

Utjecaj nitriranja na radne karakteristike igličastog ležaja

Ćorić, Zlatko

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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:235:681276>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-30**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Zlatko Čorić

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Zlatko Čorić

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentoru prof.dr.sc. Darku Landeku, dipl.ing. na stručnoj i nesebičnoj pomoći prilikom izrade ovog diplomskog rada.

Zahvaljujem se i obitelji na podršci tijekom studiranja.

Zlatko Ćorić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 24 - 06 / 1	
Ur.broj: 15 - 24 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Zlatko Čorić**

JMBAG: 0035227978

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj nitriranja na radne karakteristike igličastog ležaja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The influence of nitriding on the operating characteristics of a needle bearing**

Opis zadatka:

Prstenovi i valjna tijela ležajeva izloženi su u radu dinamičkim naprezanjima, kontaktnim pritiscima, trošenju i koroziji. Njihova trajnost u određenim uvjetima uporabe može se dodatno povećati modificiranjem površine unutrašnjeg prstena ležaja i primjenom odgovarajućeg maziva. U radu treba opisati kriterije za izbor čelika i površinskog sloja valjnih ležaja povećane otpornosti na kontaktne pritiske i trošenje te metode ispitivanja vibracija i buke valjnih ležaja.

U eksperimentalnom dijelu rada treba provesti nitriranje unutrašnjeg prstena igličastog ležaja izrađenog od čelika 100Cr6. Na nitriranim i nitriranim prstenovima provesti ispitivanje hrapavosti i tvrdoće površine te ispitivanje vibracija i buke pri različitim brzinama vrtnje. Na temelju rezultata ispitivanja predložiti optimalnu toplinsku obradu dijelova igličastog ležaja koja će omogućiti smanjenje buke i vibracija.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

Datum predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

9. svibnja 2024.

11. srpnja 2024.

15. – 19. srpnja 2024.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

SADRŽAJ	1
POPIS SLIKA	3
POPIS TABLICA.....	5
POPIS OZNAKA	6
SAŽETAK.....	7
SUMMARY	8
1. UVOD.....	9
2. VALJNI LEŽAJEVI.....	11
2.1. Podjela valjnih ležajeva	11
2.1.1. Podjela ležajeva prema obliku valjnih tijela	11
2.1.2. Podjela igličastih ležajeva.....	12
2.2. Proračun nazivnog vijeka trajanja ležaja	14
3. MATERIJALI ZA VALJNE LEŽAJEVE.....	17
3.1. Utjecajni čimbenici na izbor čelika za valjne ležajeve	17
3.2. Materijali za izradu valjnih ležajeva	17
3.2.1. Visokouglični čelici bogati kromom.....	17
3.2.2. Čelici za cementiranje	20
3.2.3. Nehrđajući čelici	20
3.2.3.1. Austenitni nehrđajući čelici	21
3.2.3.2. Martenzitni nehrđajući čelici	21
3.2.3.3. Precipitacijski očvrstivi nehrđajući čelici	22
3.2.4. Čelici za rad pri povišenim temperaturama	22
3.2.5. Čelici za rad pri sniženim temperaturama.....	23
3.2.6. Metalne legure proizvedene metalurgijom praha.....	23
3.2.7. Nemetalni materijali za ležajeve	23
3.2.7.1. Polimeri.....	23
3.2.7.2. Keramika.....	23
4. NITRIRANJE	25
4.1. Dijagram stanja Fe-N	25
4.2. Mikrostruktura nitriranih čelika	26
4.3. Plinsko nitriranje	27
4.4. Nitriranje u solnoj kupci	29
4.5. Nitriranje u plazmi	29
4.6. Karakterizacija nitriranog sloja.....	33
5. VIBRACIJE VALJNIH LEŽAJEVA	36
5.1. Senzori za mjerenje vibracija ležaja.....	36
5.2. Karakteristične frekvencije vibracija valjnih ležaja.....	39
5.3. Metode ispitivanja vibracija.....	39
5.3.1. Brze Fourierove transformacije	40
5.3.2. Filtriranje niskih frekvencija.....	42

5.3.3. Metoda spektralno emitirane energije.....	43
6. PLAN I PROVEDBA ISPITIVANJA	45
6.1. Provedba nitriranja	45
6.2. Plan pokusa	48
6.3. Uređaji za ispitivanje	49
7. REZULTATI I DISKUSIJA ISPITIVANJA.....	53
7.1. Ispitivanje tvrdoće površine	53
7.2. Ispitivanje hrapavosti površine	54
7.2.1. Hrapavost površina u polaznom stanju	54
7.2.2. Hrapavost površina nakon ispitivanja vibracija i buke ležaja.....	57
7.3. Ispitivanje vibracija.....	59
7.4. Ispitivanje buke	64
7.5. Zagrijavanje ležaja	69
7.6. Analiza trošenja prstenova	70
7.7. Diskusija rezultata.....	72
8. ZAKLJUČAK.....	74
LITERATURA.....	75
PRILOZI.....	77

POPIS SLIKA

Slika 1. Podjela ležajeva [1]	11
Slika 2. Glavni dijelovi kugličnog ležaja [2].....	12
Slika 3. Podjela valjnih tijela ležajeva [3].....	12
Slika 4. Igličasti ležaji izrađeni [4] : a) dubokim vučenjem b) obradom odvajanjem čestica	13
Slika 5. Konstrukcije složenih igličastih ležaja [4]: a) radijalni igličasti i aksijalni kuglični ležaj, b) radijalno- aksijalni ležaj, c) radijalni i dvostruko aksijalni ležaj	14
Slika 6. Ovisnosti faktora radnih uvjeta a_3 o temperaturi ležaja [4].....	16
Slika 7. Dijagram toplinske obrade čelika 100Cr6 [7].....	18
Slika 8. Mikrostrukture čelika DIN 100Cr6 [6]	18
Slika 9. Dijagram popuštanja čelika 100Cr6 [8].....	19
Slika 10. Mikrostruktura čelika DIN X105CrMo17 (AISI 440C) [6].....	21
Slika 11. Fe-N fazni dijagram [10].....	25
Slika 12. Shematski prikaz nitriranog sloja [10]	26
Slika 13. Mikrostruktura čelika nitriranog u plinu [10]	27
Slika 14. Shematski prikaz intersticijske difuzije dušika u atmosferi amonijaka [10]	28
Slika 15. Paschenova krivulja električnog pražnjenja u ioniziranom plinu [11]	30
Slika 16. Mehanizam procesa nitriranja u plazmi [11]	31
Slika 17. Shematski prikaz peći za nitriranje u plazmi [11].....	32
Slika 18. Određivanje efektivne dubine nitriranja nitrokarburiranog čelika postupkom TENIFER (TF1 580°C / 2h / voda) [12].....	34
Slika 19. Sustav gibanja mase na opruzi [13]	36
Slika 20. Senzori za mjerenje pomaka postavljeni na kućištu ležaja [13]	37
Slika 21. Poprečni presjek akcelerometra s piezoelektričnim elementima [13]	38
Slika 22. Zapis neobrađenog signala vibracija u vremenskoj domeni [13]	38
Slika 23. Različitosť utjecaja na ukupne vibracije stroja [13]	41
Slika 24. FFT analiza vibracija [13].....	41
Slika 25. Oštećenje vanjske staze kotrljanja [13].....	42
Slika 26. Primjer: a) nefiltriranog i b) filtriranog signala vibracija ležaja (CPM – broj ciklusa u minuti) [13].....	43
Slika 27. Dijelovi igličastog ležaja: a) nemodificirani unutarnji prsten, b) vanjski prsten s kavezom i iglicama [15]	45
Slika 28. Vakuumska peć Rübige PC 70/90 za nitriranje i PACVD prevlačenje	45
Slika 29. Ispitni uzorci od čelika 100Cr6 nakon nitriranja u plazmi pri 480°C/7h.....	47
Slika 30. Unutarnji prstenovi ležaja	48
Slika 31. Tvrdomjer „ZwickRoell Indentec“	49
Slika 32. Uređaj za ispitivanje hrapavosti „TIME 3202“ [16].....	50
Slika 33. Mjerni postav za ispitivanje vibracija ležajeva	50
Slika 34. Uređaj za ispitivanje vibracija „VM-6360“ [17].....	51
Slika 35. Kontaktni termometar UNI-T UT320D [18]	51
Slika 36. Svjetlosni mikroskop "Toolcraft DigiMicro Profi" [19].....	52
Slika 37. Mjerni postav za ispitivanje tvrdoće	53
Slika 38. Mjerenje tvrdoće unutarnjeg prstena.....	53
Slika 39. Histogram srednjih vrijednosti tvrdoća unutarnjih prstenova.....	54
Slika 40. Histogram vrijednosti parametara površinske hrapavosti prstenova u polaznom stanju	55

Slika 41. Histogram vrijednosti parametara površinske hrapavosti nakon trošenja	57
Slika 42. Uređaj za mjerenje vibracija spojen s prijenosnim računalom	59
Slika 43. Položaj senzora vibracija i termoelementa u ispitivanjima igličastih ležaja.....	60
Slika 44. Grafički prikaz izmjerenih parametara vibracija	60
Slika 45. Histogram srednjih vrijednosti amplituda vibracija ležaja	61
Slika 46. Histogram srednjih vrijednosti brzine vibracija ležaja	62
Slika 47. Histogram srednjih vrijednosti ubrzanja vibracija ležajeva	63
Slika 48. Histogram srednjih vrijednosti frekvencija vibracija ležajeva.....	64
Slika 49. Zvučni zapis rotacije ležaja	64
Slika 50. Analiza buke rada ležaja: a) graf dB/Hz, b) FFT spektar	65
Slika 51. Porast temperature ispitivanih ležajeva nakon 5 min vrtnje bez podmazivanja	69
Slika 52. Tragovi trošenja unutarnjeg prstena L0	70
Slika 53. Tragovi trošenja unutarnjeg prstena L1	70
Slika 54. Tragovi trošenja unutarnjeg prstena L2	71
Slika 55. Tragovi trošenja unutarnjeg prstena L3	71
Slika 56. Tragovi trošenja unutarnjeg prstena L4	71

POPIS TABLICA

Tablica 1. Iznos faktora pouzdanosti za određene iznose pouzdanosti [4]	15
Tablica 2. Kemijski sastav čelika 100Cr6 [6]	18
Tablica 3. Mehanička svojstva čelika DIN 100Cr6 pri različitim temperaturama ispitivanja [6]	20
Tablica 4. Kemijski sastav čelika DIN X5CrNiCuNb16-4 [9]	22
Tablica 5. Usporedba odabranih svojstava keramičkih i metalnih materijala za valjne ležajeve [5]	24
Tablica 6. Metode za ispitivanje nitriranog sloja s obzirom na svrhu ispitivanja [12]	35
Tablica 7. Parametri nitriranja ležajnog prstena u plazmi za uzorak 450°C/6h	46
Tablica 8. Parametri nitriranja ležajnog prstena u plazmi za uzorak 480°C/7h	46
Tablica 9. Parametri nitriranja ležajnog prstena u plazmi za uzorak 500 °C/4h	47
Tablica 10. Opis korištenih oznaka unutarnjih prstenova ležaja.....	48
Tablica 11. Vrijednosti parametara površinske hrapavosti unutarnjih prstenova	55
Tablica 12. Profili hrapavosti unutarnjih prstenova u polaznom stanju.....	56
Tablica 13. Vrijednosti parametara površinske hrapavosti nakon trošenja.....	57
Tablica 14. Profili hrapavosti površina nakon trošenja.....	58
Tablica 15. Usporedba spektra frekvencije buke pri brzini vrtnje od 950 o/min.....	66
Tablica 16. Usporedba spektra frekvencije buke pri brzini vrtnje od 1215 o/min.....	67
Tablica 17. Usporedba spektra frekvencija buke pri brzini vrtnje od 2280 o/min.....	68

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
L_{10}	10^6 rotacija	Nazivni vijek trajanja ležaja
C	N	Dinamička nosivost
P	N	Ekvivalentno dinamičko opterećenje
p	-	Eksponent vijeka trajanja
L_{10h}	h	Nazivni vijek trajanja ležaja
n	min^{-1}	Brzina vrtnje
a_1	-	Faktor pouzdanosti
a_2	-	Faktor materijala
a_3	-	Faktor radnih uvjeta
$R_{p0,2}$	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
Z	%	Kontrakcija
E	MPa	Modul elastičnosti

SAŽETAK

Ležajevi su strojni elementi koji služe kao oslonci osovina ili vratila. Tijekom eksploatacijskog vijeka, ležajevi su izloženi različitim mehanizmima trošenja. Kod valjnih ležaja, umor materijala je primarni mehanizam trošenja koji uzrokuje degradaciju materijala, a posljedično vibracije i buku stroja. Različitim postupcima modificiranja površine materijala kotrljajućeg ležaja moguće je promijeniti svojstva površinskog sloja koja posljedično utječu i na radne karakteristike kotrljajućeg ležaja.

U teorijskom dijelu ovog rada opisana je podjela ležajeva, konstrukcijske karakteristike igličastih ležajeva, metalni i nemetalni materijali za izradu valjnih ležajeva uz kriterije za izbor optimalnog materijala za izradu ležaja, karakteristike toplinsko-kemijskog postupka nitriranja (plinskog, u solnoj kupci i plazmi) te metode ispitivanja vibracija i buke ležajeva.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena su nitriranja unutarnjih prstenova u plazmi i solnoj kupci TENIFER. Na unutarnjim prstenovima provedena su mjerenja hrapavosti površine i tvrdoće te ispitivanja vibracija, buke i zagrijavanja ležaja sastavljenog od nitriranog vanjskog prstena s kavezom i igličastim valjnim tijelima te nitriranih unutrašnjih prstenova pri različitim brzinama vrtnje. Na temelju provedenih ispitivanja preporučena je optimalna toplinska obrada koja će smanjiti buku i vibracije igličastog ležaja.

Ključne riječi: igličasti ležaj, nitriranje, 100Cr6, vibracije, buka

SUMMARY

Bearings are machine elements that serve as a support for axles or shafts. During the exploitation life, bearings are exposed to different wear mechanisms. In rolling bearings, material fatigue is the primary wear mechanism that causes material degradation and consequently machine vibration and noise. Various methods of modifying the material of the rolling bearing can be used to change the properties of the surface, which consequently affect the working characteristics of the rolling bearing.

In the theoretical part of this work, the division of bearings, structural characteristics of rolling needle bearings, metallic and non-metallic materials for manufacturing rolling bearings are described, along with criteria for choosing the optimal material for manufacturing bearings, characteristics of the thermochemical process of nitriding (gas nitriding, salt bath nitriding and plasma nitriding). and vibration test methods of bearings.

In the experimental part of the work, nitriding of the inner rings was carried out in plasma and salt bath TENIFER. Measurements of surface roughness and hardness were carried out on the inner rings, as well as vibration, noise and heating tests of a needle bearing composed of a non-nitrided outer ring with a cage and nitrided inner rings at different rotation speeds. Based on the conducted tests, an optimal heat treatment that will reduce the noise and vibrations of the needle bearing was recommended.

Key words: needle bearing, nitriding, 100Cr6, vibrations, noise

1. UVOD

Ležajevi su strojni elementi koji služe kao oslonac rukavca osovina ili vratila te prenose vanjska opterećenja između dijelova ležaja i drugi strojnih dijelova koji se nalaze u relativnom gibanju s dijelovima ležaja.

Uporaba kliznog ležaja započela je s otkrićem kotača (odnosno još prije nove ere), dok je prva uporaba valjnog (ili kotrljajućeg) ležaja zabilježena 1852. godine na pedalama za bicikl.

Ovisno o djelovanju smjeru opterećenja, i klizni i valjni ležaji također se dijele na aksijalne i radijalne ležaje, a obje vrste ležaja se nadopunjuju u svojstvima i radnim karakteristikama. Ispravan rad, ali prije svega odabir ležaja, od velikog je značaja kako bi se osigurala funkcionalnost i zahtjevani vijek trajanja strojeva i vozila u koji je ugrađen. Pri projektiranju ležaja u obzir je potrebno uzeti karakteristične radne uvjete ležaja (temperatura, medij za podmazivanje, opterećenje) te odabrati optimalan materijal za izradu ležaja. Svojstva materijala i radne karakteristike valjnih ležaja mogu se značajno promijeniti postupcima modificiranja i prevlačenja površine kako bi se ispunili određeni uporabni zahtjevi.

TEORIJSKI DIO

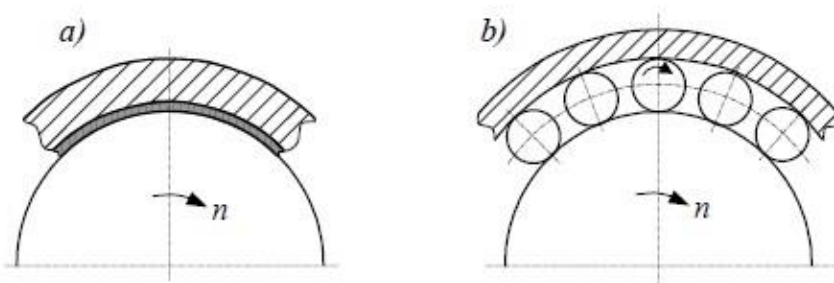
2. VALJNI LEŽAJEVI

2.1. Podjela valjnih ležajeva

2.1.1. Podjela ležajeva prema obliku valjnih tijela

Prema vrsti trenja koja se pojavljuje između dijelova ležaja razlikuju se klizni i valjni ležaji. Slika 1 prikazuje podjelu ležaja s obzirom na vrstu trenja između dijelova ležaja:

- a) klizni ležaj – ležaj s trenjem klizanja
- b) valjni (kotrljajući) ležaj – ležaj s trenjem valjanja

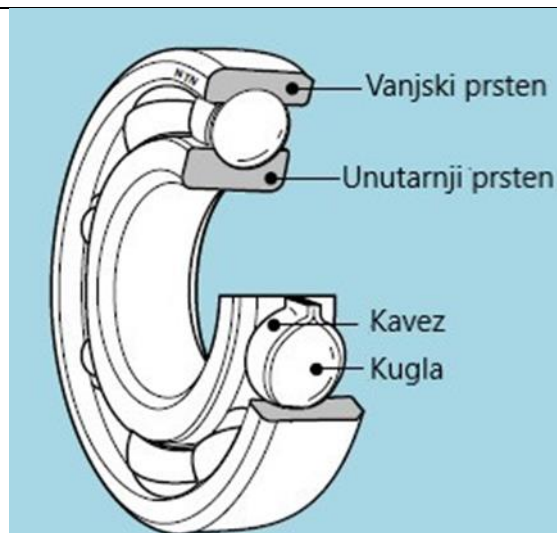


Slika 1. Podjela ležajeva [1]

U usporedbi s kliznim ležajevima, valjni (kotrljajući) ležajevi su više u uporabi zbog niskog koeficijenta trenja (uslijed pojave trenja kotrljanja), veće nosivosti pri manjim dimenzijama, manjeg zagrijavanja, manjih gubitaka snage, precizne vrtnje (zbog male zračnosti između valjnih dijelova), jednostavnog održavanja i standardnih dimenzija koje osiguravaju laku zamjenjivost u slučaju kvara.

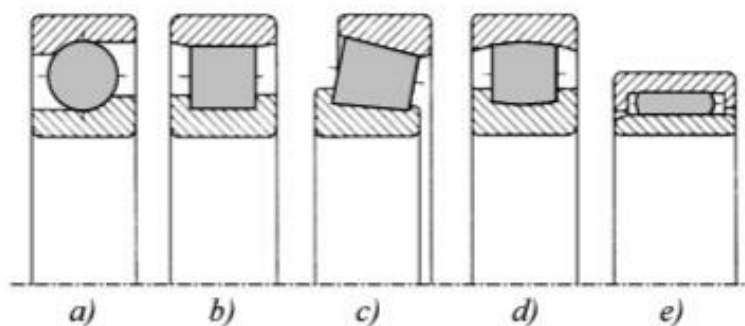
S druge strane, glavni nedostaci valjnih ležajeva u odnosu na klizne su uglavnom viša cijena, značajna razina buke pri većim brzinama vrtnje, slaba otpornost na udarna opterećenja, sklonost pojavi vibracija i stvaranju buke, zahtjevnija montaža i demontaža te potreba za zamjenom cijelog ležaja u slučaju kvara.

Glavni dijelovi valjnog ležaja su vanjski i unutarnji prsten, kavez i valjna tijela. Valjna tijela su raspoređena po obodu kaveza i uglavnom su jednostavnog geometrijskog oblika: kugle, valjci, stožci i iglice. Slika 2 prikazuje glavne dijelove kugličnog ležaja.



Slika 2. Glavni dijelovi kugličnog ležaja [2]

Glavna podjela valjnih ležajeva (s obzirom na smjer djelovanja opterećenja) je na radijalne i aksijalne ležajeve. Prema geometriji, valjna tijela se dijele na: a) kuglična, b) valjkasta, c) stožasta, d) bačvasta i e) igličasta prikazana na donjoj slici [Slika 3].



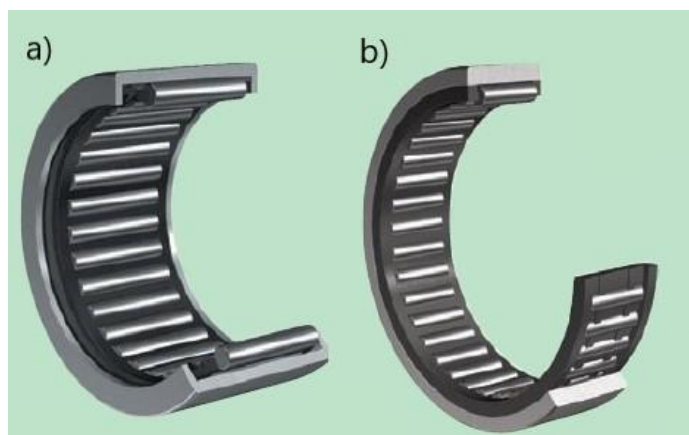
Slika 3. Podjela valjnih tijela ležajeva [3]

2.1.2. Podjela igličastih ležajeva

Igličasti ležajevi su konstruirani prema normi ISO 1206 (DIN 617) i uglavnom se ugrađuju u sklopove u kojima postoji malo prostora za ugradnju u radijalnom smjeru u odnosu na os vrtnje osovine. Za razliku od drugih tipova valjnih ležajeva, igličasti ležaji posjeduju veću nosivost za istu masu materijala, visoku krutost i manje inercijske sile. Na tržištu nalaze se različite vrste igličastih ležaja, a zajednička karakteristika svih vrsta je geometrija valjnih tijela (iglica) čija je dimenzija duljine znatno veća od dimenzije promjera. Zbog manjih

promjera iglica, igličasti ležajevi se sastoje od većeg broja valjnih tijela u odnosu na npr. kuglične ili bačvaste valjne ležajeve.

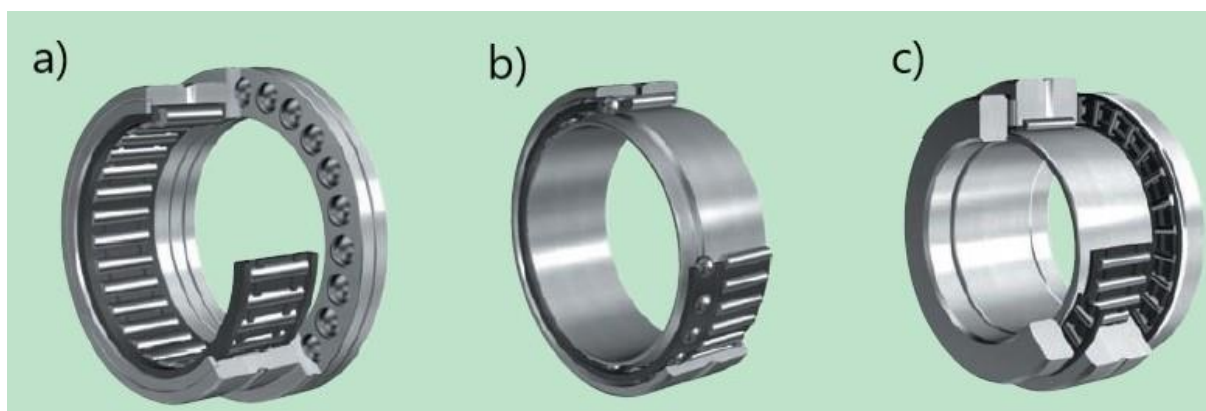
Igličaste ležajeve moguće je izraditi postupkom dubokog vučenja ili postupcima obrade odvajanjem čestica. Preciznim postupkom dubokog vučenja izrađuju se vanjski prsten i valjna tijela iz tankih čeličnih ploča, dok unutarnji prsten nerijetko zamjenjuje vratilo. Prije montaže, rukavci vratila se kale, popuštaju i fino bruse kako bi se postigla odgovarajuća površinska hrapavost i kružnost oblika. Ukoliko se postupkom kaljenja ne može postići odgovarajuća tvrdoća i/ili postupkom brušenja odgovarajuća površinska hrapavost vratila, tada se koristi unutarnji prsten od visokougličnih čelika bogatih kromom. Kao i vratilo, unutarnji prsten se nakon odgovarajuće toplinske obrade također brusi kako bi se postigla mala površinska hrapavost. Kod ovakve konstrukcije ležaja, vanjski prsten, valjna tijela i kavez nisu odvojivi pa montaža ležaja ne zahtijeva uporabu uskočnog prstena. Postoje još i izvedbe s otvorenim i zatvorenim ležajem na kraju vratila, a moguća je i ugradnja brtve s jedne ili obje strane ležaja. Skupina igličastih ležajeva koja se izrađuje obradom odvajanja čestica (tokarenjem i brušenjem) se najčešće dijeli na dvije vrste: nerastavljive i rastavljive. Slika 4 prikazuje: a) igličasti ležaj namijenjen izradi dubokim vučenjem, b) igličasti ležaj namijenjen izradi postupcima obrade odvajanja čestica (rastavljivog tipa).



Slika 4. Igličasti ležaji izrađeni [4] : a) dubokim vučenjem b) obradom odvajanjem čestica

Industrijski razvoj zahtijevao je i razvoj složenijih igličastih ležajeva za brojne primjene. Slika 5 prikazuje neke vrste složenih igličastih ležajeva: a) složeni ležaj kao kombinaciju radijalnog igličastog i aksijalnog kugličnog ležaja; b) složeni radijalni ležaj s dvije vrste valjnih tijela, s iglicama za radijalna opterećenja i kuglicama za minimalna aksijalna

opterećenja te c) složeni ležaj kao kombinaciju radijalnog i dvostrukog aksijalnog igličastog ležaja.



Slika 5. Konstrukcije složenih igličastih ležaja [4]: a) radijalni igličasti i aksijalni kuglični ležaj, b) radijalno- aksijalni ležaj, c) radijalni i dvostruko aksijalni ležaj

2.2. Proračun nazivnog vijeka trajanja ležaja

Proračun ležajeva obuhvaća proračun nazivnog vijeka trajanja ležaja L_{10} , pri 90% pouzdanosti (izražen u 10^6 rotacija). Nazivni vijek trajanja ležaja određuje se iz izraza (1) prema normi ISO 281:2007 [4]:

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

gdje je: C - dinamička nosivost (N); P – ekvivalentno dinamičko opterećenje (N); p – eksponent vijeka trajanja. Eksponent vijeka trajanja (p) ovisi o vrsti ležaja. Za valjkaste ležajeve (s teoretskim dodirrom u liniji), eksponent vijeka trajanja iznosi $10/3$, dok za kuglične ležajeve (s teoretskim dodirrom u točki) iznosi 3.

Osim prethodno navedenog izraza (1), za proračun nazivnog vijeka trajanja ležaja u satima - L_{10h} , može se koristiti i izraz (2) [4]:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60n} \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (2)$$

gdje je: n – brzina vrtnje (1/min).

Određene primjene ležaja zahtijevaju proračun nazivnog vijeka trajanja ležaja pri pouzdanosti većoj od 90%. Pri proračunu nazivnog vijeka trajanja pri pouzdanosti većoj od 90% se koristi izraz (3) [4]:

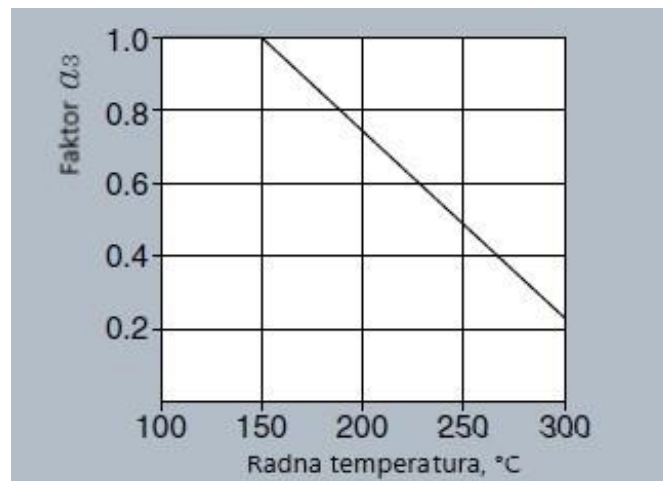
$$L_n = a_1 a_2 a_3 \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (3)$$

gdje je a_1 – faktor pouzdanosti, a_2 – faktor materijala i a_3 – faktor radnih uvjeta. Faktor pouzdanosti a_1 određuje se iz odgovarajućih tablica [Tablica 1].

Tablica 1. Iznos faktora pouzdanosti za određene iznose pouzdanosti [4]

Pouzdanost, %	L_n	Faktor pouzdanosti a_1
90	L_{10}	1.00
95	L_5	0.62
96	L_4	0.53
97	L_3	0.44
98	L_2	0.33
99	L_1	0.21

Nazivni vijek trajanja ležaja može se bitno promijeniti izborom nekonvencionalnog materijala pri proizvodnji ležaja pa tada prilikom proračuna nazivnog vijeka trajanja ležaja u obzir tada treba uzeti i faktor materijala a_2 . Nadalje, pri uporabi ležaja u netipičnim radnim uvjetima (prekomjerne brzine rotacije, kontaminacija u sustava pomazivanja ili nedovoljno podmazivanje) nazivni vijek trajanja se može promijeniti. U proračun tada ulazi i faktor radnih uvjeta a_3 . U većini slučajeva faktor radnih uvjeta a_3 iznosi 1. U određenim („savršenim“) radnim uvjetima, faktor a_3 može biti veći od 1. Faktor a_3 je manji od 1 u slučajevima: niske dinamičke viskoznosti ulja i maziva pri radnoj temperaturi ležaja, visokim radnim temperaturama, prisustvo vlage i kontaminacije u sredstvu za podmazivanje. Slika 6 prikazuje ovisnost faktora radnih uvjeta a_3 o temperaturi ležaja.



Slika 6. Ovisnosti faktora radnih uvjeta a_3 o temperaturi ležaja [4]

3. MATERIJALI ZA VALJNE LEŽAJEVE

3.1. Utjecajni čimbenici na izbor čelika za valjne ležajeve

Radne karakteristike valjnih ležajeva primarno ovise o svojstvima materijala od kojih se isti izrađuju. Prilikom izbora materijala za izradu valjnih ležajeva u obzir treba uzeti konstrukcijske zahtjeve za smještaj ležaja, vrstu pogona, očekivani radni vijek i radne uvjete:

- Temperaturu
- Opterećenje (smjer djelovanja i iznos opterećenja)
- Brzinu vrtnje
- Medij za podmazivanje

Bitne karakteristike materijala za izradu dijelova valjnih ležajeva (vanjskog i unutarnjeg prstena, valjnih tijela i kaveza) su: visoka granica razvlačenja, visoka otpornost na umor materijala, dobra otpornost na trošenje i postojanost na koroziju, dimenzijska stabilnost, visoka tvrdoća i žilavost te odgovarajuća tehnološkičnost.

3.2. Materijali za izradu valjnih ležajeva

Vanjski i unutarnji prstenovi te valjna tijela valjnih ležajeva najčešće se izrađuju od visokougličnih čelika bogatih kromom. Osim njih, u proizvodnji valjnih ležajeva su zastupljeni nehrđajući čelici, čelici za cementiranje, srednjeuglični čelici, čelici za rad pri povišenim temperaturama i nemetalni materijali (polimeri i keramika) [5].

3.2.1. Visokouglični čelici bogati kromom

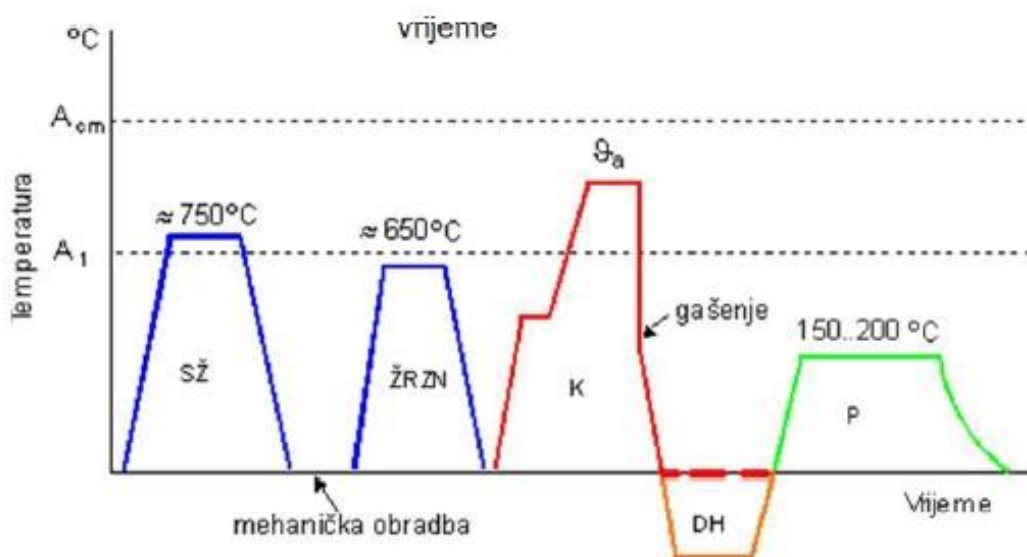
Ovoj skupini čelika za ležajeve pripadaju čelici poput: GB/T GCr4, GCr15 (EN DIN 100Cr6, ASTM 52000), GCr15SiMn, GCr15SiMo i GCr18Mo. Više od 80% ukupne proizvodnje čelika za ležajeve odnosi se na čelike 100Cr6 i GCr15SiMn (SKF24) [5].

Čelik 100Cr6 posjeduje visoku tvrdoću, visoku otpornost na trošenje i otpornost na umor i najviše je zastupljen kod različitih vrsta ležajeva za automobile, traktore, avione, željeznička vozila, alatne strojeve i sl. Tablica 2 prikazuje normom propisani kemijski sastav čelika DIN 100 Cr6.

Tablica 2. Kemijski sastav čelika 100Cr6 [6]

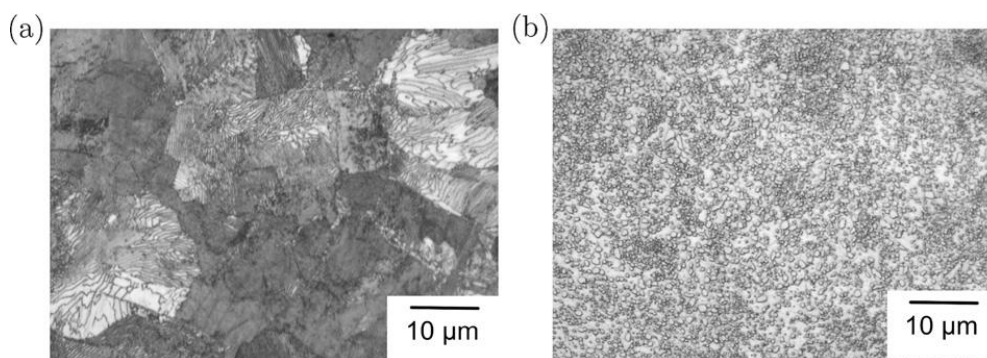
Element	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	P
Maseni udjel (%)	0.90-1.05	0.25-0.45	0.15-0.35	1.40-1.65	≤ 0.30	≤ 0.025	0.03

Visoka otpornost na trošenje, visoka otpornost na umor i trošenje postižu se nakon toplinske obrade koja uključuje sferodizacijsko žarenje, žarenje za redukciju zaostalih naprezanja, predgrijavanje, austenitizaciju, gašenje, duboko hlađenje i popuštanje [Slika 7].



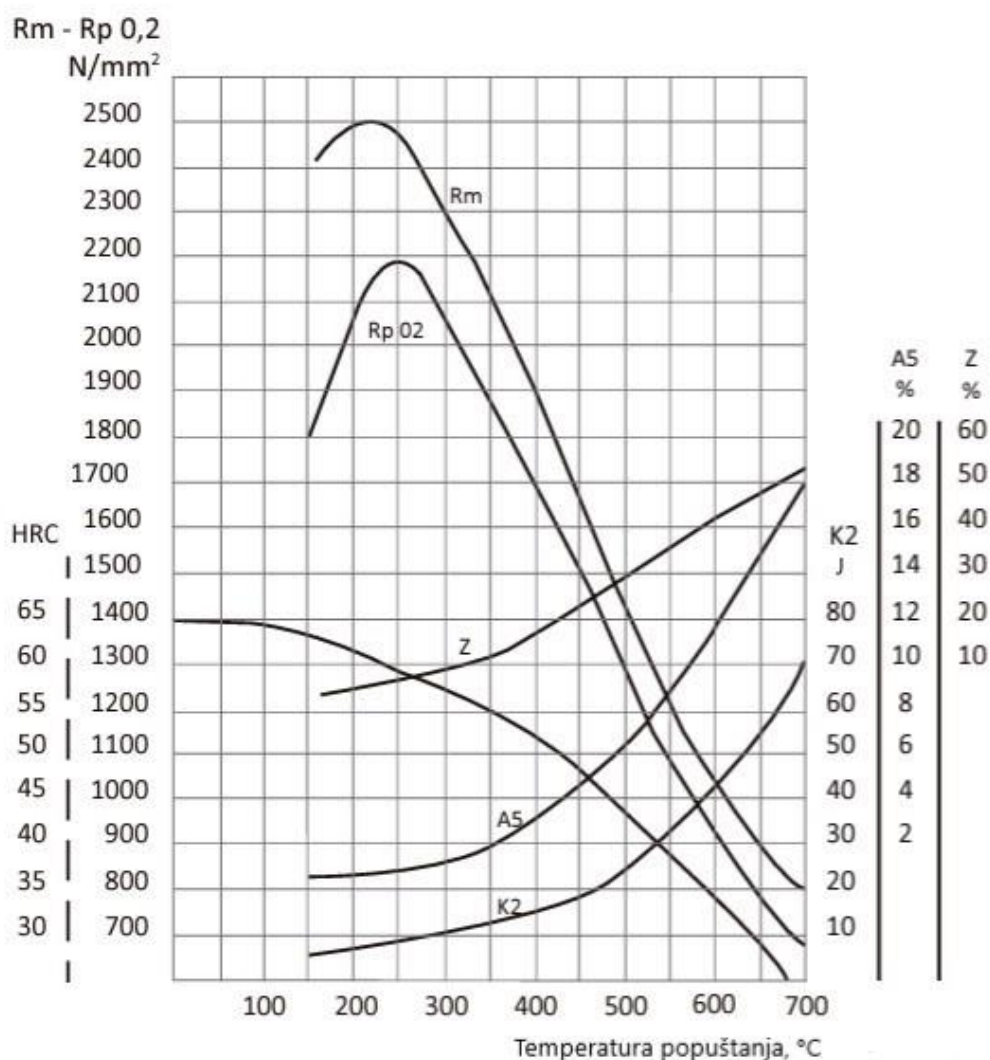
Slika 7. Dijagram toplinske obrade čelika 100Cr6 [7]

Slika 8 prikazuje mikrostrukture čelika DIN 100Cr6 u dva slučaja: a) nakon postupka toplog valjanja i b) nakon sferodizacijskog žarenja.



Slika 8. Mikrostrukture čelika DIN 100Cr6 [6]

Sferodizacijsko žarenje provodi se kako bi se postigla dobra obradivost visokougličnih čelika. Pomoću žarenja dobiva se karakteristična mikrostruktura koja sadrži feritnu matricu s izlučenim sferodiziranim karbidima. Nakon sferodizacijskog žarenja provodi se mehanička obrada, a potom žarenje za smanjenje zaostalih naprezanja, kaljenje i popuštanje. Kaljenje čelika 100Cr6 provodi se uz jedno predgrijavanje, a nakon austenitizacije, provodi se gašenje u ulju ili vodi s ciljem dobivanja martenzitne mikrostrukture. Po potrebi se provodi duboko hlađenje, s ciljem uklanjanja zaostalog austenita. Popuštanje čelika provodi se u temperaturnom rasponu od 150 do 200 °C. Slika 9 prikazuje dijagram popuštanja čelika 100Cr6.



Slika 9. Dijagram popuštanja čelika 100Cr6 [8]

Tablica 3 prikazuje mehanička svojstva čelika 100Cr6 na različitim temperaturama ispitivanja od 20 do 800 °C.

Tablica 3. Mehanička svojstva čelika DIN 100Cr6 pri različitim temperaturama ispitivanja [6]

Temperatura, θ (°C)	20	200	400	600	800
Granica razvlačenja, $R_{p0,2}$ (MPa)	1394	1161	908	414	303
Vlačna čvrstoća, R_m (MPa)	1748	2151	1551	934	311
Kontrakcija, Z (%)	1,0	2,0	1,6	1,5	1,0
Youngov modul elastičnosti, E (GPa)	208	163	154	113	103

Dodavanjem silicija (Si) i mangana (Mn) dobiva se čelik GB/T GCr15SiMn koji posjeduje bolju prokaljivost i otpornost na trošenje od čelika 100Cr6 (GB/T GCr15). Međutim, u usporedbi s čelikom 100Cr6 obradivost je slabija, a zbog osjetljivosti na udarna opterećenja i pukotine, uglavnom se koristi za izradu ležajeva s debljom stijenkom, od 15 do 35 mm .

3.2.2. Čelici za cementiranje

U postupku izrade ležaja, čelici za cementiranje se podvrgavaju toplinskoj obradi koja se sastoji od pougljičenja, kaljenja i popuštanja. Nakon provedene toplinske obrade, čelici za cementiranje postižu površinsku tvrdoću od 58 do 62 HRC, dok tvrdoća jezgre iznosi 25-45 HRC [5]. Toplinskom obradom postiže se veća otpornost na trošenje i bolja žilavost jezgre. Zbog navedenih svojstava te otpornosti na umor i udarna opterećenja, čelici za cementiranje se uglavnom koriste u proizvodnji ležajeva većih dimenzija (npr. ležajevi za valjke, ležajevi za željeznička vozila). Predstavnici ove skupine čelika za ležajeve su: GB/T G20CrNiMo, GB/T 16Cr2Ni4Mo, GB/T 2Cr2Ni3Mo5, GB/T H10Cr4Mo4V i EN DIN M50NiL [5].

3.2.3. Nehrđajući čelici

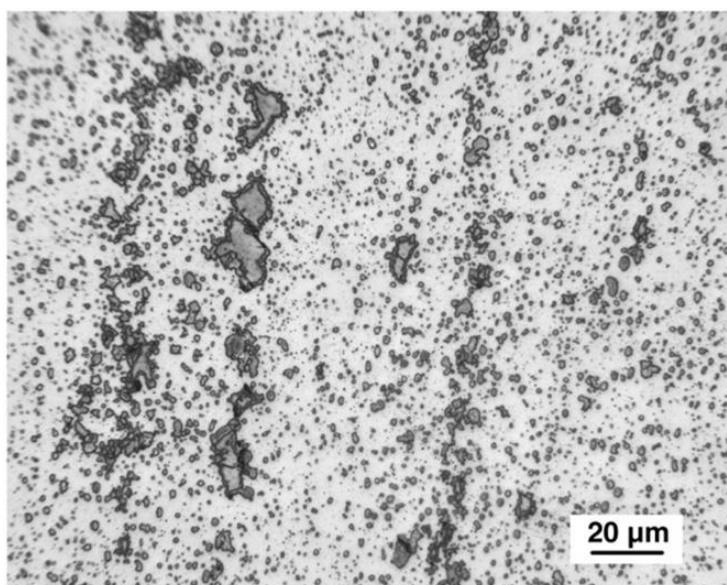
Nehrđajući čelici primjenjuju se kod izrade ležajeva koji su izloženi korozivnom mediju u kemijskoj i prehrambenoj industriji ili brodogradnji. Nehrđajuće čelike moguće je izložiti korozivnom mediju i uz povišenu radnu temperaturu (ali ne preko 250 °C). Za izradu valjnih ležajeva primjenjuju se različite vrste martenzitnih, austenitnih i precipitacijski očvrnutih nehrđajućih čelika.

3.2.3.1. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici se koriste za ležajeve u slučajevima kada se zahtijeva nemagnetičnost materijala ležaja. Tipični predstavnik ove podskupine nehrđajućih čelika je DIN X6CrNiTi18-10 (GB/T 1Cr18Ni9Ti) koji posjeduje odličnu otpornost na koroziju u različitim medijima. Zbog toga se koristi u primjenama s jakim korozivnim djelovanjem te manjim brzinama vrtnje i manjim opterećenjima. Radne karakteristike mogu se poboljšati postupkom nitriranja pa je tada moguća primjena i kod većih brzina vrtnje, viših radnih temperatura i otpornost na intenzivnije trošenje.

3.2.3.2. Martenzitni nehrđajući čelici

Kemijski sastav martenzitnih nehrđajućih čelika GB/T 9Cr18 (DIN X105CrMo17) i GB/T 9Cr18Mo (DIN X102CrMo17) u proizvodnji ležajeva sastoji se od oko 1% C i 18% Cr. Povišena tvrdoća, čvrstoća, otpornost na trošenje i otpornost na umor se postižu kaljenjem i popuštanjem. Martenzitni nehrđajući čelici koriste se za izradu ležajeva za rad u korozivnom mediju, ali zbog stabilnosti pri niskim temperaturama, koriste se i za izradu ležajeva za rad pri niskim temperaturama (-253 °C). Slika 10. prikazuje mikrostrukturu čelika DIN X105CrMo17 (GB/T 9Cr18; AISI 440C) s raspršenim kromovim karbidima u matrici popuštenog martenzita.



Slika 10. Mikrostruktura čelika DIN X105CrMo17 (AISI 440C) [6]

3.2.3.3. Precipitacijski očvrstivi nehrđajući čelici

Precipitacijski očvrstivi nehrđajući čelici su posebna skupina nehrđajućih čelika koje karakterizira povišena čvrstoća. Njihova toplinska obrada sastoji se od homogenizacijskog žarenja dozrijevanja. Tijekom dozrijevanja, legirni elementi (Al, Cu, Ti, Mo i Nb) stvaraju precipitate, koji otežavaju gibanje dislokacija i time povisuju čvrstoću i osiguravaju dobru žilavost. Ova skupina čelika primjenjuje se kod izrade ležajeva od kojih se zahtijeva visoka čvrstoća, visoka otpornost na koroziju i visoka otpornost na oksidaciju. Precipitacijski očvrstivi nehrđajući čelici koji se koriste u izradu ležajeva jesu: EN DIN X5CrNiCuNb16-4 (GB/T 0Cr17Ni4Cu4Nb; 17-4 PH), GB/T 0Cr17Ni7A, GB/T 1Cr13. Tablica 4 prikazuje kemijski sastav čelika EN DIN X5CrNiCuNb16-4.

Tablica 4. Kemijski sastav čelika DIN X5CrNiCuNb16-4 [9]

Element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Cu	Nb
Maseni udio (%)	0,07	1,0	0,04	0,03	1,0	15,0 – 17,5	3,0-5,0	3,0-5,0	0,15-0,45

3.2.4. Čelici za rad pri povišenim temperaturama

Povišene radne temperature izazivaju pad vrijednosti različitih mehaničkih i drugih svojstava čelika. Kad je riječ o primjeni s povišenim radnim temperaturama, čelik za ležajeve trebao bi zadržati odgovarajuću tvrdoću, otpornost na koroziju, otpornost na umor i oksidaciju te dimenzijsku stabilnost. Kada radna temperatura ležaja prelazi 250 °C (npr. kod ležajeva za zrakoplovne motore, plinske turbine, nuklearne sustave s radnom temperaturom između 300 i 600 °C) koriste se čelici za rad pri povišenim temperaturama. Tipični predstavnici ove skupine čelika jesu: DIN 80MoCrV42-16 (GB/T Cr4Mo4V), Cr14Mo4, W18Cr4V, W9Cr4V2Mo, W6Mo5Cr4V2.

Čelici za rad pri povišenim temperaturama sadrže različite legirne elemente (W, Mo, Cr, V) koji tvore toplinski stabilne karbide, a tijekom popuštanja dolazi do disperzije karbida i pojave precipitacijskog očvrstnuća.

Povišenjem radne temperature iznad 500 °C, ovi čelici ne mogu ispuniti zahtjeve za primjenu, pa se u tom slučaju pribjegava uporabi metalnih legura na bazi Ni, Co ili keramike.

3.2.5. Čelici za rad pri sniženim temperaturama

Osim čelika za cementiranje, za ležajeve s udarnim opterećenjima se primjenjuju i srednjeugljični čelici koji imaju bolja uporabna svojstva pri nižim i povišenim temperaturama. U skupinu srednjeugljičnih čelika za proizvodnju ležajeva pripadaju čelici DIN 41Cr4 (GB/T 40Cr), GB/T 65Mn, GB/T 5CrMnMo i GB/T 60 CrMnMoNi te čelici GB/T GCr10, GB/T 37CrA i GB/T 40CrA koji se koriste u proizvodnji ležajeva za transportne uređaje.

3.2.6. Metalne legure proizvedene metalurgijom praha

Kotrljajući ležajevi izrađuju se i od metalnih legura i materijala dobivenih metalurgijom praha. Jedna od metalnih legura u proizvodnji ležajeva je legura željeza i nikla DIN 17745 koja posjeduje visoke vrijednosti tvrdoće (50-57 HRC), izvrsnu otpornost na visokotemperaturnu koroziju i nemagnetičnost. Postupkom metalurgije praha dobivaju se ležajevi od keramičkih materijala (Si_3N_4 , ZrO_2 , Al_2O_3).

3.2.7. Nemetalni materijali za ležajeve

3.2.7.1. Polimeri

Poliamid (PA), politetrafluoretilen (PTFE), polioksimetilen (POM), fenolna smola i polimid su polimerni materijali koji su zastupljeni u proizvodnji ležajeva. U usporedbi s metalnim materijalima, polimerni materijali posjeduju manju gustoću, bolju otpornost na koroziju i niži koeficijent trenja, mogućnost samopodmazivanja i podmazivanja vodom. Polimerni materijali koriste se za izradu prstenova ležaja kod manjih opterećenja, npr. za različite uredske i kućne strojeve, u kombinaciji sa staklenim, polimernim valjnim tijelima ili valjnim tijelima od nehrđajućeg čelika.

3.2.7.2. Keramika

U usporedbi s metalnim materijalima, keramika posjeduje bolju otpornost na trošenje, manju gustoću, manji koeficijent toplinskog rastezanja i veći modul elastičnosti. Keramički materijali primjenjuju se u slučajevima kada se javljaju visoke brzine vrtnje, visoke temperature ili pak korozivni medij. Najčešći keramički materijali koji se koriste za izradu ležajeva su: Si_3N_4 , ZrO_2 , Al_2O_3 [5]. Tablica 5 prikazuje usporedbu odabranih svojstava metalnih i keramičkih materijala za kotrljajuće ležajeve.

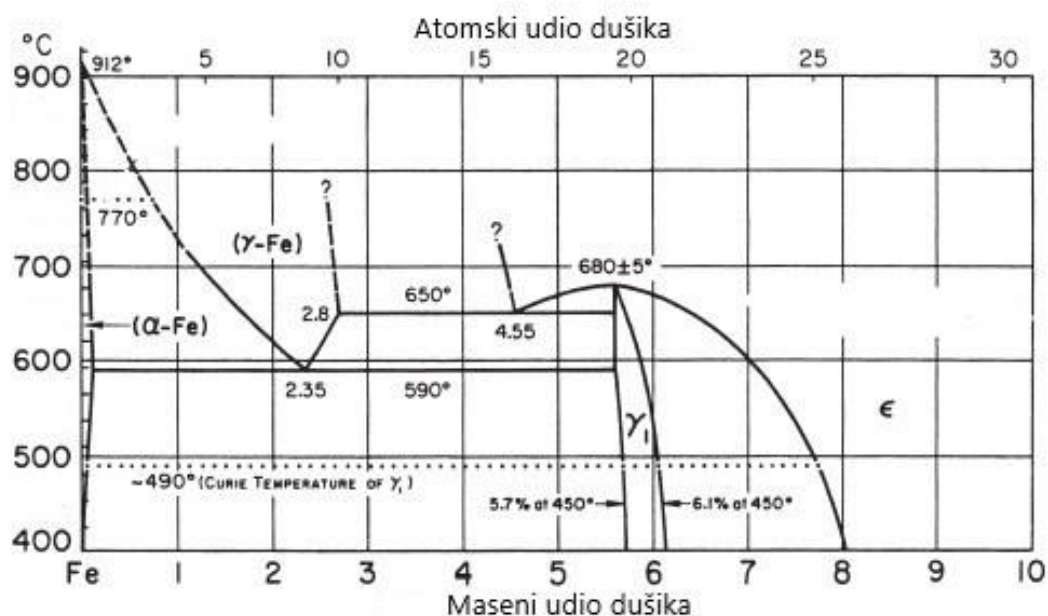
Tablica 5. Usporedba odabranih svojstava keramičkih i metalnih materijala za valjne ležajeve [5]

Svojstvo	100 Cr6	GB/T 9Cr18	Si ₃ N ₄	ZrO ₂	Al ₂ O ₃
Gustoća (g/cm ³)	7.85	7.9	3.2	6.00	3.95
Koeficijent toplinskog rastezanja, α (10 ⁻⁶ /K)	10.0	17.0	3.2	10.5	8.5
Modul elastičnosti E (GPa)	208	200	310	210	380
Poissonov omjer, μ	0.30	0.30	0.26	0.30	0.22
Tvrdoća, HV ₁₀	800	700	1500-1800	1200	1800
Tlačna čvrstoća, σ (MPa)			2800	3000	1000
Savojna čvrstoća, σ (MPa)	2400	2600	800-1000	950-1200	300-500
Lomna žilavost, K _{IC} (MPa·m ^{-3/2})	20	25	7.0-8.0	10.0	3-4
Toplinska provodnost, λ (W/mK)	30-40	15	35	2-3	30
Radna temperatura, °C	130	300	≥800	800	1200

4. NITRIRANJE

4.1. Dijagram stanja Fe-N

Toplinsko-kemijski postupak nitriranja razvijen je početkom 20. stoljeća i danas je naširoko zastupljen u različitim industrijskim granama (npr. proizvodnji ležaja, automobilske industriji, zrakoplovnoj industriji, tekstilnoj industriji). Nitriranje je postupak toplinsko-kemijskog modificiranja površine pri kojem se površina materijala obogaćuje dušikom (N) iz odgovarajućeg aktivnog medija. Postupak se temelji na topivosti dušika u željezu koja se može odrediti iz faznog dijagrama stanja željezo-dušik (Fe-N) [Slika 11].



Slika 11. Fe-N fazni dijagram [10]

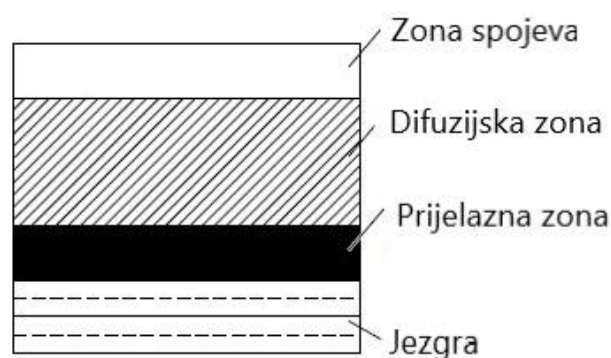
Prednosti nitriranja prepoznate su još početkom 1920-ih godina u Njemačkoj, pa se nitriranje uglavnom koristilo u primjenama koje su zahtijevale visoku otpornost na trošenje (posebice na abrazijski mehanizam trošenja), otpornost na koroziju i visoku tlačnu čvrstoću površinskog sloja.

U usporedbi s ostalim toplinsko-kemijskim postupcima modificiranja površine (primjerice karbonitriranja ili pougljičavanja), nitriranje je niskotemperaturni proces koji se izvodi na temperaturi između 400 do 650 °C [10]. Nadalje, moguće je vrlo lako upravljati parametrima

nitiranja. Kao dodatne prednosti postupka ističu se i postizanje korozijske otpornosti niskolegiranih i niskougljičnih čelika te zadržavanje svojstava jezgre (osnovnog materijala). Zbog odsutnosti fazne pretvorbe čelika nakon nitiranja se pojavljuju minimalne promjene oblika i dimenzija obradaka.

4.2. Mikrostruktura nitiranih čelika

Nakon provedenog procesa nitiranja, na površini čelika nastaje vrlo krhka i tvrda zona spojeva i/ili difuzijska zona. Slika 12 prikazuje shematski prikaz nitiranog sloja čelika.

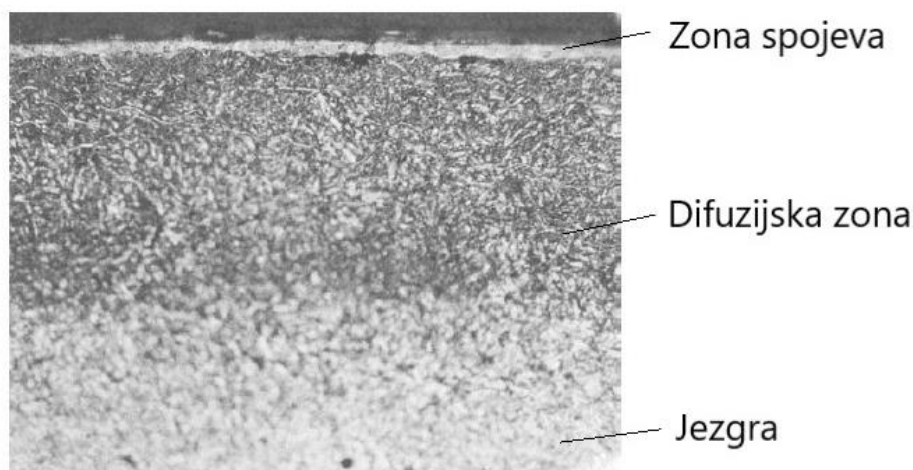


Slika 12. Shematski prikaz nitiranog sloja [10]

Zona spojeva je vanjski sloj koji nastaje prilikom nitiranja, otprilike na dubini od 2–30 μm i pretežno se sastoji od γ' -faza (Fe_4N) i ε -faza (Fe_{2-3}N). Količina γ' i ε nitrida ovisi o udjelu ugljika, pa s povećanjem masenog udjela ugljika u čeliku raste udio ε -faze u zoni spojeva i obrnuto. Na rast i debljinu zone spojeva utječu vrijeme, temperatura, sastav medija, temperatura predgrijavanja i tlak u plinskoj atmosferi. Debljina sloja ovisi i o kemijskom sastavu materijala, pa će primjerice, zona spojeva ugljičnog čelika biti znatno deblja u usporedbi s legiranim čelicima. Vanjski sloj (zona spojeva) još se naziva i bijelim ili keramičkim slojem. Zahvaljujući svojstvima zone spojeva, poboljšana su različita svojstva (poput otpornosti na trošenje i otpornosti na koroziju) koja se bitno razlikuju od svojstava osnovnog materijala (jezgre).

Ispod zone spojeva nalazi se difuzijska zona koja se uglavnom sastoji od stabilnih nitrida koji nastaju kemijskom reakcijom s legirajućim elementima, uobičajeno na dubini od 0,1–0,5 mm. U difuzijskoj zoni, pri temperaturi nitiranja za čisto željezo, dolazi do intersticijskog otapanja dušika u α -željezu. Tvrdoća i dubina difuzijske zone uvjetuju nosivost te čvrstoću i dinamičku

izdržljivost. Nitiranje je uglavnom primjenjivo na različite vrste čelika, no elementi poput Al, Cr, V, W i Mo koji su skloni stvaranju nitrida, bitni su za visoku učinkovitost samog postupka. Nitridi (posebice s Al) pokazuju visoke vrijednosti tvrdoće. Slika 13 prikazuje mikrostrukturu čelika nitiranog u plinu.



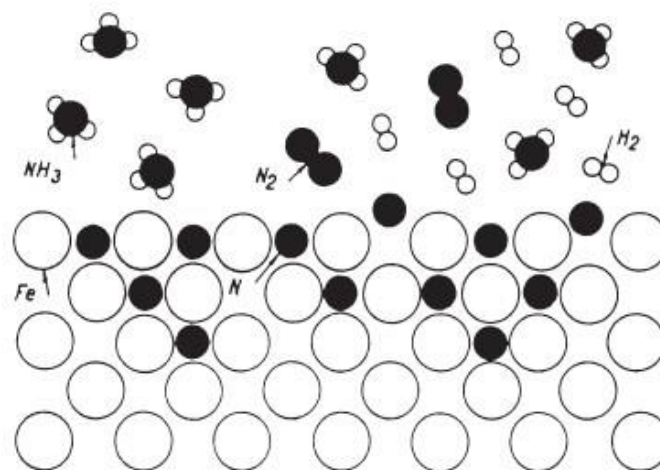
Slika 13. Mikrostruktura čelika nitiranog u plinu [10]

Ovisno o procesnom mediju, razlikuje se:

- nitiranje u solnoj kupci
- plinsko nitiranje
- nitiranje u plazmi.

4.3. Plinsko nitiranje

Plinsko nitiranje je jedan od najučinkovitijih postupaka modificiranja površine strojnih dijelova. Kod plinskog nitiranja se pretežno koriste jamske, komorne ili zvonaste peći, a proces se provodi u rasponu temperatura 500-565 °C [11], iznad temperature A_1 koja označava početak austenitne pretvorbe za feritne čelike. Za uspješno postizanje odgovarajuće mikrostrukture, nužno je osigurati i ujednačenu raspodjelu temperature u peći. Osim na kontroliranoj temperaturi, prilikom procesa plinskog nitiranja, obradak se drži u kontroliranoj plinskoj atmosferi (sastavljenoj od amonijaka, ili smjese dušika i vodika). Slika 14 prikazuje shematski prikaz plinskog nitiranja u atmosferi amonijaka.



Slika 14. Shematski prikaz intersticijske difuzije dušika u atmosferi amonijaka [10]

Uobičajeni kontrolni parametar za vođenje procesa plinskog nitriranja je bila brzina disocijacije amonijaka koja se mjerila ručno pomoću bireta. Budući da se takav postupak mjerenja obavlja ručno, ne može se osigurati točna kontrola procesa, pa je 1990-ih uveden novi kontrolni parametar – potencijal dušika. Potencijal dušika se definira prema jednadžbi za konstantu ravnoteže kemijske reakcije disocijacije amonijaka (4) [10]:

$$K_N = \frac{p_{NH_3}}{p_{H_2}^{3/2}} \quad (4)$$

gdje je p_{NH_3} – parcijalni tlak amonijaka, a p_{H_2} – parcijalni tlak vodika. Uporabom senzora i regulatora protoka amonijaka i dušika, mjerenje i praćenje potencijala dušika se odvija automatski.

Tijekom zagrijavanja peći (do temperature 150 °C) retortu treba odzračiti s ciljem sprječavanja oksidacije obradaka koji se podvrgavaju nitriranju. U peć se upuhuje suhi amonijak. Dušik iz amonijaka kemijski reagira s legirnim elementima, tvoreći različite nitride. Postoje dvije metode za provedbu procesa plinskog nitriranja. Plinsko nitriranje s jednom fazom izvodi se na temperaturi od 500 do 530 °C [11] uz disocijaciju amonijaka od 15 i 30 % [11]. Međutim, zbog male debljine difuzijske zone od 0,05 mm, površina nitriranih dijelova je sklona krhkom lomu.

Metoda plinskog nitriranja s dvije faze provodi se na način da temperatura prvih 15 do 20 h provedbe procesa iznosi od 500 do 510 °C, a nakon toga se povećava na 550 °C do kraja

ciklusa [11]. U usporedbi s prvom metodom, disocijacija amonijaka u ovom slučaju iznosi 65 do 85 % [11], pri čemu se postiže manja debljine zone spojeva nego kod prve metode.

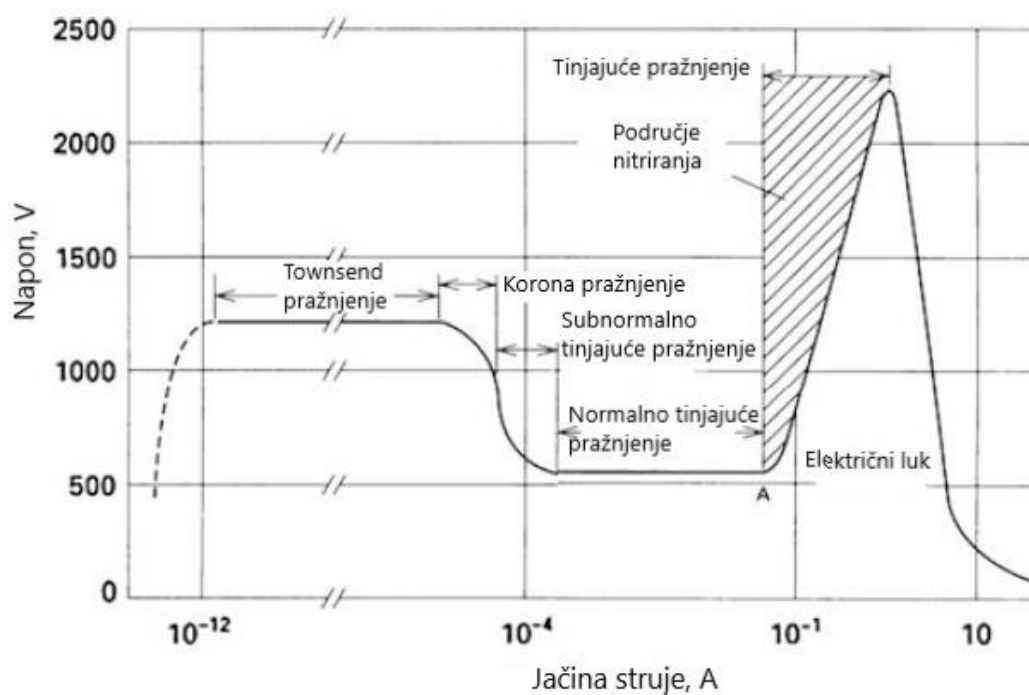
4.4. Nitiranje u solnoj kupci

Postupak nitiranja u solnoj kupci, kao alternativa plinskom nitiranju, zaživio je sredinom 1930-ih. Proces nitiranja u solnoj kupci odvija se u rastaljenoj kupci koja sadrži dušik i cijanide ili cijanate, na temperaturama od 510 do 580 °C. Uobičajeni sastav solne kupke je 60-70 % natrijevih te 30-40 % kalijevih soli, a svojstva nitiranog sloja ovise o omjeru cijanata i cijanida. Glavne prednosti procesa su niži investicijski troškovi, niži pogonski troškovi, jednostavno održavanje, jednostavno upravljanje i kraće vrijeme ciklusa. Zbog ekoloških problema sa cijanidima, postupak nitiranja u solnoj kupci polako gubi tržišni udio nad ostalim postupcima.

4.5. Nitiranje u plazmi

Osim kod nitiranja, plazma (kao četvrto agregatno stanje) se koristi i kod drugih postupaka (plazmatsko naštrcavanje, taloženja iz parne faze – PACVD), a nastaje ionizacijom plinske smjese dušika i vodika toplinom, radijacijom ili električnim pražnjenjem. Tijekom procesa nitiranja u plazmi, plazma nastaje ionizacijom plinske smjese djelovanjem elektromagnetskog polja uspostavljenog visokim naponom između obradaka i stijenke peći ili pomoćnih elektroda. U procesu nitiranja atomi elementarnog dušika ubrzavaju kroz plazmu i sudaraju se s površinom obradaka u vakuumskoj komori. Posljedično dolazi do ugrijavanja obradaka i čišćenja površine.

Pri nižim vrijednostima napona generira se struja koja je konstantnog iznosa. Međutim, povećanjem napona iznad određene vrijednosti, električna struja izaziva lančanu reakciju prilikom koje elektroni napuštaju vanjsku ljusku atoma plina i putuju prema protuelektrodi. Ioni i elektroni ubrzavaju, sudaraju se s drugim atoma i aktiviraju nove elektrone. Pojava naglog rasta struje naziva se Townsendovo pražnjenje. Slika 15 prikazuje Paschenovu krivulju koja prikazuje različite karakteristike pražnjenja, u ovisnosti o jakosti struje i napona.

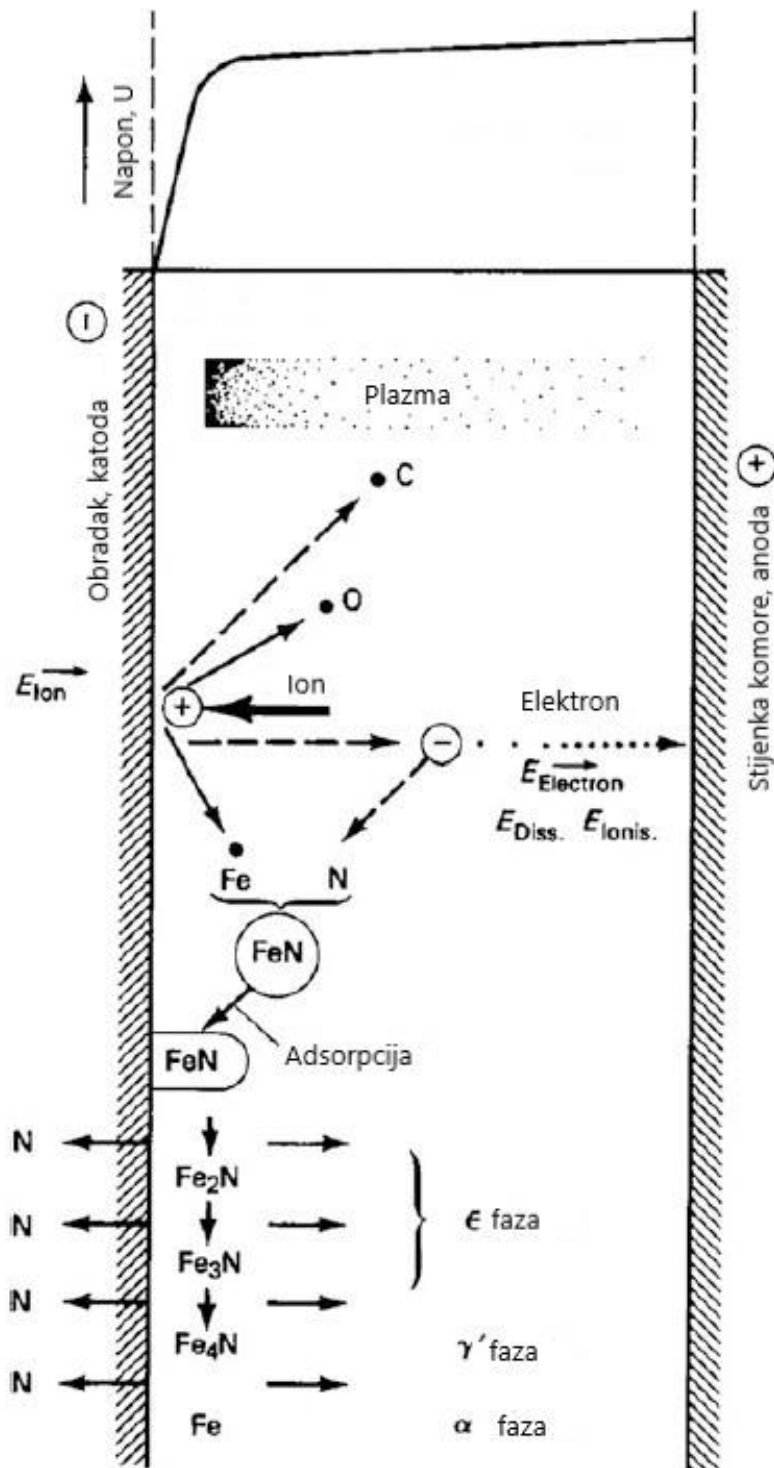


Slika 15. Paschenova krivulja električnog pražnjenja u ioniziranom plinu [11]

Izvan označenog područja vrijednosti za nitriranje u plazmi, uspostavlja se električni luk koji može dovesti do oštećenja i taljenja ili isparivanja materijala s površine obradka.

Mehanizam postupka nitriranja u plazmi opisuje se kemijskom reakcijom dušika i željeza na površini pri čemu nastaje nestabilan spoj FeN. Zbog svoje nestabilnosti nitrid se brzo pretvara u γ' i ϵ -fazu čime dolazi do stvaranja zone spojeva.

Daljnjom difuzijom dušika prema jezgri nastaje difuzijska zona, odnosno različiti nitridi s legirajućim elementima – nitridotvorcima. Slika 16 prikazuje mehanizam procesa nitriranja u plazmi ioniziranih plinova.

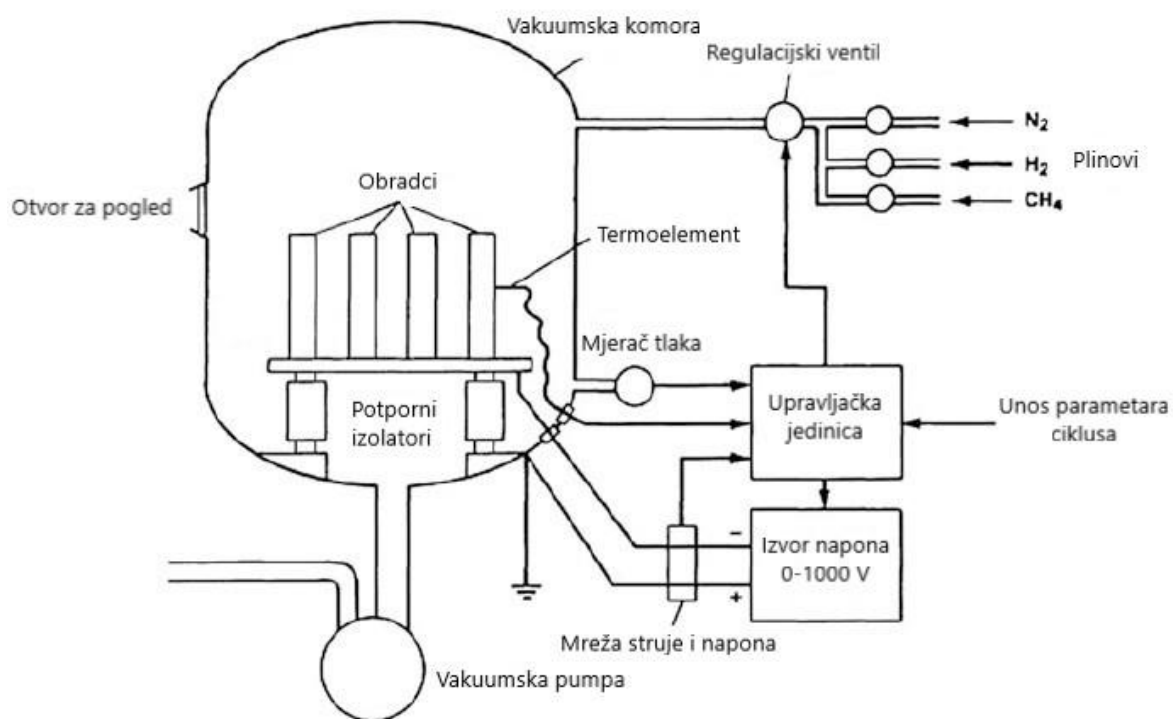


Slika 16. Mehanizam procesa nitriranja u plazmi [11]

Tijekom provedbe procesa nitriranja u plazmi nužno je pratiti određene parametre, poput protoka plinova, temperature, vremena, tlaka i snage plazme.

Uobičajena plinska smjesa za nitriranje u plazmi obično sadrži 25% N_2 i 75% H_2 , a povećanjem udjela dušika do 50% moguće je izravno utjecati i na brzinu difuzije. Temperatura toplinsko-kemijskog procesa nitriranja u plazmi ovisi o vrsti materijala obradka i uobičajeno se nalazi u rasponu od 350–580 °C [11]. O temperaturi plazme ovisi i efektivna dubina nitriranja. Temperatura procesa za ugljične čelike je viša od temperature nitriranja za legirane čelike. Nitriranje u plazmi izvodi se u rasponu tlakova od 130-1300 Pa [11].

Glavni dijelovi sustava nitriranja u plazmi su: vakuumska komora, sustav za regulaciju protoka plinova, upravljačka jedinica, izvor napona i vakuumska pumpa. Slika 17 prikazuje dijelove peći za nitriranje u plazmi.



Slika 17. Shematski prikaz peći za nitriranje u plazmi [11]

Kao i svaki drugi toplinsko-kemijski proces, i nitriranje u plazmi posjeduje određene prednosti i nedostatke. Glavne prednosti nitriranja u plazmi su: kraće vrijeme u odnosu na plinsko nitriranje, smanjene distorzije i dimenzijske promjene obradaka, uklanjanje potrebe za naknadnom obradom površine, smanjeni troškovi obrade, bezopasnost postupka, homogenost i ujednačenost mikrostrukture, brze kinetičke reakcije na površini i odstranjivanje oksidnog sloja sa površine. S druge strane, potreba za kvalificiranim osobljem, ograničenost serije zbog dimenzija vakuumske komore, nejednolika raspodjela temperatura

kod obradaka i moguće oštećenje površine obradka pri visokim naponima, se ističu kao glavni nedostaci ovog postupka nitriranja.

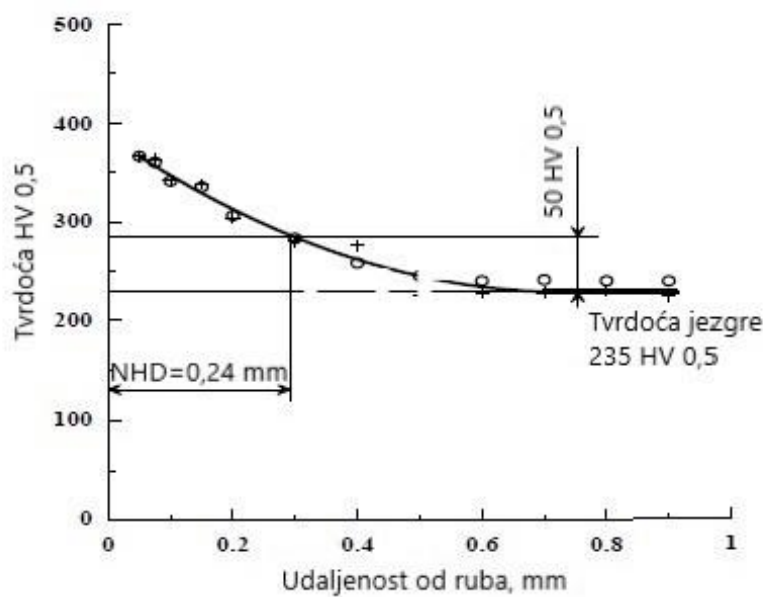
4.6. Karakterizacija nitriranog sloja

Za karakterizaciju nitriranog sloja treba pripremiti metalografski uzorak od poprečnog presjeka nitriranog obradka, a karakterizacija uključuje ispitivanje sljedećih veličina: površinske tvrdoće, tvrdoće zone spojeva, rasporeda tvrdoće po dubini difuzijske zone, te određivanje debljine zone spojeva, ukupne dubine i efektivne dubine nitriranja.

Na vrijednost površinske tvrdoće utječu tvrdoće zone spojeva i difuzijske zone, efektivna dubina nitriranja te primijenjeno opterećenje indentora propisano normama (ISO 15787:2001). Površinska tvrdoća se značajno razlikuje od tvrdoće zone spojeva za čije se ispitivanje primjenjuju metoda prema Vickersu (HV 0,1; HV 0,05; HV 0,01) ili Knoopu (HK 0,1; HK 0,2). Za ispitivanje tvrdoće, zbog male debljine i velike krhosti sloja, primjenjuju se samo mala opterećenja.

Na metalografski pripremljenom uzorku moguće je odrediti i debljinu zonu slojeva, izmjerenu kao okomitu udaljenost od površine nitriranog čelika do vidljivog prijelaza u difuzijsku zonu. Za određivanje debljine zone spojeva (kao i za određivanje dubine poroznosti zone spojeva) koristi se svjetlosna mikroskopija.

Efektivna dubina nitriranja (*njem. Nitrierhärtetiefe* - NHT) jedna je od najvažnijih veličina prilikom ispitivanja nitriranog sloja obradka, a određuje se sukladno normi DIN 50190:1979. Ispitivanje efektivne dubine nitriranja provodi se na poliranom metalografskom uzorku na način da se mjeri tvrdoća od ruba prema jezgri. Pritom se koriste metoda prema Vickersu ili Knoopu. Sila utiskavanja iznosi 4,9 N (HV 0,5), a prema potrebi moguće je koristiti i sile utiskavanja od 2,9 N do 19,6 N (HV 0,3 do HV 2). Rezultati dobiveni ispitivanjem se unose u dijagram, a efektivna dubina nitriranja se određuje kao okomita udaljenost od ruba do mjesta gdje je granična tvrdoća jednaka tvrdoći jezgre uvećana za 50 HV. Treba istaknuti kako opisani postupci karakterizacije nitriranog sloja vrijede i za nitrokarburiranje, oksinitriranje, oksinitrokarburiranje, sulfonitriranje, oksisulfonitriranje. Slika 18 prikazuje primjer određivanja efektivne dubine nitrokarburiranog čelika.



Slika 18. Određivanje efektivne dubine nitriranja nitrokarburiranog čelika postupkom TENIFER (TF1 580°C / 2h / voda) [12]

Osim navedenih, postoji i čitav niz drugih metoda za ispitivanje nitriranog sloja koje se uglavnom koriste pri znanstvenim istraživanjima, razvoju novih postupaka i sl. [Tablica 6]

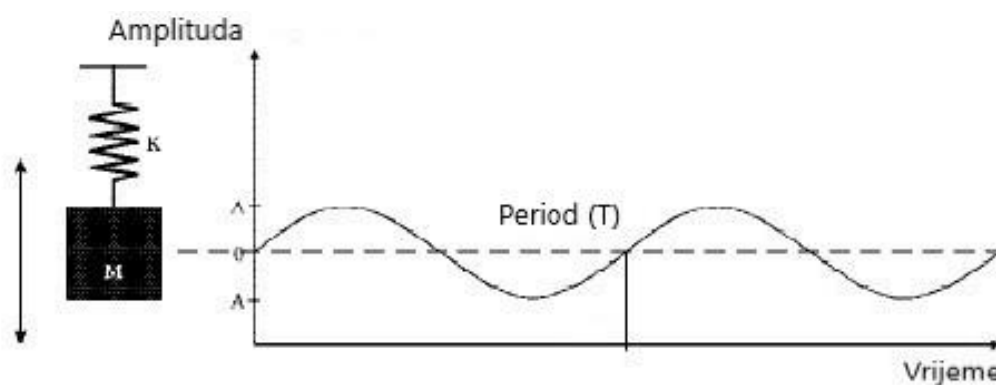
Tablica 6. Metode za ispitivanje nitriranog sloja s obzirom na svrhu ispitivanja [12]

Svrha ispitivanja	Metode ispitivanja
Određivanje kemijskog sastava rubnog sloja	rendgenska difrakcija Auger-ova elektronska spektroskopijaoptička spektrometrija tinjajućeg pražnjenja (GDOS)
Određivanje kemijskog sastava osnovnog materijala	spektroskopija mokra kemijska analiza
Određivanje debljine sloja	nerazorne metoderazorne metode
Ispitivanje hrapavost i topografije površine nitrokarburiranog 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

5. VIBRACIJE VALJNIH LEŽAJEVA

5.1. Senzori za mjerenje vibracija ležaja

Vibracije su sastavni dio rada strojeva, a proučavanjem istih moguće je identificirati stanje stroja te uspješno otkriti kvarove. Mjerenje vibracija je mjerenje periodičkog gibanja koje se može prikazati pomoću sustava gibanja mase na opruzi [Slika 19].



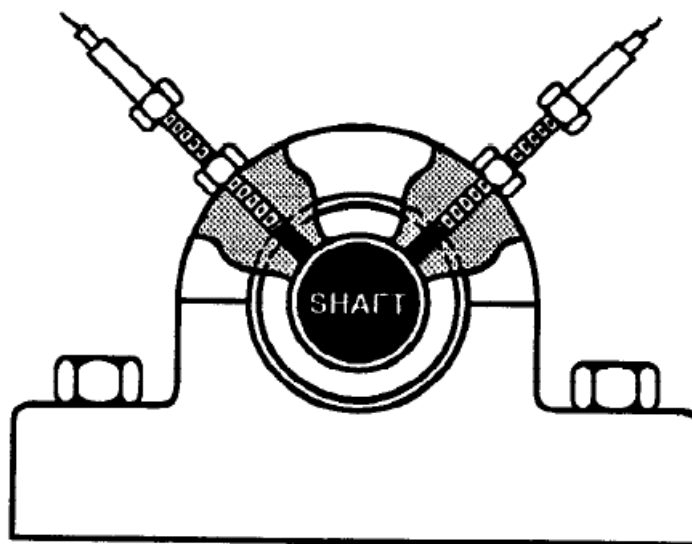
Slika 19. Sustav gibanja mase na opruzi [13]

Tijekom titranja gore prikazanog sustava, masa oscilira na opruzi određene krutosti oko ravnotežnog položaja, a promatranjem položaja centra mase u određenom vremenskom intervalu generira se sinusoidni val s karakterističnom valnom duljinom, frekvencijom i amplitudom. Tri mjerljive karakteristike vibracijskih signala jesu: pomak, brzina i ubrzanje.

Promjena udaljenosti mase od referentnog položaja definira se kao pomak (μm). Pomak se izražava u milimetrima (mm) ili mikrometrima (μm) i najčešće se mjeri pomoću senzora za pomak (beskontaktnih uređaja za mjerenje udaljenosti između dvije površine). Senzori za pomak [Slika 20] uglavnom se koriste kod rotirajućih strojeva i ležajeva s uljnim filmom.

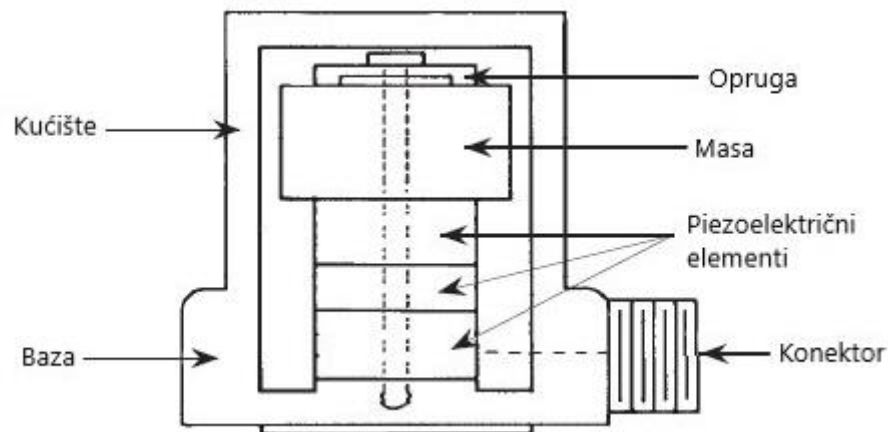
Tijekom mjerenja vibracija najčešće se mjeri brzina vibracijskog signala koja se izražava u milimetrima po sekundi (mm/s) i označava promjenu pomaka vibracijskog signala u jedinici vremena. Brzina vibracija odnosi se na najveću brzinu promjene pomaka u jedinici vremena. Brzina vibracija mijenja se tijekom ciklusa vibracije. Na gornjoj i donjoj granici pomaka vibrirajućeg objekta (ovdje vanjski prsten ležaja), objekt se zaustavlja i mijenja smjer kretanja, tako da je njegova brzina u te dvije točke nula. Kad objekt mjerenja prolazi kroz neutralni položaj ili položaj mirovanja, brzina je najveća. Budući da se brzina neprestano

mijenja s obzirom na vrijeme, u vibrometrima se uobičajeno mjeri vršna ili maksimalna brzina i izražava u mm/s. Brzina vibracija ovisna je o pomaku i frekvenciji, u smislu da se postiže veća brzina uz veći pomak i manju frekvenciju vibracija. Frekvencija vibracija ovisi o brzini vrtnje osovine te o dimenzijama i brzini vrtnje konstrukcijskih elemenata ležaja koji izazivaju vibracije.



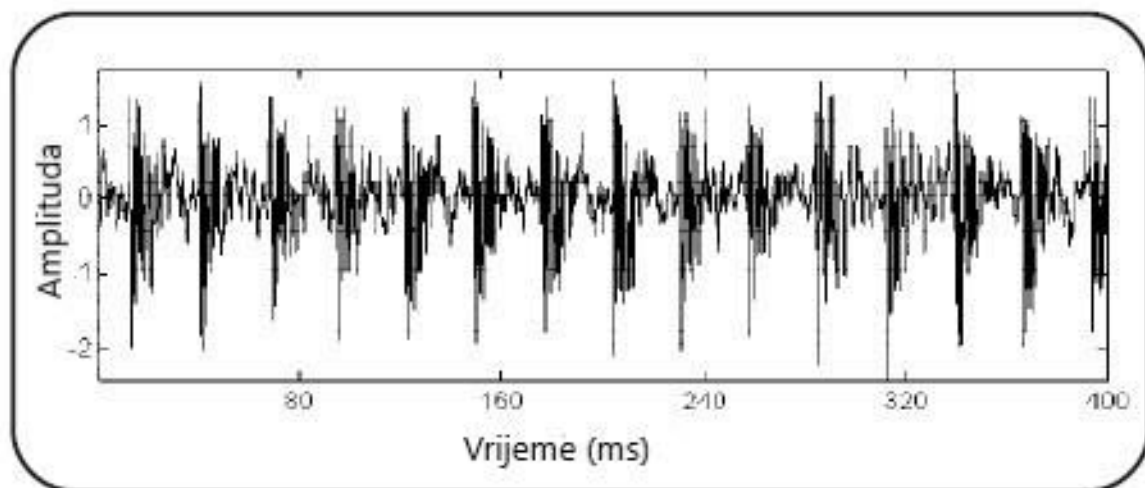
Slika 20. Senzori za mjerenje pomaka postavljeni na kućištu ležaja [13]

Promjena brzine se definira kao ubrzanje koje se izražava u $\frac{mm}{s^2}$. Ubrzanje se definira kao promjene brzine vibracija u jedinici vremena. Ako se promatra uteg mase m obješen na oprugu, ubrzanje utega je maksimalno na krajnjoj granici puta gdje je brzina utega nula. Kako se brzina približava maksimalnoj vrijednosti, ubrzanje pada na nulu i ponovno nastavlja rasti do svoje najveće vrijednosti na drugoj krajnjoj granici titraja. Ubrzanje vibracija se mjeri akcelerometrom [Slika 21]. Akcelerometri su uređaji koji rade u vrlo širokom rasponu frekvencija (od 0 Hz do iznad 400 kHz), što je ujedno i njihova glavna prednost. Akcelerometri se sastoje se od utega i jednog ili više piezoelektričnih kristala.



Slika 21. Poprečni presjek akcelerometra s piezoelektričnim elementima [13]

Pod opterećenjem utega, piezoelektrični kristali generiraju električni signal proporcionalan ubrzanju. Pobuda piezoelektričnog kristala uzrokovana je vibracijom utega koja je sukladna vibraciji stroja ili strojnog dijela na kojem se nalazi. Postavljanjem akcelerometra na ležajeve mjeri se ubrzanje čijom se integracijom dobiva brzina.. Jedan od najčešćih prikaza vibracija je u vremenskoj domeni. Slika 22 prikazuje neobrađeni signal vibracije izmjeren senzorom pomaka i prikazan kao promjena amplitude vibracija ovisne o vremenu.



Slika 22. Zapis neobrađenog signala vibracija u vremenskoj domeni [13]

5.2. Karakteristične frekvencije vibracija valjnih ležaja

Za valjni ležaj (sa stacionarnim vanjskom i rotirajućim unutarnjim prstenom) moguće je izračunati karakteristične frekvencije vibracija dijelova ležaja pomoću izraza (5) do (9) [14] :

$$f_{c/o} = \frac{f_r}{2} \left[1 - \frac{d}{D} \cos \alpha \right] \quad (5)$$

$$f_{c/i} = \frac{f_r}{2} \left[1 + \frac{d}{D} \cos \alpha \right] \quad (6)$$

$$f_{b/o} = Z f_{c/o} \quad (7)$$

$$f_{b/i} = Z f_{c/i} \quad (8)$$

$$f_b = \frac{D}{2d} f_r \left[1 - \left(\frac{d}{D} \cos \alpha \right)^2 \right] \quad (9)$$

gdje je: f_r – frekvencija vrtnje unutarnjeg prstena, $f_{c/o}$ – frekvencija vrtnje kaveza u odnosu na vanjski prsten, $f_{c/i}$ – frekvencija vrtnje kaveza u odnosu na unutarnji prsten, $f_{b/o}$ – frekvencija valjnog tijela u odnosu na vanjsku stazu kotrljanja, $f_{b/i}$ – frekvencija valjnog tijela u odnosu na unutarnju stazu kotrljanja, f_b – rotacijska frekvencija valjnog tijela, D – promjer upisane dodirne kružnice (*eng. Pitch circle*), d – promjer valjnih tijela, Z – broj valjnih tijela, α – dodirni kut.

Vibracije na navedenim frekvencijama postaju intenzivnije ako nastane oštećenje ili trošenje određenog dijela ležaja. Ponekad se ovakve vibracije mogu pojaviti i kod novih ležaja zbog određene greške u proizvodnji ležaja prisutne na nekom od elemenata ležaja.

5.3. Metode ispitivanja vibracija

Danas se vibracije mjere odgovarajućim sensorima. Mjerna pozicija senzora od velike je važnosti prilikom mjerenja vibracija te je preporučljivo izbjegavati obojene površine, neopterećene zone ležajeva i strukturalne rascjepa. Kod ručnog mjerenja vibracija, treba osigurati dosljednost očitavanja, a u obzir treba uzeti kut između stroja i senzora te pritisnu silu na površinu.

Titranje objekta ispod 10 Hz proizvodi vrlo male vibracije u mjerene iznosom ubrzanja, umjerene vibracije mjerene iznosom brzine i relativno velike vibracije mjerene iznosom pomaka. Stoga se u rasponu frekvencija vibracija do 10 Hz preporučuje mjerenje pomaka kao reprezentantnog parametra vibracija. U visokofrekventnom području, mjerenje ubrzanja daje

značajnije promjene vrijednosti od mjerenja brzine ili pomaka. Stoga se, za frekvencije preko 1000 Hz ili 1500 Hz, preporučuje mjerenje vibracija mjerenjem ubrzanja. Općenito je prihvaćeno da je u području frekvencija između 10 Hz i 1000 Hz najbolji pokazatelj intenziteta vibracija brzina, a iznad 1000 Hz jedini dobar pokazatelj opasnosti od vibracija je ubrzanje.

Vibracije se u pravilu očitavaju u tri smjera:

- aksijalnom
- horizontalnom
- vertikalnom

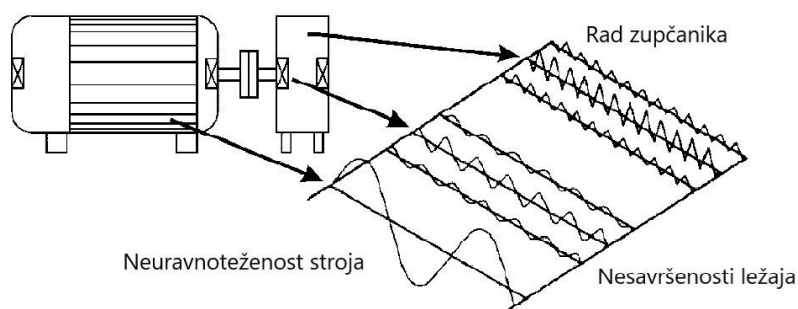
Najzastupljenije metode za analizu i prikaz snimljenih signala vibracija jesu:

- Brze Fourierove transformacije (*eng. Fast Fourier Transformation, FFT*)
- Filtriranje niskih frekvencija (*eng. Eveloping Detection*)
- Metoda spektralno emitirane energije (*eng. Spectral Emitted Energy*)

5.3.1. Brze Fourierove transformacije

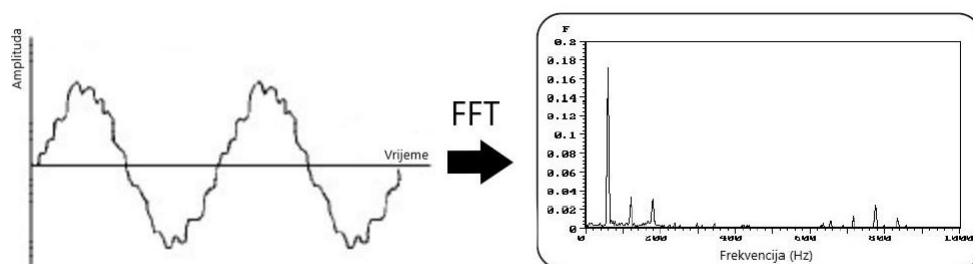
Brze Fourierove transformacije (*eng. Fast Fourier Transformation, FFT*) su jedna od najraširenijih metoda, a riječ je o analizi koja periodički prikupljene podatke u određenom intervalu iz vremenske domene (amplituda vs. vrijeme) uz pomoć računalnih algoritama prevodi u frekvencijsku domenu (frekvencija vs. vrijeme). Pri tome je važno provesti uzorkovanje vrijednosti signala prema Nyquistovom teoremu, koji preporučuje izbor frekvencije uzorkovanja najmanje dvostruko veće vrijednosti od najveće vrijednosti frekvencije vibracija prisutne u analiziranom vremenskom intervalu. Ako se traži praćenje vibracija u rasponu frekvencija od 0 Hz do 10 kHz, frekvencija uzorkovanja trebala bi biti najmanje 20 kHz. Uz pomoć Fourierovih transformacija, snimljeni vremensko stohastički signal se zamjenjuje redom harmonijskih (trigonometrijskih ili eksponencijalnih) funkcija specifične amplitude i frekvencije. Broj prikazanih frekvencija u spektrogramu vibracija ovisi o kapacitetu spremnika A/D pretvornika. Osnovni 8 bitni A/D pretvornik može pohraniti $2^8 = 256$ frekvencija, dok npr. 12 bitni pretvornik može pohraniti $2^{12} = 4096$ frekvencija, unutar analiziranog raspona frekvencija. Što je veća rezolucija pretvornika FFT analiza prikazuje srednju vrijednost frekvencija za uži interval frekvencija. Usporedbom frekvencija određenih Fourierovom analizom sa karakterističnim frekvencijama dijelova ležaja, određenih jednadžbama (5) do (9) moguće je otkriti uzrok i lokaciju kvara ležaja. Osim vibracija ležaja

na snimljeni signal vibracija utječu i ostali dijelovi pogonskog sklopa, što analizu uzorka kvara čini kompleksnom i zahtijeva primjenu metoda umjetne inteligencije i dubokog učenja, odnosno primjenu znanja iskusnih stručnjaka i ekspertnih sustava. Slika 23 prikazuje utjecaj vibracija različitih strojnih elemenata i sklopova na ukupne vibracije stroja.



Slika 23. Različnost utjecaja na ukupne vibracije stroja [13]

U FFT analizi signala, određuje se amplituda vibracija pri različitim frekvencijama sve do trenutka kada se dobiju sve frekvencije koje se nalaze unutar snimljenog signala stroja. Analizom određene vrijednosti frekvencija se potom prenose na frekvencijsku skalu. Slika 24 prikazuje tipični snimljeni signal nakon upotrebe metode brzih Fourierovih transformacija, tzv. FFT spektar.

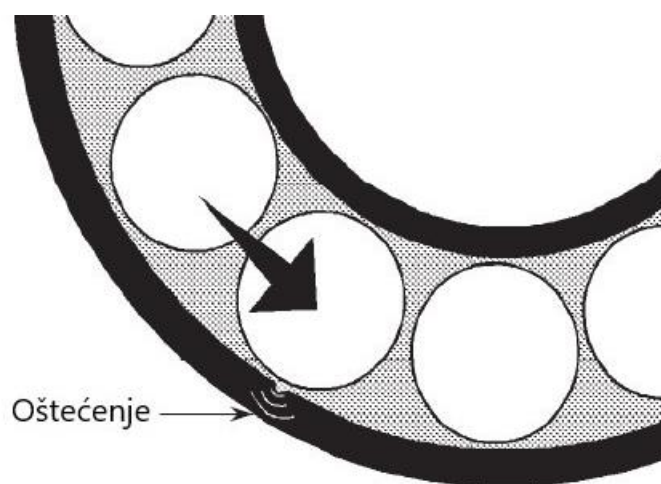


Slika 24. FFT analiza vibracija [13]

FFT spektar je koristan alat koji pomaže odrediti lokaciju kvara, kao i uzrok i fazu kvara. Osim FFT metode, u analizi vibracijskih signala koriste se i druge metode, poput metode filtriranja niskih frekvencija i metode spektralno emitirane energije.

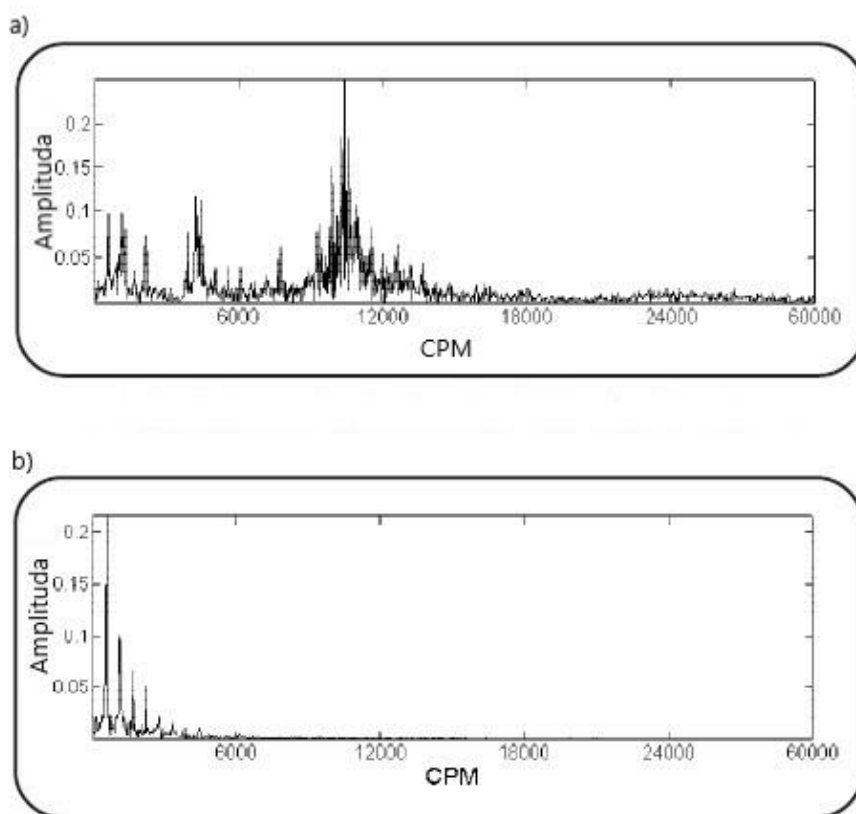
5.3.2. Filtriranje niskih frekvencija

Filtriranje niskih frekvencija (eng. *Envelope Detection*) je vrlo uspješna metoda u otkrivanju različitih grešaka kod dijelova valjnih ležajeva, mjenjačkih kutija, rotora i statora elektromotora i sl. Za razliku od ostalih vibracijskih signala stroja, ležajevi i zupčanici generiraju vibracijske signale manje amplitude i više frekvencije. Primarni cilj navedene metode je filtriranje signala niske frekvencije koji ne pripadaju frekvencijskom rasponu koji odgovara radu ležaja i zupčanika. Primjerice, ukoliko na kotrljajućem ležaju postoji oštećenje na vanjskoj stazi kotrljanja uzrokovano nekim od mehanizama trošenja, prelaskom preko istog generira se vibracijski signal uzrokovan takvim oštećenjem [Slika 25].



Slika 25. Oštećenje vanjske staze kotrljanja [13]

Međutim, zbog svoje niske energije, takav vibracijski signal na određenoj frekvenciji koji odgovara kvaru može ostati prikriven prilikom mjerenja ukupnih vibracija određenog stroja, pa se upravo zbog toga često koristi metoda filtriranja niskih frekvencija. Filtriranjem niskih frekvencija, do izražaja dolaze ponavljajući vibracijski signali koji odgovaraju frekvencijskom rasponu kvara ležaja. Time se kvar može uspješno ukloniti, a stroj nastaviti djelovati učinkovito. Slika 26 prikazuje primjer nefiltriranog i filtriranog signala oštećenog ležaja.



Slika 26. Primjer: a) nefiltriranog i b) filtriranog signala vibracija ležaja (CPM – broj ciklusa u minuti) [13]

5.3.3. Metoda spektralno emitirane energije

Metoda spektralno emitirane energije (eng. *Spectral Emitted Energy technology*) koristi se za rano otkrivanje različitih kvarova kod ležajeva i zupčanika, a pritom se mjeri akustični signal koji generira materijal. Pomoću senzora za akustičnu emisiju, detektiraju se akustične emisije u frekvencijskom rasponu od 150 - 500 kHz, a ova vrsta signala se ne smatra vibracijom već ultrazvukom. Takvi akustični signali se javljaju u različitim slučajevima, npr. kod grešaka u ležajevima, prisustvu nečistoća u sredstvu za podmazivanje, kod dinamičkog preopterećenja, kavitacije i sl. Metoda spektralno emitirane energije je posebice pogodna za rano otkrivanje grešaka na ležajevima na mikroskopskoj razini.

EKSPERIMENTALNI DIO

6. PLAN I PROVEDBA ISPITIVANJA

6.1. Provedba nitriranja

Postupci nitriranja provedeni su na unutarnjim prstenovima od čelika 100Cr6 (NTN Corporation, 1R30X35X17). Eksperimentalna ispitivanja provedena su na igličastom ležaju (NTN Corporation, NK35/20 RCT) sastavljenom od nenitriranog vanjskog prstena s kavezom i nitriranih unutrašnjih prstenova [Slika 27].



Slika 27. Dijelovi igličastog ležaja: a) nedomificirani unutarnji prsten, b) vanjski prsten s kavezom i iglicama [15]

Nitriranje unutarnjih prstenova u plazmi provedeno je u vakuumskoj peći Rübiger PC 70/90 [Slika 28] u Laboratoriju za inženjerstvo površina na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Tri šarže unutarnjih prstenova su nitrirane u plazmi, a jedna šarža je nitrokarburirana u solnoj kupci TENIFER.



Slika 28. Vakuumaska peć Rübiger PC 70/90 za nitriranje i PACVD prevlačenje

Tablica 7 prikazuje parametre nitriranja u plazmi prve šarže unutarnjih prstenova.

Tablica 7. Parametri nitriranja ležajnog prstena u plazmi za uzorak 450°C/6h

Parametri postupka	Vrijednost parametra
Temperatura čišćenja površine otprašivanjem iona	430 °C
Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona	2 h
Temperatura nitriranja	450 °C
Trajanje nitriranja u plazmi	6 h
Sastav plinske smjese	120 l/h H ₂ , 40 l/h N ₂ , 10 l/h Ar
Tlak u vakuumskoj komori	2 mbar
Napon plazme	425 V
Snaga izvora plazme	2000 W

Tablica 8 prikazuje parametre nitriranja u plazmi druge šarže unutarnjih prstenova.

Tablica 8. Parametri nitriranja ležajnog prstena u plazmi za uzorak 480°C/7h

Parametri postupka	Vrijednost parametra
Temperatura čišćenja površine otprašivanjem iona	480 °C
Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona	2 h
Temperatura nitriranja	480 °C
Trajanje nitriranja u plazmi	7 h
Sastav plinske smjese	120 l/h H ₂ , 40 l/h N ₂ , 10 l/h Ar
Tlak u vakuumskoj komori	2 mbar
Napon plazme	520 V
Snaga izvora plazme	2400 W

Tablica 9 prikazuje parametre nitiranja u plazmi treće šarže unutarnjih prstenova.

Tablica 9. Parametri nitiranja ležajnog prstena u plazmi za uzorak 500 °C/4h

Parametri postupka	Vrijednost parametra
Temperatura čišćenja površine otprašivanjem iona	500 °C
Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona	2 h
Temperatura nitiranja	500 °C
Trajanje nitiranja u plazmi	4 h
Sastav plinske smjese	20 l/h H ₂ , 60 l/h N ₂ , 10 l/h Ar
Tlak u vakuumskoj komori	2 mbar
Napon plazme	375 V
Snaga izvora plazme	4000 W



Slika 29. Ispitni uzorci od čelika 100Cr6 nakon nitiranja u plazmi pri 480°C/7h

6.2. Plan pokusa

Nakon provedenog nitriranja, za daljnja eksperimentalna ispitivanja je odabrano ukupno pet unutarnjih prstenova, od kojih su četiri prstena modificirana postupkom nitriranja, a peti prsten je nemodificiran. Od četiri modificirana prstena, tri prstena su modificirana nitriranjem u plazmi dok je četvrti prsten modificiran nitrokarburiranjem u solnoj kupci TENIFER. Slika 30 prikazuje pet unutarnjih prstenova s pripadajućim oznakama koje su se koristile u ispitivanjima. Tablica 10 sadrži opis i tumačenje oznaka za ispitane prstenove.



Slika 30. Unutarnji prstenovi ležaja

Tablica 10. Opis korištenih oznaka unutarnjih prstenova ležaja

Oznaka	Opis
L0	Nemodificirani (polazni) prsten
L1	Prsten modificiran postupkom nitriranja u plazmi (450°C/6h)
L2	Prsten modificiran postupkom nitriranja u plazmi (480°C/7h)
L3	Prsten modificiran postupkom nitriranja u plazmi (500°C/4h)
L4	Prsten modificiran postupkom nitrokarburiranja u solnoj kupci TENIFER (580°C/2h)

Ekperimentalna ispitivanja obuhvaćaju ispitivanja tvrdoće i površinske hrapavosti unutarnjih prstenova te ispitivanja vibracije, buke i zagrijavanja igličastog ležaja (NTN, NK35/20RCT) u koji su ugrađeni modificirani prstenovi. Sva ispitivanja vibracije, buke i zagrijavanja ležaja provedeni u uvjetima bez podmazivanja. Nakon ispitivanja ležaja u simulatoru pomoću svjetlosnog mikroskopa snimljene su površine unutarnjih prstenova.

6.3. Uređaji za ispitivanje

Tvrdoća unutarnjih prstenova ispitana je pomoću tvrdomjera „ZwickRoell Indentec“ [Slika 31] u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje.



Slika 31. Tvrdomjer „ZwickRoell Indentec“

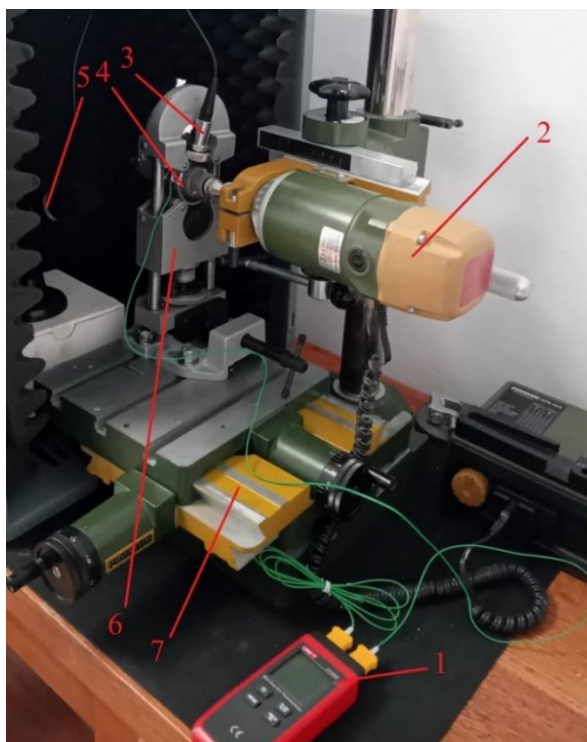
Za ispitivanje površinske hrapavosti unutarnjih prstenova korišten je uređaj „TIME 3202“

[Slika 32].



Slika 32. Uređaj za ispitivanje hrapavosti „TIME 3202“ [16]

Slika 33 prikazuje mjerni postav (simulator) namijenjen mjerenju vibracija, buke i zagrijavanja igličastih ležajeva. Dijelovi simulatora jesu: 1 - kontaktni termometar, 2 - elektromotor, 3 - piezoelektrični akcelerometar, 4 - ležaj za ispitivanje, 5 - mikrofoni, 6 - kućište za prihvat ležaja, 7 - koordinatni stol.



Slika 33. Mjerni postav za ispitivanje vibracija ležajeva

Za provedbu mjerenja vibracija ležaja korišten je uređaj za ispitivanje vibracija „Schut Vibration meter VM-6360“ (s piezoelektričnim akcelerometrom) [Slika 34] spojen na prijenosno računalo. Senzor vibrometra VM-6360 mjeri pomak vibrirajućeg objekta (od jednog do drugog krajnjeg položaja vibracije) u iznosu od 1 do 1999 μm , brzinu vibracija od 0,2 do 199,9 mm/s, ubrzanje od 0,2 do 199,9 mm/s^2 i frekvenciju vibracija ležaja s najvećom amplitudom u iznosu od od 10 Hz do 20 kHz [17].



Slika 34. Uređaj za ispitivanje vibracija „VM-6360“ [17]

Mjerenje zagrijavanja ležaja provedeno je pomoću dvokanalnog kontaktnog termometra „UNI-T UT320D“ [Slika 35].



Slika 35. Kontaktni termometar UNI-T UT320D [18]

Nakon svih provedenih ispitivanja, na unutarnjim prstenovima ležaja su se pojavili tragovi trošenja koji su snimljeni pomoću svjetlosnog mikroskopa „Toolcraft DigiMicro Profi“ koji je preko USB porta bio spojen na prijenosno računalo [Slika 36]. Optička rezolucija kamere je 2 MP, a mikroskop može snimati fotografije ili filmove s kontinuiranom promjenom povećanja od 20x do 200x. Snimljene slike se analiziraju u računalnom programu MicroCapture Plus, uz prethodnu kalibraciju povećanja.

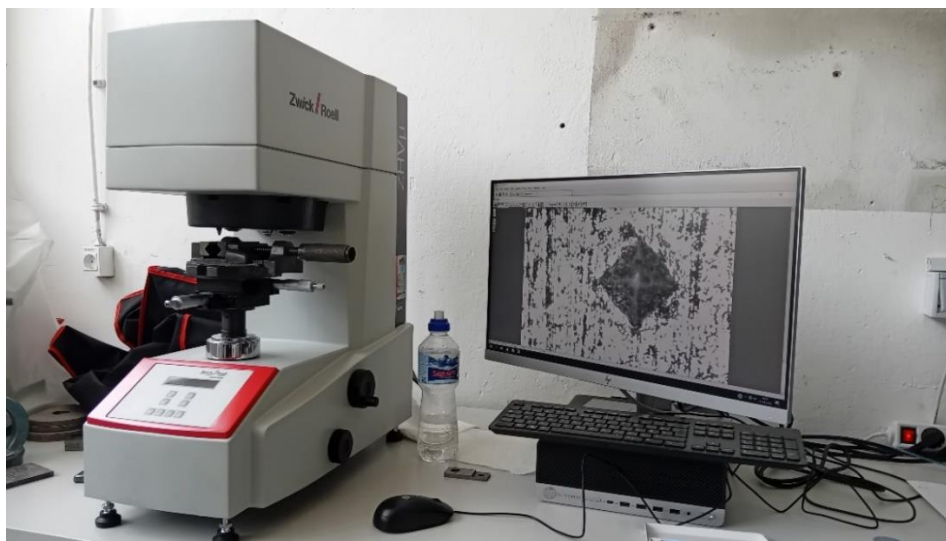


Slika 36. Svjetlosni mikroskop "Toolcraft DigiMicro Profi" [19].

7. REZULTATI I DISKUSIJA ISPITIVANJA

7.1. Ispitivanje tvrdoće površine

Ispitivanje tvrdoće unutarnjih prstenova provedeno je pomoću Vickers metode s 5 ponavljanja po uzorku, uz primijenjeno opterećenje HV0,5.

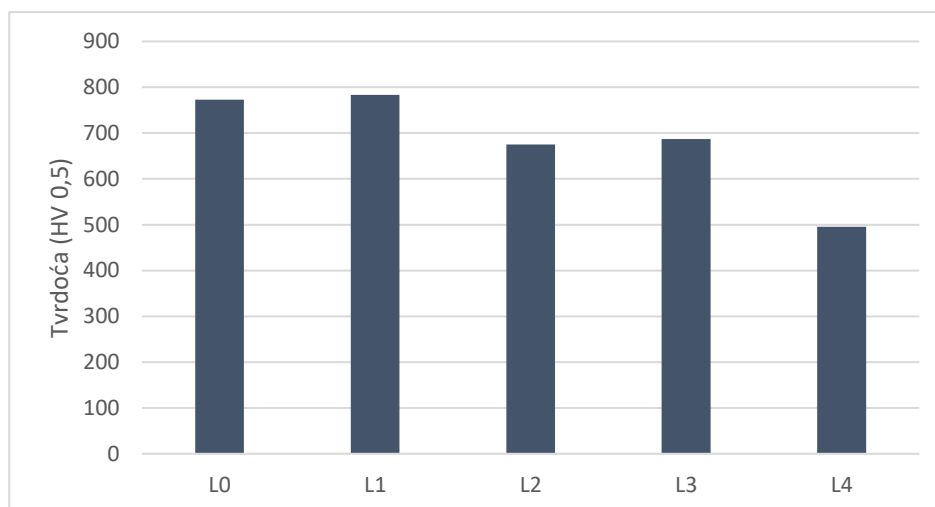


Slika 37. Mjerni postav za ispitivanje tvrdoće



Slika 38. Mjerenje tvrdoće unutarnjeg prstena

Slika 39 prikazuje histogram srednjih vrijednosti tvrdoća unutarnjih prstenova.



Slika 39. Histogram srednjih vrijednosti tvrdoća unutarnjih prstenova

Analizom dobivenih rezultata utvrđen je pad srednjih vrijednosti tvrdoće unutarnjih prstenova s porastom temperature nitriranja. Srednja vrijednost tvrdoće uzorka L2 (nitriranog u plazmi na 480 °C) smanjila se za 12,6 %. Srednja vrijednost tvrdoće uzorka L3 (nitriranog u plazmi na 500 °C) smanjila se za 11,17 %, a srednja vrijednost tvrdoće uzorka L4 (nitrokarburiranog u solnoj kupci na 580 °C) smanjila se za 35,92 % u usporedbi s polaznim vrijednostima. Porast temperature nitriranja potaknuo je nastavak procesa popuštanja u čeliku 100Cr6, koji uzrokuju smanjenje tvrdoće martenzita i nastavak izlučivanja cementita popuštanja. Nitriranje u plazmi (uzorka L1) na donjoj temperaturi postupka od 450 °C/6 h najmanje je utjecalo na smanjenje tvrdoće jezgre, dok je nitrokarburiranje u solnoj kupci TENIFER (uzorak L4) najviše smanjilo tvrdoću, unatoč najkraćem vremenu nitriranja (580 °C/2 h). Ovakvo ponašanje materijala se može objasniti Hollomon-Jaffeo-vim zakonom popuštanja, koji predviđa smanjenje tvrdoće kaljenog čelika direktno proporcionalno porastu temperature popuštanja i logaritmu vremena popuštanja.

7.2. Ispitivanje hrapavosti površine

7.2.1. Hrapavost površina u polaznom stanju

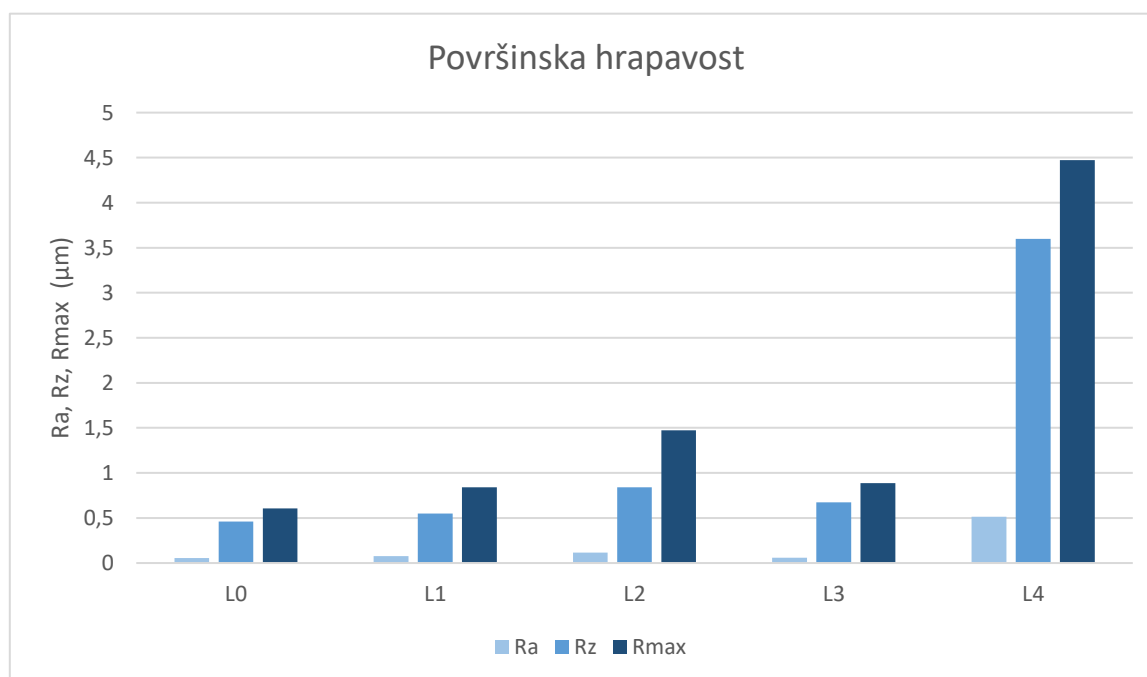
Površinska hrapavost ispitana je u polaznom stanju pomoću uređaja „TIME 32202“ [Slika 32] na nitriranim unutarnjim prstenovima, kao i na polaznom (nemodificiranom) prstenu. Tablica 11 prikazuje slijedeće vrijednosti parametara površinske hrapavosti: R_{max} – najveća

vertikalna udaljenost između najvišeg vrha i najnižeg dola profila, R_z – srednja visina neravnina, R_a – srednje aritmetičko odstupanje profila. U strojarskoj praksi se najčešće razmatra vrijednost parametra R_a .

Tablica 11. Vrijednosti parametara površinske hrapavosti unutarnjih prstenova

	L0	L1	L2	L3	L4
$R_{max}, \mu\text{m}$	0,605	0,839	1,474	0,888	4,472
$R_z, \mu\text{m}$	0,460	0,550	0,839	0,673	3,597
$R_a, \mu\text{m}$	0,056	0,077	0,115	0,059	0,512

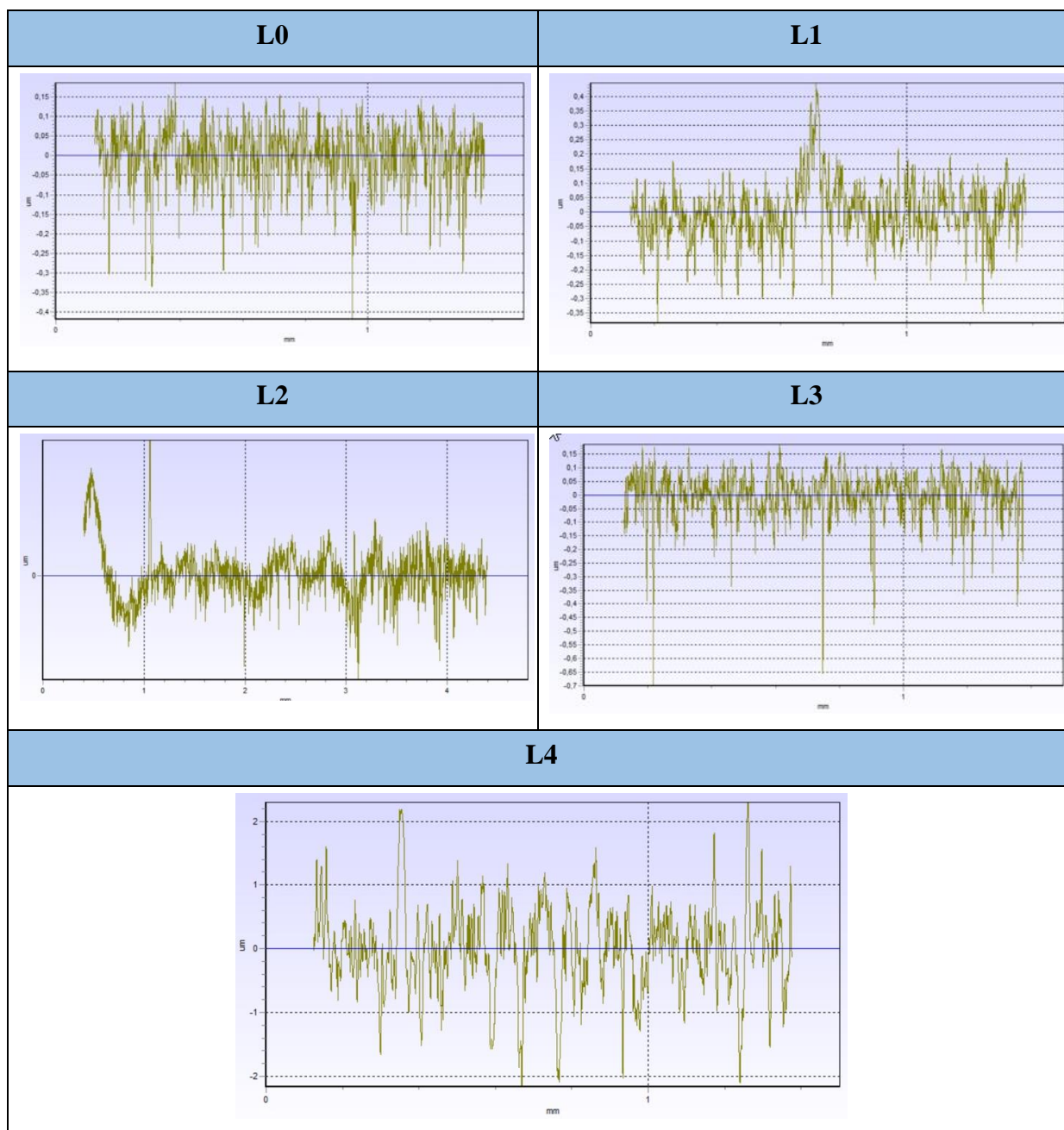
Slika 40 prikazuje histogram vrijednosti parametara površinske hrapavosti unutarnjih prstenova.



Slika 40. Histogram vrijednosti parametara površinske hrapavosti prstenova u polaznom stanju

Tablica 12 prikazuje snimljene profile hrapavosti unutarnjih prstenova u polaznom stanju.

Tablica 12. Profili hrapavosti unutarnjih prstenova u polaznom stanju



Dobivene vrijednosti parametara i snimljeni profili hrapavosti površina prstenova ukazuju na povećanje površinske hrapavosti prstenova uslijed modificiranja postupcima nitriranja u plazmi i nitrokarburiranja u solnoj kupci. Najveći prirast vrijednosti zabilježen je kod postupka nitrokarburiranja u solnoj kupci TENIFER zbog stvaranja porozne zone spojeva. Vrijednost parametra R_a uzorka L4 povećala se 9,14 puta u usporedbi s polaznim prstenom.

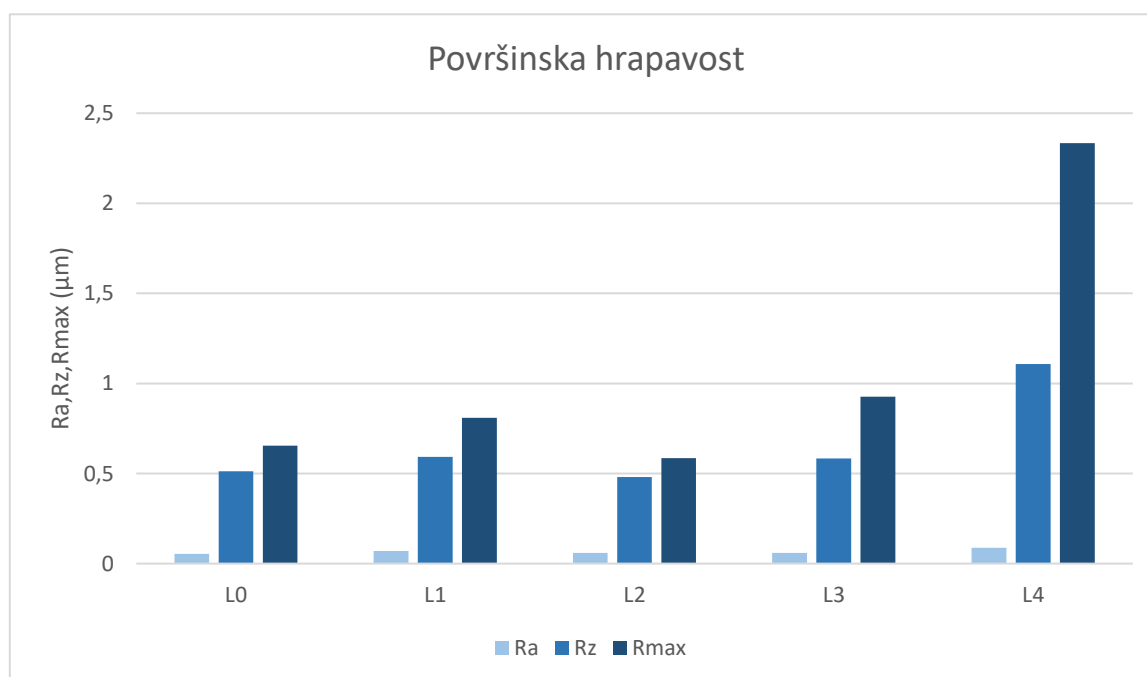
7.2.2. Hrapavost površina nakon ispitivanja vibracija i buke ležaja

Površinska hrapavost ispitana je i nakon provedenih ispitivanja vibracije, buke i zagrijavanja ležaja u uvjetima bez podmazivanja i opterećenja. Tablica 13 prikazuje dobivene vrijednosti parametara površinske hrapavosti unutarnjih prstenova nakon svih provedenih ispitivanja.

Tablica 13. Vrijednosti parametara površinske hrapavosti nakon trošenja

	L0	L1	L2	L3	L4
$R_{max}, \mu\text{m}$	0,654	0,810	0,585	0,927	2,333
$R_z, \mu\text{m}$	0,513	0,593	0,480	0,583	1,107
$R_a, \mu\text{m}$	0,054	0,070	0,059	0,059	0,088

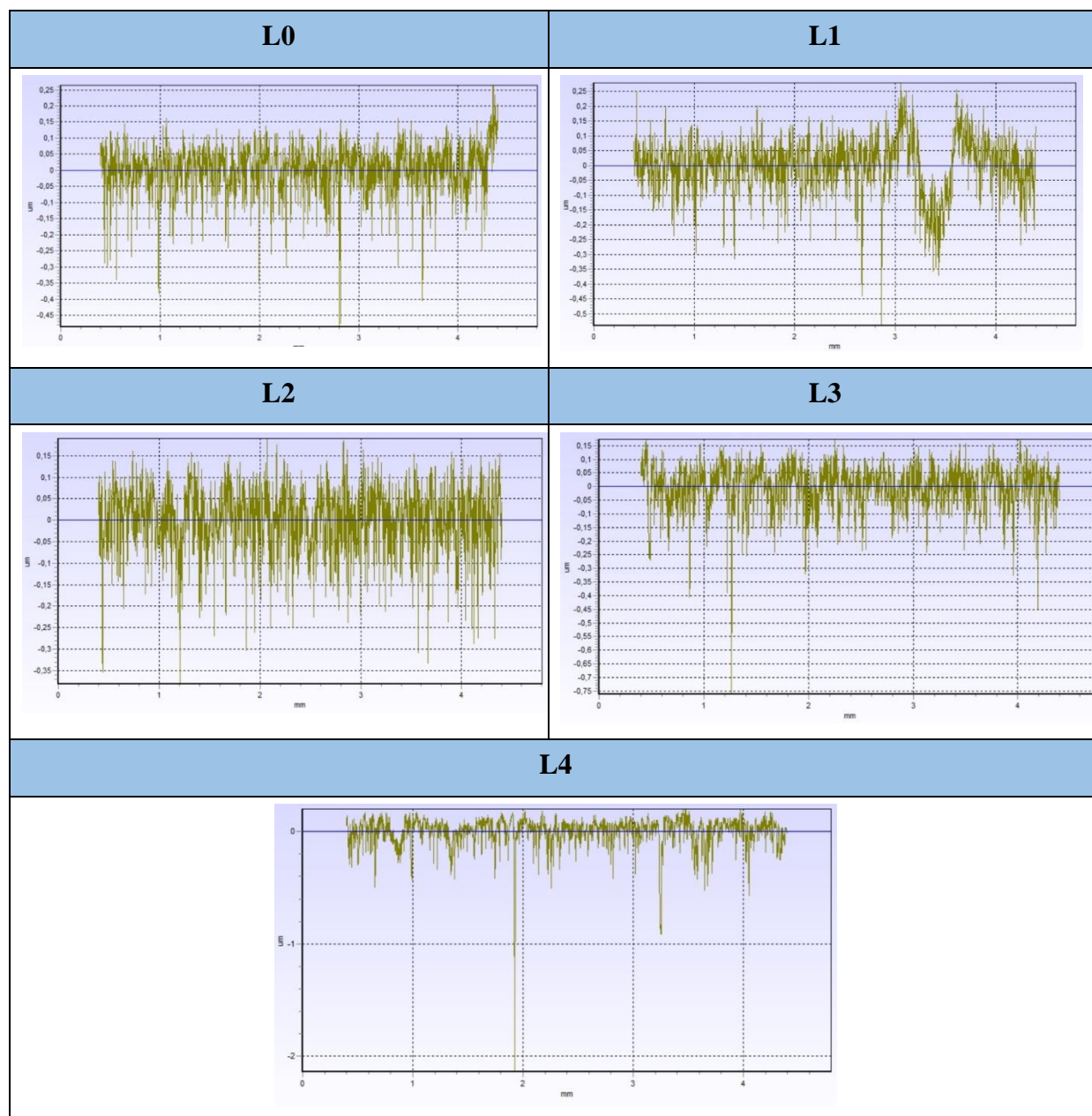
Slika 41 prikazuje histogram vrijednosti parametara površinske hrapavosti unutarnjih prstenova nakon provedenih ispitivanja.



Slika 41. Histogram vrijednosti parametara površinske hrapavosti nakon trošenja

Tablica 14 prikazuje snimljene profile hrapavosti unutarnjih prstenova nakon provedenih ispitivanja (nakon trošenja).

Tablica 14. Profili hrapavosti površina nakon trošenja

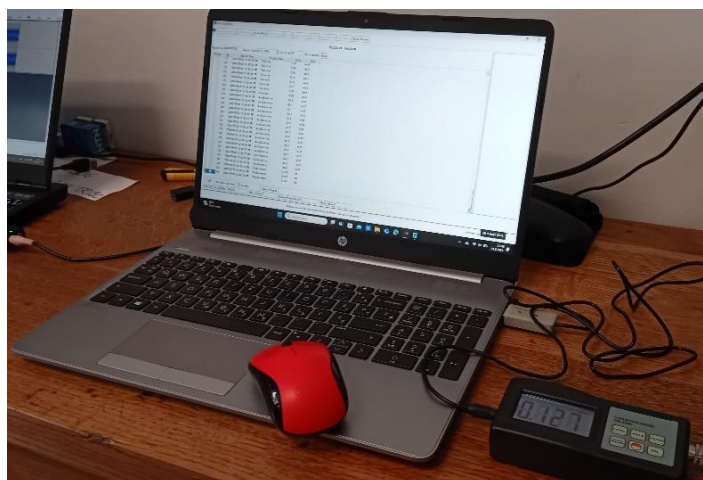


U usporedbi s polaznim vrijednostima [Tablica 11], vrijednosti parametara hrapavosti unutarnjih prstenova su se promijenile nakon provedenih ispitivanja ležaja. Uzorak L4 bilježi nagli pad vrijednosti parametara površinske hrapavosti koji je nastao uslijed uglačavanja površine. Vrijednost parametra R_a uzorka L4 se nakon ispitivanja smanjila za 82,8 %.

7.3. Ispitivanje vibracija

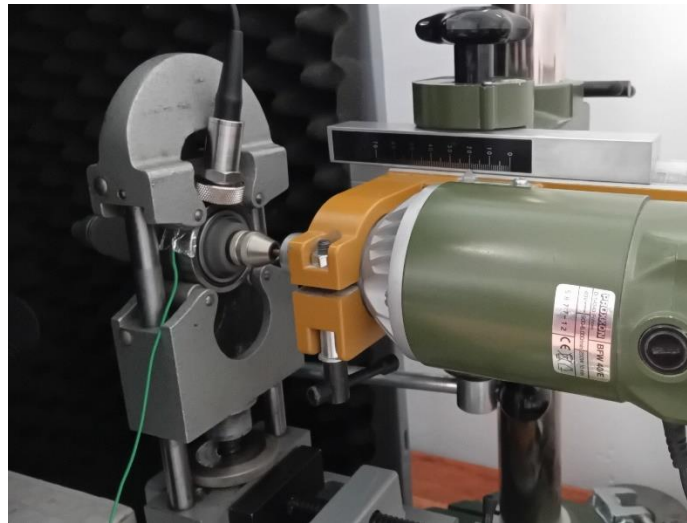
Ispitivanje vibracija igličastog ležaja, koji je sastavljen od nemodificiranog vanjskog i različitih modificiranih unutarnjih prstenova [Slika 30], provedeno je u vremenskim intervalima po 5 minuta pri brzinama vrtnje od 950, 1215 i 2280 o/min i uvjetima bez podmazivanja i bez dodatnog opterećenja, osim mase osovine i samog igličastog ležaja, koja je iznosila 0,5 kg. Za ispitivanje vibracija korišten je uređaj za ispitivanje vibracija [Slika 34] koji je spojen na prijenosno računalo [Slika 42].

Držać ležaja pričvršćen je u škripcu od sivog lijeva koji je vijcima spojen na T-utore na koordinatnom stolu od AlSi legure. Unutrašnji prsten ležaja navučen je na osovinu od polimernog materijala proizvedenu 3D printanjem koja je preko dodatne osovine od brzoreznog čelika S 18-0-1 spojena na steznu čahuru u glavi glodalice/bušilice Proxxon Micromot. Brzina vrtnje istosmjernog modora glodalice/bušilice bila je nepromijenjena tijekom ispitivanja. Podudaranje osi vrtnje osovine ležaja i elektromotora bušilice ostvareno je pomicanjem držača ležaja i elektromotora namještanjem položaja po sve tri okomite osi (x,y,z) s pomacima od 0,05 mm.

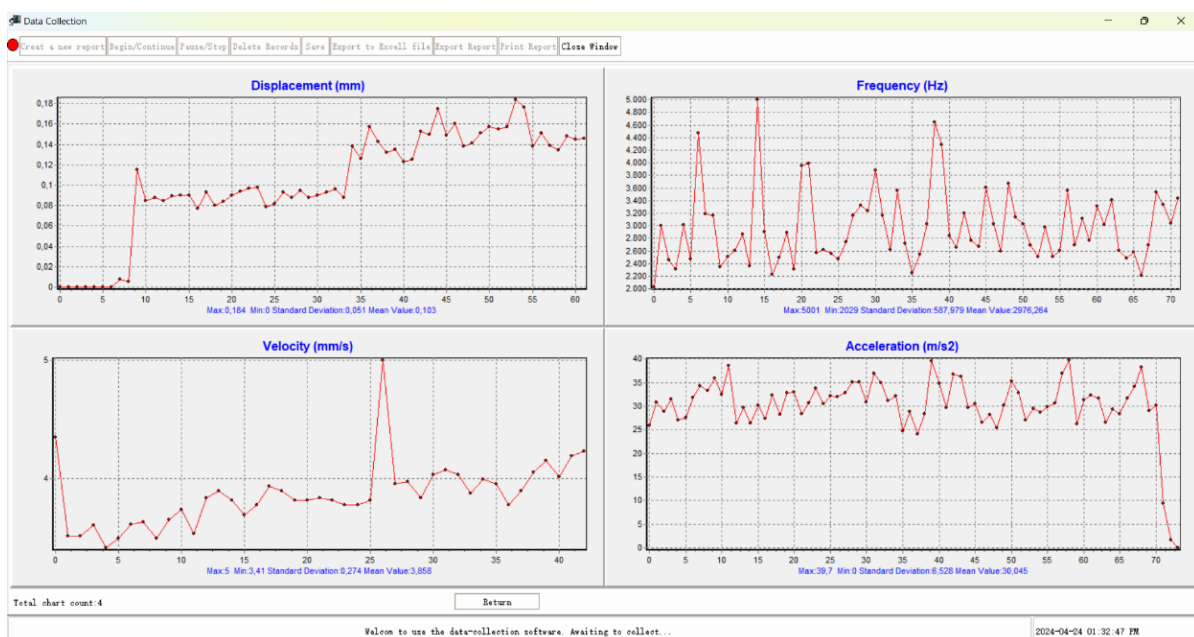


Slika 42. Uređaj za mjerenje vibracija spojen s prijenosnim računalom

Slika 44 prikazuje mjerene parametre vibracija ležajeva: pomak, brzinu, ubrzanje i frekvenciju. Tijekom ispitivanja vibracija istovremeno je mjerena buka i zagrijavanje ležaja.

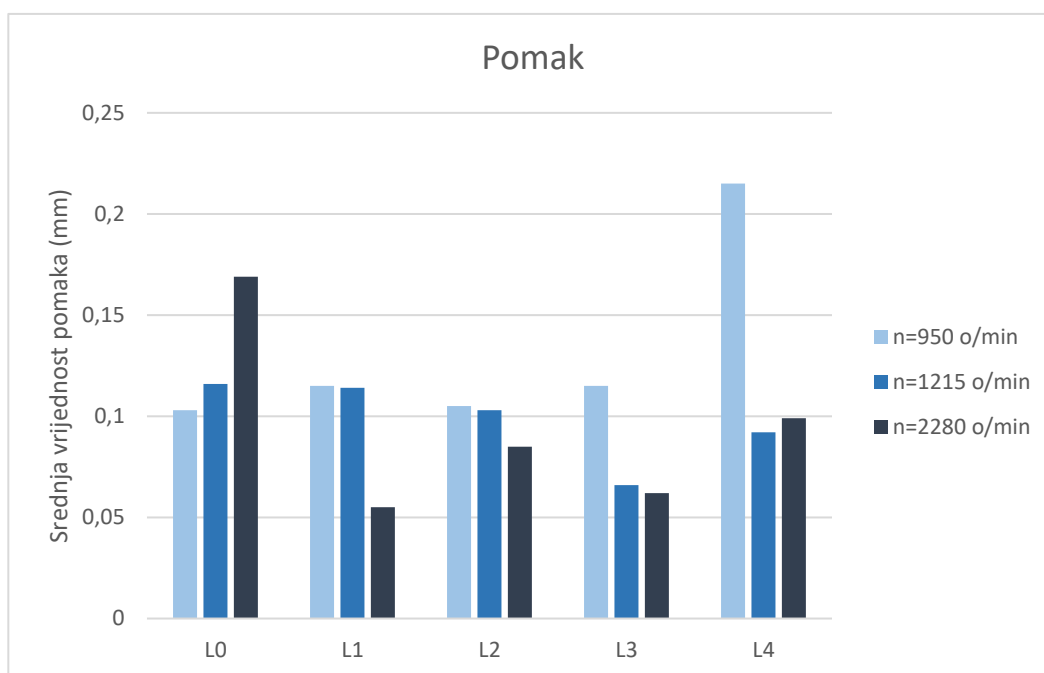


Slika 43. Položaj senzora vibracija i termoelementa u ispitivanjima igličastih ležaja



Slika 44. Grafički prikaz izmjerenih parametara vibracija

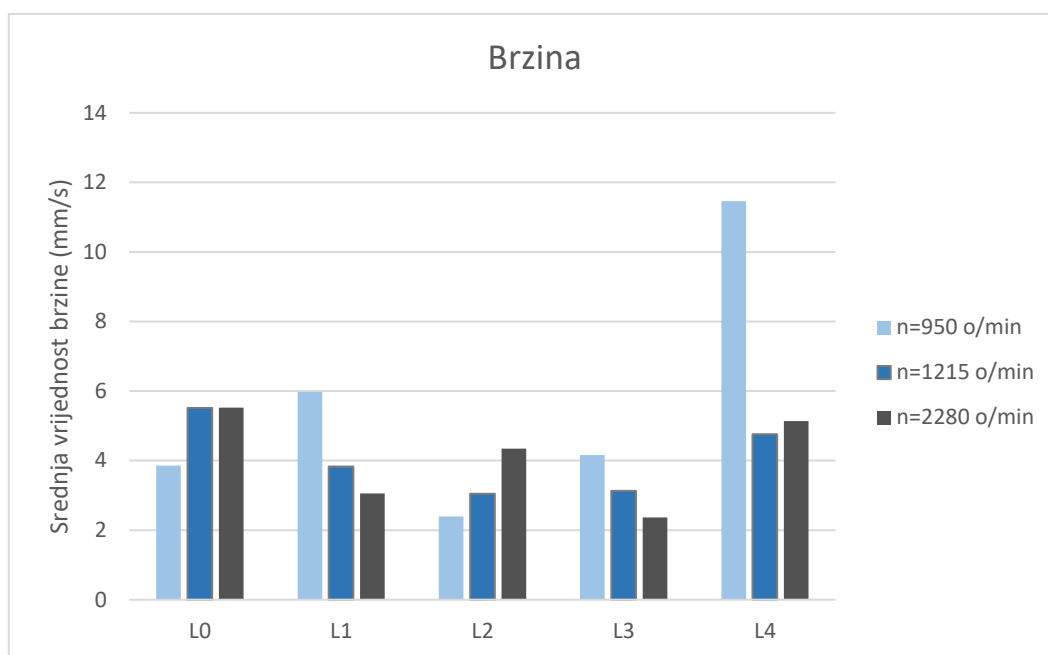
Slika 45 prikazuje histogram srednjih vrijednosti pomaka ležaja, mjenjen kao udaljenost od najvećeg ($+A_{\max}$) do najmanjeg ($-A_{\max}$) iznosa amplitude vibracija u ciklusu vibracijskog titranja. Mjerenja pomaka uobičajena su kod niskofrekventnih vibracija na strojevima koji su izrađeni od krhkih materijala, poput željeznih ljevova ili lijevane mjedi.



Slika 45. Histogram srednjih vrijednosti amplituda vibracija ležaja

Iz rezultata mjerenja vidljivo je da je pri brzini od 950 o/min najveću srednju vrijednost pomaka vibracija imao uzorak L4. Ostali uzorci bilježe relativno jednake pomake vibracija. Pri brzini od 1215 o/min, najniža srednja vrijednost pomaka vibracija zabilježen je kod uzorka L3. Pri brzini od 2280 o/min, relativno jednake srednje vrijednosti pomaka bilježe uzorci L1 i L3. Smanjenje pomaka vibracija kod svih uzoraka može se objasniti zaglađivanjem mikroneravnina na površini unutarnjeg prstena i „uhodavanjem“ ležaja. Značajno veće smanjenje pomaka vibracija uzorka L4, u odnosu na ostale uzorke, može se objasniti uglacavanjem neravnina i popunjavanjem poroznosti na vrhu zone spojeva nakon ispitivanja na 945 o/min. Ostala ispitivanja na 1215 o/min i 2280 o/min, koja su uslijedila neposredno jedno iza drugog nisu značajnije utjecala na prethodno postignuto uglacavanje površine te su u ovim ispitivanjima postignute slične vrijednosti pomaka vibracija.

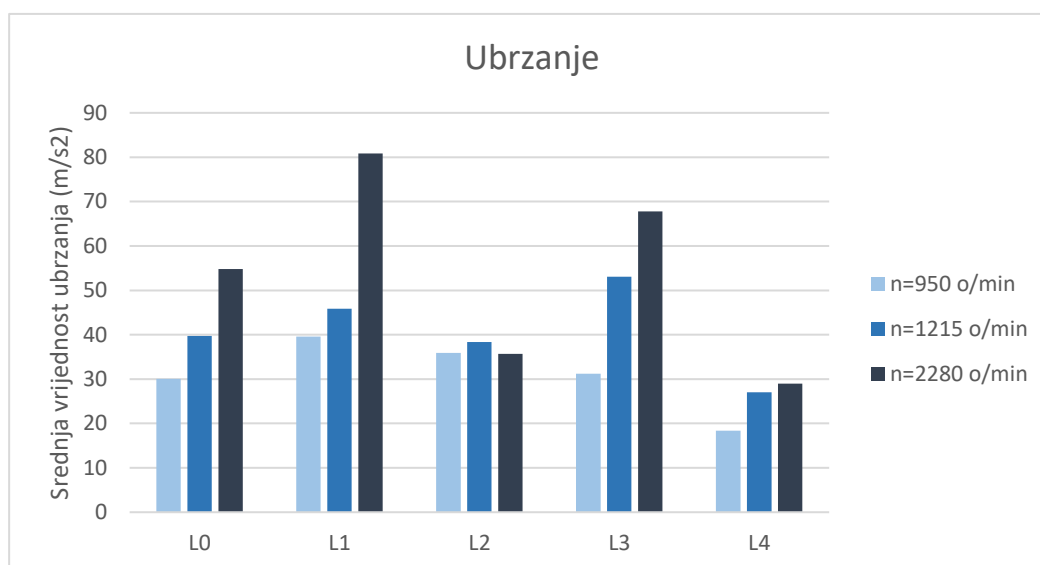
Slika 46 prikazuje histogram srednjih efektivnih vrijednosti brzine vibracija ležaja.



Slika 46. Histogram srednjih vrijednosti brzine vibracija ležaja

Pri brzini od 950 o/min, najmanju srednju vrijednost brzine vibracija bilježi uzorak L2, a najveću uzorak L4. Pri brzini od 1215 o/min, najmanje relativno jednake srednje vrijednosti vrijednosti brzina vibracija bilježe uzorci L2 i L3. Pri brzini od 2280 o/min, najmanja srednja vrijednost brzine vibracija je kod uzorka L3. Pomak i brzina vibracije su međusobno ovisni, u smislu da pri istoj brzini vrtnje, odnosno frekvenciji vibracija, uzorak s manjim pomakom pokazuje i manju brzinu vibracija. Brzina vibracija je pokazatelj unosa kinetičke energije vibracija u vibrirajući objekt. Unešena kinetička energija u vibrirajućem objektu se pretvara u energiju deformacija i loma, energiju zvučnog vala (buke) te toplinsku energiju. Prema dobivenim rezultatima očekuju se manja oštećenja na površini prstena L2 i L3 u odnosu na ostale prstenove.

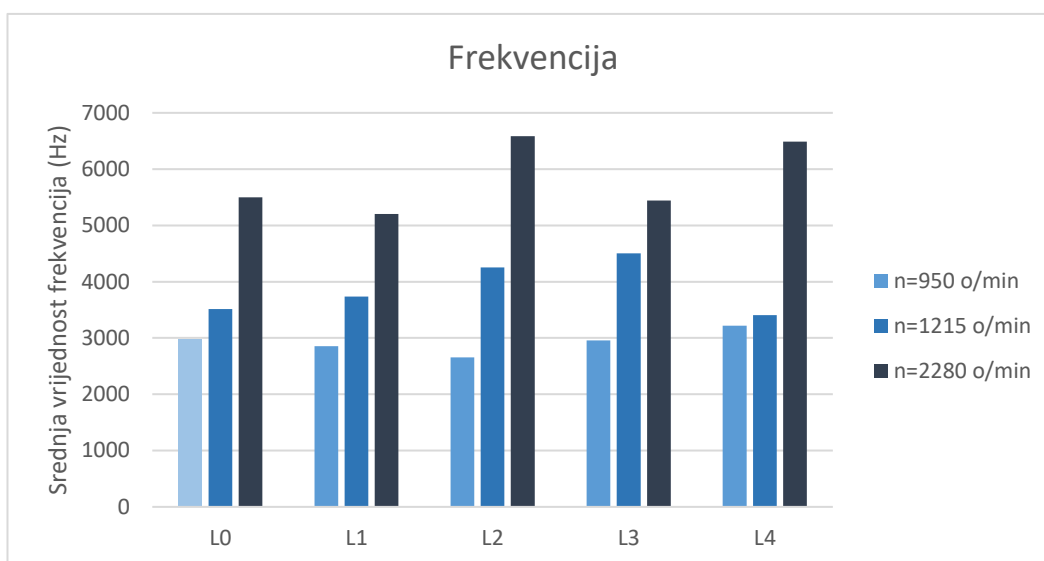
Slika 47 prikazuje histogram srednjih vrijednosti ubrzanja vibracija ležajeva. Ubrzanje vibrirajućih valjnih tijela određene mase pokazatelj je djelovanja vibracijskih sila na elemente ležaja i prijenosa tih sila na kućište ležaja.



Slika 47. Histogram srednjih vrijednosti ubrzanja vibracija ležajeva

Najniža srednja vrijednost ubrzanja vibracija pri svim brzinama vrtnje zabilježena je kod uzorka L4. Uzorak L1 ima najveću srednju vrijednost ubrzanja pri brzini od 950 o/min te 2280 o/min, a uzorak L3 ima najveću srednju vrijednost ubrzanja pri brzini od 1215 o/min. Najmanja vrijednost ubrzanja na uzorku L4 može se objasniti boljim prigušivanjem udaraca vibracijskih sila u zoni spojeva na površini nitrokarburiranog prstena u odnosu na ostale prstenove. Kod ležaja L4 pojava mikro poroznosti u zoni spojeva omogućuje elastične i plastične deformacije koje prigušuju vibracijske sile i razgrađuju zaostala naprezanja nastala djelovanjem kontaktnih pritiska. Od ostalih ležajeva slično ponašanje pokazao je uzorak L2 nitriran u plazmi na 480 °C/7 h kod kojeg je također nastala tanka i dovoljno duktilna zona spojeva koja na sebe može preuzeti djelovanje kontaktnih pritisaka i elastično prigušiti udarce vibracijskih sila.

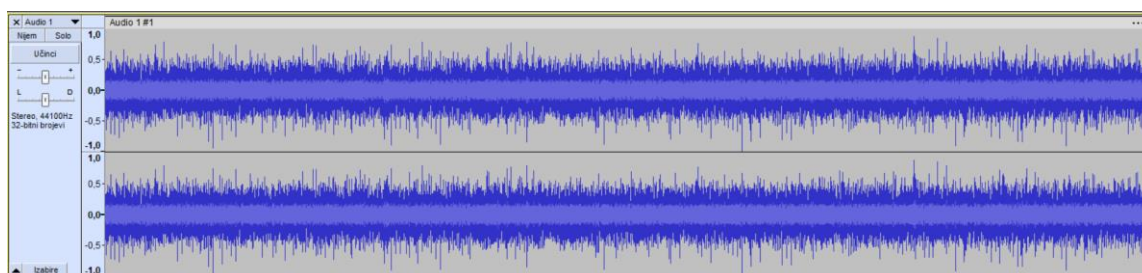
Slika 48 prikazuje histogram srednjih vrijednosti frekvencija s najvećom amplitudom vibracija ležajeva iz kojeg je vidljivo da srednja vrijednost frekvencije raste s brzinom vrtnje ležaja.



Slika 48. Histogram srednjih vrijednosti frekvencija vibracija ležajeva

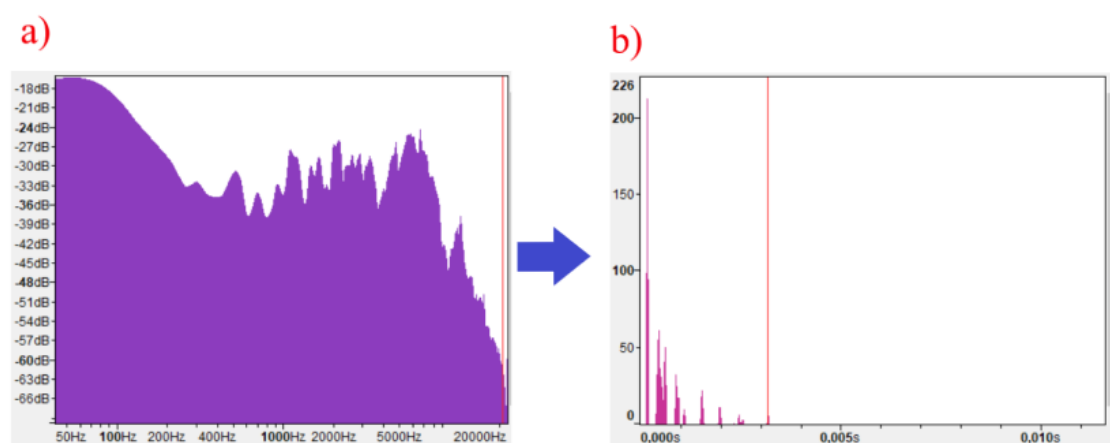
7.4. Ispitivanje buke

Ispitivanje buke je provedeno pri brzinama vrtnje ležaja od 950, 1215 i 2280 o/min. Za snimanje buke igličastog ležaja korišten je mikروفон povezan s prijenosnim računalom. Analiza buke provedena je pomoću računalnog programa „Audacity“, namijenjenog za snimanje i obradu audio podataka. Slika 49 prikazuje primjer zvučnog zapisa rotacije ležaja.



Slika 49. Zvučni zapis rotacije ležaja

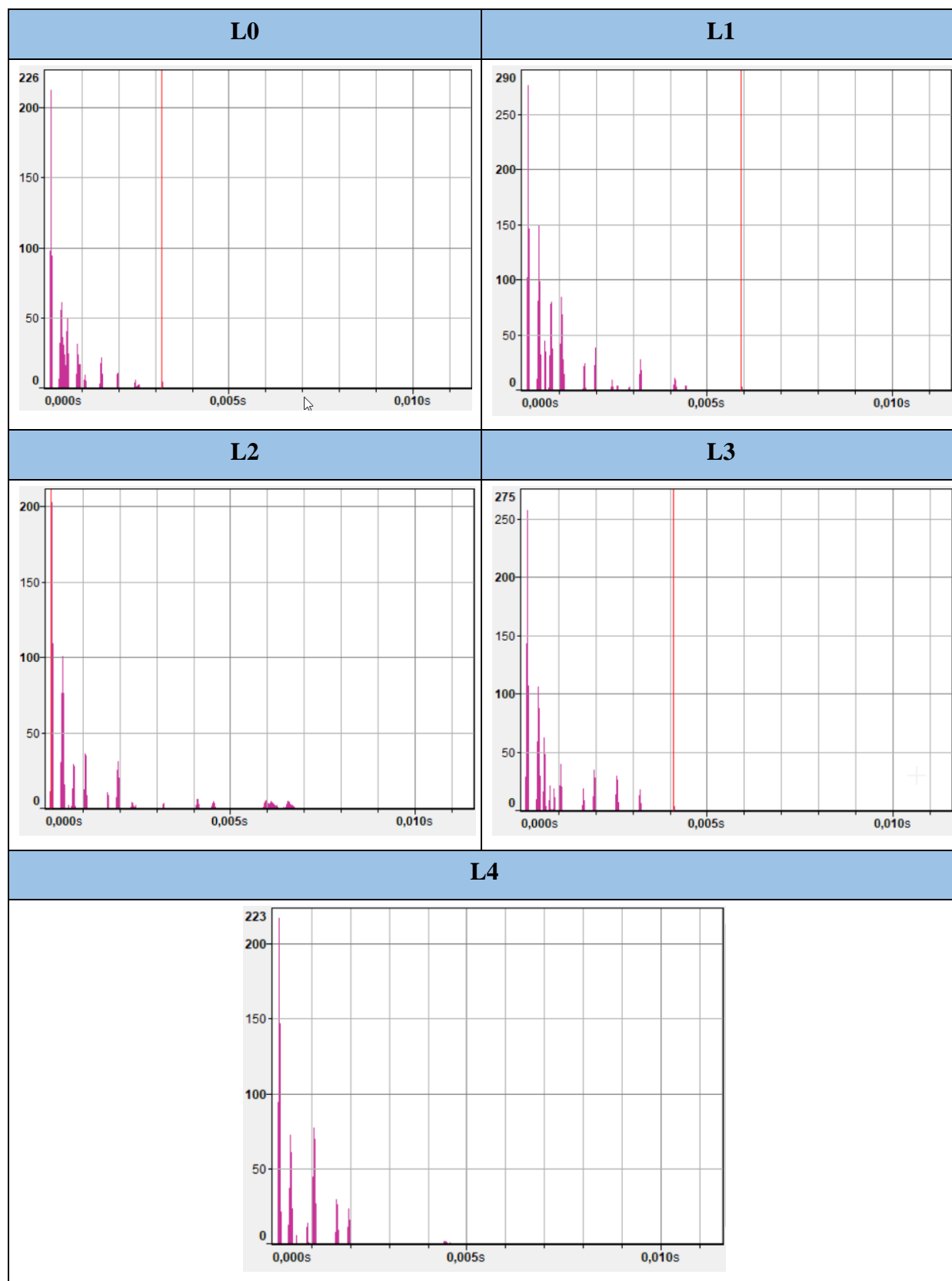
Računalni program „Audacity“ omogućuje analizu zvučnog zapisa preko prikaza intenziteta zvuka u ovisnosti o frekvenciji zvuka (tz. dB/Hz dijagram). Osim toga, program omogućuje i spektralnu analizu buke kojom se zvučni signal razlaže na sastavne frekvencije pomoću algoritma brze Fourierove transformacije (eng. *Fast Fourier Transformation, FFT*) [Slika 50].



Slika 50. Analiza buke rada ležaja: a) graf dB/Hz, b) FFT spektar

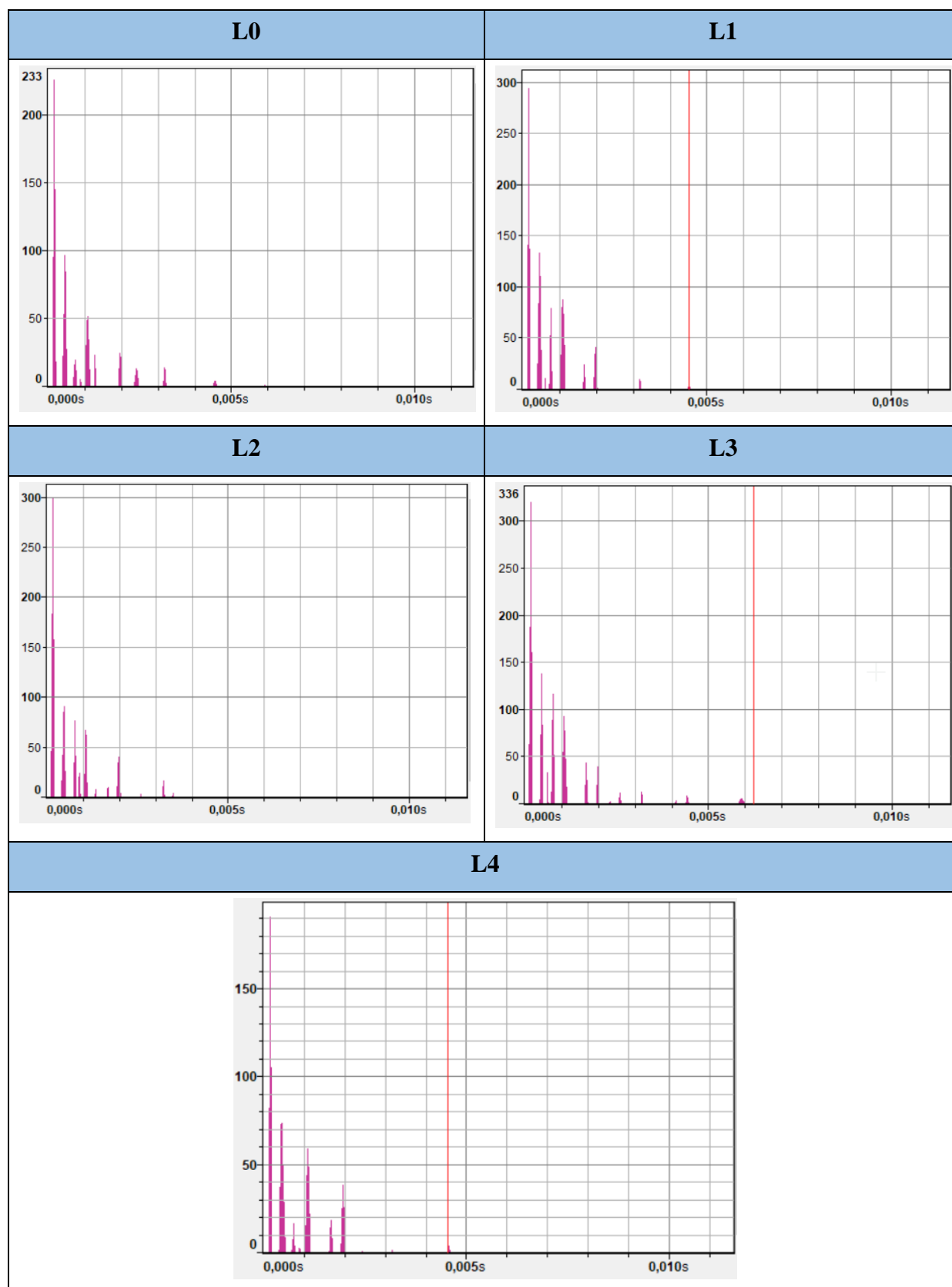
Postupak spektralne analize primijenjen je na sve snimljene zvučne zapise rotacije ležaja. U prikazu spektra frekvencija interval od 20 Hz do 20 kHz podijeljen je 1024 podintervala u kojima su metodom FFT određene srednje vrijednosti frekvencija prema algoritmu poboljšane autokorelacije (eng. *Enhanced Autocorrelation*) s Hamming funkcijom analize zvučnog signala. Tablica 15 prikazuje spektre frekvencija buke koja nastaje prilikom rada ležaja s polaznim unutarnjim prstenom te nitriranim unutarnjim prstenovima pri brzini vrtnje od 950 o/min.

Tablica 15. Usporedba spektra frekvencije buke pri brzini vrtnje od 950 o/min



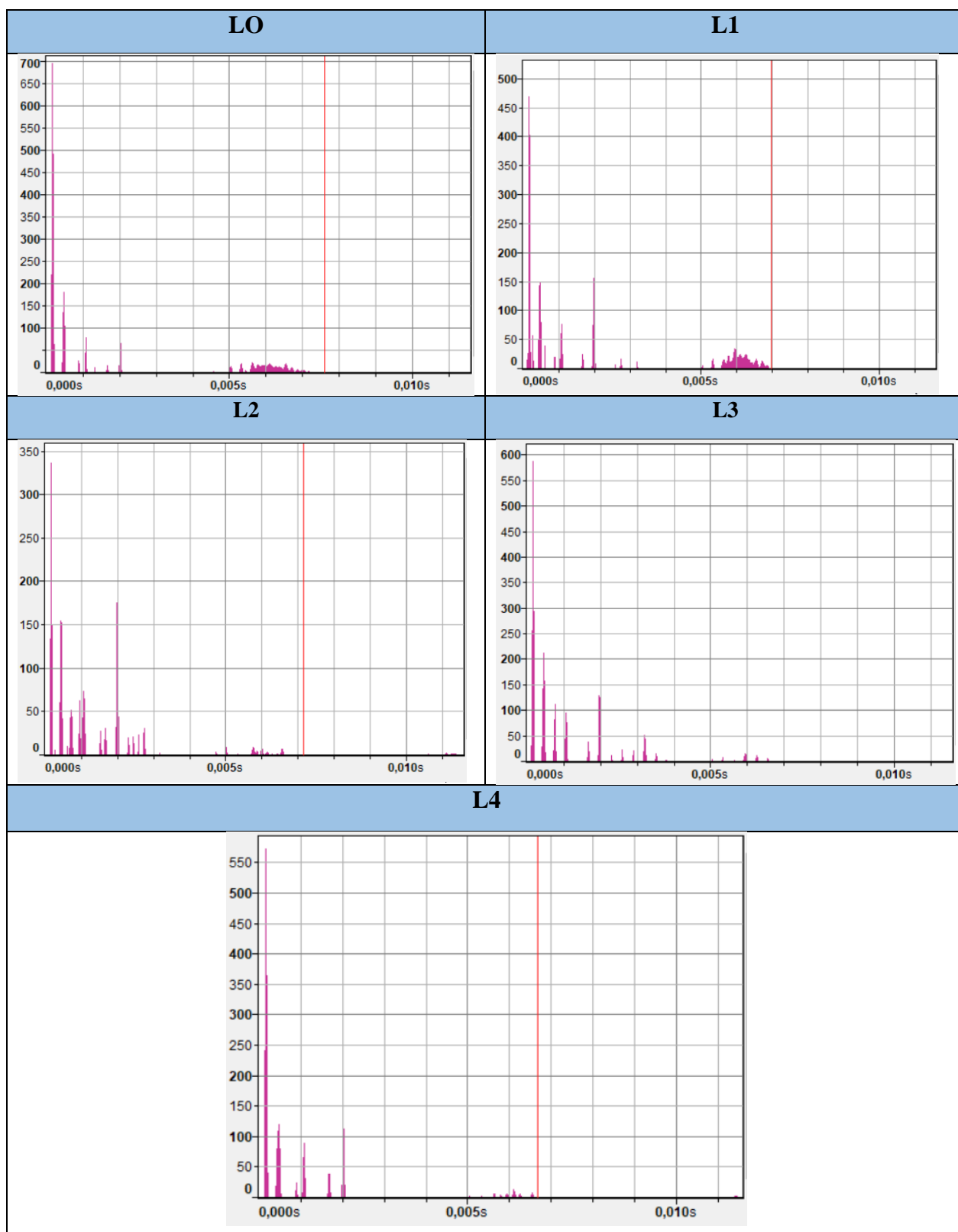
Tablica 16 prikazuje spektre frekvencija buke pri brzini vrtnje od 1215 o/min.

Tablica 16. Usporedba spektra frekvencije buke pri brzini vrtnje od 1215 o/min



Tablica 17 prikazuje spektre frekvencija buke pri brzini vrtnje od 2280 o/min.

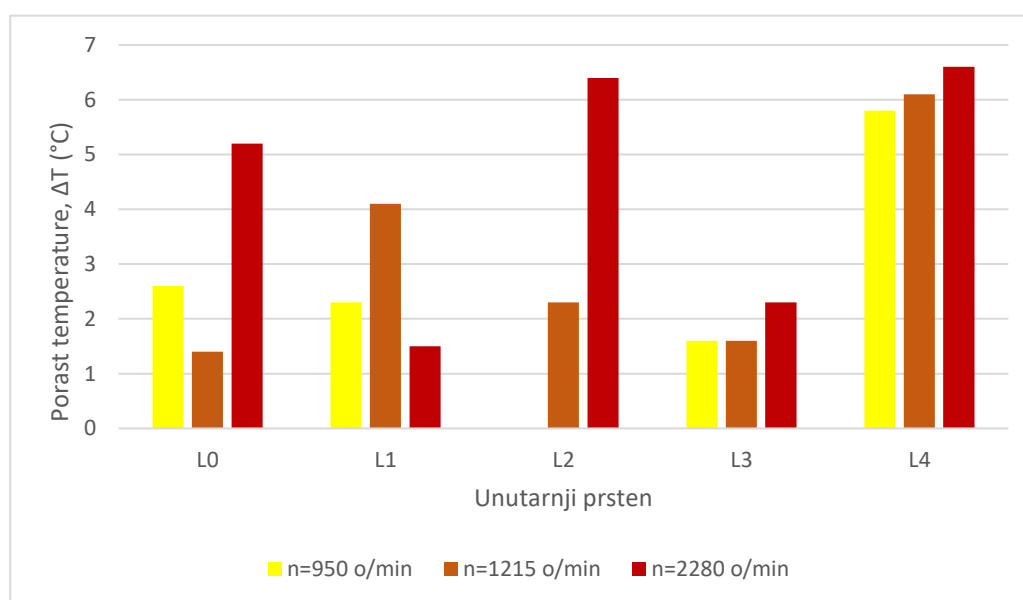
Tablica 17. Usporedba spektra frekvencija buke pri brzini vrtnje od 2280 o/min



Analizom spektara frekvencija zvučnih signala uočeno je da se osim karakterističnih frekvencija koje nastaju uslijed rada ležaja, tijekom vremena i porastom brzine vrtnje pojavljuju i frekvencije niskog iznosa koje nastaju uslijed udaraca valjnih tijela u unutrašnji ili vanjski prsten.

7.5. Zagrijavanje ležaja

Mjerenje porasta temperature uslijed zagrijavanja ležaja s unutarnjim modificiranim prstenovima provedeno je pomoću dvokanalnog kontaktnog termometra [Slika 35]. Slika 51 prikazuje histogram vrijednosti porasta temperature ležaja pri različitim brzinama vrtnje ležaja nakon 5 min ispitivanja bez podmazivanja.

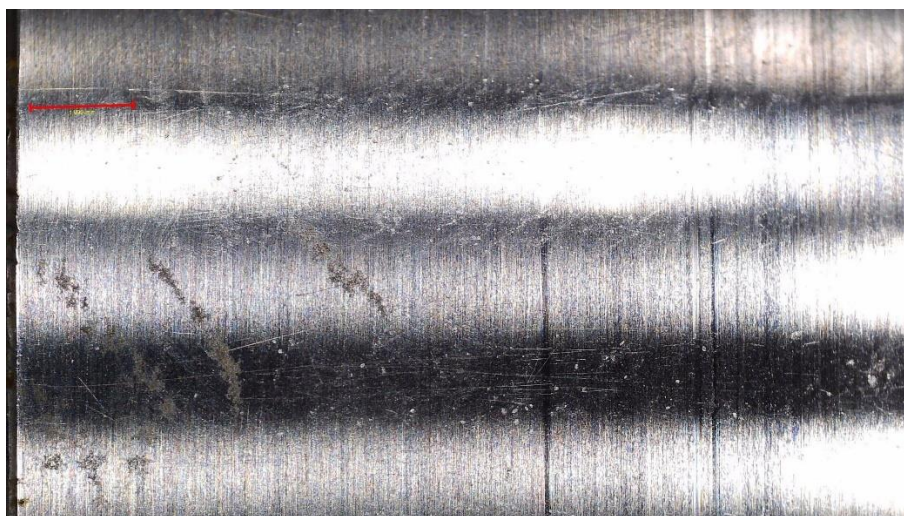


Slika 51. Porast temperature ispitivanih ležajeva nakon 5 min vrtnje bez podmazivanja

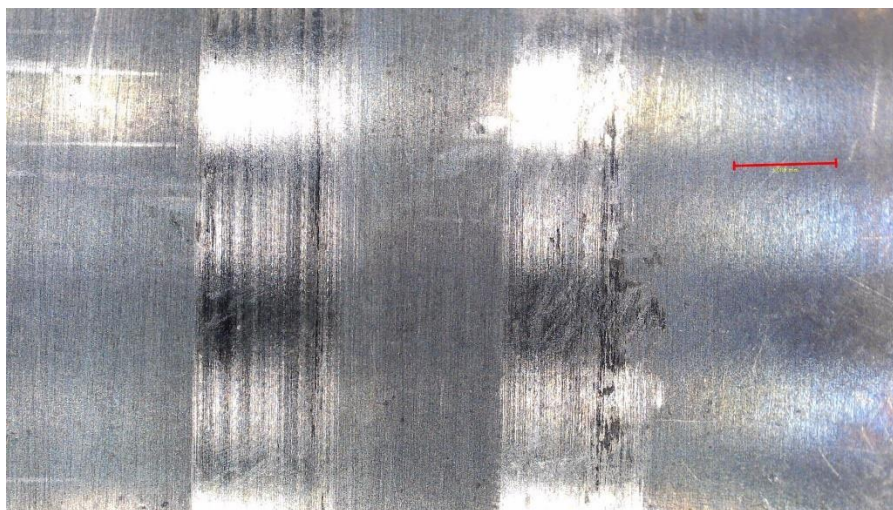
Najveći prirast temperature pri svim brzinama vrtnje ležaja bilježi uzorak L4. Najmanji prirast temperature pri brzinama od 950 o/min i 1215 o/min postignut je na uzorku L3, dok najmanji prirast temperature pri 2280 o/min postignut na uzorku L1. Porast temperature ležaja posljedica je rada sile trenja između valjnih tijela, prstenova i kaveza ležaja. Veći porast temperature posljedica je pojave većeg kinematičkog trenja u ležaju.

7.6. Analiza trošenja prstenova

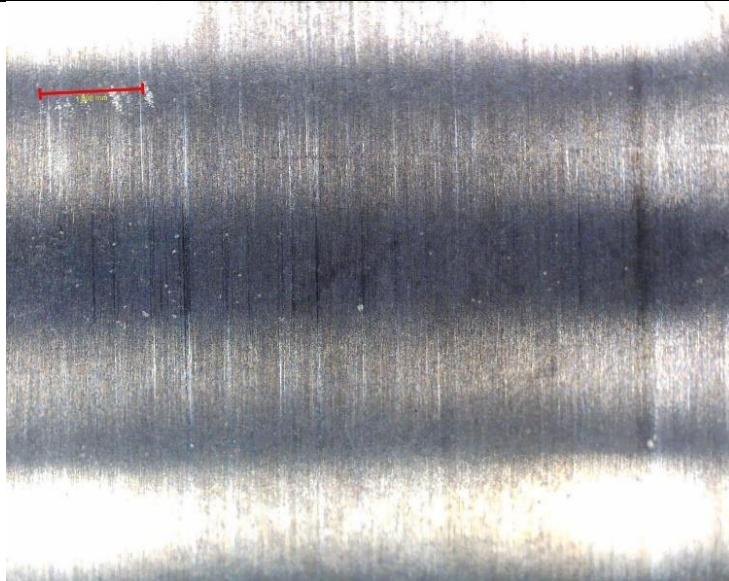
Budući da su ispitivanja vibracije, buke i temperature igličastih ležajeva provedena u uvjetima bez podmazivanja, nakon provedenih ispitivanja su se pojavili tragovi trošenja na unutarnjim prstenovima. Trošenje unutarnjih prstenova uzrokovano je adhezijom, abrazijom i umorom površine. Tragovi trošenja snimljeni su pomoću svjetlosnog mikroskopa [Slika 36]. Na slikama 52 do 56 prikazane su površine unutrašnjeg prstena nakon ukupno 15 min trošenja na 945 o/min / 5 min, 1215 o/min / 5 min i 2280 o/min / 5 min.



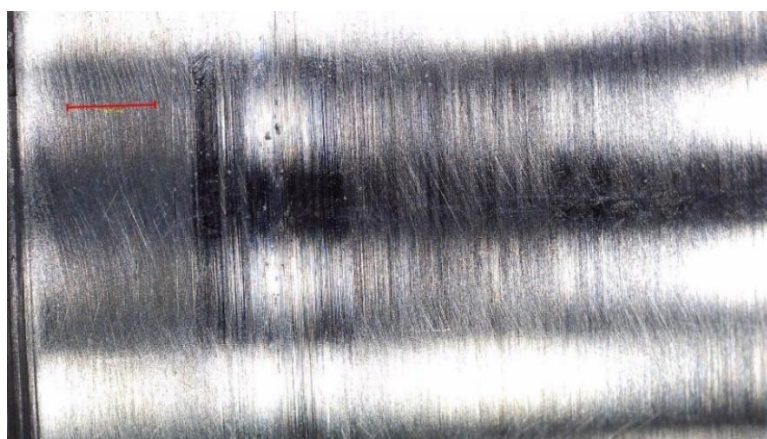
Slika 52. Tragovi trošenja unutarnjeg prstena L0



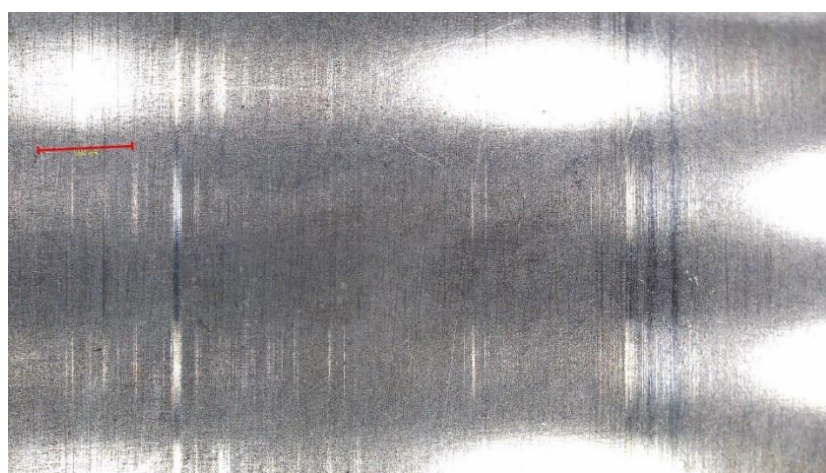
Slika 53. Tragovi trošenja unutarnjeg prstena L1



Slika 54. Tragovi trošenja unutarnjeg prstena L2



Slika 55. Tragovi trošenja unutarnjeg prstena L3



Slika 56. Tragovi trošenja unutarnjeg prstena L4

7.7. Diskusija rezultata

Cilj ispitivanja bio je analizirati utjecaj nitriranja unutarnjih prstenova na radne karakteristike igličastog ležaja.

Iz rezultata ispitivanja tvrdoće unutrašnjih prstenova uočava se da je nakon nitriranja u plazmi na 480 °C i 500 °C te nitriranja u solnoj kupci na 580 °C došlo do pojave visokotemperaturnog popuštanja i smanjenja tvrdoće čelika 100Cr6 koji je u nemodificiranom ležaju u kaljenom i niskopopuštenom stanju.. Vrijednost tvrdoće uzorka L2 (nitriranog u plazmi na 480 °C) smanjila se za 12,6 %. Vrijednost tvrdoće uzorka L3 (nitriranog u plazmi na 500 °C) se smanjila za 11,17 %, a vrijednost tvrdoće uzorka L4 (nitriranog u solnoj kupci na 580 °C, ujedno i najvećoj temperaturi) se smanjila za 35,92 %. Povoljna posljedica primjene nitriranja je da se visokotemperaturnim popuštanjem povećala žilavost i duktilnost čelika 100Cr6.

U usporedbi s nemodificiranim unutarnjim prstenom, vrijednosti parametara površinske hrapavosti su se povećale kod svih nitriranih prstenova. Unutarnji prsten nitrokarburiran u solnoj kupci (oznake L4) pokazao je najveće vrijednosti parametara površinske hrapavosti zbog stvaranja porozne zone spojeva. U usporedbi s polaznim prstenom, vrijednost parametra R_a uzorka L4 povećala se 9,14 puta. Ostali unutarnji prstenovi nitrirani u plazmi pokazali su beznačajno povećanje parametara površinske hrapavosti. Vrijednosti parametara površinske hrapavosti također su se promijenile tijekom ispitivanja vibracija, buke i zagrijavanja ležaja zbog karakterističnih radnih uvjeta (vrtnja bez podmazivanja). Uslijed ugaćavanja površina, vrijednost parametra R_a uzorka L4 se smanjila za 82,8 %.

Ispitivanjem vibracija, buke i zagrijavanje analiziran je utjecaj nitriranja na radne karakteristike igličastog ležaja. Najveći pomak i amplitudu vibracija ležaja pri brzini od 950 o/min pokazao je uzorak L4 (nitrokarburiran u solnoj kupci) zbog stvaranja porozne zone spojeva i visokih vrijednosti parametara površinske hrapavosti, dok ostali prstenovi pokazuju podjednake iznose pomaka vibracija. Najmirniji rad, odnosno najmanju srednju vrijednost pomaka vibracija pri brzini vrtnje od 1215 o/min pokazao je uzorak L3, a pri brzini vrtnje od 2280 o/min relativno jednake iznose pomaka vibracije bilježe uzorci L3 i L1. Kod uzorka L4 (nitrokarburiranog u solnoj kupci) zabilježena je najmanja srednja vrijednost ubrzanja vibracija pri svim brzinama. Vrijednosti srednjih frekvencija vibracija s najvećim amplitudom se povećavaju s brzinom vrtnje ležaja.

Analizom spektara frekvencija zvučnih signala pri različitim brzinama vrtnje uočeno je da se osim karakterističnih frekvencija koje nastaju uslijed vrtnje ležaja, s vremenom i rastom brzine vrtnje pojavljuju i frekvencije niskog iznosa.

Snimanjem unutarnjih prstenova pomoću svjetlosnog mikroskopa uočeni su tragovi trošenja adhezijom (zbog klizanja iglica po unutarnjem prstenu) i umorom površine (zbog dinamičkog opterećenja površine unutarnjeg prstena). Umor površine najviše je zastupljen kod polaznog prstena (oznake L0). U manjoj mjeri je vidljivo djelovanje i abrazijskog mehanizma trošenja kod svih prstenova.

8. ZAKLJUČAK

U teorijskom dijelu rada opisane su konstrukcijske značajke valjnih igličastih ležajeva. Odabir materijala za izradu ležaja ovisi o radnim uvjetima, a najzastupljeniji čelik u velikoserijskoj proizvodnji valjnih ležajeva je čelik 100Cr6. Ležajevi su prilikom eksploatacije izloženi različitim mehanizmima trošenja, prvenstveno umoru materijala, a različita oštećenja i kvarovi mogu se otkriti mjerenjem vibracija, buke i zagrijavanja ležaja.

Na temelju provedenih ispitivanja nitriranih unutarnjih prstenova, koja obuhvaćaju ispitivanje tvrdoće, hrapavosti te vibracija, buke i zagrijavanja ležaja donose se sljedeći zaključci:

- Prilikom nitriranja unutarnjih prstenova pri višim temperaturama (iznad 400 °C) dolazi do pojave visoko temperaturnog popuštanja i smanjenja tvrdoće uz povećanje žilavosti čelika 100Cr6.
- Nitriranjem unutarnjih prstenova dolazi do povećanja površinske hrapavosti, a najveći prirast vrijednosti parametara površinske hrapavosti je kod postupka nitrokarburiranja u solnoj kupci zbog stvaranja porozne zone spojeva.
- Parametri površinske hrapavosti utječu na parametre vibracija ležaja (pomak vibracija, brzinu i ubrzanje) kao i na buku i zagrijavanje ležaja.
- Nakon ispitivanja vrtnje igličastih ležajeva na 945 o/min, 1215 o/min i 2280 o/min u ukupnom trajanju od 15 min bez podmazivanja na površini unutrašnjeg prstena uočeno je trošenje adhezijom i umorom površine uz tragove slabe abrazije.

Kao optimalna toplinska obrada unutrašnjih prstenova, koja će omogućiti rad igličastih ležajeva sa smanjenim vibracijama, bukom i trenjem, preporučuje se nitriranje u plazmi na temperaturi od 500 °C u trajanju od 4 h.

U nastavku istraživanja utjecaja postupka nitriranja na vibracijske karakteristike ležaja preporučuje se provedba ispitivanja utjecaja parametara nitriranja te izbora i viskoznosti maziva na parametre vibracija i zagrijavanje ležaja.

LITERATURA

- [1] Jelaska D.: Elementi strojeva, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Splitu, Split, 2005.
- [2] NTN, Ball and Roller Bearings, Cat.No. 2200-E
- [3] Decker, K. H.: Elementi strojeva, Tehnička knjiga Zagreb, 1975.
- [4] NTN, Needle Roller Bearings, Cat.No. 2300-X/E (<https://www.ntnglobal.com/en/products/catalog/en/2300/index.html>)
- [5] Qiu M., Chen L., Li Y., Yan J.: Bearing Tribology Principles and Applications, Springer & National Defense Industry Press, Luoyang, 2015.
- [6] Bhadeshia H.K.D.H.: Steels for bearings. Vol. 57, Progress in Materials Science. 2012. p. 268–435. doi: 10.1016/j.pmatsci.2011.06.002
- [7] Landek D.: Predavanja iz kolegija „Posebni metalni materijali“, „Alatni materijali“, autorizirana predavanja. Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 2020.
- [8] <https://www.ausasteel.com/en/steels/special-steels/bearing-steels/bearing-steel-100cr6/> (pristupljeno 8.3.2024.)
- [9] Rede, V.: Nehrđajući čelici, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [10] Pye, D.: Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing, ASM International, Ohio, 2003.
- [11] Aghajani, H. Behrangi, S.: Plasma Nitriding of Steel, Springer
- [12] Cajner, F., Landek, D., Šolić, S.: Karakterizacija nitrokarburiranog sloja, Zbornik radova, Zagreb, 2006.
- [13] SKF Reliability Systems, Vibration Diagnostic Guide (<https://skftechnicalsupport.zendesk.com/hc/en-us/articles/360033182914-Vibration-Diagnostic-Guide>)
- [14] Lacey J.: An Overview of Bearing Vibration Analysis, FAG.
- [15] <https://www.motion.com/products/sku/09328407> (pristupljeno 10.6.2024.)
- [16] <https://www.checkline.eu/prod/surface-roughness-testers/t-3200> (pristupljeno 10.6.2024.)
- [17] <https://www.omniinstruments.co.uk/vm-6360-hand-held-vibration-meter.html> (pristupljeno 10.6.2024.)
- [18] <https://meters.uni-trend.com/product/ut320-series/> (pristupljeno 11.6.2024.)

-
- [19] <https://www.galaxus.ch/en/s5/product/toolcraft-digitale-mikroskopkamera-digimicro-profi-microscopes-9463189> (pristupljeno 12.6.2024.)

PRILOZI

1. CD-R disk
2. Rezultati mjerenja tvrdoće unutarnjih prstenova (HV0,5)
3. Rezultati mjerenja zagrijavanja ležaja

Prilog 2. Rezultati mjerenja tvrdoće unutarnjih prstenova (HV0,5)

Redni broj mjerenja	L0	L1	L2	L3	L4
1.	784	759	640	706	487
2.	784	769	693	690	499
3.	772	782	685	659	500
4.	772	788	685	685	494
5.	754	818	674	694	497
\bar{x}	773,2	783,2	675,4	686,8	495,4

Prilog 3. Rezultati mjerenja zagrijavanja ležaja

Brzina vrtnje, o/min	Temperatura	L0	L1	L2	L3	L4
950	T_0	24,7	21,0	22,8	25,5	22,3
	T_k	27,3	23,3	*	27,1	28,1
1215	T_0	24,1	22,5	21,7	24,0	22,3
	T_k	25,5	26,6	24,0	25,7	28,4
2280	T_0	22,7	25,7	25,8	25,0	24,5
	T_k	27,9	27,2	32,2	27,3	31,1