

Utjecaj nitriranja na svojstva igličastih ležaja

Gašo, Marko Antonio

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:793460>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Marko Antonio Gašo

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Marko Antonio Gašo

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem svome mentoru prof. dr. sc. Darku Landeku, na uloženom vremenu, pomoći i savjetima tijekom izrade ovoga rada.

Posebno hvala mojoj obitelji i prijateljima na velikoj podršci tijekom studija.

Marko Antonio Gašo



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomске ispите
Povjerenstvo za završne i diplomске ispите 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: **Marko Antonio Gašo** JMBAG: **0035228377**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj nitriranja na svojstva igličastih ležaja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **The influence of nitriding on the properties of needle bearings**

Opis zadatka:

Prstenovi i valjna tijela igličastih ležajeva izloženi su u radu dinamičkim naprezanjima, kontaktnim pritiscima, trošenju i koroziji. Njihova trajnost u određenim uvjetima uporabe može se dodatno povećati nitriranjem površine unutrašnjeg prstena i primjenom odgovarajućeg maziva. U radu treba opisati konstrukcijske karakteristike igličastih ležaja, postupke nitriranja čelika za ležajeve te ispitivanje vibracija i buke valjnih ležaja.

U eksperimentalnom dijelu rada treba provesti nitriranje unutrašnjeg prstena istovrsnog igličastog ležaja izrađenog od čelika 100Cr6 u plazmi i u solnoj kupci. Na nitriranim i ne nitriranim igličastim ležajima, uz primjenu istog maziva provesti snimanje vibracija i buke pri različitim brzinama vrtnje. Na temelju rezultata ispitivanja predložiti optimalni postupak nitriranja unutrašnjeg prstena igličastog ležaja.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

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.

Zadatak zadan:


Prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
TEORIJSKI DIO	2
2. MATERIJAL ZA LEŽAJE.....	3
2.1. Valjni ležajevi	3
2.2. Igličasti ležajevi	5
2.3. Proračun radnog vijeka ležaja	8
2.4. Materijali za valjne ležaje	10
3. NITRIRANJE	11
3.1. Nitrokarburiranje u solnoj kupki.....	11
3.1.1. Postupak TENIFER-TUFFTRIDE.....	13
3.2. Plinsko nitriranje	15
3.3. Nitriranje u plazmi	16
4. ISPITIVANJE VIBRACIJA I ZAGRIJAVANJA LEŽAJA	20
4.1. Stvaranje vibracija i buke u ležajevima	20
4.2. Senzori za mjerenje vibracija ležaja.....	21
4.3. Mjerenje temperature ležaja.....	24
EKSPERIMENTALNI DIO.....	26
5. PLAN POKUSA I PRIPREMA ISPITNIH UZORAKA	27
5.1. Plan pokusa	27

5.2. Nitiranje ležajnih prstenova	27
5.3. Mjerni uređaji za ispitivanje vibracija igličastih ležaja	31
6. REZULTATI ISPITIVANJA	34
6.1. Mjerenje dimenzija nitriranih prstenova	34
6.2. Hrapavost površine	35
6.3. Ispitivanje vibracija igličastih ležaja.....	40
6.4. Ispitivanje buke	46
6.5. Mjerenje temperature zagrijavanja igličastog ležaja.....	50
6.6. Analiza trošenja površine unutrašnjeg prstena ležaja	53
6.7. Diskusija rezultata.....	56
7. ZAKLJUČAK.....	58
LITERATURA.....	59

POPIS SLIKA

Slika 1.	Osnovne vrste ležaja: a) klizni ležaj, b) valjni ležaj [1]	3
Slika 2.	Smjer sile trenja valjanja u odnosu na smjer gibanja valjnog tijela [4].....	4
Slika 3.	Podjela valjnih ležaja: a) Kuglični ležaj, b) Valjni ležaj, c) Igličasti ležaj [1].....	5
Slika 4.	Podjela i oznake igličastih ležajeva [5]	6
Slika 5.	Izvedbe igličastih ležaja: a) ležaj s vanjskim i unutarnjim prstenom, b) ležaj bez prstena [3] ..7	
Slika 6.	Igličasti ležaji s kavezom bez unutrašnjeg prstena: a) kruti ležaj, b) samoprilagodljivi ležaj [3] ..7	
Slika 7.	Ljuskanje valjnog tijela i unutarnjeg prstena uslijed umora površine [6]	8
Slika 8.	Oštećenja nastala tijekom rada ležaja: umor površine i adhezijsko trošenje [7]... ..8	
Slika 9.	Uređaji za nitriranje u solnim kupkama [11].....	12
Slika 10.	Mikrotvrdoća i dubina nitrokarburiranog sloja različitih kvaliteta čelika [10].....	13
Slika 11.	Osnovna reakcija u talini soli [14]	14
Slika 12.	Dijagram postupka TUFFTRIDE QPQ [11]	15
Slika 13.	Jamske peći za nitriranje u plinu [11]	16
Slika 14.	Raspored mikrotvrdoće u površinskom sloju čelika nitriranog u plazmi [10]	17
Slika 15.	Struktura zone spojeva i difuzijske zone na čeliku nitriranom u plazmi [10].....	17
Slika 16.	Osnovne strukture zone spojeva nakon nitriranja čelika u plazmi [11]	18
Slika 17.	Shematski prikaz uređaja za nitriranje u plazmi [11].....	19
Slika 18.	Vremenski dijagrami brzine vibracija ispravnog i neispravnog ležaja [17].....	21
Slika 19.	Senzori za mjerenje vibracija [19].....	22
Slika 20.	Prikaz rezultata mjerenja vibracija [18]	23
Slika 21.	Nemodificirani DIN 100Cr6 prsten	27
Slika 22.	Vakuumska peć za nitriranje u plazmi Rübzig PN 70/90	29
Slika 23.	Prstenovi prije nitriranja u plazmi	29
Slika 24.	Prstenovi nakon nitriranja u plazmi.....	30
Slika 25.	Nitrirani prstenovi	30
Slika 26.	Uređaj za ispitivanje vibracija	31
Slika 27.	Mjerač jačine zvuka.....	32
Slika 28.	Termalna kamera UT1120M.....	32
Slika 29.	Laserski tahometar UT373	33
Slika 30.	INSIZE Uređaj za mjerenje odstupanja od kružnosti.....	35

Slika 31.	Usporedba parametara hrapavosti ispitnih uzoraka.....	37
Slika 32.	Profil hrapavosti na nemodificiranom prstenu	37
Slika 33.	Profil hrapavosti na prstenu nitriranom u plazmi PN450/6h.....	38
Slika 34.	Profil hrapavosti prstenu nitriranom u plazmi PN500/4h	38
Slika 35.	Profil hrapavosti na plinski nitriranom prstenu	38
Slika 36.	Profil hrapavosti na plinski nitriranom prstenu s prorezom	39
Slika 37.	Profil hrapavosti na prstenu nitrokarburiranom postupkom TENIFER-A	39
Slika 38.	Profil hrapavosti na prstenu nitrokarburiranom postupkom TENIFER-B	39
Slika 39.	Srednja vrijednost akceleracije ležaja pri brzini vrtnje 510 okr/min.....	40
Slika 40.	Srednja vrijednost brzina udarca pri brzini vrtnje ležaja 510 okr/min	41
Slika 41.	Srednja vrijednost pomaka ležaja pri brzini vrtnje 510 okr/min	41
Slika 42.	Srednja vrijednost akceleracije ležaja pri brzini vrtnje 725 okr/min.....	42
Slika 43.	Srednja vrijednost brzina udarca pri brzini vrtnje ležaja 725 okr/min	42
Slika 44.	Srednja vrijednost pomaka ležaja pri brzini vrtnje 725 okr/min	42
Slika 45.	Srednja vrijednost akceleracije ležaja pri brzini vrtnje 1500 okr/min.....	43
Slika 46.	Srednja vrijednost brzina udarca pri brzini vrtnje ležaja 1500 okr/min	43
Slika 47.	Srednja vrijednost pomaka ležaja pri brzini vrtnje 1500 okr/min	44
Slika 48.	Raspon frekvencija vibracija pri brzini vrtnje ležaja 510 okr/min	44
Slika 49.	Raspon frekvencija vibracija pri brzini vrtnje ležaja 725 okr/min	45
Slika 50.	Raspon frekvencija vibracija pri brzini vrtnje ležaja 1500 okr/min	45
Slika 51.	Polazni prsten fotografiran termokamerom pri 1500 okr/min.....	51
Slika 52.	Prsten PN 450/6h fotografiran termokamerom pri 1500 okr/min	51
Slika 53.	Prsten PN 500/4h fotografiran termokamerom pri 1500 okr/min	52
Slika 54.	Plinski nitriran prsten s prorezom slikan termokamerom pri 1500 okr/min	52
Slika 55.	Prsten nitriran postupkom TF1 fotografiran termokamerom pri 1500 okr/min	53
Slika 56.	Tragovi trošenja na površini nenitriranog prstena.....	54
Slika 57.	Tragovi trošenja na unutrašnjem prstenu PN 450/6h ležaja nitriranom u plazmi .	54
Slika 58.	Tragovi trošenja na unutrašnjem prstenu PN 500/4h ležaja nitriranom u plazmi .	55
Slika 59.	Tragovi trošenja na plinski nitriranom prstenu s prorezom	55
Slika 60.	Tragovi trošenja na prstenu nitrokarburiranom postupkom TENIFER.....	56

POPIS TABLICA

Tablica 1. Parametri nitiranja ležajnog prstena u plazmi za uzorak P1	28
Tablica 2. Parametri nitiranja ležajnog prstena u plazmi za uzorak P2	28
Tablica 3. Vrijednosti vanjskih i unutarnjih promjera prstenova, te njihova srednja vrijednost	34
Tablica 4. Izmjerene vrijednosti odstupanja od kružnosti.....	35
Tablica 5. Vrijednosti parametara hrapavosti za ispitane prstenove igličastog ležaja	36
Tablica 6. Amplituda zvuka ovisna o frekvenciji buke pri brzini vrtnje ležaja 510 o/min ...	47
Tablica 7. Amplituda zvuka ovisna o frekvenciji buke pri brzini vrtnje ležaja 725 o/min ...	48
Tablica 8. Amplituda zvuka ovisna o frekvenciji buke pri brzini vrtnje ležaja 1500 o/min .	49
Tablica 9. Srednje temperature prstenova pri različitim brzinama vrtnje	50

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
L_{10}	10^6 rotacija	Osnovni radni vijek ležaja
C	N	Osnovna dinamička nosivost
P	N	Radno opterećenje ležaja
p	-	EkspONENT potencije za ležajeve
r	r/min	Brzina vrtnje
L_{10h}	h	Osnovni nazivni resurs
L_{na}	10^6 rotacija	Prilagođeni nazivni resurs
α_1	-	Faktor pouzdanosti
α_2	-	Faktor materijala
α_3	-	Faktor radnih uvjeta

SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada opisane su konstrukcijske karakteristike igličastih ležaja, postupci nitriranja te metode ispitivanja vibracije, buke i zagrijavanja ležaja. U eksperimentalnom dijelu rada provedena su nitriranja u plazmi, solnoj kupci TENIFER i plinskoj atmosferi amonijaka na prstenima igličastog ležaja od čelika 100Cr6. Na nitriranim prstenima provedena su mjerenja hrapavosti površine i odstupanja od kružnosti te dinamička ispitivanja vibracija, buke i zagrijavanja igličastog ležaja sastavljenog od nenitriranog vanjskog prstena s iglicama i nitriranog unutrašnjeg prstena brzinama vrtnje 510 o/min, 725 o/min i 1500 o/min. Na temelju provedenih ispitivanja najbolja ležajna svojstva pokazali su unutrašnji prsten nitrokarburiran postupkom TENIFER i prsten nitriran u plazmi s parametrima 450 °C/6h.

Ključne riječi: 100Cr6, prsten igličastog ležaja, nitriranje u plazmi, plinsko nitriranje, TENIFER, vibracije ležaja, buka ležaja, zagrijavanje ležaja

SUMMARY

In the theoretical part of the work, the structural characteristics of needle bearings, nitriding procedures, and methods of testing vibration, noise and bearing heating are described. In the experimental part of the work, nitriding was carried out in plasma, TENIFER salt and ammonia gas atmosphere on the rings of the needle bearing made of steel 100Cr6. On the nitrided rings, measurements of surface roughness and deviation from circularity were carried out, as well as dynamic tests of vibrations, noise and wear of needle bearing composed of a non-nitrided outer ring with needles and a nitrided inner ring at rotation speeds of 510 rpm, 725 rpm and 1500 rpm. Based on tests carried out, the inner ring nitrocarburized by the TENIFER process and the ring nitrided in plasma with parameters 450 °C/6h showed the best bearing properties.

Key words: 100Cr6, needle bearing ring, plasma nitriding, gas nitriding, TENIFER, bearing vibrations, bearing noise, bearing heating

1. UVOD

Valjni ležaj omogućuju vođenje pokretnih strojnih dijelova, umetnutih u odgovarajuće kućište. Sastavljeni su od unutarnjeg i vanjskog prstena (ili ploče kod aksijalnih ležajeva), između kojih se u odgovarajuće oblikovanom kavezu vrte valjna tijela. Među valjnim tijelima prevladava trenje valjanja, premda se može u manjoj mjeri pojaviti i trenje klizanja. Valjni ležajevi mogu istovremeno prenositi poprečno i uzdužno opterećenje, samo poprečno ili samo uzdužno opterećenje. Obzirom na opterećenje koje prevladava razlikuju se poprečni i uzdužni valjni ležajevi. Prema rasporedu valjnih tijela ležajevi mogu biti jednoredni i dvoredni, a prema obliku kuglični, valjkasti, igličasti, bačvasti i stožasti [1].

Nitriranje je toplinsko-kemijska obrada kod koje se površina željeznog materijala obogaćuje dušikom. Nitriranje se provodi radi postizanja visoke površinske tvrdoće, poboljšanja otpornosti na trošenje i umor, bolje korozijske otpornosti s neznatnim promjenama dimenzija i svojstava jezgre obrađivanih predmeta. U radu će se provesti nitriranje u plazmi, solnoj kupci i plinu. Na prstenovima valjnih ležaja ispitati će se hrapavost površine, provesti snimanje vibracija, buke i temperature pri brzinama vrtnje od 510 o/min, 725 o/min i 1500 o/min te će se na temelju toga predložiti postupak nitriranja koji će omogućiti rad igličastog ležaja s najmanjim vibracijama i zagrijavanjem..

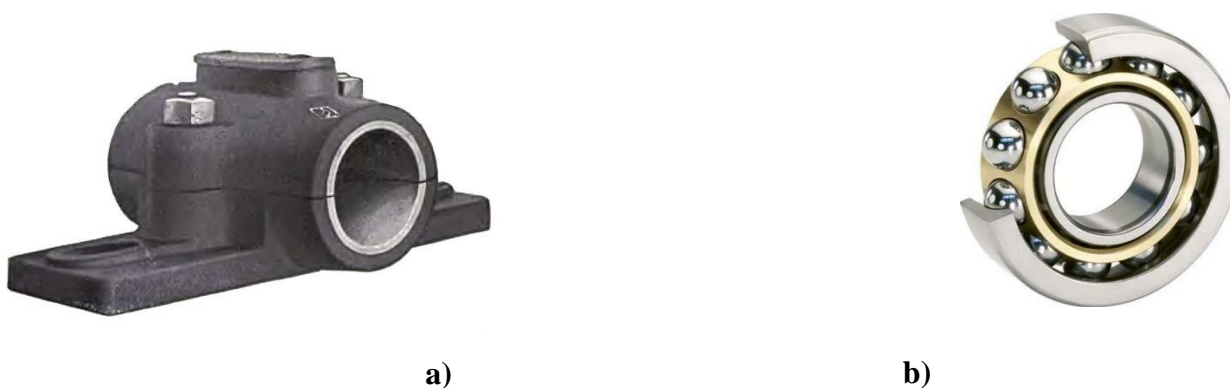
TEORIJSKI DIO

2. MATERIJALI ZA VALJNE LEŽAJE

Ležaj je element konstrukcije pomoću kojeg se ostvaruje nošenje, vođenje ili oslanjanje pokretnih dijelova mehanizma ili konstrukcije na mirujuće dijelove poput postolja ili kućišta. Ležaji primarno prenose gibanje i sile s jednog strojnog dijela na drugi uz smanjivanje gubitaka trenja između povezanih dijelova mehanizama. Prema smjeru djelovanja sila, ležaj može biti poprečni i uzdužni [1]:

- Poprečni ili radijalni ležaj prenosi isključivo sile okomite na os ležaja
- Uzdužni ili aksijalni ležaj preuzima one sile koje djeluju u smjeru njegove osi

Prema načinu rada ležajevi se dijele na klizne i kotrljajuće. Razliku je moguće vidjeti na slici 1.



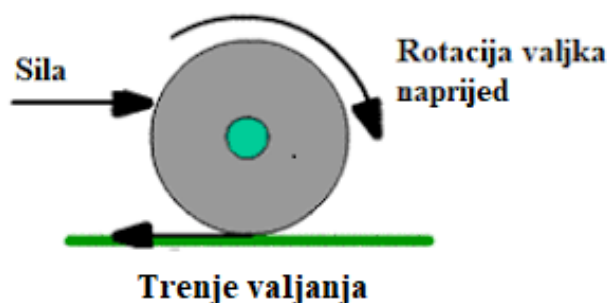
Slika 1. Osnovne vrste ležaja: a) klizni ležaj, b) valjni ležaj [1]

Ispravan rad ležajeva je često od presudnog značenja za ispravan rad i vijek mehanizama, konstrukcija i strojeva koje su ugrađeni. Zbog toga je važno odabrati odgovarajući ležaj za konkretnu namijenu prema odgovarajućem proračunu nosivosti površina ležanih tijela i očekivanom eksploatacijskom vijeku konstrukcije, sklopa stroja ili naprave. Pri tome se moraju uzeti u razmatranje brojni čimbenici, kao što su promjer osovine ili vratila, način opterećenja, brzina vrtnje, zahtijevani životni vijek, radni uvjeti rada (temperatura, okolina) itd. [1]

2.1. Valjni ležajevi

Valjni (kotrljajući) ležajevi sastavljeni su od unutarnjeg i vanjskog prstena (ili ploče kod aksijalnih ležajeva), između kojih se u odgovarajuće oblikovanom kavezu vrte valjna tijela.

Između valjnih tijela prevladava trenje valjanja. [2] . Smjer sile trenja valjanja suprotan je smjeru aktivne sile koja uzrokuje valjenje (slika 2). Otpori koji se pojavljuju pri trenju valjanja znatno su manji od onih pri trenju klizanja, jer se pri tome teorijski dodir površina u međusobnom relativnom kretanju svodi na točke, kad su valjni elementi kuglice, odnosno na izvodnice kad su to valjci, iglice, stošci ili bačvasti elementi. Ova predodžba u potpunosti vrijedi samo za idealno kruta tijela bez elastične defomacije. Uz neizbježnu prisutnost elastične defomacije valjnih tijela tijekom rada ležaja između njih se u većoj ili manjoj mjeri pojavljuje i trenje klizanja. [3]



Slika 2. a) Smjer sile trenja valjanja u odnosu na smjer gibanja valjnog tijela[4]

Valjni ležajevi mogu istovremeno prenositi radijalno i aksijalno opterećenje, samo radijalno ili samo aksijalno opterećenje. Obzirom na opterećenje koje prevladava razlikuju se radijalni i aksijalni valjni ležajevi. Valjna tijela su jednostavnih geometrijskih oblika, vođena u kavezu koji sprječava njihov međusoban dodir, a istovremeno su ravnomjerno raspoređena po obodu ležaja. [2]

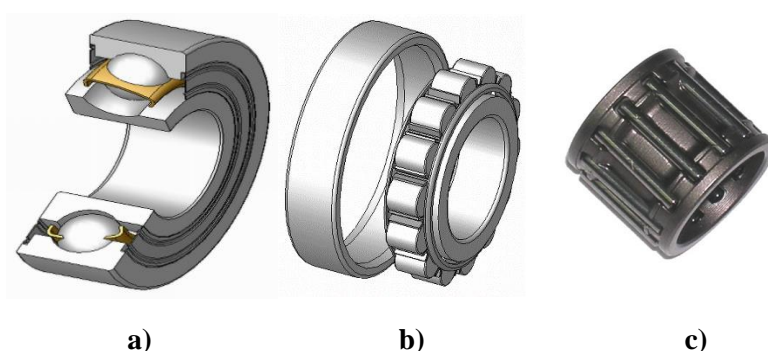
Valjni ležajevi imaju, u usporedbi s kliznim ležajevima sljedeće prednosti [2]:

1. Koeficijent trenja je zbog trenja valjanja, 25 % do 50 % niži nego kod kliznih ležajeva
2. Visoka nosivost pri relativno malim dimenzijama
3. Zbog manjeg trenja, manji su gubici snage
4. Manje se zagrijavaju
5. Precizna vrtnja zbog manje zračnosti među elementima
6. Jednostavno održavanje
7. Upotrebljivi za sve položaje vratila
8. Standardizirani su i jednostavnija je zamjena dotrajalog ležaja.

Nedostaci valjnih ležajeva jesu slijedeće [2]:

1. Veća osjetljivost na udarna opterećenja
2. Slaba otpornost na mehaničke vibracije
3. Skuplji od jednostavnih kliznih ležajeva
4. Sastavljeni iz velikog broja pojedinačnih dijelova
5. Nisu pogodni za popravak
6. Zahtjevna ugradnja i rasklapanje

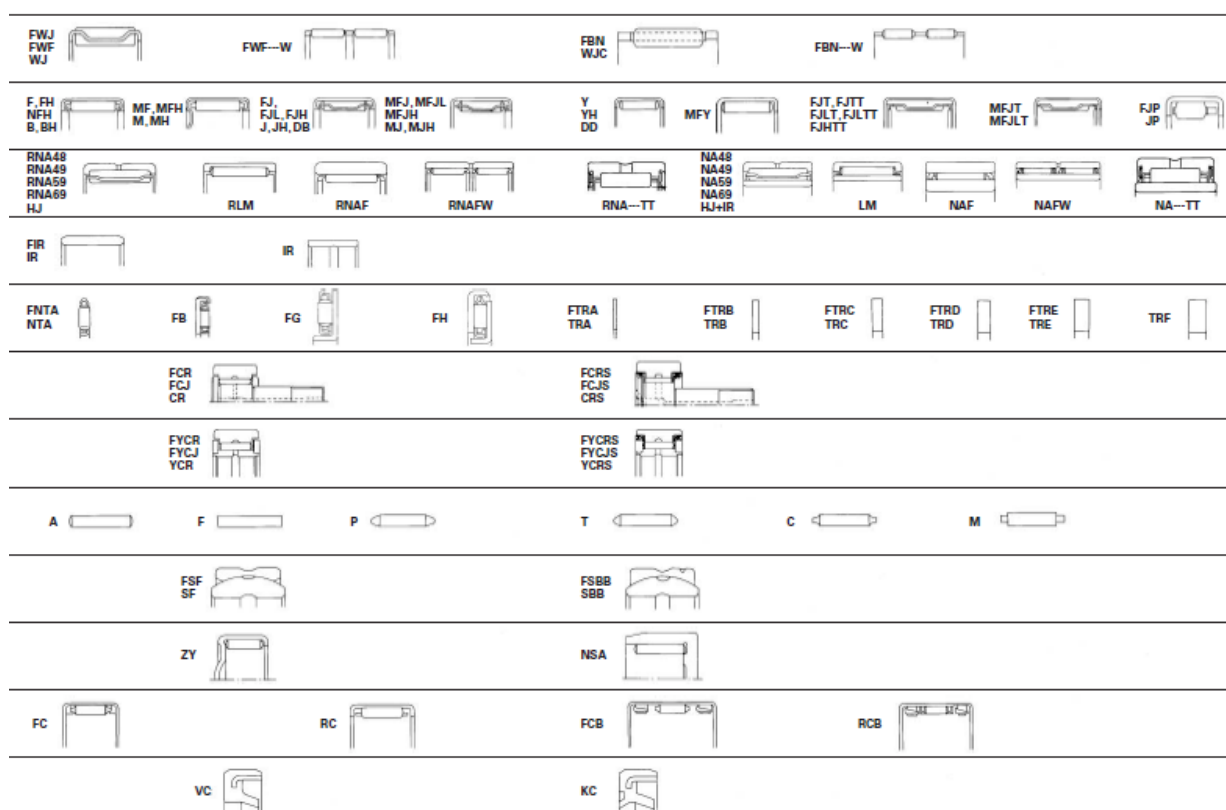
Na slici 3. prikazana je podjela valjnih ležajeva prema obliku valjnih tijela na tri glavne skupine: kuglične, valjkaste i igličaste.



Slika 3. Podjela valjnih ležajeva: a) kuglični ležaj, b) valjkasti ležaj, c) igličasti ležaj [1]

2.2. Igličasti ležajevi

Igličasti ležajevi su standardizirani prema normi ISO 1206:2018 (DIN 617). Valjna tijela su valjci manjih promjera (iglice) koji osiguravaju relativno veliku nosivost unatoč malim poprečnim presjecima. Izrađuju se s unutarnjim prstenom ili bez njega, a prikladni su svugdje tamo gdje je u radijalnom smjeru na raspolaganju 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 ležajeva su primjerene samo za radijalna opterećenja. [1] Na slici 4. prikazan je primjer podjele i oznaka standardnih igličastih ležajeva.



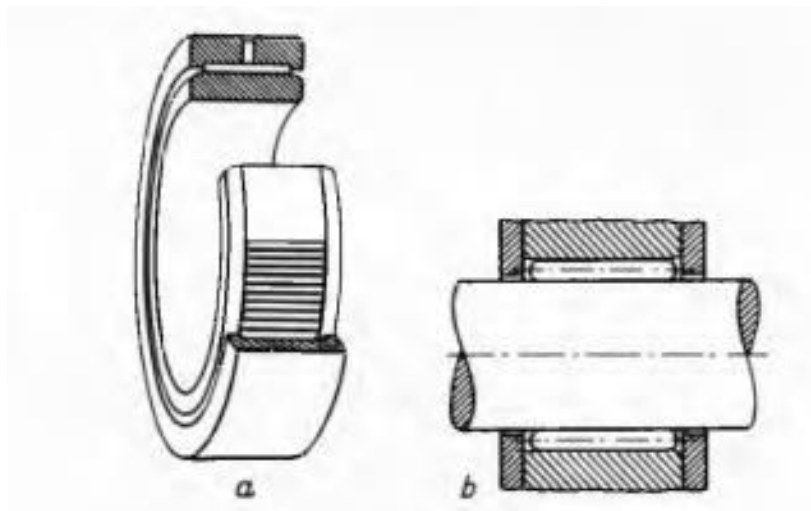
Slika 4. Podjela i oznake igličastih ležajeva [5]

Igličasti se ležaji izrađuju s oba prstena ili samo s vanjskim prstenom te s kavezom ili bez njega. Kavezne izvedbe igličastih ležaja omogućavaju rad pri višim brojevima okretaja u usporedbi s ležajem bez kaveza. Kod igličastih ležaja bez kaveza može doći do okretanja iglica u suprotnim smjerovima i zaglavljivanja ležaja. Zbog toga se danas uglavnom proizvode kavezni igličasti ležaji s unutrašnjim prstenom ili bez njega.

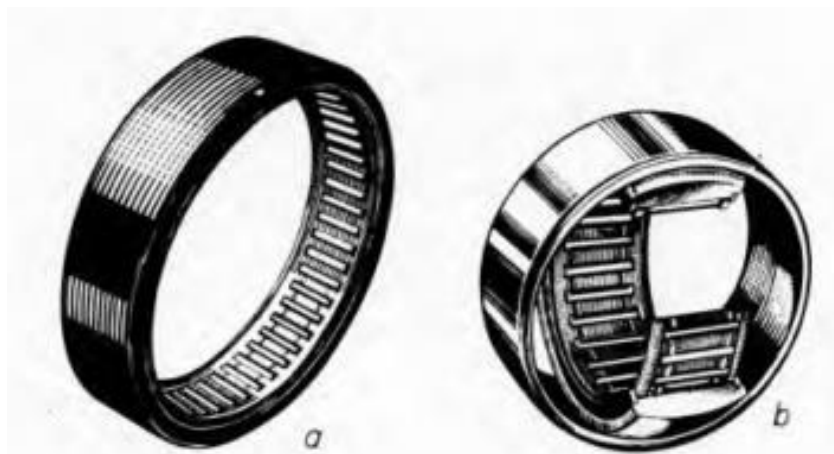
Iglice ležaja bez unutrašnjeg prstena valjaju se izravno po površini rukavca osovine ili vratila. Ovakvi ležaji su male debljine i zauzimaju malo prostora u kućištu mehanizma ili stroja. Igličasti ležaji bez kaveza služe isključivo kao radijalni. Prikladni su za rad pri visokim brojevima okretaja, imaju veliku nosivost i dobro podnose udarce. Ako se izrade u dvorednoj izvedbi valjnih tijela mogu podnositi značajno veća radijalna opterećenja od jednorednih igličastih ležaja.

Igličasti ležaji se smatraju najsuvremenijim od svih vrsta ležaja te se zbog svojih prednosti sve više primjenjuju u strojogradnji i zrakoplovstvu. Na slikama 5. i 6. prikazane su krute izvedbe igličastih ležaja, a na slici. 6. b samoprilagodljiva izvedba igličastih ležaja. Njihovi valjni

elementi, tzv. iglice, zapravo su tanki valjci sa zaobljenim rubovima, s promjerom od 1,5 mm do 5,0 mm i dužinom od 5 mm do 10 mm. [3]



Slika 5. Izvedbe igličastih ležaja: a) ležaj s vanjskim i unutarnjim prstenom, b) ležaj bez prstena [3]

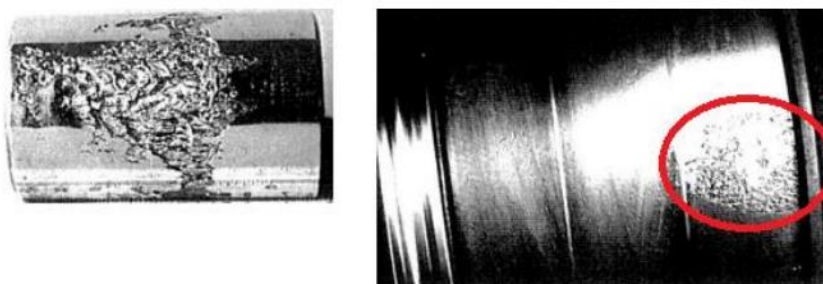


Slika 6. Igličasti ležaji s kavezom bez unutrašnjeg prstena: a) kruti ležaj, b) samoprilagodljivi ležaj [3]

2.3. Proračun radnog vijeka ležaja

Ležajevi koji rade u uobičajenim eksploatacijskim uvjetima na sobnoj temperaturi bez visokog opterećenja, izloženi su stalnom tlačnom opterećenju koje oštećuje sve dijelove ležaja. Zbog periodičkih promjena tlačnog opterećenja dolazi do ljuskanja površina na dijelovima ležaja. Ljuskanje se pojavljuje zbog umora materijala te nakon duljeg vremena eksploatacije dovodi do kvara ležaja.

Efektivni radni vijek ležaja se definira kao broj okretaja ležaja prije pojave ljuskanja na prstenovima ili valjnim tijelima. Ljuskanje dijelova površine valjnog ležaja od čelika prikazano je na slici 7. Ostali mehanizmi dotrajavanja koji mogu uzrokovati oštećenje ležaja jesu: adhezijsko i abrazijsko trošenje, stvaranje mikro i makro pukotina te djelovanje tribokorozije. Do pojave ovih mehanizama dotrajavanja dolazi zbog nepravilnog ili nedovoljnog podmazivanja, pogrešnog brtvljenja ili lošeg izbora ležaja. Svi mehanizmi osim ljuskanja zbog umora materijala mogu se izbjeći te ih se zbog ne može staviti u istu kategoriju s neizbježnim ljuskanjem, odnosno pojavom umora površine. Zbog oštećenja ležaja može se pojaviti povećanje vibracija, zagrijavanje i pojačani šum (buka) ležaja. Na slici 8. prikazan je oštećeni unutarnji prsten ležaja. [6]



Slika 7. Ljuskanje valjnog tijela i unutarnjeg prstena uslijed umora površine [6]



Slika 8. Oštećenja nastala tijekom rada ležaja: umor površine i adhezijsko trošenje [7]

Radni vijek ležaja definira iako podrazumijeva vremenski period ispravnog rada ležaja, uobičajeno se izražava kao ukupni broj okretaja jednog od prstenova ležaja u odnosu na druge ostvaren prije pojave loma valjnog tijela zbog umora materijala ili umora površine. Može se izraziti u milijunima okretaja ili radnim satima.

Procijenjeni vijek trajanja ležaja predstavlja radni vijek serije ležajeva u kojem će najmanje 90 % identičnih ležajeva raditi bez ikakvih znakova kvara i pojave umora površine pod sličnim opterećenjima i brzinama vrtnje.

Glavna normama propisana karakteristika ležaja, zajedno s osnovnom dinamičkom nosivosti (C) je ekvivalentno opterećenje ležaja (P) definirano kao ono opterećenje koje valjni ležaj treba podnijeti tijekom eksploatacije u kojoj se ostvari milijun okretaja valjnih tijela. [8]

Odnos između nominalnog vijeka trajanja, dinamičke nosivosti i opterećenja koje djeluje na ležaj pri brzini vrtnje $n > 20 \text{ min}^{-1}$ računa se formulom [8]:

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

gdje je: p – eksponent vijeka trajanja, koji iznosi za kuglične ležajeve $p = 3$, za valjkaste ležajeve $p = \frac{10}{3}$. [8].

Nominalni vijek trajanja se uglavnom izražava u satima rada ležaja:

$$L_{10h} = \frac{1000000}{60n} \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (2)$$

gdje je n (s^{-1}) brzina vrtnje ležaja, C (kN) je dinamička nosivost normalnog ležaja, P (kN) je ekvivalentno opterećenje ležaja U normalnim radnim uvjetima, nominalni vijek trajanja izračunat na razini pouzdanosti od 90 % (L_{10}) zadovoljava većinu slučajeva upotrebe ležajeva, budući da je stvarno dostižan životni vijek veći od izračunatog. Također, uz 50 %-tnu pouzdanost vijek trajanja (L) je u pravilu pet puta veći od nominalnog vijeka trajanja (L). Da bi se povećala kompaktnost ležaja i smanjila masa, ne preporučuje se izbor ležaja s precijenjenim (predimenzioniranim) nominalnim vijekom trajanja. Međutim u nizu tehničkih područja pojavljuje se zahtjev za razinom pouzdanosti različitom od 90 %. Osim toga poznato je iz literature da uvjeti podmazivanja značajno utječu na životni vijek ležaja. Stoga je ISO normom uvedena oznaka prilagođenog vijeka trajanja, čija je formula sljedećeg oblika [8]:

$$L_{na} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \left(\frac{C}{P}\right)^p \text{ ili:} \quad (3)$$

$$L_{na} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 L_{10} \quad (4)$$

gdje je L_{na} – prilagođeni nominalni vijek trajanja, Faktor n znači razliku između iskazane

pouzdanosti i razine pouzdanosti 100 % (npr. pri 95 % pouzdanosti $L_{na} = L_{5a}$) [8]. Ojesu ali faktori α_1 – faktor pouzdanosti, α_2 – faktor materijala, α_3 – faktor radnih uvjeta. Za općenito prihvaćenu pouzdanost od 90 %, kao i za odgovarajuću kvalitetu čelika za ležajeve i uvjete podmazivanja, koji osiguravaju odvajanje površina ležaja u kontaktu unutar preporučenih granica, vrijednosti faktora $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 1$ te formula (4) za prilagođeni vijek trajanja postaje identična formuli (1) za nominalni vijek trajanja [8].

2.4. Materijali za valjne ležaje

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

Nisu dopušteni nedostaci materijala poput pukotina, uključaka troske, nepravilnosti površine (eng. elephant skin), ljuskice oksida, korozijske naslage ispod površine (tzv. bijele mrlje), brušenjem spaljena područja površine i oštećenja integriteta površine [9]

Za izradu valjnih ležaja uobičajeno se upotrebljavaju visokougljični čelici legirani kromom, srednjeugljični čelici, čelici za cementiranje, čelici za rad pri povišenim temperaturama, nehrđajući čelici i polimerni materijali. [9]

3. NITRIRANJE

Generički pojam nitriranje odnosi se na toplinsko-kemijsku obradu kojom se površinski sloj željeznih materijala obogaćuje dušikom (DIN 17014). U početku nitriranja dušik difundira u površinu materijala i intersticijski se otapa u željezu. Kada koncentracija dušika prijeđe granicu topljivosti od 2,5 % masenog udjela dušika, formira se jednofazni ili višefazni sloj željeznog nitrida. Nitriranje se uobičajeno provodi u temperaturnom rasponu između 400°C do 600 °C. Postupci nitriranja pružaju ne samo izvrsnu zaštitu čelika od korozije, već i izvanrednu zaštitu od trošenja uz poboljšanje dinamičke izdržljivosti. [10]

Ako je samo dušik ugrađen u difuzijsku zonu, proces se naziva „nitriranje“. Ako u isto vrijeme ugljik difundira u difuzijsku zonu kao rezultat difuzije atoma ugljika iz aktivnog medija za nitriranje, proces se naziva „nitrokarburiranje“. Obje metode prvenstveno se koriste za zaštitu od trošenja. Ako se uz dušik provodi i dodavanje kisika tijekom nitriranja, proces se naziva „oksnitriranje“. Ova varijanta postupka koristi se za izradu poroznog nitridnog sloja koji omogućava bolje prijanjanje naknadno nanesenog oksidnog sloja. [10]

Nasuprot tome, „oksidacija“ je oksidacija željeznih materijala u kojoj se ciljano proizvodi magnetit (Fe_3O_4) kao gornji sloj na nitriranoj zoni. Takve sustave slojevitih spojeva karakterizira izvrsna otpornost na koroziju. Oksidacija nitriranih zona također se koristi u slučajevima kada je potrebno smanjiti trenje klizanja ili omogućiti uhodavanje površina u kliznom kontaktu uz što manje trenje i trošenje. [10]

Obogaćivanje dušikom ili dušikom i ugljikom može se postići pomoću [10]:

- Rastaljene soli (nitriranje u solnoj kupki, nitrokarburiranje u solnoj kupci)
- Plinske smjese (plinsko nitriranje)
- Niskoenergetske plazme (nitriranje u plazmi, plazma nitriranje)

3.1. Nitrokarburiranje u solnoj kupki

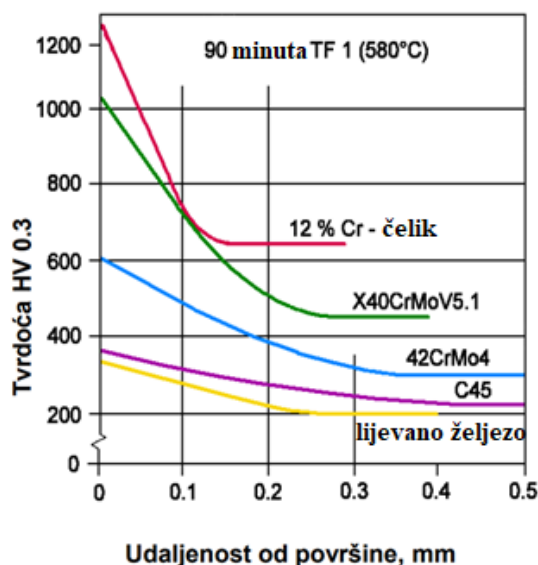
Nitrokarburiranje u solnoj kupki se desetljećima koristi u raznim granama industrije. Dušik koji prodire u površinsku zonu potječe iz tekućeg medija koji se sastoji od rastaljenih soli na temperaturi između 400 °C i 600 °C. Cijanid, koji se koristi do danas, podvrgava se katalitičkoj razgradnji na čeličnim površinama na temperaturi nitriranja kako bi se formirao cijanid, karbonat i adsorbirani dušik. Zbog stvaranja karbonata, ovom metodom se mogu proizvesti samo slojevi nitrida koji uz dušik sadrže i ugljik. Ot tuda slijedi i naziv postupka ,

nitrokarburiranje. Kako bi se izbjeglo prenošenje visoko toksičnih sastojaka kupke izvan postrojenja za nitrokarburiranje, alati i obradci se moraju se temeljito oprati i neutralizirati nakon obrade u solnoj kupci. Iskorišteni materijali za solnu kupku moraju se odložiti na ekološki prihvatljiv način. [10]. Na donjoj slici prikazano je suvremeno postrojenje za nitrokarburiranje u solnoj kupci sastavljeno od jamskih peći za predgrijavanje i nitrokarburiranje te bazena za gašenje, neutralizaciju soli i pranje nitrokarburiranih dijelova.



Slika 9. Uređaji za nitriranje u solnim kupkama [11]

Nitrokarburiranje u solnoj kupci se koristi za obradu proizvoda iz ugljičnih i niskolegiranih čelika, brzoreznih čelika, alatnih čelika za rad u toplom stanju, nehrđajućih čelika i lijevanih željeza. Nitriranjem u solnoj kupci ne postižu se visoke tvrdoće kao u slučaju nitriranja u amonijaku, pa se ovaj postupak još naziva meko nitriranje. [12]. Na slici 10 prikazana je raspodjela tvrdoće po difuzijskoj zoni čelika nitrokarburiranih u solnoj kupci postupkom TENIFER.



Slika 10. Mikrotvrdoća i dubina nitrokarburiranog sloja različitih kvaliteta čelika [11]

Nitrokarburiranje se može primijeniti u krutom, tekućem ili plinovitom stanju ili korištenjem plazma tehnika. Medij za obradu može odrediti sastav i debljinu zone spojeva, kao i dubinu difuzijske zone zbog razlike u koeficijentu difuzije ugljika i dušika. Postupci nitrokarburiranja u solnoj kupci (npr. u soli $\text{NaCN}_{(l)}$) komercijalno su poznati kao postupci Tufftriding, TENIFER i Melonite. Ovi postupci su kraćeg trajanja od plinskih nitiranja i stvaraju slojeve nitrida dobre kvalitete, odnosno otpornosti na trošenje i koroziju. [13]

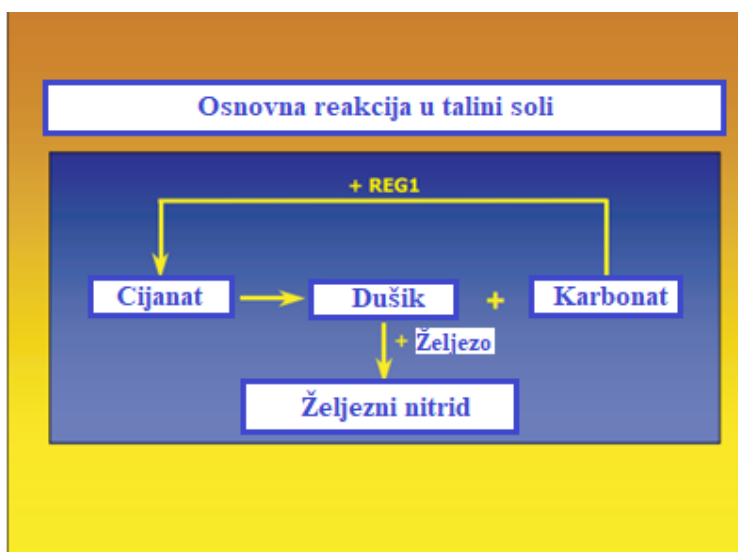
3.1.1. Postupak TENIFER-TUFFTRIDE

Nitrokarburiranje u solnoj kupci postupkom TUFFTRIDE primjenjuje se u širokom rasponu industrija već desetljećima. Koristi se za poboljšanje otpornosti na trošenje, dinamičke izdržljivosti te u kombinaciji s oksidativnim hlađenjem i za poboljšanje otpornosti na koroziju dijelova i alata izrađenih od čelika, lijevanog željeza i sinteriranih željeznih materijala. U mnogim slučajevima TUFFTRIDE postupak se koristi kao alternativa drugim procesima modificiranja ili prevlačenja površina kao što su površinsko kaljenje, galvanizacija (npr. tvrdo kromiranje) prevlačenje laserskim snopom, naštracavanje plazmom i sl. uz jednako dobru ili poboljšanu kvalitetu i veću ekonomičnost obrade. [14]

U usporedbi s drugim postupcima nitrokarburiranja, TUFFTRIDE Q, QP i QPQ postupci su jednostavniji za izvođenje. Kao što je uobičajeno kod obrade komponenti u solnim kupkama,

dijelovi se prvo predgrijevaju na 350 °C u peći bez zaštitne atmosfere. Poslije toga se prebacuju u solnu kupku za nitrokarburiranje zagrijanu na 580 °C i u njoj drže određeno vrijeme ovisno o zahtijevanoj dubini nitrokarburiranja i vrsti čelika ili željeznog lijeva..

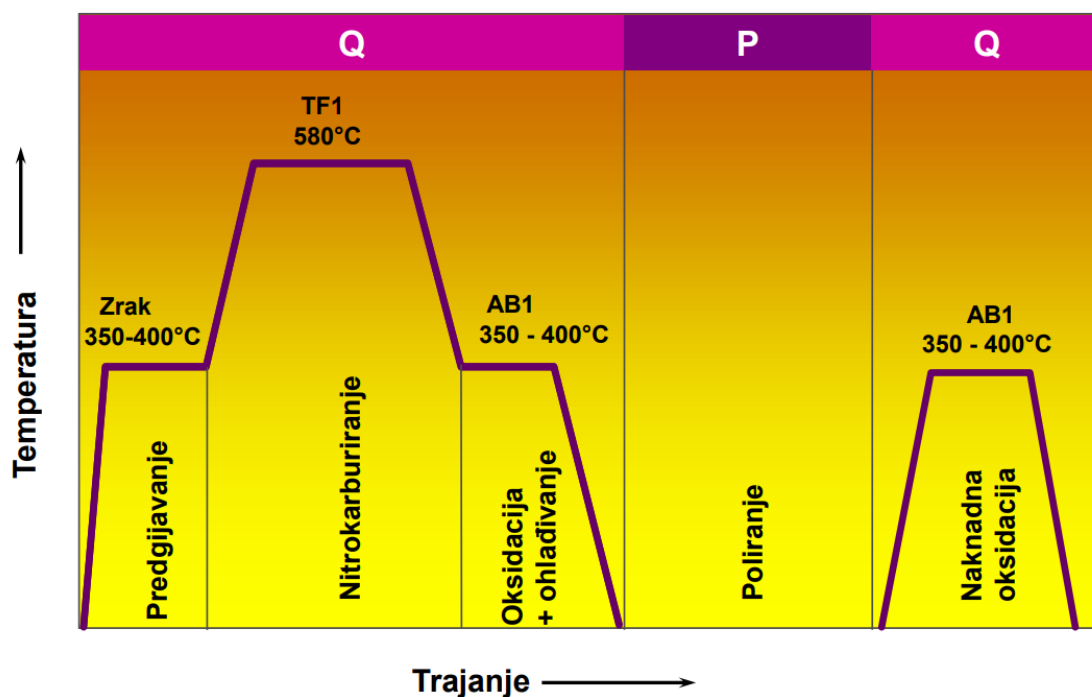
Talina soli komercijalnog naziva TF1 sastoji se od alkalnog cijanata i alkalnog karbonata koji kemijski reagiraju u loncu od čistog titanija. Lonac treba biti kemijski postojan u otopini soli. Za ispravan rad kupke nužno je prozračivanje kupke zrakom. Aktivni sastojak i izvor dušika u kupki je TF 1 alkalni cijanat. Tijekom nitrokarburiranja odvija se kemijska reakcija između površine čeličnih predmeta i alkalnog cijanata koja rezultira oslobađanjem atoma dušika i ugljika i stvaranjem alkalijskog karbonata. Dodavanjem malih količina netoksičnog regeneratora REG 1, aktivni sastojak kupke se obnavlja. Periodičkim određivanjem sastava solne kupke kemijskom analizom i dodavanjem regeneratora aktivnost kupke TF 1 se održava unutar vrlo uskih tolerancija (slika 11.). [14]



Slika 11. Osnovna reakcija u talini soli [14]

Budući da se regeneracija odvija bez ikakve promjene u volumenu kupke za nitrokarburiranje, dio taline se ne mora ispuštati. Gubici izvlačenja koji nastaju kada se nitrokarburirani obradci izvade iz kupke nadopunjuju se dodatkom soli TF 1. Za razliku od plinskog nitriranja ili plinskog nitrokarburiranja, tvari TF 1 i REG 1 potrebne za TUFFTRIDE QPQ proces, ne sadrže sastojke klasificirane kao otrovne ili štetne za okoliš na sobnoj temperaturi. [14]

Uz solnu kupku TF1+REG1 posebno je razvijena kupka za hlađenje (sa soli komercijalnog naziva AB 1) koja se koristi za provedbu oksidacije površine nakon nitrokarburiranja. Tijekom ove obrade na površini nitrokarburiranih obradaka nastaje crni sloj željeznog oksida (magnetita) koji dodatno povećava otpornost na koroziju. Temperatura kupke AB1 održava se između 350 °C do 400 °C. Osim oksidativnog učinka, kupka pozitivno utječe na dimenzionalnu stabilnost jer se obradci hlađe u dvije faze, od 580 °C do npr. 350 °C i potom od 350 °C do sobne temperature. Nitrokarburiranje u solnoj kupci TF1 s hlađenjem u oksidativnoj kupci AB1 naziva se TUFFTRIDE Q postupak [14]. Naok ovog postupka može se primijeniti poliranje površine i ponovna dodatna oksidacija u kupci AB1. Ovaj dupleks postupak prikazan je na slici 12. i komercijalno se naziva TUFFTRIDE QPQ postupak (eng. Quench Polish Quench). [14]



Slika 12. Dijagram postupka TUFFTRIDE QPQ [11]

3.2. Plinsko nitriranje

Plinsko nitriranje je postupak toplinsko kemijske obrade pri kojem se dušik difundira u površinu čelika ili željeznog lijeva iz plinske atmosfere sastavljene od amonijaka i dušika. Temperatura plinskog nitriranja za čelike je između 495°C i 565 °C. [15]

Kod plinskog nitriranja čistim, tzv. bezvodnim amonijakom može se koristiti jednostupanjski ili dvostupanjski postupak. U jednostupanjskom postupku primjenjuje se temperatura nitriranja

u rasponu od oko 495 °C do 525 °C, a stupanj disocijacije amonijaka iznosi od 15 do 30 %. Ovaj postupak proizvodi krhak površinski sloj bogat dušikom poznat kao sloj „bijelog nitrida“. U dvostupanjskom postupku nitriranja dva puta se ponavlja jednostupanjski proces, pri čemu se drugi stupanj može provoditi na temperaturi nitriranja koja se koristi za prvi stupanj, ili se temperatura može povećati na 550 °C do 565 °C. U oba slučaja stupanj disocijacije amonijaka u drugom stupnju se povećava na 65 % do 80 % (po mogućnosti na 75 % do 80 %). Općenito stoga je za ovaj postupak nužna primjena generatora atmosfere, odnosno vanjskog disocijatora amonijaka za postizanje potrebne veće disocijacije u drugom stupnju nitriranja. [15]

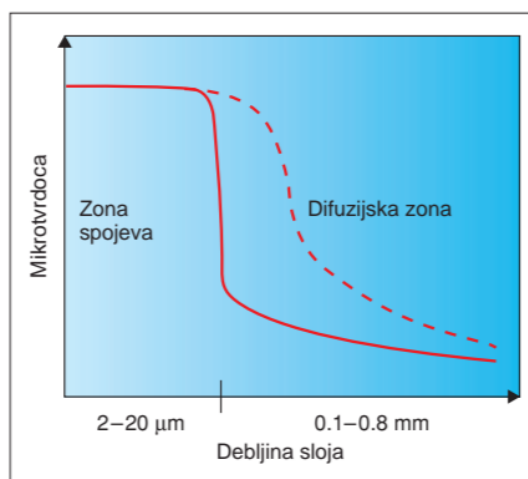


Slika 13. Jamske peći za nitriranje u plinu [11]

3.3. Nitriranje u plazmi

Nitriranje u plazmi također je poznato kao ionsko nitriranje ili tzv. sjajno nitriranje. Ovaj postupak obuhvaća selektivno dodavanje dušika i u nekim slučajevima ugljika u površinski sloj željeznih materijala u vakuumskoj komori primjenom niskoenergetske plazme. Difuzija dušika i ugljika provodi iz ionizirane plinske smjese koja se sastoji od dušika, vodika i dodatnog plina koji sadrži ugljik, kao što je metan ili ugljikov dioksid. [10]

Površinske zone nitriranih željeznih materijala općenito se sastoje od dva različita dijela. Na površini obradaka nitriranih u plazmi nalazi se zona spojeva debljine od 2 μm do 20 μm. Ispod nje je difuzijska zona dubine od 0,1 mm do 0,8 mm (slika 14.). [10]

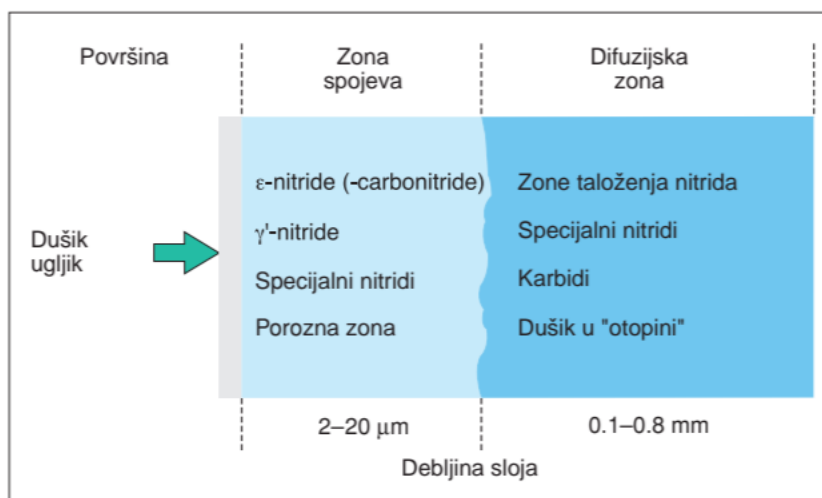


Slika 14. Raspored mikrotvrdoće u površinskom sloju čelika nitriranog u plazmi [10]

Zona spojeva koja se sastoji od željeznih nitrida i/ili karbonitrida određuje tvrdoću i otpornost na trošenje i koroziju površine. Zona spojeva poprima jedan od tri sljedeća oblika [10]:

- γ' – zona spojeva (γ' – nitrid: Fe_4N)
- ε – zona spojeva koji sadrži više dušika i/ili ugljika (ε – nitrid: Fe_{2-3}N , ε – karbonitrid, Fe_{2-3}NC)
- Zona spojeva mješovite faze (γ' – nitrid i ε – nitrid)

Nitrid γ' je čvršći od nitrida ε , ali raste sporije i doseže debljini od 2 μm do 6 μm . Nitrid ε može nastati u debljini od 10 μm do 20 μm . Sastav zone spojeva također se može modificirati prisutnošću posebnih nitrida i manje ili više izražene porozne zone (slika 15.). [10]



Slika 15. Struktra zone spojeva i difuzijske zone na čeliku nitriranom u plazmi [10]

Veliki raspon mogućnosti upravljanja procesom nitriranja u plazmi omogućuje optimizaciju brzine rasta zone spojeva za specifičnu primjenu (slika 16.). U uobičajenom postupku nitriranja u plazmi proizvodi se smjesa obje nitridne faze. Ovisno o parametrima procesa, na površini čelika mogu se proizvesti gotovo jednofazni γ' nitridi (plazma nitriranjem) ili ε nitridi u zoni spojeva (plazma nitrokarburiranjem). Objе vrste zone spojeva karakterizira visoka otpornost na trošenje. Kako se udio dušika povećava, tvrdoća, otpornost na koroziju i otpornost na trošenje se povećavaju, a duktilnost zone spojeva se smanjuje. [10]



Slika 16. Osnovne strukture zone spojeva nakon nitriranja čelika u plazmi [11]

Tipični parametri postupka nitriranja u plazmi jesu sljedeći [10]:

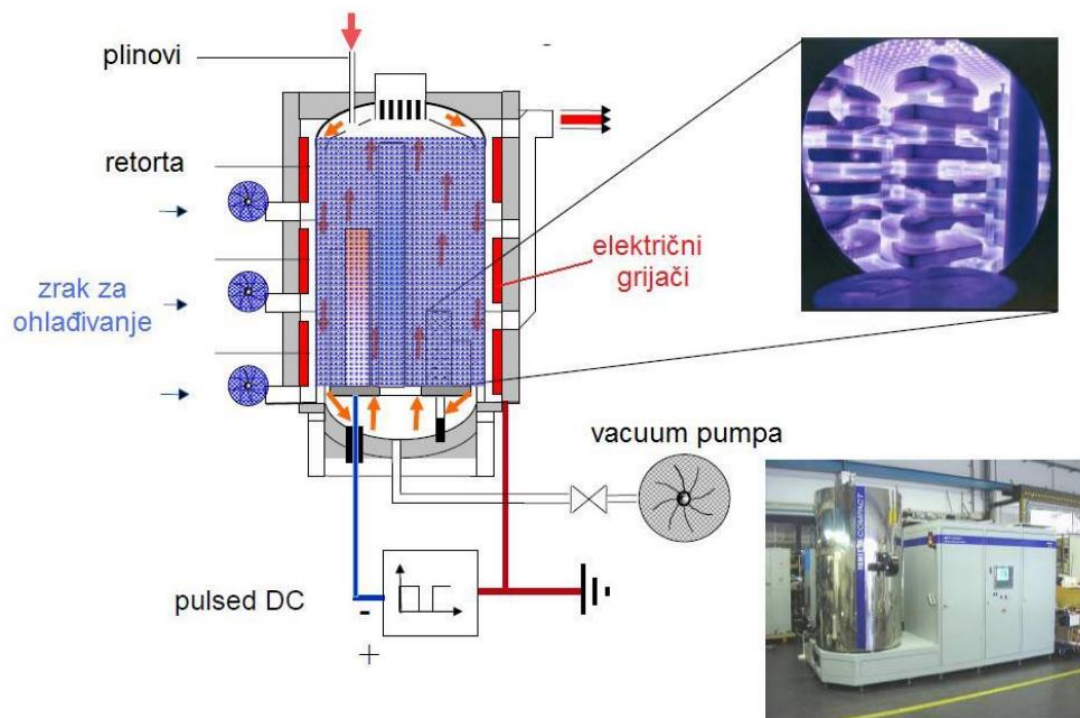
- Primarne plinske komponente za nitriranje: dušik, vodik
- Primarne plinske komponente za nitrokarburiranje: dušik, vodik, ugljikov dioksid ili metan
- Dodatni plin: argon
- Temperatura: 350 do 600 °C
- Pritisak plina: 50 do 500 Pa
- Potrošnja plinske smjese: od 20 l/h (laboratorij) do 500 l/h (industrijsko postrojenje)
- Vrijeme toplinske obrade: 0,5 do 60 sati
- Struja i napon plazme: 500 A pri 0 do 800 V

Prednosti nitriranja u plazmi su mnogobrojne, od kojih se posebno ističu sljedeće [11]:

1. Široke mogućnosti variranja parametara postupka (350...560 °C, najčešće 500...550 °C) uz kraće vrijeme u odnosu na nitriranje u plinu i bolju ekonomičnost postupka
2. Moguće je postići:
 - Zonu spojeva s ε nitridima, bez pora ili sa slabom poroznošću

- Smjesu nitrida u zoni spojeva: $\gamma' + \varepsilon$
 - Zonu spojeva samo s γ' nitridom (vrlo tvrda i žilava zona spojeva)
 - Nitrirani sloj bez zone spojeva (samo difuziona zona)
3. Ekološki prikladan postupak (neotrovan za okoliš)
 4. Mogu se nitrirati praktički svi čelici, Fe lijevovi
 5. Lako se može automatizirati i uklopiti u proizvodnu liniju
 6. Prikladan postupak za sve dijelove, velike i male mase
 7. Moguće je parcijalno nitiranje

Tipična izvedba zonaste vakuumske peći za nitiranje u impulsnoj istosmjernoj plazmi prikazana je na donjoj slici.



Slika 17. Shematski prikaz uređaja za nitiranje u plazmi [11]

4. ISPITIVANJE VIBRACIJA I ZAGRIJAVANJA LEŽAJA

Valjni ležajevi nalaze široku primjenu u kućanstvu i industriji. Pravilan rad ovih uređaja u velikoj mjeri ovisi o mirnom i tihom radu ležajeva. U industrijskim primjenama ovi se ležajevi smatraju kritičnim mehaničkim komponentama i nedostatak na takvom ležaju, ako se ne otkrije na vrijeme, uzrokuje zastoj i može dovesti do skupih kvarova strojeva. Greške na ležajevima mogu nastati tijekom uporabe ili tijekom procesa proizvodnje. Stoga je otkrivanje ovih nedostataka važno za praćenje stanja kao i pregled kvalitete ležajeva. Za otkrivanje i dijagnozu nedostataka ležaja koriste se različite metode koje se mogu općenito klasificirati kao mjerenja vibracija i zvuka, mjerenja temperature i analiza čestica trošenja. Među njima se najčešće koristi metoda praćenja rada i stanja ležaja mjerenjem vibracija. Pri tome se primjenjuje nekoliko tehnika za mjerenje vibracija i akustičnih odziva neispravnih ležajeva, koje se staoje od mjerenja vibracija u vremenskoj i frekvencijskoj domeni, mjerenja udarnog impulsa, mjerenja zvučnog tlaka i intenziteta zvuka te metoda mjerenja akustične emisije ležaja. [16]

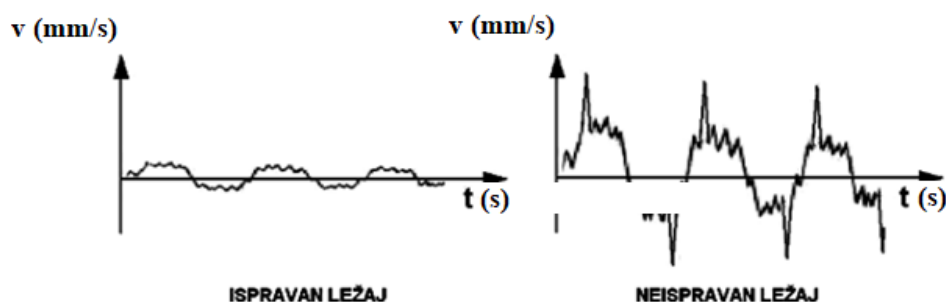
4.1. Stvaranje vibracija i buke u ležajevima

Provedeno je nekoliko studija kako bi se objasnio mehanizam stvaranja vibracija i buke u ležajevima. Radijalno opterećeni valjni ležajevi generiraju vibracije čak i ako su geometrijski savršeni zbog upotrebe konačnog broja valjnih tijela za nošenje tereta. Broj valjnih elemenata i njihov položaj u zoni opterećenja mijenjaju se s rotacijom ležaja, što dovodi do periodične varijacije ukupne krutosti sklopa ležaja. Ova varijacija krutosti stvara vibracije poznate kao vibracije različite popustljivosti. Kada se prstenovi ležajeva pretpostave kao kontinuirani sustavi, promjenjivi smjer kontaktnih sila koje stvaraju valjna tijela može uzrokovati savojne ili uvojne vibracije čak i ako su prstenovi geometrijski savršeni. [16]

Prisutnost kvara uzrokuje značajno povećanje razine vibracija. Nedostaci ležaja mogu se kategorizirati kao „raspodijeljeni“ i „lokalni“. Raspodijeljeni nedostaci obuhvaćaju hrapavost površine, valovitost, neusklađene žljebove i valjna tijela izvan nazivnih mjera. Površinske značajke razmatraju se u skali njihove valne duljine u usporedbi sa širinom kontaktnog Hertzovog pritiska na površini valjnog elementa. Površinske značajke valne duljine reda veličine kao što je širina Hertzove kontaktne površine ili manje od nje, nazivaju se „hrapavosti“, dok se značajke većih valnih duljina nazivaju „valovitosti“. Raspodijeljeni nedostaci uzrokovani su greškama u proizvodnji, nepravilnom ugradnjom ili abrazivnim

trošenjem ležaja. Varijacije u kontaktnoj sili između valjnih elemenata i valjnih staza zbog prisutnosti raspodijeljenih nedostataka rezultiraju povećanom razinom vibracija. Proučavanje odziva na vibracije zbog ove kategorije nedostataka važno je za kontrolu kvalitete i praćenje stanja ležaja. [16]

Lokalizirani nedostaci uključuju pukotine, jamice i lomove na valjnim površinama ležaja. Dominanti način kvara valjnih ležajeva je lom prstenova ili valjnih elemenata, koji je iniciran jamicama i mikropukotinama na površini nastalim trošenjem ležaja umorom površine. Kvar ležaja zbog umora površine ili umora materijala može biti ubrzan preopterećenjem ili udarnim opterećenjem ležajeva tijekom rada ili ugradnje. Kad god lokalni nedostatak na valjnom elementu stupi u interakciju s njegovim spojnim elementom, dolazi do naglih promjena u kontaktnim naprezanjima na kontaktnoj površini, koje generiraju impuls vrlo kratkog trajanja. Ovaj impuls proizvodi vibracije i buku koji upućuju na prisutnost kvara u ležaju. [16]



Slika 18. Vremenski dijagrami brzine vibracija ispravnog i neispravnog ležaja [17]

4.2. Senzori za mjerenje vibracija ležaja

Pri postavljanju senzora za mjerenje vibracija ležaja potrebno je izbjegavati obojena područja, neopterećene zone ležajeva, razmake između kućišta i rascjepa u konstrukciji ležaja i kućišta. Pri primjeni ručnog senzora vibracija treba osigurati konzistentnost očitavanja, odnosno treba ispravno postaviti senzor, izabrati optimalni kut između stroja i senzora i sila kojom se senzor pritišće senzor na stroj. Kada je moguće preporučljivo je mjeriti vibracije u sva tri smjera u odnosu na os vrtnje ležaja: aksijalnom, horizontalnom (poprečnom) i vertikalnom (u smjeru djelovanja gravitacijske sile). [18]

Mjerenja vibracija u horizontalnoj ravnini, okomito na os vrtnje ležaja uobičajeno daje najintenzivnije vibracije zbog elastičnih deformacija kućišta u horizontalnoj ravnini te zbog moguće pojave neuravnoteženog rasporeda strojnih dijelova, što dodatno povećava vibracije.

[18]. Mjerenja vibracija u vertikalnom smjeru uobičajeno prikazuju manje vibracije zbog krutosti uređaja, djelovanja sile teže i učvršćivanja stroja. U idealnim uvjetima tijekom mjerenja vibracija u aksijalnom smjeru dobivaju se male vrijednosti vibracija, jer do vibracija u tom smjeru dolazi samo zbog dijelova koji nisu u ravnini i savijenosti osovine ili vratila. Na slici 51 prikazani su različiti oblici glava senzora za mjerenje vibracija. [18]



Slika 19. Senzori za mjerenje vibracija [19]

Vibracija ima tri mjerljive karakteristike: pomak, brzinu i ubrzanje. Iako su ove tri karakteristike matematički povezane, to su tri različite karakteristike, a ne samo tri naziva za istu mjernu veličinu. [18]

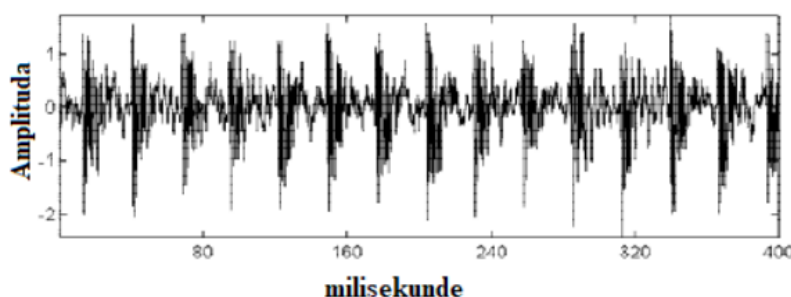
Pomak vibracije se iskazuje u milimetrima ili mikrometrima te predstavlja promjenu udaljenosti ili položaja mjenog objekta u odnosu na referentni položaj. Pomak se obično mjeri senzorom poznatim kao sonda pomaka ili vrtložna sonda. Sonda pomaka je beskontaktni uređaj koji mjeri relativnu udaljenost između dviju površina. Njom se najčešće prate vibracije vratila na strojevima s kliznim ležajima. Sonde za pomak mjere samo kretanje osovine ili rotora u odnosu na kućište stroja. Ako se kućište i osovina kreću zajedno, pomak se mjeri kao nula, dok zapravo stroj može jako vibrirati. [18]

Brzina vibracija se iskazuje u $\left(\frac{\text{mm}}{\text{s}}\right)$, a predstavlja brzinu promjene pomaka vibracijskog signala. To je najčešće korišteno mjerenje vibracija. Povijesno gledano, senzor brzine bio je jedan od prvih električnih senzora koji se koristio za praćenje stanja rotacijskih elemenata

strojeva. Mjerenje brzine promjene pomaka u prednosti je pred mjerenjem pomaka jer za jednaku količinu dinamičkog gibanja koja se generira rotacijom nekog elementa stroja, brzina promjene pomaka ostaje konstantna bez obzira na frekvenciju vibracija. Na vrlo niskim frekvencijama vibracija (ispod 10 Hz) i na višim frekvencijama (iznad 2 kHz) senzori vibracija brzine gube točnost i preciznost. Izvorni pretvarač brzine koristio je zavojnicu koja je vibrirala u magnetskom polju i proizvodila električni napon proporcionalan brzini vibracija površine stroja. Danas, s dolaskom jeftinih i složenijih akcelometara, u najvećem broju izvedbi senzora vrijednosti brzine dobiva se numeričkom integracijom izmjenog ubrzanja utega postavljenog u akcelometar u kontaktu s površinom vibrirajućeg stroja. [18]

Ubrzanje vibrirajuće površine se iskazuje u $\left(\frac{m}{s^2}\right)$ i matematički predstavlja derivaciju brzine promjene pomaka mjerene površine. Ubrzanje vibrirajuće površine stroja se mjeri akcelometrima. Akcelometar obično sadrži jedan ili više piezoelektričnih poluvodiča spojenih na uteg poznate mase, koja vibrira sukladno s dijelom stroja na koji je senzor pričvršćen. Kada je piezoelektrični kristal element mehanički napregnut, on proizvodi električni napon proporcionalan ubrzanju mase. Akcelometri su robusni uređaji koji rade u vrlo širokom frekvencijskom rasponu od 0 Hz do iznad 400 kHz. Ova mogućnost ispitivanja širokog frekvencijskog spektra vibracija glavna je prednost primjene akcelometra. [18]

Postavljanjem akcelometra na strateškim točkama na ležajevima, može se provesti mjerenje ubrzanja i iz izmjerenih podataka numeričkom integracijom izračunati brzinu. Ova mjerenja se bilježe, analiziraju i prikazuju kao tablice ili dijagrami kao što je prikazano na slici 20. Vizualni prikaz promjene amplitude vibracija tijekom vremena snimanja naziva se vremenski valni oblik. [18]



Slika 20. Prikaz rezultata mjerenja vibracija [18]

Zapis vremenskog valnog oblika prikazan na slici 20., ilustrira izgled signala iz akcelometra

ili sonde brzine u vremenskoj domeni. Ova vrsta dijagrama vibracija također se naziva dijagram vremenske domene. [18] Vremenski valni oblici prikazuju kratki vremenski uzorak izmjenjenog i neobrađenog signala vibracije. Iako obično nije tako korisna kao druge metode analize, analiza vremenskog valnog oblika može dati indicaciju stanja rotacijskih elemenata stroja koje nije uvijek vidljivo u frekvencijskom spektru te bi se kada je vremenski valni oblik snimljen trebao koristiti kao dio prilog dijagnostici vibracija stroja. [18]

4.3. Mjerenje temperature ležaja

Mjerenje temperature ležaja je vrlo stara metoda koja se primjenjuje praktično od kada se primjenjuju i sami ležaji. Pri radu dolazi do zagrijavanja ležajeva uslijed [17]:

- Lošeg podmazivanja ležaja
- Kontaminacije (zaprljanja) maziva
- Oštećenja (defekta) ležaja
- Vanjskih izvora topline

Loše podmazivanje je uzrok zagrijavanja ležaja, ako je primjenjeno [17]:

- premalo maziva
- previše maziva ili
- neadekvatno mazivo

Ukoliko je primjenjena premala količina maziva ili je u pitanju neadekvatno mazivo koje svojim svojstvima ne zadovoljava zahtjeve ležaja dolazi do povećanog trenja i trošenja u ležaju uslijed čega se isti zagrijava. Također, ako se primjeni prevelika količina maziva unutar kućišta ležaja, posebno ako se za podmazivanje koristi mast, tada također dolazi do povećanog trenja i zagrijavanja ležaja. Uslijed primjene prevelike količine masti ponekad dolazi do oštećenja kaveza ležaja. Mazivo može biti kontaminirano raznim nečistoćama kao što su npr. metalne čestice, pijesak, voda itd. što opet dovodi do zagrijavanja uzrokovanog trenjem, oštećenja valjnih tijela i ubrzanog trošenja ležaja. Do zagrijavanja ležaja često dolazi od strane vanjskih izvora topline, a također nije rijedak slučaj da se ležaji prisilno hlade. Npr. ako se podmazivanje provodi uljem koje cirkulira i hladi se u hladnjaku ulja ili ako je hlađenje ležaja uzrokovano niskim temperaturama okoline u zimskom periodu. Većina nedostataka ležaja dovodi do povećanog trenja i zagrijavanja ležaja tako da povišena temperatura ležaja u pravilu predstavlja simptom oštećenja (defekta) ležaja. Dakako da pri dijagnosticiranju treba eliminirati druge

potencijalne uzroke zagrijavanja. Najjednostavniji, ali svakako ne i najbolji način ocjene temperature ležaja je ljudsko čulo dodira. U mnogo slučajeva je dovoljno da rukom opipati kućište ležaja da bi se procijenila njegova temperatura. Najsuvremeniji postupak mjerenja temperature ležaja se provodi pomoću beskontaktnih IR termometara ili pomoću termovizijske kamere. Također su u primjeni mjerenja temperature ležaja pomoću trajno ugrađenih senzora temperature kao što su Pt100 senzori, termistorski senzori i termoelementi tipa J (FeCo). Zaprime metode praćenja stanja ležaja mjerenjem temperature treba poznavati normalnu radnu temperaturu ležaja, a u slučaju odstupanja treba istražiti uzrok zagrijavanja, vodeći računa da uzrok može biti i greška mjerenja. Korisno je pratiti trend promjene temperature ručnim bilježenjem mjerenja ili pomoću elektronskih uređaja. U svakom slučaju temperaturu ležaja treba mjeriti i provjeravati da li je u zadanim granicama za konkretni tip ležaja, jer u slučaju odstupanja može doći do trajnog oštećenja ležaja. Ležaji opće namjene su predviđeni za rad u temperaturnom intervalu od -20 °C do 110 °C. [17]

EKSPERIMENTALNI DIO

5. PLAN POKUSA I PRIPREMA ISPITNIH UZORAKA

5.1. Plan pokusa

U eksperimentalnom dijelu korišteni su unutarnji prstenovi igličastih ležajeva. Proizvođač prstena valjnog ležaja je NTN oznake 1R30X35X17. Iz oznake su vidljive dimenzije prstena: vanjski promjer 35 mm, unutarnji promjer 30 mm, debljina prstena 17 mm. Na četiri prstena provedeni su postupci nitriranja kako bi se modificirala površina, a peti je ispitivan u površinski nemodificiranom (polaznom) stanju. Na slici 21. prikazan je osnovni nemodificirani prsten.

Na svim uzorcima su provedena sljedeća ispitivanja: ispitivanje hrapavosti površine, ispitivanje buke i vibracija, te mjerenje temperature prstena ležaja.



Slika 21. Nemodificirani DIN 100Cr6 prsten

5.2. Nitriranje ležajnih prstenova

Na prstenovima su provedeni različiti postupci nitriranja. Dva prstena nitrirana su u plazmi s različitim parametrima (tablica 1. i 2.), dva su prstena nitrirana u plinu i dva u solnoj kupci postupkom TENIFER. Prvi prsten nitriran je u plazmi na temperaturi od 450 °C u trajanju od 6 sati, dok je drugi nitriran na temperaturi od 500 °C u trajanju od 4 sata (tablica 1.). Nitriranje trećeg prstena u plinu provedeno je na temperaturi od 520 °C u trajanju od 24 sata. Plinovi koji su bili prisutni za vrijeme nitriranja su dušik (N_2) i amonijak (NH_3). Četvrti i peti prsten nitrirani su u solnoj kupci postupkom TENIFER na temperaturi od 580 °C u trajanju od 2 sata.

Tablica 1. Parametri nitriranja ležajnog prstena u plazmi za uzorak P1

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

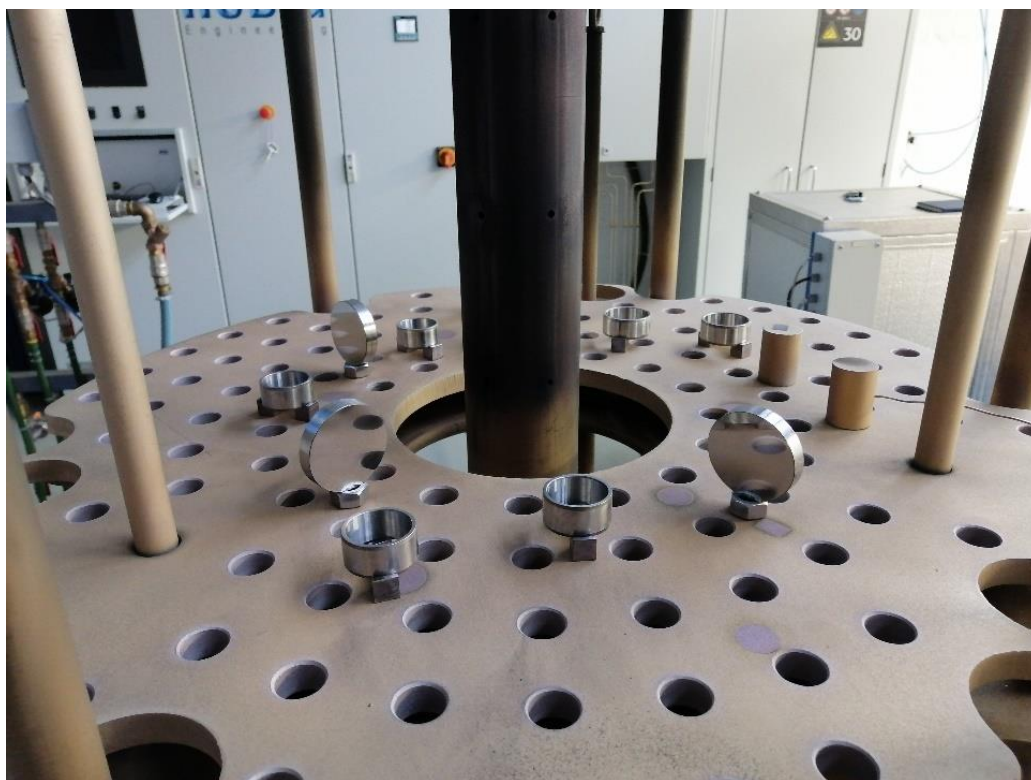
Tablica 2. Parametri nitriranja ležajnog prstena u plazmi za uzorak P2

Parametri postupka	Vrijednost parametra
Temperatura čišćenja površine otprašivanjem iona	500 °C
Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona	2 h
Temperatura nitriranja	500 °C
Trajanje nitriranja 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

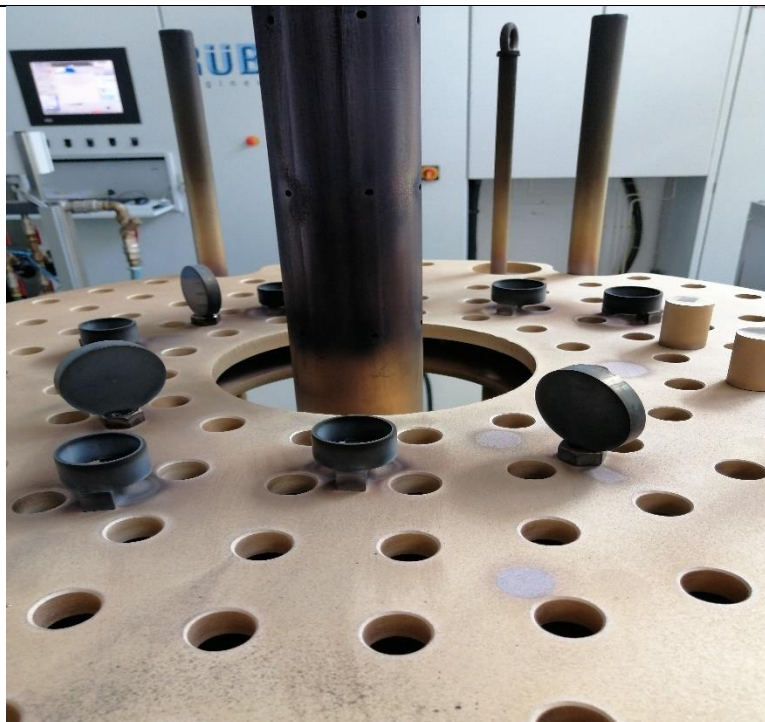
Posljedice do kojih ove razlike u parametrima vode su te da niža temperatura nitriranja stvara difuzijsku zonu i vrlo tanku zonu spojeva, dok viša temperatura stvara deblju zonu spojeva. Nitiranje u plazmi provedeno je u uređaju Rübiger PN 70/90 (slika 22), te se na slikama 23 i 24 može vidjeti razlika u izgledu prstenova prije i poslije nitriranja u plazmi.



Slika 22. Vakuumska peć za nitriranje u plazmi Rübigo PN 70/90



Slika 23. Prstenovi prije nitriranja u plazmi



Slika 24. Prstenovi nakon nitiranja u plazmi

Na slici 25. jasno je vidljiva razlika u izgledu ležajnog prstena u polaznom stanju (P0) u odnosu na nitirane prstenove (P1, P2, P3, P4).



Slika 25. Nitirani prstenovi

5.3. Mjerni uređaji za ispitivanje vibracija igličastih ležaja

Od nitriranog unutrašnjeg prstena i nemodificiranog vanjskog prstena sastavljen je igličasti ležaj koji je postavljen na osovinu od poliamida i učvršćen u kućište od sivog lijeva. U pokusima ispitivanja vibracija igličasti ležaj je rotirao u praznom hodu (bez opterećenja) 5 min brzinama od 510 o/min, 725 o/min i 1500 o/min bez podmazivanja. Osovina ležaja bila je pogonja savitljivom osovinom povezanom s ručnom bušilicom na kojoj je zadana brzina vrtnje. Tijekom rotacije mjerene su vibracije, buka i zagrijavanje ležaja.

Za provedbu ispitivanja vibracija korišten je „Vibration meter VM-6360“ uređaj za ispitivanje vibracija proizvođača „Schut“ s 10 ponavljanja na svakom uzorku. Uređaj je prikazan na slici 26.



Slika 26. Uređaj za ispitivanje vibracija

Ispitivanje razine buke nitriranih prstenova provedeno je instrumentom „UT-352“ mjerac jačine zvuka proizvođača „Uni-Trend Technology“ prikazanom na slici 27. Mjerni instrument je bio povezan s prijenosnim računalom i računalnim programim Audicity. U istom programu provedena je i analiza zvučnog signala prikupljenih tijekom rotacije uzoraka ležajeva brzinama vrtnje 510 o/min, 725 o/min i 1500 o/min.



Slika 27. Mjerač jačine zvuka

Mjerenje temperature tijekom rotacije i zagrijavanja ležaja provedeno je termalnom kamerom „UTI120M“ proizvođača „Uni-Trend Technology“ s 3 ponavljanja na svakom uzorku. Uređaj je prikazan na slici 28.



Slika 28. Termalna kamera UTI120M

Rotacija prstena je ostvarena pomoću elektromotora udarne bušilice „BOSCH PSB 8000 RCE“. Prema specifikacijama proizvođača, uređaj može postići brzinu vrtnje u rasponu od 500 do 3000 okretaja u minuti. Tijekom ispitivanja izmjerena je brzina vrtnje pomoću laserskog tahometra „UT373“ prikazanog na slici 29.



Slika 29. Laserski tahometer UT373

6. REZULTATI ISPITIVANJA

6.1. Mjerenje dimenzija nitriranih prstenova

Prije ispitivanja hrapavosti, vibracija, buke i temperature, pomičnim mjerilom u dva su položaja izmjerene vrijednosti vanjskog (d_v) i unutarnjeg promjera (d_u) prstenova, te je izračunata njihova srednja vrijednost ($d_{v,SR}$, $d_{u,SR}$). U tablici 3. vidljivo je da su promjeri nakon postupaka nitriranja neznatno povećani. Plinski nitriran uzorak P4 s prorezom obuhvaćen je u ispitivanje kao uzorka s izrazitom pogaškom u izradi. Uzorak P6 nitrokarburiran u solnoj kupci TENIFER također je primjer uzorka s greškom koja se sastoji od prisutnosti tragova prethodnog adhezijskog trošenja vanjske površine prstena.

Tablica 3. Vrijednosti vanjskih i unutarnjih promjera prstenova, te njihova srednja vrijednost

	P0 Polazni prsten	P1 PN 450/6h	P2 PN 500/4h	P3 Plinski nitrirano	P4 Plinski nitrirano (uzorak s prorezom)	P5 TENIFER (A)	P6 TENIFER (B)
d_{v1} (mm)	35,00	35,02	35,00	35,03	35,01	35,06	35,01
d_{v2} (mm)	34,98	35,00	34,98	35,01	35,04	35,06	35,02
d_{u1} (mm)	29,95	29,96	29,96	30,01	29,85	30,03	29,97
d_{u2} (mm)	29,96	29,96	29,96	30,00	29,95	30	29,99
$d_{v,SR}$ (mm)	34,99	35,01	34,99	35,02	35,025	35,06	35,015
$d_{u,SR}$ (mm)	29,955	29,96	29,96	30,005	29,90	30,15	29,98

Pomoću uređaja INSIZE 2313-1FA (slika 30.) na prstenovima su izmjerena odstupanja od kružnosti da bi se dobila indikacija da li je ispitani prsten pravilan ili ne (bez izraženih grešaka

kružnosti). Rezultati mjerenja odstupanja od kružnosti navedeni su u tablici 4.



Slika 30. INSIZE Uređaj za mjerenje odstupanja od kružnosti

Tablica 4. Izmjerene vrijednosti odstupanja od kružnosti

Oznaka uzorka	Odstupanje
P0, Polazni prsten	$\Delta = 4 \mu\text{m}$
P1, PN 450/6h	$\Delta = 1 \mu\text{m}$
P2, PN 500/4h	$\Delta = 14 \mu\text{m}$
P3, Plinski nitrirano 520/24h	$\Delta = 4 \mu\text{m}$
P5, TENIFER-A 580/2h	$\Delta = 5 \mu\text{m}$
P6, TENIFER-B 580/2h	$\Delta = 4 \mu\text{m}$

6.2. Hrapavost površine

Hrapavost površine je u općem smislu mikrogeometrijska nepravilnost površine, koja nastaje tijekom postupaka obrade ili drugih utjecaja. Mjerena je pomoću ticala koje dodiruje površinu uzorka u točkama čiji položaj se registrira. Ticalo je u fizičkom kontaktu s uzorkom čije se

vertikalno kretanje pretvara u električni signal.

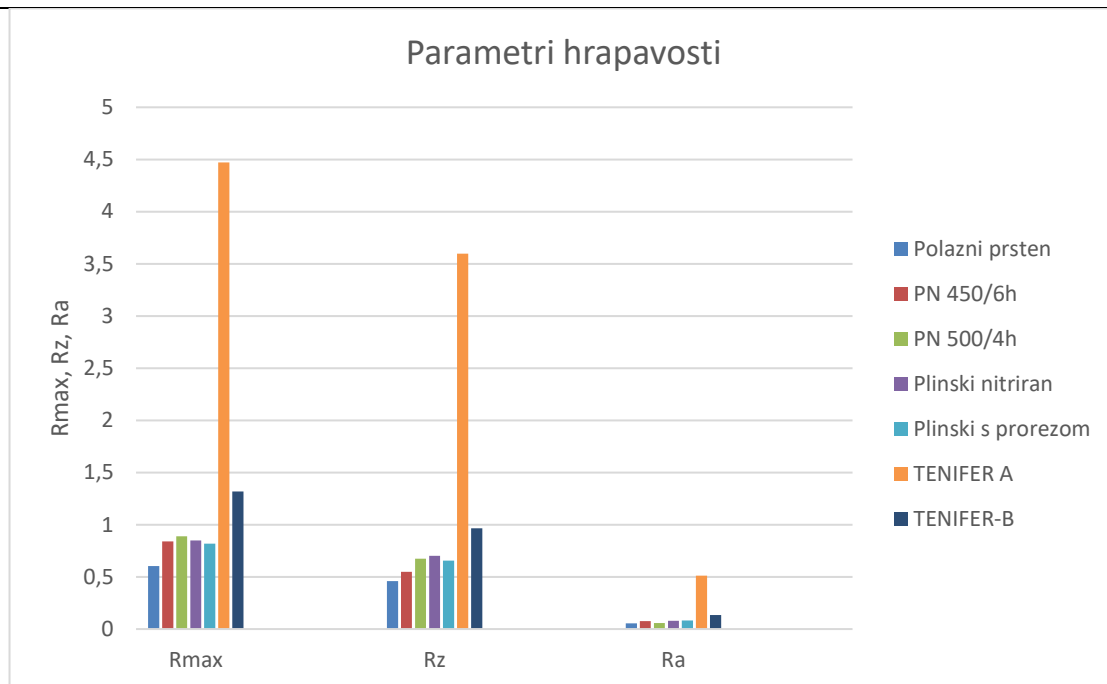
Ispitivanje hrapavosti površine provedeno je na uređaju TIME 3202. Ispitane su vrijednosti parametar hrapavosti površine R_a , R_z , R_{max} .

Hrapavost površine određena je na dva prstena nitriranim u plazmi, dva prstena nitirana u plinu te na dva prstena nitrirana postupkom TENIFER. Za svaki od uzoraka napravljeno je 5 mjerenja i izračunata je srednja vrijednost. U tablici 5, navedeni su rezultati za srednje aritmetičko odstupanje (R_a), prosječnu visinu neravnina (R_z) i najveću visinu neravnina (R_{max}).

Tablica 5. Vrijednosti parametara hrapavosti za ispitane prstenove igličastog ležaja

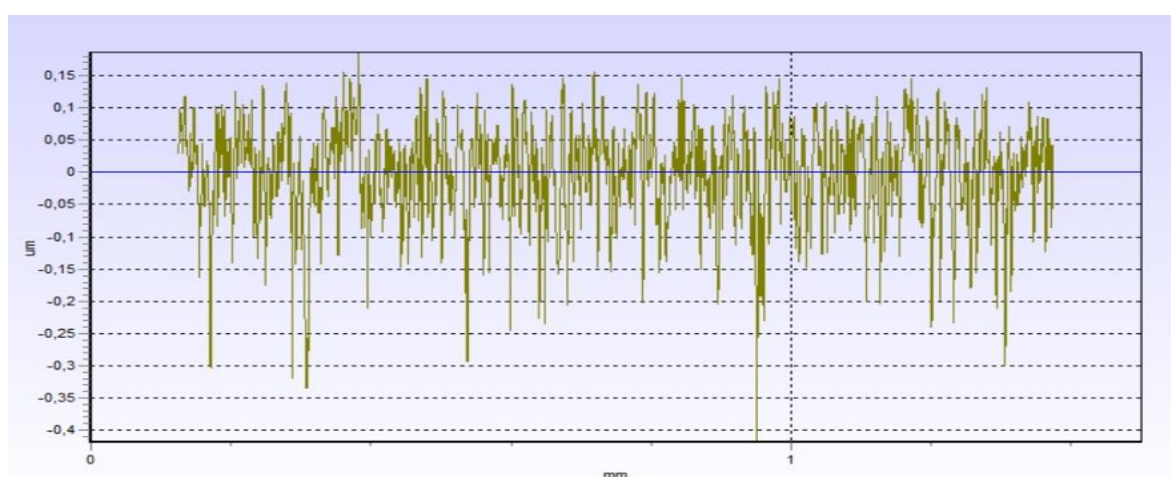
Parametri hrapavosti	Polazni prsten	PN 450/6h	PN 500/4h	Plinski nitriran	Plinski s prorezom	TENIFER-A 580/2h	TENIFER-B 580/2h
R_{max} , (μm)	0,605	0,839	0,888	0,849	0,820	4,472	1,318
R_z , (μm)	0,460	0,550	0,673	0,703	0,656	3,597	0,966
R_a , (μm)	0,056	0,077	0,059	0,080	0,083	0,512	0,133

Slika 31. pokazuje kako je nitiranje u plazmi kao i plinsko nitiranje najmanje utjecalo na promjenu hrapavosti. Parametar hrapavosti površine R_z je veći između 1,15 do 1,5 puta u odnosu na polazno stanje što je prihvatljivo za industrijsku primjenu. Postupkom TENIFER-A hrapavost površine znatno se povisila. Vrijednost parametra hrapavosti R_z je oko 8 puta veća u odnosu na polazni prsten, dok je kod TENIFER-B postupka R_z veći više od 2 puta. Kod valjnih ležajeva takvo povećanje parametara hrapavosti nije povoljno.

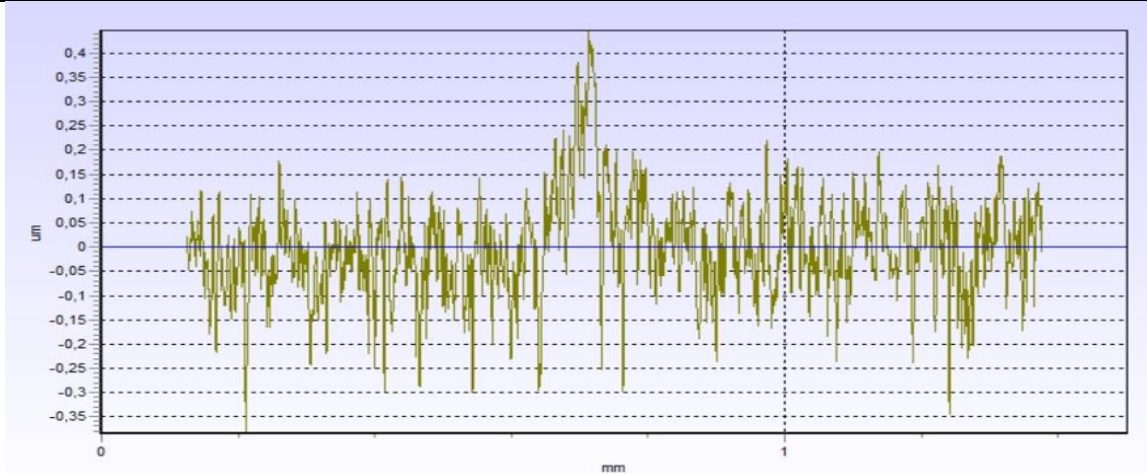


Slika 31. Usporedba parametara hrapavosti ispitnih uzoraka

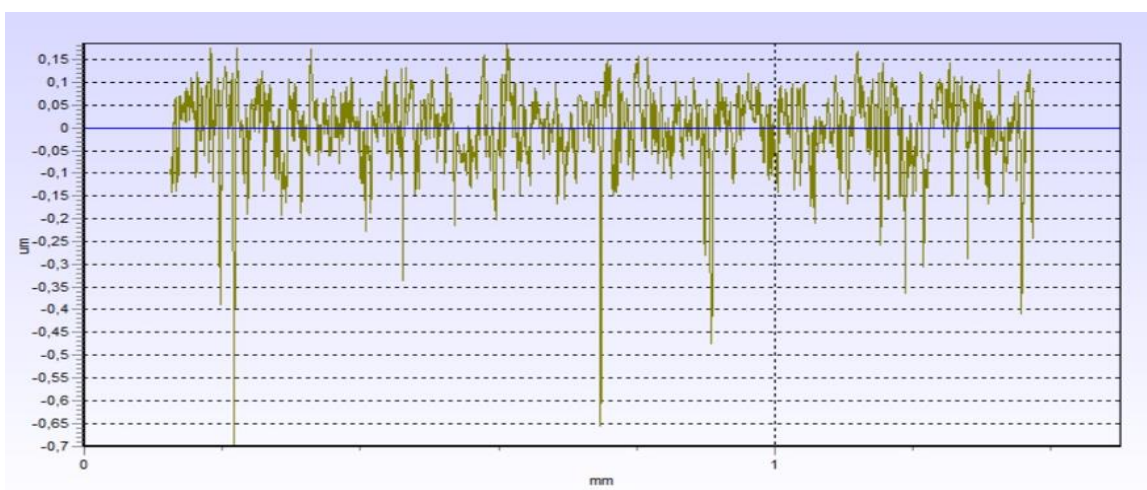
Na slikama od 32 do 38 prikazani su profili hrapavosti za sve ispitane uzorke. Profil hrapavosti za prsten nitriran u plinu (slika 32.) ima nešto više brjegova za razliku od polaznog prstena. Polazni prsten ima više dolova zbog toga što je fino brušen. Na profilu hrapavosti kod postupka TENIFER-A (slika 33.) ima najviše poroznosti (širi dolovi) što je za ovaj način nitriranja uobičajeno, dok su kod postupka TENIFER-B (slika 34.) također dolovi širi nego kod polaznog prstena.



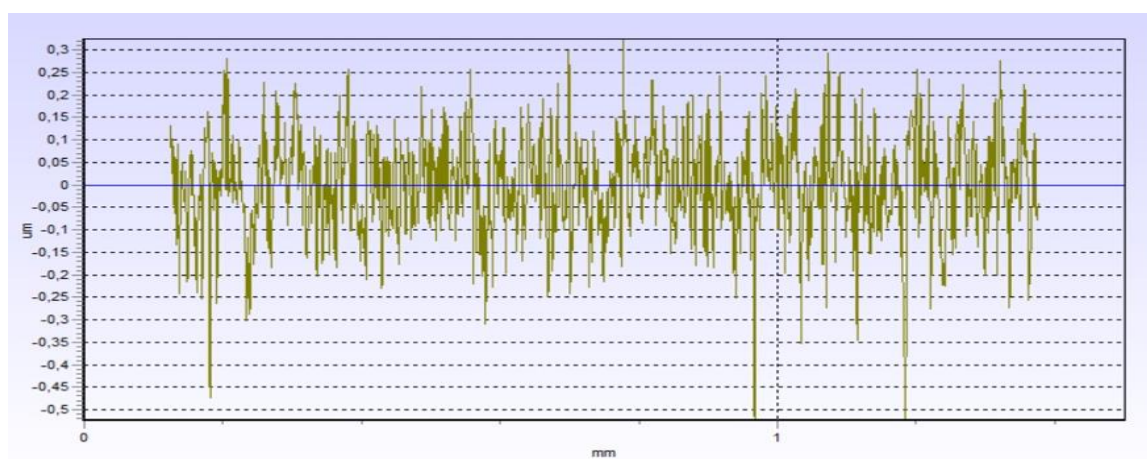
Slika 32. Profil hrapavosti površine na nemodificiranom prstenu



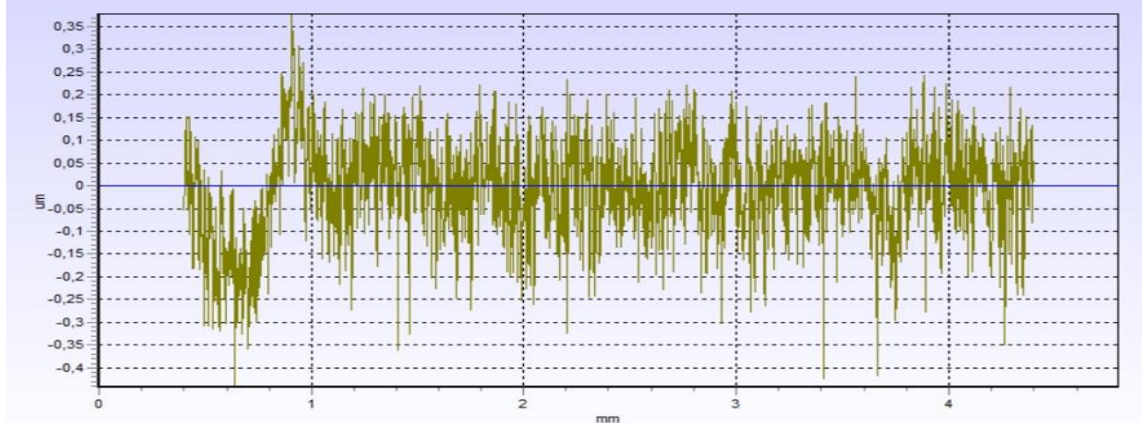
Slika 33. Profil hrapavosti površine na prstenu nitriranom u plazmi PN450/6h



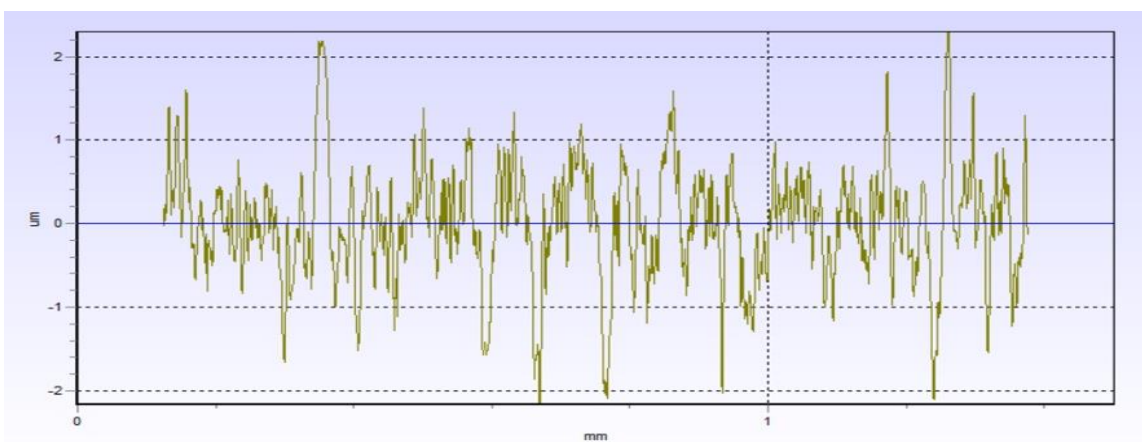
Slika 34. Profil hrapavosti površine prstenu nitriranom u plazmi PN500/4h



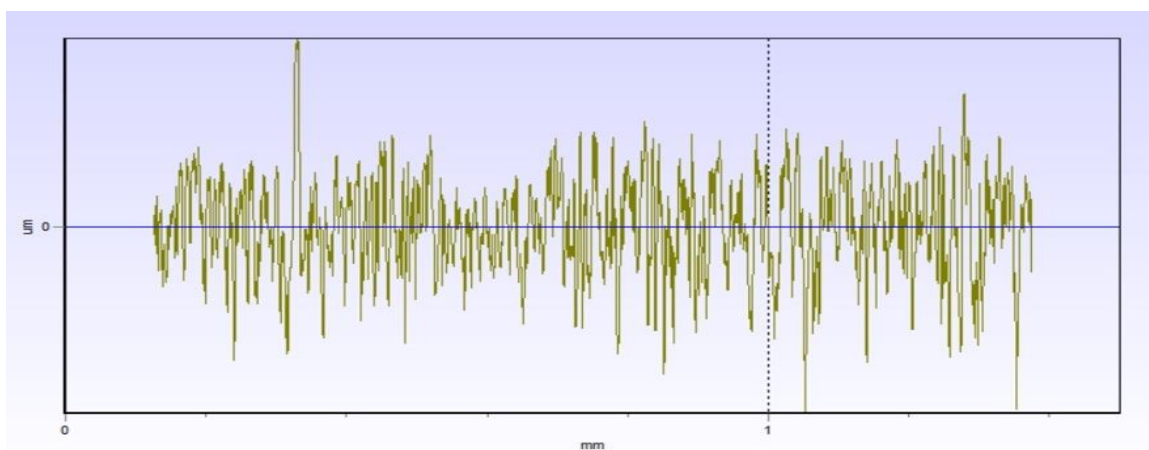
Slika 35. Profil hrapavosti površine na plinski nitriranom prstenu



Slika 36. Profil hrapavosti površine na plinski nitriranom prstenu s prorezom



Slika 37. Profil hrapavosti površine na prstenu nitrokarburiranom postupkom TENIFER-A

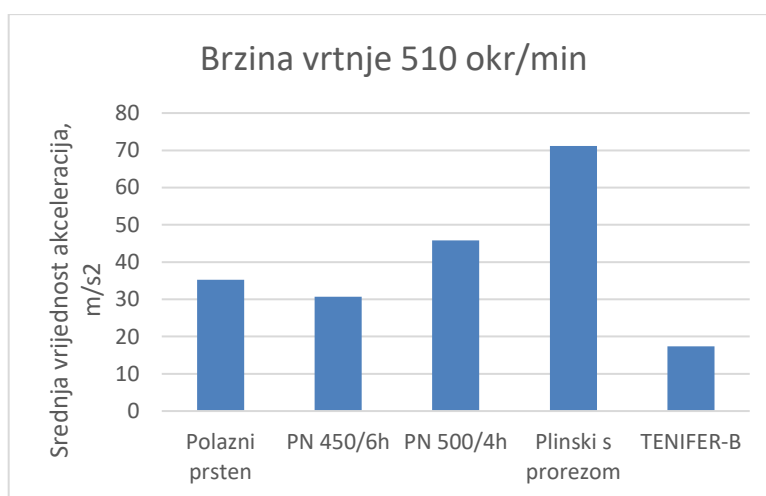


Slika 38. Profil hrapavosti površine na prstenu nitrokarburiranom postupkom TENIFER-B

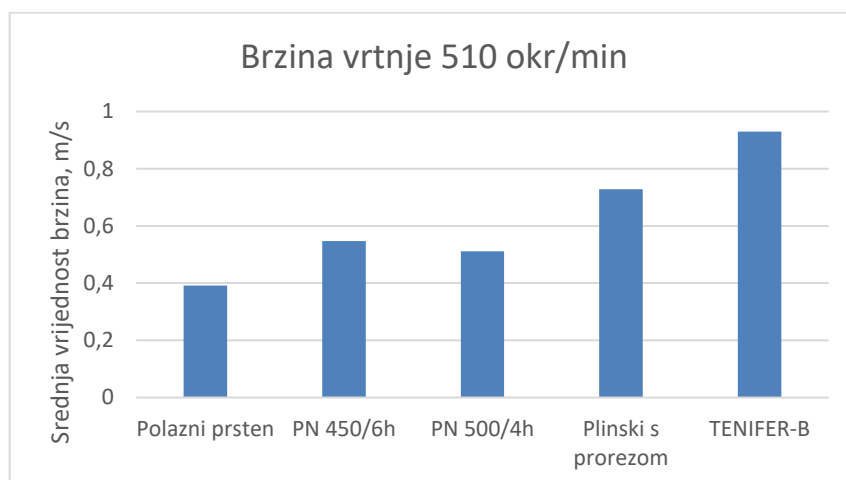
6.3. Ispitivanje vibracija igličastih ležaja

U ovom dijelu rada izmjerene su vibracije nitriranih prstenova i uspoređene su u odnosu na polazni prsten pri različitim brzinama vrtnje. Cilj provedenih ispitivanja bio je ustanoviti kako pojedini postupak nitriranja i brzina vrtnje utječu na pojavu vibracije i rotaciju nitriranog prstena u igličastom ležaju. Kod mjerenja vibracija izmjereno je 10 vrijednosti mjerljivih karakteristika: brzine vibracija, akceleracije i pomaka kod prstenova, te su izračunate njihove srednje vrijednosti za svaku brzinu vrtnje ležaja te broj frekvencija vibracija u određenom rasponu frekvencija. Nisu izmjerene vrijednosti kod plinski nitriranog prstena (P3) i prstena nitriranog postupkom TENIFER-A jer oni zbog svog povećanja dimenzija nakon nitriranja nisu mogli biti ugrađeni u kavez vanjskog prstena igličastog ležaja.

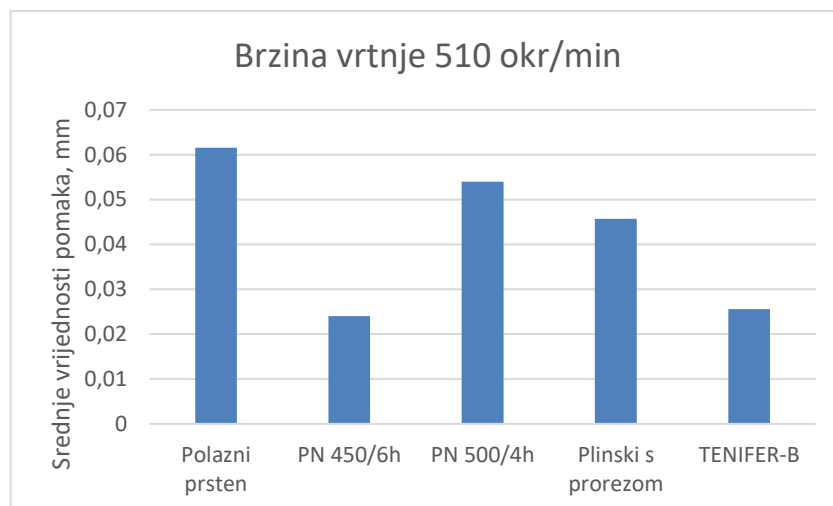
Na slici 39. prikazane su srednje vrijednosti akceleracije prstenova pri brzini vrtnje od 510 okretaja u minuti. Na slici 40. prikazane su srednje vrijednosti brzine, a na slici 41. srednje vrijednosti pomaka pri istoj brzini vrtnje.



Slika 39. Srednja vrijednost akceleracija ležaja pri brzini vrtnje 510 okr/min

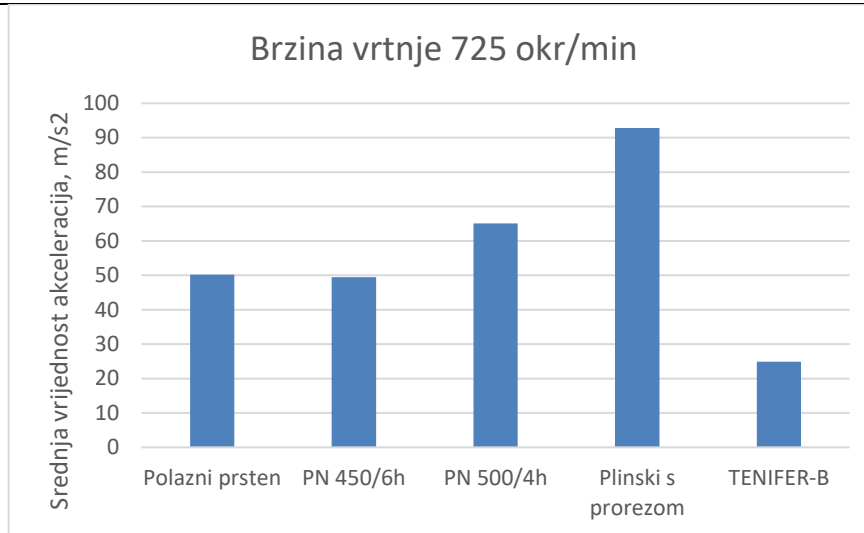


Slika 40. Srednja vrijednost brzine udarca pri brzini vrtnje ležaja 510 okr/min

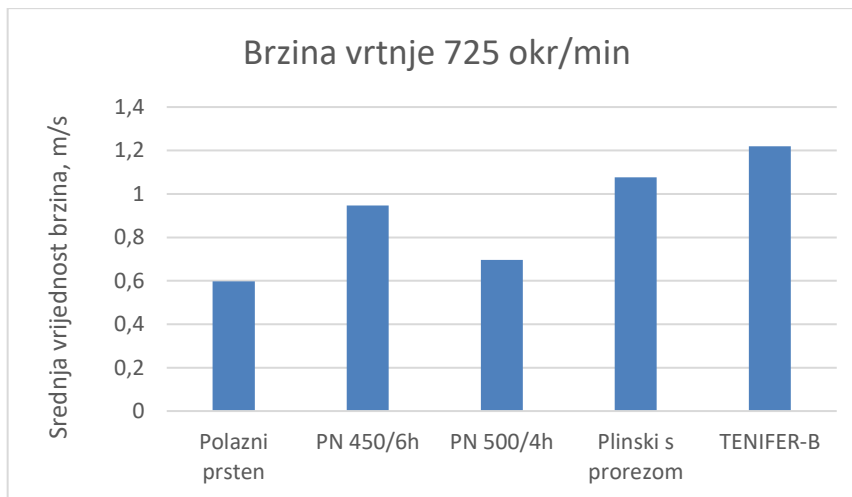


Slika 41. Srednja vrijednost pomaka ležaja pri brzini vrtnje 510 okr/min

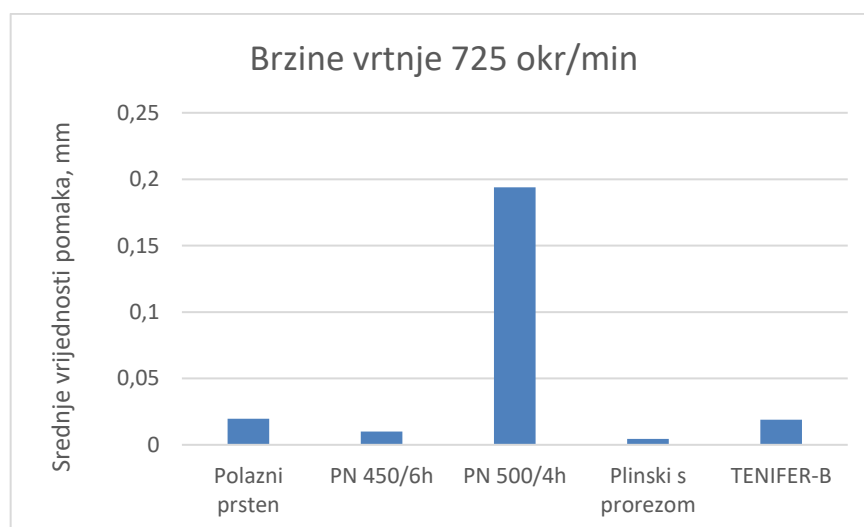
Na slici 42. prikazane su srednje vrijednosti akceleracije prstenova pri brzini vrtnje od 725 okretaja u minuti. Na slici 43. prikazane su srednje vrijednosti brzine, a na slici 44. srednje vrijednosti pomaka pri istoj brzini vrtnje.



Slika 42. Srednja vrijednost akceleracije ležaja pri brzini vrtnje 725 okr/min

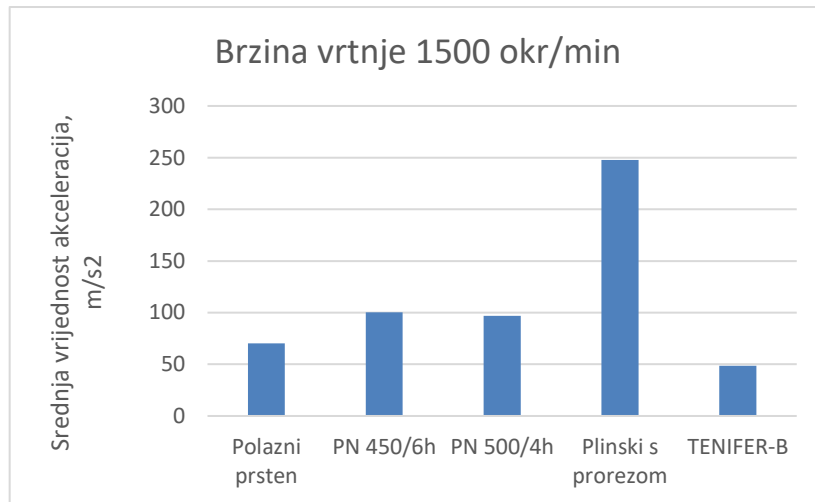


Slika 43. Srednja vrijednost brzina udarca pri brzini vrtnje ležaja 725 okr/min

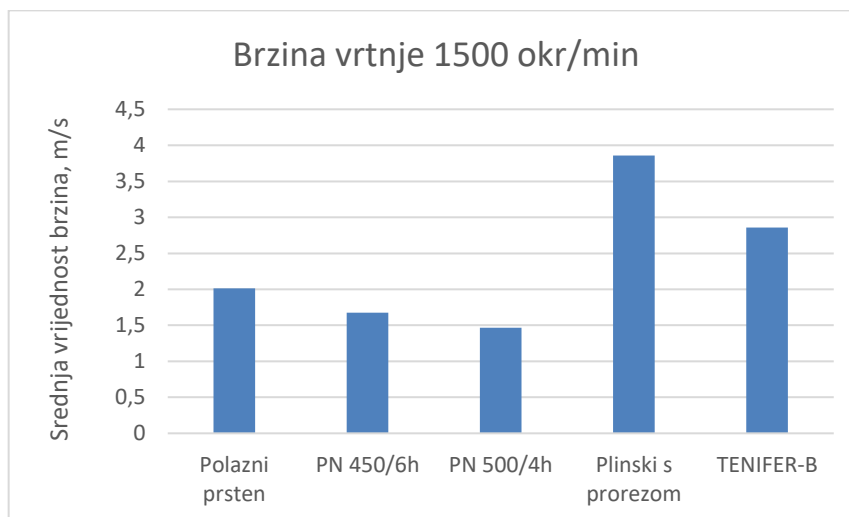


Slika 44. Srednja vrijednost pomaka ležaja pri brzini vrtnje 725 okr/min

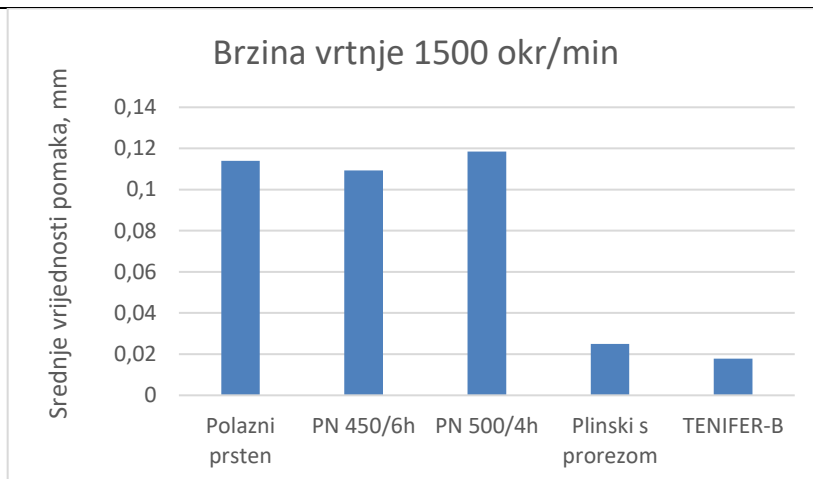
Na slikama od 45 do 47 primijenjena je najveća brzina vrtnje od 1500 okretaja u minuti, te su pri njoj vidljive najveće razlike u odnosu na manje brzine. S većom brzinom vrtnje, rastu i sve tri mjerljive karakteristike što je i razumljivo.



Slika 45. Srednja vrijednost akceleracije ležaja pri brzini vrtnje 1500 okr/min

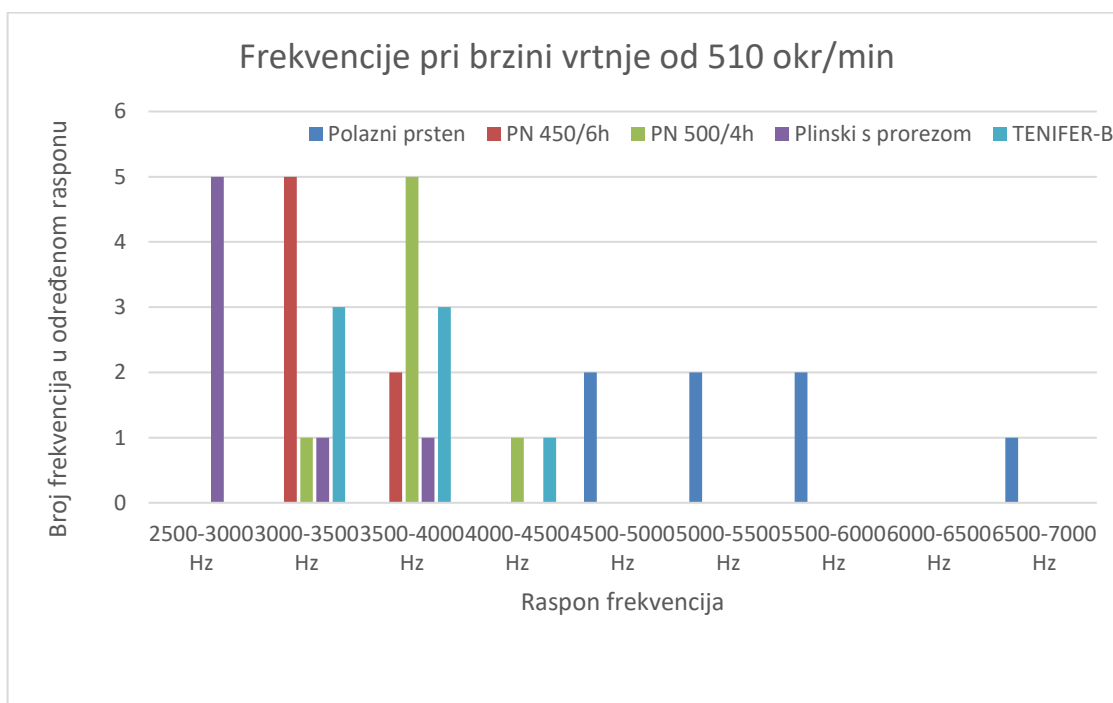


Slika 46. Srednja vrijednost brzina udarca pri brzini vrtnje ležaja 1500 okr/min

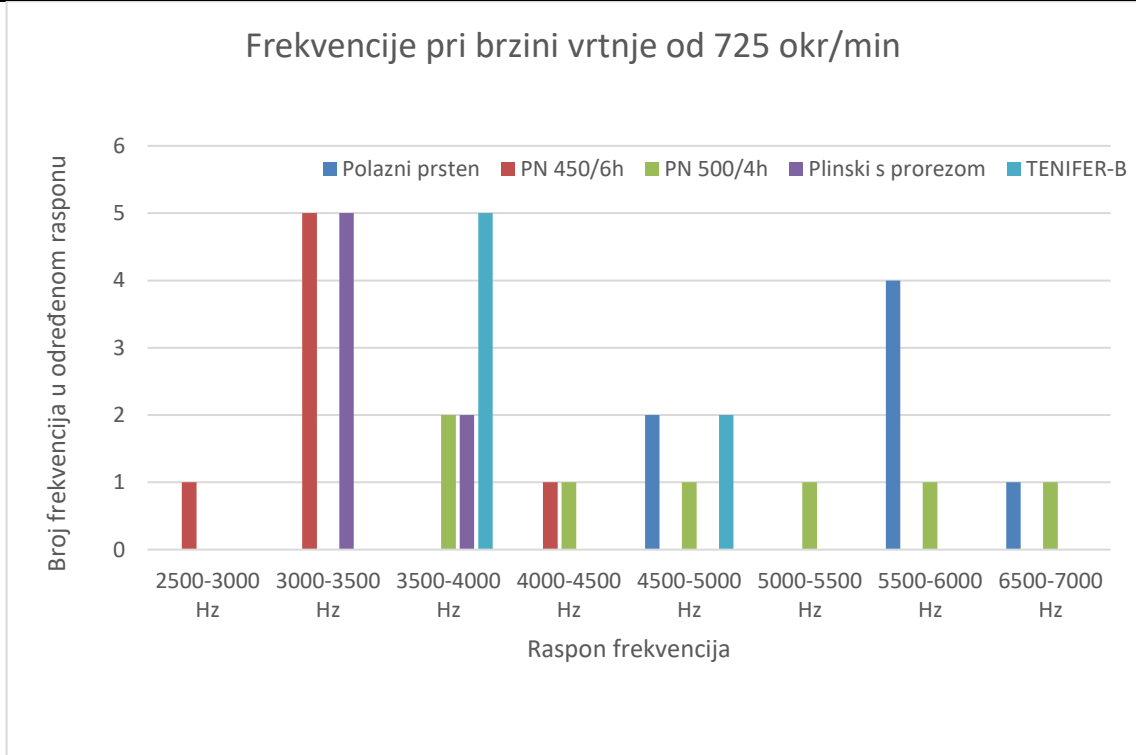


Slika 47. Srednja vrijednost pomaka ležaja pri brzini vrtnje 1500 okr/min

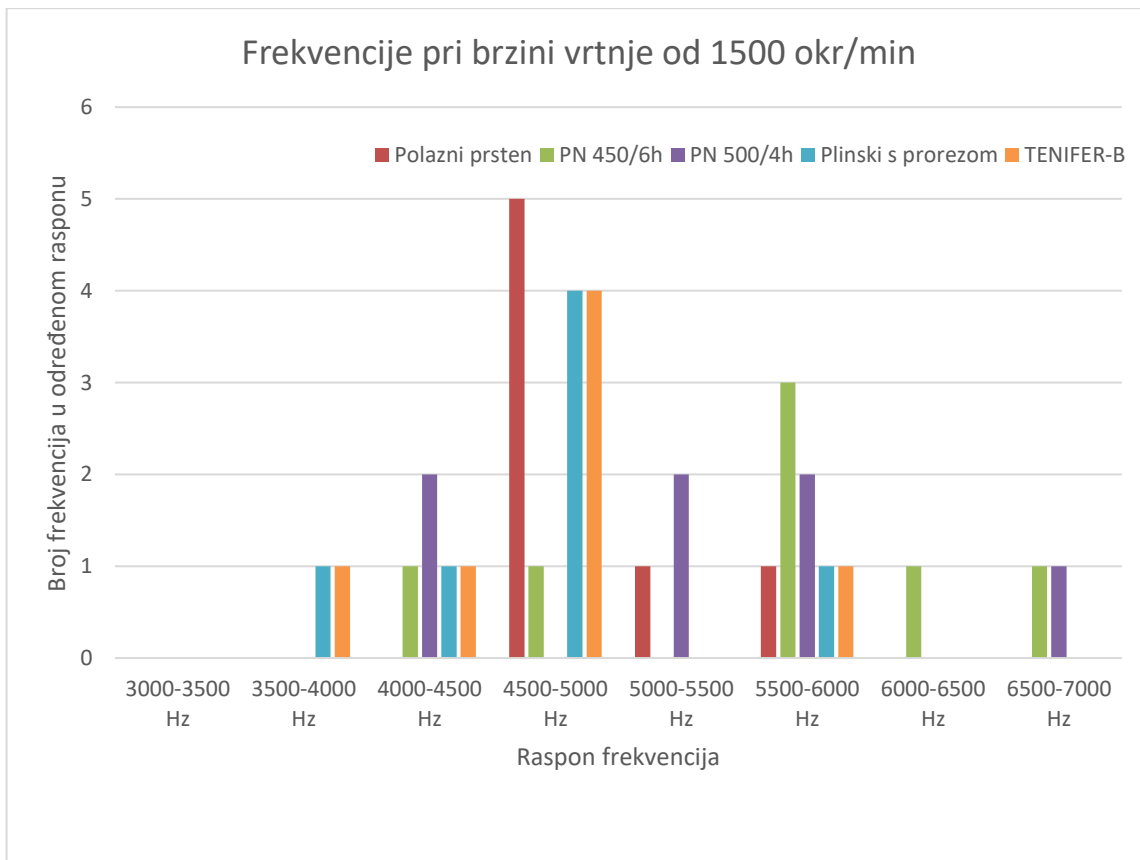
Iz rezultata mjerenja frekvencija vibracija, izmjerene su njene vrijednosti, odabrano je po 7 frekvencija za svaki prsten, te su smještene u raspon od po 500 Hz kako bi se odredio broj frekvencija u pojedinom rasponu. Na slikama 48 do 50 se može vidjeti njihova raspodjela pri različitim brzinama vrtnje. Iz prikaza raspodjele frekvencija vibracija uočava se da se s povećanjem brzine vrtnje povećava broj viših frekvencija.



Slika 48. Raspon frekvencija vibracija pri brzini vrtnje ležaja 510 okr/min



Slika 49. Raspon frekvencija vibracija pri brzini vrtnje ležaja 725 okr/min



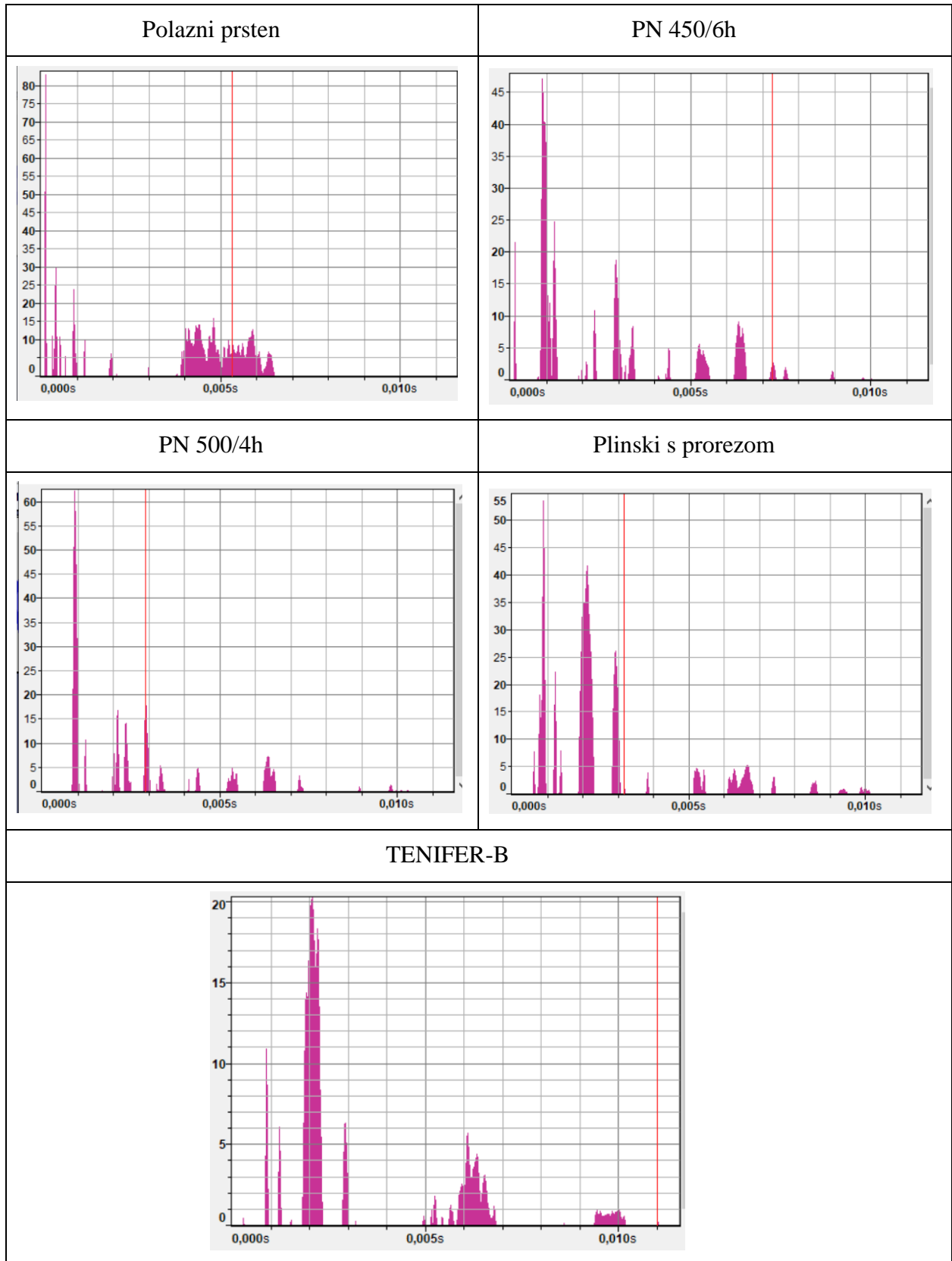
Slika 50. Raspon frekvencija vibracija pri brzini vrtnje ležaja 1500 okr/min

6.4. Ispitivanje buke

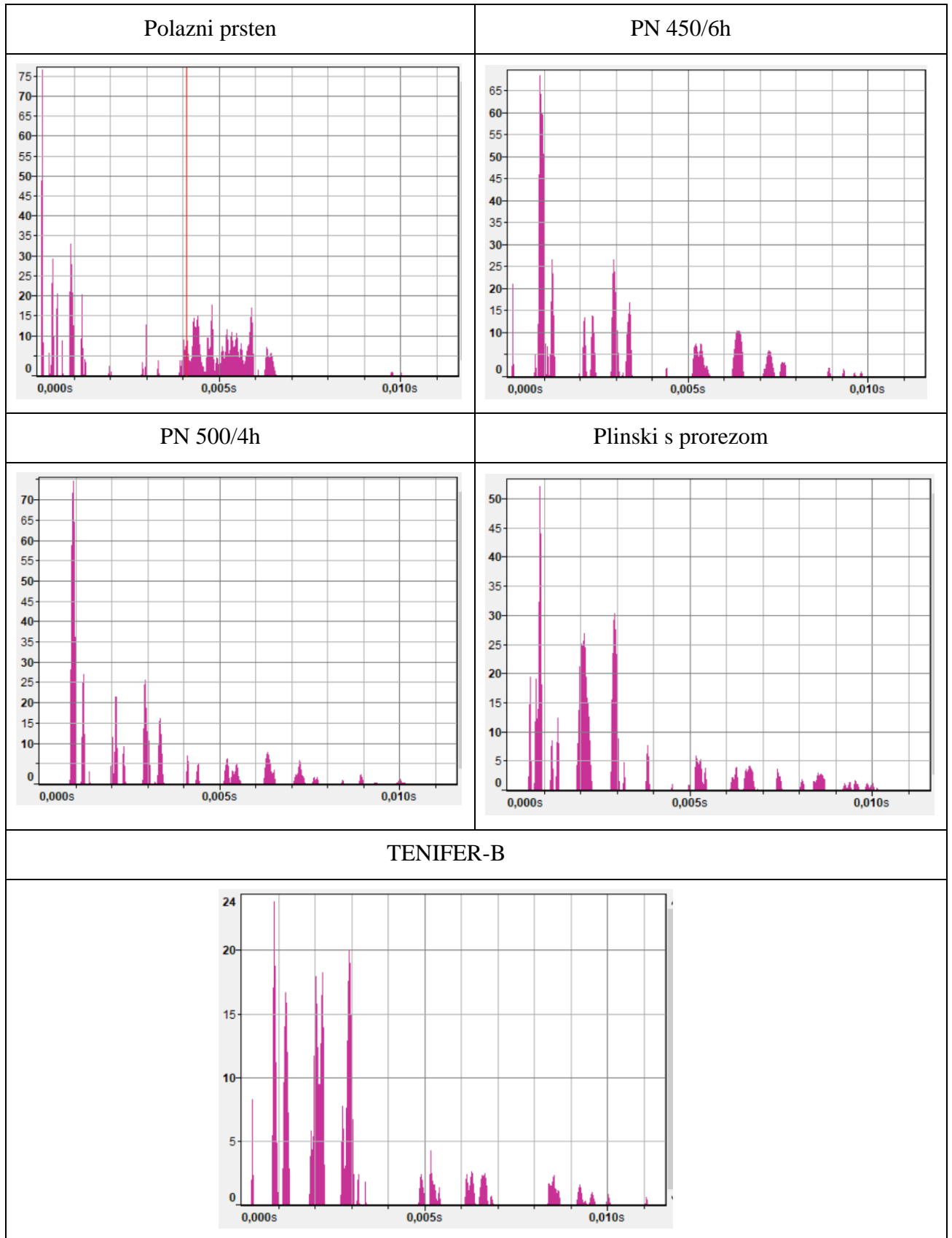
Ispitivanje buke se je provedeno pomoću mikrofona i računalnog programa za snimanje i analizu zvuka „Audacity“. U tablicama 6 do 8 prikazana je promjena intenziteta (jačine) zvuka ovisno o vremenu za svaku pojedinačnu brzinu vrtnje ležaja. Zvuk rada igličastog ležaja je snimljen pri brzinama od 510 o/min, 725 o/min i 1500 o/min te je za svaki uzorak za analizu spektra frekvencija zvuka izabran dio zvučnog zapisa u trajanju od 5 sekundi.

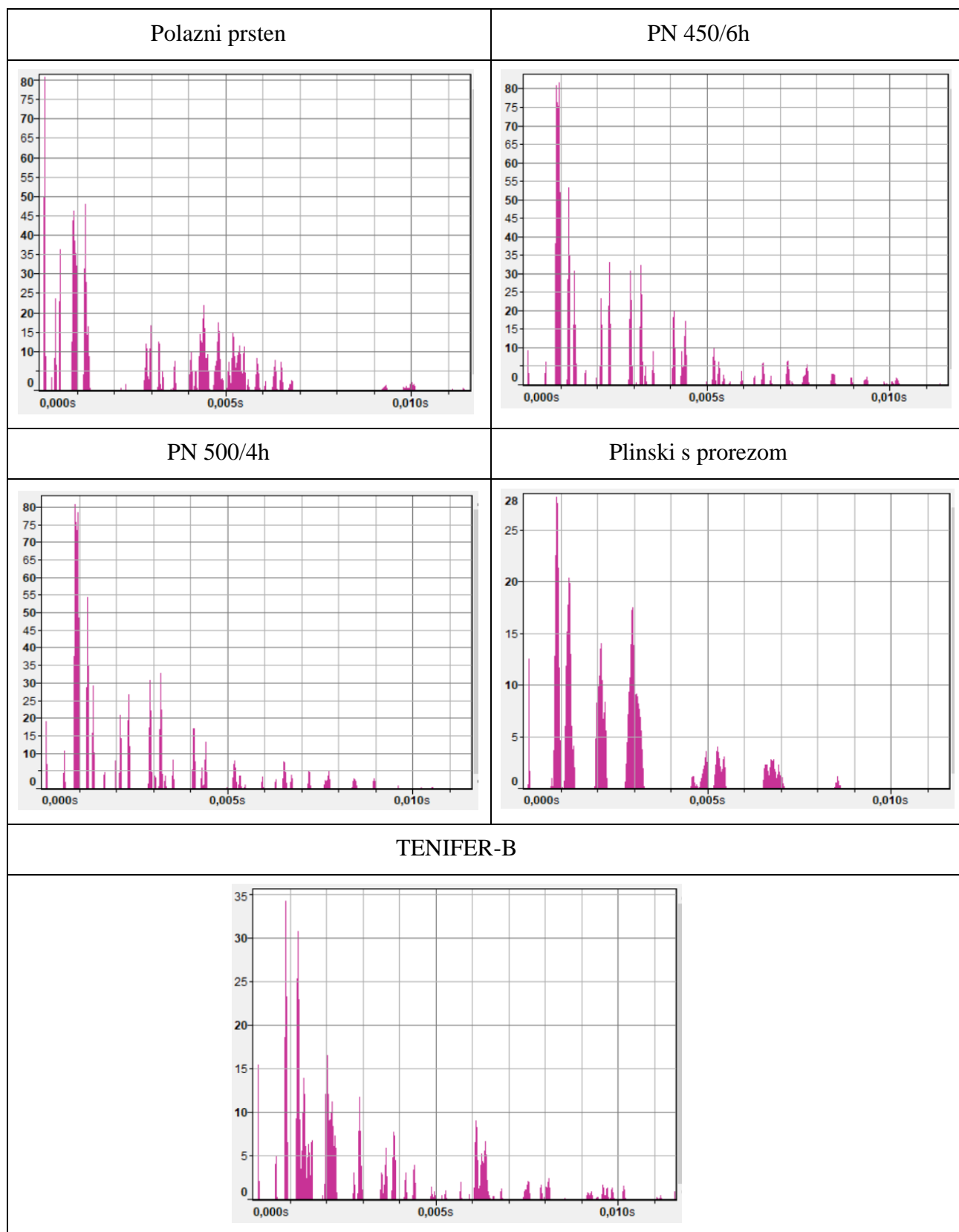
U donjem prikazu ovisnosti intenziteta zvuka (dB) o frekvenciji zvuka, frekvencija zvuka je na horizontalnoj osi dijagama prikazana u vremenskoj skali, u zapisu $t = 1/f$. U ovom načinu zapisa kraća vremena na horizontalnoj osi odgovaraju zvukovima više frekvencije. Iz tablica 6 do 8 se uočava da prsten nitriran postupkom TENIFER-B ima najniži intenzite zvuka, odnosno najtiši je u radu.

Tablica 6. Amplituda zvuka ovisna o frekvenciji buke pri brzini vrtnje ležaja 510 okr/min



Tablica 7. Amplituda zvuka ovisna o frekvenciji buke pri brzini vrtnje ležaja 725 okr/min



Tablica 8. Amplituda zvuka ovisna o frekvenciji buke pri brzini vrtnje ležaja 1500 okr/min

6.5. Mjerenje temperature zagrijavanja igličastog ležaja

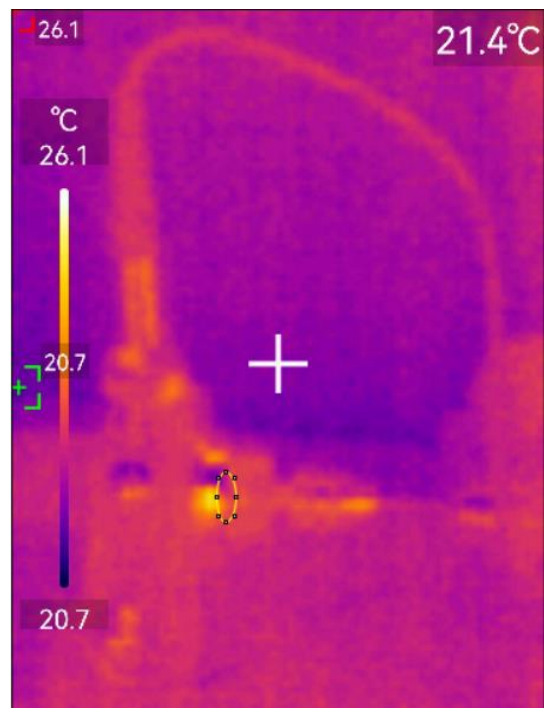
Temperatura prstenova ležaja ispitana je da bi se utvrdilo koji prsten se najviše zagrijao tijekom vrtnje na različitim brzinama. Termovizijskom kamerom povezanom na mobitel su snimljeni prstenovi u ležaju nakon 15 sekundi rada pri određenoj brzini vrtnje. Fotografije dobivene termovizijskom kamerom su analizirane u programu „ImageJ“ u kojem su se analizom dobile srednje vrijednosti temperature prstena na ispitivanim brzinama vrtnje: 510 o/min, 725 o/min i 1500 o/min.

U tablici 9 dane su temperature pri brzini vrtnje od 510 o/min, 725 o/min i 1500 o/min u minuti. Iz rezultat mjerenja temperature je vidljivo kako se temperatura povećava proporcionalno s brzinom vrtnje. Zagrijavanje traje do onog trenutka dok se ne dostigne radna temperatura ležaja i tada temperatura ostaje približno stalnog iznosa. Najveće povećanje temperature vidljivo je kod prstena nitriranog postupkom TENIFER kojem je temperatura narasla za 1,80 °C. Dok je najmanji prirast imao polazni prsten kojem je temperatura narasla za 0,14 °C. Plazma nitriranom prstenu PN 450/6h se isto tako znatno povećala temperatura nakon 15 sekundi, te njen prirast iznosi 1,68 °C.

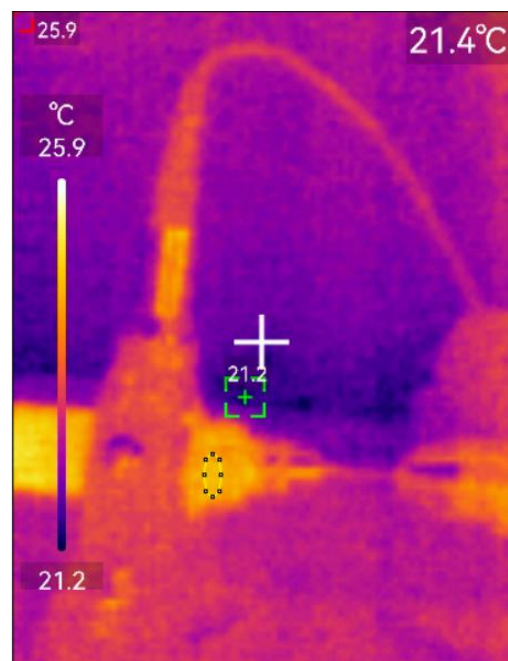
Tablica 9. Srednje temperature prstenova pri različitim brzinama vrtnje

	Temperatura, °C				
	P0	P1	P2	P4	P6
510 okr/min	25,96	24,07	25,47	25,26	26,10
725 okr/min	26,01	24,29	25,88	25,51	26,82
1500 okr /min	26,10	25,75	26,10	25,72	27,90

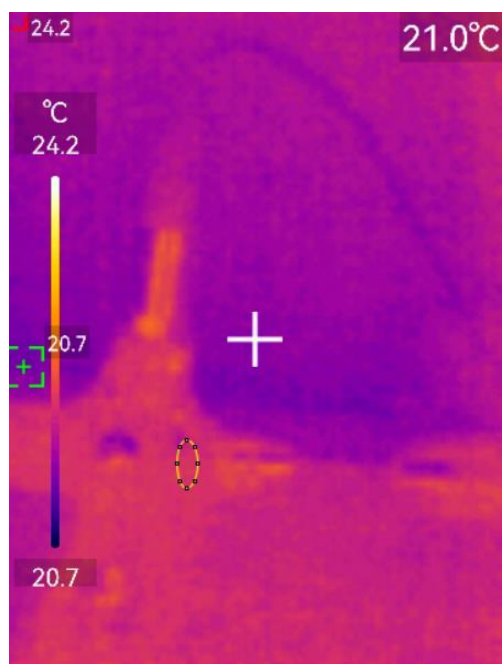
Na slikama 51 do 55 vidljive su fotografije uslikane termokamerom pri brzini od 1500 okretaja u minuti.



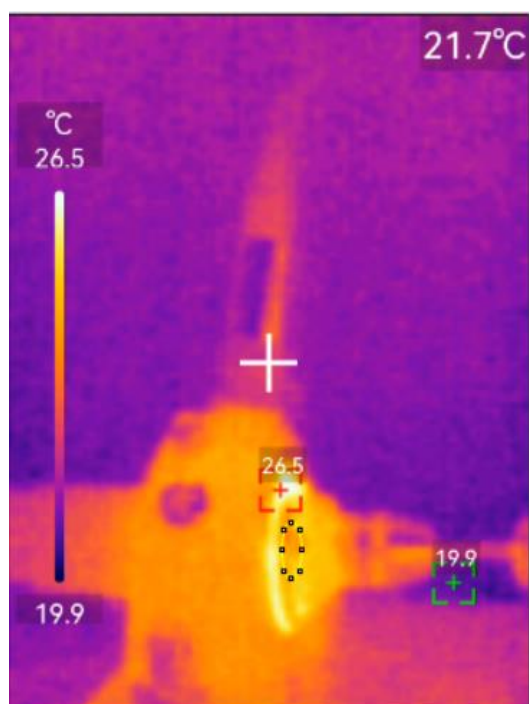
Slika 51. Polazni prsten fotografiran termokamerom pri 1500 okr/min



Slika 52. Prsten PN 450/6h fotografiran termokamerom pri 1500 okr/min



Slika 53. Prsten PN 500/4h fotografiran termokamerom pri 1500 okr/min



Slika 54. Plinski nitriran prsten s prorezom fotografiran termokamerom pri 1500 okr/min

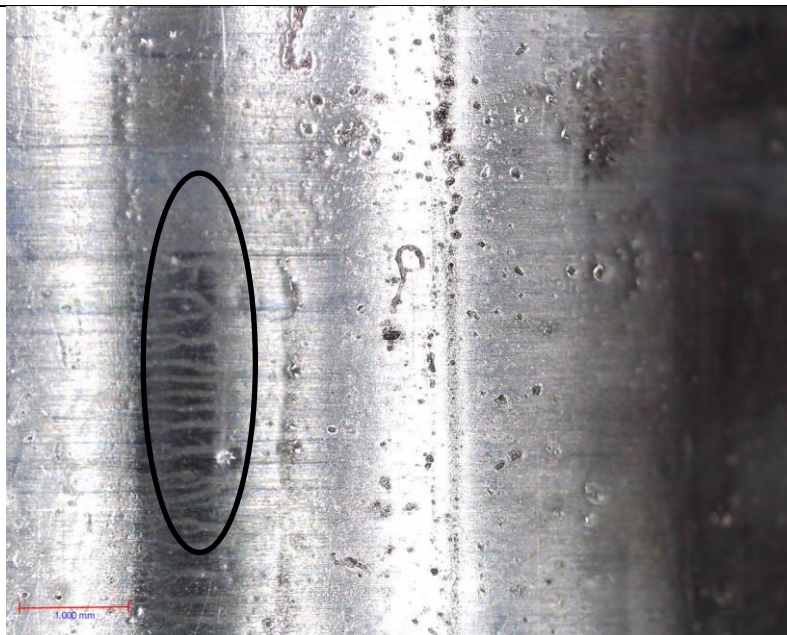


Slika 55. Prsten nitriran postupkom TENIFER fotografiran termokamerom pri 1500 okr/min

6.6. Analiza trošenja površine unutrašnjeg prstena ležaja

Tijekom ispitivanja vibracija, buke i zagrijavanja ležajni prstenovi su bili izloženi roraciji na brzinama 525 o/min, 725 o/min i 1500 o/min u ukupnom trajanju od 15 min. Ovaj kratkotrajni rad u uvjetima bez opterećanja i bez podmazivanja ostavio je tragove trošenja na površinama valjnih tijela ležaja. Tragovi trošenja snimljeni su svjetlosnim mikroskopom Toolcraft s kamerom i analizirani u računalnom programu MicroCapture Plus.

Na slici 56 prikazan je polazni prsten P0 nakon provedenih ispitivanja. Rupice na površini prstena predstavljaju početak umora površine, a zaokruženi dio na površini pokazuje pojavu adhezijskog trošenja kao posljedice klizanja valjnih tijela tijekom ispitivanja.



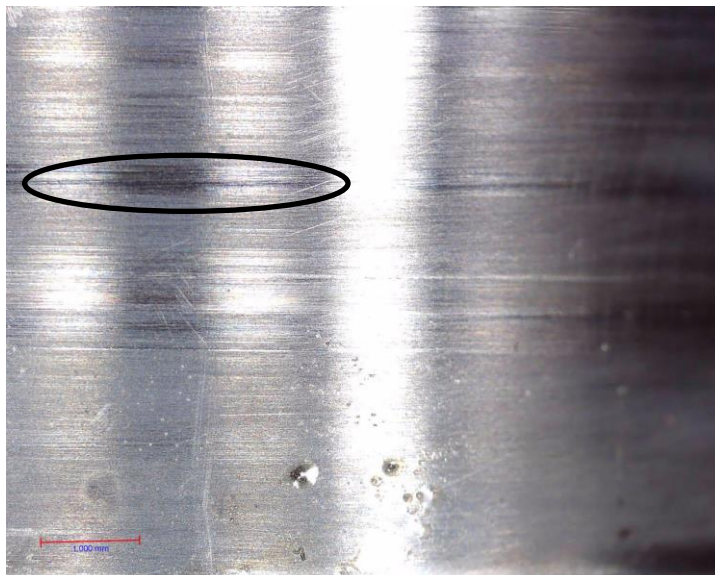
Slika 56. Tragovi trošenja na površini nenitriranog prstena

Na slici 57 prikazan je unutrašnji prsten igličastog ležaja P1 nitriran u plazmi PN 450/6h. Na površini su vidljive rupice nastale umorom površine, dok isprekidane linije predstavljaju otisak i tragove klizanja iglica iz kaveza vanjskog prstena ležaja.



Slika 57. Tragovi trošenja na unutrašnjem prstenu PN 450/6h igličastog ležaja nitriranom u plazmi

Na slici 58 prikazan je unutrašnji prsten P2 nitriran u plazmi PN 500/4h. Rupice na površini prstena predstavljaju početak trošenja prstena umorom površine, dok zaokruženi dio predstavlja pojavu adhezijskog trošenja zbog klizanja valjih tijela (iglica) po prstenu.



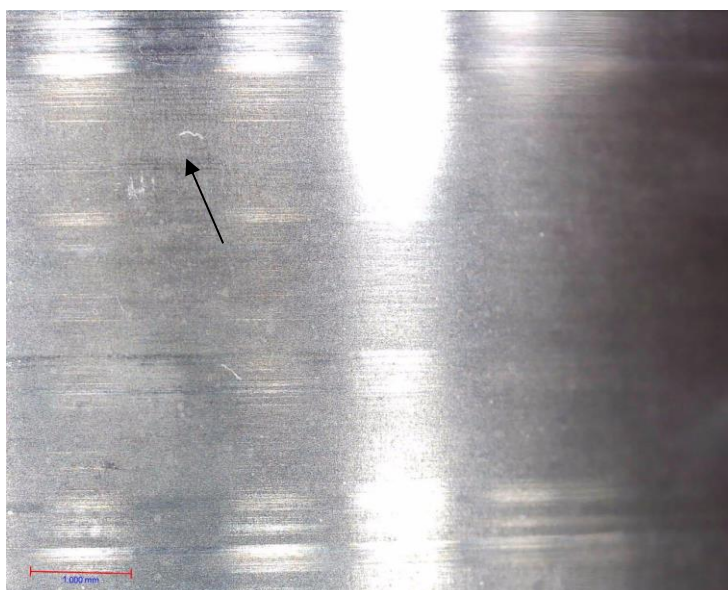
Slika 58. Tragovi trošenja na unutrašnjem prstenu PN 500/4h igličastog ležaja nitriranom u plazmi

Na slici 59 prikazana površina plinski nitriranog prstena P4 s prorezom. Strelica na slici označuje tragove abrazijskog trošenja, dok zaokruženi dio predstavlja adhezijsko trošenje.



Slika 59. Tragovi trošenja na plinski nitriranom prstenu s prorezom

Na slici 60. prikazan je prsten P6 nitrokarburiran postupkom TENIFER. Uzorak nije pokazivao znakove umora površine, no vidljivi su tragovi adhezijskog trošenja označeni strelicom na slici.



Slika 60. Tragovi trošenja na prstenu nitrokarburiranom postupkom TENIFER

6.7. Diskusija rezultata

U provedenim pokusima trošenja ispitano je više svojstava igličastog ležaja (promjena dimenzija i hrapavosti nakon postupaka nitriranja, vibracije, buka i zagrijavanje u radu) sastavljenog od istog vanjskog prstena s kavezom i igličastim valjnim tijelima i unutrašnjeg prstena nitriranog različitim postupcima nitriranja: u plazmi, plinu i solnoj kupci. u pokusima trošenja je korišteno 5 različitih unutrašnjih prstenova: polazni nenitrirani prsten od čelika DIN 100Cr6, dva prstena nitrirana u plazmi, jedan nitriran na 450 °C u trajanju od 6 sati, a drugi nitriran na 500 °C u trajanju od 4 sata, jedan plinski nitrirani prsten s prorezom te prsten nitrokarburiran postupkom TENIFER. Cilj provedenih ispitivanja bio je usporediti svojstva različito obrađenih površina unutrašnjeg prstena i predložiti optimalni postupak nitriranja.

Na svim uzorcima provedena su ispitivanja hrapavosti, snimljeni su parametri hrapavosti i profili hrapavosti. Utvrđeno je kako dolazi do promjene hrapavosti površine postupcima nitriranja. Kod TENIFER postupaka vidljive su najveće promjene hrapavosti. Najveći porast parametara hrapavosti u odnosu na polazni prsten vidljiv je kod TENIFER-A postupka, kod njegovog su profila hrapavosti širi dolovi, dok kod TENIFER-B imamo drugi najveći porast hrapavosti površine. Njihova površina je zbog toga puno grublja u odnosu na polazni nenitrirani

prsten. Kod prstenova nitriranih u plazmi i plinski nitriranih prstenova dolazi do manjih promjena hrapavosti što je prihvatljivo, te ne dolazi do pretjerano značajne razlike nakon obrade.

Ispitivanjem vibracija ležaja, mjerene su karakteristike pomaka, brzine, akceleracije i frekvencija vibracija. Najveću vrijednost akceleracije vibracija pri svim brzinama pokazao je plinski nitriran prsten s prorezom, dok najmanju vrijednost ima TENIFER-B prsten. Najveću brzinu vibracija imaju TENIFER-B prsten i prsten plinski nitriran s prorezom, a najmanju ima prsten nitriran u plazmi PN 450/6h. Kod pomaka primjerice pri brzini od 510 o/min najmanji pomak ima prsten PN 450/6h, dok pri brzini vrtnje ležaja od 725 o/min najmanji pomak ostvaruje plinski nitriran prsten s prorezom, a pri najvećoj brzini najmanji pomak ima TENIFER-B prsten. Vidi se kako svaki prsten dominira u pojedinoj mjerljivoj karakteristici.

Ispitivanjem buke koja nastaje tijekom rada ležaja analizirane su specifične frekvencije kod kojih dolazi do povećanja amplitude zvuka. Buka je ispitina pri brzinama vrtnje od 510, 725 i 1500 okretaja u minuti. Pri brzini od 510 okretaja u minuti najmanju buku proizvodi TENIFER-B prsten, dok najveću buku proizvodi plinski nitriran prsten s prorezom. Povećanjem brzine na 725 okretaja u minuti prsten TENIFER-B i dalje proizvodi najmanju buku, a plinski nitriran prsten s prorezom je i dalje najbučniji. Pri najvećoj brzini od 1500 okretaja u minuti TENIFER-B prsten je najtiši, dok ostali prstenovi imaju sličnu razinu buke tijekom cijelog ispitivanja.

Ispitivanja temperature u 15. sekundi za svaki prsten pri brzinama od 510, 725 i 1500 okretaja u minuti rezultiralo je na sljedeći način. Porastom brzine vrtnje raste i temperatura prstenova u ležajevima, te tako najveći prirast temperature imaju prsten TENIFER-B i prsten nitriran u plazmi PN 450/6h, a najmanji prirast ima polazni nenitrirani prsten.

Kod analize trošenja površine nakon ispitivanja, vidljivo je kako najmanje oštećenja ima prsten TENIFER-B, dok ostali prstenovi imaju slična oštećenja kao što su umor površine i adhezijsko trošenje.

7. ZAKLJUČAK

Na temelju rezultata dobivenih ispitivanjem hrapavosti površine, vibracija, buke, temperature, te analizom trošenja površine nitriranih prstenova igličastog ležaja od čelika DIN 100Cr6 proizlaze sljedeći zaključci.

Hrapavost površine nitriranih prstenova se najviše povećala nitrokarburiranjem postupkom TENIFER zbog stvaranja porozne zone spojeva. Prsteni nitrirani u plazmi i plinskoj atmosferi pokazali su neznatno povećanje hrapavosti površine. Profil hrapavosti nitriranih prstenova također su promijenjeni u odnosu na polazni prsten. Najmanja promjena profila hrapavosti površine vidljiva je kod prstena nitriranog u plazmi na temperaturi od 500 °C pri trajanju od 4 sata.

Nitrokarburiranje u solnoj kupci TENIFER i plinskim nitriranjem značajno se povećao promjer unutrašnjeg prstena, što je posljedica visoke temperature na kojima se provode ovi postupci. Polazno stanje ležaja od čelika 100Cr6 je kaljeno i popušteno, a tijekom ovih nitriranja nastavljaju se procesi popuštanja koji dovode do povećanja dimenzija. Unutrašnji prstenovi nitrirani u plazmi neznatno su promjenili dimenzije nakon nitriranja.

Najveću vrijednost akceleracije vibracija pri svim brzinama pokazao je plinski nitriran prsten s prorezom, zbog udaraca proreza u kavez i valjna tijela vanjskog prstena. Najmanju vrijednost akceleracija vibracija pokazao je prsten P6 nitrokarburiran postupkom TENIFER-B. Najmanju brzinu vibracija pokazao je prsten P1 nitriran u plazmi PN 450/6h.

Najmanju buku proizvodi nitrokarburirani prsten P6 TENIFER-B prsten, dok najveću buku proizvodi plinski nitriran prsten s prorezom. Ostali prstenovi imali su sličnu razinu buke tijekom svih brzina vrtnje.

Najveći prirast temperature tijekom 5 min trošenja uočen je kod rotacije prstena P6 nitrokarburiranog postupkom TENIFER-B i prstena P1 nitriranog u plazmi PN 450/6h, a najmanji prirast temperature uočen je na polaznom nenitriranom prstenu.

Iz rezultata analize trošenja svjetlosnom mikroskopijom uočeno je da najmanje trošenje na nitrokarburiranom prstenu P6 obrađenom u postupku TENIFER-B, dok ostali prstenovi imaju slična oštećenja nastala pojavom jamica od umora površine i tragova klizanja valjnih tijela kao posljedice adhezijskog trošenja.

LITERATURA

- [1] „Ležaj“ Wikipedia, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Le%C5%BEaj> (15.01.2024.)
- [2] „Valjni ležaj“ Wikipedia, https://hr.wikipedia.org/wiki/Valjni_le%C5%BEaj (15.01.2024.)
- [3] https://tehnika.lzmk.hr/tehnickaenciklopedija/elementi_strojeva_10_lezaji.pdf
- [4] <https://blog.myrank.co.in/rolling-friction/> (15.01.2024.)
- [5] <https://www.nskamericas-literature.com/en/rolling-bearings/> (15.01.2024.)
- [6] https://www.schaeffler.com/remotemedien/media/_shared_media/08_media_library/01_publications/schaeffler_2/tpi/downloads_8/tpi_109_de_en.pdf (16.01.2024.)
- [7] Bhadeshia HKDH. Steels for bearings. Vol. 57, Progress in Materials Science. 2012. p. 268–435. doi: 10.1016/j.pmatsci.2011.06.002
- [8] https://www.fbj-bearings.com/pdf_engineeringdata/calculationofservicelife.pdf (16.01.2024.)
- [9] Qiu, M., Chen, L., Li, Y., Yan, J.: Bearing Tribology Principles and Applications, 2017, str. 39-76.
- [10] 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.
- [11] Matijević B.: Predavanje iz kolegija „Toplinska obrada“, autorizirana predavanja. FSB, Zagreb; 2022.
- [12] „Nitriranje“ Wikipedia, [https://hr.wikipedia.org/wiki/Nitriranje_\(metalurgija\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/Nitriranje_(metalurgija)) (19.01.2024.)
- [13] E.V.Pereloma, A.W.Conn, R.W.Reynoldson.: Comparison of ferritic nitrocarburising technologies. Surface and Coatings Technology 145 (2001), 44-50.
- [14] Dr. Joachim Bosslet, Michael Kreutz.: Tufftride-QPQ-Process, HEF-Degussa, 2000
- [15] <https://www.totalmateria.com/articles/Art132.htm> (19.1.2024.)
- [16] Tandon, N., Choudhury, A.: A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearing, August 1999., str. 469-480.
- [17] Halep, A.: Metode za procjenu stanja kotrljajućih ležaja. 1 Konferencija „Održavanje“; Zagreb, 2010.
- [18] SKF Reliability Systems. Vibration Diagnostic Guide CM5003. San Diego; 2000.

[19] <https://controltech.hr/hr/usluge/mjerenje-vibracija-i-dijagnostika>

(19.1.2024)