniform operation.

Key words: needle bearing inner ring, EN DIN 100Cr6, TENIFER nitriding, plasma nitriding, lubrication, friction, wear, noise

1. Uvod

Ležajevi su jedni od najbitnijih dijelova svakog stroja koji u sebi ima neke elemente koji se gibaju. Gibanja koji mogu prenositi su aksijalna i radijalna. Prema definiciji ležaja to je dio konstrukcije koji se koristi za prijenos gibanja, a njegova uloga je smanjenje trenja i trošenja. Prema njihovoj konstrukciji dijele se na klizne i kotrljajuće. Klizni ležajevi su jednostavniji i ne sadrže kotrljajuće elemente, već se sastoje od kućišta i blazinice ležaja. Osovina koja se rotira ili aksijalno giba u ležaju putuje pomoću uljnog klina koji se stvara tijekom rada, ali prilikom pokretanja osovina dodiruje blazinicu kliznog ležaja. Kotrljajući ležajevi se sastoje od vanjskog i unutarnjeg prstena, te kotrljajućih elemenata koji se nalaze između ta dva prstena. Kotrljajući elementi mogu biti različitih oblika i prema njihovom obliku se dijele kotrljajući ležajevi. Oblici kotrljajućih elemenata su kuglasti, igličasti ili bačvasti.

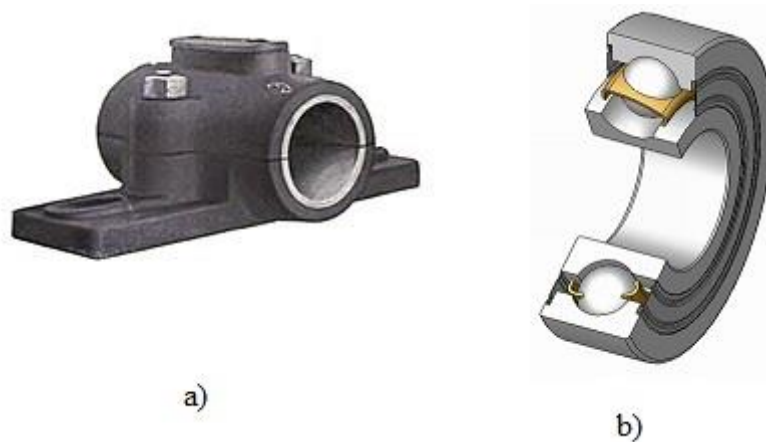
Tijekom njihovog rada zbog trenja između komponenti (unutarnji prsten i osovina) dolazi do pojave trošenja, zagrijavanja i vibracija. Kada dođe do pojave povišenih vrijednosti trošenja, temperature i vibracija obično znači da je došlo do neke vrste oštećenja ili poremećaja u radu ležaja. Na rad ležaja utječe izbor ulja i masti za podmazivanje. U laboratoriju se ispituje utjecaj različitih sredstava za podmazivanje na rad ležaja i postoje normirane ispitne metode kojima se ispituje. Neke od tih metoda su kuglica po kuglici (eng. *ball/ball*), ploča po ploči (eng. *plate/plate*) i prsten po ploči (eng. *plate/ring*). Tijekom tih ispitivanja proučavaju se svojstva koja su podijeljena u dvije skupine: kemijsko fizikalna svojstva i mehaničko dinamička svojstva.

Najčešće se za podmazivanje kliznih ležajeva koriste ulja, dok se u manjoj mjeri i za posebne slučajeve koriste masti. Korištena ulja dijele se prema njihovom načinu dobivanja. Tako se ona dijele na sintetička, mineralna i biljna ulja. U ovom radu ispitivati će se utjecaj biljnih i sintetičkih ulja na rad igličasti ležaja s unutarnjim prstenom nitriranom u plazmi. Oponašati će se eksploatacijski uvjeti radijalnog gibanja osovine pri različitim brzinama vrtnje. Osnovni materijal ležaja je čelik DIN 100Cr6 koji pripada skupini niskolegiranih alatnih čelika za hladni rad.

TEORIJSKI DIO

2. Materijali za valjne ležaje

Prilikom izrade nekog stroja bitan je izbor ležaja koji će se koristiti. Pravilnim odabirom vrste ležaja smanjuje se trošenje između komponenti koje se gibaju i također se smanjuju gubici koji nastaju u radu stroja. Ovisno o veličini i snazi stroja ovisiti će vrsta materijala i dimenzije ležaja koji se koristi. Svaka vrsta ima svoje prednosti i nedostatke, a glavna podjela je na klizne i kotrljajuće ležajeve. Razlika je u njihovoj konstrukciji. Kotrljajući ležajevi imaju kotrljajuće elemente koji omogućuju lakše gibanje, a nazivaju se valjna tijela. Razliku je moguće vidjeti na slici 1.



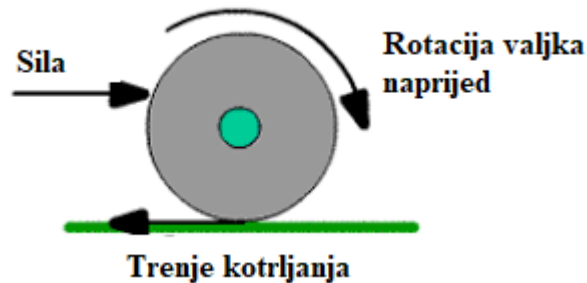
Slika 1. a) Klizni ležaj, b) Kotrljajući ležaj [1]

Osim konstrukcijski razlika postoje još razlike u mehanizmima trošenja, cijeni, jednostavnosti postavljanja i izrade, te njihovoj namjeni. Opis rada kliznih ležajeva detaljnije je opisan u [2].

2.1. Kotrljajući (valjni) ležajevi

Kotrljajući ležajevi dijele se prema obliku valjnih dijela koja se rotiraju između prstenova ili ploča prstena. Valjna tijela su kugličnog, valjkastog i igličastog oblika. Trenje koje se pojavljuje između valjnih tijela i prstenova ili ploča naziva se trenje kotrljanja. „Prema DIN 5281 trenje je otpor koji se javlja između površina nalijeganja dvaju tijela i suprotstavlja se međusobnom gibanju bilo klizanjem, bilo kotrljanjem ili valjanjem (trenje gibanja – kinetičko trenje), ili onemogućuje gibanje (trenje mirovanja – statičko trenje)“ [3]. Dok je trenje kotrljanja definirano kao „kada se dva elastična tijela (na primjer od čelika) kotrljaju jedno po drugom. Zbog elastične deformacije nastaje iz teorijskog točkastog ili linijskog dodira površinski dodir

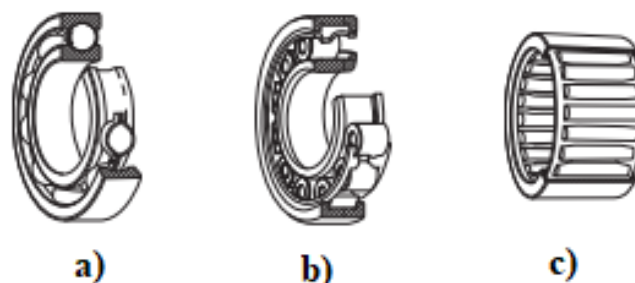
koji daje klizni udio (valjčići koji se slobodno gibaju između vodilica). Na slici 2 prikaz je shematski prikaz djelovanja trenja kotrljanja. [3]



Slika 2. Trenje kotrljanja kod valjnog tijela [4]

Zbog trenja kotrljanja kotrljajući ležajevi ostvaruju 25 do 50% manje trenje nego kod kliznih ležajeva kod koji se pojavljuje trenje klizanja. Ostale prednosti kotrljajućih ležajeva su manje zagrijavanje i manji gubici energije, manje zračnosti što je važno zbog preciznog rada kod električnih i alatnih strojeva. Kod kotrljajućih ležajeva nije potrebna konstrukcija kućišta kao kod kliznih ležajeva pa zauzimaju manje prostora. Izmjenjivost im je osigurana pomoću internacionalnih normi. Za rad kotrljajućih ležajeva potrebne su male količine maziva, te zbog njihova konstrukcije nema uhodavanja. [5]

Kao nedostaci kotrljajućih ležajeva može se navesti bučniji rad (zbog kotrljanja valjčića), veća osjetljivost na udarna opterećenja, skuplji su od kliznih ležajeva, te zahtijevaju vrlo preciznu izradu provrta kućišta i rukavca (uske granice tolerancija). Otežana je montaža i demontaža kada se uspoređuju s dvodijelnim kliznim ležajevima. Na slici 3 prikazana je podjela kotrljajućih ležajeva na glavne skupine. [5]

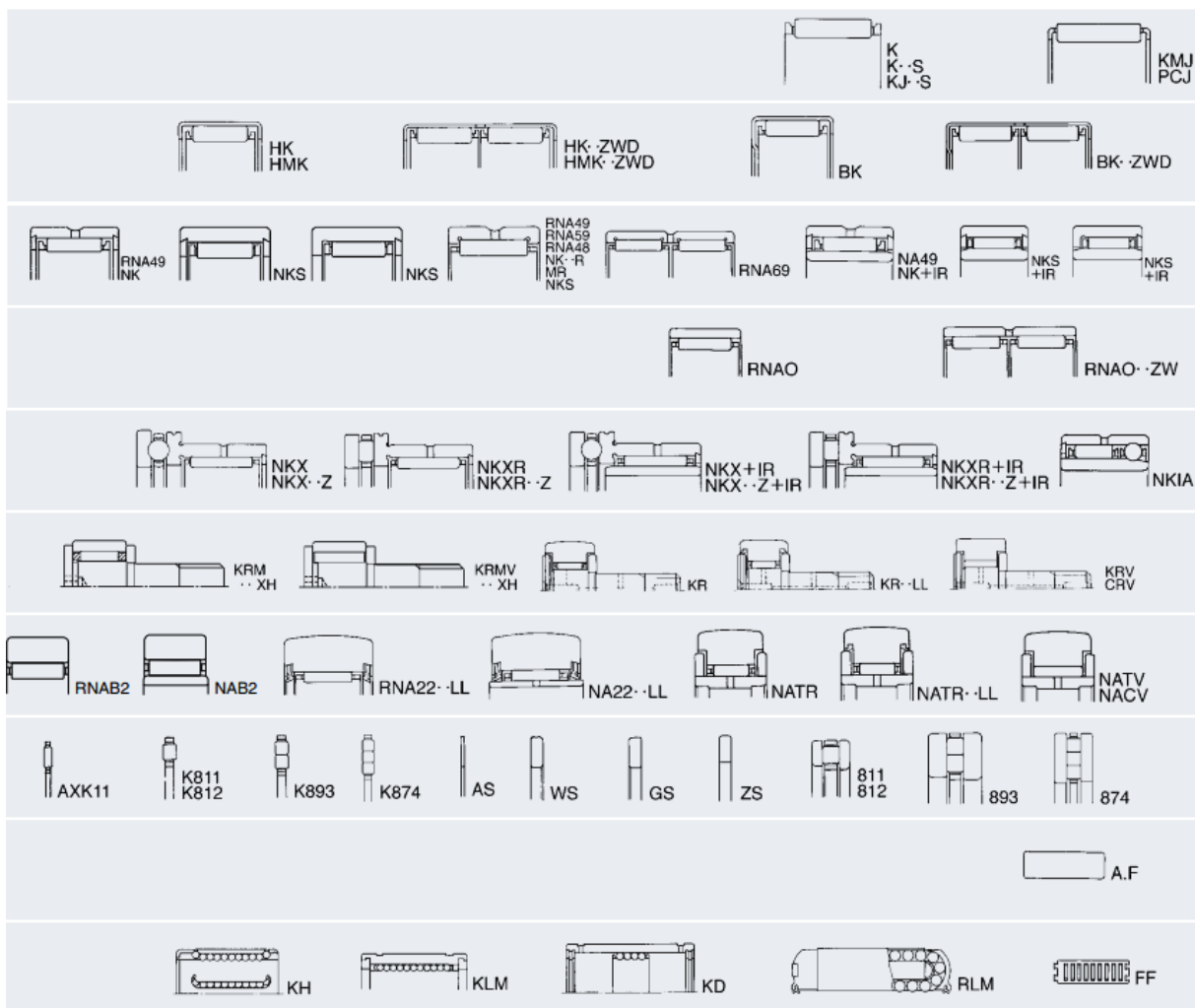


Slika 3. a) Kuglični ležaj, b) Valjkasti ležaj c) Igličasti ležaj [5]

2.2. Igličasti ležajevi

Jedna od vrsti ležajeva u skupini kotrljajućih ležajeva su igličasti ležajevi. Specifični su po tome što je dužina valjnih tijela 3 do 10 puta veća nego promjer. I zbog tog oblika valjnih tijela se nazivaju igličasti. Omjer promjera vanjskog i unutarnjeg prstena je mali što omogućuje podnošenje visokih opterećenja.

Igličasti ležajevi se dijele na puno različitih vrsti ovisno o njihovoj konstrukciji i dijelovima koji se koriste. Dio ležajeva se koristi bez unutarnjeg prstena jer njegovu ulogu preuzima vratilo ili osovina na koju se montira ležaj. Na slici 4 prikazana je podjela igličastih ležajeva.



Slika 4 Podjela igličastih ležajeva [6]

2.3. Komponentne igličastog ležaja

Tri glavne komponente igličastog ležaja su unutarnji i vanjski prsten te iglice (valjna tijela). Većina ležajeva nema unutarnji prsten nego su iglice u dodiru s osovinom ili vratilom na koji je montiran ležaj. [6]

Unutarnji prsten se koristi kada nije moguće obraditi osovinu ili vratilo tako da zadovoljava zahtjeve za tvrdoćom ili površinskom hrapavosti koji su potrebni. Unutarnji prstenovi su izrađeni od visokougličnog čelika koji je legiran kromom (u ovom radu je korišten unutarnji prsten od čelika DIN 100Cr6). Unutarnji prstenovi se toplinski obrađuju i zatim se bruse kako i se dobila visoka preciznost izrade. Prsten se može koristiti kao blazinica za klizne ležajeve, izrađuju se u metričnim i inčnim mjerama, te se mogu proizvoditi s provrtom za dodavanje ulja. Unutarnji prsten prikazan je na slici 5. [6]



Slika 5. Unutarnji prsten igličastog ležaja [6]

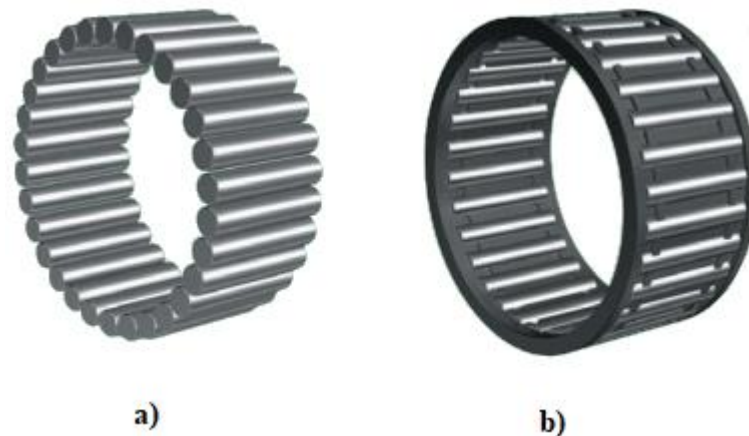
Vanjski prsten se u igličastim ležajevima koristi u različitim izvedbama. Izvedba vanjskog prstena ovisi o namjeni i radnim uvjetima ležaja. Vanjski prsten se može proizvesti kao sklop ili kao zasebni dio ležaja. Kao sklop se proizvodi kada su u vanjskom prstenu ugrađena valjna tijela. Vanjski prsteni se proizvode od tankih limova, pomoću postupka koji se naziva duboko vučenje. Vanjski prsten se u slučaju sklopa proizvodi s posebnim uzvišenjem na krajevima (rebrima) kako bi valjna tijela tijekom rada bila na osigurana. U takvoj izvedbi nije moguće rastaviti vanjski prsten i valjna tijela. U slučaju velikih opterećenja vanjski prsten se proizvodi od debljeg lima. Druga izvedba vanjskog prstena je oblikovanje vanjskog prstena pomoću postupaka odvajanjem čestica (tokarenje i brušenje). U toj izvedbi moguće je odvojiti kavez s iglicama od vanjskog prstena. Vanjski prstenovi se proizvode s provrtom za dodavanje sredstva za podmazivanje. Obje verzije prikazane su na slici 6. [6]



Slika 6. Vanjski prsten a) Nerastavljivi sklop proizveden dubokim vučenjem, b) Rastavljivi sklop proizveden postupcima odvajanjem čestica [6]

Iglice su valjna tijela koja se gibaju između unutrašnjeg i vanjskog prstena, te se njihovim gibanjem olakšava gibanje vratila ili osovine. Zbog omjera svojih dimenzija (širine i dužine) se razlikuju od valjčića koji se koriste u valjkastim ležajevima. Dužina iglice je 3 do 10 puta veća nego promjer iglice. Iglice se izrađuju kao cilindrične šipke s ravnim krajem i skošenjem za lakše umetanje. Iglice se proizvode od visokougličnog čelika koji je legiran s kromom, materijal koji se koristi i za druge dijelove i vrste ležajeva. Nakon toplinske obrade, površina iglica se brusi i polira kako bi se dobila zadovoljavajuća hrapavost površine. Prilikom izrade iglica maksimalno odstupanje mjere promjera iznosi 2 milimetra. U posebnim izvedbama proizvode se iglice s košenjem, odnosno s promjerom koji se smanjuje od sredine prema krajevima iglice. Osim kod ležajeva iglice se mogu koristiti kao pinovi ili vratila kod proizvoda malih dimenzija. Osim kao pojedinačni dijelovi iglice se sklapaju u kaveze i kao takve čine kavez s iglicama. [6]

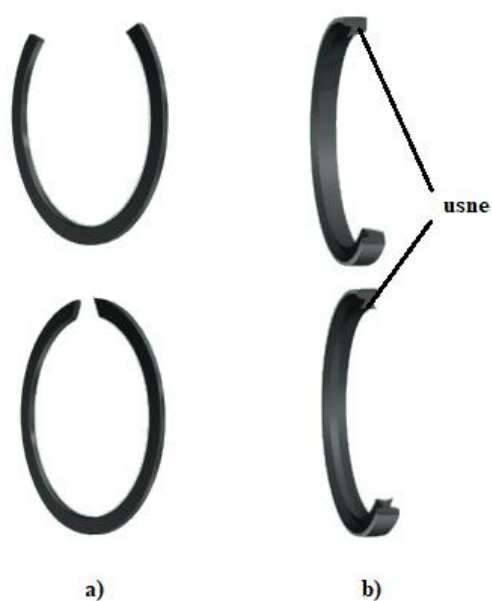
Kavez s iglicama se može koristiti kao ležaj bez unutarnjeg i vanjskog prstena, tada su oni zamijenjeni kućištem vratila kao vanjskim prstenom i vratilom koji služi kao unutarnji prsten. Prednost takvih sklopova je jednostavnost montaže, mala težina i mala debljina presjeka koja je otprilike jednaka promjeru iglica. Kavezi se izrađuju prešanjem, postupcima odvajanjem čestica ili injekcijskim prešanjem. Materijali kaveza su čelični ili brončani lim, lagani metali ili polimerni i kompozitni materijali. Na slici 7 prikazane su iglice i kavez s ugrađenim iglicama. [6]



Slika 7. a) Igljice (valjna tijela), b) Kavez s ugrađenim iglicama [6]

Sporedni dijelovi u igličastim ležajevima su uskočni prstenovi i brtve. Uskočni prstenovi se koriste za aksijalno pozicioniranje, pozicioniranje i poravnavanje unutarnjeg i vanjskog prsten, te kod montaže kaveza s iglicama. Dijele se u dvije vrste, jedni prstenovi se koriste za vratila dok se druga koriste kod kućišta ležajeva. [6]

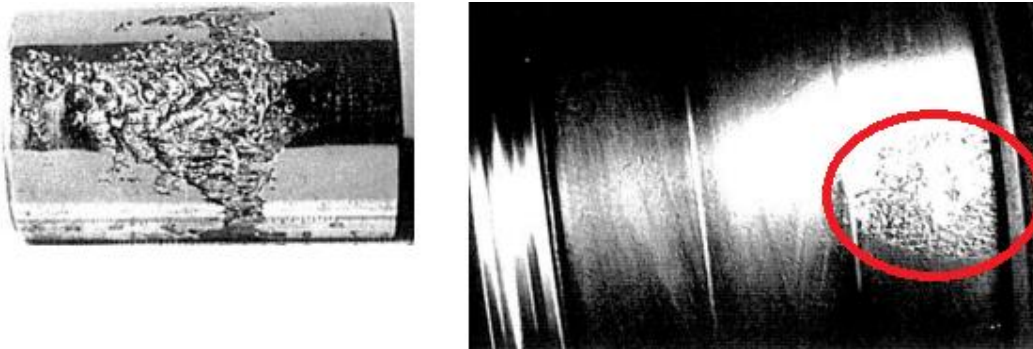
Brtve se koriste u dvije izvedbe, brtve G vrste imaju jednu usnu, dok kod GD vrste postoje dvije usne. Svaka vrsta se koristi ovisno o potrebi i vrsti ležaja. Brtve se sastoji od prstena koji se proizvodi iz čeličnog lima ili sintetičkog gumenog materijala. Koriste se na temperaturama od $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Njihova uloga je sprečavanje ulaska čestica koje je bi mogle oštetiti ili kontaminirati unutrašnjost ležaja, te sprječavanje pretjeranog podmazivanja ležaja. Na slici 8 su prikazani uskočni prstenovi i brtve. [6]



Slika 8. a) Uskočni prstenovi, b) Brtve [6]

2.4. Proračun radnog vijeka ležaja

Ležajevi koji rade u normalnim eksploatacijskim uvjetima, sobna temperatura i bez visokog opterećenja, izloženi su stalnom tlačnom opterećenju što oštećuje dijelove ležajeva. Zbog kontinuiranog rasta i smanjivanja tlačnog opterećenja dolazi do ljuskanja površina dijelova ležaja. Ljuskanje se dešava zbog umora materijala koje će nakon duljeg vremena djelovanja dovesti do kvara ležaja. Efektivni radni vijek ležaja se definira kao broj okretaja ležaja prije pojave ljuskanja na prstenovima ili valjnim tijelima. Ljuskanja dijelova čelika prikazano je na slici 9. Ostali mehanizmi koji mogu uzrokovati oštećenje ležaja su: adhezija, abrazija, pukotine i djelovanje korozije. Do pojave tih mehanizama trošenja dolazi zbog nepravilnog podmazivanja, pogrešnog brtvljenja ili lošeg odabira ležaja prilikom projektiranja. Svi mehanizmi osim ljuskanja uslijed umora materijala mogu se izbjeći i zbog toga ih se ne može staviti u istu kategoriju s ljuskanjem. Zbog oštećenja ležaja može doći do povećanja vibracija, temperature i šuma koji proizvodi ležaj. Na slici 10 prikazan je oštećeni unutarnji prsten ležaja. [7]



Slika 9. Ljuskanje valjnog tijela i unutarnjeg prstena uslijed umora materijala [7]



Slika 10. Oštećenja nastala tijekom rada ležaja [8]

Radni vijek trajanja je različit za ležajeve koji su jednaki i radne u istim eksploatacijskim uvjetima. Do toga dolazi zbog materijala od kojih su ležajevi napravljeni. Stoga je radni vijek trajanja ležaja definiran na statističkom modelu. Prema statistici osnovni radni vijek ležaja je ono vrijeme koje će 90% ležajeva koji su napravljeni od istog materijala izdržati u istim eksploatacijskim uvjetima ili duže bez pojave luskanja uslijed umora materijala. Za ležajeve koji rade konstantnom brzinom osnovni radni vijek se označuje u brojem radnih sati s sigurnošću od 90%. [6]

Za izračun radnog vijeka ležaja bitna je osnovna ocjena dinamičkog opterećenja, što je karakterizirano kao sposobnost valjnog ležaja da ponese dinamičko opterećenje. Osnovna ocjena dinamičkog opterećenja izražava se kao opterećenje uslijed čijeg djelovanja će ležaj odraditi 1 milijun okretaja. Ovisno o vrsti ležaja ispituje se osnovna ocjena dinamičkog radijalno opterećenja (C_r) ili osnovna ocjena dinamičkog aksijalnog opterećenja (C_a). [6]

Osnovni radni vijek se može izračunati prema jednadžbi 1. Osnovni radni vijek je definiran normom ISO 281:2007,. [6]

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (1)$$

Gdje za igličaste ležajeve vrijedi $p = \frac{10}{3}$, u jednadžbi su oznake: L_{10} (osnovni radni vijek, izražen u milijun rotacija), C (osnovna ocjena dinamičkog opterećenja, [N, Njutn]) i P (radno opterećenje ležaja, [N, Njutn]). Za izračun radnog vijeka ležaja izraženo u satima koriste se sljedeće jednadžbe (2),(3),(4). [6]

$$L_{10h} = 500 f_h^p \quad (2)$$

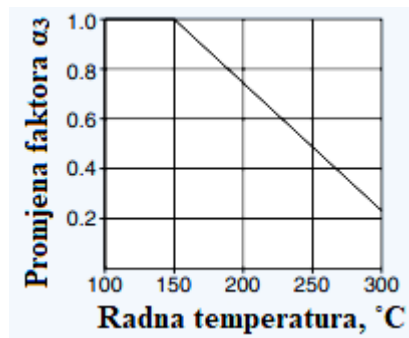
$$f_h = f_n \frac{C}{P} \quad (3)$$

$$f_n = \left(\frac{33,3}{n}\right)^{\frac{1}{p}} \quad (4)$$

U jednadžbama su sljedeće oznake: L_{10h} (osnovni radni vijek, u satima), f_h (faktor radnog vijeka), f_n (faktor brzine), n (brzina vrtnje, u rotacijama u minuti [r/min]). Iz jednadžbi (2),(3),(4) izvodi se jednadžba (5) koja objedinjuje jednadžbe za izračun osnovnog radnog vijeka u satima. Jednadžbe su prema normi ISO 281:2007 iz priručnika za igličaste ležajeve tvrtke NTN. [6]

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (5)$$

Prema potrebi i u posebnim slučajevima za izračun se koriste dodatni faktori koji se označuju kao α_1 , α_2 i α_3 . Faktor α_1 naziva se faktor prilagodbe prema zahtijevanoj sigurnosti, koristi se kada potreban osnovni radni vijek izračunat s većom sigurnosti od 90%. Faktor α_2 naziva se faktor prilagodbe prema materijala ležaja, faktor se koristi u slučaju proizvodnje ležaja od nestandardnog materijala. Faktor α_3 naziva se faktor prilagodbe prema radnim uvjetima. Na faktor α_3 utječu radni uvjeti poput podmazivanja (viskoznost maziva pri različitoj temperaturi), brzina vrtnje pri kojoj ležaj radi, smanjenje tvrdoće uslijed visokih radnih temperaturi. Na slici 11 prikazana je promjena faktora α_3 uslijed promjene radne temperature. [6]



Slika 11. Utjecaj radne temperature na faktor α_3 [6]

2.5. Materijali kotrljajuće ležaje

Izbor materijala kotrljajućih ležajeva ovisi o eksploatacijskim uvjetima u kojima ležaj radi. Općenito materijali za ležajeve trebaju imati visoku otpornost na umor materijala, poboljšanu otpornost na trošenje, visoku granicu razvlačenja, odgovarajuću tvrdoću i čvrstoću, dobru dimenzijsku stabilnost, otpornost na koroziju i dobru obradljivost. Kako bi se dobila tražena svojstva materijal mora imati odgovarajući kemijski sastav, odnosno jednoliko stvaranje karbida, makrostrukturu i mikrostrukturu, površinski sloj sa smanjenim udjelom ugljika, visoku čistoću, te nizak udio kisika i strogo kontrolirani udio ostalih elemenata. [9]

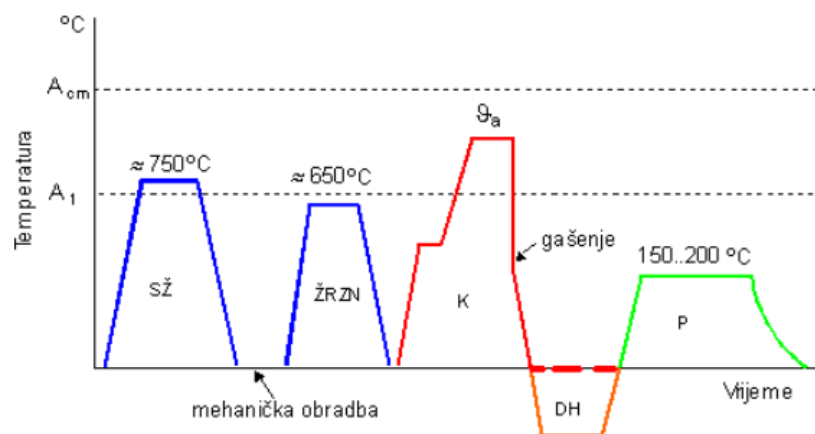
Nisu dopušteni nedostaci materijala poput pukotina, inkluzija poput troske, nepravilnosti površine (eng. *elephant skin*), ljuskica oksida, skupljanja, bijelih mrlja (korozijske naslage ispod površine), spaljenih područja i unutarnjih nedostataka. [9]

Za izradu valjnih ležaja upotrebljavaju se: visokouglični čelici legirani kromom, srednjuglični čelici, čelici za cementiranje, čelici za rad pri povišenim temperaturama, nehrđajući čelici, te polimerni materijali. [9]

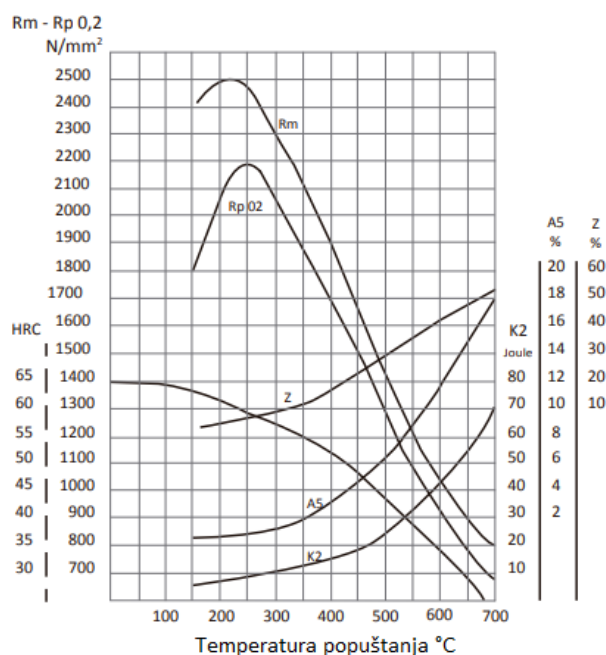
2.5.1. Visokouglični čelici legirani kromom

Najčešći materijal od kojeg se proizvode dijelove ležaja (unutarnji i vanjski prsten, te kotrljajući elementi) su visokouglični čelici legirani kromom. Neki od čelika koji se također koriste su nehrđajući čelici, ležajni čelici za rad pri visokim temperaturama, čelici za cementiranje i srednjeuglični čelici. [9]

Najčešće korišteni visokouglični krom čelik je DIN 100Cr6 čelik (prema kineskom standardu oznaka čelika je GB GCr15). Čelik ima visoku tvrdoću, otpornost na trošenje i otpornost na umor materijala. Tražena svojstva se dobivaju nakon toplinske obrade koja se sastoji od kaljenja i popuštanja. Nadalje čelik ima zadovoljavajuća svojstva pri povišenim temperaturama, dobru obradljivost, dobru sposobnost otvrdnuća, te lošu zavarljivost. Zbog tih svojstava čelik se koristi za ležajeve u motorima kod automobila, traktora, tenkova, zrakoplova i ostalih prijevoznih sredstava i strojeva. Također se koristi kod valjkastih (igličastih) ležajeva kod strojeva za obradu materijala, električnih motora, ležajeva za šinska vozila i opremu za rudarenje. Toplinska obrada čelika EN DIN 100Cr6 sastoji se od: sferoidizacijskog žarenja i potrebne mehanička obrade, žarenja za redukciju zaostalih naprezanja, nakon čega slijedi zagrijavanje na temperaturu austenitizacije s jednim predgrijavanjem uz brzo gašenje. Postupak dubokog hlađenja se provodi po potrebi, a posljedni dio postupka toplinske obrade je niskotemperaturno popuštanje. Redoslijed postupaka prikazan je na slici 12, dok je na slici 13 prikazan utjecaj temperature popuštanja na mehanička svojstva čelika pri isporučivanju. [9]



Slika 12. Postupak toplinske obrade čelika EN DIN 100Cr6 [10]



Slika 13. Mehanička svojstva čelika DIN 100Cr6 ovisno o temperaturi popuštanja [11]

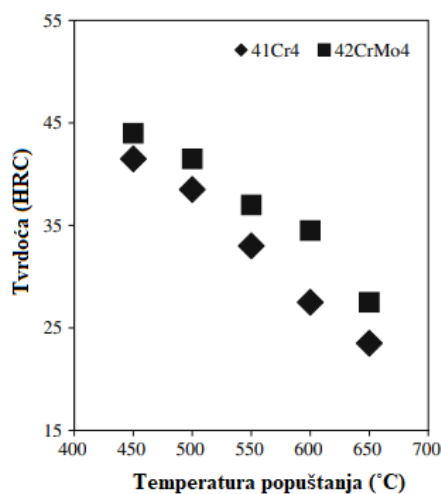
Osim DIN 100Cr6 čelika za proizvodnju ležajeva koriste se GB/T (kineski standard za označavanje čelika) GCr15SiMn i GCr15SiMo. Čelik GB/T GCr15SiMn se od čelika DIN 100Cr6 razlikuje po udjelu silicija i mangana, time se postižu veće vrijednosti tvrdoće i otpornosti na trošenje. Nedostatak tih čelika je mogućnost pojave krhkosti tijekom popuštanja. GB/T GCr15SiMn se koristi za stijenke debljine 15 do 35 milimetara zbog osjetljivosti na pukotine i male otpornosti na udarce. Kao zamjena se koristi GB/T GCr15SiMo gdje se mangan zamjenjuje molibdenom kako bi se poboljšala sposobnost kaljenja, tvrdoća, dimenzijska stabilnost i otpornost na udarce. GB/T GCr15SiMo se koristi za stijenke veće od 35 milimetara. [9]

2.5.2. Srednjeugljični čelici

Kada je potrebna dobra otpornost na udarna opterećenja umjesto čelika za cementiranje koriste se srednjeugljični legirani čelici. Imaju bolja svojstva pri povišenim i sniženim temperaturama. Postupak dobivanja je jednostavniji s obzirom na dobivanje čelika za cementiranje i karbonitriranih čelika, a moguće je dobiti sličan efekt otvrdnuća površine. Upotrebljava se za ležajeve koji moraju biti otporni na udarce i vibraciju, u koju kategoriju spadaju ležajevi velikih dimenzija za strojeve za rudarenje i kopanje tunela. [9]

Za proizvodnju prstenova koriste se čelici GB/T 40Cr (DIN 41Cr4) i GB/T 65Mn, dok se za proizvodnju ležajeva za transportne strojeve koriste GB/T GCr10, 37CrA i 40CrA (oznake

prema normama NR Kine iz reference [9]). Na slici 14 prikazano je kako odabir temperature popuštanja utječe na tvrdoću srednjeugljičnih čelika.

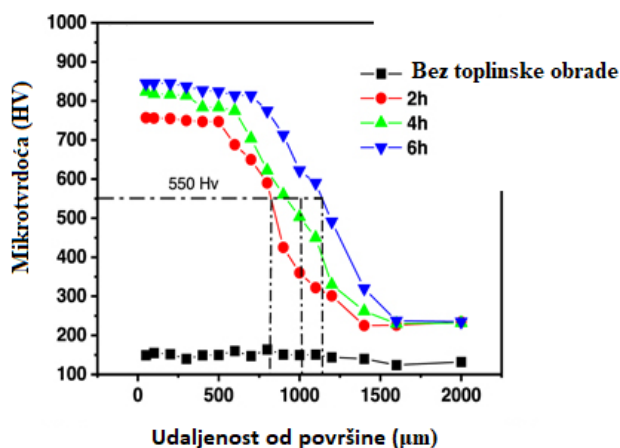


Slika 14. Utjecaj temperature popuštanja na tvrdoću srednjeugljičnih čelika DIN 41Cr4 i DIN 42CrMo4 [12]

2.5.3. Čelici za cementiranje

To su legirani čelici s niskim udjelom ugljika, ali nakon postupka pougljičavanja dolazi do povećanja udjela ugljika u vanjskim slojevima čelika dok u jezgri ostaje niski udio ugljika. Nakon postupka pougljičavanja provodi se kaljenje i popuštanje. Zbog takve toplinske obrade tvrdoća površine iznosi 56-62 HRC, dok u jezgri ostaje 25-45 HRC. Zbog toga čelici imaju dobru otpornost na trošenje površine, a zbog jezgre smanjenje tvrdoće dolazi do porasta otpornosti na udarce. Dijelovi ležaja napravljeni od čelika za cementiranja mogu podnijeti veća udarna opterećenja, te imaju visoku otpornost na trošenje i veću otpornost na umor materijala. Zbog tih svojstava čelici za cementiranje se koriste za proizvodnju većih ležajeva. Ležajevi od čelika za cementiranje koriste se kao ležajevi velikih mlinova, ležajevi u automobilima i vlakovima. U posebnim slučajevima se koriste kao zamjena za čelike legirane s kromom koji se najčešće koriste. [9]

Najčešće korišteni čelici iz skupine čelika za cementiranje su: GB/T G20CrNiMo, G20CrNi2Mo, 16Cr2Ni4Mo, 12Cr2Ni3Mo5, G20Cr2Ni4 (oznake prema normama NR Kine iz reference [9]). Na mehanička svojstva čelika u ovoj kategoriji utječe vrijeme pougljičavanja. Ovisno o trajanju pougljičavanja dobivaju se različite vrijednosti tvrdoće. Duljim vremenom pougljičavanja dobivaju se veće vrijednosti tvrdoće. Ovisnost vremena trajanja pougljičavanja i tvrdoće po dubini od površine uzorka prikazana je na slici 15.



Slika 15. Utjecaj vremena pougljičavanja na mikrotvrdoću čelika za pougljičavanje [13]

2.5.4. Čelici za rad pri povišenim temperaturama

Čelici za rad pri visokim temperaturama se koriste kada je radna temperatura iznad 250 °C. Ti ležajevi se koriste kod motora zrakoplova na mlazni pogon, plinskih turbina, sustava nuklearnih reaktora i sustava koji koriste rendgen. U tim sustavima radne temperature su 300-600 °C. Osim svojstava koje čelici trebaju imati pri normalnim temperaturama čelici iz ove kategorije također imaju: visoku tvrdoću pri visokim temperaturama, dobru otpornost na koroziju pri visokim temperaturama, dobru otpornost na umor pri visokim temperaturama, otpornost na oksidaciju, dobru otpornost na udarce pri visokim temperaturama i dobru stabilnost dimenzija pri visokim temperaturama. Čelici koji spadaju u ovu skupinu su: GB/T Cr4Mo4V, Cr14Mo4, W18Cr4V, W9Cr4V2Mo, W6Mo5Cr4V2 (oznake prema normama NR Kine iz reference [9]). Toplinska obrada se sastoji od kaljenja i tri popuštanja kako bi se dobila tražena svojstva.

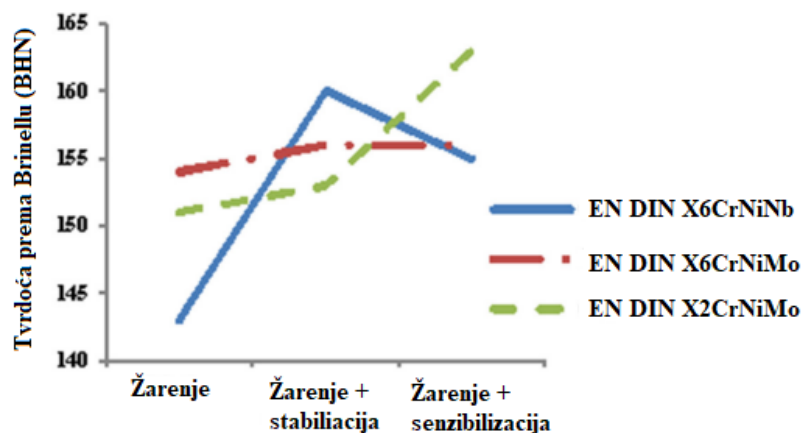
2.5.5. Nehrđajući čelici za ležajeve

Ležajevi se proizvode od nehrđajućih čelika u posebnim slučajevima, takvi ležajevi se koriste u kemijskoj i prehrambenoj industriji, brodogradnji i ostalim grana industrije gdje je potrebna visoka otpornost na koroziju. Nehrđajući čelici se koriste za rad do 250 °C. [9]

Nehrđajući čelici koji se koriste za ležajeve podijeljeni su u tri skupine, a iz svake skupine najkorišteniji čelici su sljedeći: čelik oznake prema kemijskom sastavu GB/T 1Cr18Ni9Ti (austenitni nehrđajući čelik), prema kemijskom sastavu GB/T 9Cr18 i GB/T 9Cr18Mo (martenzitni nehrđajući čelik), te prema kemijskom sastavu GB/T 0Cr17Ni7Al (precipitacijski očvrnuti nehrđajući čelik). W6Mo5Cr4V2 (oznake prema normama NR Kine iz reference [9]).

2.5.5.1. Austenitni nehrđajući čelik

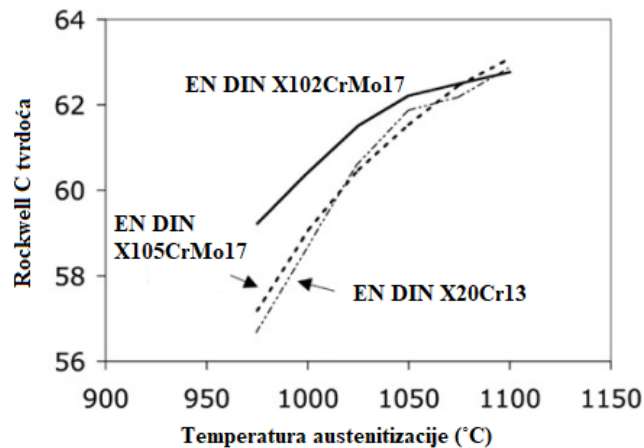
Austenitni nehrđajući čelici imaju odlična antikorozivna svojstva u medijima različitim pH vrijednosti i koncentracija (poput dušične kiseline i većine vodenih otopina organskih i anorganskih kiselina i plinova). Čelik se koristi za proizvodnju dijelova koji će biti izloženi malim opterećenjima, niskim brzinama i jakim korozivnim medijima. U slučaju nitriranja dijelova moguće ih je koristiti pri visokoj temperaturi, visokim brzinama i niskim opterećenjima s dobrom otpornošću na trošenje. Zbog svoje mikrostrukture (monofazni austenit) čelik se koristi gdje su potrebni nemagnetični ležajevi. Na slici 16 prikazano je kako tvrdoća austenitnih nehrđajućih čelika ovisi o toplinskoj obradi. [9]



Slika 16. Tvrdoća nehrđajućih austenitnih čelika ovisno o vrsti toplinske obrade [14]

2.5.5.2. Martenzitni nehrđajući čelici

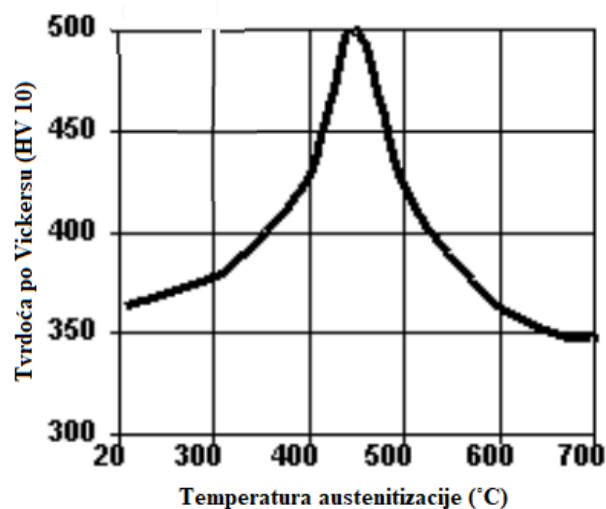
Čelici GB/T 9Cr18 i GB/T 9Cr18Mo se sastoje od otprilike 1% čelika i 18% kroma stoga nakon toplinske obrade ti čelici imaju povećanu čvrstoću, tvrdoću, otpornost na trošenje i otpornost na umor materijala. Imaju dobru otpornost na korozivne medije poput prirodne atmosfere, morske vode, paru i dušičnu paru. Osim otpornosti na korozivne medije ovi čelici zadržavaju dobra mehanička svojstva pri niskim temperaturama, te se koriste do radnih temperatura do $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$. Takvi radni uvjeti su u raketnih motora (vodik-kisik), također se koriste u medicinskoj i prehrambenoj industriji. Tvrdoća martenzitnih nehrđajućih čelika ovisi o temperaturi austenitizacije i raspršenosti karbida u mikrostrukтури. Na slici 17 prikazana je usporedba tvrdoća martenzitnih nehrđajućih čelika ovisno o temperaturi austenitizacije. [9]



Slika 17. Ovisnost tvrdoće o temperaturi austenitizacije martenzitnih nehrđajućih čelika [8]

2.5.5.3. Precipitacijski očvrsnuti nehrđajući čelici

Kako bi se dobili precipitacijski čelici potrebno je čelike legirati s različitim legirnim elementima, nakon pravilne toplinske obrade i dozrijevanje dobije se mikrostruktura s precipitatima koji čeliku daju visoku čvrstoću. Ovi čelici imaju kombinaciju dobre otpornosti na korozivne medije od austenitnih nehrđajućih čelika i visoku čvrstoću martenzitnih nehrđajućih čelika. Osim toga precipitacijski očvrsnuti nehrđajući čelici imaju dobru čvrstoću pri povišenim temperaturama, te se koriste gdje je potrebna: visoka čvrstoća, visoka otpornost na korozivne medije i visoka otpornost na oksidaciju. Na slici 18 prikazano je kako temperature austenitizacije utječe na tvrdoću čelika DIN X5CrNiCuNb16-4. Najviša tvrdoća dobiva se austenitizacijom na 480 °C. [9]



Slika 18. Utjecaj temperature austenitizacije na tvrdoću čelika DIN X5CrNiCuNb16-4 [15]

2.5.6. Ostali materijali za izradu kotrljajućih ležajeva

Osim čelika za proizvodnju kotrljajućih ležajeva koriste se legure metala i materijali koji se proizvode metalurgijom praha (keramički materijali) i polimerni materijali.

2.5.6.1. Metalne legure i keramički materijali dobiveni metalurgijom praha

Za proizvodnju ležajeva koristi metalna legura nikla i željeza DIN 17745, legura se dobiva dozrijevanjem nakon kojeg ima visoku tvrdoću (50-57 HRC), odličnu otpornost na visokotemperaturnu koroziju, nije magnetična i ima dobru zaštitu od zračenja. Zbog visoke cijene koristi se u posebnim slučajevima. [9]

Materijali dobiveni metalurgijom praha za proizvodnju dijelova ležaja su MT35 (sastoji se od 35% TiC i 65% krom molibden praha) i ST35 (35% TiC i 65% nikal krom praha) oba materijala dobivaju se sinteriranjem. Imaju visoku tvrdoću i otpornost na trošenje, dobru obradljivost i dimenzijsku stabilnost. [9]

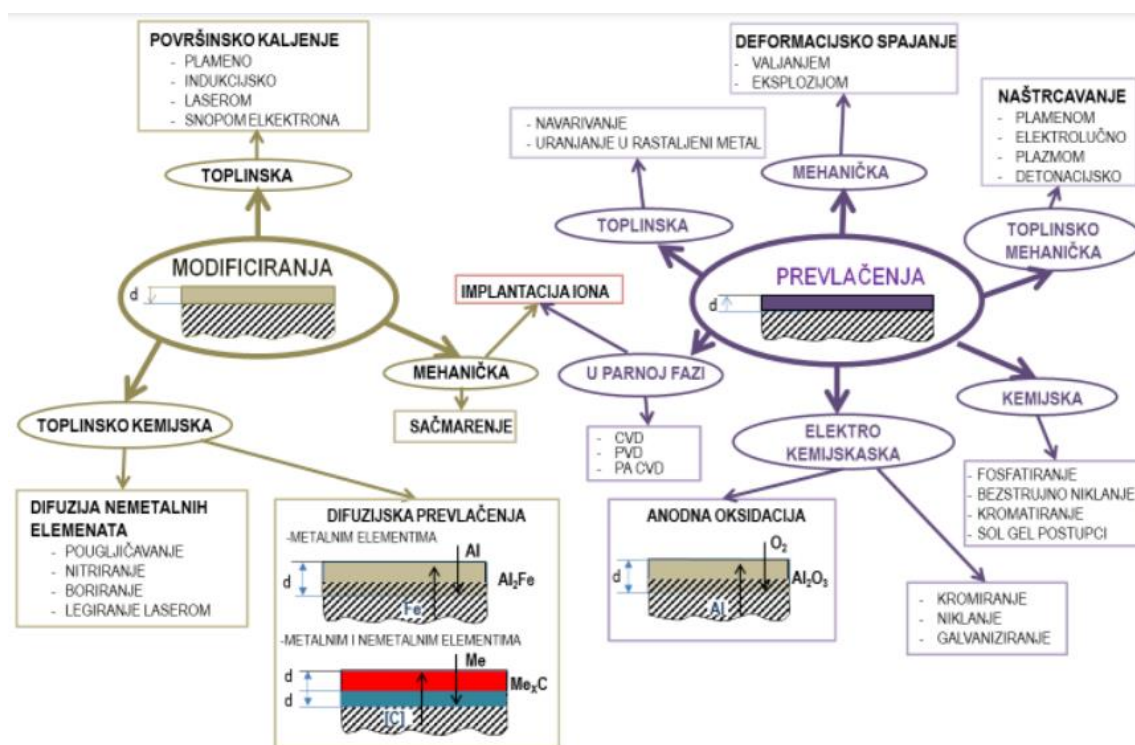
Metalurgijom praha se proizvode dijelovi ležajeva od keramičkih materijala (Al_2O_3 , Si_3N_4 i ZrO_2). Korištenjem keramičkih materijala dobivaju se dijelovi s visokom tvrdoćom, niskom relativnom gustoćom, dobrim svojstvima pri visokim temperaturama, dobru otpornost na trošenje, visoku preciznost strojne obrade i visoku dimenzijsku stabilnost. Prednost keramičkih materijala nad čelicima je niža gustoća (otprilike 40% manja gustoća od čelika), niski koeficijent termalne ekspanzije (otprilike 25% manja nego kod čelika), te veći modul elastičnosti (otprilike 1.5 veće vrijednosti). Zbog svojih svojstava koriste se u uvjetima visokih brzina i temperatura, te u uvjetima jako korozivnih medija. [9]

2.5.6.2. Polimerni materijali

Polimerni materijali se koriste zbog male mase (niska gustoća), samopodmazivanja i otpornosti na koroziju, nisko koeficijenta trenja, otpornosti na trošenje, niske buke i mogu se podmazivati vodom. Najčešće se koriste za proizvodnju dijelova ležaja koji su izloženi niskom opterećenju u pomorskoj, prehrambenoj i kemijskoj industriji. Polimerne dijelove moguće je koristiti u kombinaciji s kotrljajućim tijelima od nehrđajućeg čelika, stakla ili polimera. Najčešće korišteni polimeri su: polioksimetilen (POM), poliamidi (PA), politetrafluoretilen (PTFE) i fenolformaldehidni polimeri. [9]

2.6. Postupci nitriranja materijala za ležaje

Postupci modificiranja površine provode se kako bi se poboljšala svojstva materijala, odnosno radi smanjenja trenja i trošenja tijekom rada strojnih dijelova, povećanja otpornosti na kiseline, lužine ili koroziju, povećanja otpornosti na udarce i površinske pritiske. Postupci se dijele ovisno o radi li se poboljšanje od površine prema jezgri materijala (postupci modificiranja) ili se na površinu dodaju slojevi (postupci prevlačenja). Podjela postupaka modificiranja i prevlačenja prikazana je na slici 19. Postupci nitriranja i nitrokarburiranja pripadaju skupini toplinsko kemijskih modificiranja koji se mogu primijeniti samostalno ili kao dio dupleks postupaka sastavljenih od nitriranja bez stvaranja zone spojeva i naknadnog prevlačenja tankim tvrdim prevlakama. [16]

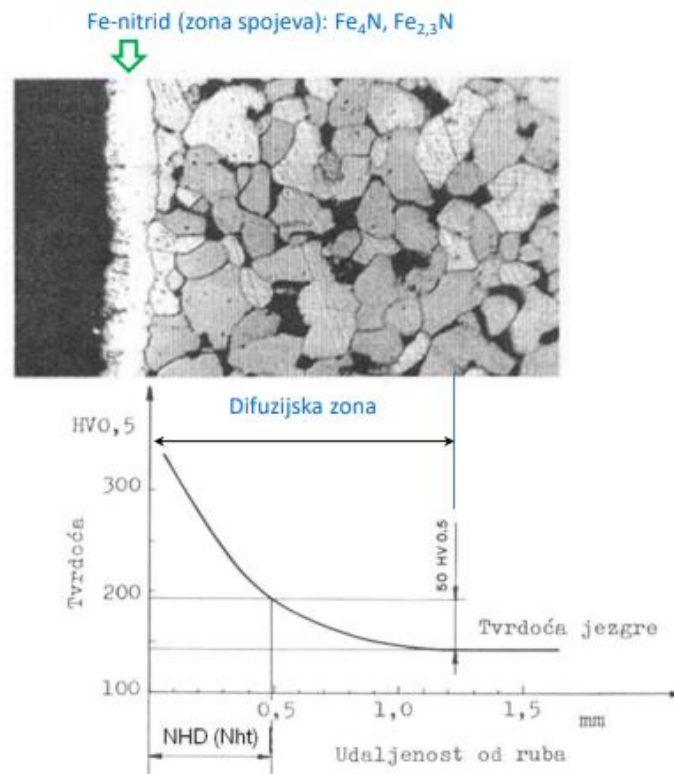


Slika 19. Podjela postupaka modificiranja i prevlačenja [17]

2.6.1. Usporedba postupaka nitriranja

Jedan od najčešće korištenih postupaka modificiranja površine čelika je postupak nitriranja. Postupkom nitriranja se površinskom sloju dodaje dušik. Sloj dušika povećava tvrdoću površine kako bi se povećala otpornost na trošenje. Proces difuzije dušika u čelik događa se pri temperaturama od 510 °C do 590 °C. Pri povišenim temperaturama feritna BBC rešetka počinje vibrirati što omogućava atomima dušika da prodru u rešetku i stvore spojeve sa željezom i drugim legirnim elementima ako ih ima (nastaju razni nitridi). Stvaranje nitrida

poput Cr_2N , Mo_2N , AlN i drugih dovodi do otežanog gibanja dislokacija u materijala i tako podižu tvrdoću površine. Na slici 20 prikazan raspored zona koja nastaju nitriranjem i promjena tvrdoće po presjeku nitriranog čelika. Na slici je prikazan nitrirani sloj i određivanje efektivne dubine nitriranja NHD (Nht) na metalografski pripremljenom uzorku nitriranog čelika. [16]



Slika 20. Prikaz nitrirane površine i promjene tvrdoće [18]

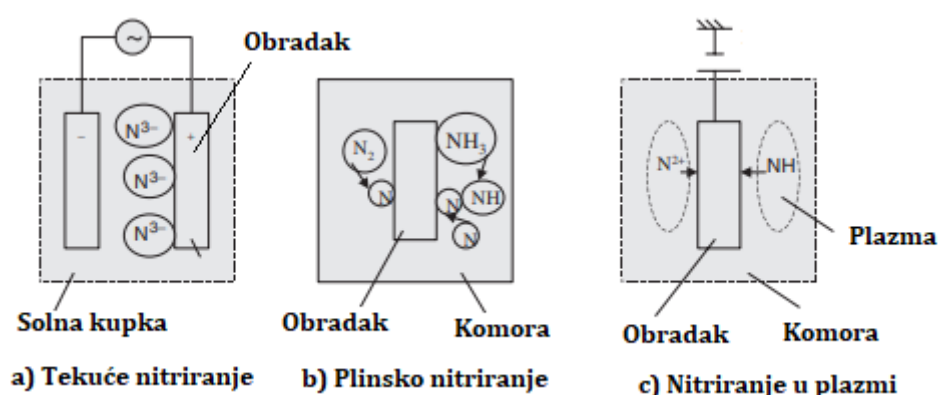
Tijekom nitriranja nastaju dvije zone sa različitim svojstvima. Nitriranjem nastaju: zona spojeva i difuzijska zona. [16]

Debljina zone spojeva ovisi o kemijskom sastavu čelika koji se modificira. Zona spojeva se najviše sastoji od γ' - Fe_4N i ϵ - $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$. U sloju površine s najvećim udjelom dušika stvara se ϵ - $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$, dok se sa smanjenjem udjela dušika stvara sve više γ' - Fe_4N . Slojevi s više ϵ - $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$ faze imaju bolja svojstva otpornosti na trošenje, ali bez poboljšanja otpornosti na udarce. Prisustvom γ' - Fe_4N povećava se otpornost na udarce. Zbog svoje krhkosti u eksploataciji se koriste nitrirani dijelovi bez zone spojeva. Zonu spojeva moguće je ukloniti postupcima odvajanja čestica (brušenje, poliranje, superfiniš), također je moguće provesti postupak bez nastanka zone spojeva. [16]

Difuzijska zona stvara se ispod zone spojeva i sastoji se nitrida. Za razliku od zone spojeva, difuzijska zona je obavezna kako bi se postiglo povećanje tvrdoće i otpornosti na

trošenje osnovnog materijala. Povećanje tvrdoće je prisutnost i raspodjela nitrida legirnih elemenata. Općenito se nitiranje može provesti na raznim vrstama čelika, ali za maksimalni učinak nitiranja potrebni su legirni elementi s kojima dušik može stvarati nitride. Legirni elementi koji s dušikom stvaraju stabilne nitride su: aluminijski, krom, vanadij, volfram i molibden. Bitan uvjet prilikom nitiranja je da sadržaj ugljika u čeliku ne prelazi 0,5 %, jer se povećanjem udjela ugljika povećava mogućnost stvaranja karbida umjesto nitrida. [16]

Metode nitiranja se dijele ovisno o metodi pomoću koje se provodi nitiranje. Podjela je na: tekuće, plinovito i plazma nitiranje. Na slici 21 prikazana je razlika u načinu nitiranja kod različitih postupaka. [16]



Slika 21. Mehanizmi nitiranja čelika [19]

Nitiranje u solnim kupkama koje se sastoje od cijanida i cijanata zagrijane na 510 do 580 °C. Zbog niske temperature postupka difuzija dušika je brža od difuzije ugljika i ne dolazi do pougljičavanja. Sastav solne kupke je najčešće 60-70% natrijevih soli i 30-40% kalijevih soli. Prije korištenja solne kupke potrebno je provesti starenje, postupak kojim se smanjuje udio cijanida i karbonata. Svojstva nitiranog sloja ovise o udjelima soli. [16]

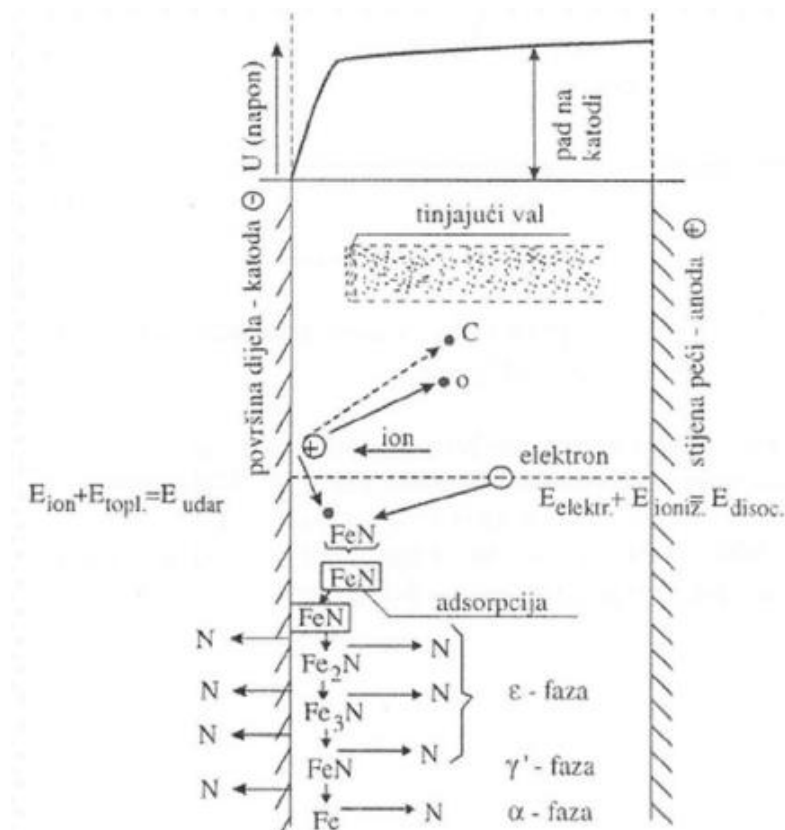
Postupak plinskog nitiranja provodi se na temperaturi između 500 i 565 °C i ispod temperature A_1 (temperature nastajanja austenita u feritnim čelicima). Prije zagrijavanja peći na temperaturu od 150 °C, potrebno je ukloniti zrak iz komore kako ne bi došlo do oksidacije obradaka. U peć se dovodi suhi amonijak iz kojeg dušik ulazi u površinu i stvaraju se razni nitridi s legirnim elementima. Plinsko nitiranje se provodi s dvije metode. Metoda s jednom fazom se provodi na temperaturama između 500 i 530 °C, a disocijacija amonijaka je između 15 i 30 %. Debljina difuzijske zone iznosi do 0,05 mm što dovodi do krhkosti površine. Druga metoda plinskog nitiranja je s dvije faze. Prvih 15 do 20 sati obradak se nitira na temperaturama između 500 i 510 °C, a zatim se do kraja postupka ona diže na 550°C. Postotak

disocijacije amonijaka iznosi između 65 i 85%, a prednost postupka je mala debljina zone spojeva. [16]

2.6.2. Postupak nitriranja u plazmi

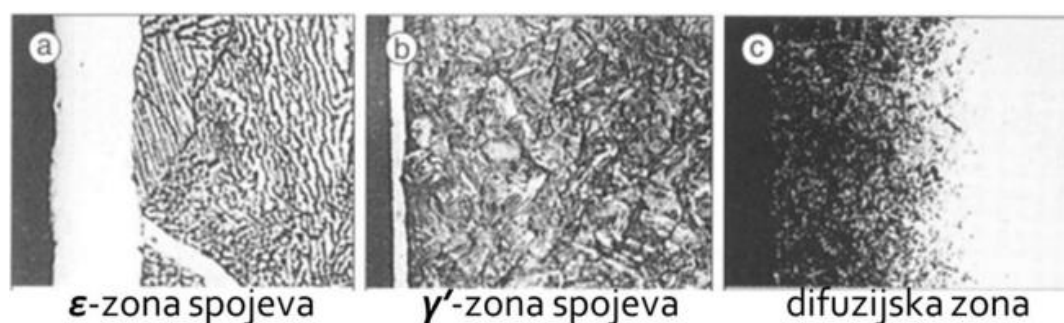
Nitriranjem u plazmi dušik se dovodi u površinu obratka postepenom difuzijom. Električna energija visokog napona stvara plazmu uz pomoć koje atomi dušika se ubrzavaju i prodiru u površinu obratka. Otprašivanje ionima ugrijava uzorak, čisti površinu i pruža veću aktivnost dušika. Korištenjem niskih napona, proizvodi se slaba električna struja koji je konstantne vrijednosti. Povećanjem napona do određene vrijednosti, električna struja počinje tjerati elektrone iz atoma plina u vakuumskoj komori da izlaze iz vanjske ljuske u kojoj kruže oko jezgre atoma. Taj postupak se naziva ioniziranje plina, a do kojeg dolazi zbog uspostavljanja napona između katode (obradak) i anode (zid peći). Otpušteni elektroni ubrzavaju prema obratku i putem udaraju u druge elektrone i uzrokuju njihovo ubrzanje. Naglo povećanje napona i struje tijekom nitriranja u plazmi naziva se „Townsendovo pražnjenje“ (eng. *Townsend discharge*). Tijekom pražnjenja dolazi do pojave svjetla (tinjajuće pražnjenje) na obratcima (eng. *Glow discharge*). Zbog toga je za vrijeme nitriranja na obratku vidljiva pojava svjetla koja prati oblik obratka. Napon koji se koristi za plazma nitriranje iznosi između 300 i 1200 V. Primjenom većeg napona dolazi do paljenja i oštećenja obradaka. [16]

Najčešće korišteni mehanizam nitriranja u plazmi započinje interakcijom atoma dušika s površinom čelika pri čemu nastaje željezov nitrid (FeN). Željezov nitrid je nestabilna faza i transformira se u γ -Fe₄N i ϵ -Fe₂₋₃N, te dolazi do nastanka zone spojeva. Prodiranjem dušika prema jezgri obratka dolazi do nastajanja difuzijske zone. Na slici 22 prikaz je mehanizam nastajanja spojeva kod nitriranja u plazmi. [16]



Slika 22. Shematski prikaz nitriranja u plazmi [18]

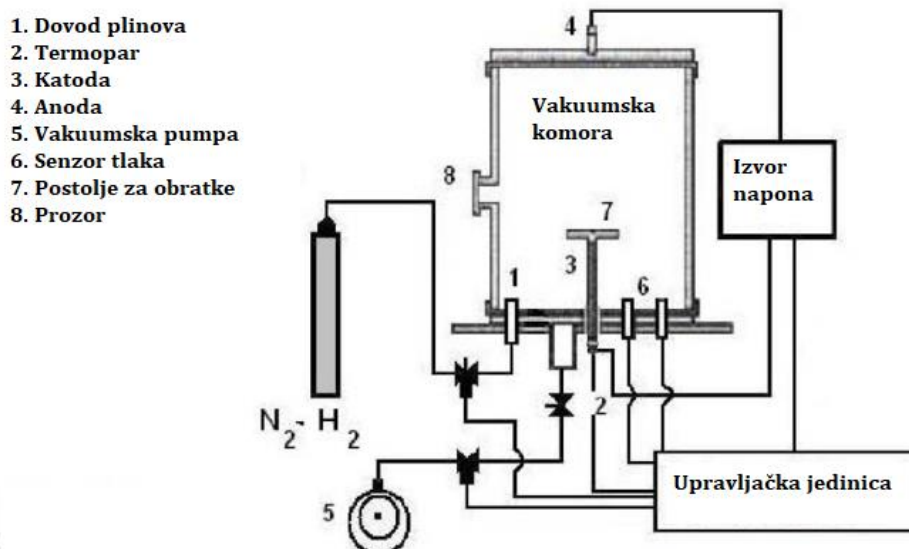
Najvažniji parametri nitriranja u plazmi su: sastav plina i temperatura, a ostali parametri su vrijeme, tlak u komori i napon plazme. Najčešći sastav plina je 25 % dušika i 75 % vodika. Podizanjem udjela dušika do 50 % povećava se brzina rasta nitriranog sloja. Dodatnim povećanjem udjela dušika (preko 50 %) dolazi do povećanja debljine zone spojeva nitriranog sloja. Temperatura kod nitriranja u plazmi utječe na efektivnu dubinu nitriranja, a trebala bi biti između 350 i 280 °C. Za legirane čelike se koriste niže temperature nego za ugljične čelike. [16]. Kombinacijom tih parametara moguće je dobiti površine različite tvrdoće i mikrostrukture. Na slici 23 prikazani su površinski slojevi koje je moguće dobiti nitriranjem u plazmi. [16]



Slika 23. Različite površine obradaka nitriranih u plazmi pri različitim parametrima [20]

Na slici 23 obradak s zonom spojeva kojoj se nalaze ϵ -Fe₂₋₃N (označeno oznakom a) nitriran je u plazmi pri sastavu plina 75-79 % dušika, 1-3 % metana, a ostali udio argon ili vodik. Temperatura nitiranja je bila oko 570°C, a vrijeme nitiranja je bilo 1 do 6 sati. Pri tim uvjetima nastaje zona spojeva debljine 0,005 do 0,0030 mm. Kod obratka označenog s oznakom b korišteno je 15-30 % dušika i 70-85% argona ili vodika. Temperatura nitiranja je bila 500 do 570 °C s vremenom trajanja manjim od sat vremena. Pri tim uvjetima nastaje zona spojeva s γ' -Fe₄N debljine 0,002 do 0,010 mm. Zadnji obradak (oznaka c) nema zonu spojeva, korišteno je 1-5 % dušika i 95-99 % argona ili vodika. Temperatura nitiranja je 530-550 °C s trajanjem kraćim od 6 sati. Zbog krhkosti nitrida u zoni spojeva, obradak s oznakom c ima najveću tvrdoću. Efektivna dubina nitiranog sloja (NDT) ovisi o parametrima nitiranja. Povećanjem duljine trajanja ili temperature nitiranja povećava se i debljina nitiranog sloja. [20]

Glavni dijelovi sustava za provedbu nitiranja u plazmi su: vakuumska komora, izvor napona i sustav za dovod i miješanje plinova s jedinicom za nadzor i upravljanje. Vakuumska komora ima dvije izvedbe, s jednim zidom koji ima izolaciju ili s dvostrukim zidovima i sustavom za hlađenje bez izolacije. Izvor napona je najvažniji dio sustava i mora osiguravati izlazni napon u rasponu od 0 do 1200 V i struju koja odgovara veličini vakuumske komore i broju uzoraka. Na slici 24. shematski je prikazan sustav za nitiranje u plazmi. [16]



Slika 24. Shematski prikaz sustava za nitiranje u plazmi [21]

Prednosti i nedostaci postupka nitiranja u plazmi u odnosu na druge načine nitiranja prikazani su u tablici 1.

Tablica 1. Prednosti i nedostaci nitriranja u plazmi [16]

Prednosti	Nedostaci
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kraće vrijeme toplinske obrade ➤ Niže deformacije i promjene dimenzija ➤ Nije potrebna naknadna obrada površine ➤ Smanjeni troškovi toplinske obrade ➤ Homogenost i ujednačenost mikrostrukture ➤ Mala opasnost postupka ➤ Brze kinetičke reakcije na površini ➤ Odstranjivanje oksidnog sloja sa površine 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Za provedbu postupka potrebna je osoba s iskustvom (znanjem) ➤ Ograničenost u veličini serije (veličina vakuumske komore) ➤ Nejednolika raspodjela temperatura kod svih obradaka ➤ Pregrijavanje malih dijelova ➤ Oštećenje površine pri visokim naponima

2.6.3. Ispitivanja nitriranog sloja

Nakon nitriranja određenog obratka uzimaju se uzorci kako bi se mogla odrediti efikasnost nitriranja i ispitati koja su svojstva nitriranog sloja. Karakterizacija nitriranog sloja sastoji se od osnovnih ispitivanja i laboratorijskih ispitivanja. [22]

„Osnovna ispitivanja su:

- površinska tvrdoća
- tvrdoća zone spojeva
- raspored tvrdoće po dubini difuzijske zone
- efektivna i ukupna dubina nitriranja
- dubina zone spojeva
- dubina poroznog sloja zone spojeva
- mikrostruktura sloja.“ [22]

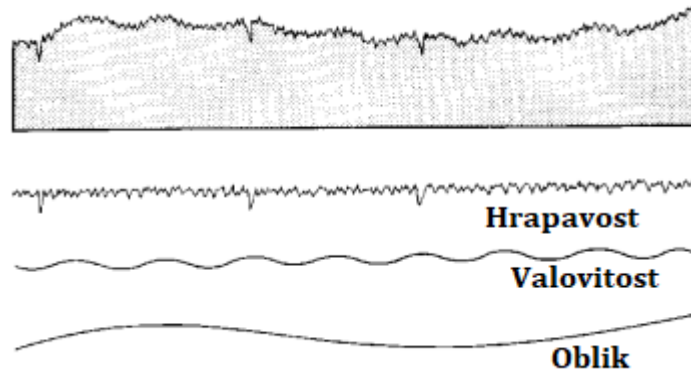
Ovim ispitivanjima se zaključuje o osnovnim svojstvima nitriranog sloja i njegovih zona. S laboratorijskim ispitivanjima se mogu ispitati još neka dodatna svojstva, ovisno o traženim svojstvima nitriranog sloja. Laboratorijska ispitivanja (njihova svrha i metoda ispitivanja) navedena su u tablici 2. [22]

Tablica 2. Svrha i metode laboratorijskih ispitivanja nitriranog sloja [22]

Laboratorijska ispitivanja	
Svrha ispitivanja	Metode ispitivanja
Određivanje kemijskog sastava rubnog sloja	- rendgenska difrakcija - optička spektrometrija tinjajućeg pražnjenja (GDOS)
Određivanje kemijskog sastav osnovnog materijala	- spektroskopija - mokra kemijska analiza
Određivanje debljine sloja	- nerazorne metode - razorne metode
Ispitivanje hrapavost i topografije površine nitriranog obratka	- mjerenja hrapavosti površine elektro-mehaničkim uređajem s ticalom - 3D profilometrija
Analiza mikrostrukture	- svjetlosna mikroskopija - elektronska mikroskopija (SEM, TEM) - rendgenska analiza
Ispitivanje unutrašnjih naprezanja sloja	- rendgenska difrakcija
Određivanje gustoće sloja	- gravimetrija - volumetrija
Ispitivanje triboloških svojstava sloja	- ispitivanje prionjivosti zone spojeva - ispitivanje faktora trenja - ispitivanje otpornosti na trošenje (adhezijsko, abrazijsko)
Ispitivanje mehaničkih svojstava sloja	- metode utiskivanja (mikrotvrdoća, nanotvrdoća)
Ispitivanje korozijske postojanosti (otpornosti) sloja	- ispitivanja u slanoj komori (SS test) - elektrokemijska ispitivanja

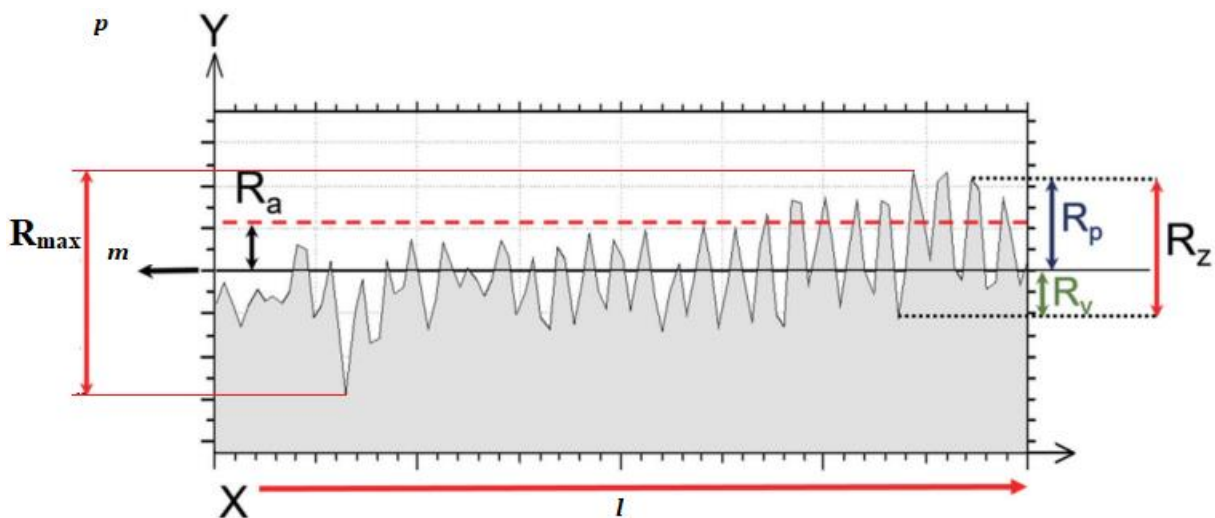
Među najčešće korištenim laboratorijskim ispitivanjima na nitriranom sloju je hrapavost površine. Na temelju vrijednosti parametara hrapavosti površine moguće je pretpostaviti ponašanje obratka prilikom dodira i gibanja u odnosu na neki drugi strojni dio. Hrapavost

površine je mjera fino razmaknutih mikronepravilnosti površinske teksture, koja se sastoji od tri komponente: hrapavost, valovitost i oblik. Razlika između hrapavosti, valovitosti i oblika prikazana je na slici 25. [23]



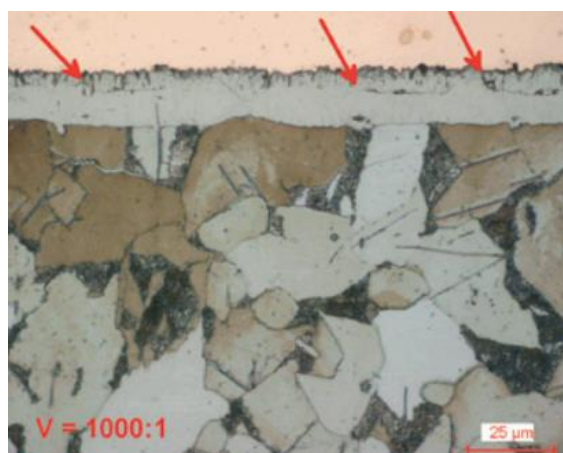
Slika 25. Komponente teksture površine [24]

Svaka obrada ostavlja karakterističnu hrapavost površine, koja može biti više ili manje hrapava. Hrapavost površine prikazuje se pomoću profila hrapavosti koji ima određene komponente. Profil hrapavosti sastoji se od profila p (presjek promatrane površine presječene određenom ravninom) na referentnoj duljini l (dogovorena duljina dijela profila izabranog za određivanje hrapavosti) sa središnjom linijom m (srednja linija profila). Parametri hrapavosti na određenom profilu definirani su normom ISO 4287. Najčešće promatrani parametri hrapavosti su R_a , R_z i R_{max} numerički izraženi u μm . Na slici 26 prikazan je profil hrapavosti s označenim parametrima R_a , R_z i R_{max} . [24]



Slika 26. Prikaz profila hrapavosti [25]

Za analizu nitriranog sloja koriste se metalografska ispitivanja. Metalografskim ispitivanjima analiziraju se debljine zona u nitriranom sloju (zona spojeva i difuzijska zona), te njihov sastav. Metalografska ispitivanja se sastoje od nekoliko koraka. Prvi korak je rezanje uzorka, uzorak je potrebno pobrusiti i pripremiti kako bi se jasno mogla vidjeti mikrostruktura. Sljedeći korak je zalijevanje uzorka s polimernom smolom kako bi se s uzorkom moglo lakše rukovati u sljedećim koracima. Uzorak u polimernoj smoli se zatim polira, odmašćuje, ispire i suši, a zatim se kemijski nagriza kako bi se lakše vidjele razlike u mikrostrukturi uzorka. Posljednji korak je ispiranje i sušenje uzorka, nakon čega se uzorak analiza pomoću svjetlosnog ili elektronskog mikroskopa. Kod obrade nitriranog uzorka treba paziti da ne dođe do otkrhuća porozne zone spojeva ili pucanja difuzijske zone. Oštećenja najčešće dolazi prilikom prve obrade odvajanjem čestica. Uzorak s pukotinama koje su nastale tijekom pripreme prikazan je na slici 27. [26]



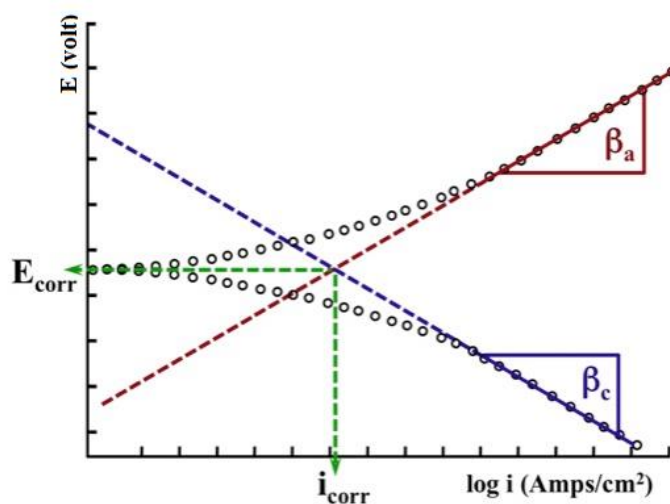
Slika 27. Nitrirani uzorak s pukotinama nastalim tijekom pripreme pod povećanjem x1000 [26]

Kako bi se izbjegle pukotine uzorak je potrebno pažljivo odrezati, najčešće s preciznim uređajem za rezanje pod mlazom vode. Nitrirani uzorci se prije zalijevanja u polimernu smolu ojačanu vlaknima omotavaju u tanku foliju (debljina od 0,05 mm) čistog bakra kako bi se zadržao dobar oblik ruba. Poliranje se provodi s papirom s česticama od silicijevog karbida granulacija 180# ili 220#. Kako bi se osigurao oblik ruba uzorka dodatno se polira pastom s dijamantnim zrcima i krpom od satenskih vlakana, te završnim kratkim poliranjem s dijamantnim zrcima promjera 1 μm . [26]

Prvi pregled nitriranog uzorka provodi se prije nagrivanja kako bi se procijenila debljina porozne zone spojeva, oblik i veličina pora. Zatim se provodi kemijsko nagrivanje u 1-3 % nitalu nakon čega do izražaja dolazi bijela zona spojeva i tamna difuzijska zona kod legiranih

čelika. Na kvalitetu nitriranog sloja utječu pukotine, uključujući i deformacije osnovnog materijala, stoga je potrebno provesti i analizu osnovnog materijala. [26]

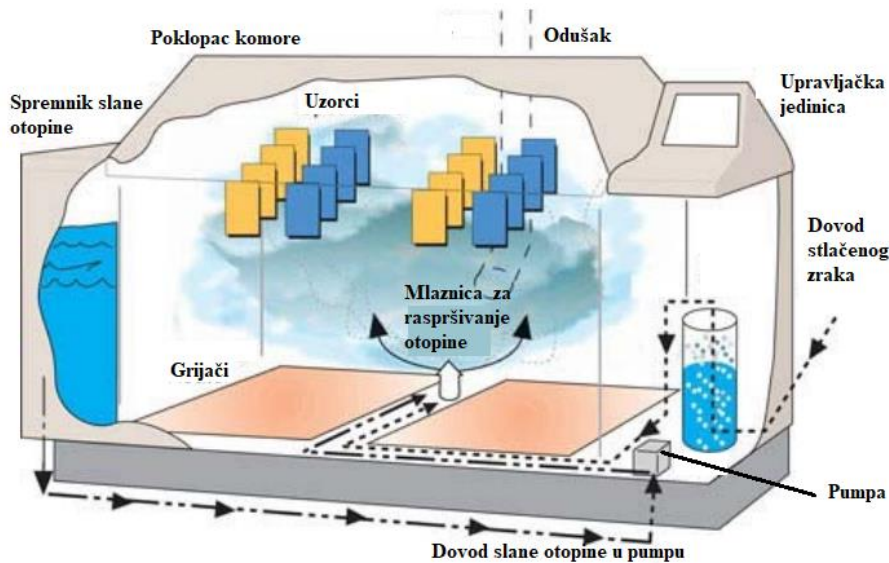
Ispitivanja otpornosti na koroziju koja se provode na nitriranim uzorcima su elektrokemijska ispitivanja i ispitivanje u slanoj komori. Elektrokemijsko ispitivanje se još naziva i „Tafel“ ispitivanje, odnosno ispitivanje jednosmjernom strujom (eng. *Direct Current (DC) Test*). Ispitivanje se provodi tako da se u elektrolit urone tri ćelije: katoda, anoda i ispitni uzorak, te se uzorak polarizira između 0,200 V katodnog korozijskog potencijala (E_{corr}) i 0,200 V anodnog korozijskog potencijala (E_{corr}). Pomoću programa na računalo se analizira promjena korozijskog potencijala anodnog i katodnog članka, te program generira linearne dijelove krivulja korozijskih potencijala. Ekstrapolacijom linearnih dijelova krivulja dobiva se sjecište pravaca i očitava se korozijski potencijal ispitnog uzorka (E_{corr}) i stopu korozije na ispitnom uzorku (i_{corr}). Korozijski potencijal ispitnog uzorka označava potencijal pri kojemu će doći do oštećenja materijala u elektrolitu uslijed djelovanja korozije, a stopom korozije se označava kojom će se brzinom razvijati korozijski produkti, odnosno stopa kojom će se smanjivati debljina uzorka. Na slici 28 prikazane su krivulje korozijskih potencijala i očitavanje ispitanih vrijednosti. [27]



Slika 28. Graf krivulja korozijskih potencijala [27]

Ispitivanje otpornosti na koroziju u slanoj komori (eng. *Salt spray test*) provodi se prema normi ISO 9227:2017. Ispitivanje se provodi tako da su uzorci kontinuirano izloženi slanoj maglici (natrijev klorid koncentracije 5 ± 1 %) na temperaturi od 35 ± 2 °C. Za provedbu ispitivanja je potrebno: slana komora, otopina natrijevog klorida, mlaznica za raspršivanje otopine, senzor pH vrijednosti, senzor temperature i senzor saliniteta. Ispitivanje se može

provoditi s korištenjem različitih slanah otopina. Normom ISO 9227:2017 nije propisano trajanje ispitivanja. Uzorci se nakon nekog vremena unutar slane komore vade i fotografiraju u slučaju daljnjeg ispitivanja uzorci se mogu vratiti u slanu komoru. Na temelju fotografija se analizira otpornost na koroziju ispitnih uzoraka. Osim ispitivanja na koroziju ispitivanjem se može utvrditi postojanost poroznosti ili nekih drugih nedostataka u nitriranom sloju. Na slici 29 prikazana je slana komora s osnovnim dijelovima. [28]



Slika 29. Slana komora [29]

3. Sredstva za podmazivanje

Za normalan rad ležaja potrebna su sredstva za podmazivanje kojima se smanjuje trenje, opterećenje i trošenje ležaja. Sredstva za podmazivanje se dijele prema agregatnom stanju: tekuća maziva (ulja), polučvrsta maziva (mazive masti) i čvrsta maziva. Razlika između masti i ulja je što se za proizvodnju masti koristi ulje kao baza uz dodavanje zgušnjivača. O odabiru sredstva za podmazivanje ovisi nekoliko faktora. Neki od tih faktora su: pristupačnost ležaja tijekom rada, mogućnost rastavljanja ležaja, radni uvjeti poput temperature, brzine vrtnje i opterećenja. Više od 90% svih kotrljajućih ležajeva kao sredstvo za podmazivanje koriste mast, stoga je vrlo bitno razumjeti svojstva i utjecaj masti na rad ležaja. Ležajevi koji se podmazuju mastima se zatvaraju brtvama tijekom svog radnog vijeka, pa je mazivo moguće promatrati kao sastavni dio ležaja. [30]

3.1. Polučvrsta maziva (masti) za podmazivanje strojnih dijelova

Riječ mast dolazi iz latinskog jezika (lat. *crassus*). Podmazivanje se počinje koristiti oko 1400 godina prije Krista. Podmazivale su se osovine kočija, odnosno bojnih kola sa ovčom i goveđom masti. Prije 19. stoljeća najčešće korištena sredstva za podmazivanje bila su trigliceridi, odnosno maziva na bazi životinjskih masti i ulja. Maziva na bazi životinjski masti bi se miješala se s vapnom ili lužinama kako bi se dobila efektivna sredstva za podmazivanje drvenih osovina i jednostavnih strojeva. [30]

Nakon otkrića nafte u Sjedinjenim Američkim Državama 1859. godine većina sredstava za podmazivanje počinje koristiti mineralno ulje kao bazu. Prva moderna polučvrsta maziva su vapneni sapuni ili kalcijevi sapuni koji se danas u eksploataciji malo koriste. Glavni nedostatak ovih maziva je mogućnost korištenja samo pod niskim temperaturama. Do Drugog svjetskog rata razvijena su maziva na bazi litija i natrija. [30]

Između 1930. i 1940. godine dolazi do razvoja novih zgušnjivača za višenamjenska polučvrsta maziva koja se baziraju na kalciju, litiju i bariju. Danas se 50% polučvrstih maziva na tržištu bazira se na litiju. 1992. godine dolazi do razvoja novog polučvrstog maziva čiji se zgušnjivač sastoji od propilena s niskom gustoćom molekula i propilena s visokom gustoćom molekula. [30]

Prednost modernih polučvrstih maziva je mogućnost korištenja u raznim radnim uvjetima. Raspon radni temperatura na kojima se koriste polučvrsta maziva je od $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Moguće ih je koristiti u vakuumskim atmosferama kao što je slučaj kod svemirske opreme. Najčešće se koriste u mokrim ili vlažnim atmosferama, te raznim korozivnim medijima (slana atmosfera, kiseline ili lužine) koji mogu utjecati na rad ležaja. Kemijski sastav polučvrstih maziva moguće je podesiti prema raznim i ekstremnim radnim uvjetima, a koriste se i zbog ekonomske isplativosti i pogodnosti. [30]

Kod polučvrstih maziva mehanizam podmazivanje događa se u dvije faze. Prva faza počinje nakon pokretanja ležaja koji je napunjen mašću. Količina masti u ovoj fazi je dovoljna da u potpunosti odvajaju dijelove ležaja. Dio masti ostaje na vanjskom prstenu, dok dio masti ulazi u dijelove ležaja (npr. kavez s valjnim tijelima) zbog svoje viskoznosti. Ova faza naziva se faza „umućivanja“ ili „bućkanja“ (eng. *churning phase*). Tijekom ove faze tečenje masti ovisi o dizajnu unutarnjih dijelova ležaja i reološkim svojstvima masti. Zbog visoke viskoznosti masti tijekom ove faze dolazi do povećanog faktora trenja i povećanja temperature ležaja. Kod ležajeva koji rade s malo zaustavljanja faza umućivanja traje od par sati do 24 sata, ovisno o količini masti i radnoj brzini ležaja. U ovoj fazi dijelovi ležaja će većinu vremena biti potpuno odvojeni i podmazujući sloj se sastoji od zgušnjivača i baznog ulja masti. [30]

Druga faza podmazivanja pomoću masti naziva se „krvarenje“ masti (eng. *bleeding phase*), odnosno održavanje postojanosti podmazujućeg sloja dolazi uslijed odvajanja ulja iz masti i zbog raspada strukture zgušnjivača. Na slici 30 prikazano je nekoliko različitih polučvrstih maziva. [30]



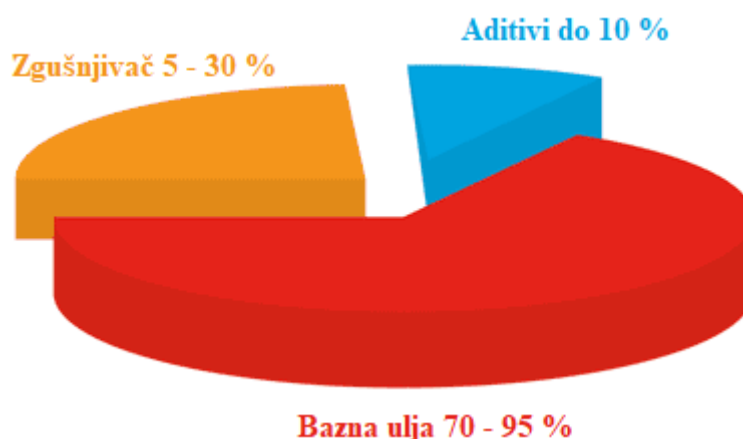
Slika 30. Prikaz polučvrstih maziva s različitim pigmentima [31]

3.1.1. Sastav polučvrstih maziva

Prema Američkom društvu za ispitivanje i materijale (eng. *American Society for Testing and Materials, ASTM*) u normi ASTM D288 polučvrsta maziva su definirana kao „čvrsti do polutekući proizvod ili disperzija sredstva za zgušnjivanje u tekućem sredstvu za podmazivanje“ [19]. Glavne komponente polučvrstih maziva su bazno ulje i zgušnjivač, te po potrebi aditivi kako bi se prilagodila svojstva. [30]

Bazno ulje se koristi kao osnovni dio polučvrstih maziva. Kako se bazno ulje ne bi odvojilo iz masti, potrebno ga je zadržati što se postiže korištenjem zgušnjivača. Bazno ulje čini 70 % do 95 % masti, a u slučaju odvajanja ulja iz masti postoji mogućnost urušavanja strukture vlakana zgušnjivača i mast gubi svoju funkciju. [30]

Zgušnjivač u mastima zauzima 5 % do 30 %, a u mastima služi kao disperzirana faza. Kao zgušnjivači mogu se koristiti: čvrsti ugljikovodici, anorganske ili organske tvari. Zgušnjivači zadržavaju ulje unutar masti pomoću Van der Wallsovih sila i kapilarnog efekta. Između molekula zgušnjivača uspostavljene su dipol-dipol interakcije, vodikove veze, ionske veze ili Van der Wallsove sile. Jakost sila ovisi o kontaktu između vlakana zgušnjivača. Vlakna zgušnjivača mogu biti različite veličine, dužina vlakana je 1 do 100 mikrona, a omjer između dužine i promjera vlakna je 10 do 100. Na slici 31 dijagramom je prikazan sastav polučvrstih maziva. [30]



Slika 31. Sastav i udjeli komponenti u polučvrstim mazivima [32]

3.1.1.1. Bazna ulja

Iz masti se odvajaju ulja koja služe kao podmazujući sloj. Viskozna svojstva baznih ulja utječu na kvalitetu i svojstva masti. Bazna ulja bi trebala ostati tekuća pri svim radnim temperaturama i Hertzovim naprežanjima. Poželjno bi bilo da viskoznost ulja pruža sloj konstantne debljine pri velikom rasponu radnih brzina i temperatura. [30]

Mineralna ulja i trigliceridi su najčešće korištena vrsta baznih ulja, dok se sintetička ulja koriste za posebne primjene (visoke radne temperature i brzine). Ulja na bazi triglicerida dobivaju se iz životinjske masnoće, biljnih sjemenki i voskova. Prirodna bazna ulja ponovno se počinju koristiti zbog minimalnog utjecaja na okoliš. Imaju jako ograničen raspon primjene, ali imaju dobru biorazgradivost, te se koriste gdje je prihvatljiva visoka potrošnja i gubitak masti u osjetljivim okolišima. [30]

Mineralna bazna ulja su najčešća vrsta ulja za podmazivanje i za proizvodnju polučvrstih maziva. Pogodna su za podmazivanje strojnih dijelova zbog niske cijene, velike rasprostranjenosti u prirodi i različitih razina viskoznosti. Na viskoznost mineralnih baznih ulja najviše utječe težina molekula, dužina molekula i grananje molekula ugljikovodika. Ostaju tekuća pri velikom rasponu temperatura i radni pritisaka, te omogućavaju postojanost uljnog filma. Stabilna su i imaju dobru oksidacijsku stabilnost do temperaturi od 100 °C. Također zbog svoje hidrofobnosti odbijaju vodu i tako štite metalne dijelove od pojave korozije. Pogodna su za korištenje s raznim zgušnjivačima i aditivima. Molekule ugljikovodika se najčešće sastoje od minimalno 25 atoma ugljika. Mineralna bazna ulja se proizvode destilacijom i pročišćavanjem iz sirove nafte i dijele se u tri kategorije: parafinska, naftenska i aromatična ovisno o kemijskom sastavu. [30]

Sintetička bazna ulja su sredstva za podmazivanje koja se proizvode, odnosno sintetiziraju, iz jednog ili više komponenti. Kombiniraju se sirovi materijali koji ima nisku molekularnu masu i dobra podmazujuća svojstva. Za proizvodnju sintetičkih baznih ulja najčešće se koriste materijala na bazi zemnog plina ili nafte, a mogu se koristiti i prirodni materijali (životinjsko salo i ulje iz sjemenki biljaka) ili ugljena i ugljeni plin putem Fischer-Tropsch sinteze. Za razliku od mineralnih ulja, sintetička ulja imaju sređenu molekularnu strukturu sa definiranom raspodjelom mase, fizičkim i kemijskim svojstvima. Zbog uređene strukture imaju veću cijenu, ali su isplativa zbog dobrih svojstava i imaju raznoliku primjenu. Najčešća sintetička bazna ulja su: organski esteri, poli-alfa-olefini (PAO) sintetički ugljikovodici, perfluoropolieteri (PFPE) i silikoni. Imaju veliki raspon radnih temperatura (veći raspon od mineralnih i prirodnih baznih ulja), niski stupanj isparavanja, visoki indeks viskoznosti, izvrsnu svojstva pri niskim temperaturama i dobru otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama. [30]

3.1.1.2. Zgušnjivači

Zgušnjivači određuju osnovna svojstva polučvrstih maziva i prema vrsti zgušnjivača se dijele u različite skupine. Postoji puno vrsti zgušnjivača koji se koriste. Zgušnjivači se mogu podijeliti u 3 skupine ovisno o njihovoj načinu nastanka (prirodi), prema načinu djelovanja na bazno ulje i prema mehanizmu zgušnjavanja. Prva skupina su polimorfni zgušnjivači ne utječu na svojstva baznog ulja pri sobnoj temperaturi ili s onim uljima koja tvore koloidne disperzije na visokim temperaturama (primjer su: sapunski zgušnjivači (eng. *Soaps*)). U drugu skupinu spadaju netopivi zgušnjivači. To su toplinski stabilni zgušnjivači organskog i anorganskog podrijetla koji nisu topivi u baznim uljima i kod kojih ne dolazi do fazne pretvorbe pri povišenju temperature (primjer su: silikonski gelovi i razni pigmenti). U treću skupinu spadaju zgušnjivači koji nemaju polimorfna svojstva, ali se tope pri relativno niskim temperaturama i tvore homogene otopine u uljima kada je temperatura ulja na višoj temperaturi od temperature talište zgušnjivača (primjer su: čvrsti ugljikovodici). [30]

3.1.1.3. Aditivi

Aditivi su kemijski spojevi koji se dodaju u polučvrsta maziva kako bi se poboljšala svojstva tijekom rada. U masti na bazi mineralnih ulja moraju imati aditive koji suzbijaju oksidaciju pri korištenju na povišenim temperaturama. U kombinaciji s aditiva za suzbijanje oksidacije se često koriste i aditivi za suzbijanje nastanka hrđe. Osim u tim primjenama aditivi se dodaju kako bi se utjecalo na: viskoznost pri određenim temperaturama, otpornost na udarce

(ne dolazi do smanjenja podmazivanja tijekom dinamičkog rada), smanjenje vrijednosti faktora trenja (pri visokim opterećenjima), smanjenje trošenja ili neka druga potrebna svojstva. Najčešće se koriste sljedeći aditivi: inhibitori korozije (sprječavaju djelovanja korozije na metalne dijelove), antioksidansi i aditivi za rad pri visokim pritiscima i visokom trošenju (eng. *Extreme pressure/Anti-wear Additives*). [30]

3.1.2. Utjecaj radne temperature na viskoznost polučvrstih maziva (masti)

Viskoznost je jedno od najbitnijih svojstava polučvrstih maziva, a najveći utjecaj na promjenu viskoznosti ima radna temperatura. Radna temperatura u ležaju raste s porastom opterećenja i brzine. S povećanjem temperature dolazi do znatnog smanjenja viskoznosti polučvrstog maziva i opada kvaliteta podmazivanja. Sa smanjenim podmazivanjem dolazi do povećanog trošenja ležaja nakon čega dolazi do oštećenja ili loma ležaja. Postoje različiti modeli i jednadžbe koje opisuju kako dolazi do promjene viskoznosti ovisno o temperaturi. Jednadžbe se temelje na teoriji fluida, a razlikuju se u tome kako interpoliraju promjenu viskoznosti pri promjeni temperature. [30]

Jednadžbom 6 je opisana ovisnost viskoznosti o temperaturi, a modelirana je pomoću teorije apsolutne brzine reakcije u 1930.-im godinama. [30]

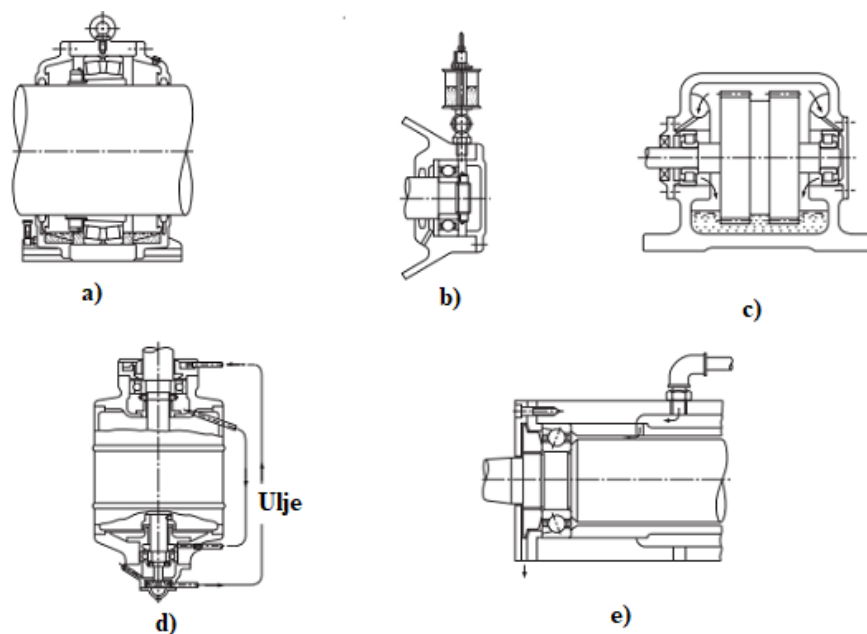
$$\eta = \frac{h * N}{V} \exp\left(\frac{\Delta E}{R * T}\right) \quad (6)$$

U jednadžbi 6 korišteni su sljedeći izrazi: h (Plankova konstanta), N (Avogadrov broj), V (volumen molekula), ΔE (aktivacijska energija viskoznog toga, slobodna aktivacijska energija), R (plinska konstanta), T (temperatura u kelvinima). U ovoj jednadžbi se koristi teorija fluida za predviđanje viskoznosti i često se koristi u molekularnim dinamičkim simulacijama. [30]

3.2. Tekuća maziva

Tekuća maziva koja se koriste za podmazivanje komponenti dijele se u tri kategorije: mineralna, sintetička i „bio“ ulja. Za razliku od polučvrstih maziva u tekuća maziva se ne dodaje zgušnjivač, te sastav čine bazno ulje i aditivi koji se dodaju radi mijenjanja određenih svojstava. Kod biranja ulja za podmazivanje najvažniji parametri su: viskoznost, svojstva graničnog podmazivanja (pri kojim uvjetima dolazi do pojave podmazujućeg filma) i vrsta aditiva. Viskoznost ima jako veliku važnost, jer prilikom preniske viskoznosti ne dolazi do stvaranja uljnog filma koji služi za odvajanje i podmazivanje strojnih dijelova u radu. Ako je tijekom rada viskoznost prevelika dolazi do nepotrebnih gubitaka energije. [30]

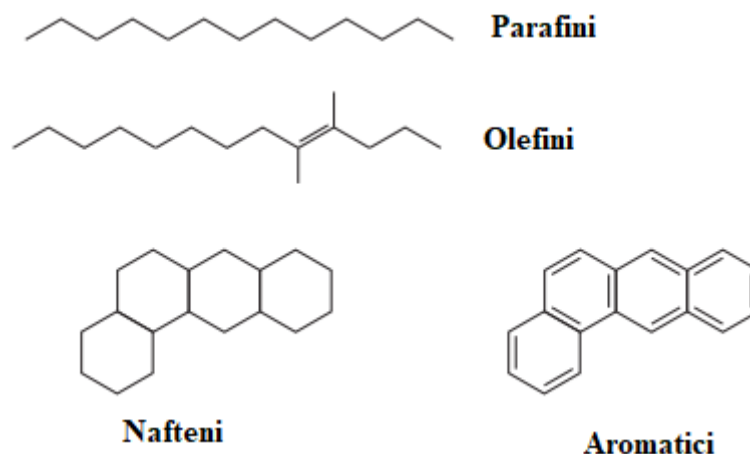
Kao tekuća maziva najviše se koriste pročišćena mineralna i sintetička ulja, a „bio“ ulja se koriste zamjena gdje može doći do velikog onečišćenja okoliša. Podmazivanje se može provoditi na više načina, a neki od tih načina su: podmazivanje u uljnoj kupci (strojni dio je potpuno potopljen u ulju), dodavanje ulja kap po kap (iz spremnika ulja se podmazuje u određenim vremenskim intervalima), podmazivanje zapljuskivanjem (dolazi do zapljuskivanja strojnog elementa zbog gibanja strojnog dijela koji se nalazi u blizini), kružno podmazivanje (sustavom se dovodi i odvodi ulje koje stalno kružni unutar strojnog sklopa), podmazivanje maglicom ulja (podmazivanje se vrši sprejanjem ulja po strojnom dijelu) i druge metode. Na slici 32 shematski su prikazani različiti načini podmazivanjem ulja. [6]



Slika 32. Načini podmazivanja uljem: a) uljna kupka, b) kap po kap, c) zapljuskivanjem, d) kružno, e) maglica ulja [6]

3.2.1. Parafinska ulja

Iz kategorije mineralnih ulja najčešće se koriste parafinska. Parafinska ulja se sastoje od mješavine alkana, odnosno ugljikovodika kod kojih su ugljikove veze zasićene vodikom. Lanci s ugljikovodicima mogu biti ravni ili razgranati (poželjna je razgranatija struktura), a prema polaritetu su nepolarna i nemaju mogućnost otapanja nekih polarnih aditiva kao što imaju olefinska (alkenska) ili naftenska ulja. Unatoč tome parafinska ulja imaju najbolju otpornost na oksidaciju i vrlo su stabilna pri promjeni temperature, odnosno imaju zadovoljavajuću viskoznost koja se malo mijenja pri promjeni temperature. Osim parafinskih mineralnih ulja, još se koriste olefinska, naftenska i aromatska ulja. Na slici 33 prikazane su strukture mineralnih ulja za podmazivanje. [30]



Slika 33. Struktura molekula mineralnih ulja [30]

3.2.2. Polialfaolefinska ulja

Sintetička ulja se koriste u posebnim uvjetima rada, a najveća prednost je što im se svojstva mogu prilagoditi uvjetima rada. Zato što se proizvode umjetnim putem moguće je prilagoditi sastav kako bi se dobila maksimalna efikasno u određenim uvjetima rada. Za podmazivanje iz skupine sintetičkih ulja najčešće se koriste polialfaolefinska (PAO) ulja. Ova vrsta ulja je u potpunosti sintetičko ulje pošto se proizvodnja provodi u strogo kontroliranim uvjetima, a proizvode se čistih alfaolefina koji su sintetičke molekule. PAO ulja se počinju proizvoditi 1950.-ih godina te se stalno unaprjeđuju. Postoji puno proizvođača polialfaolefinskih ulja u svijetu koji ih proizvode s različitim formula, odnosno omjerima raznih aditiva. Koriste se u uvjetima u kojima se ne mogu koristiti mineralna ulja zbog njihovih ograničenja u radu. Neke od prednosti PAO ulja nad mineralnim uljima su: veliki raspon radnih temperatura, visoki indeks viskoznosti, velika stabilnost pri promjeni radne temperature, velika stabilnost u oksidativnim medijima, dobra otpornost na koroziju, mala otrovnost i druga. [33]

PAO ulja se proizvode reakcijom u dva koraka iz linearnih alfaolefina koji se proizvode iz etilena. Prvi korak je sinteza mješavine oligomera koji su polimerne molekule s relativno malom molekularnom masom. U proizvodnji polialfaolefinskih ulja s malom viskoznošću potrebno je koristiti katalizator za reakciju oligomerizacije, najčešće se koristi bor trifluorid (BF_3) u plinovitom stanju. Drugi korak je hidrogenacija nezasićenih oligomera. Hidrogenacija se može provoditi prije ili poslije destilacije, a destilacija se provodi kako bi se uklonili monomeri koji nisu izreagirali u prvom koraku. Tijekom proizvodnje moguće je mijenjati svojstva ulja prema potrebi. U reakciji je moguće mijenjati sljedeće varijable: duljina olefinskog lanca, temperatura postupka, vrijeme, tlak, količina katalizatora i druge. [33]

PAO ulja se najčešće koriste za podmazivanje koljenastih vratila kod automobila. Primjerice u „Porsche“ automobilima se koriste SAE (eng. *The Society of Automotive Engineers*) 5W-40 i SAE 10W-40 ulja proizvođača „Mobil 1“. Kod automobila se prilikom korištenja tih ulja pokazalo da se povećava čistoća unutar motora, povećana je iskoristivost goriva, povećana je iskoristivost ulja, pruža otpornost na oksidaciju pri visokim temperatura i druga poboljšanja u radu motora. [33]

Osim polialfaolefina, sintetička ulja koja se često koriste za podmazivanje strojeva su: različiti esteri, silikoni, polifenil eteri, prstenasti ugljikovodici i drugi. [33]

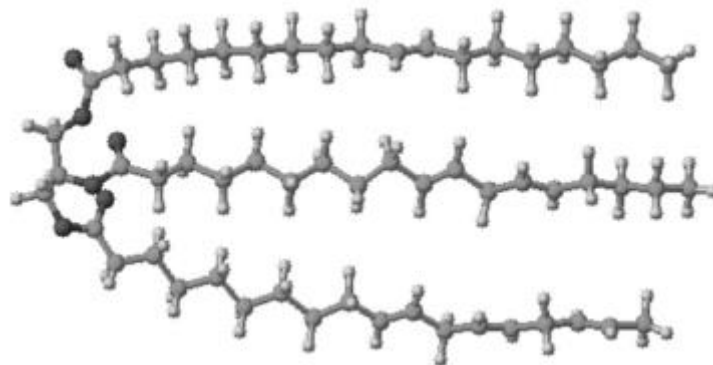
3.2.3. *Ulja na biljnoj bazi*

Bio ulja su ulja proizvedena iz biljaka. Proizvode se sa svrhom očuvanja prirode i smanjenja štetnih djelovanja sintetičkih ulja na okoliš. Ulja proizvedena na biljnoj bazi nemaju štetnih utjecaja na okoliš i imaju dobru biorazgradivost. Biorazgradivost je razvojem tehnologija i povećanjem svijesti o okolišu postala jedan od bitnijih parametara u postupku razvoja proizvoda, pa tako i ulja koja se koriste u strojevima. Ulje je bio razgradljivo ako dođe do njegovog raspada u prirodi u određenom vremenskom periodu koji se utvrđuje ispitivanjima biorazgradivosti. Raspad ulja se odnosi na njegovu mikrostrukturu, dolazi do pretvorbe fluida u molekule male molekularne mase koje nemaju utjecaja na okoliš. Ovisno o kemijskom sastavu različita ulja imaju različito vrijeme raspada. [33]

Donošenjem zakona na lokalnoj i nacionalnoj razini u Europskim državama (Njemačka, Austrija i Skandinavske države) o potrebi za biorazgradivim uljima dolazi do propisivanja zahtjeva koji moraju biti ispunjeni prilikom razvoja ulja ili strojeva. Dok se u Sjedinjenim Američkim Država bio uljima pokušava zamijeniti skupa sintetička ulja koja dolaze iz uvoza. Potreba za bio uljima izražena u poljoprivrednoj industriji gdje prilikom rada može doći do istjecanja ulja iz strojeva na poljoprivredne površine čime dolazi do negativnog utjecaja na biljke i životinje. [33]

Osim biorazgradivosti ulja na biljnoj bazi su također obnovljiva i troškovi prolijevanja tijekom oštećenja transportnih vozila nisu veliki i pogubni za okoliš kao kod prolijevanja sintetičkih ulja ili nafte. Trošak proizvodnje bio ulja je dvostruko veći nego proizvodnja sintetičkih ulja, ali troškovi prolijevanja i čišćenja su znatno manji što pozitivno utječe na razvoj bio ulja. Nedostatak bio ulja su njihova svojstva koja su lošija od ostalih vrsti tekućih maziva (smanjenja oksidacijska stabilnost, slaba otpornost na zapaljenje i loša svojstva pri niskim temperaturama). [33]

Prema kemijskom sastavu bio ulja se primarno sastoje od triglicerida. Trigliceridi su spojevi koji se sastoje od glicerolnog glavnog lanca na koji su spojeni lanci masnih kiselina. Masne kiseline su dugi lanci s malim stupnjem grananja alifatskih kiselina sa atomima ugljika spojenih s vodikom i karboksilnom kiselinom. Ovisno o kemijskom sastavu bio ulja moguće je dobiti različita svojstva ovisno o primjeni. Bio ulja imaju visoku viskoznost, otprilike dvostruko veću viskoznost od mineralnih ulja. Većina bio ulja u svojoj mikrostrukturi se sastoji od 16 do 18 atoma ugljika zbog čega imaju slična svojstva, a visoka viskoznost ih ograničava u njihovoj primjeni. Viskoznost se može smanjiti dodavanjem viskoznih sintetičkih polimera ili putem postupka dodatne termalne polimerizacije. Na slici 34 je prikazana struktura triglicerida. [33]



Slika 34. Prikaz molekule triglicerida [33]

4. Ispitivanje karakteristika maziva i ležajeva u eksploataciji

Kako bi se mogao odabrati najbolje mazivo za neki stroj potrebno je provesti ispitivanja kompatibilnosti maziva s materijalom ležaja i radnim uvjetima stroja. Osim ispravno provedenog ispitivanja potrebno je i znanje kojim se može točno interpretirati dobivene rezultate ispitivanja. Ispitivanja se dijele u dvije skupine: kemijsko fizikalna i mehaničko dinamička. Ako tijekom rada ležaja dođe do oštećenja dolazi do promjena u radu. Kako ne bi došlo do većeg kvara rad ležajeva se prati sensorima. Najčešći parametri praćenja su pojava vibracija i šuma, te porast temperature ležaja.

4.1. Ispitivanja karakteristika maziva

Kemijsko fizikalnim ispitivanjima se ispituju točno određena svojstva maziva, dok se mehaničko dinamičkim ispitivanjima ispituju svojstva prilikom simulacije radnih uvjeta ležaja (opterećenje, brzina, medij, radna temperatura i trošenje). Najveći nedostatak ovih ispitivanja je u izvedbi jer ne postoji univerzalna testna oprema na kojoj bi se izvodilo ispitivanje. Tijekom ispitivanja ispitivač se oslanja na pretpostavku da testna oprema najbolje opisuje stvarni stroj.

Taj problem se najviše primijeti kada postoje samo nacrti stroja za koji se mora odabrati mazivo. Dok se kemijsko fizikalna ispitivanjima ispituju određena svojstva, mehaničko dinamička ispitivanja imaju drugačiju svrhu. Interpretacijom rezultata se: određuje zadovoljavaju li svojstva maziva tražena svojstva, određuje primjenu maziva, omogućuje provjeru kvalitete maziva i standardizaciju, te usporedbu rezultata različitih maziva. Svojstva masti koja se ispituju kemijsko fizikalnim ispitivanjima prikazani su u tablici 3. [34]

Tablica 3. Ispitivana svojstva masti za podmazivanje [34]

Svojstvo	Norma
Tekstura	-
Gustoća	DIN 51757
Viskoznost	DIN 51561
Unutarnja viskoznost	DIN 53018
Korozivnost metala	DIN 51811
Otpornost na oksidaciju	DIN 51808
Otpornost na vodu	DIN 51807
Razdvajanje ulja	DIN 51817

U tablici 4 se nalaze svojstva koja se ispituju kemijsko fizikalnim ispitivanjima za ulja za podmazivanja. [34]

Tablica 4. Ispitivana svojstva ulja za podmazivanje [34]

Svojstvo	Norma
Boja	DIN 51411
Gustoća	DIN 51757
Temperatura zapaljenja	DIN ISO 2592
Sadržaj „pepela“	DIN 51575 DIN EN 7
Viskoznost	DIN 51561
Emulzivnost	DIN 51589
Gubitak izgaranjem	DIN 51581
Točka tečenja	DIN ISO 3016

4.2. Mehaničko dinamička ispitivanja

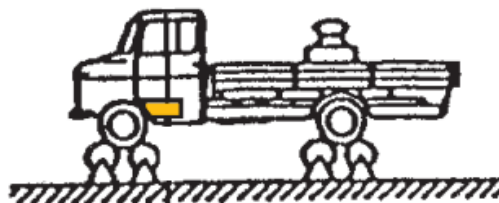
Kod mehaničko dinamičkih ispitivanja se ispituje ponašanje sredstva za podmazivanje u stvarnim uvjetima. Prema vrsti ispitivanja su podijeljena u 6 kategorija. [34]

U prvu kategoriju spadaju ispitivanja na terenu ili praktična ispitivanja. Prati se rad stroja koji se ispituje u stvarnim uvjetima rada. Na slici 35 je prikazano ispitivanje na primjeru vozila. [34]



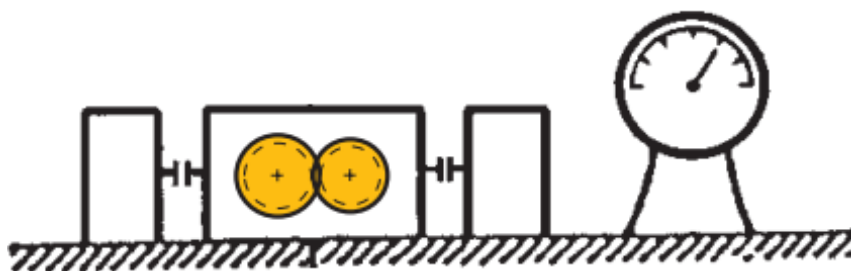
Slika 35. Prva kategorija ispitivanja (terenska ispitivanja) [34]

U drugoj kategoriji ispitivanja stroj (vozilo) se postavlja na uređaje za ispitivanje (ispitni valjci), a teret koji se prevozi zamjenjuje se utezima. Drugom kategorijom se zamjenjuju stvarni uvjeti rada s opremom koja oponaša radne uvjete, odnosno ispitivanje je prilagođeno laboratorijskim uvjetima. Ovom kategorijom ispitivanja se omogućava ponovljivost ispitivanja. Druga kategorija ispitivanja prikazana je na slici 36. [34]



Slika 36. Druga kategorija ispitivanja [34]

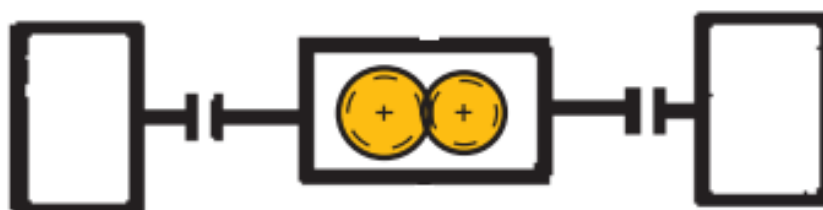
U treću kategoriju spadaju ispitivanja komponenti i utjecaj sredstva za podmazivanje na njihov rad. Za ispitivanje se uzimaju dijelovi stroja koji se ispituju, ispitivanja se provode u kontroliranim uvjetima. Uvjetima se okušava oponašati stvarne radne uvjete. Ispitivanje komponenti je prikazano na slici 37. [34]



Slika 37. Treća kategorija ispitivanja (ispitivanje komponenti) [34]

Prve tri kategorije ispitivanja odnose se na provedbu ispitivanja u stvarni ili približno stvarnim radnim naprežanjem, a ispitivanja se provode na strojevima ili njihovim komponentama. U kategorijama 4,5,6 ispitivanja se provode na ispitnoj opremi na sustavima koji oponašaju rad stvarnih dijelova ili strojeva. [34]

U četvrtu kategoriju spadaju ispitivanja koja se provode na umanjenim dijelovima stroja, umanjene komponentne se ispituju u laboratorijskim uvjetima. Četvrta kategorija ispitivanja je prikazana na slici 38. [34]



Slika 38. Shematski prikaz četvrte kategorije ispitivanja [34]

U petu kategoriju spadaju ispitivanja koja se izvode s pojednostavljenim modelom sustava koji se promatra. Kod pojednostavljenog modela oponašaju se radni uvjeti. Dolazi do geometrijskog pojednostavljenja komponenti (zupčanci se zamjenjuju diskovima koji oponašaju gibanje zupčanika u radu) ili dolazi do promjene načina rada kako bi se olakšala provedba ispitivanja. Peta kategorija ispitivanja prikazana je na slici 39. [34]



Slika 39. Shematski prikaz pojednostavljenja u petoj kategoriji ispitivanja [34]

U posljednju, šestu kategoriju spadaju ispitivanja kojima se pojednostavljeni modeli ispituju na prilagođenoj ispitnoj opremi i uređajima za ispitivanje. U ovoj kategoriji ispitivanja dolazi do potpune prilagodbe sustava koji se ispituje laboratorijskim uvjetima koji ne moraju odgovarati pravim radnim uvjetima, te geometrija ispitnih uzoraka ne mora odgovarati komponentama koje se ispituju. Ova vrsta ispitivanja se provodi zbog ekonomičnosti provedbe ispitivanja. Shematski prikaz šeste kategorije ispitivanja je prikazan na slici 40. [34]

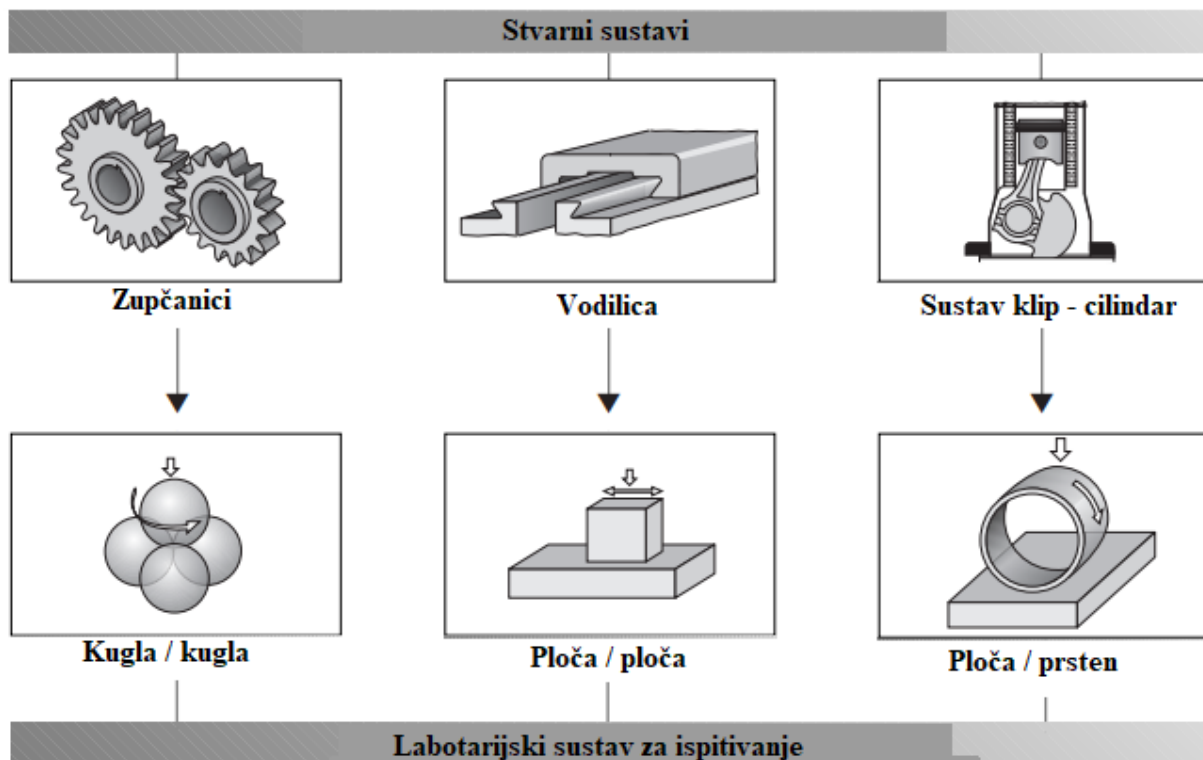


Slika 40. Shematski prikaz pojednostavljenja u petoj kategoriji ispitivanja [34]

Zbog visoke cijene provedbe praktičnih ispitivanja i ispitivanja s testnom opremom (prva i druga kategorija ispitivanja) najčešće se provode ispitivanja na modelima i pojednostavljenim komponentama (ispitivanja iz treće, četvrte, pete i šeste kategorije). Pojednostavljenjem modela koji se ispituje on se reducira na tribološki sustav na kojem se provode ispitivanja kojima se ispituje kako opterećenje utječe na pojavu trenja i traga trošenja na komponentama ovisno o vrsti sredstva za podmazivanje. [34]

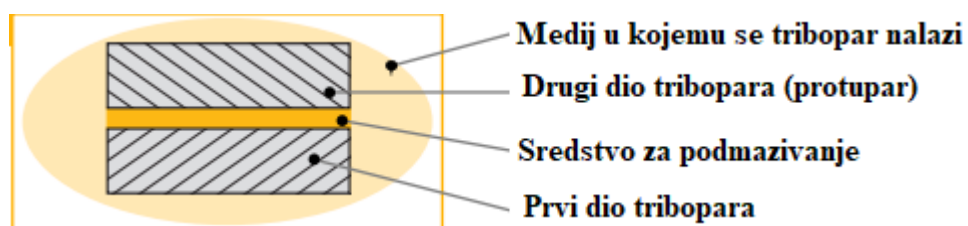
4.3. Postupak pojednostavljenja tribosustava

Sustavi koji omogućuju ili prenose gibanje kod strojeva su komplicirane geometrije, a jednačbe koje se koriste za proračun naprezanja su složene i ima sadrže puno utjecajnih faktora. Stoga se svaki sustav pokušava pojednostaviti. Pojednostavljenje sustava omogućava ponovljivost ispitivanja i lakšu analizu rezultata, dok se pri tome smanjuju troškovi. Pojednostavljenje sustava prikazano je na slici 41. [34]



Slika 41. Primjer pojednostavljenja sustava [34]

Pojednostavljenjem se složeni sustav pretvara tribološki par kojim se oponaša ponašanje stvarnog sustava. Tribologija je znanost koja se bavi dizajnom, trenjem, trošenjem i podmazivanjem površina koje se međusobno relativno gibaju. Komponente tribološkog sustava prikazane su na slici 42. [34]

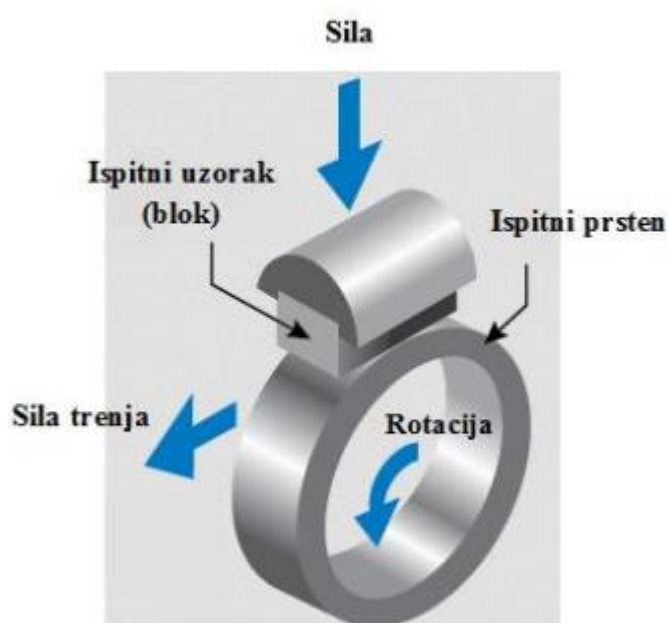


Slika 42. Prikaz tribološkog sustava [34]

Prilikom ispitivanja tribopara moguće je u laboratorijskim uvjetima namjestiti radne uvjete. Radni uvjeti koji se kontroliraju tijekom ispitivanja su: temperatura, opterećenje, brzina gibanja, trajanje ispitivanja, geometrija tijela koja se dodiruju, materijal, medij u kojemu je tribopar i druge parametre. [34]

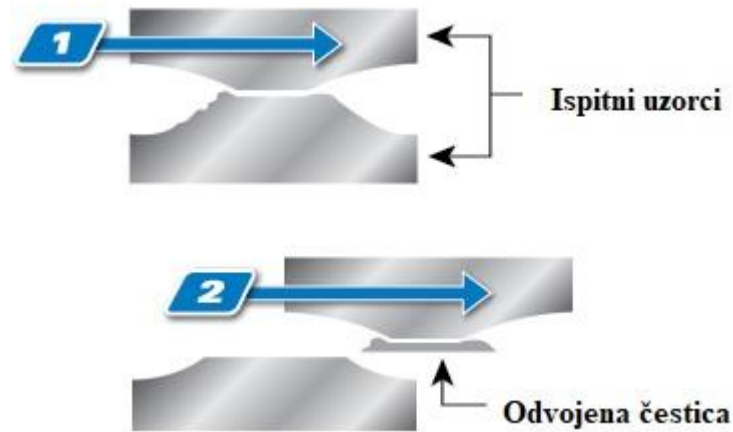
4.4. Ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje metodom klizanja prizme po prstenu

Ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje od trošenje klizanjem metala po metala provodi se prema normi ASTM G77. Rezultati se prikazuju kao gubitak volumena u mm^3 na oba člana tribopara (prsten i prizma). Materijali s većom otpornošću na trošenje imat će manji gubitak volumena. Tijekom ispitivanja se također mogu ispitati faktori trenja za određene triboparove. Prema normi ispitivanje se provodi na putu trošenja od 3000 metara s fiksnim normalnim opterećenjem F_N iznosa 136,07 kilograma. Za vrijeme trajanja ispitivanja prsten mora rotirati kutnom brzinom od 300 okretaja u minuti. Na slici 43 shematski je prikazana provedba ispitivanja metodom prizme po prstenu. [35]



Slika 43. Shematski prikaz ispitivanja metodom prizme po prstenu [35]

Do adhezivnog trošenja dolazi kada dođe do kontakta pod opterećenjem između neravnina na površina ispitivanih uzoraka pri tome dolazi do nastanka jako velikog pritiska iz relativno male sile. Do velikog pritiska dolazi jer se kontakt i sila ostvaraju na jako maloj površini dodira. Trenje do kojeg dolazi prilikom dodira zagrijava područje kontakta i stvara se mikrozavar dva materijala zbog daljnjeg gibanja prstena i prizme dolazi do pucanja mikrozavara i materijal se odnosi s površine ispitnih uzoraka. Kada do te pojave dođe u sklopu stroja, čestica koja se odlomi od strojnog dijela može dalje djelovati na ostale dijelove sklopa mehanizmom abrazije. Na slici 44 je prikazano adhezijsko trošenje. [35]



Slika 44. Djelovanje adhezivnog trošenja [35]

U ispitivanju se ispitni uzorak od prizme učvrsti u držač ispitnih uzoraka, a prsten se montira na osovinu koja je spojena na elektromotor. Podaci ispitivanjae snimaju sensorima, te se kasnije mogu analizirati raznim računalnim programima.

4.5. Prednosti i troškovi triboloških ispitivanja

Ispitivanja se mogu podijeliti u tri karakteristične skupine: praktična ispitivanja (ispitivanje rada cijelih strojeva), ispitivanja komponenti (ispituju se samo pojedine komponente stroja, npr. zupčanici, ležajevi), ispitivanja modela (pojednostavljeni modeli stvarnih sustava). Prednosti i nedostaci ovisno o razini pojednostavljenja sustava prikazani su u tablici 5. [34]

Tablica 5. Prednosti i nedostaci kategorija ispitivanja [34]

	Praktična ispitivanja	Ispitivanja komponenti	Ispitivanja modela
Primjena	Identična primjena	Identična primjena ili razvoj	Osnovna analiza (fenomeni)
Uzorak	Originalni stroj ili uređaj	Jednostavni dijelovi i komponente	Jednostavna dodirna geometrija
Praćenje parametara ili pojedinosti	Moguće u određenoj mjeri	Ponekad moguće	Moguće
Određivanja kriterija neuspjeha	Moguće u određenoj mjeri	Ponekad moguće	Moguće
Primjena u stvarnim radnim uvjetima	Jednako	Ponekad jednako	Jednako u određenoj mjeri
Troškovi ispitivanja	Niski do visoki	Srednji do visoki	Niski do srednji
Vrijeme trajanja	Dugo	Srednje dugo	Kratko

Cijela laboratorijske opreme za tribološka ispitivanja ovisi o mogućnostima uređaja na kojima se ispituje (rasponi brzina gibanja, temperatura, opterećenja, momenata, vrstama mjerenja i brzini procesuiranja rezultata ispitivanja). Prosječna cijena uređaja za ispitivanja modela iznosi 5000 € do 75000 €, dok je prosječna cijena uređaja za ispitivanje komponenti 15000 € do 250000 €. Dodatni troškovi nastaju zbog održavanja i korištenja ispitne opreme, te nadogradnje osnovne opreme s dodatnim sensorima. Na troškove utječu plaće radnika koji rade za tim uređajima, jer će za rad na kompleksnijim uređajima biti potrebni radnici s većim znanjem čime će porasti cijena rada. [34]

Kada se uračunaju svi troškovi, cijena ispitivanja na modelu s analizom ispitivanja košta 50 € do 500 €, dok ispitivanje komponenti može koštati nekoliko 1000 €. S obzirom na cijenu mehaničko dinamička ispitivanja su isplativa, jer troškovi odabira krive vrste sredstva za podmazivanje mogu biti izrazito veliki. Zbog odabira krive vrste sredstva za podmazivanje može doći do štete na strojevima, a štete će uzrokovati velike troškove zbog oštećenja uređaja i troškova popravka, te troškova zastoja i dodatnih troškova. Proizvodnjom sredstva za

podmazivanja koja su specijalno izrađena za stroj može biti skupo, ali je isplativo jer osigurava dug radni vijek uređaja i rad bez visokog rizika čime se ulaganje može brzo isplatiti. [34]

4.6. Ispitivanja svojstava masti i ulja

Postoji veliki broj ispitivanja koja se provode sa ciljem odabira optimalnog sredstva za podmazivanje. Jedan dio ispitivanja je standardiziran prema DIN i ASTM normama, dok je drugi dio ispitivanja propisan ovisno o proizvođaču ili laboratoriju koji provodi ispitivanje. U tablici 6. navedeno je nekoliko mehaničko dinamička ispitivanja (oprema) i njihova primjena. [34]

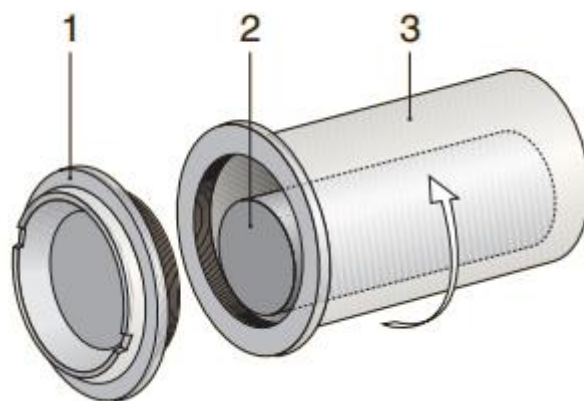
Tablica 6. Ispitivanja (oprema za ispitivanje) svojstava maziva u različitim uvjetima [34]

Ispitivanje (oprema)	Primjena
Ispitivanje stabilnosti valjkom (eng. <i>Roll stability tester</i>)	Određivanje mehaničke stabilnosti, razdvajanja i promjene u konzistenciji masti
Oprema za ispitivanje sa zupčanicima (eng. <i>CV-joint test rig</i>)	Određivanje radnog vijeka masti kod zupčanika
Ispitivanje trošenja uslijed oscilacijskog djelovanja trenja (eng. <i>Oscillation friction wear tester</i>)	Određivanje utjecaja maziva (masti i ulja) i prevlaka na tribokoroziju u uvjetima konstantnog opterećenja i oscilatornog klizanja
EMCOR uređaj (eng. <i>EMCOR-machine, SKF-EMCOR method</i>)	Određivanje antikorozivnih svojstava masti za podmazivanje
Reichertov test trošenja (eng. <i>Reichert fretting wear tester</i>)	Određivanje nosivog opterećenja ležaja ovisno o ulju u uvjetima mješovitog trenja
Ispitivanje trenja klizanja (eng. <i>Sliding friction test rig</i>)	Određivanje krivulje sile trenja i trošenja ovisno o mazivu (masti i ulja)
Ispitivanje momenata kod kotrljajućih ležajeva (eng. <i>Rolling bearing torque tester</i>)	Određivanje početnog momenta i momenta u radu kotrljajućih ležajeva ovisno o mazivu (masti i ulja)

4.6.1. Ispitivanje stabilnosti podmazivanja valjka u cilindru

Ispitivanje se provodi kako bi se odredila mehanička stabilnost, promjene u konzistenciji i razdvajanje masti od ulja. Postupak je standardiziran prema normi ASTM D 1831. Prema normi određeni su uvjeti ispitivanja. [34]

Uvjeti ispitivanja se sastoje od trajanja ispitivanja, količini maziva koja se primjenjuje, brzina vrtnje i temperatura. Prema normi propisano trajanje ispitivanja je 2, 50 ili 100 sati, količina masti treba iznositi 55 cm^3 ili 50 grama za masti koje imaju gustoću $0,9 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, brzina vrtnje mora biti 165 r/min (rotacija u minuti), te temperatura može biti sobna, $70 \text{ }^\circ\text{C}$, $100 \text{ }^\circ\text{C}$, $130 \text{ }^\circ\text{C}$ ili $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Mazivo se unutarnju stijenku vanjskog valjka unutar kojeg se nalazi manji (unutarnji) valjak težine 5 kilograma. Na vanjski valjak se stavlja poklopac s navojem, kako ne bi dolazilo do curenja maziva. Sklop je prikazan na slici 45. [34]



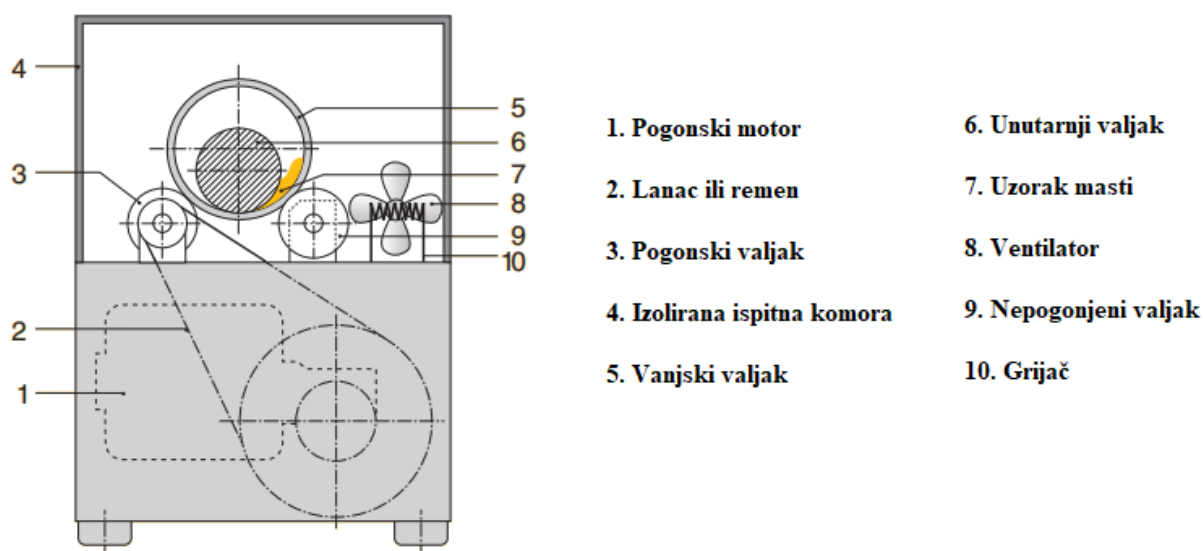
1. Poklopac s navojem

2. Unutarnji valjak

3. Vanjski valjak

Slika 45. Prikaz valjaka za ispitivanje maziva [34]

Ispitivanje se provodi tako da se propisana količina maziva nanosi na unutarnju stijenku vanjskog valjka, unutarnji valjak se stavlja u vanjski i čvrsto se zatvara pomoću poklopca s navojem. Zatim se zatvoreni vanjski valjak postavljanja u komoru za ispitivanje. Potrebno je odrediti vrijeme predgrijavanja komore, vrijeme ispitivanja i temperatura ispitivanja. Nakon predgrijavanja ispitne komore pokreće se motor kojim se pokreću valjci na kojima se vanjski valjak rotira. Pri završetku ispitivanja vizualnom metodom se određuju svojstva maziva. Na slici 46 prikazan je uređaj za provedbu ispitivanja. [34]

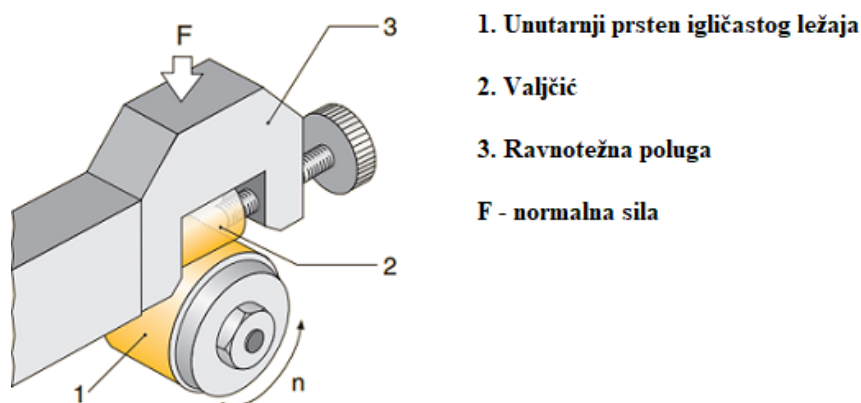


Slika 46. Uredaj za ispitivanje [34]

4.6.2. Reichertov test trošenja ležaja

Ispitivanje se provodi kako bi se odredila mogućnost maziva da podnese opterećenje u uvjetima mješovitog trenja, kako bi se odredila nosivost ležaja. Uvjeti ispitivanja: opterećenje, brzina vrtnje, brzina klizanja i put trošenja (duljina koja se prođe tijekom ispitivanja dok su ispitna tijela u dodiru), standardizirani su Klüber uvjetima ispitivanja i VKIS uputama za princip ispitivanja. [34]

Propisano je: konstantno opterećenje iznosi 300 N, stalna brzina vrtnje od 980 r/min, brzina klizanja mora iznositi $1,8 \text{ ms}^{-1}$, te da put trošenja mora iznositi 100 metara po provedenom ispitivanju. Uzorci pomoću kojih se ispituje su valjčić (promjera 12 milimetara i duljine 18 milimetara) i vanjski prsten igličastog ležaja čije su dimenzije $\text{Ø } 30 \times \text{Ø } 35 \times 16$ milimetara. Princip ispitivanja prikazan je na slici 47. [34]

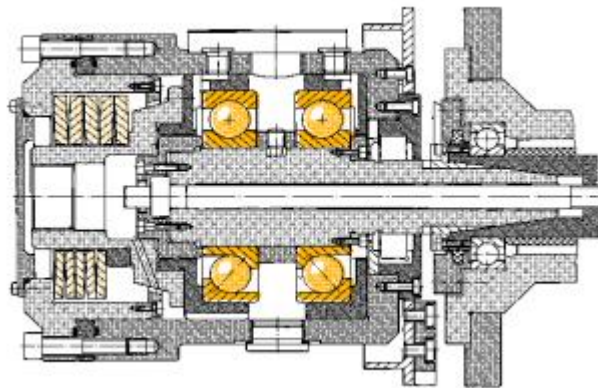


Slika 47. Princip ispitivanja [34]

Postupak se sastoji od postavljanja ispitnih uzoraka na uređaj i provedbom kalibracije. Kalibracija se provodi pokretanjem uređaja dok se umjesto maziva koristi neutralno ulje ili deionizirana vode. Nakon kalibracije potrebno je očistiti ispitne uzorke i provjeriti ima li na uzorcima znakova trošenja. Nakon kalibracije provode se tri uzastopna ispitivanja sa uljem koje se ispituje. Tijekom ispitivanja na valjčiću nastaju tragovi trošenja na valjčiću pomoću kojega se izračunava specifični površinski pritisak. [34]

4.6.3. FE-8 ispitivanje maziva za kotrljajuće ležajeve

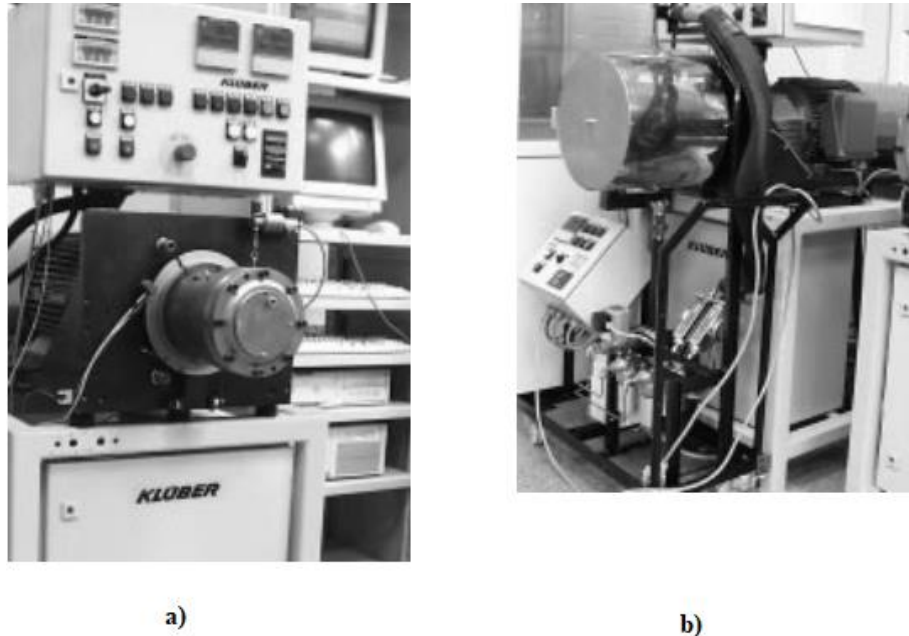
Ovim ispitivanjem se ocjenjuje sposobnost maziva da tijekom rada dođe do što manjeg trošenja ležaja u stvarnim radnim uvjetima. Ispitivanje je standardizirano normom DIN 51819 prema dobavljaču FAG iz Schweinfurta u Njemačkoj. Prema normi propisani su uvjeti ispitivanja i ispitni uzorci. Propisani uvjeti su: trajanje ispitivanja (500 do 1500 sati za masti i 80 sati za ulja), opterećenje (promjenjivo opterećenje iznosa 5 do 100 kN), brzina vrtnje (7,5 do 6000 r/min s postepenim povećanjem) i temperatura (od sobne temperature do 150 °C). Ispitivanje se provodi na ležajevima koji se postavljaju u paru, postavljaju se kuglični ili valjni ležajevi. Na slici 48 prikazan je postavljeni kuglični ležaj u uređaj za ispitivanje. [34]



Slika 48. Prikaz postavljanja kugličnog ležaja u uređaj [34]

Ležajevi koji se postavljaju u uređaj trebaju biti očišćeni, izvagani i zatim podmazani. Ležajevi se ugrađuju na sklop s osovinom i stavljaju se u uređaj za ispitivanje. Prije pokretanja uređaja i postavljanja radne temperature spajaju se senzori koji tijekom ispitivanja prikupljaju podatke o radu ležaja. Na računalu se prikupljeni podaci prate i prikupljaju. Nakon ispitivanja se sklop rastavlja, a ležajeve je potrebno ponovno izvagati. Spremljeni podaci se nakon ispitivanja analiziraju, analizira se moment trenja i krivulja temperature ležaja na temelju koji

se zaključuje o trošenju dijelova ležaja. Na slici 49. prikazani su uređaji za ispitivanje masti i ulja. Na uređaj za ispitivanje ulja potrebno je dodati toplinsku zaštitu, kako ne bi došlo do prolijevanja vrućeg ulja. [34]



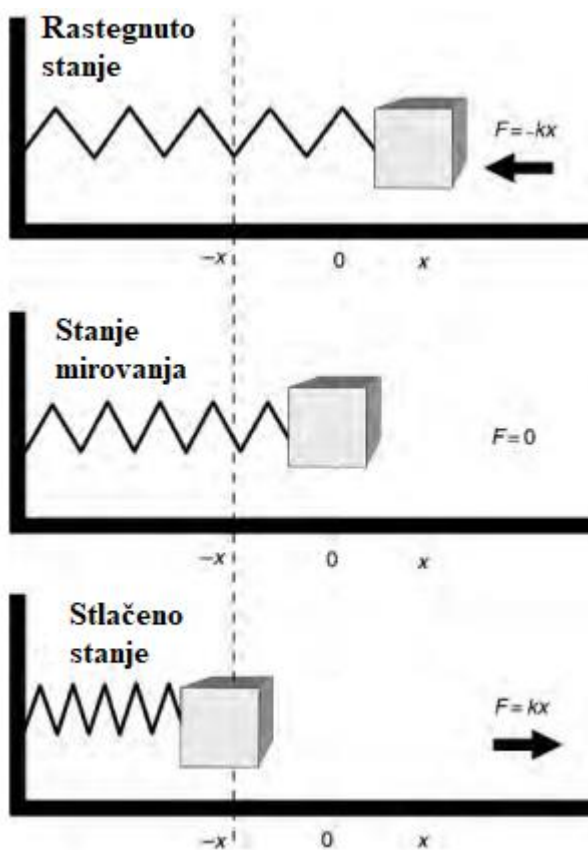
Slika 49. Uređaji za ispitivanje a) masti, b) ulja [34]

4.7. Praćenje ležajeva u eksploataciji

Prvi znakovi oštećenja ležaja očitavaju se kao povišena buka (pojava vibracija) i povećanje temperature unutar ležaja. Na slikama 9 i 10 prikazana su oštećenja kakva mogu nastati tijekom rada ležaja. Oštećenja nastaju zbog lošeg podmazivanja, grešaka u materijali ili zbog prevelikih opterećenja. Kako ta oštećenja ne bi dovela do većih kvarova na stroju provodi se kontrola parametara ležaja. Kontrola i analiza radnih parametara je vrlo bitna, jer se njome sprječavaju zastoji, kvarovi i moguće žrtve do kojih može doći zbog kvara stroja. Sensorima se prati pojava povišenih vibracija, a porast vibracija se osjeti kao povećanje buke. Drugi parametar koji se prati je povišenje temperature ležaja pomoću senzora. [36]

4.7.1. Vibracije

Vibracije su normalna pojava u radu svih strojeva i strojnih dijelova. Vibracije u stroju su rezultat gibanja dijelova unutar stroja. Vibracije se mogu opisati primjerom mase na opruzi koja titra oko ravnotežnog položaja. Princip pojave vibracija prikazan je na slici 50. [36]



Slika 50. Princip vibracija [36]

Praćenjem vibracija kod rada stroja ili ležaja moguće je pratiti stanje ili moguće mehaničke probleme koji se događaju. Gibanje mase na opruzi kroz vrijeme opisuje se sinusoidom. Svaki sinusoidan val ima karakterističnu valnu duljinu, frekvenciju i amplitudu, te se oni mogu pratiti tijekom rada stroja. Za mjerenje vibracija koriste se senzori. [36]

4.7.2. Senzori za mjerenje vibracija

Kod stroja bitno je postaviti senzore na odgovarajuće mjesto. Prilikom postavljanja senzora potrebno je izbjegavati obojena područja, neopterećene zone ležajeva, razmake između kućišta i strukturalne rascjepa. Prilikom korištenja ručnog senzora najbitnije je osigurati konzistentnost očitavanja, pri tome treba paziti na pozicioniranje senzora, kut između stroja i senzora i sila kojom se pritišće senzor na stroj. Kada je moguće preporučljivo je mjeriti vibracije u tri smjera: aksijalni, horizontalni i vertikalni smjer. [37]

Mjerenja vibracija u horizontalnom smjeru uobičajeno snimaju najviše vibracija zbog fleksibilnosti stroja u toj ravnini, ali i zbog neuravnoteženog rasporeda strojnih dijelova što dodatno povećava vibracije. [37]

Mjerenja u vertikalnom smjeru uobičajeno prikazuju manje vibracije zbog krutosti uređaja zbog gravitacije i učvršćivanja stroja. U idealnim uvjetima prilikom mjerenja vibracija u aksijalnom smjeru dobivaju se male vrijednosti vibracija, jer do vibracija u tom smjeru dolazi samo zbog dijelova koji nisu u ravnini i savijenosti osovine ili vratila. Na slici 51 prikazani su različiti oblici glava senzora. [37]



Slika 51. Razne glave senzora za mjerenja ubrzanja [38]

Vibracije kod strojeva imaju tri mjerljive karakteristike: pomak, brzinu i ubrzanje. Unatoč matematičkoj vezi triju veličina, sve tri karakteristike imaju različita svojstva i mogu se prepoznati. [37]

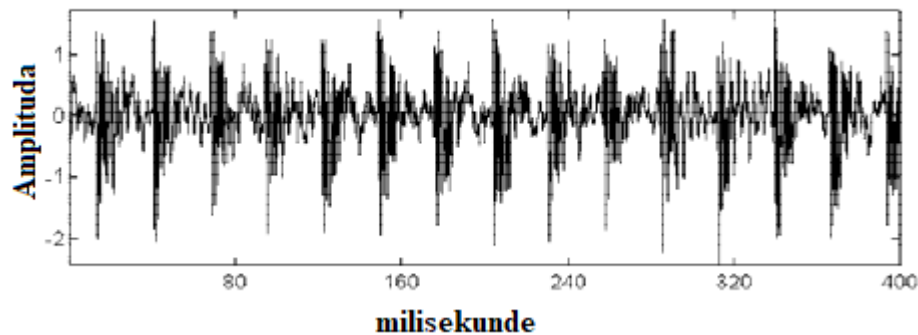
Pomak se mjeri u mikrometrima, a označuje promjenu udaljenosti ili pozicije osovine ili vratila od referentne pozicije. Pomak se mjeri pomoću senzora koji se naziva sonda za pomak (eng. *displacement probe*). Sonda je beskontaktni uređaj koji mjeri udaljenost između dvije površine, a najčešće se koriste kod strojeva koji koriste ležajeve kod kojih se stvara uljni sloj. Nedostatak mjerenja ove karakteristike je što sonda mjeri udaljenost između osovine ili vratila i kućišta uređaja. U slučaju da se kućište i osovina jednako gibaju i vibriraju senzor mjeri vrijednost pomaka 0, dok su u stvarnosti moguće jake vibracije. [37]

Druga mjerljiva karakteristika je brzina. Mjeri se u milimetrima u sekundi ($\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$), a označuje vibracije uslijed promjene brzine signala pomaka. Mjerenja vibracija pomoću brzina je najčešće korišteno mjerenje vibracija. Takvi senzori su bili među prvima električnim sensorima za mjerenje stanja stroja, jer brzina ostaje ista neovisno o frekvenciji sve dok se proizvodi jednaka količina dinamičkog gibanja. Nedostatci senzora su primjetni kod niskih frekvencija (niže od 10 herca) i visokih frekvencija (iznad 2 kiloherca). U tom rasponu senzor

gubi svoju efikasnost. Prvi senzori su koristili zavojnicu koja vibrira u magnetnom polju koje proizvodi napon proporcionalan brzini gibanja strojnog dijela, dok se kod modernih senzora brzina mjeri pomoću integriranja mjerenja ubrzanja. [37]

Ubrzanje je promjena brzine, a mjeri se akcelerometrom. Akcelerometar se sastoji od jednog ili više piezoelektričnih kristala i mase. Kada dođe do pobude u piezoelektričnom kristalu proizvodi se električni signal proporcionalan ubrzanju. Do pobude u kristalu dolazi zbog vibracije mase koji vibrira sukladno vibraciji stroja ili strojnog dijela na koji je spojen. Akcelerometri imaju vrlo široki raspon mjerenja (od 0 do više od 400 kiloherca), taj široki raspon je najveća prednost korištenja mjerenja. Mjerna jedinica ubrzanja tijekom mjerenja vibracija je metara u sekundi na kvadrat. ($\frac{\text{mm}}{\text{sec}^2}$). [37]

Postavljanjem akcelerometara na ležajeve moguće je mjeriti ubrzanje i integriranjem se dobiva brzina. Podaci se mjere, snimaju i analiziraju, te se mogu prikazati grafom kao što je prikazano na slici 52. [36]



Slika 52. Prikaz rezultata mjerenja vibracija [37]

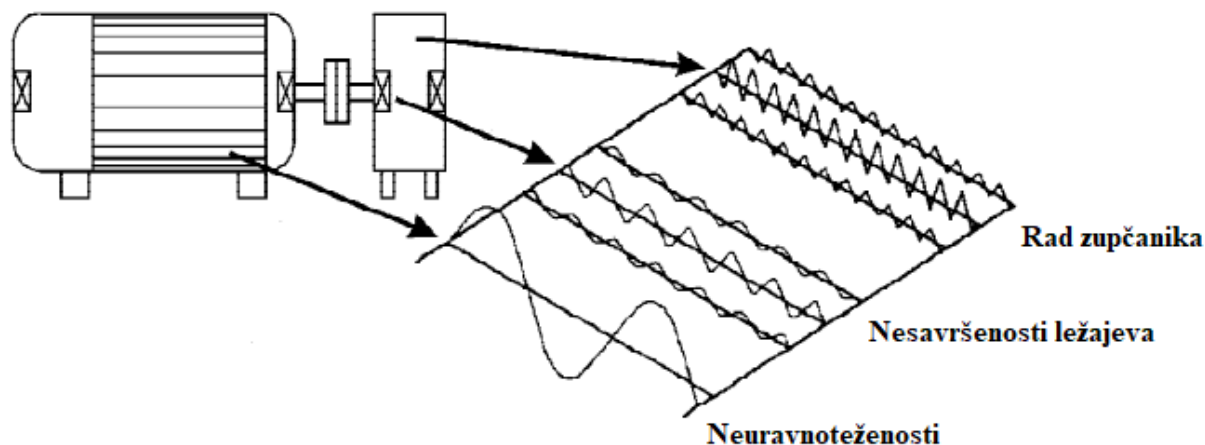
Na slici 52 prikazan je graf koji prikazuje signal dobiven pomoću mjerenja brzine ili ubrzanja, te se signal prikazuje kao promjena amplitude u vremenu. Ovakav oblik grafa vibracija naziva se graf u vremenskoj domeni. Prikazuje neobrađeni signal koji obično nije koristan kao obrađeni signal, ali se koristi u analiza rada stroja jer može ukazati na neke karakteristike stroja koje nije moguće prepoznati kod drugih metoda analize signala. [37]

4.7.3. Metode mjerenja, prikazivanja i analize signala vibracija

Za lakšu analizu signala koriste se različite metode prikazivanja dobivenog signala. Najčešće metode prikaza i analize signala su: Fourierove transformacije (eng. *Fast Fourier Transformation, FFT*), filtriranje niskih frekvencija (eng. *Eveloping*) i tehnologija spektralno emitirane energije (eng. *Spectral Emitted Energy, SEE technology*) [37]

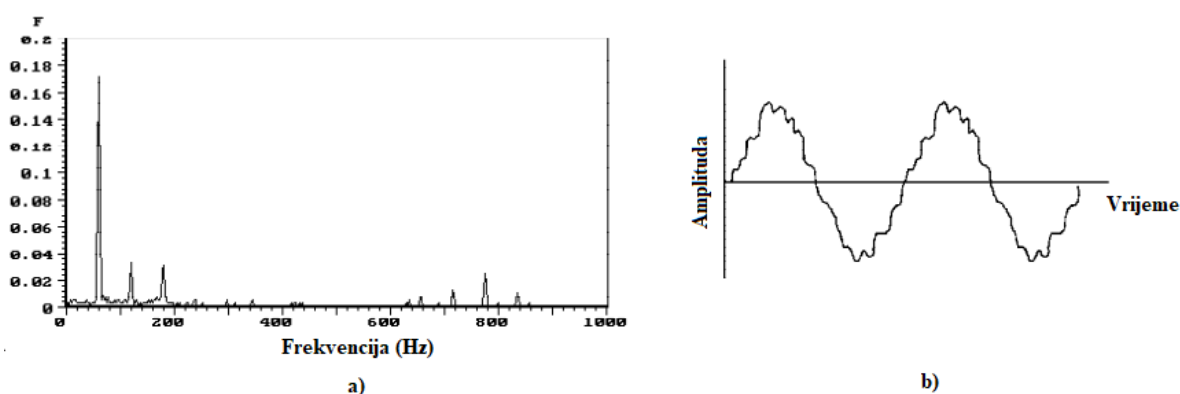
4.7.3.1. Fourierove transformacije

Fourierove transformacije se najviše koriste za analizu signala. Njima se snimljeni signal razdvaja na specifične amplitude koje odgovaraju određenoj komponenti frekvencije vibracija. Na slici 53. prikazano je kako različite komponente stroja djeluju na signal. [37]



Slika 53. Utjecaj različitih dijelova stroja na signal vibracija razdvojeni korištenjem fourierovih transformacija [37]

Snima se amplituda signala pri različitim frekvencija sve dok se ne dobiju vrijednosti za sve frekvencije koje se nalaze u snimljenim signalu stroja. Snimljene vrijednosti se precrtavaju na frekvencijsku skalu. Na slici 54 prikazano je kako izgleda spektar fourierovih transformacija i kako izgleda snimljeni signal prije korištenja fourierovih transformacija. [37]



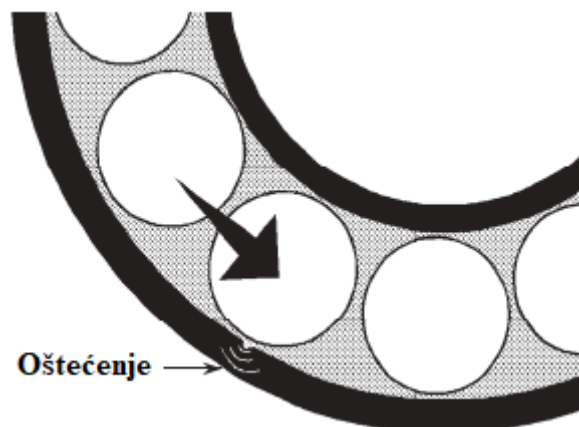
Slika 54. a) Spektra fourierovih transformacija, b) Snimljeni signal [37]

Spektar fourierovih transformacija vrlo je koristan alat, jer se njime može otkriti mjesto problema u stroju, što uzrokuje problem i kroz duže vrijeme kada će problem postati kritičan za rad stroja. Svi podaci se mogu iščitati iz grafa jer je poznato koji dio spektra označava rad određenog dijela stroja i tako se promjene na spektru povezuju uz promjene u radu dijela stroja. [37]

4.7.3.2. Filtriranje niskih frekvencija

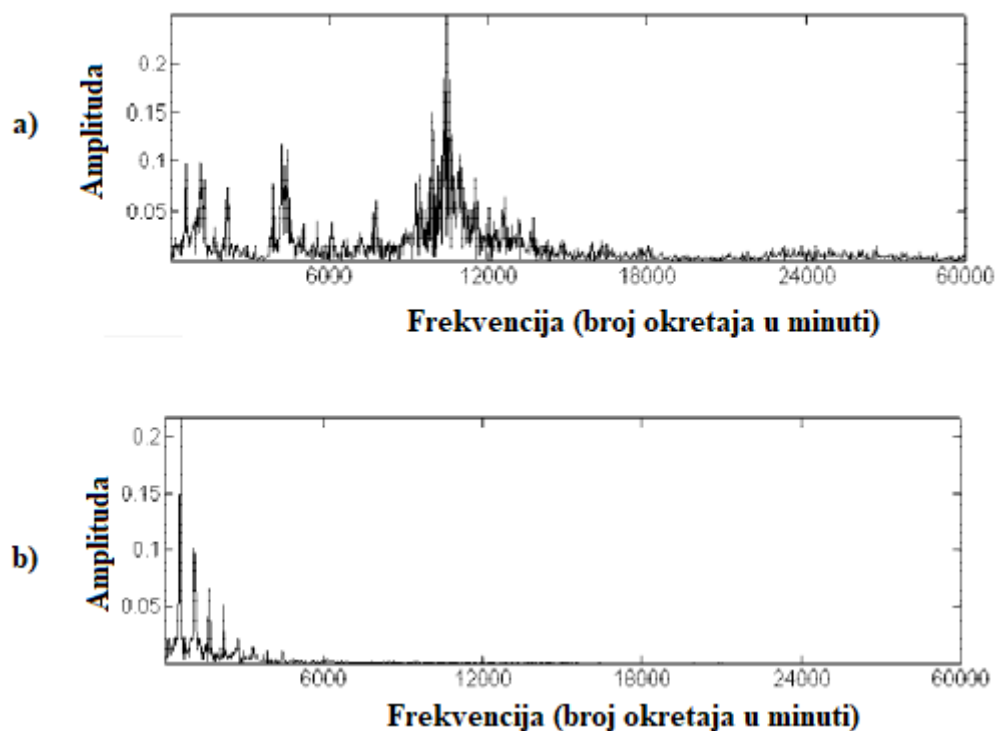
Ponavljajući rad ležaja i zupčanika stvara signal znatno manje amplitude i većih frekvencija od signala vibracija dijelova koji rotiraju (rotor, vratilo ili osovina) ili dijelova koji svojom konstrukcijom stvaraju vibracije. Za efikasnije otkrivanje oštećenja na ležajevima koristi se filtriranje niskih frekvencija kako bi u signalu ostao samo signal visokih frekvencija u kojem rasponu se pojavljuju vibracije kod ležajeva i zupčanika. Metoda se najviše koristi za otkrivanje oštećenja kod kotrljajućih ležajeva kod kojih takve vibracije mogu biti prikrivene. [37]

Primjerice kada dođe do oštećenja na vanjskom prstenu igličastog ležaja prijelazom svake iglice preko tog dijela uzrokovati će mali ponavljajući vibracijski signal na frekvenciji te vrste oštećenja. Zbog niske energije te vrste vibracija ona može biti zanemarena u sveukupnom mjerenju vibracija stroja, te se iz tog razloga koristi filtriranje niskih frekvencija. Na slici 55 prikazana je vrsta oštećenja koje je moguće uočiti filtriranjem niskih frekvencija. [37]



Slika 55. Oštećenje vanjskog prstena ležaja [37]

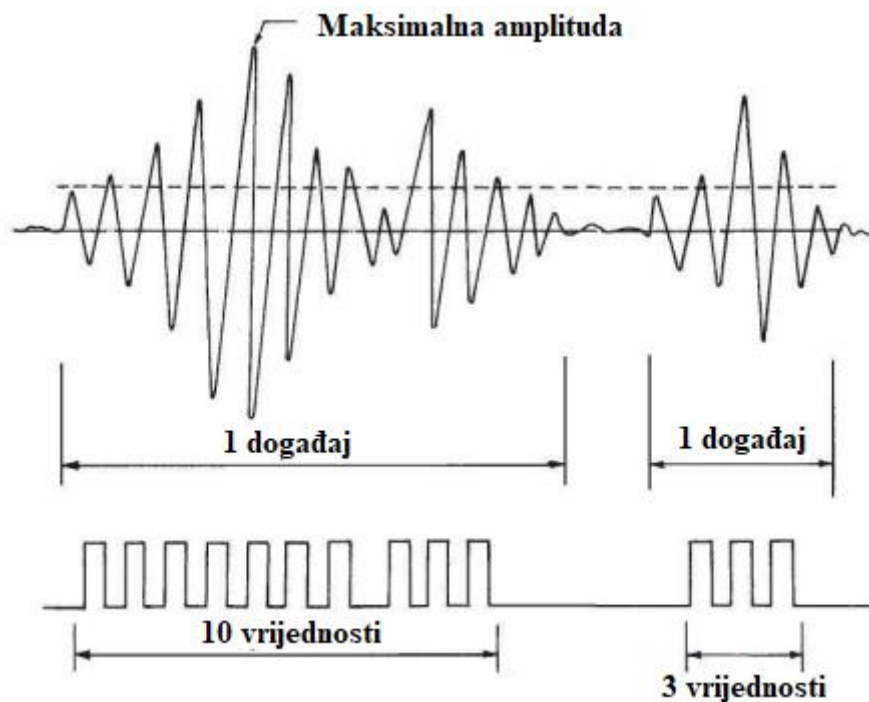
Ovom metodom moguće je uz filtriranje niskih frekvencija i pojačanje ponavljajućeg signala ležaja u rasponu frekvencija u kojemu se nalaze oštećenja ležaja. U praksi se ova metoda pokazala kao uspješna za uočavanje velikog broja problema kod različitih strojnih dijelova (ležajevi, zupčanici, te kod rotora i statora elektromotora). Na slici 56 prikazani su grafovi prije i poslije korištenja filtriranja niskih frekvencija. [37]



Slika 56. a) Nefiltrirani signal, b) Signal s filtriranim niskim frekvencijama [37]

4.7.3.3. Tehnologija spektralno emitirane energije

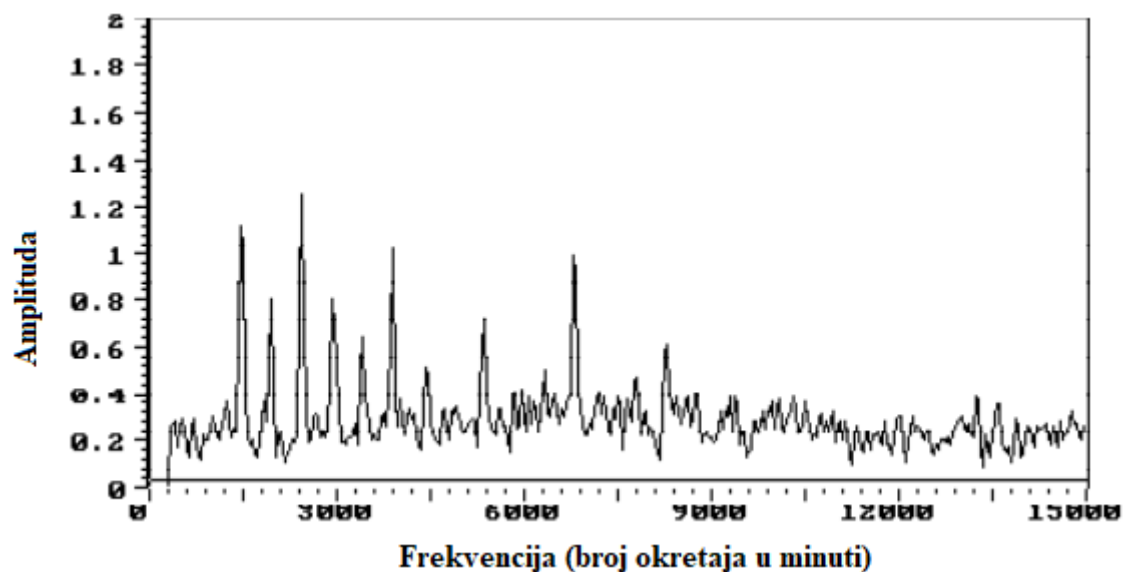
Ovom metodom se omogućuje vrlo rano otkrivanje grešaka u ležajevima ili zupčanicima. Mjeri se akustični signal koji proizvodi materijal s greškom ili u nekim posebnim slučajevima. Uvjeti u kojima se proizvodi akustični signal: greške u ležajevima, nečistoće u sredstvima za podmazivanje, nedostatak sredstva za podmazivanje, dinamičko preopterećenje, izjedanje, povišeno trenje, kavitacija, raspadanje metala, električni luk, pucanje, dodiri materijala i drugi. Za mjerenje se koristi posebni senzor za akustičnu emisiju koji bilježi ultrazvučnu akustičnu emisiju do koje dolazi prilikom degradacije ležajnih elemenata (raspon akustične emisije je 150 do 500 kHz). U tom rasponu signal se ne smatra vibracijom već visokofrekvencijskim zvukom. Zbog toga se metoda koristi za rano otkrivanje grešaka, greške koje proizvode takav signal su ispod površine ili mikroskopske veličine. Metoda je vrlo efektivna prilikom snimanja stroja kod kojeg dođe do korozije, izjedanja, kavitacije i ostalih oblika oštećenja. U slučaju porasta normalnih snimanih vrijednosti služba za održavanje ima dovoljno vremena za zamjenu oštećenog dijela ili je preporučljivo pažljivije mjerenje i kontrola strojnog dijela s ostalim metodama nadzora i analize. Na 57 prikazan je izgled signala snimljen tehnologijom spektralno emitirane energije. [37]



Slika 57. Snimljeni signal akustične emisije [39]

4.7.4. Specifične vibracije oštećenja ležaja

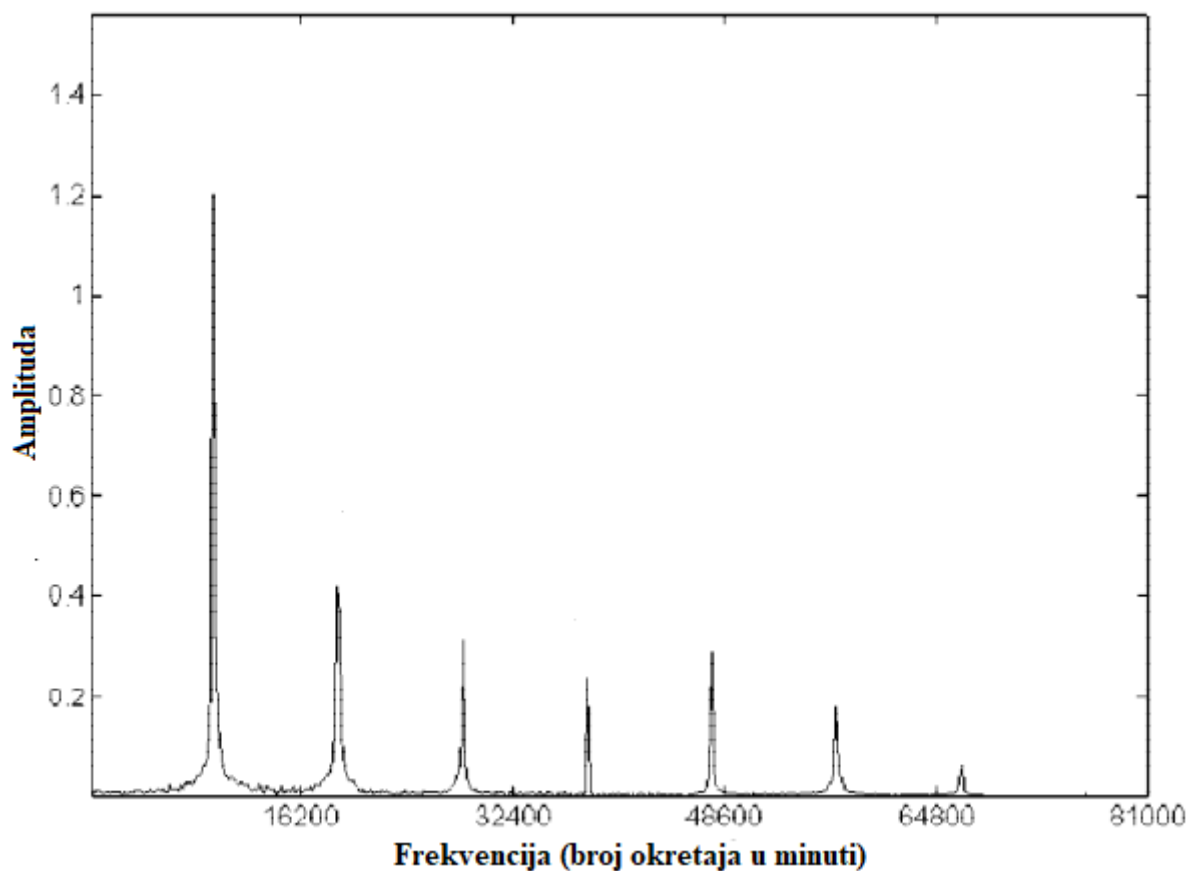
Analizom signala snimljenim senzorom moguće je otkriti na kojemu je dijelu ležaja oštećenje. Tako je moguće prepoznati nalaze li se oštećenja na kavezu ležaja, unutarnjem prstenu, valjnim tijelima ili vanjskom prstenu. Na slici 58 prikazan je graf vibracija oštećenog kaveza unutar valjnog ležaja. [37]



Slika 58. Amplitude vibracija ovisne o broju okretaja ležaja karakteristične za oštećenje kaveza ležaja [37]

Na grafu koji je analiziran filtriranje niskih frekvencija vidljive su vibracije manjih i većih amplituda kroz cijeli spektar frekvencija uz smanjivanje amplitude vibracija povećanjem frekvencije. [37]

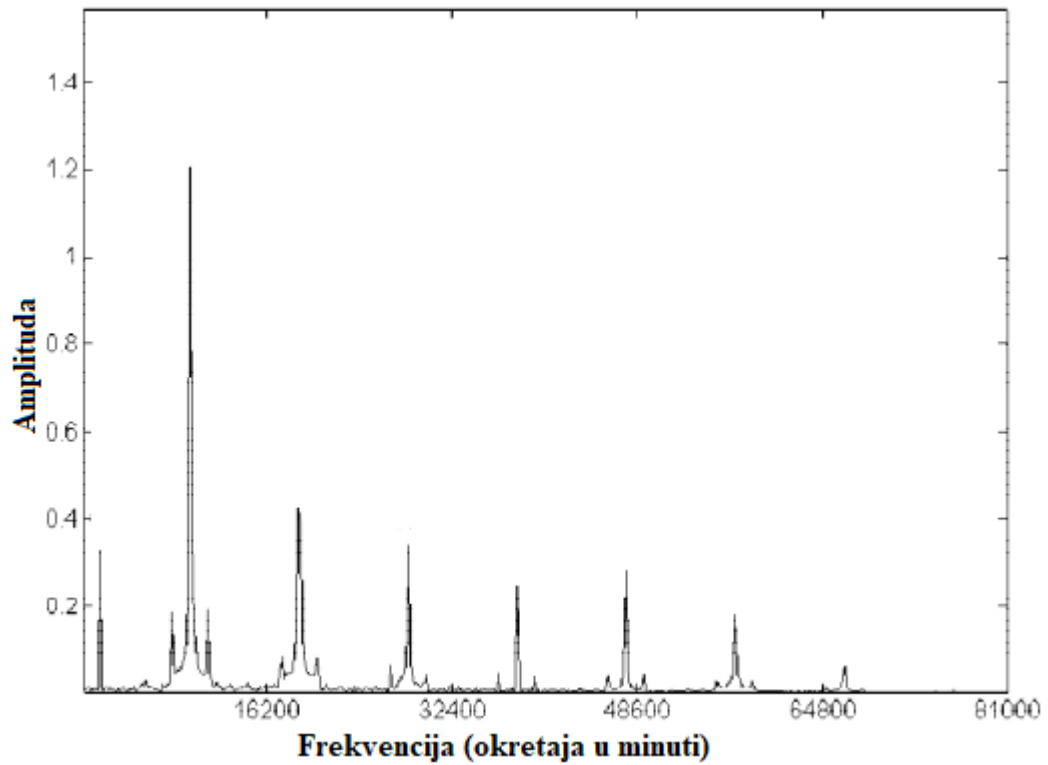
Grafovi vibracija oštećenja vanjskog prstena, unutarnjeg prstena i valjnih tijela znatno se razlikuju od grafa vibracija oštećenja kaveza ležaja. Vibracije koje stvara oštećenje na vanjskom prstenu visoke su amplitude pri manjim frekvencijama. Na slici 59. prikazan je graf vibracija zbog oštećenja vanjskog prstena. [37]



Slika 59. Amplitude vibracija ovisne o broju okretaja ležaja karakteristične za oštećenje vanjskog prstena ležaja [37]

Na slici 59. moguće je uočiti da pri broju okretaju od 9540 dolazi do pojave vibracije s najvećom amplitudom što ukazuje na oštećenje vanjskog prstena ležaja. Povećanjem broja okretaja amplituda vibracije se smanjuje. [37]

Vibracije oštećenja unutarnjeg prstena i valjnih tijela imaju isti karakter, a slične se vibracijama oštećenja vanjskog prstena. Vibracije unutarnjeg prstena i valjnih tijela prikazane su grafom na slici 60. [37]



Slika 60. Amplitude vibracija ovisne o broju okretaja ležaja karakteristične za oštećenje unutarnjeg prstena ležaja [37]

Na slici 60 vidljivo je da dolazi do pojave najvećih vibracija na istom broju okretaju kao i kod oštećenja vanjskog prstena. Razlika u signalu je zbog pojave vibracija malih amplituda prije i poslije vibracije velike amplitude. Također kao i kod oštećenja vanjskog prstena povećanjem broja okretaja u minuti dolazi do smanjenja amplituda vibracija. Svi grafovi oštećenja analizirani su metodom filtriranja niskih frekvencija. [37]

EKSPERIMENTALNI DIO

5. Plan i provedba ispitivanja

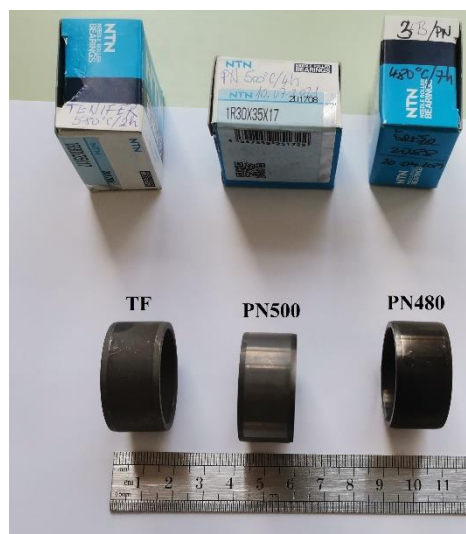
5.1. Plan ispitivanja

Za provedbu eksperimentalnog dijela korišteni su unutarnji prstenovi igličastih ležaja. Prstenovi su proizvedeni od čelika EN DIN 100Cr6 (proizvođač NTN, Japan) s oznakom 1R30X35X17. Na tri prstena provedeni su postupci nitriranja kako bi se modificirala površina. Na slici 61 prikazan je osnovni nemodificirani prsten.



Slika 61. Nemodificirani EN DIN 100Cr6 prsten

Na prstenovima su provedene različite metode nitriranja. Dva prstena su nitrirana u plazmi s različitim parametrima, a treći prsten je nitriran postupkom TENIFER (nitriranje u solnoj kupci). Na slici 62 prikazani su nitrirani prstenovi. Prsteni su označeni oznakama TF (prsten nitriran postupkom TENIFER), PN500 (prsten nitriran u plazmi na temperaturi od 500 °C) i PN480 (prsten nitriran u plazmi na temperaturi od 480 °C).



Slika 62. Nitrirani prstenovi

U ispitivanju trenja, buke i traga trošenja metodom prizme po prstenu kao protupar korišteni su uzorci od ležajne bronce (legura bakra i olova). Uzorci od ležajne bronce su izrezani iz brončane blazinice kliznog ležaja. Uzorak od ležajne bronce prikazan je na slici 63.



Slika 63. Uzorak ležajne bronce

Karakteristične dimenzije osnovnog prstena su: vanjski promjer (35 mm), unutarnji promjer (30 mm) i širina prstena (17 mm). Uzorci od ležajne bronce su dimenzija 7x7x14 mm. Prije ispitivanja hrapavosti površine i ispitivanja faktora i trenja i traga trošenja uzorci od ležajne bronce brušeni su brusnim papirima gradacija 120, 1200 i 2000.

Na svim uzorcima su provedena sljedeća ispitivanja: ispitivanje hrapavosti površine, tvrdoće površine i tribološko ispitivanje metodom prizme po prstenu.

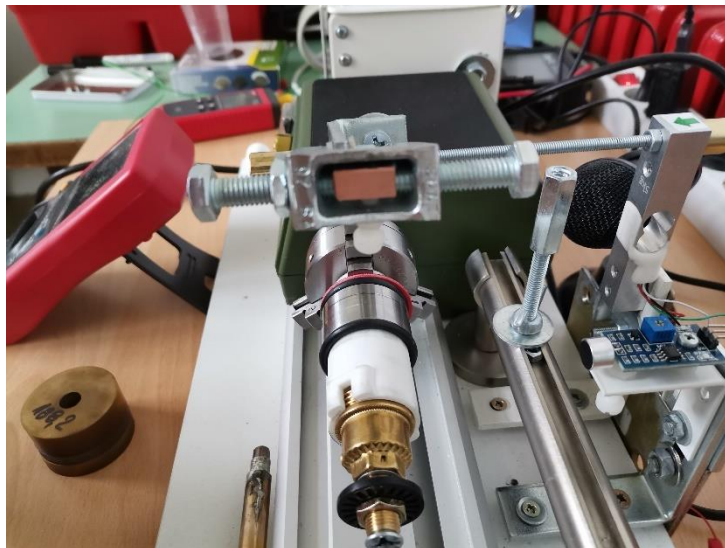
Ispitivanje hrapavosti površine provedeno je na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu u Laboratoriju za precizna mjerenja. Za ispitivanje je korišten uređaj Perthen Mehr s 4 ponavljanja. U ispitivanju su ispitane karakteristične vrijednosti površine uzoraka (R_a , R_z i R_p).

Ispitivanje tvrdoće površine uzoraka provedeno je u Laboratoriju za toplinsku obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Za provedbu ispitivanja korišten je „Wilson-Wolpert Tukon 2100B uređaj za ispitivanje tvrdoće proizvođača „Instron“ s 5 ponavljanja na svakom uzorku. Uređaj je prikazan na slici 64.



Slika 64. Uređaj za ispitivanje tvrdoće

Ispitivanje prizme po prstenu provedeno je u Laboratoriju za toplinsku obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Tijekom ispitivanja mjereni su faktor trenja, trag trošenja na uzorcima od ležajne bronce, buka koja se postiže tijekom ispitivanja, te porast temperature uslijed djelovanja trenja. Na slici 65 prikazan je uređaj za provedbu ispitivanja.



Slika 65. Uređaj za ispitivanje metodom prizme po prstenu

Rotacija prstena se vrši pomoću elektromotora na tokarilici za drvo „Proxxon DB 250“. Prema uputama za upotrebu proizvođača, elektromotor može postići brzinu vrtnje u rasponu od 500 do 5000 okretaja u minuti. Stvarna brzina vrtnje tijekom ispitivanja ispitana je pomoću

laserskog tahometra „UT373“. Tahometar je prikazan na slici 66. Izmjerene vrijednosti brzina za svaki modul rada prikazane su u tablici 7.



Slika 66. Tahometar UT373

Tablica 7. Izmjerene vrijednosti brzine vrtnje

Modul rada	Brzina vrtnje, okretaji u minuti
1	1200
2	1310
3	1740
4	2500
5	3580
6	3932

Za provedbu ispitivanja izabrane su brzine od 1200, 1740 i 2500 okretaja u minuti. Tijekom rada uređaja pri tim brzinama izmjerena je razina buke u decibelima. Buka (glasnoća rada) je izmjerena na neopterećenom uređaju pri odabranim brzinama. Buka je izmjerena na senzor zvuka (eng. *Mini Sound Meters*) „UT353“ prikazanom na slici 67. U tablici 8 prikazana je razina buke pri radu uređaja za ispitivanje.



Slika 67. Senzor zvuka UT353

Tablica 8. Izmjerena glasnoća rada uređaja

Brzina vrtnje, okretaji u minuti	Glasnoća, decibeli
1200	67
1310	73
1740	75
2500	74
3580	74
3932	76

Tijekom ispitivanja prizma od ležajne bronce pritišće ispitni prsten određenom silom. Sila pritiskanja je određena pomoću utega. Mase utega i držača uzorka koji svojom masom pritišću prsten izmjereni su pomoću vage „VTBAL22“. Izmjerene mase prikazane su u tablici 9. Ukupno se prsten pritišće masom od 630,5 g, odnosno silom od 6,305 N.

Tablica 9. Izmjerene mase dijelova uređaja i utega

Dio	Masa dijela, g
Držač uzorka i utega	250
Uteg 1	188,2
Uteg 2	113,8
Uteg 3	78,5

5.2. Provedba nitriranja

Tri postupka nitriranja provedena su na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Nitriranja u plazmi su provedena na uređaju PC 70/90 tvrtke Rübige. Uređaj je prikazan na slici 64. U tablici 10 prikazani su parametri nitriranja u plazmi za prsten nitriran pri temperaturi od 500 °C (oznaka PN500 na slici 68). U tablici 11 prikazani su parametri nitriranja za prsten označenog sa oznakom PN480.



Slika 68. Uređaj PC 70/90 tvrtke Rübige

Tablica 10. Parametri nitriranja za prsten PN500

Parametri postupka	Grijanje u vakuumu	Otprašivanje ionima	Nitriranje u plazmi
ϑ , °C	450	500	500
t , h	3	2	4
p , mbar	1	1	2
Protok H ₂ , l/h	-	140	20
Protok N ₂ , l/h	5	5	60
Protok Ar, l/h	-	10	10
P , W	-	-	2000

Tablica 11. Parametri nitriranja za prsten PN480

Parametri postupka	Grijanje u vakuumu	Otprašivanje ionima	Nitriranje u plazmi
ϑ , °C	420	480	480
t , h	3	2	8
p , mbar	2	2	1
Protok H ₂ , l/h	-	145	120
Protok N ₂ , l/h	-	15	40
Protok Ar, l/h	-	-	10
P , W	-	2000	2200

Postupak TENIFER, koji se koristio za nitriranje prstena označenog oznakom TF, proveo se u tri faze. Postupak predgrijavanja proveden je pri temperaturi od 450 °C s vremenom trajanja od 1 sat. Postupak nitriranja trajao je 2 sata i proveden je pri temperaturi od 580 °C. Nakon nitriranja prsten je hlađen u vodi.

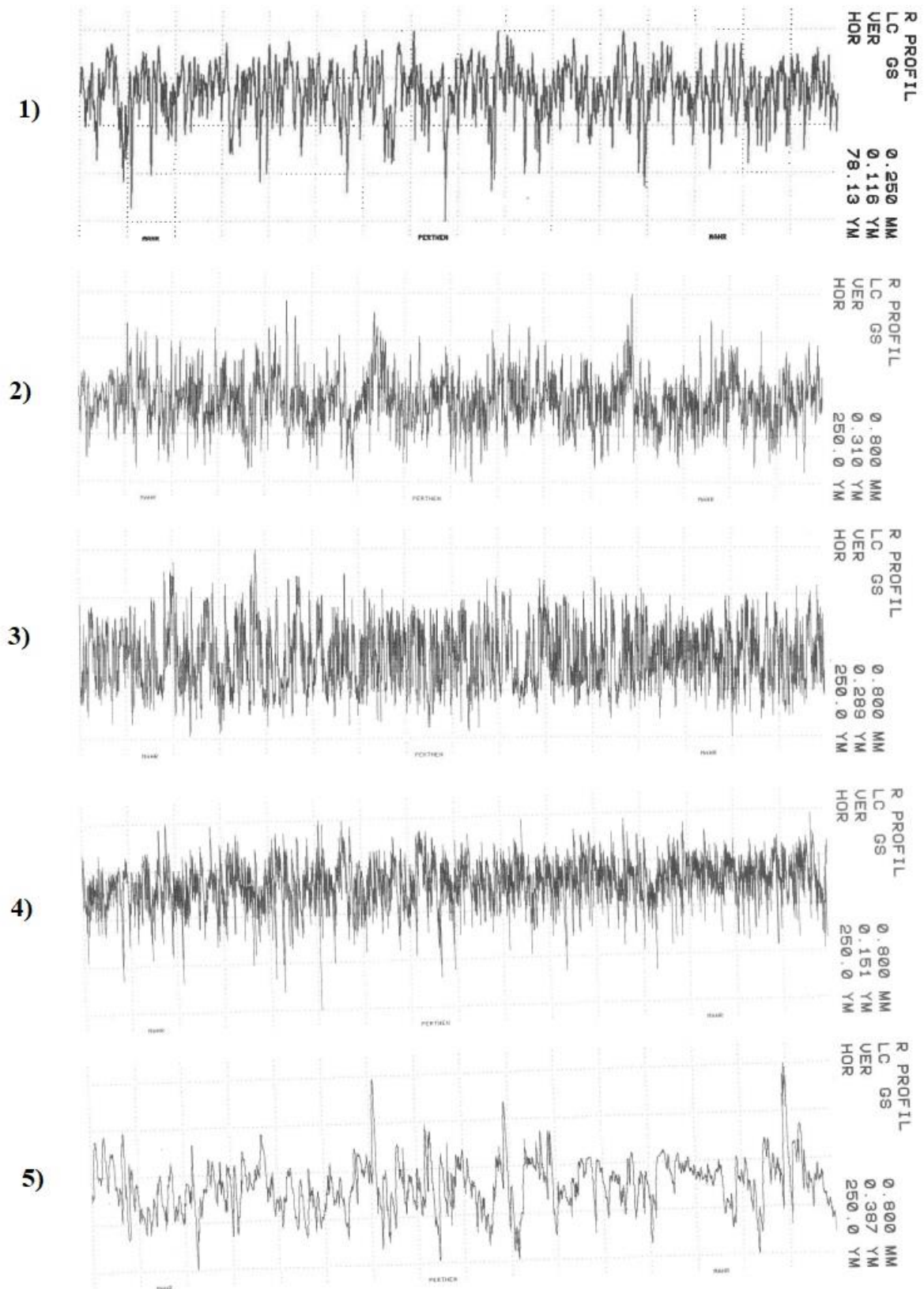
6. Rezultati ispitivanja i diskusija rezultata

6.1. Ispitivanje hrapavosti površine

Hrapavosti površina su izmjerene za sve uzorke. Uzorci su: 1) Prsten od čelika EN DIN 100Cr6, 2) Prsten nitriran postupkom TENIFER, 3) Prsten nitriran u plazmi pri temperaturi od 500 °C, 4) Prsten nitriran u plazmi pri temperaturi od 480 °C, 5) Prizma od ležajne bronce. Na uzorcima su snimljeni podaci o parametrima R_a , R_z i R_p s 5 ponavljanja. Za svaki uzorak snimljen je profil hrapavosti. Srednje vrijednosti parametara prikazane su u tablici 12, a profili hrapavosti prikazani su na slici 69.

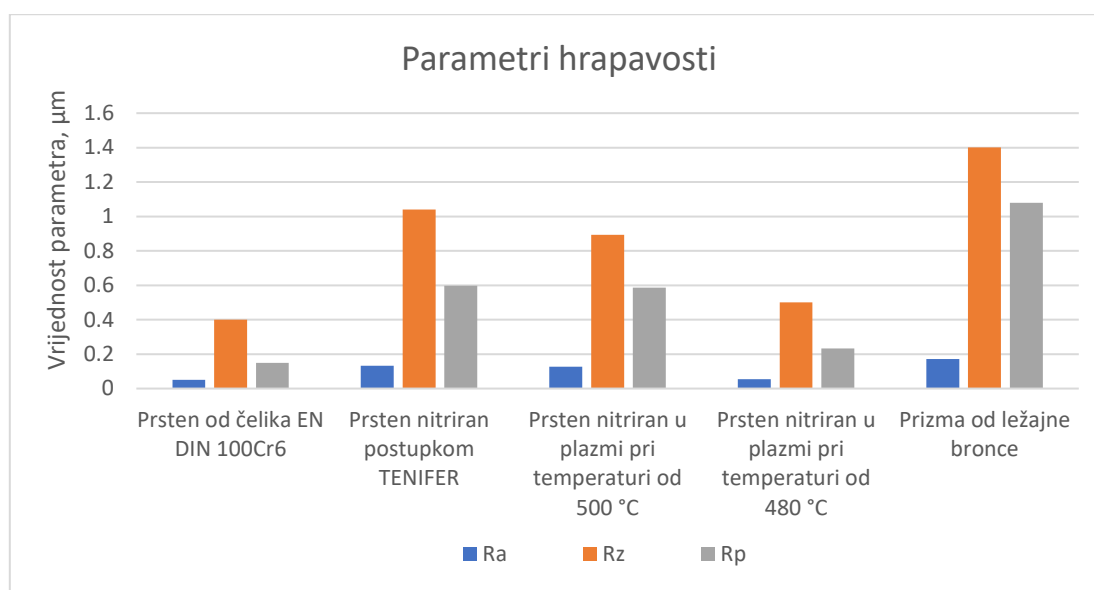
Tablica 12. Srednje vrijednosti parametara hrapavosti

Parametri hrapavosti	Prsten od čelika EN DIN 100Cr6	Prsten nitriran postupkom TENIFER	Prsten nitriran u plazmi pri temperaturi od 500 °C	Prsten nitriran u plazmi pri temperaturi od 480 °C	Prizma od ležajne bronce
R_a , μm	$0,050 \pm 0,003$	$0,132 \pm 0,025$	$0,127 \pm 0,060$	$0,055 \pm 0,020$	$0,171 \pm 0,031$
R_z , μm	$0,400 \pm 0,039$	$1,040 \pm 0,340$	$0,894 \pm 0,215$	$0,500 \pm 0,233$	$1,401 \pm 0,578$
R_p , μm	$0,150 \pm 0,003$	$0,598 \pm 0,360$	$0,587 \pm 0,201$	$0,233 \pm 0,172$	$1,079 \pm 0,683$



Slika 69. Profili hrapavosti svih uzoraka

Na slici 70 prikazan je histogram srednjih vrijednosti parametara hrapavosti po uzorcima.

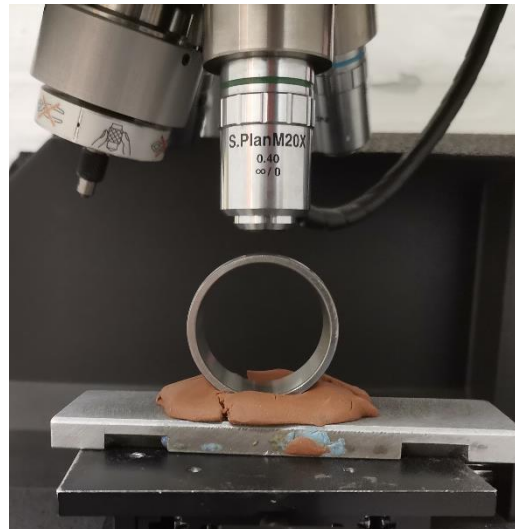


Slika 70. Histogram vrijednosti parametara

Usporedbom parametara hrapavosti i profila hrapavosti vidljivo je da se nitriranjem osnovnog prstena rastu vrijednosti svih parametara vrijednosti. Do velikog porasta parametara dolazi zbog mikrostrukture samog nitiranog sloja koji nastaje pri različitim parametrima nitriranja. Kod prstena nitiranog postupkom TENIFER dolazi do nastanka velikih pora koja su vidljive na profilu hrapavosti, te zbog njih profil izgleda valovito. Variranjem parametara tijekom nitriranja u plazmi dobivaju se različite površine prstenova. Iz parametara i profila hrapavosti vidljivo je da dolazi do manje promjene u odnosu na osnovni prsten kod prstena koji je nitriran pri temperaturi od 480 °C. Uzorak od ležajne bronce ima višestruko veće vrijednosti parametara površinske hrapavosti od prstenova zbog načina obrade površine.

6.2. Tvrdoća površine

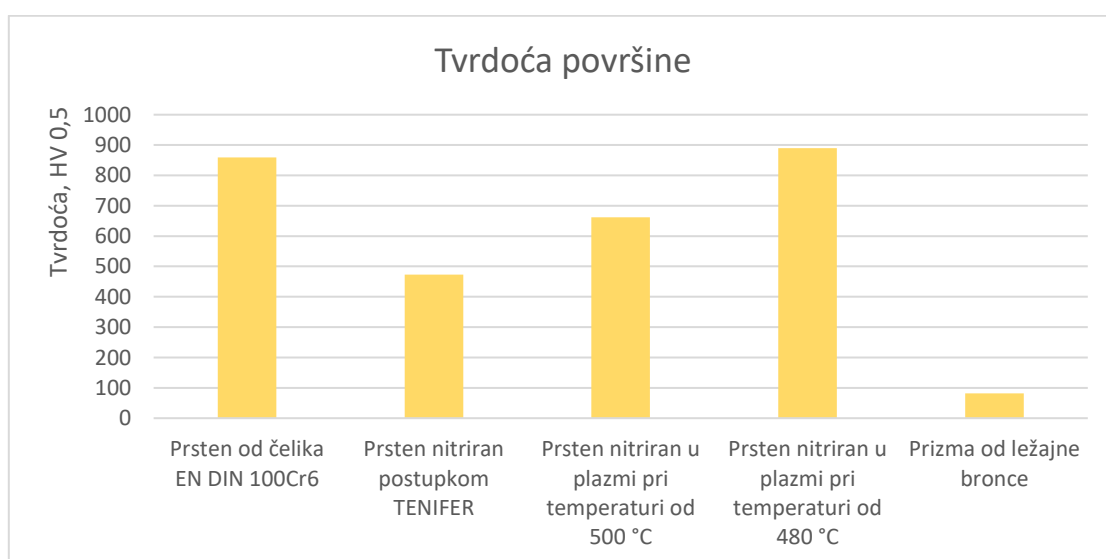
Postupkom nitriranja dolazi do promjene površinske tvrdoće prstena. Svi uzorci su ispitani sa metodom Vickers pri opterećenju od 0,5 kilograma. Na slici 71. prikazana je provedba ispitivanja, a u tablici 13 dane su prosječne vrijednosti tvrdoće uzoraka nakon 5 mjerenja. Na slici 72 prikazan je histogram srednjih vrijednosti površinskih tvrdoća.



Slika 71. Ispitivanje tvrdoće površine

Tablica 13. Vrijednosti tvrdoće površine uzoraka

Uzorci	Prsten od čelika EN DIN 100Cr6	Prsten nitriran postupkom TENIFER	Prsten nitriran u plazmi pri temperaturi od 500 °C	Prsten nitriran u plazmi pri temperaturi od 480 °C	Prizma od ležajne bronce
Tvrdoća, HV 0,5	859	473	662	890	82

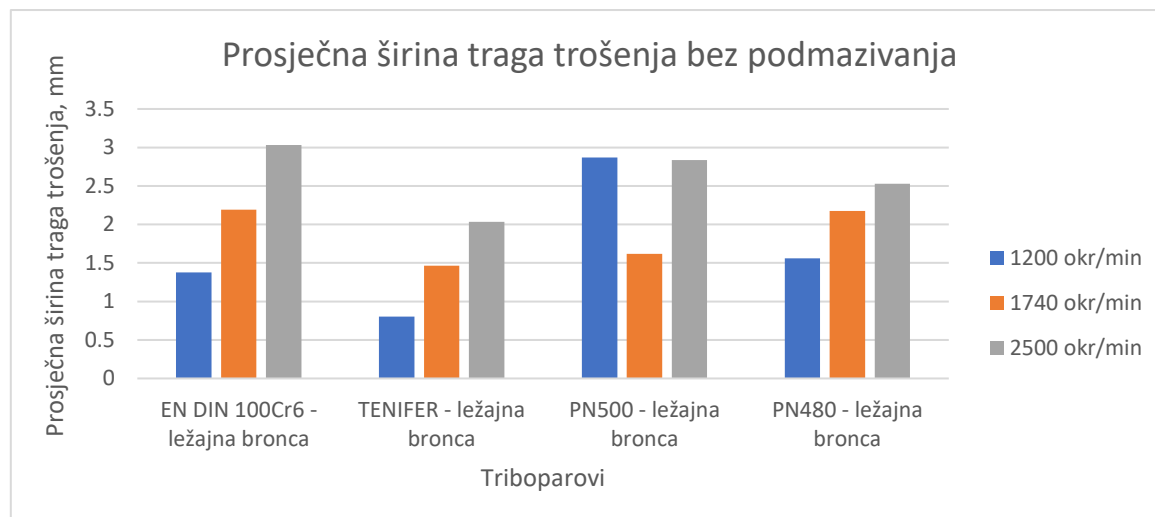


Slika 72. Histogram srednjih vrijednosti tvrdoća površine

Prsten od čelika DIN 100Cr6 ima prosječnu tvrdoću od 859 HV. Nitiranjem postupkom TENIFER i nitiranjem u plazmi dolazi do smanjenja površinske tvrdoće zbog dodatnog popuštanja pri povišenoj temperaturi. Nitiranjem u ta dva slučaja dolazi do nastanka krhke zone spojeva. Prsten nitiran u plazmi pri temperaturi od 480 stupnjeva dolazi porasta tvrdoće u odnosu na nemodificirani prsten (890 HV). Prizma od ležajne bronce značajno je mekši materijal s prosječnom tvrdoćom površine od 82 HV.

6.3. Ispitivanje prosječne širine traga trošenja, faktora trenja i buke metodom prizme po prstenu

Nakon ispitivanja zbog trenja koje nastaje pri dodiru prizme u prstena pri relativnom gibanju dolazi do trošenja prizme. Nakon ispitivanja analizirana je površina prizme i utvrđena je prosječna širina traga trošenja koji nastaje tijekom ispitivanja. Također su slikani prstenovi kako bi se utvrdilo je li došlo do prijelaza materijala s prizme na prstenove. Na slikama 73, 75 i 77 grafički su prikazane prosječne širine tragova trošenja za ispitivanja bez podmazivanja, s podmazivanjem suncokretovim uljem i podmazivanjem uljem SAE 5W-30, dok su na slikama 74, 76 i 78 prikazani prstenovi nakon provedbe ispitivanja.

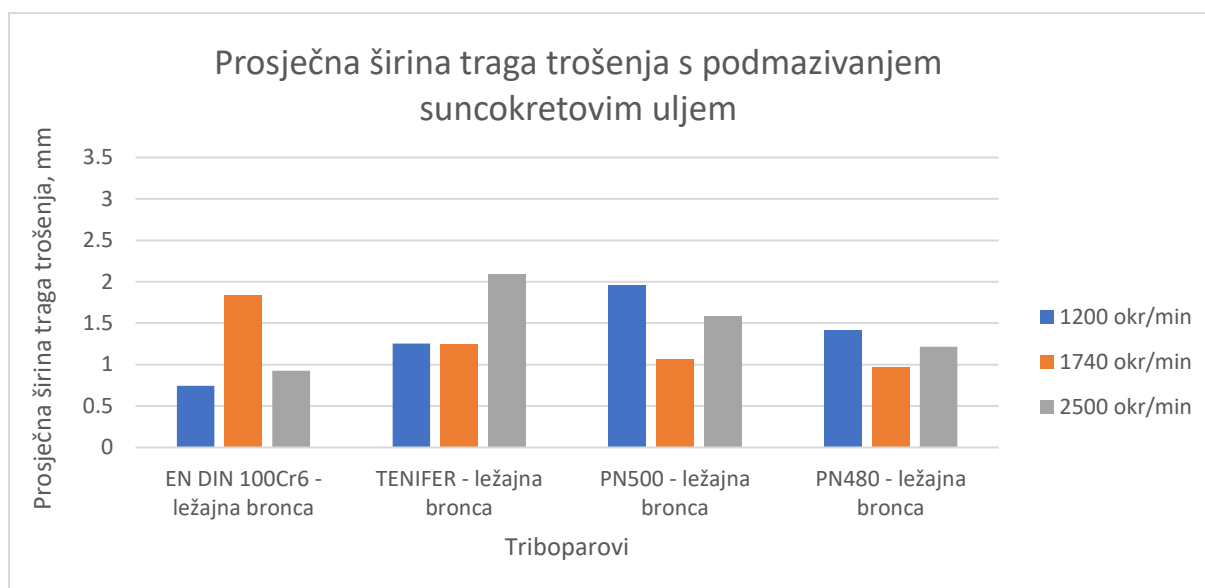


Slika 73. Histogram prosječnih vrijednosti širina traga trošenja u ispitivanju bez podmazivanja

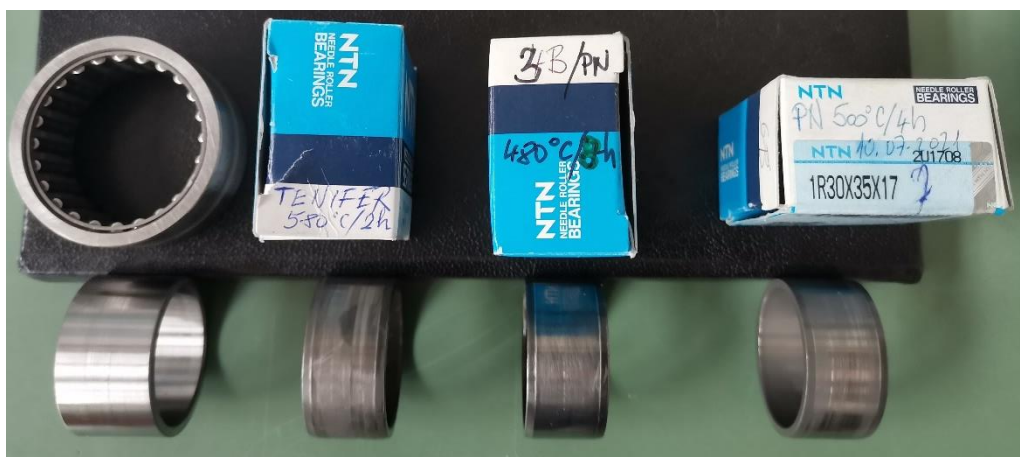


Slika 74. Prstenovi nakon provedbe ispitivanja bez podmazivanja

Na slici 73 su prikazane prosječne vrijednosti širine traga trošenja s različitim kombinacijama materijala i pri različitim brzinama vrtnje prstenova. Za tribopar „EN DIN 100Cr6 – ležajna bronca“ vidljiv je porast širine traga trošenja s povećanjem brzine. Modificiranjem površine prstena postupkom TENIFER dolazi do smanjenja prosječnog traga trošenja i vidljiv je porast širine traga trošenja povećanjem brzine. Kod tribopara „PN500 – ležajna bronca“ dolazi do povećanja širine traga trošenja u odnosu na nemodificirani prsten. Pri brzinama od 1200 i 2500 okretaja u minuti dolazi do velikog trošenja materijala, dok je kod brzine od 1740 okretaja u minuti došlo do pojave vibracija i smanjenog dodira između ležajne bronce i prstena pri čemu se uzorak od ležajne bronce manje trošio. Tribopar „PN480 – ležajna bronca“ također pokazuje porast prosječne širine traga trošenja povećanjem brzine, a u usporedbi s nemodificiranim prstenom dolazi do smanjenja širine traga trošenja pri većim brzinama. Usporedbom prstenova sa slike 74 moguće je uočiti da je do najvećeg prijenosa materijala s uzorka ležajne bronce na prsten došlo kod tribopara „TENIFER – ležajna bronca“ do čega dolazi zbog mikrostrukture površinskog sloja prstena (krhka zona spojeva s porama). Kod ostalih nitriranih prstenova došlo je do manjeg prijelaza materijala, dok je na nemodificiranom prstenu vidljiv izrazito mali prijenos materijala.

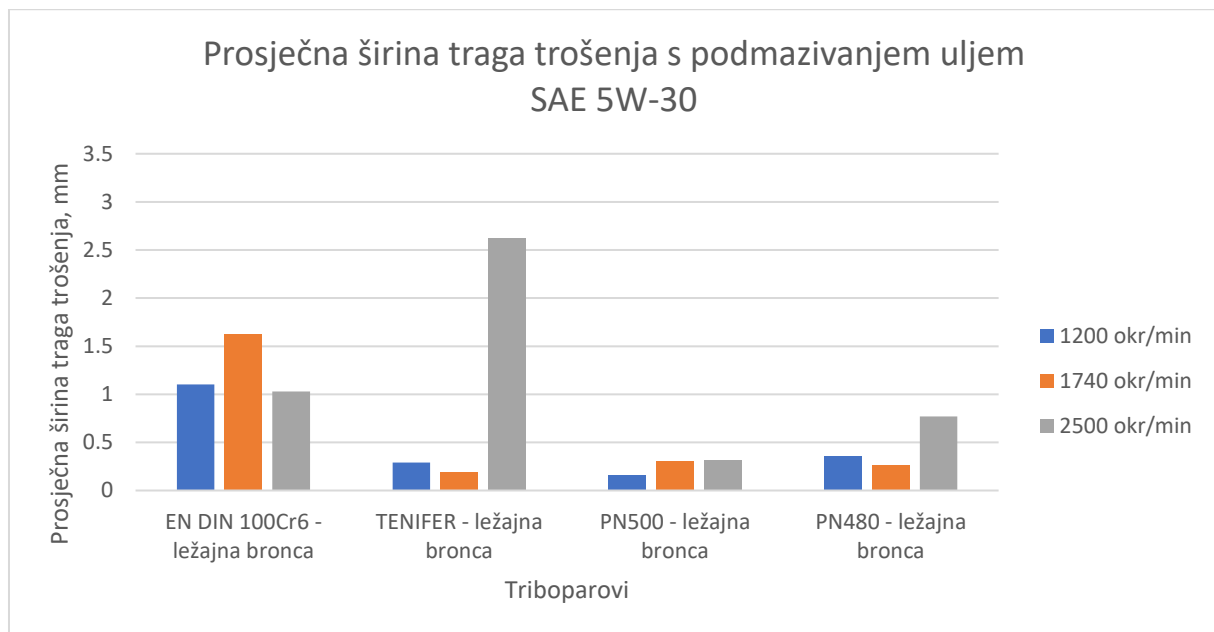


Slika 75. Histogram prosječnih vrijednosti širina traga trošenja u ispitivanju s podmazivanjem suncokretovim uljem

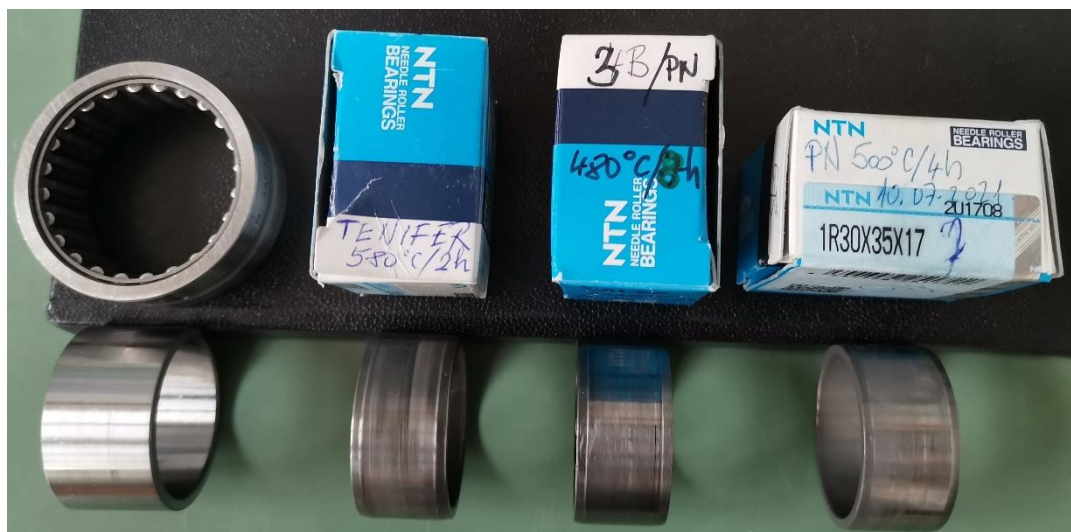


Slika 76. Prstenovi nakon provedbe ispitivanja s podmazivanjem suncokretovim uljem

Korištenjem ulja za podmazivanje dolazi do manjeg trošenja uzoraka od ležajne bronce što rezultira smanjenom prosječnom širinom traga trošenja. Kod tribopara „EN DIN 100Cr6 – ležajna bronca“ dolazi do smanjenja širine traga trošenja pri svim brzinama. Dolazi do porasta širine traga trošenja povećanjem brzine, ali pri brzini od 2500 okretaja uspostave tekućeg trenja pri čemu dolazi do smanjenja faktora trenja i smanjenja traga trošenja. Kod ostalih triboparova nije došlo do uspostave tekućeg trenja pri brzini od 2500 okretaja stoga je trošenje povećano u odnosu na manje brzine vrtnje. Kod triboparova s nitriranim prstenovima do najmanjeg prosječnog traga trošenja dolazi pri brzini od 1740 okretaja u minuti, a najveće trošenje se ostvaruje pri najmanjoj brzini. Na slici 76 vidljivo je da je došlo do manjeg prijelaza materijala s prizme na prstenove u odnosu na prstenove sa slike 74.



Slika 77. Histogram prosječnih vrijednosti širina traga trošenja u ispitivanju s podmazivanjem uljem SAE 5W-30

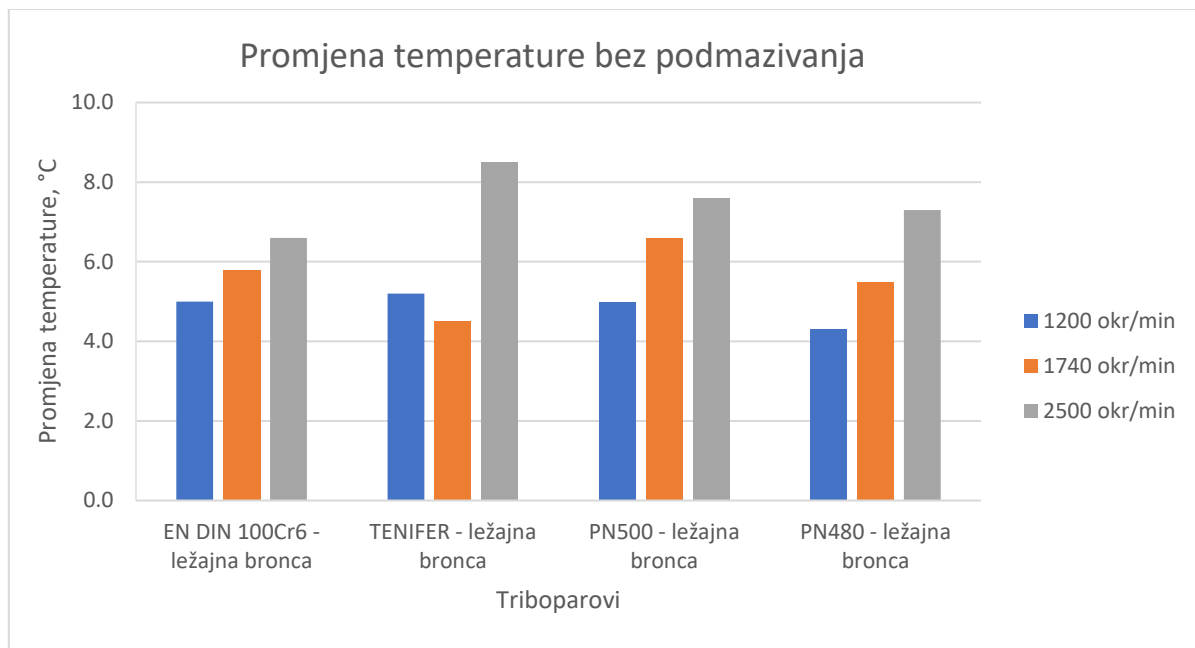


Slika 78. Prstenovi nakon provedbe ispitivanja s podmazivanjem uljem SAE 5W-30

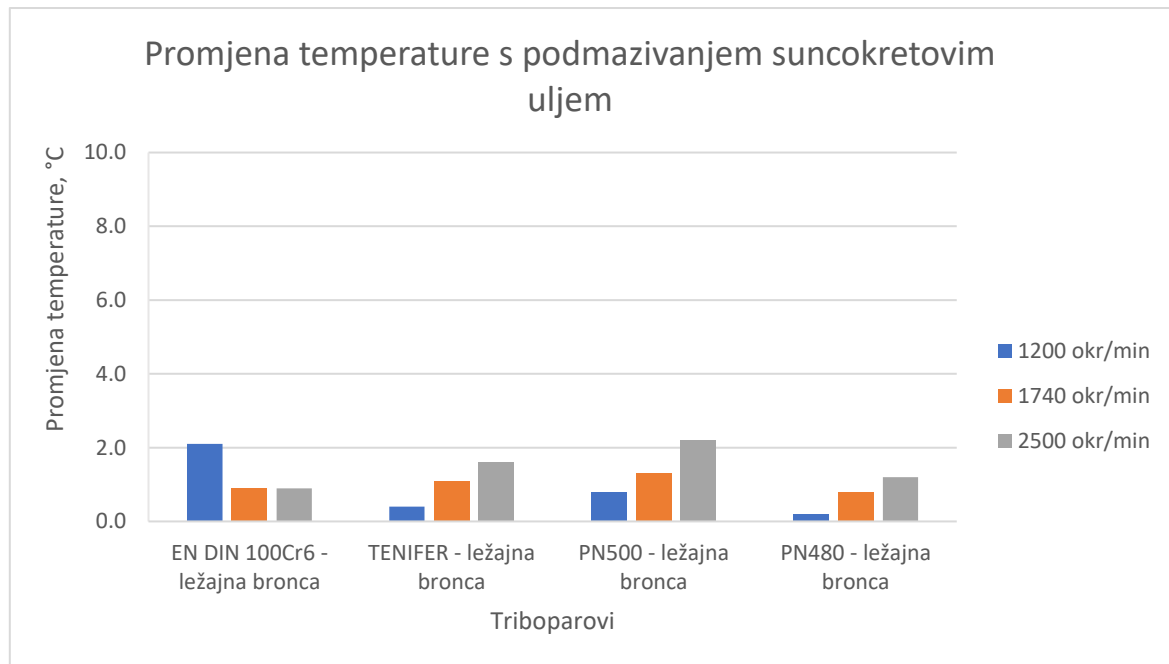
Sintetičko motorno ulje SAE 5W-30 ima aditive koji omogućavaju lakši rad ležajnih i motornih dijelova. Kod tribopara „EN DIN 100Cr6 – ležajna bronca“ dolazi do povećanja prosječne širine traga trošenja u odnosu na ispitivanje s podmazivanjem suncokretovim ulje, ali u usporedbi s vrijednostima iz ispitivanja bez podmazivanja vrijednosti su znatno manje. Triboparovi s nitriranim prstenovima pokazuje jako male vrijednosti širine traga trošenja u odnosu na ostala ispitivanja. Najmanja prosječna širina traga trošenja izmjerena je kod tribopara

„PN500 – ležajna bronca“ s prosječnim vrijednostima ispod 0,35 milimetra pri svim brzinama. Najveća prosječna širina traga trošenja ostvaruje se kod tribopara „TENIFER – ležajna bronca“, gdje je zbog povećanih parametara hrapavosti površine došlo po povećanog trošenja pri brzini od 2500 okretaja u minuti. Na slici 78 vidljivo je da ne dolazi do prijelaza materijala s prizme od ležajne bronce.

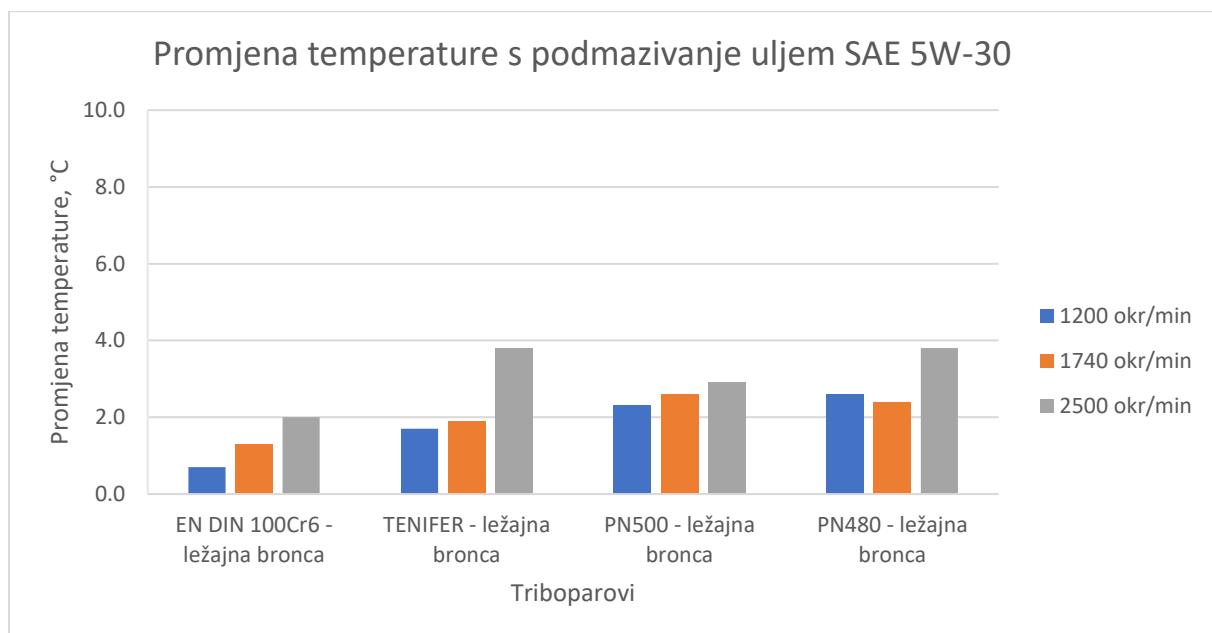
Za proračun prosječne vrijednosti faktora trenja mjerena je promjena temperature površine uzorka od prizme. Na slikama 79, 80 i 81 prikazani su histogrami koji prikazuju promjenu temperature tijekom ispitivanja.



Slika 79. Promjena temperature površine prizme od ležajne bronce tijekom ispitivanja bez podmazivanja



Slika 80. Promjena temperature površine prizme od ležajne bronce tijekom ispitivanja s podmazivanjem suncokretovim uljem



Slika 81. Promjena temperature površine prizme od ležajne bronce tijekom ispitivanja s podmazivanjem uljem SAE 5W-30

Sa slika 79, 80 i 81 vidljivo je da dolazi do porasta promjene temperature kod svih triboparova. Također je vidljivo smanjenje porasta temperature u ispitivanjima s podmazivanjem, jer sredstvo za podmazivanje odvodi dio topline koja se stvara uslijed djelovanja trenja. Na slici 79 kod tribopara „TENIFER – ležajna bronca“ dolazi do smanjenja

promjene temperature zbog smanjenog kontakta između prstena i prizme od ležajne bronce zbog vibracija.

Zbog rada koji obavi sila trenja na putu tijekom ispitivanja dolazi do generiranja toplinske energije koja je jednaka tom radu. Jednadžba za računanje toplinske energije uslijed promjene temperature prikazana je jednadžbom 7.

$$Q = m_{sr} * c_{sr} * \Delta T \quad (7)$$

Jednadžbom 8 opisan je rad koji obavi sila trenja na putu, a proračun puta tijekom ispitivanja prikazan je jednadžbom 9. Gdje je: r (vanjski radijus prstena, iznosi 17,5 milimetara)

$$W_{Ftr.} = F_{tr.} * s \quad (8)$$

$$s = 2 * r * \pi \quad (9)$$

Jednadžbom 10 opisana je ovisnost sile trenje o normalnoj sili i faktoru trenja.

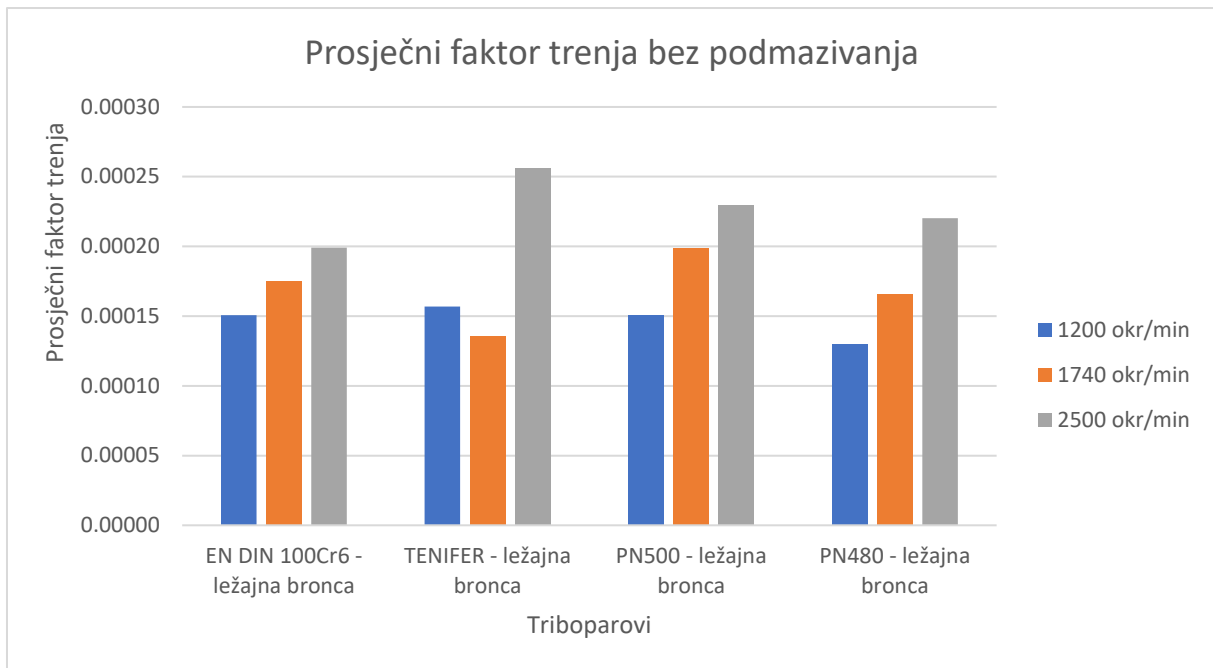
$$F_{tr.} = \mu * F_N \quad (10)$$

Zbog zakona očuvanja energije moguće je izjednačiti toplinsku energiju i rad koji obavlja sila trenja, moguće je izvesti jednadžbu 11 kojom je moguće izračunati faktor trenja.

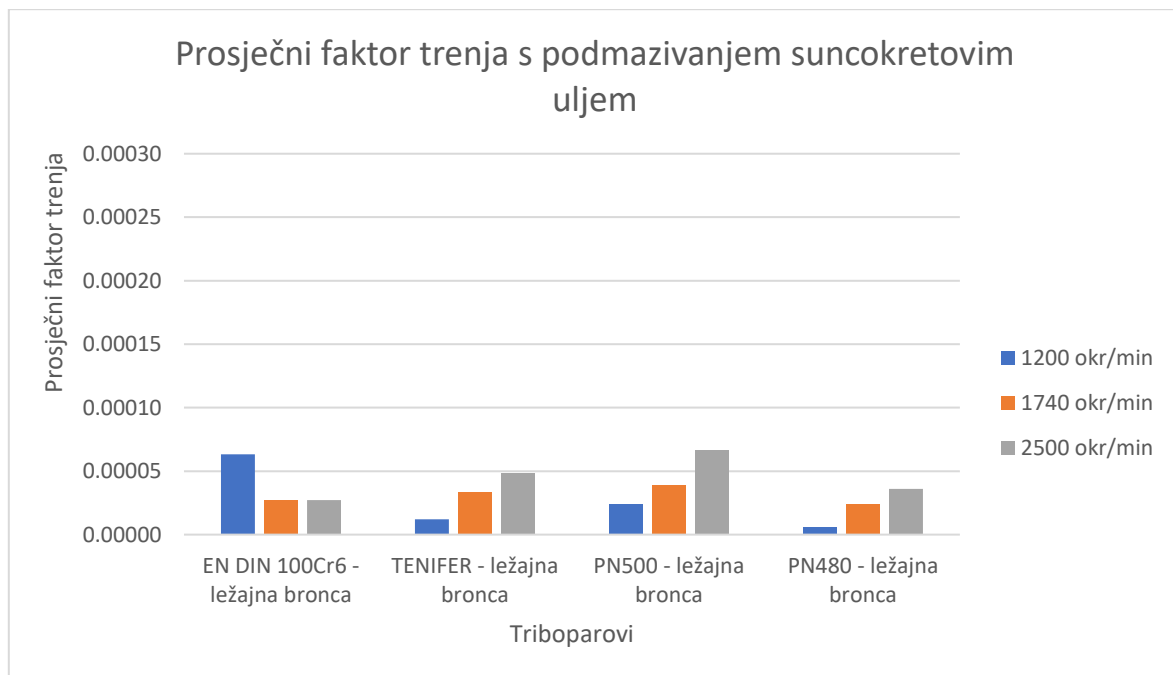
$$\mu = \frac{m_{sr} * c_{sr} * \Delta T}{F_N * s} \quad (11)$$

Gdje je u jednadžbi 11.: μ (prosječna vrijednosti faktora trenja), m_{sr} (srednja masa uzorka u kg), c_{sr} (srednji specifični toplinski koeficijent, kJ/kg*K), ΔT (promjena temperature tijekom ispitivanja u K), F_N (normalna sila kojom prizma pritišće prsten u N), s (put koji se prođe tijekom ispitivanja u m).

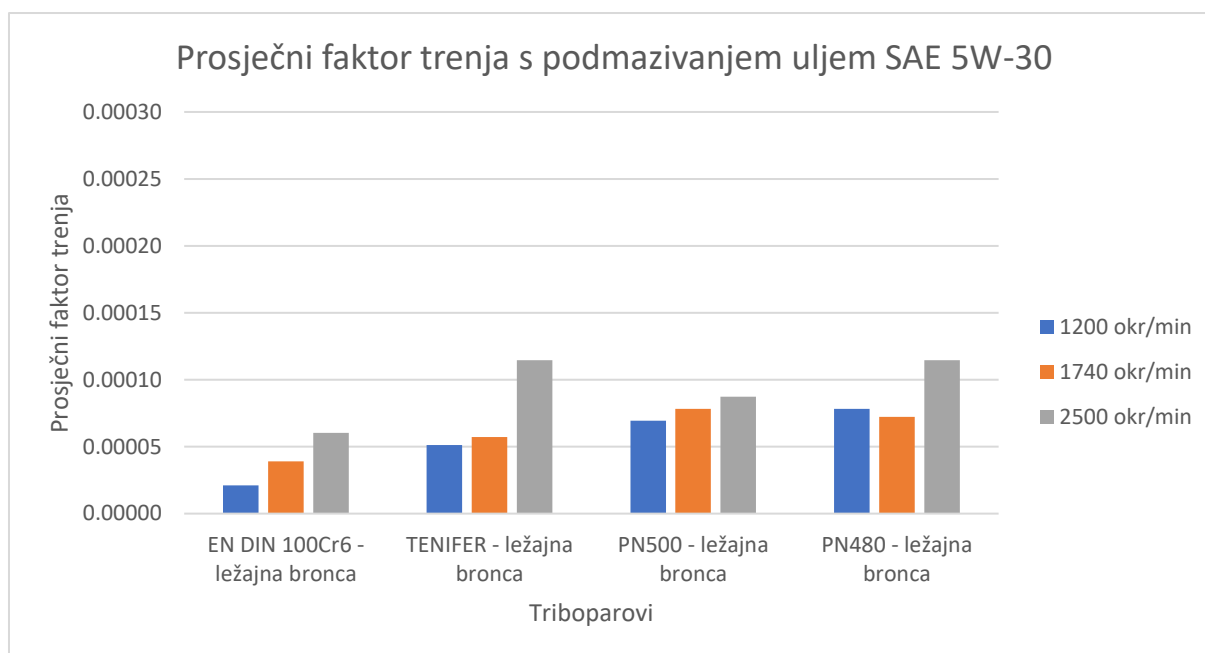
Na slikama 82, 83 i 84 prikazani su histogrami prosječnih vrijednosti faktora trenja za ispitivanja bez podmazivanja, ispitivanja s podmazivanjem suncokretovim uljem i ispitivanja s podmazivanjem uljem SAE 5W-30.



Slika 82. Prosječna vrijednost faktora trenja u ispitivanjima bez podmazivanja



Slika 83. Prosječna vrijednost faktora trenja u ispitivanjima s podmazivanjem suncokretovim uljem

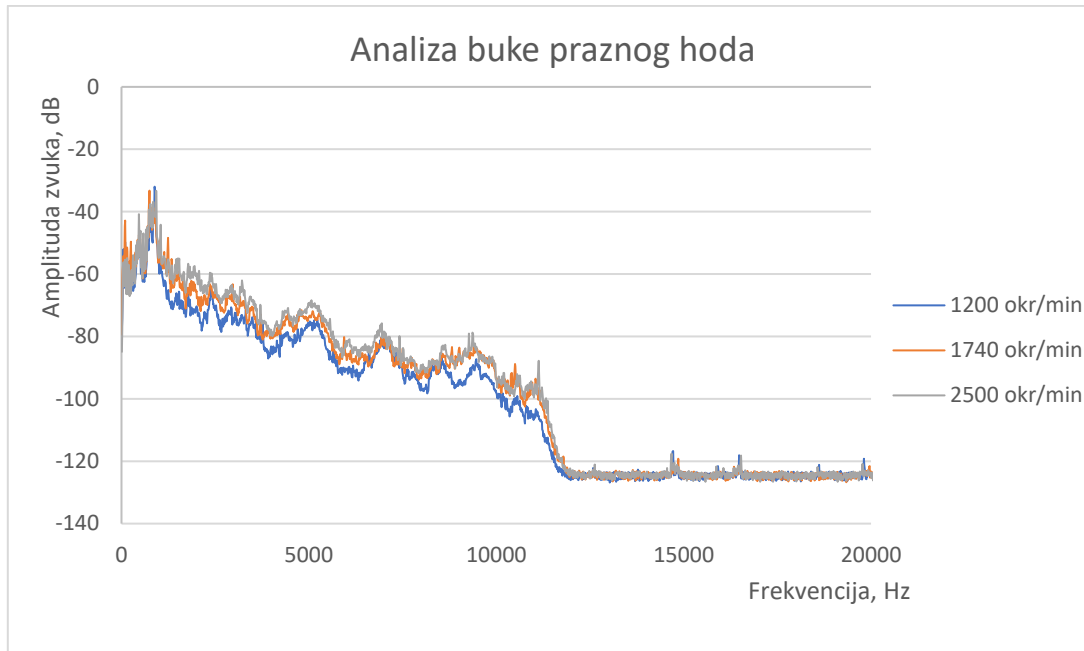


Slika 84. Prosječna vrijednost faktora trenja u ispitivanjima s podmazivanjem uljem SAE 5W-30

Usporedbom slika 82, 83 i 84 moguće je zaključiti da podmazivanjem dolazi do smanjenja vrijednosti faktora trenja kod svih triboparova. U ispitivanjima bez podmazivanja pri nižim brzinama najmanju prosječnu vrijednost faktora trenja ima tribopar „PN480 – ležajna bronca“, dok pri višim brzinama najnižu vrijednost faktora trenja ima tribopar „EN DIN 100Cr6 – ležajna bronca“. Kod svih triboparova u ispitivanju bez podmazivanja dolazi do povećanja vrijednosti prosječnog faktora trenja povećanjem brzine, osim kod tribopara „TENIFER – ležajna bronca“ zbog pojave vibracija i smanjenog kontakta između prstena i prizme. Korištenjem ulja dolazi do znatnog smanjenja vrijednosti prosječnog faktora trenja. Do najvećeg smanjenja dolazi uporabom suncokretovog ulja, gdje u slučaju tribopara „EN DIN 100Cr6 – ležajna bronca“ dolazi do smanjenja vrijednosti faktora trenja pri većim brzinama vrtnje prstena i uspostave uljnog klina između prstena i prizme. Kod ostalih triboparova povećanjem brzine vrtnje dolazi do povećanja faktora trenja što je posljedica većih vrijednosti parametara hrapavosti površine i promjene u profilu hrapavosti prstena. Kod ispitivanja s podmazivanjem uljem SAE 5W-30 dolazi povećanja vrijednosti prosječnog faktora trenja povećanjem brzine vrtnje prstena. Najmanja vrijednost prosječnog koeficijenta trenja ostvaruje se kod tribopara „EN DIN 100Cr6 – ležajna bronca“. U svim ispitivanjima faktora trenja tribopar „PN500 – ležajna bronca“ pokazuje najujednačenije rezultate gdje u svim ispitivanjima dolazi do malog povećanja vrijednosti prosječnog faktora trenja povećanjem brzine. U radu

Za snimanje zvuka tijekom ispitivanja korišten je mikrofon i program za snimanje i analizu zvuka „Audacity“. Na slici 85. prikazan je graf amplitude zvuka ovisno o frekvenciji

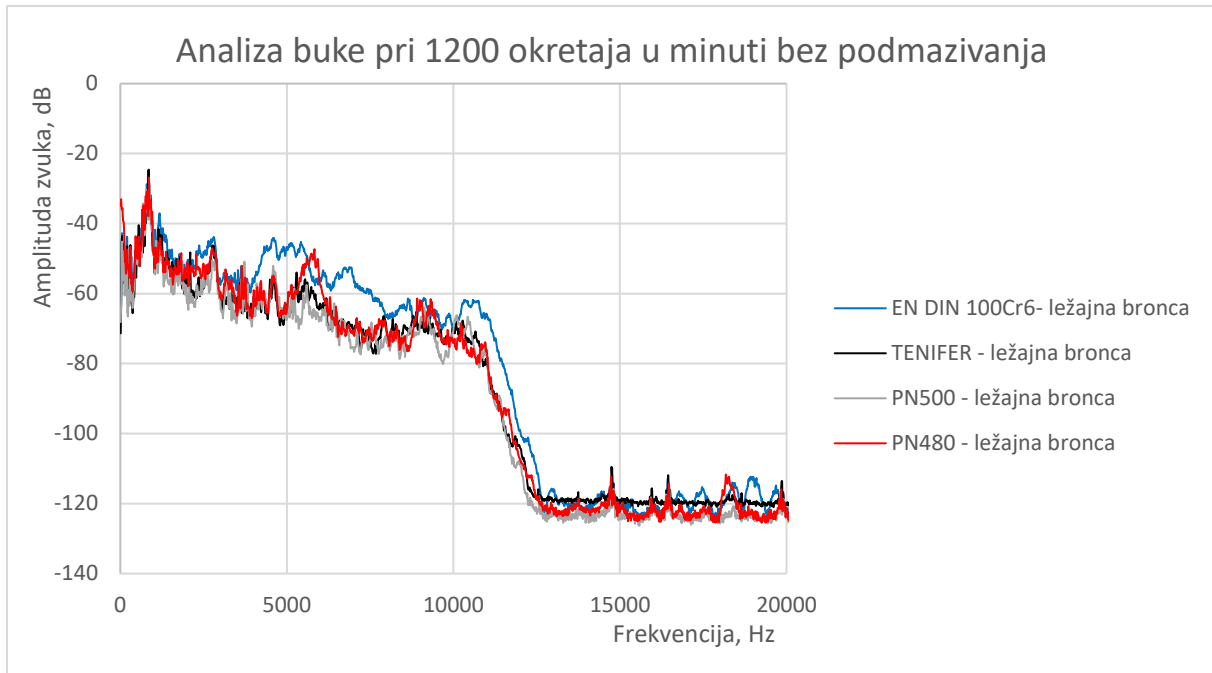
koji je snimljen za vrijeme rada stroja bez opterećenja i ispitivanja trenja. Snimljen je zvuk rada pri brzinama vrtnje od 1200, 1740 i 2500 okretaja u minuti koje su korištene za ispitivanje faktora trenja i širine traga trošenja.



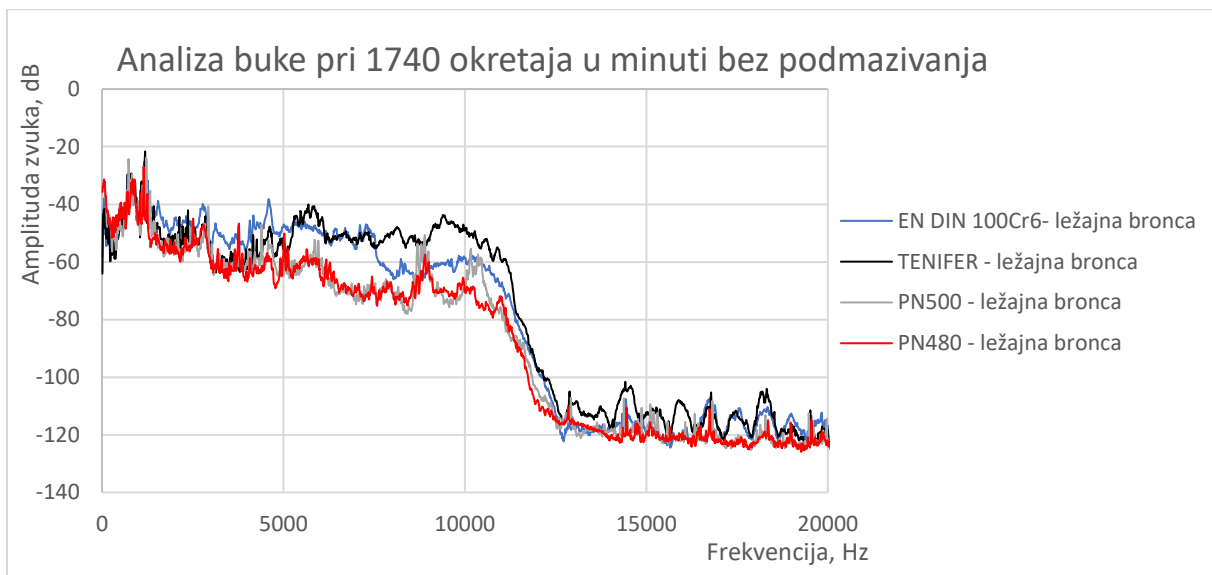
Slika 85. Analiza buke praznog hoda (bez opterećenja)

Na slici 85 moguće je vidjeti kako dolazi do porasta glasnoće pri određenim frekvencijama bez obzira na brzinu vrtnje. Te frekvencije su karakteristične za rad uređaja „Proxxon DB 250“.

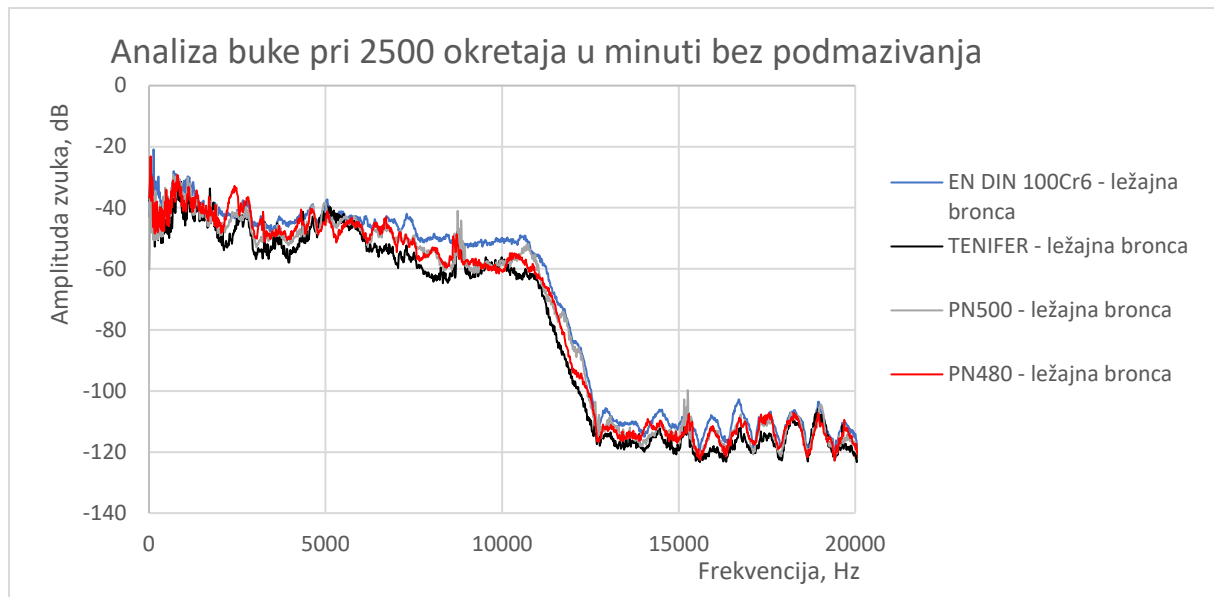
Na slikama 86, 87 i 88 prikazana je usporedba amplitude zvuka za sve triboparove u ispitivanjima bez podmazivanja za brzine vrtnje prstena 1200, 1740 i 2500 okretaja u minuti.



Slika 86. Analiza buke pri 1200 okretaja u minuti bez podmazivanja



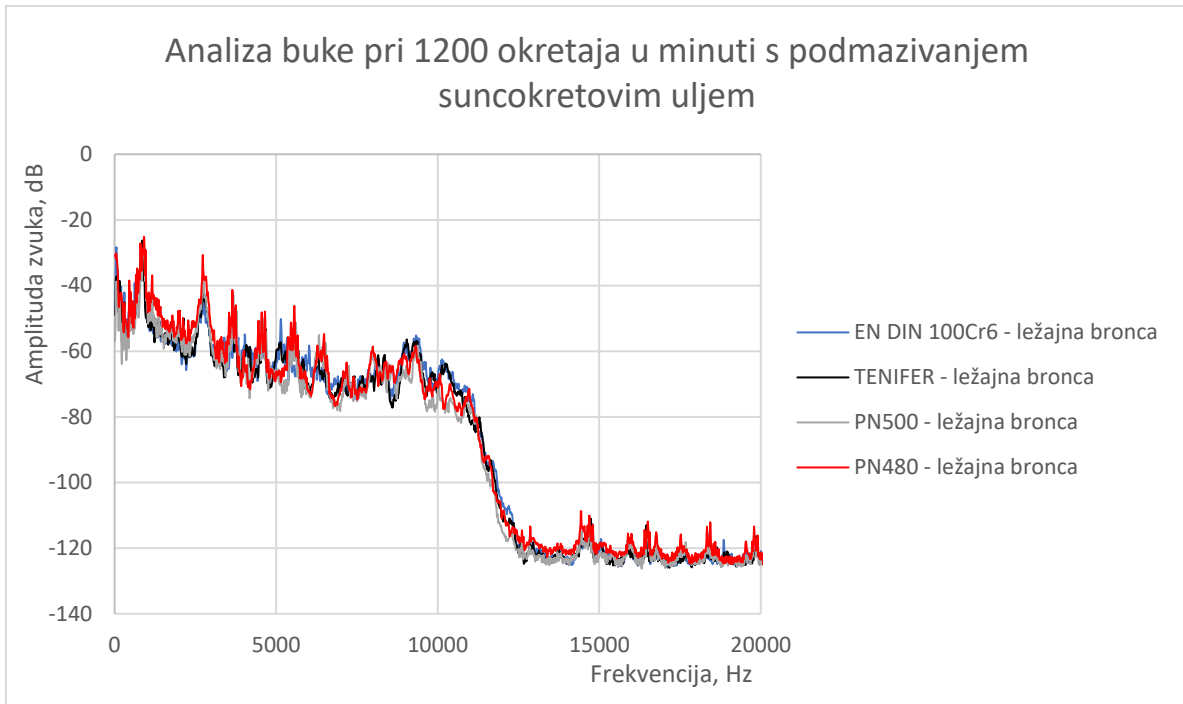
Slika 87. Analiza buke pri 1740 okretaja u minuti bez podmazivanja



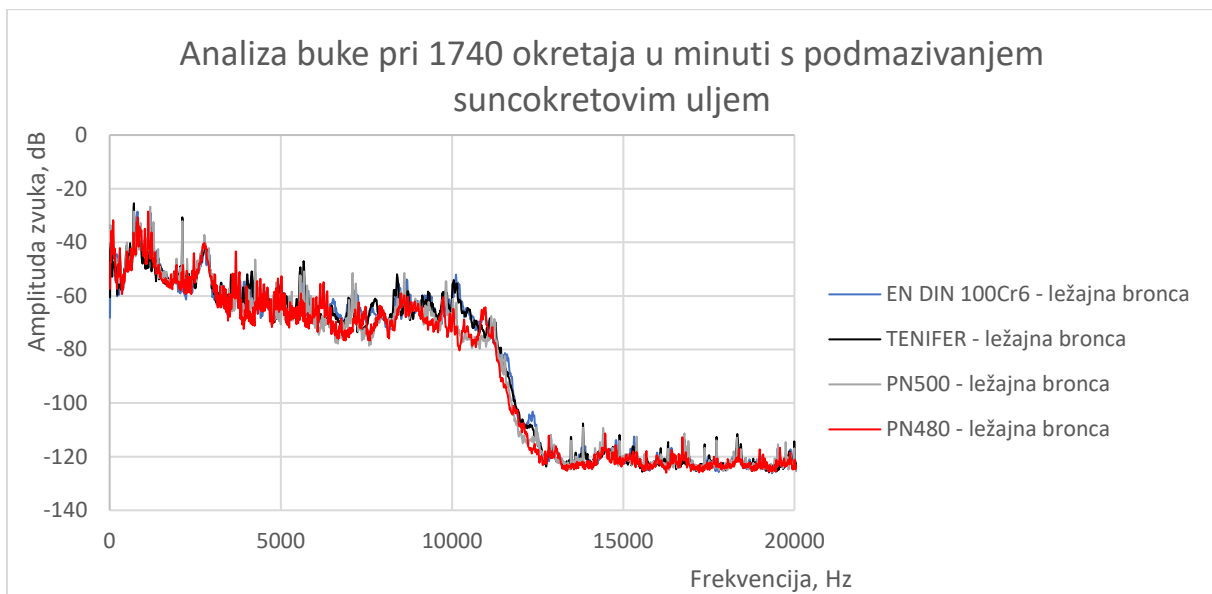
Slika 88. Analiza buke pri 2500 okretaja u minuti bez podmazivanja

Povećanjem brzine vrtnje prstena dolazi do povećanja buke tijekom ispitivanja. U rasponu od 0 Hz do 11000 Hz razina buke je relativno visoka, dok pri višim frekvencija razina buke spušta se na jako nisku razinu. Pri brzini od 1200 okretaja u minuti svi triboparovi imaju sličnu razinu amplitude do vrijednosti frekvencije od 4500 Hz nakon čega tribopar „EN DIN 100Cr6 – ležajna bronca“ počinje imati glasnjiji rad i odstupa od ostalih triboparova. Triboparovi s nitriranim prstenovima pokazuju slično ponašanje pri brzinama vrtnje od 1200 okretaja u minuti. Pri brzini vrtnje od 1740 okretaja u minuti glasnjiji su triboparovi „EN DIN 100Cr – ležajna bronca“ i „TENIFER - ležajna bronca“. Pri najvišoj brzini ispitivanja od 2500 okretaja u minuti svi prstenovi pokazuju sličnu amplitudu zvuka kroz cijeli spektar mjerenja. U svim ispitivanjima bez podmazivanja triboparovi s prstenovima nitriranim u plazmi pokazuju sličnu amplitudu buke kroz cijeli spektar mjerenja.

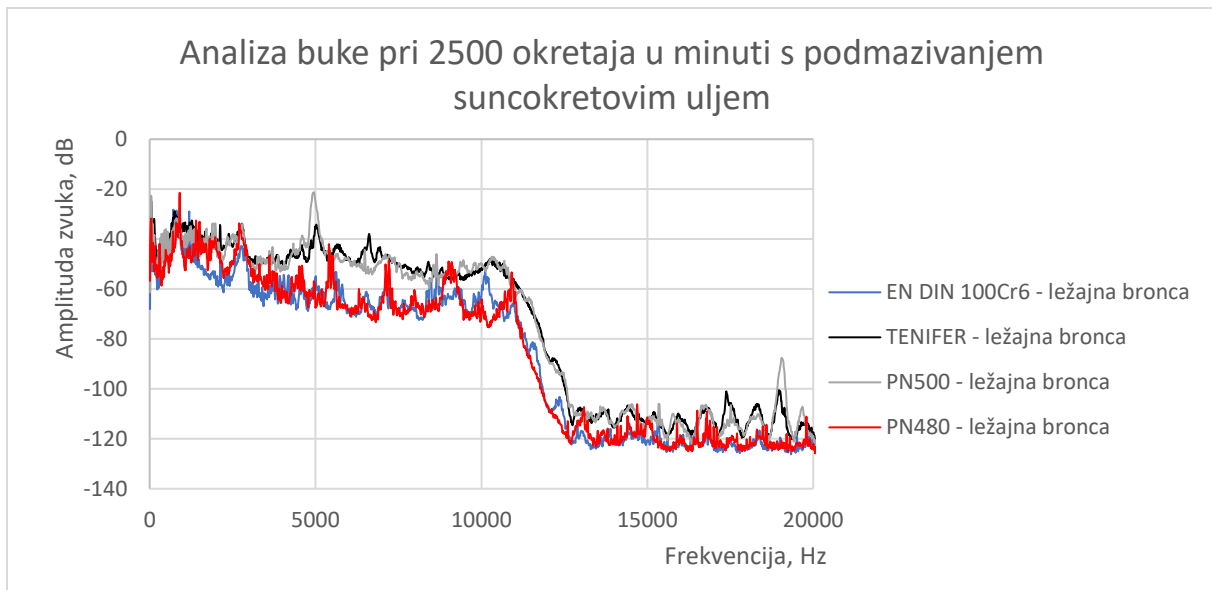
Na slikama 89, 90 i 91 prikazani su dijagrami usporedbe amplitude zvuke ovisno o frekvenciji za sve prstenove u ispitivanjima s podmazivanjem suncokretovim uljem pri brzinama vrtnje od 1200, 1740 i 2500 okretaja u minuti.



Slika 89. Analiza buke pri 1200 okretaja u minuti u ispitivanjima s podmazivanjem suncokretovim uljem



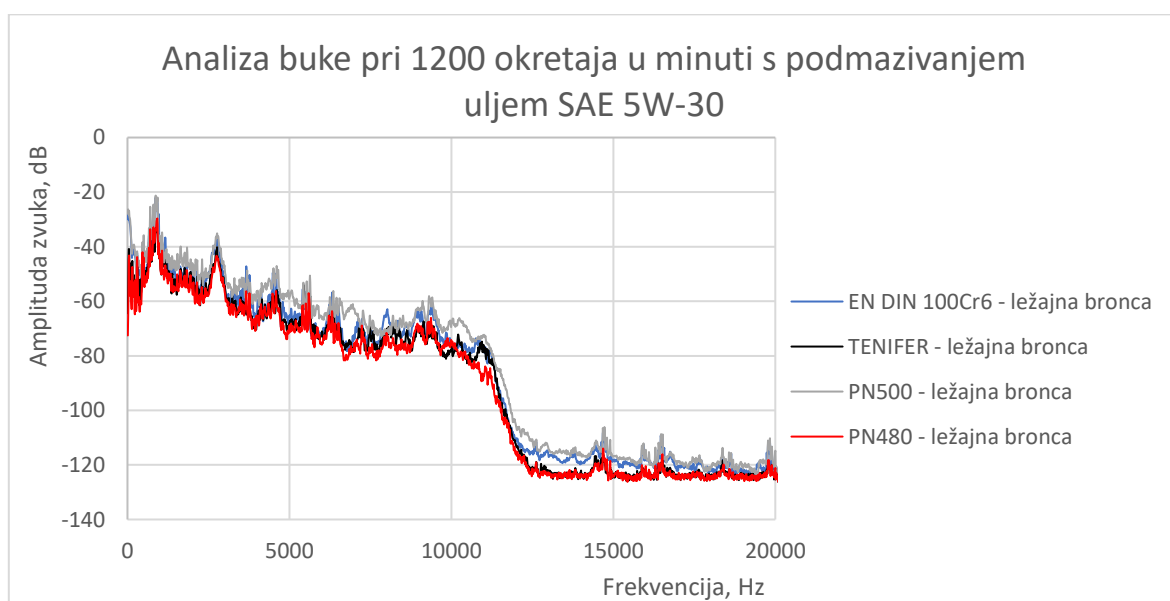
Slika 90. Analiza buke pri 1740 okretaja u minuti u ispitivanjima s podmazivanjem suncokretovim uljem



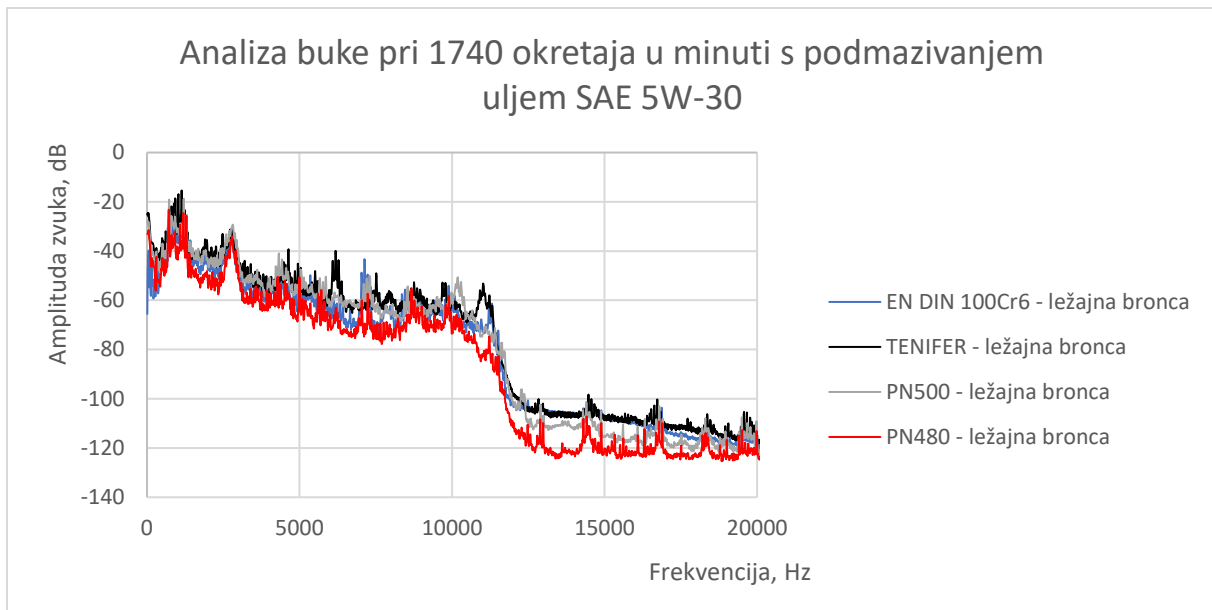
Slika 91. Analiza buke pri 2500 okretaja u minuti u ispitivanjima s podmazivanjem suncokretovim uljem

U ispitivanjima s podmazivanjem suncokretovim ulje pri brzinama vrtnje od 1200 i 1740 okretaja u minuti svi triboparovi pokazuju sličnu amplitudu zvuka pri svim frekvencijama. U ispitivanju s brzinom vrtnje od 2500 okretaja u minuti dolazi do značajnog porasta u amplitudi zvuka kod triboparova „TENIFER – ležajna bronca“ i „PN500 – ležajna bronca“ koji su bučniji u cijelom frekvencijskom spektru.

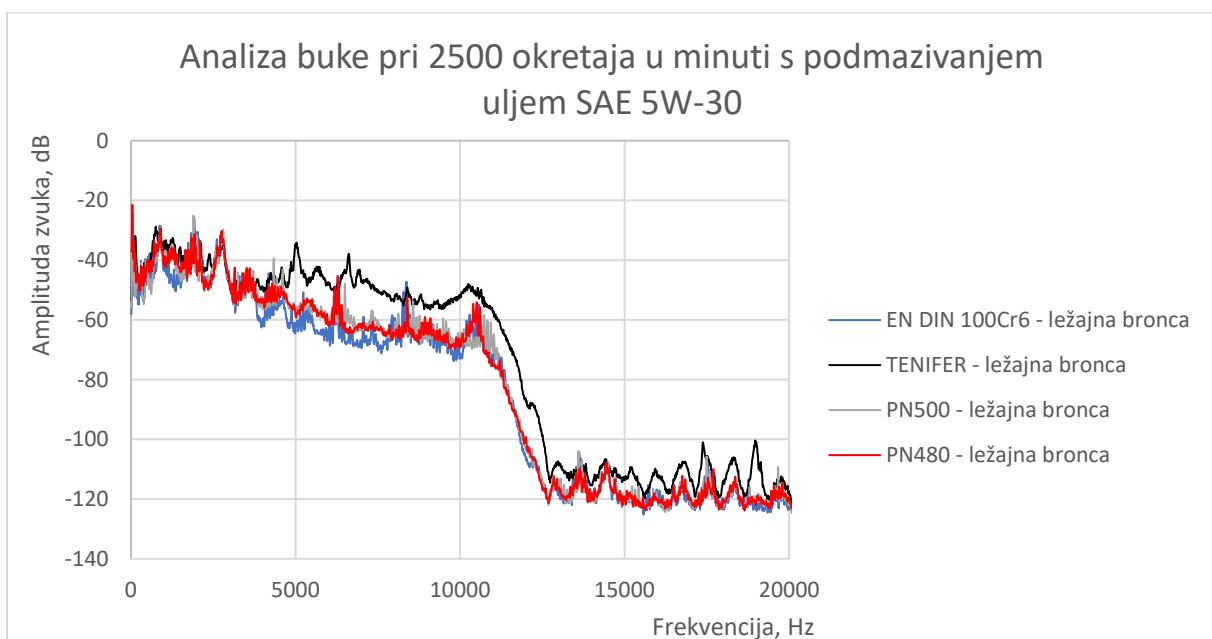
Na slikama 92, 93 i 94 prikazani su dijagrami amplitude zvuka u ovisnosti o frekvenciji tijekom ispitivanja s podmazivanjem uljem SAE 5W-30 pri brzinama vrtnje od 1200, 1740 i 2500 okretaja u minuti.



Slika 92. Analiza buke pri 1200 okretaja u minuti u ispitivanjima s podmazivanjem uljem SAE 5W-30



Slika 93. Analiza buke pri 1740 okretaja u minuti u ispitivanjima s podmazivanjem uljem SAE 5W-30



Slika 94. Analiza buke pri 2500 okretaja u minuti u ispitivanjima s podmazivanjem uljem SAE 5W-30

Pri brzinama vrtnje od 1200 i 1740 okretaja u minuti svi triboparovi imaju sličnu amplitudu zvuka koja je manja u usporedbi s onima iz ispitivanja bez podmazivanja ili s podmazivanjem suncokretovim uljem. Pri najvećoj brzini vrtnje od 2500 okretaja u minuti najveću buku proizvodi tribopar „TENIFER – ležajna bronca“ kao i u ispitivanju s podmazivanjem suncokretovim uljem.

6.4. Diskusija rezultata

U ispitivanjima ispitani su unutarnji prstenovi igličastih ležajeva s ciljem utvrđivanja sinergijskog utjecaja nitriranja i podmazivanja na smanjenje kinetičkog trenja u igličastim ležajevima. Korištena su četiri unutarnja prstena igličastih ležajeva: prsten bez modificiranja površine od čelika EN DIN 100Cr6, prsten modificiran postupkom TENIFER (nitriranje u solnoj kupci), prsten modificiran postupkom nitriranja u plazmi pri temperaturi od 500 °C, te prsten modificiran postupkom nitriranja u plazmi pri temperaturi od 480 °C. U ispitivanjima širine traga trošenja, faktora trenja i buke kao protupar korišten je uzorak od ležajne bronce u obliku prizme.

Na svim uzorcima provedeno je ispitivanje hrapavosti površine. U ispitivanju su snimljeni parametri hrapavosti i profili hrapavosti površine. Analizom rezultata utvrđeno je da postupcima nitriranja dolazi do promjene hrapavosti površine u odnosu na nemodificirani prsten. Postupkom TENIFER dolazi do najveće promjene u vrijednostima parametara hrapavosti, a na profilu hrapavosti su vidljive valovitosti koju označuju pojavu velikih pora u poroznoj i krhkoj zoni spojeva. Postupkom nitriranja u plazmi pri temperaturi od 500 °C dolazi do značajne promjene u parametrima hrapavosti i profilu hrapavosti. Na površini prstena nastaju male pore u tankoj zoni spojeva koja nastaje pri parametrima nitriranja. Do najmanje promjene u parametrima hrapavosti površine i profilu površine dolazi obradom postupkom nitriranja u plazmi pri temperaturi od 480 °C. U odnosu na nemodificirani prsten ne dolazi do značajne razlike nakon obrade. Nitiranjem pri toj temperaturi ne dolazi do nastanka zone spojeva, već je na površini tvrda difuzijska zona bez pora. U odnosu na prstenove uzorak od ležajne bronce ima puno grublju površinu što se očituje iz puno većih vrijednosti parametara hrapavosti površine i grubljeg profila hrapavosti.

Ispitivanjem tvrdoće površine izmjerena je tvrdoća prstenova i uzorka od ležajne bronce. Za sve uzorke korištena je metoda HV 0,5. Ispitivanjem je utvrđeno da nemodificirani prsten ima prosječnu tvrdoću od 859 HV. Postupkom TENIFER dolazi do nastanka krhke zone spojeva koja ima manju tvrdoću od nemodificiranog prstena u iznosu od 473 HV. Zbog temperature na kojoj se provodi postupak (580 °C) dolazi do dodatnog popuštanja osnovnog materijala ispod nitrirane površine čime se dodatno snižava tvrdoća prstena. Do sniženja tvrdoće također dolazi i nakon modificiranja postupkom nitriranja u plazmi pri temperaturi od 500 °C koja iznosi 662 HV. Postupkom nitriranja u plazmi pri temperaturi od 480 °C dolazi do povećanja tvrdoće u odnosu na nemodificirani prsten i tvrdoća površine iznosi 890 HV. Na površini se nalazi tvrda difuzijska zona koja nastaje nitiranjem pri tim parametrima. Ležajna

bronca od koje se rade blazinice za klizne ležajeve je znatno mekši materijal od prstenova i tvrdoća površine prizme iznosi 82 HV što je poželjno za materijal blazinice kliznog ležaja.

U ispitivanju metodom prizme po prstenu mjereno je više parametara. Mjerena je prosječna vrijednost širine traga trošenja na prizmi koja nastaje uslijed djelovanja trenja, mjerena je prosječna vrijednost faktora trenja do kojeg nastaje zbog gibanja između prstena i prizme, te razina i promjena buke do koje dolazi tijekom ispitivanja. Ispitivanjem širine traga trošenja moguće je utvrditi da se korištenjem sredstva podmazivanje smanjuje širina traga trošenja, te da se povećanjem brzine vrtnje postižu veće vrijednosti širine traga trošenja. Najmanju prosječnu širinu traga trošenja ima tribopar „TENIFER – ležajna bronca“ kod kojeg dolazi do najvećeg prinosa materijala s bronce na prsten. U pore na površini ulazi ležajna bronca zbog čega tijekom ispitivanja dolazi do smanjenog trošenja. Tribopar s najvećim prosječnim vrijednostima širine traga trošenja je „PN500 – ležajna bronca“ kod kojeg tijekom ispitivanja s brzinom vrtnje od 1740 okretaja u minuti dolazi pojave vibracija. Podmazivanjem suncokretovim ulje smanjuju se vrijednosti širine traga trošenja za sve triboparove. Povećanjem brzine vrtnje prstena ne dolazi do povećanja širine traga trošenja na uzorcima od ležajne bronce. Pri brzinama od 1200 i 2500 okretaja u minuti najmanja širina traga trošenja ostvaruje se kod tribopara „EN DIN 100Cr6 – ležajna bronca“, dok je pri brzini od 1740 okretaja u minuti kod tog tribopara širina traga trošenja najveća. Pri brzini od 1740 okretaja u minuti najmanja širina traga trošenja pojavljuje se kod tribopara „PN480 – ležajna bronca“. U ispitivanju s podmazivanjem uljem SAE 5W-30 dolazi do nastanka tragova trošenja s prosječno najmanjim vrijednostima. U ispitivanjima svi triboparovi s modificiranim prstenovi imaju izrazito niske širine tragova trošenja. Pri brzinama od 1200 i 2500 okretaja u minuti do nastanka najmanjeg prosječnog traga trošenja dolazi kod tribopara „PN500 – ležajna bronca“, a pri brzini od 2500 okretaja u minuti najmanja vrijednost prosječnog traga trošenja ostvaruje se kod tribopara „PN480 – ležajna bronca“. Kod ispitivanja prosječnog faktora trenja korištenjem sredstva za podmazivanje dolazi do značajnog smanjenja faktora trenja. U ispitivanju bez podmazivanja pri brzinama od 1200 i 1740 okretaja u minuti najmanji faktor trenja se ostvaruje kod tribopara „PN480 – ležajna bronca“ dok pri brzini od 2500 okretaja najmanji prosječni faktor trenja kod tribopara „EN DIN 100Cr6 – ležajna bronca“. Podmazivanjem suncokretovim uljem ostvaruju se najmanji prosječni koeficijenti trenja. Triboparovi s najmanjim prosječnim faktorima trenja su isti kao u ispitivanju bez podmazivanja. Podmazivanjem uljem SAE 5W-30 prosječni najmanji faktor trenja ostvaruje se kod tribopara „EN DIN 100Cr6 – ležajna bronca“ pri svim brzinama vrtnje. Analizom buke koja nastaje tijekom rada uređaja za ispitivanje moguće je utvrditi specifične frekvencije uređaja kod kojih dolazi do povećanja amplitude zvuka, odnosno

povećanja glasnoće rada. Analizom snimljenih snimaka tijekom ispitivanja svakog tribopara utvrđene su frekvencije pri kojima dolazi do povećanja buke, te koji tribopar ostvaruje najmirniji i najtiši rad. Buka koja nastaje je ispitana za različite brzine u uvjetima bez i sa podmazivanjem. U većini ispitivanja prstenovi pokazuju slične karakteristike buke. Pri određenim brzinama i uvjetima podmazivanja dolazi do odstupanja nekih triboparova. Tako pri brzini od 1200 okretaja u minuti bez podmazivanja najveću buku tijekom ispitivanja proizvodio je tribopar „EN DIN 100Cr6 – ležajna bronca“. Povećanjem brzine na 1740 okretaja u minuti dolazi do povećanja glasnoće za tribopar „TENIFER – ležajna bronca“, a kod tribopara „EN DIN 100Cr6 – ležajna bronca“ ne dolazi do smanjenja buke. Postavljanjem brzine ispitivanja na 2500 okretaja u minuti tribopar „TENIFER – ležajna bronca“ ostvaruje najtiši rad, a ostali prstenovi imaju sličnu razinu buke tijekom cijelog ispitivanja. Korištenjem suncokretovog ulja za podmazivanje dolazi do ujednačene buke tijekom ispitivanja pri brzinama od 1200 i 1740 okretaja u minuti za sve triboparova, ali povećanjem brzine vrtnje na 2500 okretaja u minuti dolazi do značajnog povećanja generiranja buke kod triboparova „PN500 – ležajna bronca“ i „TENIFER – ležajna bronca“. Ispitivanja s podmazivanjem uljem SAE 5W-30 pružaju najujednačeniju razinu buke prilikom nižih brzina vrtnje (1200 i 1740 okretaja u minuti). Pri brzini od 2500 okretaja u minuti dolazi do porasta razine buke tijekom ispitivanja tribopara „TENIFER – ležajna bronca“.

7. Zaključak

Na ispitnim uzorcima: nemodificirani prsten od čelika EN DIN 100Cr6, prsten nitriran postupkom TENIFER, prsten nitriran u plazmi pri temperaturi od 500 °C, prsten nitriran u plazmi pri temperaturi 480°C, te prizmi od ležajne bronce provedena su ispitivanja hrapavosti površine, tvrdoće površine, te ispitivanje prosječne širine traga trošenja, prosječnog faktora trenja i prosječne buke metodom prizme po prstenu. Analizom rezultata dolazi se do sljedećih zaključaka.

Na temelju rezultata hrapavosti površine slijedi da se modificiranjem postupcima TENIFER i nitriranjem u plazmi pri temperaturi od 500 °C znatno mijenjaju parametri hrapavosti površine i profila hrapavosti na što utječe nastanak porozne zone spojeva. Modificiranjem nitriranjem u plazmi pri temperaturi od 480 °C dolazi do male promjene u parametrima hrapavosti i profila hrapavosti bez nastanka zone spojeva.

Mjerenjem tvrdoće površine utvrđuje se da dolazi do velikog smanjenja tvrdoće kod modificiranjem postupkom TENIFER. Do značajnog smanjenja tvrdoće površine dolazi nakon postupka nitriranja u plazmi pri temperaturi od 500 °C. U oba postupka do smanjenja tvrdoće dolazi zbog nastanka krhke zone spojeva i popuštanja jezgre prstena. Nitriranjem u plazmi pri temperaturi od 480 °C dolazi do malog povećanja tvrdoće površine.

Iz ispitivanja metodom prizme po prstenu može se zaključiti da podmazivanjem dolazi do smanjenja vrijednosti prosječne širine traga trošenja, faktora trenja i razine buke, a povećanjem brzine vrtnje prstena dolazi do povećanja tih vrijednosti. Sva ispitivanja su provedena pri normalnom opterećenju od 6,305 N. U ispitivanjima bez podmazivanja i podmazivanjem uljem SAE 5W-30 nitriranjem se postižu manje vrijednosti prosječne širine traga trošenja. Kod ispitivanja s podmazivanjem suncokretovim uljem najmanje vrijednosti širine traga trošenja ostvaruju se kod triboparova „EN DIN 100Cr6 – ležajna bronca“ i „PN480 – ležajna bronca“ ovisno o brzini vrtnje prstena. U ispitivanju faktora trenja najmanje prosječne vrijednosti faktora trenja ostvaruju se podmazivanjem suncokretovim uljem, a na smanjenje također utječe nitriranje površine. Podmazivanjem uljem SAE 5W-30 dolazi do smanjenja prosječnog faktora trenja u odnosu na ispitivanja bez podmazivanja, a najmanji prosječni faktor trenja ostvaruje se kod tribopara „EN DIN 100Cr6 – ležajna bronca“. Analizom buke moguće je zaključiti da triboparovi imaju slične karakteristike trošenja ovisno o uvjetima ispitivanja.

U nastavku ovih ispitivanja preporuča se provedba ispitivanja s različitim temperaturama ulja za podmazivanje, te različitim vrstama ležaja s različitim modifikacijama površine.

8. Literatura

- [1] <https://hr.wikipedia.org/wiki/Ležaj> dostupno (7.5.2022.)
- [2] Cerovečki J. Prevlčenje prstena kliznog ležaja PACVD prevlakama. [Zagreb]: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2021.
- [3] Decker K-H. Elementi strojeva. Zagreb: Tehnička knjiga; 2006.
- [4] <https://blog.myrank.co.in/rolling-friction/> dostupno (7.5.2022.)
- [5] https://www.nsk.com/common/data/ctrGPdf/bearings/split/e1102/nsk_cat_e1102m_a7-15.pdf dostupno (7.5.2022.)
- [6] https://www.nsk.com/common/data/ctrGPdf/bearings/split/e1102/nsk_cat_e1102m_a105-113.pdf dostupno (7.5.2022.)
- [7] https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi_109_de_en.pdf dostupno (7.5.2022.)
- [8] Bhadeshia HKDH. Steels for bearings. Vol. 57, Progress in Materials Science. 2012. p. 268–435. doi: 10.1016/j.pmatsci.2011.06.002
- [9] Qiu M, Chen L, Li Y, Yan · Jiafei. Bearing Tribology Principles and Applications
- [10] Landek D. Predavanje iz kolegija „Posebni metalni materijali“, „Alatni materijali“, autorizirana predavanja. Zagreb; 2020.
- [11] <https://www.ausasteel.com/fichas/Bearing-Steel-100Cr6-AUSA.pdf> dostupno (7.5.2022.)
- [12] Bayrak M, Ozturk F, Demirezen M, Evis Z. Analysis of tempering treatment on material properties of DIN 41Cr4 and DIN 42CrMo4 steels. Journal of Materials Engineering and Performance. 2007 Oct;16(5):597–600. doi: 10.1007/s11665-007-9043-1
- [13] Abdenour S, Linda A, Oualid C, Ali B, Salah LM, Hamid D, et al. Influence of the carburization time on the structural and mechanical properties of XC20 steel. Materials Research Express. 2021 Aug 1;8(8). doi: 10.1088/2053-1591/ac1ece
- [14] Karivaratharajan A, Raha B. Effect of various heat treatment processes on microstructural evolution and properties of cast austenitic stainless steel of ASTM A351 grade CF8C. In: Materials Today: Proceedings. Elsevier Ltd; 2021. p. 418–24. doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.388
- [15] <https://tubingchina.com/17-4PH-630-Heat-Treatment.htm> dostupno (20.5.2022.)
- [16] Bergmann CP, Aghajani H, Behrangi S. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering Series Editor: Plasma Nitriding of Steels [Internet]. Dostupno na: <http://www.springer.com/series/11054>
- [17] Matijević B. Predavanje iz kolegija „Napredne tehnologije materijala“, autorizirana predavanja. Zagreb; 2022.
- [18] Landek D. Predavanje iz kolegija „Postupci modificiranja i prevlačenja površina“, autorizirana predavanja. Zagreb; 2022.
- [19] Aizawa T, Kuwahara H. Plasma Nitriding as an Environmentally Benign Surface Structuring Process
- [20] Landek D. Predavanje iz kolegija „Tribologija i inženjerstvo površina“, autorizirana predavanja. Zagreb; 2022.
- [21] Paula Souza C, Dorigão Manfrinato Fatec Sorocaba Centro Paula Souza M, Sgarbi Rossino Fatec Sorocaba Centro Paula Souza L, Muñoz Riofano RM, Varavallo R, Dorigão Manfrinato M, et al. The influence of plasma nitriding on the fatigue behavior of

- austenitic stainless steel types AISI 316 and AISI 304 THE INFLUENCE OF PLASMA NITRIDING ON THE FATIGUE BEHAVIOR OF AUSTENITIC STAINLESS STEEL TYPES AISI 316 AND AISI 304 1 [Internet]. 2010. Dostupno na: <https://www.researchgate.net/publication/288096435>
- [22] Cajner F, Landek D, Šolić S. KARAKTERIZACIJA NITROKARBURIRANOG SLOJA. Zagreb; 2006.
- [23] Choudhury SK, Chinchani S. Finish Machining of Hardened Steel. In: Comprehensive Materials Finishing. Elsevier Inc.; 2017. p. 47–92. doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.09149-9
- [24] Ettl P, Schmidt BE, Schenk M, Laszlo I, Haeusler G. Roughness parameters and surface deformation measured by coherence radar. In: International Conference on Applied Optical Metrology. SPIE; 1998. p. 133–40. doi: 10.1117/12.323304
- [25] Tekçe N, Fidan S, Tuncer S, Kara D, Demirci M. The effect of glazing and aging on the surface properties of CAD/CAM resin blocks. Journal of Advanced Prosthodontics. 2018 Feb 1;10(1):50–7. doi: 10.4047/jap.2018.10.1.50
- [26] <https://dokument.pub/metallographic-preparation-of-nitrided-and-nitrocarburised-flipbook-pdf.html> dostupno (1.6.2022.)
- [27] <https://www.gscsg.com/tafel-extrapolation.html> dostupno (1.6.2022.)
- [28] <https://labomat.eu/gb/faq/613-iso-9227-how-to-conduct-a-salt-spray-test.html> dostupno (1.6.2022.)
- [29] Qian X, Jin K, Lu S, Lv L. Research on salt spray test of power facilities based on standardized laboratory construction. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Institute of Physics Publishing; 2020. doi: 10.1088/1757-899X/782/3/032013
- [30] Lugt PM. Grease lubrication in rolling bearings. Wiley; 2013.
- [31] <http://www.lubrita.com/news/92/671/General-Characteristics-and-Uses-of-Industrial-Greases/> dostupno (1.6.2022.)
- [32] <https://www.maintenanceandengineering.com/2019/02/19/the-me-guide-to-grease/> dostupno (1.6.2022.)
- [33] Speight JG, Ahmad M, Ajab Khan M, Zafar M, Sultana S. SYNTHETICS, MINERAL OILS, and BIO-BASED LUBRICANTS. Boca Raton; 2013.
- [34] <http://www.klueber.co.kr/index/images/pdf/Lubricant-testing.pdf> dostupno (1.6.2022.)
- [35] <https://extremecoatings.net/technical-resources/test-results/adhesive-wear-test-astm-g77/> dostupno (1.6.2022.)
- [36] Scheffer C, Girdhar P. Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive Maintenance. Oxford; 2004.
- [37] SKF Reliability Systems. Vibration Diagnostic Guide CM5003. San Diego; 2000.
- [38] <https://www.marposs.com/eng/product/vibration-sensors> dostupno (1.6.2022.)
- [39] Tandon N, Choudhury A. Vibration and Acoustics Measurement Methods. New Delhi; 1999.