

# Određivanje vibracija i zagrijavanja nitriranog igličastog ležaja

---

**Brkić, Ivan**

**Undergraduate thesis / Završni 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:235:673922>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-28**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Ivan Brkić

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Ivan Brkić

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 na konstantnoj pomoći i savjetima tijekom izrade ovoga rada.

Također se zahvaljujem obitelji i prijateljima na velikoj podršci tijekom studiranja.

Ivan Brkić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Brkić** JMBAG: **0035228062**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Određivanje vibracija i zagrijavanja nitriranog igličastog ležaja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Determination of vibration and heating of nitrided needle bearing**

Opis zadatka:

Zbog malog faktora trenja, male potrebe za mazivom, malog ugradbenog prostora i mirnog rada s velikim radijalnim opterećenjem igličasti ležaji često se koriste kao zamjena za ostale radijalno opterećene valjne ili klizne ležaje. Dodano povišenje nosivosti, smanjenje trenja i vibracija igličastih ležaja moguće je postići primjenom nitriranja unutrašnjeg prstena ležaja. U radu treba opisati svojstva i toplinsku obradu čelika za ležajeve i konstrukcijske karakteristike igličastih ležaja.

U eksperimentalnom dijelu rada treba izmjeriti vibracije i temperaturno polje u izabranom igličastom ležaju za tri brzine vrtnje, sa i bez primjene nitriranja. Na temelju analize vibracija i temperature odrediti utjecaj nitriranja unutrašnjeg prstena na rad ležaja.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.  
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.  
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. - 1. 3. 2024.  
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.  
3. rok: 23. 9. - 27. 9. 2024.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY (prevesti korigirani tekst iz HRV sažetka na ENG) .....	VII
1. UVOD.....	1
2. VALJNI I IGLIČASTI LEŽAJEVI .....	3
2.1. Postupci izrade valjnih ležaja.....	5
2.2. Označavanje valjnih ležajeva .....	6
2.3. Igličasti ležajevi.....	6
2.3. Čelici za valjne i igličaste ležajeve .....	8
2. NITRIRANJE I NITROKARBURIRANJE .....	10
3.1. Plinsko nitriranje .....	12
3. KARAKTERIZACIJA NITRIRANE POVRŠINE .....	18
3.1. Hrapavost površine .....	18
3.2. Mjerenje temperature zagrijavanja ležaja .....	20
3.3. Vibracije i buka u ležajevima.....	21
4. PLAN I PROVEDBA ISPITIVANJA .....	24
4.1. Plan pokusa .....	24
4.2. Postupak nitriranja unutrašnjih prstenova.....	24
5. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA.....	27
5.1. Hrapavost prstenova prije i poslije pokusa .....	27
5.2. Analiza trošenja površine.....	31
5.3. Mjerenje vibracija ležajeva .....	36
5.4. Mjerenje buke ležaja .....	40
5.5. Mjerenje zagrijavanja ležajeva.....	44
5.6. Diskusija rezultata.....	47
6. ZAKLJUČAK.....	49
LITERATURA.....	50

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Presjek radijalnog kugličnog ležaja [3].....	3
Slika 2. Aksijalni kuglični ležaj [4].....	4
Slika 3. Podjela valjnih ležaja prema obliku valjnih elemenata: a) kuglični, b) valjkasti, c) igličasti ležaj [1] .....	5
Slika 4. Podjela standardnih igličastih ležajeva [6].....	7
Slika 5. Igličasti ležaj bez kaveza: a) s oba prstena, b) bez prstena [5] .....	8
Slika 6. Igličasti ležaj s kavezom [5].....	8
Slika 7. Podloge za pripremu toplinske obrade čelika za ležajeve: a) kontinuirani TTT dijagram, b) dijagram popuštanja [14] .....	9
Slika 8. Izgled nitriranog sloja [14].....	10
Slika 9. Karakterizacija nitriranog sloja .....	11
Slika 10. Postrojenje za nitriranje u plinu [10].....	13
Slika 11. Mikrostruktura čelika X35CrWMoV5 nitrokarburiranog u plinu [12].....	13
Slika 12. Nitrokarburirani površinski sloj na čelicima H13 (X35CrWMoV5), SS304 (X5CrNi18-10) i M2 (S 6- 5-2) [11] .....	14
Slika 13. Mikrostruktura nitrokarburiranog čelika C15 hlađenog: a) u ulju; b) na zraku [12] .....	15
Slika 14. Moguće strukture zone spojeva nakon nitriranja u plazmi [14].....	16
Slika 15. Prikaz peći za nitriranje u plazmi [14] .....	17
Slika 16. Stupnjevi i razredi hrapavosti površina [15] .....	18
Slika 17. šest različitih profila hrapavosti sa istim Ra [16].....	19
Slika 18. Područje optimalne radne temperature ležaja [18] .....	20
Slika 19. Unutrašnji prsten igličastog ležaja u polaznom stanju.....	24
Slika 20. Peć za nitriranje u plazmi Rubig PN 70/90.....	24
Slika 21. Prsten prije postupka nitriranja u plazmi .....	25
Slika 22. Prsten nakon nitriranja u plazmi .....	25
Slika 23. Ispitni uzorci prstenova igličastog ležaja .....	26
Slika 24. Prijenosni uređaj za mjerenje hrapavosti TR 3202 .....	27
Slika 25. Postav za mjerenje hrapavosti .....	27
Slika 26. Histogram vrijednosti hrapavosti prstena prije i nakon trošenja u trajanju od 3 min .....	28
Slika 27. Profil hrapavosti površine prstena A1 .....	29
Slika 28. Profil hrapavosti površine prstena A2.....	29
Slika 29. Profil hrapavosti površine prstena B1 .....	30
Slika 30. Profil hrapavosti površine prstena B2 .....	30
Slika 31. Profil hrapavosti površine prstena C1 .....	31
Slika 32. Profil hrapavosti površine prstena C2 .....	31
Slika 33. Mikroskopska kamera Digimicro profi .....	32
Slika 34. Kalibracija kamere prije korištenja .....	32
Slika 35. Površina prstena A1 .....	33
Slika 36. Površina prstena A2 .....	33
Slika 37. Površina prsten B1 .....	34
Slika 38. Površina prstena B2 .....	34
Slika 39. Površina prstena C1 .....	35
Slika 40. Površina prstena C2 .....	35
Slika 41. Mjerač vibracija VM-6360.....	36
Slika 42. Sonda za mjerenje vibracija spojena na vanjski prsten ležaja .....	36
Slika 43. Bušilica Proxxon za pogon ležaja zadanim brzinama vrtnje .....	37
Slika 44. Akceleracija vibracija igličastog ležaja ovisna o brzini vrtnje .....	38
Slika 45. Pomak vibracija igličastog ležaja ovisna o brzini vrtnje.....	39

---

Slika 46. Mikrofon .....	40
Slika 47. Postav za snimanje buke i vibracija igličastog ležaja .....	40
Slika 48. Termovizijska kamera.....	44



---

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Vrijednosti hrapavosti prstena prije i poslije trošenja .....	28
Tablica 2. Srednja vrijednost akceleracije vibracija igličastih ležaja.....	37
Tablica 3. Srednja vrijednost pomaka vibracija igličastih ležaja .....	38
Tablica 4. Buka igličastih ležajeva pri brzini vrtnje 950 o/min .....	41
Tablica 5. Buka igličastih ležajeva pri brzini vrtnje 1025 o/min .....	42
Tablica 6. Buka igličastih ležajeva pri brzini vrtnje 1215 o/min .....	43
Tablica 7. Temperature ležajeva pri zadanim okretajima .....	44
Tablica 8. Fotografije termovizijske kamere pri brzini vrtnje ležaja od 950 o/min.....	45
Tablica 9. Fotografije termovizijske kamere pri brzini vrtnje ležaja od 1025 o/min.....	45
Tablica 10. Fotografije termovizijske kamere pri brzini vrtnje ležaja od 1215 o/min.....	46

**POPIS OZNAKA**

---

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
N <sub>2</sub>	-	dušik
NH <sub>3</sub>	-	amonijak
CO <sub>2</sub>	-	ugljkov dioksid
Cr	-	krom

---

**SAŽETAK**

U teorijskom dijelu rada opisani su igličasti ležaji, njihove karakteristike, postupci nitriranja prestena ležaja te metode ispitivanja hrapavosti površine, mjerenje temperature i vibracija ležaja. U eksperimentalnom dijelu provedeno je nitriranje unutarnjeg prstena igličastog ležaja od čelika 100Cr6 u plazmi  $N_2+H_2$  i nitrokarburiranje u solnoj kupci TENIFER. Provedeno je ispitivanje hrapavosti površina nenitriranog i nitriranih prstenova koje je pokazalo povećanje hrapavosti primjenom nitrokarburiranja u solnoj kupci, dok nitriranje u plazmi nije značajnije utjecalo na hrapavost površine. Nenitrirani i nitrirani prstenovi izloženi su vrtnji u igličastom ležaju bez opterećenja, pri brzinama  $950 \text{ min}^{-1}$ ,  $1025 \text{ min}^{-1}$  i  $1215 \text{ min}^{-1}$  u trajanju od 1 min, bez podmazivanja. Tijekom rotacije igličastih ležaja provedena su mjerenja vibracija, buke i temperaturnog polja ležaja. Iz provedenih ispitivanja, može se zaključiti da unutarnji prsteni nitrirani u plazmi te prsteni nitrokarburirani postupkom TENIFER, imaju bolja svojstva nego prsten u polaznom stanju, odnosno manje se zagrijavaju, imaju manji nivo buke i amplitudu vibracija.

Ključne riječi: igličasti ležaj, 100Cr6, prsten, nitriranje, površina, TENIFER, temperatura, vibracije.

---

**SUMMARY**

In the theoretical part of the work, needle bearings, their characteristics, nitriding procedures of the bearing rings and methods of testing the surface roughness, measuring the temperature and vibration of the bearing are described. In the experimental part, nitriding of the inner ring of the needle bearing made of 100Cr6 steel in N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub> plasma and nitrocarburizing in the TENIFER salt bath were carried out. The surface roughness of non-nitrided and nitrided rings was tested, which showed an increase in roughness with the use of nitrocarburized in salt water, while nitriding in plasma did not significantly affect the surface roughness. Non-nitrided and nitrided rings are exposed to rotation in a needle bearing without load, at speeds of 950 min<sup>-1</sup>, 1025 min<sup>-1</sup> and 1215 min<sup>-1</sup> for 1 min, without lubrication. During the rotation of the needle bearings, measurements of vibrations, noise and the temperature field of the bearing were carried out. From the conducted tests, it can be concluded that inner rings nitrided in plasma and rings nitrocarburized by the TENIFER process have better properties than the ring in its initial state, i.e. they heat up less, have a lower noise level and vibration amplitude.

Key words: needle bearing, 100Cr6, ring, nitriding, surface, TENIFER, temperature, vibrations.

## 1. UVOD

Ležaj je strojni dio koji se koristi za nošenje, vođenje ili oslanjanje pokretnih dijelova ( npr. osovine, vratila) na mirujuće dijelove (npr. postolja, kućišta.) Osim prenošenja sila, osnovna mu je zadaća smanjivanje trenja između strojnih dijelova. Ležajevi se prema načinu rada dijele na klizne i kotrljajuće (valjne) ležajeve. Ispravan rad ležajeva je od presudnog značenja za ispravan rad i vijek trajanja strojeva i naprava. Valjni ležaj omogućuje vođenje pokretnih strojnih dijelova, umetnutih u odgovarajuće kućište. Sastavljeni su od unutarnjeg i vanjskog prstena, između kojih se u kavezu vrte valjna tijela, uz dominantno djelovanje trenja valjanja i manji utjecaj trenja klizanja. [1] Smanjenje trenja i trošenja valjnih površina ležaja moguće je postići primjenom triboloških prevlaka i slojeva. Jedna od industrijski najperspektivnijih skupina postupaka za ovu namjenu je nitriranje i nitrokarburiranje.

Nitriranje je toplinsko-kemijski proces u kojem se površina željeznog materijala obogaćuje slojem dušika, pri čemu se stvara difuzijska zona u površinskom sloju i zona spojeva (željeznih nitrida) na površini obratka. U difuzijskoj zoni dušik je intersticijski otopljen u matrici željeza do granice topljivosti od 2,5% masenog udjela dušika. Kemijskim vezanjem atoma dušika s atomima željeza u udjelima većim od 2,5 % N, nastaje jednofazni ili višefazni nitridni sloj. Nitriranje se provodi na temperaturama između 400 °C do 600 °C. Dobro proveden proces nitriranja ne osigurava samo izvrsnu površinsku zaštitu od korozije, nego poboljšava i dinamičke karakteristike te materijalu daje vrlo dobru zaštitu od trošenja i umora. [2]

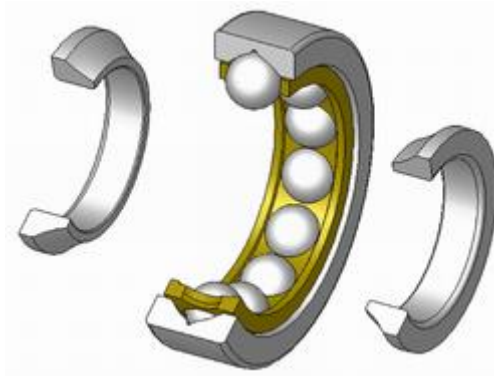
U eksperimentalnom dijelu rada, usporedit će se pojava vibracija, temperaturno polje i buka igličastih ležaja za tri brzine vrtnje, sa i bez primjene nitriranja.

# **TEORIJSKI DIO**

## 2. VALJNI I IGLIČASTI LEŽAJEVI

Valjni, odnosno kotrljajući ležajevi su strojni dijelovi koji omogućuju vođenje pokretnih strojnih dijelova, umetnutih u odgovarajuće kućište. Sastoje se od dva prstena (unutrašnjeg i vanjskog) između kojih se u odgovarajuće oblikovanom kavezu vrte valjna tijela. Među valjnim tijelima prevladava trenje valjanja. Valjni ležajevi mogu istodobno prenositi radijalno i aksijalno opterećenje, samo radijalno ili samo aksijalno opterećenje. S obzirom na opterećenje koje prevladava, razlikuju se radijalni i aksijalni valjni ležajevi. Valjna tijela su jednostavnih oblika i nalaze se u kavezu koji onemogućuje njihov međusobni dodir.

Glavna zadaća radijalnih valjnih ležajeva je prenošenje radijalnih opterećenja. Neke izvedbe također mogu prenositi i manja aksijalna opterećenja. Međusobno se razlikuju ponajviše prema izvedbi oblika valjnih tijela. Tako se u praksi najčešće upotrebljavaju kuglični ležajevi (valjna tijela su kuglice.) Na slici 1. prikazan je presjek radijalnog kugličnog ležaja gdje se dodir valjnih tijela ostvaruje s 4 točke.



**Slika 1. Presjek radijalnog kugličnog ležaja [3]**

Aksijalni ležajevi uglavnom prenose samo velika aksijalna opterećenja. Također se, kao i radijalni valjni ležajevi, razlikuju po obliku valjnih tijela. Na slici 2. prikazan je aksijalni kuglični jednostrani ležaj.



Slika 2. Aksijalni kuglični ležaj [4]

Neki od razloga upotrebe valjnih ležajeva su [3]:

- mali koeficijent trenja zbog valjanja,
- velika nosivost pri malim dimenzijama,
- manje zagrijavanje,
- manji gubitci snage,
- mala zračnost među valjnim elementima,
- ne zahtjevno održavanje.

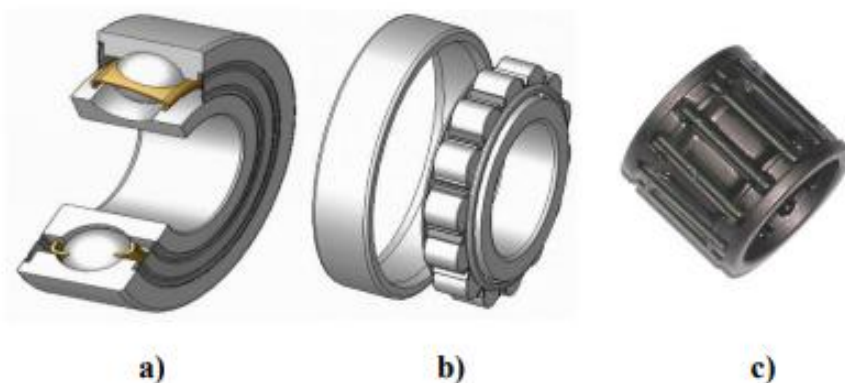
Glavni nedostaci valjnih ležajeva su [3]:

- osjetljivost na udarna opterećenja,
- visoka cijena,
- u slučaju kvara treba zamijeniti cijeli ležaj,
- mala otpornost na mehaničke vibracije.

Otpori pri trenju valjanja su puno manji od onih pri trenju klizanja, jer se teorijski dodir površina u kretanju svodi na točke, ako su valjni elementi kuglice, odnosno na izvodnice ako su valjni elementi iglice, stošci, valjci ili bačvoliki elementi. Navedena predodžba vrijedi samo za idealno kruta tijela bez pojave deformacije. U realnim uvjetima rada valjnih ležaja neizbježno se pojavljuje trenje valjanja, koje je dosta manje nego kog kliznih ležajeva. [5]



Uz maloprije spomenutu podjelu na radijalne i aksijalne ležajeve, valjni ležaji se mogu podijeliti i prema obliku valjnih elemenata. Tako razlikujemo: kuglične, valjkaste i igličaste valjne ležajeve. Navedena podjela je vidljiva na slici 3.



**Slika 3. Podjela valjnih ležaja prema obliku valjnih elemenata: a) kuglični, b) valjkasti, c) igličasti ležaj [1]**

## 2.1. Postupci izrade valjnih ležaja

Pri izradi i konstrukciji ležajeva, teži se tome da izdrže što veća statička i ciklička opterećenja u eksploatacijskim uvjetima. Proces proizvodnje kuglica, iglica i ostalih valjnih elemenata se sastoji od plastične deformacije sirovog, lijevanog materijala u trupce kvadratnog presjeka. Ona pomaže u razbijanju struktura lijeva i zatvara poroznost. Trupci se zatim smanjuju u presjeku daljnjim valjanjem, toplinski ih obrađujući do omekšanog stanja i izrezane na duljinu prikladnu za proizvodnju kuglica.

Gotovi valjni elementi se potom kale i popuštaju (ili izotermički poboljšavaju) do željene tvrdoće. Prstenovi ležajeva se uglavnom izrađuju od bešavne cijevi proizvedene toplim valjanjem i kaljenjem, nakon čega se strojno obrađuju i bruse do zadanih dimenzija te potom površinski obrađuju.

Preko 95% svih valjnih tijela se izrađuje od čelika za ležajeve, čelika za cementiranje ili čelika za poboljšavanje. Učinkovit rad ležajeva od presudne je važnosti za ispravan rad i željeni vijek trajanja strojeva u koje su ugrađeni. Zbog toga je vrlo važno odabrati optimalnu vrstu ležaja. [1]

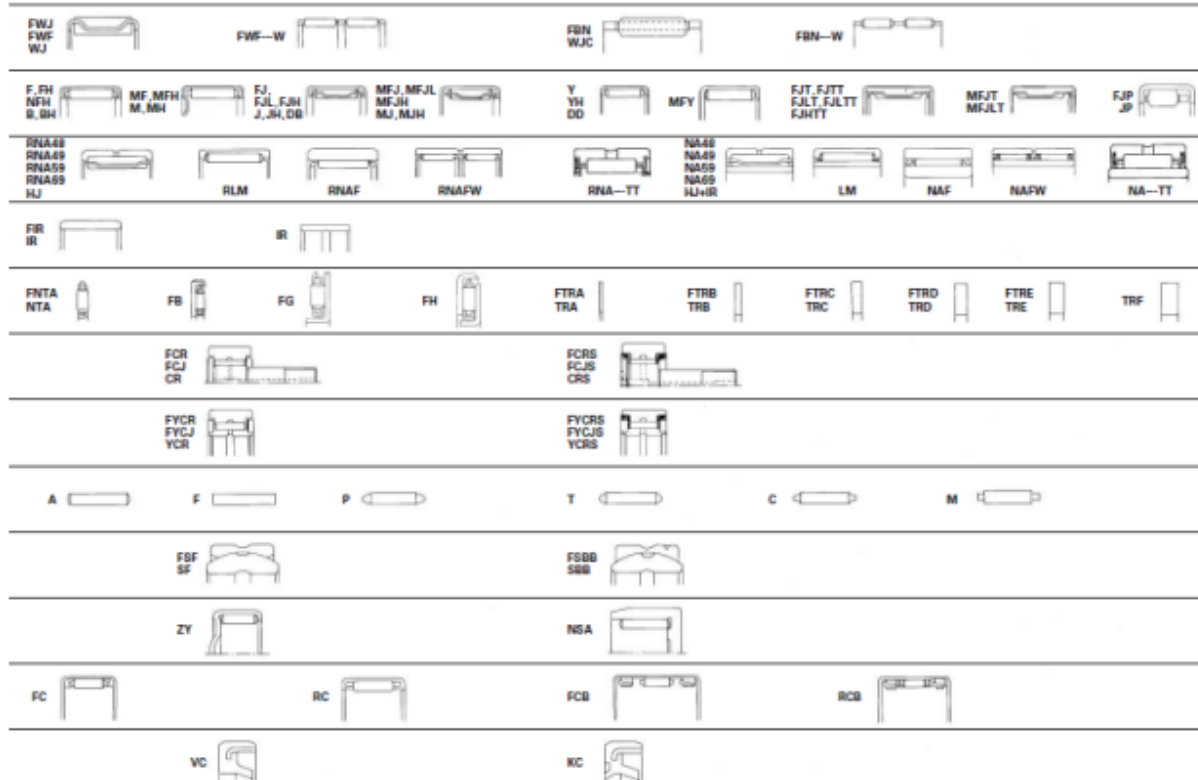
## 2.2. Označavanje valjnih ležajeva

Oznaka valjnih ležajeva sastavljena je, prema DIN 623 sastavljena od kombinacije slova i brojeva, „XXXXX“ [1]:

- Prvi broj ili slovo u osnovnoj oznaci predstavlja vrstu ležaja:  
0 - dvoredni kuglični ležaj s kosim dodirom, 1 - samopodesivi kuglični ležaj, 2 - radijalni i aksijalni bačvasti ležajevi, 3 - konični ležajevi, 4 - jednostavni dvoredni kuglični ležajevi, 5 - aksijalni kuglični ležajevi, 6 - jednostavni jednoredni kuglični ležajevi, 7 - jednoredni kuglični ležajevi s kosim dodirom, 8 - aksijalni valjkasti ležajevi, N - jednoredni valjkasti ležajevi.
- Drugi ili treći broj predstavljaju dimenzijsku seriju. Pri tome treći broj znači red vanjskog promjera (brojevi 8, 9, 0, 1, 2, 3 i 4), prema kojoj odabranom promjeru uvrta d odgovara precizno određeni vanjski promjer ležaja D.
- Zadnja dva broja osnovne oznake označuju unutrašnji promjer ležaja (jednak promjeru rukavca) d, koji istovremeno definira veličinu ležaja.

## 2.3. Igličasti ležajevi

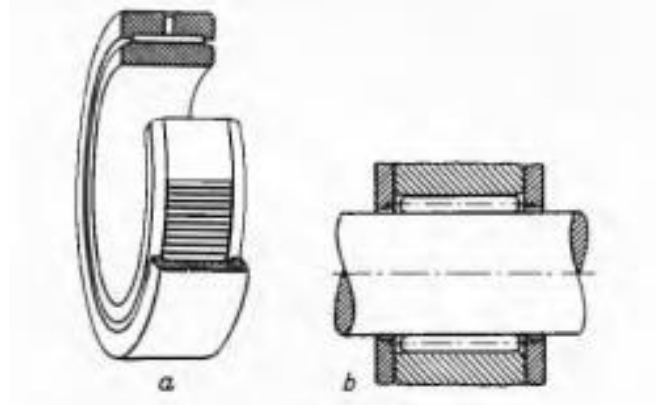
Igličasti ležajevi za valjna tijela koriste valjke manjih promjera (iglice) zbog koji si i dobili ime. Standardizirani su prema aktualnoj normi ISO 1206:2018 (DIN 617). Valjci osiguravaju veliku nosivost pri malim poprečnim presjecima. Izrađuju se s unutarnjim prstenom ili bez njega, a koriste se tamo gdje u radijalnom smjeru ima malo prostora za ugradnju. Igličasti ležajevi s unutarnjim prstenom su upotrebljivi za uležištenja kod kojih nije moguće ili nije ekonomski opravdano kaljenje i brušenje vratila. Igličasti ležajevi bez unutarnjeg prstena optimalno su rješenje za uležištenja kod kojih je vratilo moguće kaliti i brusiti. Obje podvrste igličastih ležaja su primjerene samo za radijalna opterećenja. [1] Na slici 4. je prikazana podjela i označavanje standardnih igličastih ležajeva



Slika 4. Podjela standardnih igličastih ležajeva [6]

Igličasti se ležajevi mogu izraditi s oba prstena ili samo s vanjskim prstenom (sa ili bez kaveza.) Izvedbe s kavezom omogućuju rad na višim brzinama okretaja u usporedbi s izvedbom bez kaveza. Zbog toga se danas proizvode pretežno kavezni igličasti ležajevi. Igljice igličastih ležajeva bez unutrašnjeg prstena valjaju se izravno po površini osovine.

Za razliku od kugličnih i običnih valjkastih ležajeva, igličasti ležajevi imaju veću površinu u kontaktu s prstenovima, tako da mogu podnijeti veća opterećenja uz malu debljinu ležaja i malo zauzeće prostora za ugradnju. Takvi ležajevi služe isključivo kao radijalni, imaju visoku nosivost, prikladni su za rad pri visokim okretajima i podnose udarce u radu [5]. Valjni elementi igličastih ležajeva, tzv. iglice, su tanki valjci sa zaobljenim rubovima, s promjerom 1,5 mm do 5mm i dužinom 5 mm do 10mm. Na slici 5. prikazani su igličasti ležaji bez kaveza, a na slici 6. igličasti ležaji s kavezom.



Slika 5. Igličasti ležaj bez kaveza: a) s oba prstena, b) bez prstena [5]



Slika 6. Igličasti ležaj s kavezom [5]

Zbog dobrih karakteristika, igličasti ležajevi se sve više primjenjuju u raznim industrijama te se smatraju najsuvremenijom vrstom ležaja. U automobilskoj industriji se koriste u raznim sklopovima, neke od njih su: klackalice, pumpe i kompresori. Ilustrativan primjer primjene ovih ležaja je pogonsko vratilo vozila s pogonom na stražnjim kotačima koje obično ima ugrađeno najmanje osam različitih igličastih ležaja, a često i više, ako je dugačko pogonsko vratilo ili je vozilo namijenjeno za kretanje na strmim padinama. [7]

### 2.3. Čelici za valjne i igličaste ležajeve

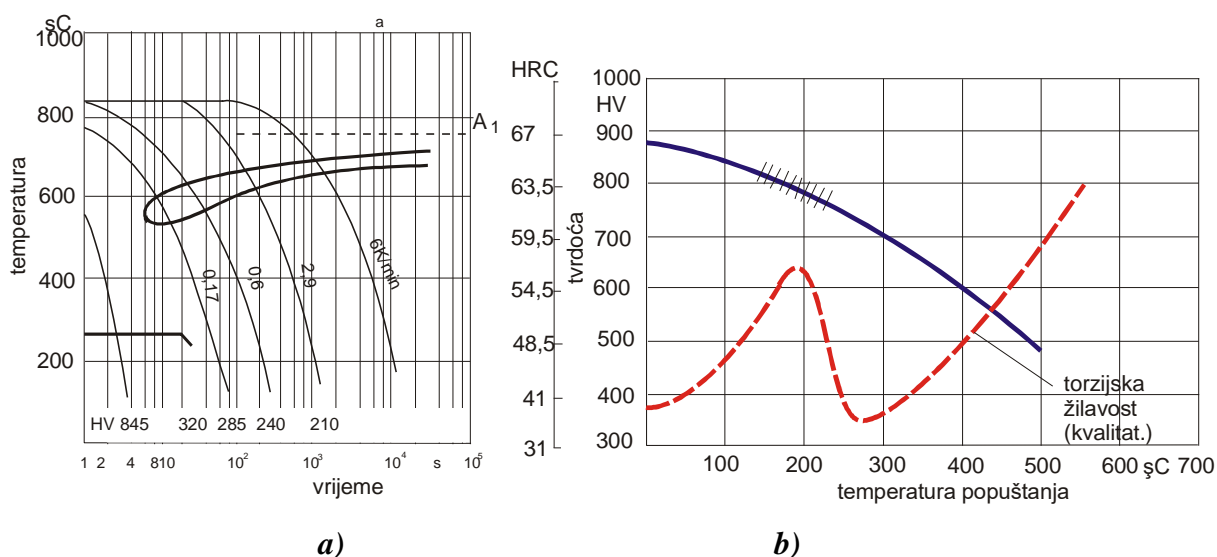
Čelici za ležajeve su visokougljični čelici legirani da osiguraju visoku otpornost na trošenje i visoku tvrdoću površine rotirajućih dijelova. Ovi čelici uglavnom sadrže 1% ugljika i legirne elemente mangan, krom i silicij, čija je glavna zadaća povećati žilavost te otpornost na umor materijala i otpornost na koroziju. Tipični čelici za ležajeve su 100Cr6, 115Cr3 i njima slični.

Čelici za ležajeve imaju široko područje primjene u automobilskej industriji, zrakoplovstvu, elektroindustriji i dr.... [8]

Glave prednosti primjene čelika za ležajeve jesu slijedeće[8]:

1. Dobra mehanička svojstva kao što su visoka tvrdoća, čvrstoća, žilavost...
2. Trajnost i dugovječnost zbog visoke otpornosti na trošenje, koroziju i umor
3. Svestranost i kompatibilnost: kompaktan je s raznim mazivima i može raditi u različitim radnim uvjetima
4. Ekonomičnost, zbog dobrih uporabnih karakteristika primjena ovih čelika omogućuje duži životni vijek ležaja, manje zastoje zbog zamijene, čim se smanjuju eksploatacijski troškovi i troškovi održavanja.
5. Točnost i pouzdanost dimenzija ležaja unutar uskih tolerancija te mogućnost izrade preciznih ležajeva namijenjenih za pogone s minimalnim vibracijama.

Na slici 7.a prikazan je kontinuirani TTT dijagrama s tvrdoćama postignutim nakon kaljenja čelika 100Cr6. Na slici 7.b prikazan je dijagram popuštanja istog čelika i označeno je područje nisko temperaturnog popuštanja nakon kojeg se postiže optimalna kombinacija tvrdoće i žilavosti.

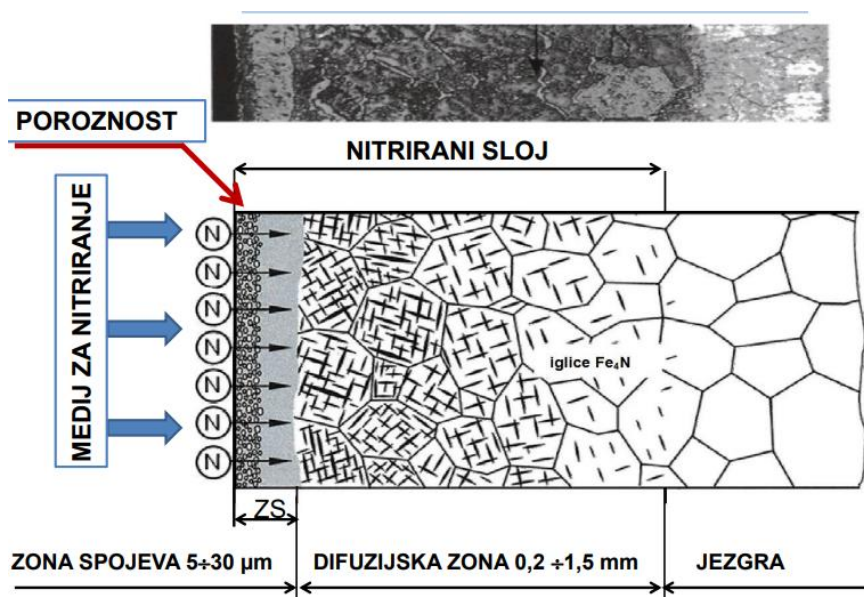


**Slika 7. Podloge za pripremu toplinske obrade čelika za ležajeve: a) kontinuirani TTT dijagram, b) dijagram popuštanja [14]**

## 2. NITRIRANJE I NITROKARBURIRANJE

Kao što je već ranije rečeno u uvodu, pod pojmom „nitiranje“, podrazumijeva se toplinsko-kemijska obrada kojom se površinske slojeve željeznih materijala, zbog postizanja određenih svojstava, obogaćuje slojem dušika. Najprije dušik difundira u površinu materijala, te se intersticijski otapa u željezu. Nakon što koncentracija dušika prijeđe 2,5% masenog udjela dušika, formira se jednofazni (ili višefazni) sloj nitrida. Proces nitiranja se u većini slučajeva provodi na temperaturama između 400 °C do 600 °C. Nitiranje, osim dobre korozijske zaštite, čeliku daje i dobru otpornost na trošenje i povišenu dinamičku izdržljivost. [2]

Treba razlikovati pojmove „nitiranje“ i „nitrokarburiranje.“ Naime, ako je u difuzijskoj zoni prisutan samo dušik, onda je postupak obrade naziva „nitiranje“. Ako osim dušika, u difuzijskoj zoni postoji i ugljik (koji difundira kao rezultat difuzije atoma ugljika iz aktivnog medija za nitiranje) onda se taj proces naziva „nitrokarburiranje“. Primarna zadaća obje metode je zaštita od trošenja. Na slici 8. prikazan je izgled nitiranog sloja.[2]



Slika 8. Izgled nitiranog sloja [14]

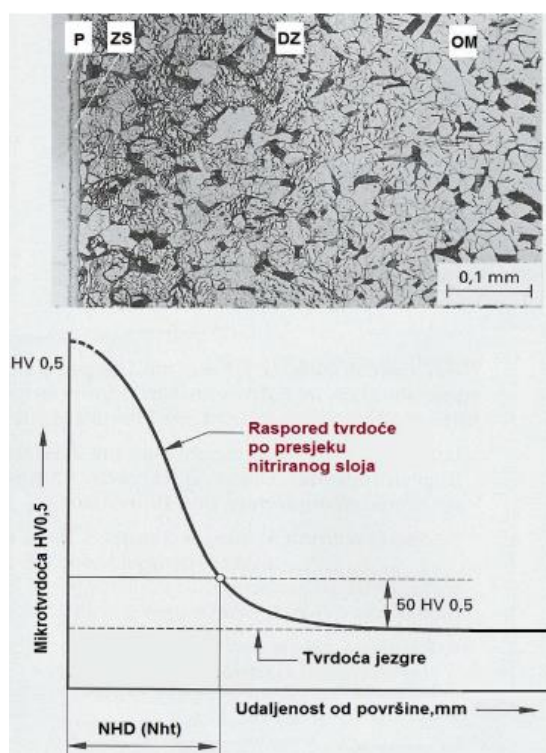
Ako osim dodavanja dušika, postoji i dodavanje kisika tijekom nitiranja, proces se naziva „oksinitiranje“ i služi za izradu poroznog nitridnog sloja koji omogućava bolje prijanjanje oksidnog sloja. [2]

Suprotno od navedenog, pod pojmom „oksidacija“ podrazumijeva se oksidacija željeznih materijala u kojoj se ciljano proizvodi magnetit ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) kao gornji sloj nitrirane zone. Time se dobiva izvrsna korozivna otpornost. Navedena metoda se također koristi u situacijama kada je potrebno smanjiti trenje klizanja ili omogućiti uhodavanje površina u kliznom kontaktu. [2]

Kako dušik može dosegnuti samo određenu dubinu, unutrašnjost materijala zadržava svoja izvorna svojstva i stoga je mekša od površine. Postupkom nitriranja se može postići konačna površinska tvrdoća do 76 HRC. [10]

Sloj nitrida općenito ima debljinu od  $30\ \mu\text{m}$ . Debljinu sloja možemo kontrolirati promjenom parametara postupka kao što su trajanje izlaganja, temperatura nitriranja, protok plina itd. Nitriranje se provodi na temperaturama ispod temperature austenitizacije čelika. Stvaranje austenita počinje na  $727\ \text{°C}$  za ugljične čelike, ali varira za legirane čelike ovisno o sastavu. Stoga se nitriranje u većini slučajeva provodi na temperaturama  $500\ \text{°C}$  do  $550\ \text{°C}$ . [10]

Proces nitriranja može trajati od 4 do 100 sati. Nakon 100 sati, debljina sloja se povećava vrlo sporo, što proces čini neizvodivim. Na slici 9. je prikazana karakterizacija nitriranog sloja. Kratica P predstavlja površinu, ZS-zonu spojeva, DZ-difuzijsku zonu, OM-osnovni materijal.



**Slika 9. Karakterizacija nitriranog sloja**

Za nitriranje je potreban aktivni medij kao izvor dušika u elementarnom stanju koji može biti [2]:

- Rastaljena sol (nitriranje, odnosno nitrokarburiranje u solnoj kupci)
- Plinska smjesa (nitriranje u plinu)
- Niskoenergetska plazma (nitriranje u plazmi)

### 3.1. Plinsko nitriranje

Kod plinskog nitriranja, zagrijani metalni dio se izlaže bezvodnom plinu amonijaku u peći. Kako temperatura raste, amonija se raspada na dušik i vodik. Dušik se difundira u površinu i tvori iznimno čvrst sloj nitrida. Plinsko nitriranje se za čelike provodi na temperaturama između 495°C i 565°C. [10]

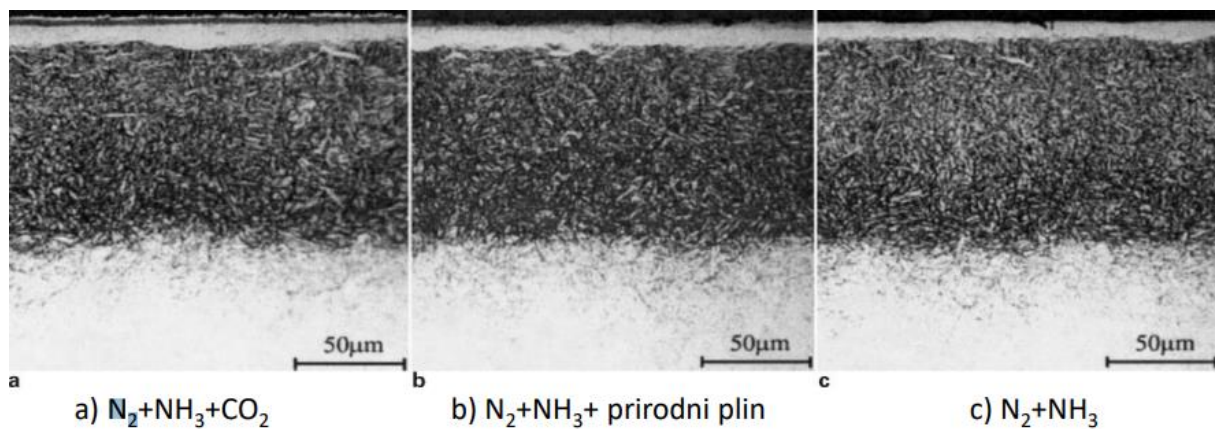
Ovisno o primjeni, plinsko nitriranje može biti jednofazno ili dvofazno. Kod jednofaznog se primjenjuje temperatura u rasponu 495 °C do 525 °C , a stupanj disocijacije amonijaka iznosi 15%-30%. Tim se postupkom proizvodi krhak površinski sloj bogat dušikom, poznat kao sloj „bijelog nitrida.“ U dvofaznom postupku nitriranja, jednofazni proces se ponavlja dva puta te se disocijacija amonijaka povećava na 65% do 85%. Za taj je postupak potrebna primjena generatora atmosfere, odnosno vanjskog disocijatora amonijaka zbog postizanja veće disocijacije u drugoj fazi nitriranja. Često se upotrebljava za masovnu proizvodnju jer je veličina serija ograničena samo protokom plina i veličinom peći. Prednost plinskog nitriranja je visoka ekonomičnost, a glavni nedostatak je vrlo dugačko trajanje, do 80 sati [10]. Na slici 10. je prikazano postrojenje za plinsko nitriranje.





Slika 10. Postrojenje za nitiranje u plinu [10]

Na slici 11. je prikazana mikrostruktura metalografski pripremljenog uzorka od alatnog čelika X35CrWMoV5 nitrokarburiranog u plinu, te nagriženog u NITAL-u. Nitiranje je provedeno u tri postupka s različitim kombinacijama plinova:  $N_2$  označava dušik,  $NH_3$  amonijak,  $CO_2$  ugljični dioksid.



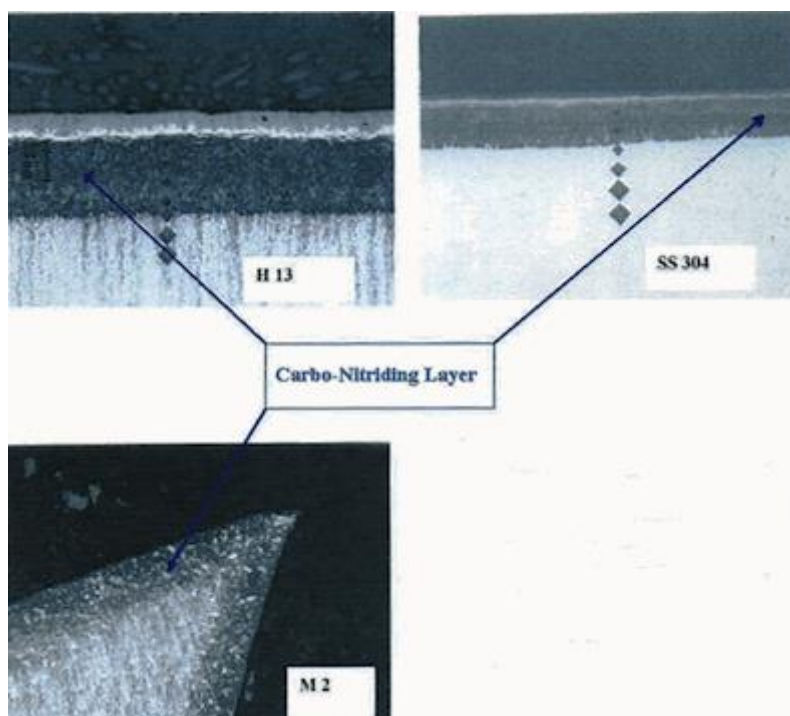
Slika 11. Mikrostruktura čelika X35CrWMoV5 nitrokarburiranog u plinu [12]

### 3.2. Nitiranje/nitrokarburiranje u solnoj kupki

Nitiranje, odnosno nitrokarburiranje u solnoj kupki izvorno je stvoreno kao alternativa plinskom nitiranju. Kada se čelični dijelovi stave u prethodno zagrijanu tekuću sol, zbog razlika u kemijskom potencijalu postoji dovoljno energije u blizini površine koja omogućuje difuziju dušika i ugljika iz soli u čeličnu podlogu. [11]

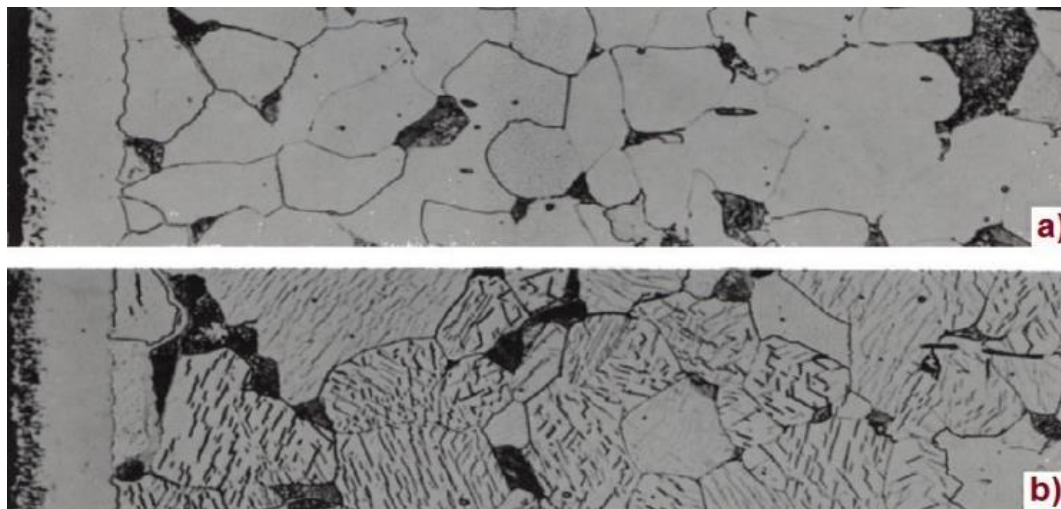
Dušik koji prodire u površinski sloj se sastoji od rastaljenih soli na temperaturi između 500 °C do 600 °C. Cijanid se podvrgava katalitičkoj razgradnji na temperaturi nitriranja kako bi se formirao cijanid, karbonat i dušik koji se adsorbira na površinu metalnog materijala.

Zbog stvaranja karbonata, ovim postupkom se mogu proizvesti samo slojevi nitrida koji, uz dušik, sadrže i ugljik. Alati i obradci se nakon procesa moraju detaljno oprati i neutralizirati kako bi se prenošenje visoko toksičnih sastojaka kupke izvan postrojenja svelo na minimum. Prikaz nitrokarburiranog sloja je prikazan i označen strelicama na slici 11.



**Slika 12. Nitrokarburirani površinski sloj na čelicima H13 (X35CrWMoV5), SS304 (X5CrNi18-10) i M2 (S 6- 5-2) [11]**

Ovaj postupak se koristi za obradu ugljičnih i niskolegiranih čelika, brzoreznih čelika, alatnih čelika za topli rad, nehrđajućih čelika i lijevanih željeza. Ne postižu se visoke tvrdoće kao u slučaju nitriranja u amonijaku, pa se ovaj postupak još naziva i meko nitriranje. Na slici 12. prikazana je mikrostruktura nitrokarburiranog čelika C15 postupkom TENIFER pri 580°C/2h i hlađenog u ulju, odnosno na zraku.



Slika 13. Mikrostruktura nitrokarburiranog čelika C15 hlađenog: a) u ulju; b) na zraku [12]

### 3.3. Nitriranje u plazmi

Od sredine 1960-ih komercijalno je dostupna oprema za nitriranje koja koristi fenomen tinjajućeg pražnjenja. U početku nazvan nitriranje s tinjajućim pražnjenjem, proces je danas općenito poznat kao ionsko ili plazma nitriranje.

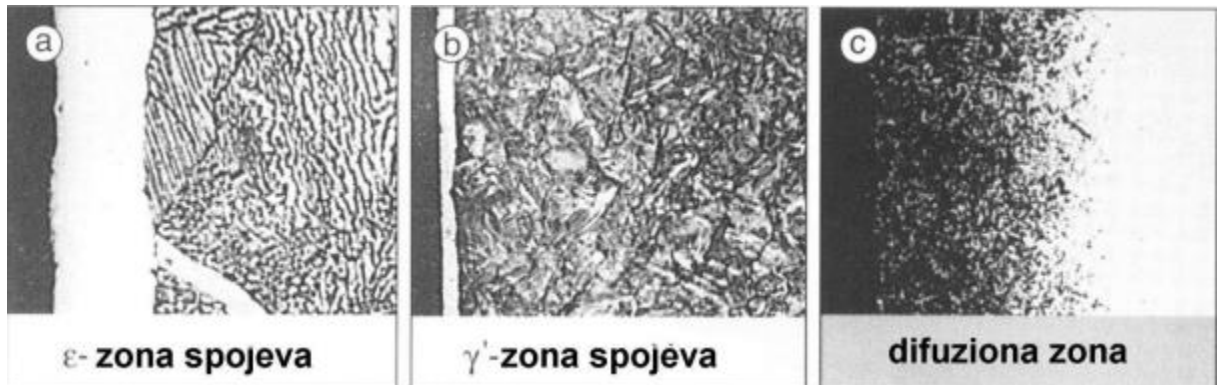
Ionsko nitriranje je proširenje konvencionalnih procesa nitriranja korištenjem fizikalnih procesa u ioniziranim plinovima (plazmi). Ionsko nitriranje omogućuje potpunu automatizaciju procesa, uz dobru ponovljivost postignutih svojstava.

Površinski sloj nitriranih metalnih materijala sastoji se od dva dijela. Na površini obratka nitiranog u plazmi nalazi se zona spojeva (2  $\mu\text{m}$  do 20  $\mu\text{m}$ ) koja određuje otpornost na trošenje, korozivsku postojanost i tvrdoću. Zona spojeva (u nastavku „ZS) može poprimiti jedan od navedenih oblika:

- $\gamma'$  – zona spojeva ( $\gamma'$  – nitrid:  $\text{Fe}_4\text{N}$ ) koja je vrlo tvrda, ali i relativno žilava
- $\varepsilon$  – zona spojeva ( $\varepsilon$  – nitrid:  $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ,  $\varepsilon$  – karbonitrid,  $\text{Fe}_{2-3}\text{NC}$ ), bez pora ili sa slabom poroznošću
- Smjesa  $\varepsilon$  i  $\gamma'$

- Nitirani sloj bez zone spojeva (samo difuziona zona)

Navedene zone spojeva su prikazane na slici 14.



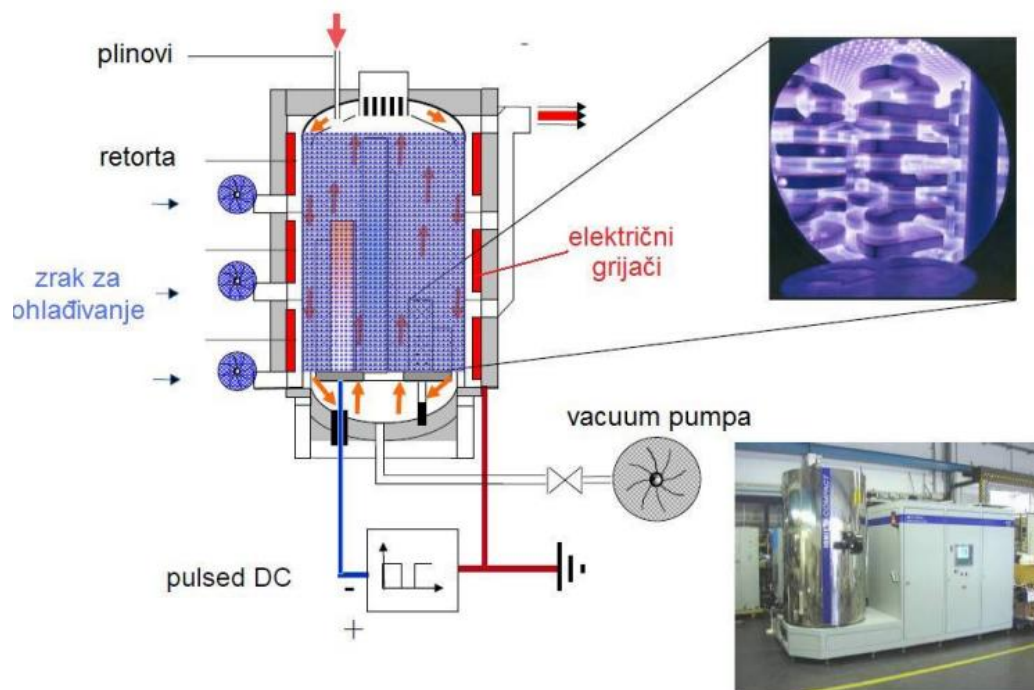
**Slika 14. Moguće strukture zone spojeva nakon nitiranja u plazmi[14]**

Ispod spomenute zone spojeva se nalazi difuzijska zona (0,1 mm do 0,8 mm dubine.)

Nitiranje u plazmi ima mnogobrojne prednosti, neke od njih su slijedeće [14]:

- Ekološki prikladan postupak
- Mogu se nitirati praktički svi čelici, Fe lijevovi
- Lagana automatizacija
- Prikladno za dijelove i velikih i malih masa
- Moguće parcijalno nitiranje.

Peć za nitiranje u impulsnoj istosmjernoj plazmi se sastoji od retorte, dovoda zraka za ohlađivanje, električnog grijača te vakuumske pumpe (slika 15.)



Slika 15. Prikaz peći za nitriranje u plazmi [14]

### 3. KARAKTERIZACIJA NITRIRANE POVRŠINE

#### 3.1. Hrapavost površine

Pod pojmom „hrapavost površine“ podrazumijeva se mikrogeometrijska nepravilnost površine koja uglavnom nastaje za vrijeme postupaka obrade. Hrapavost u velikom dijelu utječe na radna svojstva strojnih dijelova, posebno na mjestima gdje su elementi međusobno spojeni. Općenito, strojni dijelovi s manjom hrapavošću imaju veću dinamičku čvrstoću, veću otpornost na koroziju, bolje prenose toplinu itd. Postizanje niskog stupnja hrapavosti je uvijek povezano s duljim i skupljim postupkom obrade te zbog toga dolazi do povećanja cijene strojnog dijela.

Parametri hrapavosti određeni su standardom DIN 4726:2017. Na slici 16. su prikazani stupnjevi i razredi hrapavosti površina strojnih dijelova pri različitim obradama.

Stupanj hrapavosti		N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12		
Razred hrapavosti		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
R <sub>a</sub> [μm]		0,012	0,025	0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100
R <sub>z</sub> [μm]		0,05	0,1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5	25	50	100	200	400
Ručna obrada	grubo turpijanje														
	fino turpijanje														
Lijevanje	u pijesku														
	u kokili														
Kovanje	toplo, slobodno														
	toplo, u ukovnju														
	hladno, u ukovnju														
Valjanje	toplo														
	hladno														
Pjeskarenje															
Tokarenje	grubo														
	fino														
Blanjanje	grubo														
	fino														
Provlačenje	grubo														
	fino														
Glodanje	grubo														
	fino														
Bušenje															
Razvrtavanje															
Brušenje	grubo														
	fino														
Poliranje	mehaničko														
	električno														
Honanje, lepanje															
Superfinaš															

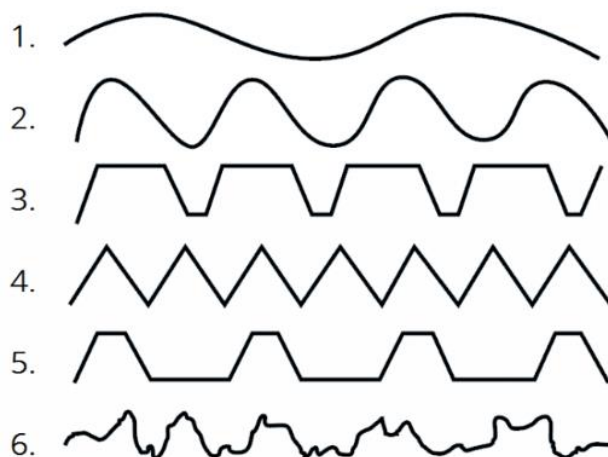
Slika 16. Stupnjevi i razredi hrapavosti površina [15]

Glavni vertikalni parametri hrapavosti površine su  $R_a$ ,  $R_z$  i  $R_{max}$ . Parametar  $R_a$  označava srednje aritmetičko odstupanje profila koje je jednako srednjoj aritmetičkoj vrijednosti apsolutnih vrijednosti visine profila neravnina na mjernoj duljini  $l$  i računa se prema sljedećoj formuli:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (1)$$

gdje je:  $R_a$  [ $\mu\text{m}$ ] - srednje aritmetičko odstupanje profila,  $l$  [ $\mu\text{m}$ ] - mjerna duljina hrapavosti površine,  $y(x)$ ,  $y_i$  [ $\mu\text{m}$ ] - visina profila hrapavosti s obzirom na srednju referentnu crtu,  $n$  - broj točaka procjenjivanja visine profila uzduž mjerne duljine.

Iako je prosjek hrapavosti ( $R_a$ ) koristan prosjek, postoje različiti profili hrapavosti koji još uvijek mogu imati isti prosjek hrapavosti, kao na donjoj slici 17.



Slika 17. šest različitih profila hrapavosti sa istim  $R_a$  [16]

Parametar  $R_z$  označava srednju visinu neravnina koja je jednaka zbroju aritmetičke sredine apsolutnih vrijednosti visine pet najviših vrhova i aritmetičke sredine apsolutnih vrijednosti pet najvećih dubina udolina na mjernoj duljini  $l$  i računa se prema formuli:

$$R_z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (2)$$

$R_z$  [ $\mu\text{m}$ ] - srednja visina neravnina,  $y_i$  [ $\mu\text{m}$ ] - visina  $i$ -tog najvišeg vrha,  $n$  - broj točaka procjenjivanja visine profila uzduž mjerne duljine. Približno vrijedi  $R_z \sim 4 R_a$ .

Parametar  $R_{max}$  se odnosi na najveću visinu neravnina na snimljenom profilu hrapavosti.

### 3.2. Mjerenje temperature zagrijavanja ležaja

Praćenje temperature ležajeva ključno je za održavanje zdravlja i svojstava strojeva. Praćenje temperature ležajeva omogućuje podatke o temperaturi ležaja u stvarnom vremenu, što može pružiti rano upozorenje o potencijalnim problemima. Uvjeti koji mogu uzrokovati visoke temperature u ležajevima uključuju ne poravnavanje osi vrtnje ležaja i osovine, nepravilno podmazivanje i preopterećenje ležaja. Visoke temperature mogu dovesti do toplinskog širenja komponenti ležaja, povećanog trenja, degradacije maziva i na kraju do kvara ležaja. Stoga je dobro implementiran sustav praćenja temperature ležaja ključan za sprječavanje skupih zastoja i oštećenja opreme. [17]

Do zagrijavanja ležaja pri radu dolazi zbog:

- Izrazito nedovoljno ili previše maziva
- Loše ugradnje ležajeva
- Neodgovarajuće vrste maziva
- Visokog trenja
- Prevelikog opterećenja

Porast temperature je vrlo česta pojava tijekom u radu ležajeva, ali postoji prihvatljivi raspon porasta temperature. Općenito, temperatura ležajeva raste s pokretanjem i stabilizira se na temperaturi nešto nižoj nego pri pokretanju u određenom vremenu. Poželjna temperatura ležajeva općenito je ispod 100°C. Vrijeme stabilizacije temperature ležaja se povećava ovisno o veličini ležaja, strukturi, brzini rotacije, sustavu podmazivanja i radnim uvjetima. Obično se kreće oko 20 minuta do čak nekoliko sati. Na slici ispod je vidljivo polje optimalne radne temperature, što se temperatura više udaljava od polja zelene boje, to je veća mogućnost da dođe do neželjenih pojava trošenja i zagrijavanja ležaja.



Slika 18. Područje optimalne radne temperature ležaja [18]



Temperatura ležajeva se može ispitati na par načina. Prvi i najjeftiniji način je da se temperatura ispita dodirnom i to je u nekim slučajevima dovoljno. Međutim, u puno više slučajeva to nije dovoljno i temperatura se mora ispitati suvremeniji postupcima mjerenja, kao što su beskontaktni IR termometri ili termovizijske kamere. Temperatura se može mjeriti i pomoću trajno ugrađenih senzora koji kontinuirano prate temperaturu i daju podatke o promjenama njezine vrijednosti. Od nužne je važnosti poznavati normalnu radnu temperaturu ležajeva jer nisu svi ležajevi predviđeni za rad na istim temperaturama.

### 3.3. Vibracije i buka u ležajevima

Vibracije i buka od primjene ležajeva može biti posljedica nedostataka, oštećenja i trošenja na vanjskom i unutarnjem prstenu, iglicama te pojave onečišćenja u ležaju. Ograničenje buke i vibracija jednako je kritičan zadatak u modernim primjenama kao i krutost, nosivost, brzine i vijek trajanja. Do vibracija ležaja dolazi tijekom rada stroja. Vibracije mogu biti posljedica neusklađenosti, neuravnoteženosti, mehaničke labavosti, problema s podmazivanjem i nedostataka ležaja. Ispitivanjem i razumijevanjem razloga koji stoje iza vibracija ležajeva, inženjeri mogu učinkovito dijagnosticirati kvarove i implementirati odgovarajuće strategije održavanja.

Kriteriji prihvatljivosti vibracija služe kao mjerilo za određivanje prihvatljivih razina vibracija za ležajeve u strojevima. Ovi se kriteriji utvrđuju na temelju nekoliko čimbenika, uključujući vrstu ležaja, radnu ulogu stroja i industrijske standarde. Obično se izvode iz smjernica koje su postavile organizacije poput ISO ili ANSI. Kriteriji pomažu u prepoznavanju kada su razine vibracija ležaja unutar sigurnog raspona ili kada prelaze pragove koji bi mogli ukazivati na potencijalne probleme ili nadolazeće kvarove. Pridržavajući se ovih kriterija, inženjeri mogu osigurati da ležajevi rade unutar sigurnih, unaprijed određenih granica, čime se smanjuje rizik od oštećenja i produljuje životni vijek strojeva.

Dijagnostičke strategije za otkrivanje vibracija jesu sljedeće:

- Tehnike akustične emisije – otkrivaju visokofrekventne zvukove ili emisije koje stvara ležaj. Promjene u tim emisijama mogu ukazivati na probleme poput pojave pukotina u elementima ležaja.

- Termografska analiza - koristeći infracrvene kamere za otkrivanje toplinskih uzoraka, ova strategija pomaže u identificiranju područja prekomjernog trenja ili neusklađenosti, što može dovesti do povećanih vibracija.
- Analiza maziva - ispitivanje maziva na kontaminaciju ili čestice trošenja može dati uvid u stanje ležaja i potencijalne izvore vibracija.
- Periodički pregled i praćenje - redoviti pregledi i praćenje razina vibracija ležaja tijekom vremena mogu pomoći u ranom otkrivanju problema i analizi trendova.
- Analiza vibracija – koja se provodi primjenom specijalizirane opreme za mjerenje i analizu frekvencije, amplitude i drugih karakteristika vibracija. Tumačenjem ovih mjerenja inženjeri mogu identificirati specifične probleme kao što su nepodudarnost osi vrtnje ležaja i osovine, neravnoteža raspodjele mase po opsegu elemenata ležaja ili istrošenost ležaja.

Neki od uređaja za analizu vibracija su: senzori vibracija (akcelerometri i sonde za mjerenje brzine vrtnje), sustavi za prikupljanje podataka, prijenosni analizatori te dijagnostički softver.

# **EKSPERIMENTALNI DIO**

## 4. PLAN I PROVEDBA ISPITIVANJA

### 4.1. Plan pokusa

U eksperimentalnom dijelu rada, korištena su tri unutarnja prstena igličastih ležajeva od čelika 100Cr6. Proizvođač prstena je NTN, a oznaka prstena je 1R30X35X17. Iz samog imena prstena, vidljiv je vanjski promjer koji iznosi 35 mm, unutarnji promjer koji iznosi 30 mm i debljina koja iznosi 17 mm. Na dva od tri prstena, primijenjen je postupak nitriranja kako bi im se modificirala površina, a jedan je ostavljen u ne nitriranom, odnosno polaznom stanju. Prsten u polaznom stanju, zajedno sa svojom ambalažom prikazan je na slici 19.



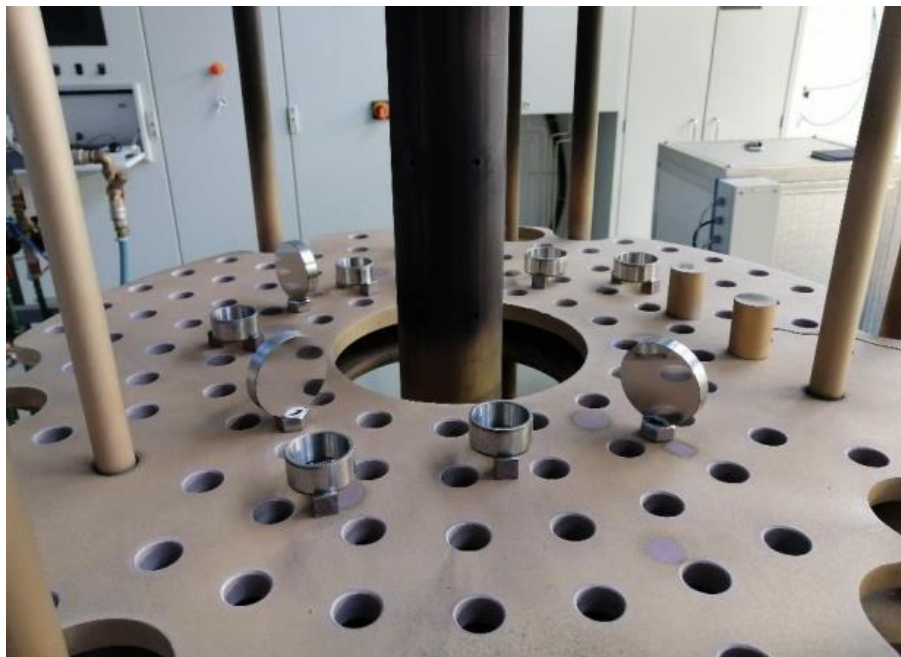
Slika 19. Unutrašnji prsten igličastog ležaja u polaznom stanju

### 4.2. Postupak nitriranja unutrašnjih prstenova

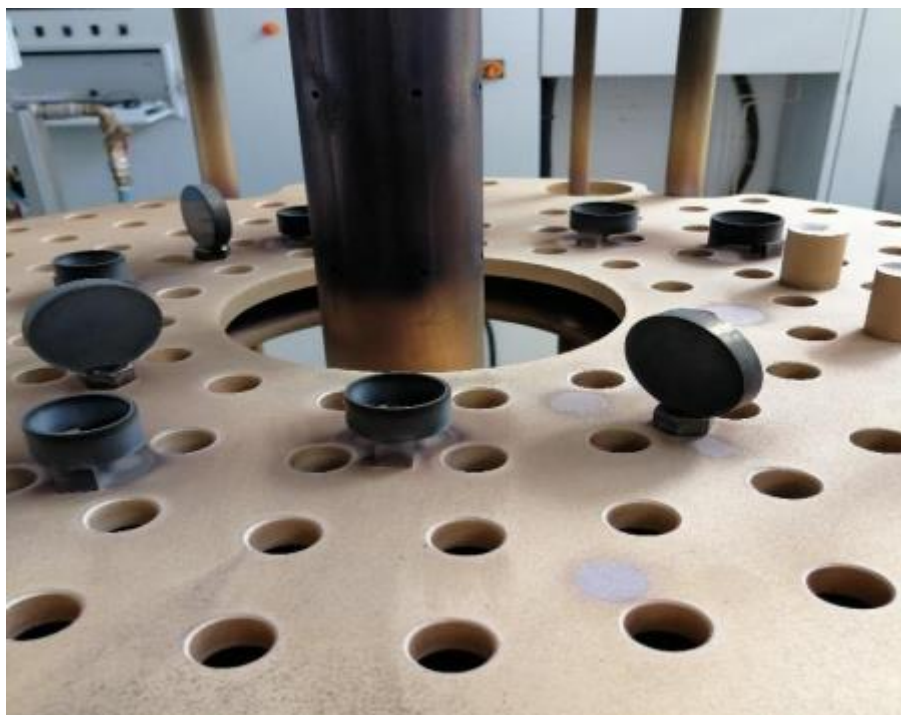
Na jednom prstenu prstenu se proveo postupak nitriranja u plazmi na 480 °C u trajanju 7 sati. Drugi prsten je nitriran u solnoj kupci TENIFER na temperaturi od 580 °C u trajanju od 2 sata. Nitriranje prstenova u plazmi prikazano je na slikama 20 do 22.



Slika 20. Peć za nitriranje u plazmi Rubig PN 70/90

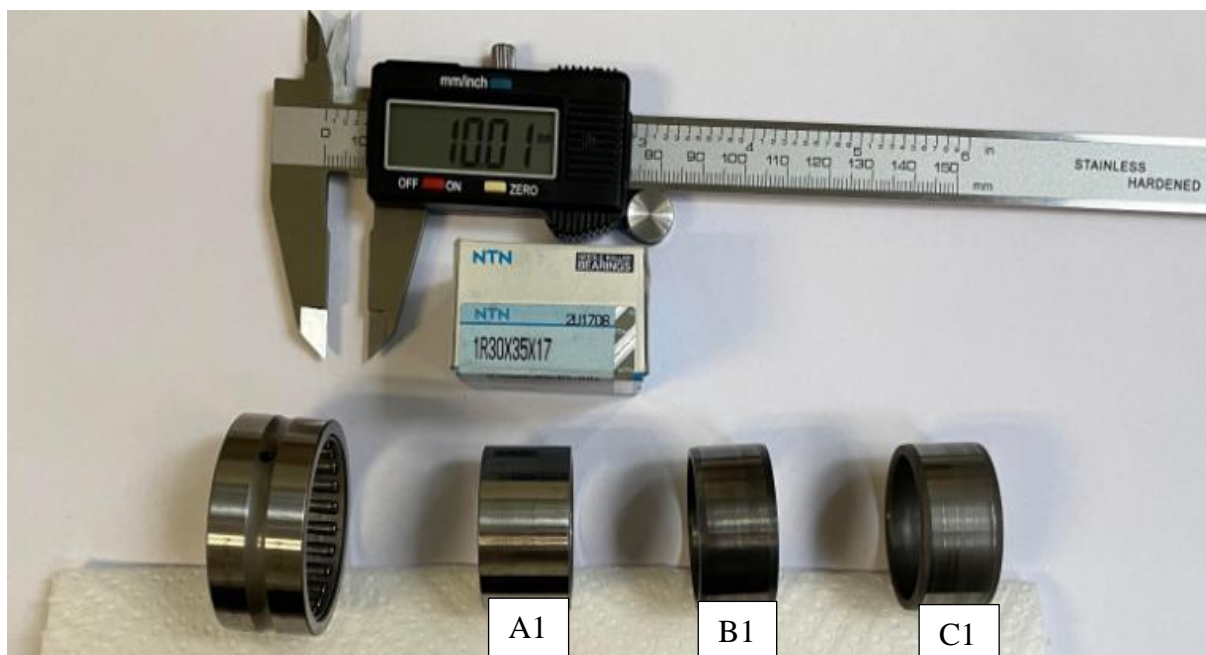


**Slika 21. Prsten prije postupka nitriranja u plazmi**



**Slika 22. Prsten nakon nitriranja u plazmi**

Zbog lakše usporedbe, na slici 23. se nalaze sva tri prstena jedan uz drugog. Jasno je vidljiva razlika u izgledu prstena prije i nakon nitriranja. Redosljed prstena je sljedeći: lijevo je vanjski prsten s iglicama, pokraj njega je prsten u polaznom stanju (označen oznakom A1), prsten nitriran u plazmi (B1), dok je s desne strane je prsten nitriran u solnoj kupci TENIFER (C1).



**Slika 23. Ispitni uzorci prstenova igličastog ležaja**

## 5. REZULTATI ISPITIVANJA I DISKUSIJA

### 5.1. Hrapavost prstenova prije i poslije pokusa

Na unutrašnjim prstenima je izmjerena hrapavost prije i nakon trošenja u ukupnom trajanju od tri minute. Mjerenje hrapavosti provedeno je prijenosnim uređajem s ticalom TR 3202, proizvođača TIME High Technology Ltd. (slika 24). Iz tablice preporučenih duljina uzorkovanja odabrana je duljina uzorkovanja od 0,8 mm prema očekivanom rasponu vrijednosti parametara hrapavosti. Na slici 25 prikazan je položaj mjerača hrapavosti i površine unutrašnjeg prstena tijekom mjerenja.



Slika 24. Prijenosni uređaj za mjerenje hrapavosti TR 3202

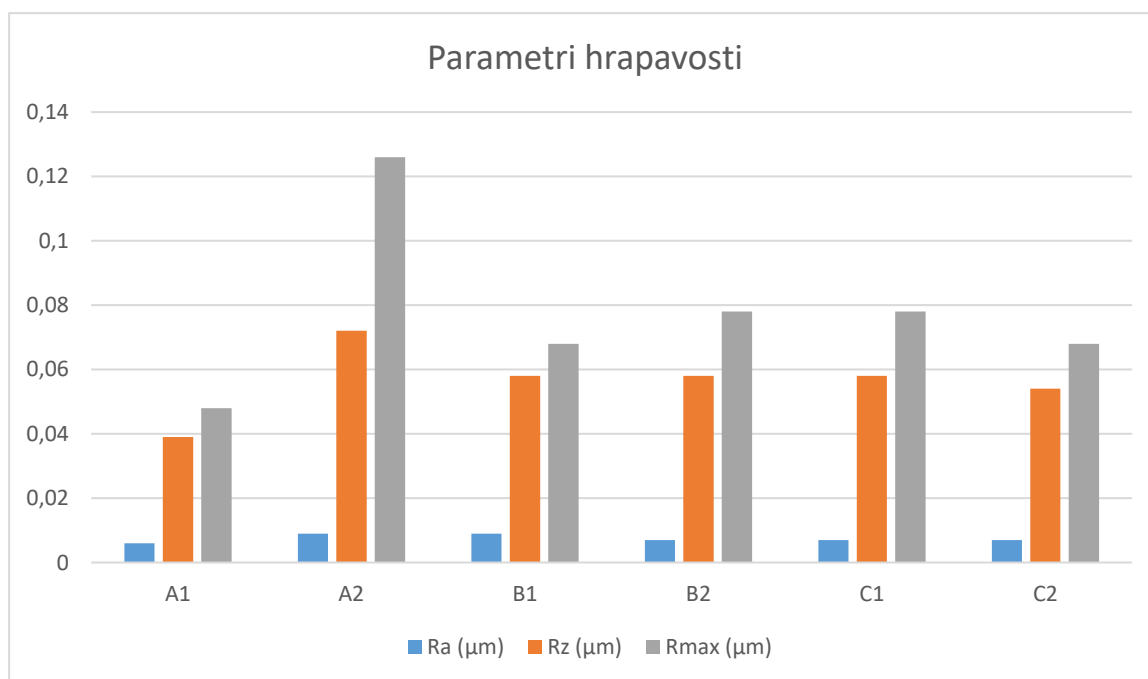


Slika 25. Postav za mjerenje hrapavosti

U računalnom programu uređaja za ispitivanje hrapavosti primijenjen Gaussov filter i odabrano je da se hrapavost mjeri na 5 mjernih duljina. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 1 i na slici 26. Oznake sa brojem „1“ odnose se na hrapavost površine prije pokusa, dok se oznake „2“ odnose na hrapavost površine prstena nakon trošenja (npr. ako je A1 prije trošenja, onda A2 označava isti prsten nakon trošenja od tri minute.)

**Tablica 1. Vrijednosti hrapavosti prstena prije i poslije trošenja**

Prsten	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	$R_{\text{max}}$ ( $\mu\text{m}$ )
A1	0,006	0,039	0,048
A2	0,009	0,072	0,126
B1	0,009	0,058	0,068
B2	0,007	0,058	0,078
C1	0,007	0,044	0,048
C2	0,007	0,054	0,068

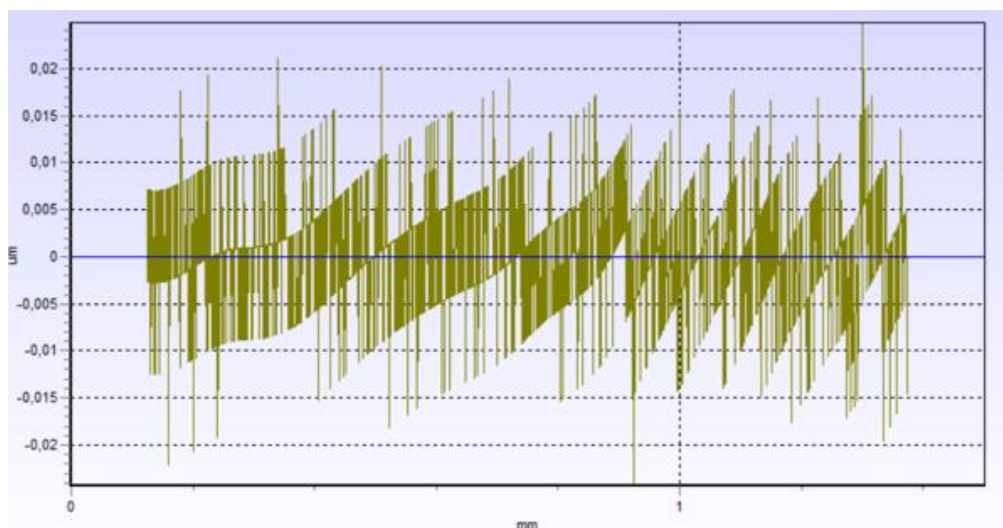


**Slika 26. Histogram vrijednosti hrapavosti prstena prije i nakon trošenja u trajanju od 3 min**

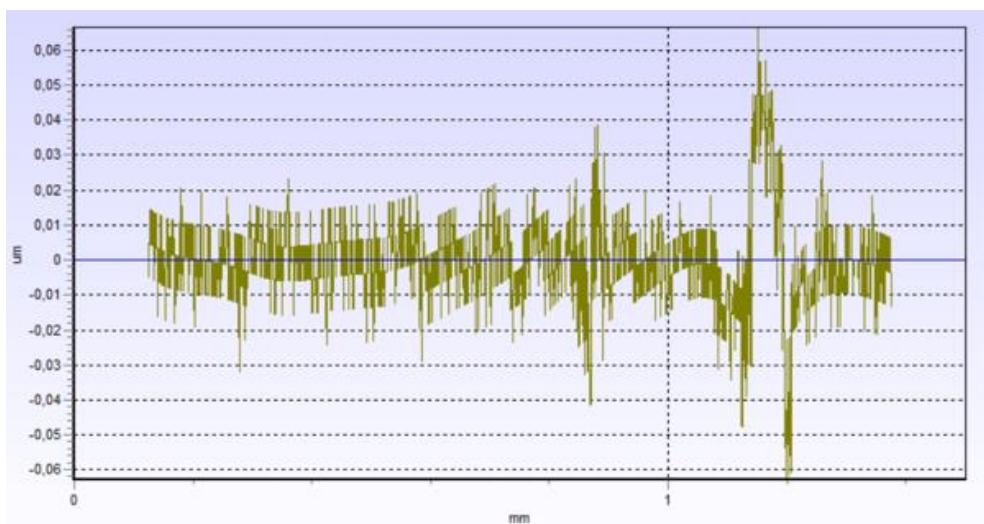
Iz rezultata ispitivanja hrapavosti površine vidljive je da razlike hrapavosti između pojedinih prstena prije trošenja nisu prevelike. Ako se pogleda stanje hrapavosti nakon pokusa, može se



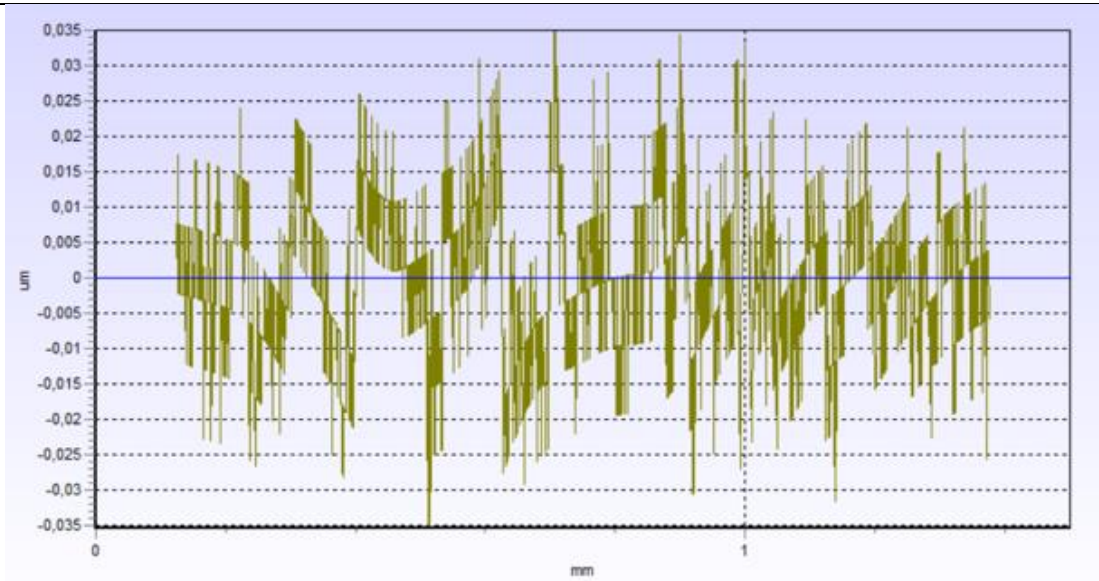
vidjeti da su vrijednosti  $R_a$  porasle samo za polazno stanje prstena dok su se kod nitriranih prstena vrijednosti  $R_a$  smanjile jer su se slojevi uglačali. To je bilo i za pretpostaviti jer je kod prstena u polaznom stanju prisutno veće trenje, a samim time i veće trošenje. Profili hrapavosti ispitivanih prstena prikazani su na slikama 27 do 32.



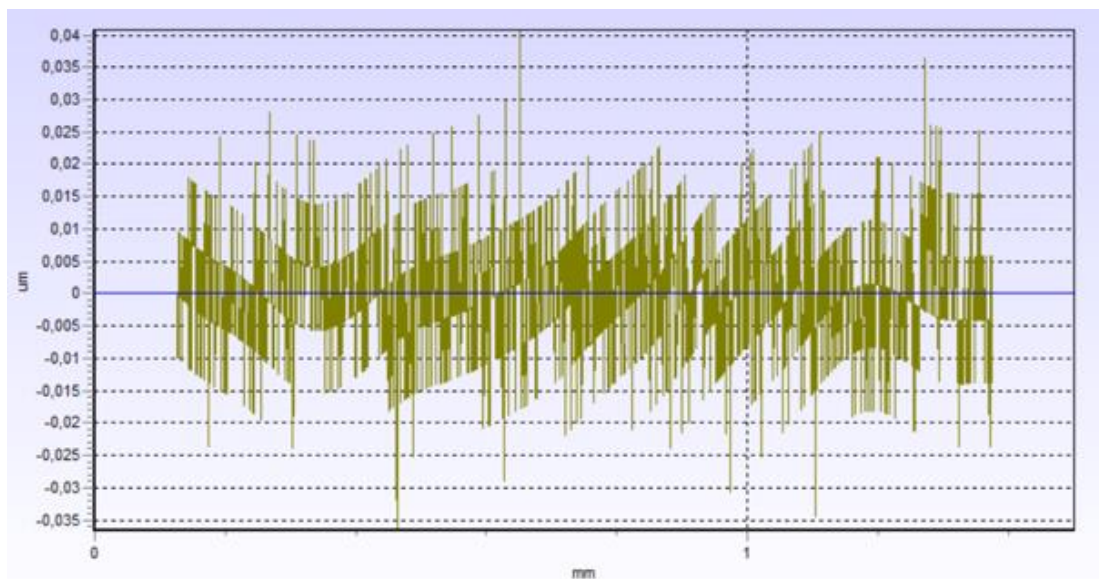
**Slika 27. Profil hrapavosti površine prstena A1**



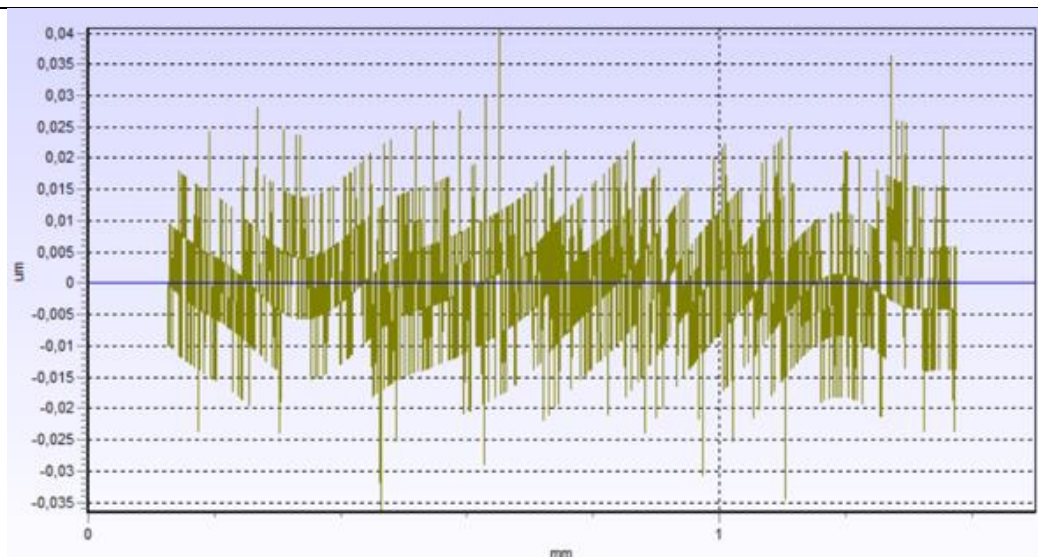
**Slika 28. Profil hrapavosti površine prstena A2**



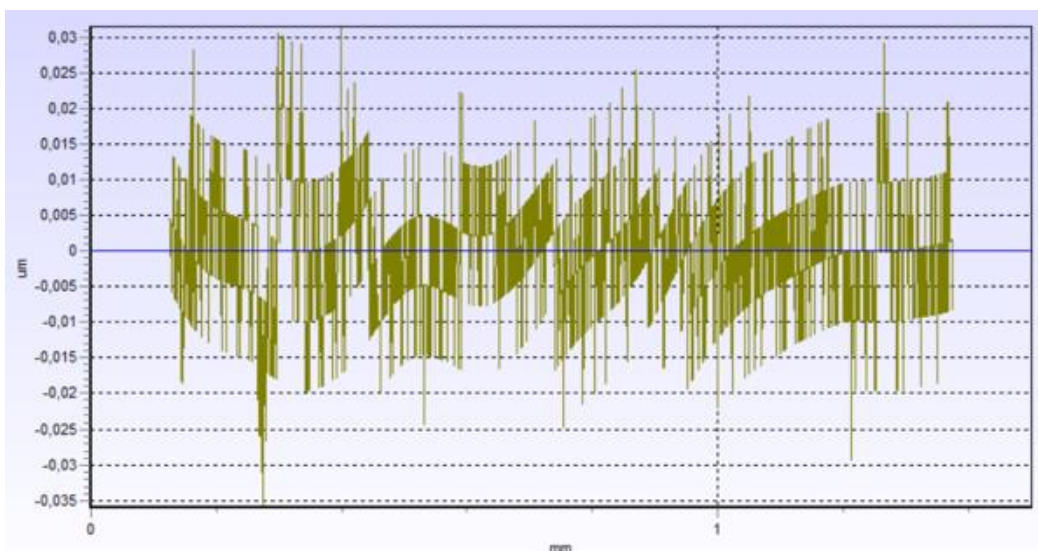
**Slika 29. Profil hrapavosti površine prstena B1**



**Slika 30. Profil hrapavosti površine prstena B2**



**Slika 31. Profil hrapavosti površine prstena C1**



**Slika 32. Profil hrapavosti površine prstena C2**

## 5.2. Analiza trošenja površine

Za analizu trošenja površine korištena je USB mikroskopska kamera „Digimicro Profi“ proizvođača Toolcraft. Njom je moguće postići povećanje od 20 do 200 puta uz rezoluciju od 5 megapiksela, na udaljenosti objektiva od uzorka do 150 mm. Kamera se prije korištenja treba kalibrirati. Njezin izgled vidljiv je na slikama 33 i 34.

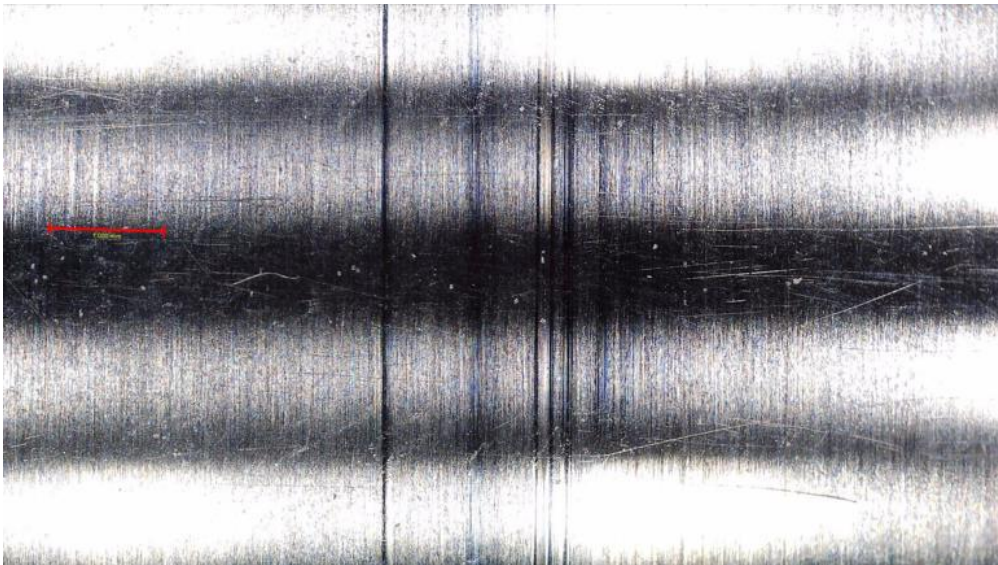


**Slika 33. Mikroskopska kamera Digimicro profi**



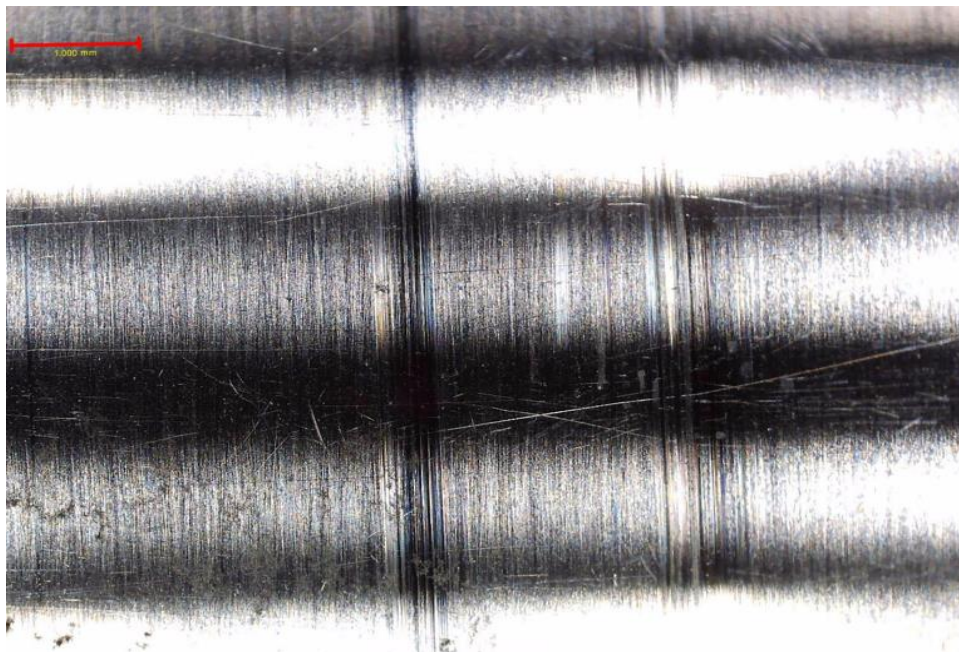
**Slika 34. Kalibracija kamere prije korištenja**

Bitno je napomenuti da prilikom ispitivanja vibracija ležajeva nisu korištena maziva (ležajevi su radili „na suho.“) Maziva bi zasigurno smanjila trošenja i sačuvala nepromijenjen izgled površine. Već je ranije (u poglavlju 5.4.) spomenuto da se hrapavost nitriranog prstena povećala, dok su se nitrirani slojevi uglačali. Vidljivo je i da se kod prstena nitriranog u solnoj kupci TENIFER, zona spojeva ravnomjerno troši. Fotografije površine prije i poslije trošenja, prikazane su u nastavku, na slikama 35 do 40.

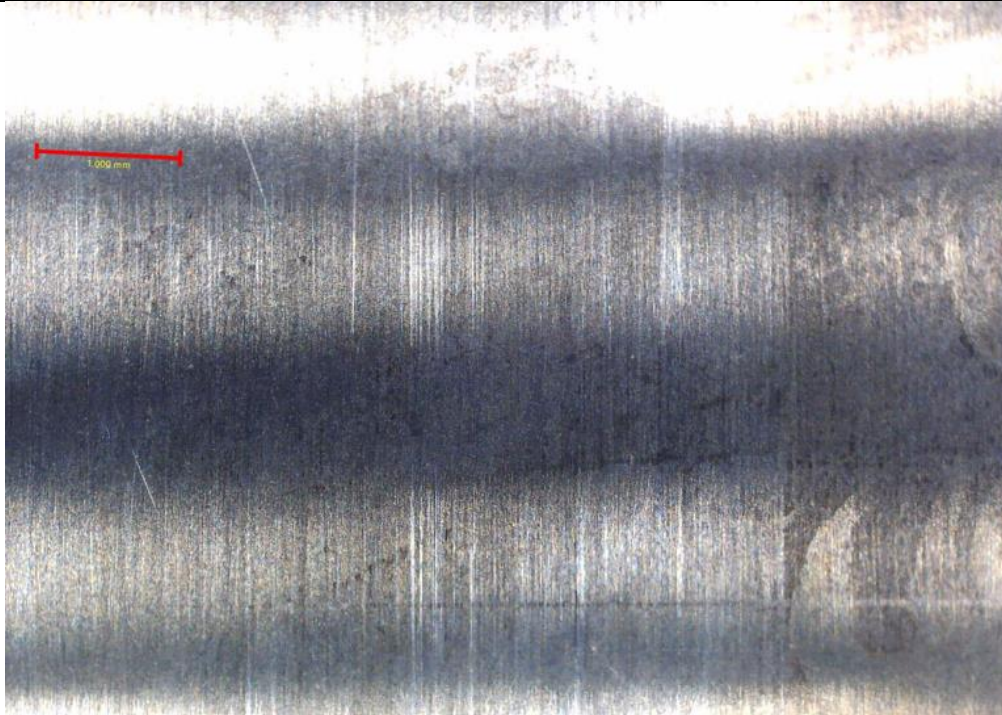


**Slika 35. Površina prstena A1**

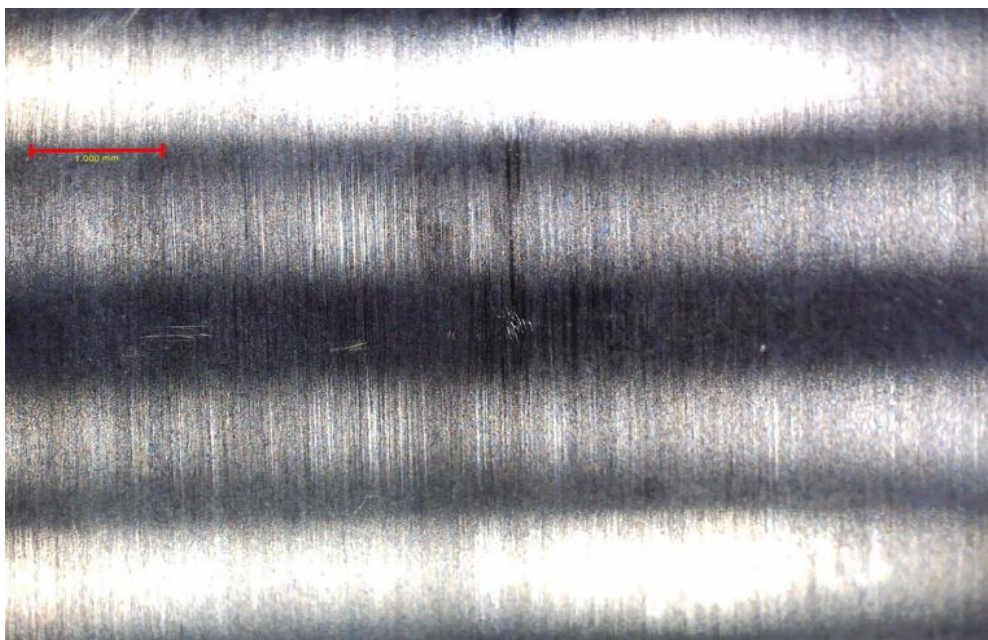
Kao što će se vidjeti u nastavku, kod prstena A2 je vrlo jasno vidljiva prisutnost abrazijskog trošenja.



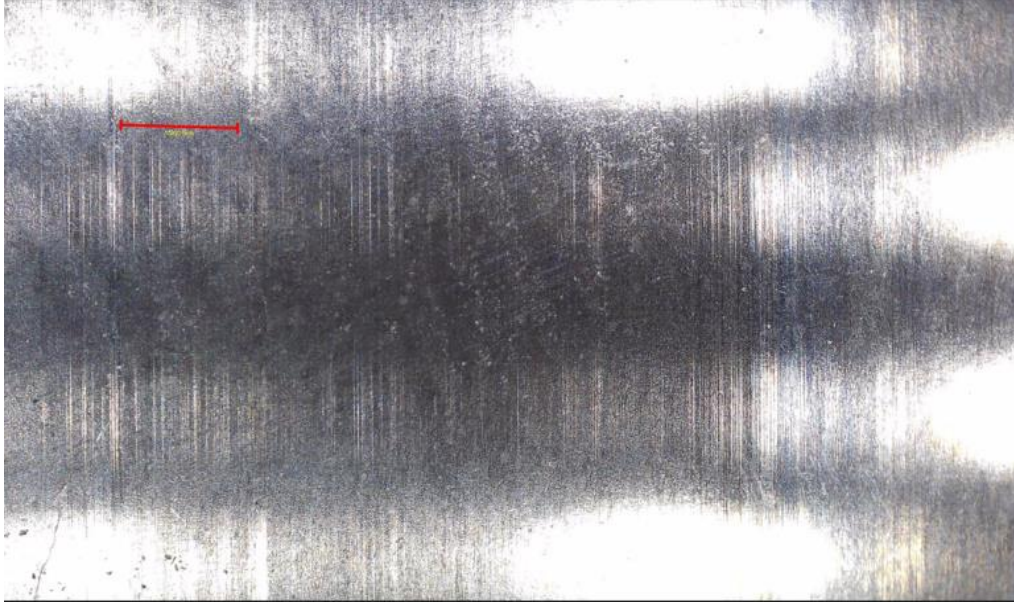
**Slika 36. Površina prstena A2**



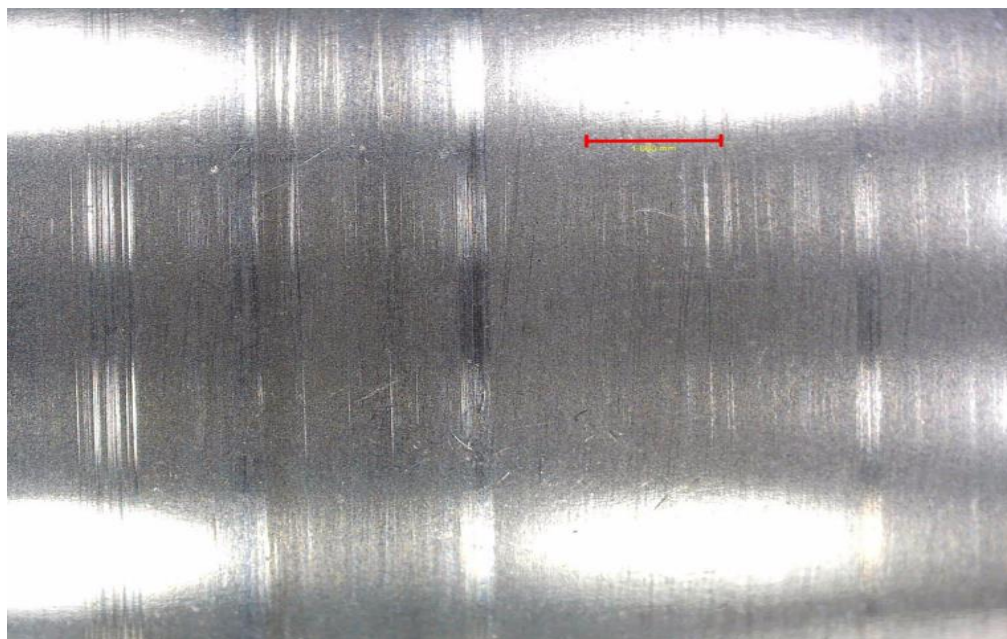
**Slika 37. Površina prsten B1**



**Slika 38. Površina prstena B2**



**Slika 39. Površina prstena C1**



**Slika 40. Površina prstena C2**

### 5.3. Mjerenje vibracija ležajeva

Mjerenje vibracija provedeno je tzv. mjeračem vibracija VM-6360 koji je preko USB priključka spojen na računalo. Na mjerač je bila priključena sonda koja je bila spojena na vanjski prsten ispitivanog igličastog ležaja. Vibracije su mjerene na Proxxon bušilici pri tri brzine vrtnje: 945 o/min, 1025 o/min i 1215 o/min. Postav pokusa i mjerač vibracija, su prikazani na slikama 41 do 43.



Slika 41. Mjerač vibracija VM-6360



Slika 42. Sonda za mjerenje vibracija spojena na vanjski prsten ležaja



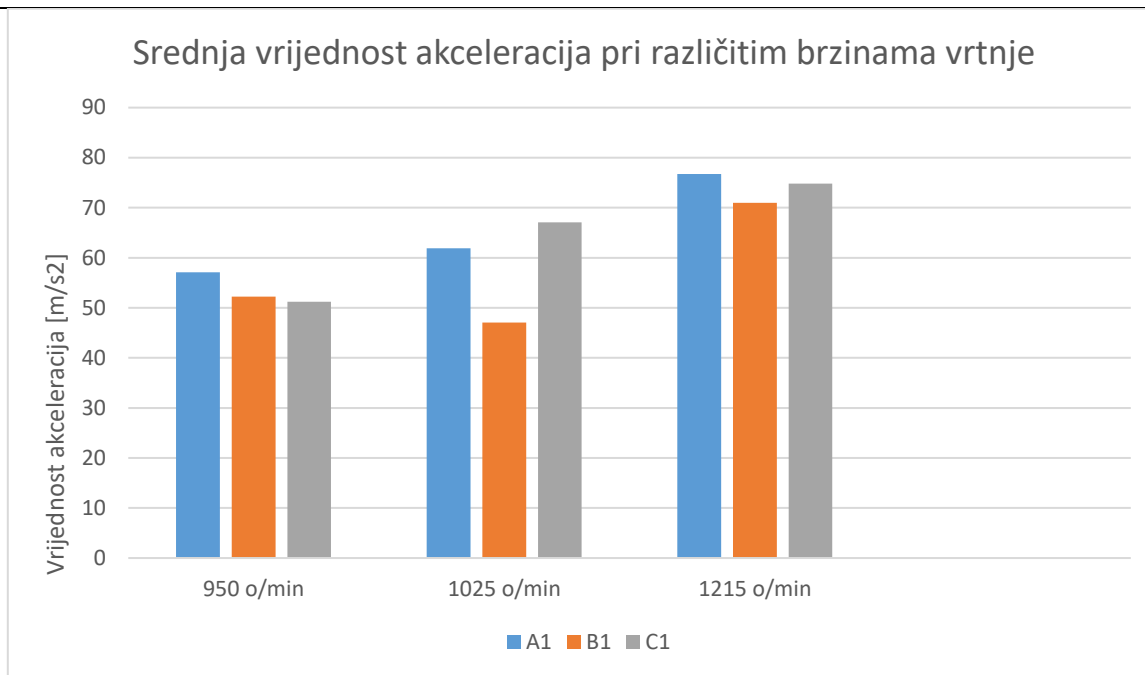


**Slika 43. Bušilica Proxxonn za pogon ležaja zadanim brzinama vrtnje**

Cilj pokusa bio je utvrditi kako različito obrađeni prsteni i brzina vrtnje utječu na vibracije i rotaciju igličastih ležajeva. Izračunate su srednje vrijednosti akceleracije i pomaka za tri brzine vrtnje. Akceleracija, ukazuje koliko unutarnji prsten pri rotaciji udara u vanjski prsten, dok pomak označava razliku između dva krajnja položaja u vibraciji prstena. Rezultati mjerenja akceleracije vibracija su prikazani u tablici 2 i na slici. 44.

**Tablica 2. Srednja vrijednost akceleracije vibracija igličastih ležaja**

Srednja vrijednost akceleracija [ $\text{m/s}^2$ ]			
	A1	B1	C1
950 o/min	57,1	52,25	51,2
1025 o/min	61,9	47,08	67,1
1215 o/min	76,7	71	74,8



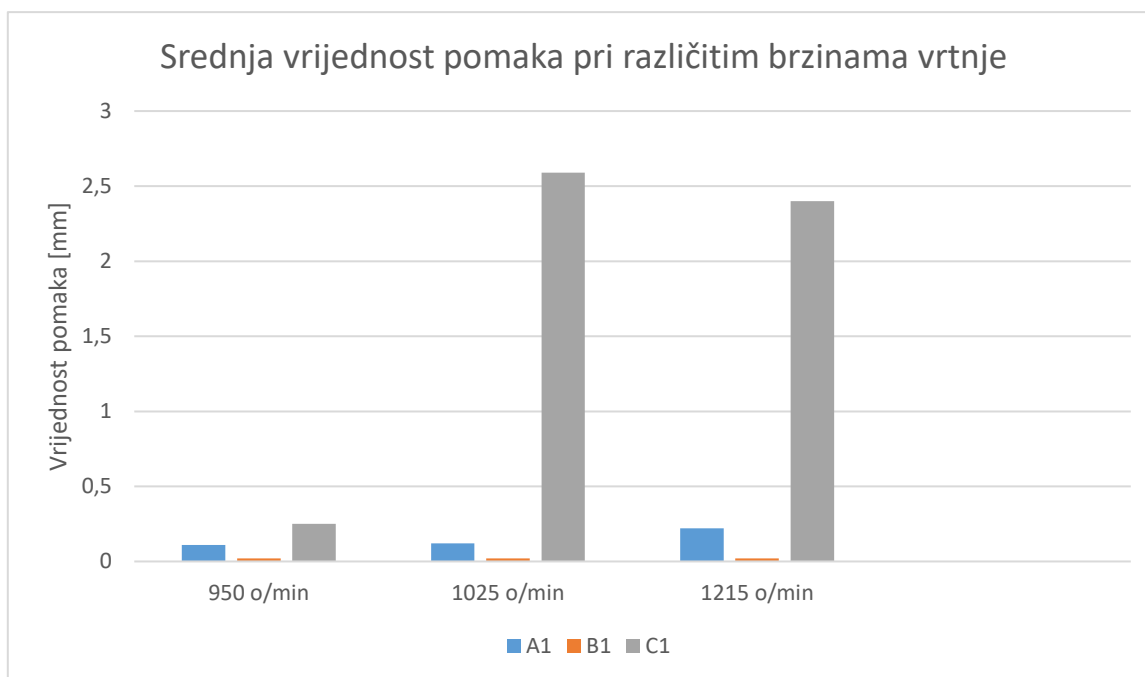
**Slika 44. Akceleracija vibracija igličastog ležaja ovisna o brzini vrtnje**

Srednja vrijednost akceleracija pri 950 o/min je najveća kod prstena u polaznom stanju. To je zato jer nitridni sloj prigušuje vibracije i djeluje samopodmazujuće. Srednja vrijednost akceleracija pri 1025 o/min najveća je kod prstena nitriranog u solnoj kupci TENIFER, to se može pripisati trošenju sloja spojeva. Srednja vrijednost akceleracija pri najvišoj testiranoj brzini okretanja, onoj od 1215 o/min, najveća je kod prstena u polaznom stanju. Usporedbom rezultata mjerenja akceleracije vibracija kod promjenjive brzine vrtnje, može se zaključiti da s porastom brzine vrtnje, rastu i vibracije.

Rezultati mjerenja pomaka vibracija su prikazani u tablici 3 i na slici. 45.

**Tablica 3. Srednja vrijednost pomaka vibracija igličastih ležaja**

Srednja vrijednost pomaka [mm]			
	A1	B1	C1
950 o/min	0,11	0,02	0,25
1025 o/min	0,12	0,02	2,59
1215 o/min	0,22	0,02	2,40



**Slika 45. Pomak vibracija igličastog ležaja ovisna o brzini vrtnje**

Pri brzini od 925 o/min najveću srednju vrijednost pomaka 0,25 mm imao je prsten nitriran u solnoj kupci TENIFER. Najmanju srednju vrijednost pomaka 0,02 mm imao je prsten nitriran u plazmi.

Pri brzini od 1025 o/min, najveću vrijednost pomaka 2,59 mm opet je imao prsten nitriran u solnoj kupci TENIFER, dok je najmanju vrijednost pomaka 0,02 mm imao prsten nitriran u solnoj plazmi. Njemu se duljina pomaka nije promijenila s brojem okretaja.

Pri najvećoj brzini u pokusu od 1215 o/min, najveću srednju vrijednost pomaka imao je prsten nitriran u solnoj kupci TENIFER, ali mu je vrijednost ovaj put nešto manja nego pri 1025 o/min. Najmanju vrijednost opet je imao prsten nitriran u plazmi.

Usporedbom svih vrijednosti, može se utvrditi da daleko najmanji pomak ima prsten nitriran u plazmi. Prstenu u polaznom stanju pomak raste s povećanjem brzine, dok prstenu nitriranom u solnoj kupci TENIFER pomak znatno raste u odnosu na početan broj okretaja.

#### 5.4. Mjerenje buke ležaja

Za snimanje buke su korišteni mikrofon, ručno napravljena kutija za zvučnu izolaciju i računalni program za snimanje zvuka „Audacity.“ Zvuk je, kao i vibracije, snimljen pri tri brzine vrtnje: 950 o/min, 1025 o/min i 1215 o/min u trajanju od 60 sekundi, ali je zbog potreba istraživanja za svaku brzinu vrtnje u obzir uzet vremenski interval od 10 sekundi. Na slici 46. i 47. vidljivi su mikrofon i postav za snimanje buke i vibracija na početku pokusa.



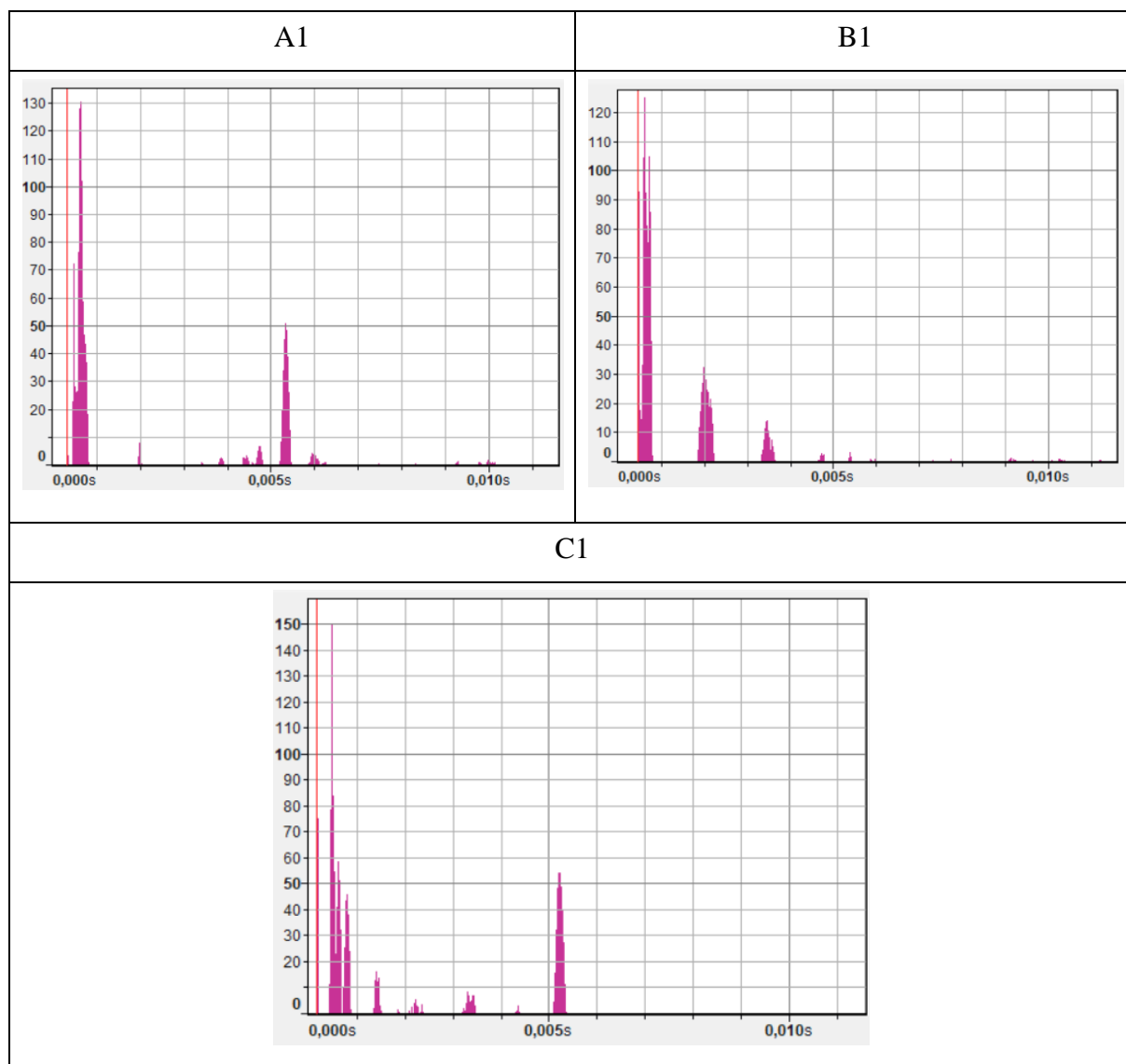
Slika 46. Mikrofon



Slika 47. Postav za snimanje buke i vibracija igličastog ležaja

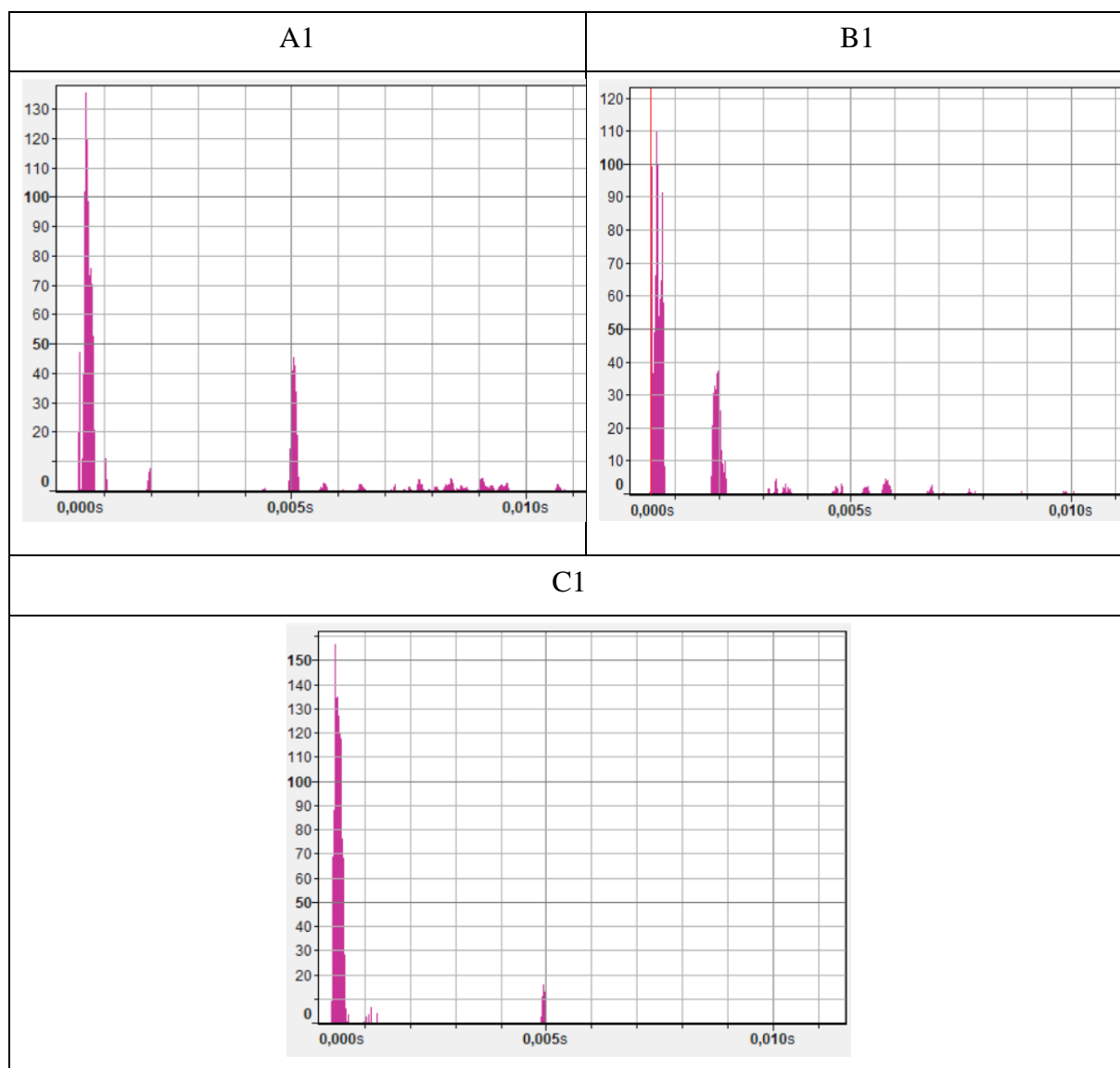
U tablicama 4 do 6 prikazan je intenzitet buke na karakterističnim frekvencijama nakon Fourierove analize određen u računalnom programu Audacity iz vremenskog zapisa buke ležaja.

**Tablica 4. Buka igličastih ležajeva pri brzini vrtnje 950 o/min**



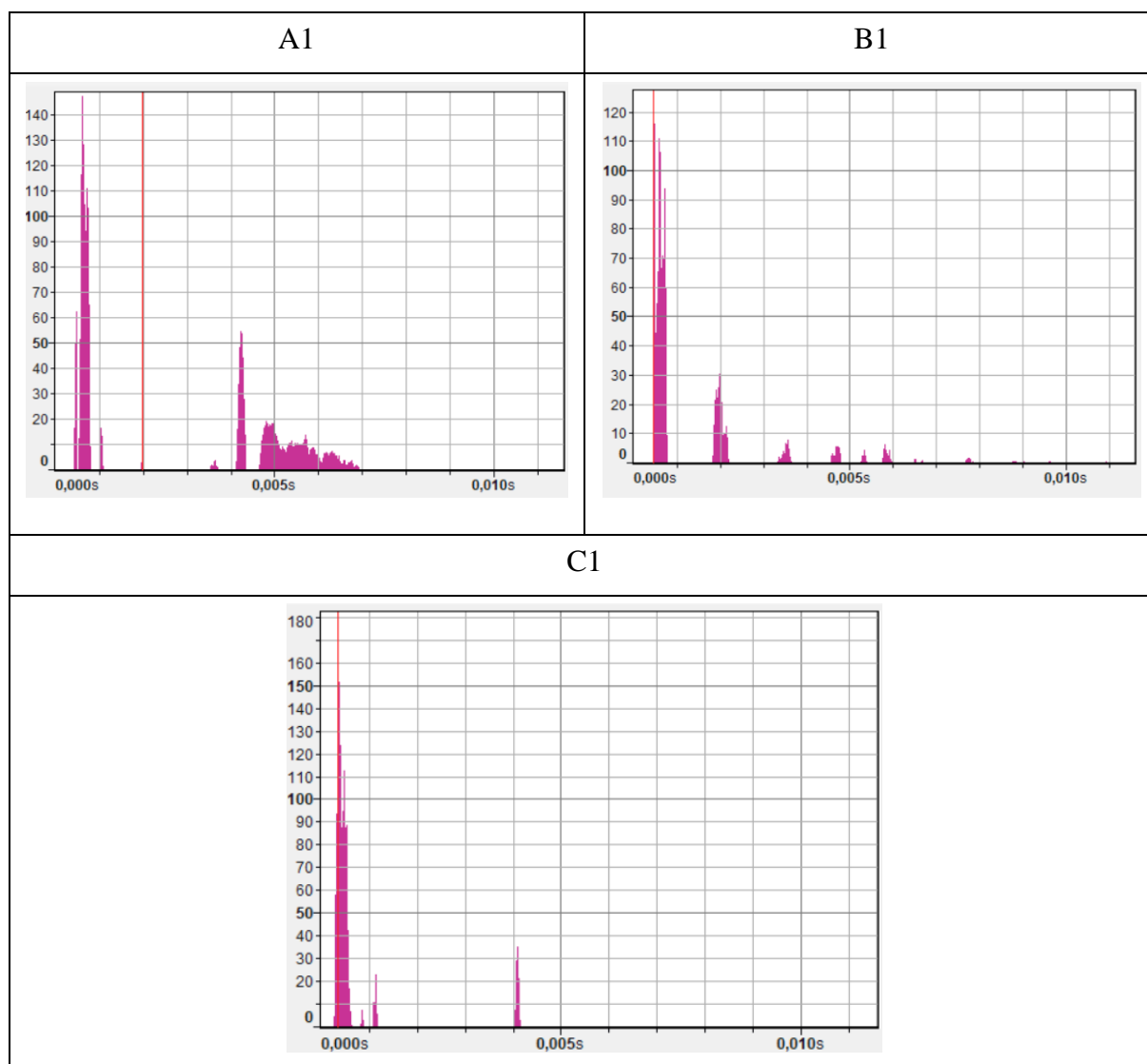
Pri brzini vrtnje ležajeva od 950 o/min, najglasniji je bio ležaj nitriran u solnoj kupci TENIFER, a najtiši je bio ležaj nitriran u plazmi.

Tablica 5. Buka igličastih ležajeva pri brzini vrtnje 1025 o/min



Pri brzini vrtnje od 1025 o/min, najglasniji je također bio ležaj nitriran u solnoj kupci tenifer, dok je najtiši bio onaj nitriran u plazmi.

Tablica 6. Buka igličastih ležajeva pri brzini vrtnje 1215 o/min



Pri najvećoj testiranoj brzini okretanja, najglasniji je opet bio ležaj nitriran u solnoj kupci TENIFER, a najtiši je bio prsten nitriran u plazmi.

Nakon provedene analize buke, može se zaključiti da nitriranje u plazmi smanjuje buku ležajeva. Također je jasno vidljivo da je buka svih ležajeva proporcionalna sa brzinom vrtnje.

## 5.5. Mjerenje zagrijavanja ležajeva

Cilj ovog dijela pokusa bio je utvrditi zagrijavanje ležaja te na koji način porast temperature ovisi o stanju površine i brzini vrtnje ležaja. Termovizijskom kamerom (slika 48.) spojenom na mobitel snimljen je ležaj tijekom tri minute pri čemu je u prvoj minuti primjenjena brzina vrtnje od 950 o/min, potom u drugoj minuti 1025 o/min i u posljednjoj minuti pokusa 1215 o/min. Fotografije dobivene kamerom analizirane su u računalnom programu „ImageJ“ kojim je određena razina svjetloće na pojedinom dijelovima slike zagrijavanog ležaja. Temperatura je mjerena na vanjskom i unutarnjem dijelu igličastog ležaja, a njezine vrijednosti nakon 60 s vrtnje prikazane su u tablici 7. U tablicama 8 do 10. prikazane su fotografije pri odabranim brzinama vrtnje.



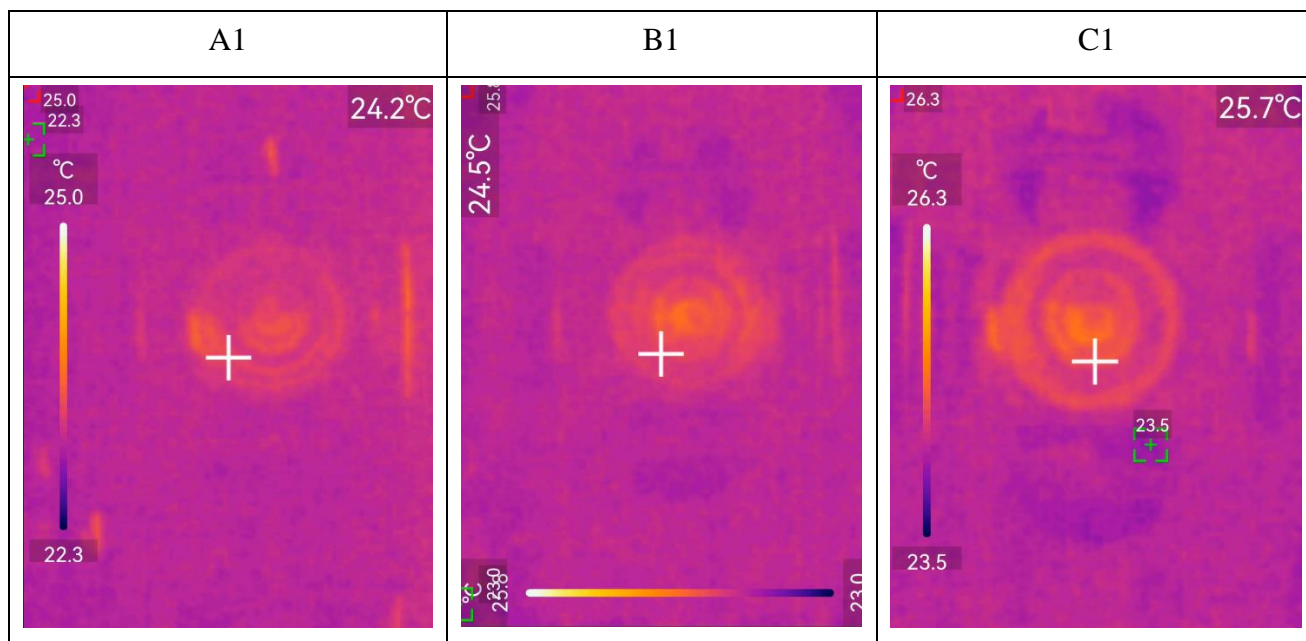
Slika 48. Termovizijska kamera

Tablica 7. Temperature ležajeva pri zadanim okretajima

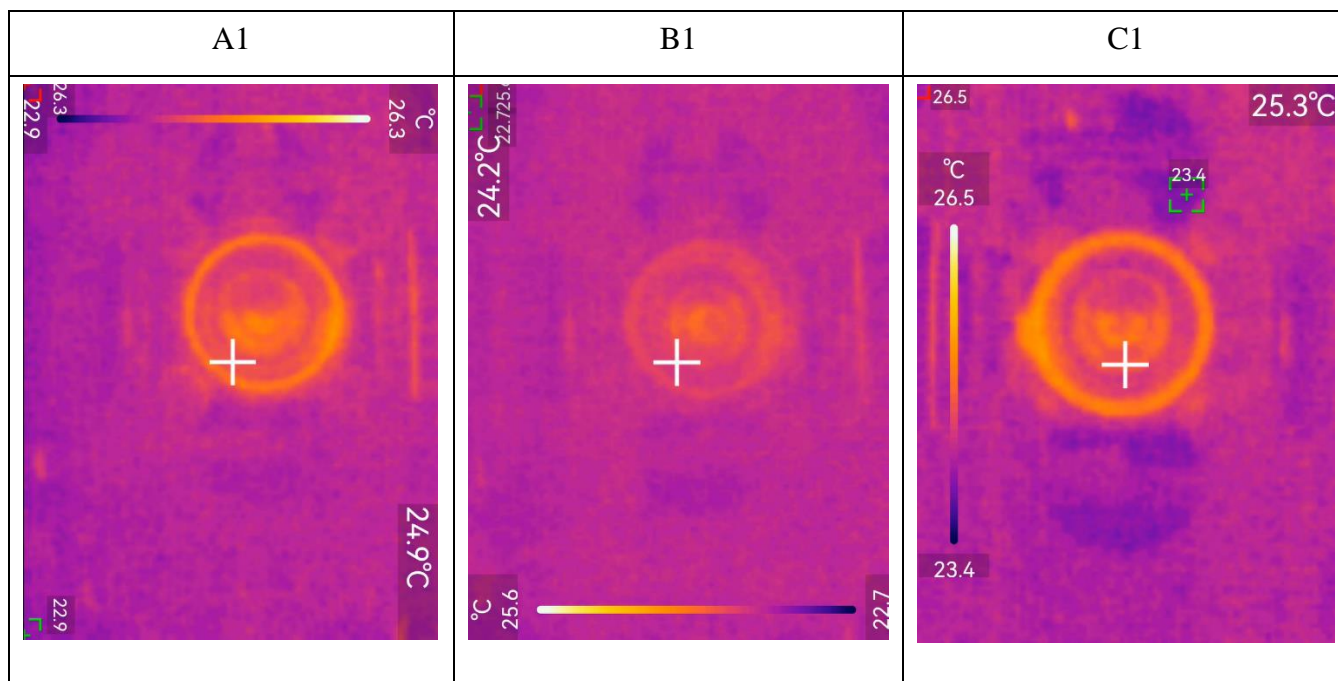
Brzina vrtnje	Temperatura, °C		
	A1	B1	C1
950 o/min	25,00	25,58	26,30
1025 o/min	26,29	25,60	26,50
1215 o/min	26,01	25,92	27,38

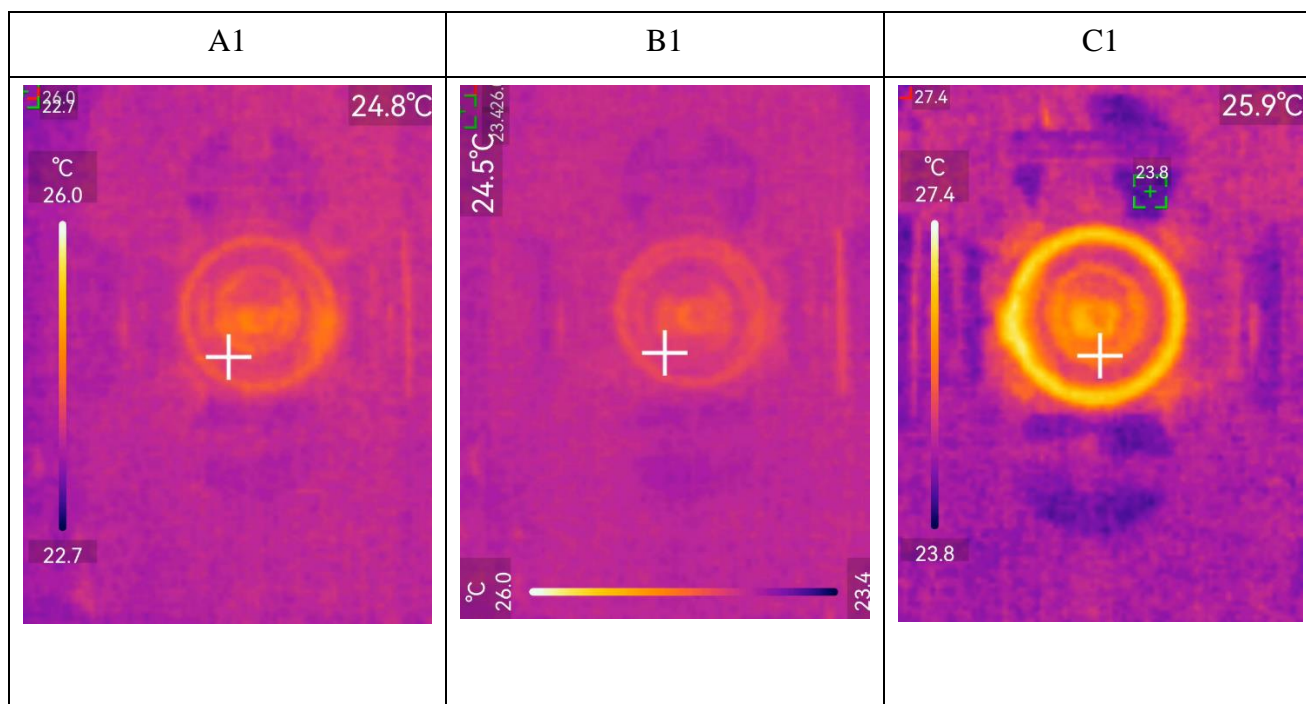


Tablica 8. Fotografije termovizijske kamere pri brzini vrtnje ležaja od 950 o/min



Tablica 9. Fotografije termovizijske kamere pri brzini vrtnje ležaja od 1025 o/min



**Tablica 10. Fotografije termovizijske kamere pri brzini vrtnje ležaja od 1215 o/min**

Iz navedenih rezultata, jasno se da zaključiti da se povećanjem brzine povećava i temperatura. Zagrijavanje traje sve dok se ne postigne radna temperatura i onda temperatura stagnira sve dok ležaj ne prestane s vrtnjom. Nakon vrtnje se postepeno hladi do sobne temperature. Najjasnija razlika između vanjskog, unutarnjeg prstena i „okoline“ vidljiva je pri 1215 o/min kod ležajeva čiji je unutarnji prsten nitriran u solnoj kupci TENIFER. Taj prsten ujedno ima i najveći porast temperature od 1,08 °C. Najmanji porast temperature od 0,34 °C imao je ležaj nitriran u plazmi dok je polazni ležaj imao porast temperature od 1,01 °C

Kod svih nitriranih prstenova je vidljivo da se unutarnji prsten zagrijao manje nego vanjski. Iz toga se također može zaključiti da nitriranje povoljno utječe na zagrijavanje ležajeva. Ležaj nitriran u solnoj kupci TENIFER imao je najvišu temperaturu na svim brzinama vrtnje, dok je najmanju temperaturu imao prsten nitriran u plazmi.

## 5.6. Diskusija rezultata

U eksperimentalnom dijelu rada, provedena su ispitivanja na tri različita igličasta ležajeva. Vanjski prsten sva tri ležaja bio je isti i neobrađen dok je jedan unutarnji prsten bio neobrađen, drugi nitriran u plazmi na 480 °C u trajanju od 7 sati, a treći nitriran u solnoj kupci TENIFER na 580 °C u trajanju od 2 sata. Svi ležajevi napravljeni su od DIN 100Cr6 čelika i ispitivani na buku, vibracije te im je mjerena temperatura. Sve se odvijalo na tri različite brzine okretanja: 950, 1025 te 1215 okretaja po minuti. Prije i nakon pokusa ležajevima je ispitana hrapavost, snimljeni su parametri hrapavosti, profili hrapavosti i mikroskopskom kamerom im je fotografirana površina kako bi se mogli usporediti rezultati i razlučiti kako postupak nitriranja utječe na promatrana svojstva površine unutrašnjeg prstena i ležaja u cjelini.

Provedenih ispitivanjima utvrđeno je da se početna hrapavost nitriranih prstenova razlikuje od prstena u ne nitriranom stanju. Razlika nije prevelika te je to bitno za pokus kako bi se lakše mogla usporediti hrapavost nakon trošenja koje je trajalo sveukupno 3 minute. Nakon pokusa, vrijednost parametra hrapavosti Ra porasla je samo za polazno stanje prstena, dok se za nitrirane prstene vrijednost smanjila. To jasno dokazuje činjenicu da nitriranje dobro utječe na svojstva hrapavost te da su se slojevi kod nitriranih prstena uglašali.

Fotografije ležajeva prije i nakon trošenja pokazuju da je kod nenitriranog prstena došlo do većeg oštećenja površine nego kod ostala dva prstena.

Ispitivanjem vibracija ležajeva, odnosno mjerenjem pomaka i akceleracije utvrđeno je da pri brzini od 950 o/min nitridni sloj djeluje samopodmazujuće, odnosno da prigušuje vibracije zbog manjeg trenja. To potvrđuje činjenicu da je pri toj brzini najveće vibracije imao prsten u polaznom stanju. Pri brzini od 1025 o/min, najveću srednju vrijednost vibracija imao je prsten nitriran u solnoj kupci TENIFER što upućuje na to da je došlo do trošenja sloja spojeva. Pri najvećoj brzini, onoj od 1215 o/min, najveću srednju vrijednost vibracija opet je imao prsten u polaznom stanju.

Mjerenjem buke ležaja pri radu, ustanovljeno je da je pri sve tri brzine vrtnje (950, 1025 i 1215 o/min), najglasniji ležaj nitriran solnoj kupci TENIFER, dok je najmanji intenzitet buke prouzročio ležaj nitriran u plazmi.

Temperatura ležajeva je također ispitivana pri tri spomenute brzine vrtnje: 950, 1025 i 1215 o/min nakon 60 s vrtnje i onda im je izmjerena radna temperatura. Svaki ležaj se zagrije do radne temperatura koja ostaje jednaka sve dok mu se ne promijeni brzina vrtnje. Nakon što se prestanu vrtjeti, ležajevi se postepeno hlade na sobnu temperaturu. Najvišu temperaturu pri sve 3 brzine vrtnje postigao je prsten nitriran u solnoj kupci TENIFER, dok je najmanju temperaturu postigao prsten nitriran u plazmi.

I za kraj, kada se pogledaju ispitivana svojstva pri svakoj specifičnoj brzini (950, 1025, 1215 o/min) može se zaključiti da je povećanje brzine proporcionalno svim ispitivanim parametrima. Tako se povećanjem brzine, povećavaju i temperatura i buka i vibracije.

## 6. ZAKLJUČAK

U radu su provedena ispitivanja hrapavosti površine unutrašnjeg prstena igličastog ležaja NTN 2U1708 u polaznom stanju (A1) te nakon primjene nitriranja u plazmi (B1) i nitrokarburiranja u solnoj kupci TENIFER (C1). Nakon ugradnje prstena u igličasti ležaj provedena su ispitivanja vibracija, buke i zagrijavanja ležaja nakon 1 min vrtnje na brzinama 950 o/min, 1025 o/min i 1215 o/min bez podmazivanja u istom vanjskom prstenu s iglicama ugrađenim u kavez. Iz rezultata ispitivanja zaključuje se slijedeće:

- Ispitivanjem vibracija, ustanovljeno je da nitrirani prstenovi uzrokuju manje vibracije od ne nitriranog prstena. Najmanje vibracije imao je B1 prsten. Prsten C1 imao je zadovoljavajuće male vibracije, iako je pri brzini od 1025 o/min došlo do trošenja zone spojeva. Prsten A1 imao je najveće vibracije.
- Ispitivanjem buke došlo se do zaključka da je najtiši rad pri sve tri brzine okretanja imao prsten B1 (nitriran u plazmi.) Najglasniji rad imao je prsten nitriran u solnoj kupci TENIFER.
- Na površinama uzorka nakon trošenja, uočava se početak umora površine i adhezijskog trošenja. To upućuje da se, osim kotrljanja iglica ležaja, javilo i klizanje koje bi upotrebom maziva bilo manje ili ne bi ni postojalo.

U nastavku istraživanja utjecaja stanja površine prstenova na karakteristike ležaja, preporučuje se ispitivanje ležaja uz primjenu odgovarajućeg maziva, čime bi se obuhvatio utjecaj maziva na buku, vibracije i zagrijavanje ležaja.

---

**LITERATURA**

- [1] „Ležaj“ Wikipedia, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Le%C5%BEaj> (01.09.2024.)  
Thomas auf dem Brinke, Jürgen Crummenauer, Rainer Hans, Werner Ooppel.: Plasma-Assisted Surface Treatment; Nitriding, nitrocarburizing and oxidation of steel, cast iron and sintered materials, Germany; 2006. str. 4-71.
- [2] „Valjni ležaj“ Wikipedia, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Valjni\\_le%C5%BEaj](https://hr.wikipedia.org/wiki/Valjni_le%C5%BEaj) (01.09.2024.)
- [3] <https://www.roto-sisak.hr/lezaj-51206-codex/11570/product/>
- [4] [https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elementi\\_strojeva\\_10\\_lezaji.pdf](https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elementi_strojeva_10_lezaji.pdf)
- [5] <https://www.nskamericas-literature.com/en/rolling-bearings/> (01.09.2024.)
- [6] „Needle roller bearing“ Wikipedia, [https://en.wikipedia.org/wiki/Needle\\_roller\\_bearing](https://en.wikipedia.org/wiki/Needle_roller_bearing) (02.09.2024.)
- [7] <https://hr.galvanized-sheets.com/bearing-steel/> (02.09.2024.)
- [8] <https://www.astbearings.com/blog/heat-treatment-bearing-steels.html> (03.09.2024.)
- [9] <https://fractory.com/nitriding-explained/> (03.09.2024.)
- [10] <https://www.ibccoatings.com/salt-bath-nitriding-ferritic-nitrocarburizing-dhn-dhnc/>
- [11] Matijević B, Landek D., Grilec K.: Predavanja iz kolegija „Tribologija i inženjerstvo površina“, autorizirana predavanja. FSB, Zagreb; 2022.
- [12] <https://www.totalmateria.com/en-us/articles/nitriding/> (03.09.2024.)
- [13] Matijević B.: Predavanja iz kolegija „Toplinska obrada“, FSB, Zagreb; 2023.
- [14] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Hrapavost\\_povr%C5%A1ine](https://hr.wikipedia.org/wiki/Hrapavost_povr%C5%A1ine)
- [15] <https://www.timesaversint.com/knowledge-base/surface-roughness/>
- [16] <https://temp-pro.com/2023/06/26/the-comprehensive-guide-to-bearing-temperature-sensors/>
- [17] <https://www.rigbrsbearing.com/bearing-temperature-rise/>