

Primjena funkcionalnih prevlaka na valjnim ležajima

Rukavina, Lucija

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:235:107764>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-09-28**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Lucija Rukavina

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Lucija Rukavina

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Darku Landeku, dipl. ing. Na pruženom znanju tokom dosadašnjeg studiranja kao i svakoj pruženoj informaciji, pomoći i savjetu koji su mi pomogli u izradi završnog rada.

Najviše se zahvaljujem obitelji i prijateljima koji su me podržavali tokom preddiplomskog studija i vjerovali u mene čak i onda kada ja nisam.

Lucija Rukavina



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: **Lucija Rukavina** JMBAG: **0035222945**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena funkcionalnih prevlaka na valjnim ležajima**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of functional coatings on roller bearings**

Opis zadatka:

Prstenovi i valjna tijela ležajeva izloženi su u radu dinamičkim naprezanjima, kontaktnim pritiscima, trošenju i koroziji. Njihova trajnost u određenim uvjetima uporabe može se dodatno povećati modifikiranjem i prevlačenjem površine unutrašnjeg prstena ležaja i primjenom odgovarajućeg maziva. U radu treba opisati svojstva čelika i funkcionalnih površinskih slojeva za prikladnih za izradu valjnih ležaja te metode ispitivanja vibracija, buke i zagrijavanja valjnih ležaja.

U eksperimentalnom dijelu rada treba provesti prevlačenje unutrašnjeg prstena istovrsnog igličastog ležaja izrađenog od čelika 100Cr6 PACVD prevlakama TiN/TiCN i TiCN/TiN te prevlakom PVD TiN. Na prevučenim i ne prevučenim igličastim ležajima, uz primjenu istog maziva provesti snimanje vibracija i buke pri različitim brzinama vrtnje. Na temelju rezultata ispitivanja predložiti optimalnu prevlaku za unutrašnji prsten igličastog ležaja koja će omogućiti smanjenje buke i vibracija 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 zadao:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| SADRŽAJ | II |
| POPIS SLIKA | IV |
| POPIS TABLICA..... | V |
| POPIS OZNAKA | VI |
| SAŽETAK..... | VII |
| SUMMARY | VIII |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. VALJNI LEŽAJI | 3 |
| 2.1. Izrada ležaja | 3 |
| 2.2. Igličasti ležaj | 4 |
| 2.3. Čelici za ležaje | 5 |
| 2.4. Čelik 100Cr6 | 5 |
| 3. POSTUPCI MODIFICIRANJA I PREVLAČENJA POVRŠINA | 6 |
| 3.1. Postupci provlačenja površina | 6 |
| 3.2. Modificiranje i prevlačenje površina | 7 |
| 3.3. Kemijsko prevlačenje iz parne faze | 7 |
| 3.3.1. CVD postupak..... | 7 |
| 3.3.2. PACVD postupak..... | 8 |
| 3.4. Fizikalno prevlačenje iz parne faze..... | 10 |
| 3.4.1. PVD postupak | 10 |
| 4. ISPITIVANJE VIBRACIJA..... | 11 |
| 4.1. Teorija vibracija | 11 |
| 4.1.1. Profili vibracija | 12 |
| 4.1.1.1. Vremenska domena..... | 12 |
| 4.1.1.2. Frekvencijska domena | 12 |
| 5. PLAN I PROVEDBA POKUSA | 15 |
| 5.1. Ispitni uzorci | 15 |
| 5.2. Parametri i provedba prevlačenja prstenova | 15 |
| 6. REZULTATI MJERENJA | 20 |
| 6.1. Mjerenje promjera i kružnosti prstena | 20 |
| 6.2. Hrapavost površine | 22 |
| 6.2.1. Mjerenje hrapavosti površine..... | 23 |
| 6.3. Mjerni postav i mjerenja vibracija igličastih ležaja | 27 |
| 6.3.1. Mjerni postav | 27 |
| 6.3.2. Mjerenja vibracija igličastih ležaja | 28 |
| 6.3.2.1. Pomak | 29 |
| 6.3.2.2. Akceleracija | 31 |
| 6.3.2.3. Brzina udarca | 33 |
| 6.3.2.4. Frekvencija mehaničkih vibracija | 35 |
| 6.4. Ispitivanje buke igličastih ležaja | 38 |
| 6.5. Analiza zagrijavanja ležaja | 42 |
| 6.6. Analiza trošenja unutarnjeg prstena ležaja..... | 46 |

| | |
|-------------------------------|----|
| 6.7. Diskusija rezultata..... | 50 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 52 |
| LITERATURA..... | 53 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1. Primjeri valjnih ležaja [15] | 3 |
| Slika 2. Igličasti ležaj [16]..... | 4 |
| Slika 3. Vrste prevlaka [4]..... | 6 |
| Slika 4. CVD postupak i pripadne toplinske obrade [8] | 8 |
| Slika 5. PACVD postupak [9] | 9 |
| Slika 6. Vanjski i unutarnji prsteni igličastog ležaja u polaznom stanju..... | 15 |
| Slika 7. Prstenovi igličastog ležaja nakon prevlačenja prevlakom PACVD TiN | 17 |
| Slika 8. Svi ispitni uzorci unutarnjih prstenova ležaja | 19 |
| Slika 9. Pomična mjerka..... | 21 |
| Slika 10. Uređaj za mjerenje odstupanja prstena od kružnosti | 21 |
| Slika 11. TIME 3202 Surface Roughness tester [17]..... | 23 |
| Slika 12. Hrapavost površine P0 uzorka | 23 |
| Slika 13. Hrapavost površine P1 uzorka | 24 |
| Slika 14. Hrapavost površine P2 uzorka | 24 |
| Slika 15. Hrapavost površine P3 uzorka | 25 |
| Slika 16. Hrapavost površine P4 uzorka | 25 |
| Slika 17. Mjerni postav za ispitivanje vibracija igličastih ležaja | 27 |
| Slika 18. Vibration meter VM – 6360..... | 28 |
| Slika 19. Srednje vrijednosti pomaka ležaja pri brzini vrtnje 510 min^{-1} | 28 |
| Slika 20. Srednje vrijednosti pomaka ležaja pri brzini 725 min^{-1} | 29 |
| Slika 21. Srednje vrijednosti pomaka ležaja pri brzini vrtnje 1500 min^{-1} | 30 |
| Slika 22. Srednje vrijednosti akceleracije ležaja pri brzini vrtnje 510 min^{-1} | 31 |
| Slika 23. Srednje vrijednosti akceleracije ležaja pri brzini vrtnje 725 min^{-1} | 32 |
| Slika 24. Srednje brzine akceleracije ležaja pri brzini vrtnje 1500 min^{-1} | 32 |
| Slika 25. Srednje vrijednosti brzine udarca pri brzini 510 rpm | 33 |
| Slika 26. Srednje vrijednosti brzine udarca iglica ležaja u vanjski prsten pri brzini vrtnje ležaja 725 min^{-1} | 34 |
| Slika 27. Srednje vrijednosti brzine udarca iglica ležaja u vanjski prsten pri brzini vrtnje ležaja 1500 min^{-1} | 34 |
| Slika 28. Raspon frekvencija vibracija prstenova pri brzini vrtnje ležaja od 510 min^{-1} | 35 |
| Slika 29. Raspon frekvencija vibracija prstenova pri brzini vrtnje ležaja od 725 min^{-1} | 36 |
| Slika 30. Raspon frekvencije vibracija prstenova pri brzini vrtnje ležaja od 1500 min^{-1} | 37 |
| Slika 31. Mjerač jačine zvuka UT – 352..... | 38 |
| Slika 32. Primjer analize termalnih fotografija u računalnom programu ImageJ | 42 |
| Slika 33. Analiza površine uzoraka primjenom svjetlosnog mikroskopa s kamerom | 46 |
| Slika 34. Površina neprevučenog prstena P0 od čelika 100Cr6 nako n30 min trošenja | 47 |
| Slika 35. Površina prstena P1 s prevlakom PACVD TiN/TiCN nakon 15 min trošenja | 47 |
| Slika 36. Površina prstena P2 s prevlakom PACVD TiN nakon 15 min trošenja..... | 48 |
| Slika 37. Površina prstena P3 s prevlakom PACVD TiCN/TiN nakon 15b min trošenja | 49 |
| Slika 38. Površina prstena P4 s prevlakom PVD TiN nakon 15 min trošenja | 49 |

POPIS TABLICA

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Parametri PACVD prevlačenja TiN/TiCN prevlakom..... | 16 |
| Tablica 2. Parametri PACVD prevlačenja TiN prevlakom..... | 17 |
| Tablica 3. Parametri prevlačenja PACVD prevlakom TiCN/TiN..... | 18 |
| Tablica 4. Parametri prevlačenja PVD prevlakom TiN | 19 |
| Tablica 5. Vanjski i unutarnji promjeri ispitivanih prstenova..... | 20 |
| Tablica 6. Odstupanje prstena od kružnosti | 20 |
| Tablica 7. Vrijednosti hrapavosti površine ispitanih uzoraka | 25 |
| Tablica 8. Usporedba spektra frekvencije buke igličastog ležaja pri brzini 510 min ⁻¹ | 39 |
| Tablica 9. Usporedba spektra frekvencije buke igličastog ležaja pri brzini 725 min ⁻¹ | 40 |
| Tablica 10. Usporedba spektra frekvencija buke igličastog ležaja pri brzini od 1500 min ⁻¹ ... | 41 |
| Tablica 11. Temperature ležaja pri ispitanim brzinama vrtnje..... | 43 |
| Tablica 12. Termalne fotografije kućišta igličastog ležaja pri brzini vrtnje 1500 min ⁻¹ | 44 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|------------------------|-----------------|----------------------------|
| Ar | | Argon |
| C | | Ugljik |
| CH ₄ | | Metan |
| Cr | | Krom |
| H ₂ | | Vodik |
| <i>l</i> | μm | Duljina |
| N ₂ | | Dušik |
| <i>R_a</i> | μm | Srednja hrapavost površine |
| <i>R_{max}</i> | μm | Najveća visina neravnina |
| <i>R_v</i> | μm | Njaveća visina profila |
| <i>R_z</i> | μm | Srednja visina neravnina |
| <i>t</i> | s | Vrijeme |
| TiCl ₄ | | Titan tetraklorid |
| TiCN | | Titan karbonitrid |
| TiN | | Titan nitrid |
| X | mm | Pomak vibracija |
| X ₀ | mm | Amplituda |
| ω | r/s | Frekvencija |
| ϑ | °C | Temperatura |

SAŽETAK

U radu su opisani igličasti ležaji, čelik 100Cr6 i postupci prevlačenja. U eksperimentalnom dijelu su ispitane buka, vibracije i zagrijavanje na unutarnjim prstenovima ležaja prevučenih PACVD TiCN, TiN i TiCN/TiN prevlakom te prevučenih PVD TiN prevlakom. Nakon provedenih ispitivanja može se zaključiti da se prevlačenjem prstena ležaja smanjuju buka i vibracija u radu ležaja, a najznačajnije smanjenje u usporedbi sa neprevučeni ležajem imala je prevlaka TiN prevučena PVD postupkom. Također, prikladna bi bila i prevlaka TiCN/TiN prevučena PACVD postupkom.

Ključne riječi: čelik 100Cr6, igličasti ležaj, PACVD, PVD, TiN, TiCN, buka, vibracije

SUMMARY

In the paper were described needle roller bearings, steel 100Cr6 and coating processes. In the experimental part of the paper noise, vibrations and heating on the inner rings of bearings coated with PACVD TiCN, TiN and TiCN/TiN coating and coated with PVD TiN coating were analysed. After the conducted tests it can be concluded that the coated bearings had reduced vibrations and noise while the bearing was in operation. The most significant reduction compared to the uncoated bearing had the TiN coating coated with the PVD process. A TiCN/TiN coating coated with the PACVD process would also be suitable.

Key words: steel 100Cr6, needle roller bearing PACVD, PVD, TiN, TiCN, noise, vibrations

1. UVOD

Inženjerstvo površina je znanstveno tehnička disciplina koja se bavi istraživanjem, razvojem i primjenom tradicionalnih i inovativnih površinskih tehnologija za stvaranje sustava površinski sloj – osnovni materijal u cilju postizanja boljih svojstava i značajnog produljenja trajnosti dijelova uz prihvatljive proizvodne troškove.

Za postizanje boljih svojstava i značajnog produljenja trajnosti dijelova veliku ulogu imaju prevlake, kojima se prevlače predmeti kako bi se povećala otpornost na trošenje, otpornost na koroziju ili postigla neka specifična kombinacija svojstava kojom će se produljiti trajnost i povećati uporabna vrijednost.

Najčešće se prevlače površine konstrukcijskih dijelova i alata koje su su izložene trošenju i mehaničkim naprezanjima za koje svojstva materijala nakon toplinske obrade cijelog volumena nisu dostatna.

Prstenovi i valjna tijela ležajeva u radu su izloženi koroziji, trošenju i dinamičkim naprezanjima te se mogu dodatno prevlačiti kako bi se povećala trajnost i nosivost površine.

U radu će se istražiti utjecaj prevlačenja na svojstva igličastih ležaja u cilju određivanja optimalne prevlake za unutrašnji prsten igličastog ležaja koja će omogućiti smanjenje buke i vibracija ležaja. Ispitat će se svojstva prevlake TiN i TiCN nanese taloženjem iz parne faze na prstenu igličastog ležaja od čelika 100Cr6 mjerenjem vibracija, buke i zagrijavanja tijekom rotacije bez opterećenja na različitim brzinama rotacije.

TEORIJSKI DIO

2. VALJNI LEŽAJI

2.1. Izrada ležaja

Ležaj je definiran kao dio stroja koji omogućuje jednom dijelu da se okreće ili pomiče u kontaktu s drugim dijelom uz što je manje moguće trenja. (slika 1) Dodatne funkcije uključuju prijenos opterećenja i omogućavanje točnog lociranja komponenti. Ležaj je konstruiran kako bi izdržao teška statička kao i ciklička opterećenja u teškim okruženjima. [2]



Slika 1. Primjeri valjnih ležaja [15]

Ležajevi se sastoje od valjnih elemenata (kuglica, cilindara ili bačvastih oblika) i prstenova koji tvore valjne staze. Proizvodni proces za valjne elemente obuhvaća plastičnu deformaciju sirovog, lijevanog materijala s visokom stopom redukcije u trupce kvadratnog presjeka. Deformacija pomaže da se razbije struktura lijeva i zatvori poroznost. Trupci se zatim smanjuju u presjeku daljnjim valjanjem, toplinski ih obrađujući do omekšanog stanja i izrezane na duljinu prikladnu za proizvodnju kuglica.

Gotovi kotrljajući elementi se zatim kale i popuštaju ili izotermički poboljšavaju do tražene tvrdoće. Prstenovi ležaja mogu biti izrađeni od bešavne cijevi proizvedene toplim valjanjem i kaljenjem, nakon čega slijedi strojna obrada i brušenje do konačnih dimenzija te površinska obrada.

Velika većina valjnih tijela i staza izrađena je od čelika za ležajeve, čeliak za cementiranje ili čelika za poboljšavanje.[2] Ispravan rad ležajeva je često od presudnog značenja za ispravan rad i vijek trajanja strojeva i naprava u koje su ugrađeni. Zbog toga je vrlo važno odabrati optimalnu vrstu ležaja. [12]

2.2. Igličasti ležaj

Igličasti ležajevi su standardizirani prema normi ISO 1206 (DIN 617). (slika 2) Valjna tijela su valjci manjih promjera (iglice) koje osiguravaju relativno veliku nosivost unatoč malim poprečnim presjecima. Izrađuju se s unutarnjim prstenom ili bez njega. Kompaktan dizajn igličastih ležajeva je primjeren u slučajevima gdje u radijalnom smjeru na raspolaganju 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 predstavljaju optimalno rješenje za uležištenja kod kojih je vratilo moguće kaliti i brusiti. Jedni i drugi su primjereni samo za radijalna opterećenja. [2, 12]



Slika 2. Igličasti ležaj [16]

2.3. Čelici za ležaje

Čelici s koncentracijom od 0,8 do 1,1 %C i ukupnim sadržajem supstitucijske otopljene tvari manjim od 3% izvorno dizajnirani za alate za obradu, povijesno su dominirali tržištem ležajeva. Mogu se učiniti martenzitnim gašenjem u ulju ili soli, od temperature austenitizacije. Martenzit se zatim podvrgava niskotemperaturnom kaljenju kako bise uravnotežila proturječna svojstva.

Mali ležajevi su obično kaljeni, tj. Čelici imaju dovoljnu kaljivost da postanu martenzitni u cijelom presjeku ležaja. S velikim ležajevima to nije slučaj; kod njih se površinski sloj mora razugljčiti da bi se proizveo martenzit. Alternativno, veliki ležajevi mogu se očvrnuti povećanjem prokaljivosti čelika upotrebom većih koncentracija legirajućih elemenata

Uobičajeno je da se čelici za ležajeve sa navedenim intervalom postotka ugljika isporučuju u vruće valjanom stanju s perlitnom mikrostrukturom uključujući udio podeutektoidnog cementita na granicama zrna austenita. [2]

2.4. Čelik 100Cr6

Čelik 100Cr6 je niskolegirani Cr-čelik što je podskupina niskolegiranih Cr-čelika. Ti čelici su nadeutektoidni i sadrže 1-1,5% C i 0,5-1,5%Cr. Imaju osrednju otpornost trošenju i nisku otpornost popuštanju. Primjenjuju se za dijelove kotrljajućih ležaja, manja svrdla, razvrtala, upuštala...

100Cr6 je namijenjen za proizvodnju ležaja gdje dolazi do kotrljajućeg kontakta i koristi se u uvjetima gdje dolazi do visokog zamora. U očvrnutom stanju, visoka tvrdoća i visoka čvrstoća daju čeliku adekvatna svojstva da izdrži velik broj ciklusa i veliki zamor od naprezanja. 100Cr6 se najčešće koristi za male i srednje veličine ležaja. Također se redovito koristi za druge komponente strojeva koji zahtijevaju visoku vlačnu čvrstoću i visoku tvrdoću. [7]

3. POSTUPCI MODIFICIRANJA I PREVLAČENJA POVRŠINA

3.1. Postupci provlačenja površina

Trošenje materijala se nekada pokušavalo riješiti promjenom svojstava osnovnog materijala ili pronalaskom novog. Tehnički ili ekonomski razlozi, te dugotrajnost ovog postupka to često ne dopuštaju. Današnji pristup stavlja naglasak na površinsku obradu kojom će se postići neko svojstvo na znatno višoj razini od one koju ima u polaznom stanju. [3]

Budući da su svojstva prevlaka bitno drugačija od osnovnog materijala te se njihovim prevlačenjem na osnovni materijal na kraju dobije kvalitetniji proizvod, nametnule su se kao rješenje.

Osnovni zahtjevi na prevlake su dobro prianjanje na podlogu alata, visoka mikrotvrdoća na radnoj temperaturi, visoka žilavost i kemijska inertnost u odnosu na obradak. [4]

Prevlake mogu biti strukturirane na različite načine, a danas su najčešće jednoslojne, „sendvič“ i gradijentne prevlake. (slika 3)



Slika 3. Vrste prevlaka [4]

3.2. Modificiranje i prevlačenje površina

Na osnovi temeljnih i fizikalnih i kemijskih zakonitosti procesa izvršena je podjela i klasifikacija postupaka obradbe površina. Osnovna je podjela na postupke modificiranja i prevlačenja. Kod postupaka modificiranja površinski sloj nastaje od polazne površine prema unutrašnjosti metala dok se kod postupaka prevlačenja površinski sloj stvara na polaznoj površini. [3]

U odnosu na osnovni materijal, prevlake se razlikuju od njega na temelju kemijskog sastava, mikrostrukture, kristalne rešetke i drugih raznih fizikalnih i kemijskih svojstava. Modificiranje i prevlačenje se može provesti mnogobrojnim procesima, a neki od tih procesa su: mehanički, toplinski, kemijski, elektrokemijski procesi i kombinacija dvaju ili više procesa.

3.3. Kemijsko prevlačenje iz parne faze

3.3.1. CVD postupak

Postupak CVD (*eng. Chemical Vapour Deposition*) je postupak nanošenja slojeva u parnoj fazi kemijskim putem na temperaturama od oko 900 °C. u postupku dolazi do interakcije između smjese plinova u aktiviranom okolišu (toplina, svjetlo, plazma) i površine zagrijanog obradka.

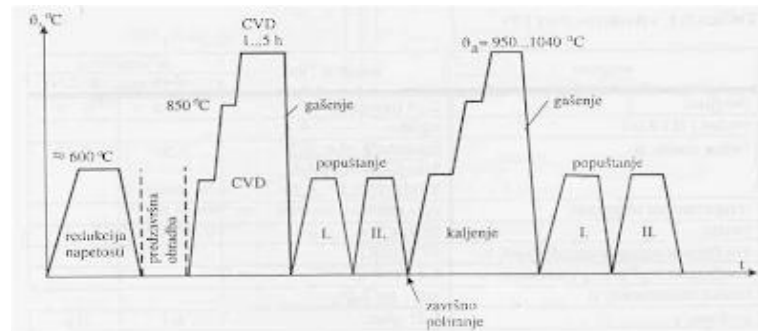
Pomoću CVD postupka mogu se postići tanke prevlake od mnogih metala, nemetalnih elemenata i od kemijskih spojeva.

Postupak se temelji na disocijaciji plinova i kemijskim reakcijama u vakuumskoj komori peći, pri čemu nastaje gusti, kruti i stabilni sloj prevlake na supstratu.

Za CVD postupak prikladni su skoro svi čelici, ali prednost će imati čelici čija je temperatura austenitizacije između 900 °C i 1000 °C i koji su kaljivi već na zraku.

Neke prednosti CVD postupka su jeftino predčišćenje, jednoličan sloj i dobro prianjanje sloja.

Glavni nedostatak CVD postupka je visoka temperatura postupka. Još neki nedostaci postupka su opasnost od deformacija i česta potreba za dvostrukom toplinskom obradom. (slika 4)



Slika 4. CVD postupak i pripadne toplinske obrade [8]

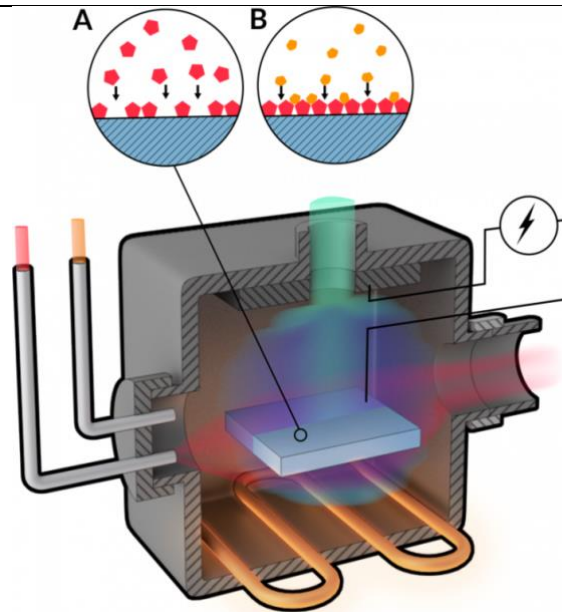
CVD prevlačenje posebno je prošireno na ona područja primjene gdje su već osnovni najkvalitetniji materijali dostigli svoja granična svojstva. [3, 8]

3.3.2. PACVD postupak

PACVD (eng. Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition) je postupak prevlačenja gdje se obradak uzastopno oblaže s dva različita plina u grijanom vakuumskom spremniku uz pomoć plazme.

Radni komad se stavlja u zagrijani spremnik koji se ispumpava do vakuuma. Dva različita plina nosača pomiješana s različitim tvarima povezana su sa spremnikom. Jedna plinska smjesa ulazi, reagira s plazmom i prekriva površinu obradka. (A) Plazma ubrzava proces i stoga je proces brži.

Preostala plinska smjesa zatim se ponovno ispumpava vakuumskom pumpom. Zatim se druga bazna smjesa ispušta u komoru koja zatim reagira s prethodnom prevlakom i nadograđuje ga. (B) (slika 5)



Slika 5. PACVD postupak [9]

Svaki izmjenični ciklus koji je izgradio atomski sloj na površini i broj ciklusa kontroliraju debljinu prevlake. [9]

Prednosti PACVD postupka su:

- mogućnost taloženja raznih materijala na podlogu ili izradak radi postizanja specifičnih svojstava
- rad na niskim temperaturama, što je pogodno za podloge osjetljive na toplinu
- tanki filmovi visoke kvalitete, ujednačene debljine i otpornosti na pucanje
- dobro prianjanje filma na podlogu
- sposobnost premazivanja čak i složenih geometrijskih dijelova [10]

Glavni nedostak PACVD postupka su visoka ulaganja u opremu i visoki zahtjevi za čistoćom plinova potrebnih za rad peći. [11]

3.4. Fizikalno prevlačenje iz parne faze

3.4.1. PVD postupak

PVD (*eng. Physical Vapour Deposition*) se odnosi na uporabu tehnologije niskog napona i jakog strujnog lučnog pražnjenja u vakuumskim uvjetima, koristeći plinsko pražnjenje za isparavanje ciljanog materijala i ionizaciju isparenog materijala i plina. Koristeći ubrzanje električnog polja, isparena tvar i produkti reakcije talože se na izratku.

Postupak se izvodi na temperaturama od oko 500 °C te s obzirom na temperaturu postupka nema utjecaja na čvrstoću materijala alata.

Sa PVD postupkom se povećava produktivnost (dulji vijek trajanja alata, veće frekvencije ciklusa, manje završne obrade obradka), smanjuju troškovi proizvodnje, poboljšava se kvaliteta proizvoda (zbog glatkijih površina, bolje dimenzijske stabilnosti) i smanjena je potrošnja maziva. PVD postupak također nema štetnih utjecaja na okoliš, što je u skladu sa suvremenim zelenim smjerom razvoja proizvodnje. [4]

Trenutno se PVD postupci široko koristi za premazivanje karbidnih završnih glodala, svrdla, razvrtača, alata posebnog oblika, alata za zavarivanje, itd.

4. ISPITIVANJE VIBRACIJA

U današnje vrijeme 80% izmjerenih parametara temelji se na vibracijama, stoga je praćenje i analiza vibracija jedno od najraširenije korištenih tehnika u području održavanja.

Mjerenje i analiza odziva na vibracije daje mnogo informacija relevantnih za uvjete kvara u različitim vrstama strojeva.

Ispitivanje vibracija je jedna je od niza tehnika u održavanju koje se koriste za praćenje i analizu različitih strojeva, opreme i sustava u pogonima. Unatoč tome, primarna svrha uporabe analize vibracija je praćenje rotirajućih dijelova za otkrivanje rastućih problema i iskorjenjivanje mogućnosti katastrofalnih ishoda. [5]

4.1. Teorija vibracija

Vibracije se definiraju kao periodično kretanje ili ono kretanje koje se ponavlja nakon određenog vremenskog intervala.

Jednadžba koja se naziva harmoničko gibanje opisuje odnos između pomaka vibracija s amplitudom, frekvencijom i vremenom, a glasi:

$$x = x_0 \sin(\omega t), \quad (1)$$

gdje je:

x – pomak vibracija

x_0 – amplituda

ω – frekvencija

t – vrijeme.

Frekvencija vibracije definirana je kao recipročna vrijednost vremenskog razdoblja 't', koja se može izraziti u jedinicama okretaja u minuti (*rpm*), ciklusa u sekundi (*cps*) ili herca (*Hz*). [5]

4.1.1. Profili vibracija

Proces analize vibracija u stvarnom vremenu tumači složene podatke dobivene iz određenog stroja ili sustava. U većini slučajeva spektar vibracija dobiven od stroja ili sustava je veoma složen i često sadrži nepotrebne informacije koje se moraju otkloniti kako bi se dobili jasniji podaci. To je zbog prisutnosti brojnih izvora vibracija.

Svaki izvor stvara posebne krivulje, a zatim se sve integriraju u jedan složeni spektar. Profili vibracija mogu se demonstrirati u dva formata: vremenskoj i frekvencijskoj domeni. [5]

4.1.1.1. Vremenska domena

U formatu vremenske domene podaci o vibracijama iscrtavaju se kao amplituda u odnosu na vrijeme.

Formati vremenske domene obično se koriste za strojeve linearnih kretnji. Također su korisni u ukupnoj evaluaciji i analizi sustava za proučavanje suptilnih promjena pri operacijama sustava.

S druge strane, učinkovito tumačenje podataka iz vremenske domene je matematički zahtjevan zadatak.

Podaci o vibracijama zapisani u vremenskoj domeni predstavljaju mješoviti spektar vibracija nastalih djelovanjem svih izvora u promatranom vibracijskom sustavu u određenom trenutku vremena. Stoga je vrlo teško izlučiti specifični vibracijski spektar određenog izvora iz zajedničkog spektra vibracija cijelog sustava. [5]

4.1.1.2. Frekvencijska domena

Format frekvencijske domene vibracijskog profila kombinacija je frekvencija povezanih s kružnim rotacijama ili linearnim kretnjama dijelova strojeva. Stoga se

profili vibracija mogu smatrati umnoškom osnovnih frekvencija dijelova, opreme ili sustava.

Za vibracijsku analizu stanja stroja u frekvencijskoj domeni moraju se odrediti osnovne frekvencije koje se pojavljuju u spektru a potom njihovi viši harmonici

.
Format vremenske domene može se pretvoriti u podatke frekvencijske domene korištenjem matematičke metode poznate pod nazivom „brza Fourierova transformacija“ (eng. *Fast Fourier transformation, FFT*) koja je nazvana po Jeanu Fourieru. FFT i druge napredne metode analize vibracijskog spektra omogućuju analitičarima vibracija izdvajanje diskretnih vrijednosti frekvencije iz zapisa svih snimljenih frekvencija vibracijskog spektra s izraženim vrijednostima ubrzanja vibrirajućeg elementa konstrukcije.

Grafički prikaz frekvencijske domene sadrži pomak, brzinu ili ubrzanje mjerne točke, odnosno područja ovisan o vremenu, za razliku od amplitude vibracija koja se snima i prikazuje ovisno o formatu zapisa vibracija u vremenskoj domeni. [5]

EKSPERIMENTALNI DIO

5. PLAN I PROVEDBA POKUSA

5.1. Ispitni uzorci

U eksperimentalnom dijelu rada korišteni su unutarnji i vanjski prstenovi ležaja proizvođača NTN Corporation. (slika 6)



Slika 6. Vanjski i unutarnji prsteni igličastog ležaja u polaznom stanju

5.2. Parametri i provedba prevlačenja prstenova

Prije početka provođenja eksperimenta određeni su i primijenjeni parametri prevlačenja ležajnih prstena u tablicama 1 do 4. [18]

Prevlačenje PACVD postupkom provedeno je u vakuumskoj peći Rübige PC 70/90 u zasebnim procesima za nanošenje prevlaka TiN/TiCN, TiN i TiCN/TiN. Četvrta prevlaka TiN nanaesena je postupkom PVD.

Tablica 1. Parametri PACVD prevlačenja TiN/TiCN prevlakom

| Parametri postupka | Vrijednost parametra |
|---|--|
| Temperatura čišćenja površine otprašivanjem iona | 450 °C |
| Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona | 2h |
| Temperatura prevlačenja | 500 °C |
| Trajanje prevlačenja | 6h |
| Protok plinske smjese | 140 l/h H ₂ , 15 l/h N ₂ , 10 l/h Ar, 4 l/h CH ₄ |
| Protok prekursora TiCl ₄ | 3 l/h |
| Tlak u vakuumskoj komori | 2 mbar |
| Napon plazme | 480 V |
| Snaga plazme | 1650 W |
| Trajanje hlađenja komore do 20 °C | 6h |

Parametri PACVD postupka za prevlačenje monoslojnom prevlakom TiN navedeni su u tablici 2. Na slici 7 prikazani su ležajni prstenovi nakon PACVD postupka u vakuumskoj peći Rübig PC 70/90.

Tablica 2. Parametri PACVD prevlačenja TiN prevlakom

| Parametri postupka | Vrijednost parametra |
|---|--|
| Temperatura čišćenja površine otprašivanjem iona | 420 °C |
| Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona | 2h |
| Temperatura prevlačenja | 520 °C |
| Trajanje prevlačenja | 6h |
| Protok plinske smjese | 250 l/h H ₂ , 45 l/h N ₂ , 10 l/h Ar |
| Protok prekursora TiCl ₄ | 7,5 l/h |
| Tlak u vakuumskoj komori | 2 mbar |
| Napon plazme | 480 V |
| Snaga plazme | 4000 W |
| Trajanje hlađenja komore do 20 °C | 6h |

**Slika 7. Prstenovi igličastog ležaja nakon prevlačenja prevlakom PACVD TiN**

Parametri PACVD postupka za prevlačenje dvoslojnom prevlakom TiCN/TiN navedeni su u tablici 3.

Tablica 3. Parametri prevlačenja PACVD prevlakom TiCN/TiN

| Parametri postupka | Vrijednost parametra |
|---|--|
| Temperatura čišćenja površine otprašivanjem iona | 450 °C |
| Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona | 2h |
| Temperatura prevlačenja | 500 °C |
| Trajanje prevlačenja | 3,5h |
| Protok plinske smjese | 140 l/h H ₂ , 15 l/h N ₂ , 10 l/h Ar |
| Protok prekursora TiCl ₄ | 3 l/h |
| Tlak u vakuumskoj komori | 2 mbar |
| Napon plazme | 480 V |
| Snaga plazme | 1650 W |
| Trajanje hlađenja komore do 20 °C | 6h |

Prevlačenje postupkom PVD provedeno je u uređaju za prevlačenje Metaplas Ionon MZR – 304 prevlakom TiN prema parametrima navedenim u tablici 4.

Na slici 8, gledajući s lijeva na desno prikazani su uzorci neprevučenog banjškog i unutrašnjeg prstena (P0), unutrašnji prsten sa PACVD TiN/TiCN prevlakom (P1), unutrašnji prsten sa PACVD TiN prevlakom (P2), unutrašnji prsten s PACVD TiCN/TiN prevlakom (P3) i unutrašnji prsten s PVD TiN prevlakom (P4).

Tablica 4. Parametri prevlačenja PVD prevlakom TiN

| Parametri postupka | Vrijednost parametra |
|---|----------------------|
| Temperatura čišćenja površine otprašivanjem iona | / |
| Vrijeme čišćenja površine otprašivanjem iona | 0,5h |
| Temperatura prevlačenja | / |
| Trajanje prevlačenja | 0,55h |
| Protok plinske smjese | / |
| Protok prekursora TiCl ₄ | / |
| Tlak u vakuumskoj komori | 3 mbar |
| Napon plazme | / |
| Snaga plazme | / |
| Trajanje hlađenja komore do 20 °C | 0,55h |



Slika 8. Svi ispitni uzorci unutarnjih prstenova ležaja

6. REZULTATI MJERENJA

6.1. Mjerenje promjera i kružnosti prstena

Prije pokusa za mjerenje vibracija izmjereni su unutarnji i vanjski promjeri i odstupanje od kružnosti svih prstena. Rezultati ovih mjerenja prikazani su u tablicama 5 i 6.

Tablica 5. Vanjski i unutarnji promjeri ispitivanih prstenova

| | Oznaka ispitnog uzorka | | | | |
|---|------------------------|--------|--------|-------|-------|
| | P0 | P1 | P2 | P3 | P4 |
| Vanjski promjer (mm) | 35,00 | 34,99 | 34,96 | 34,96 | 34,94 |
| | 34,98 | 35,04 | 35,10 | 34,96 | 34,94 |
| Srednja vrijednost vanjskog promjera (mm) | 34,99 | 35,015 | 35,03 | 34,96 | 34,94 |
| Unutarnji promjer (mm) | 29,95 | 29,55 | 29,91 | 29,76 | 29,93 |
| | 29,96 | 29,41 | 29,70 | 29,76 | 29,85 |
| Srednja vrijednost unutarnjeg promjera (mm) | 29,995 | 29,48 | 29,805 | 29,76 | 29,89 |

Tablica 6. Odstupanje prstena od kružnosti

| | Oznaka ispitnog uzorka | | | | |
|---|------------------------|----|----|----|----|
| | P0 | P1 | P2 | P3 | P4 |
| Odstupanje od kružnosti (μm) | 4 | 5 | 7 | 3 | 7 |

Vanjski i unutarnji promjer prstenova izmjeren je na digitalnoj pomičnoj mjerki 150 Kramp. (slika 9) u dva okomita smjera te je izračunata srednja vrijednost promjera. Odstupanje prstena od kružnosti izmjerena je na mjernoj uri INSIZE 2313-IFA (slika 9 i 10) s točnosti $\pm 0,001$ mm.



Slika 9. Pomična mjerka



Slika 10. Uređaj za mjerenje odstupanja prstena od kružnosti

6.2. Hrapavost površine

Hrapavost površine je u općem smislu mikrogeometrijska nepravilnost površine, koja nastaje tijekom postupaka obrade ili drugih utjecaja. Hrapavost površine u određenim slučajevima bitno utječe na radna svojstva strojnih dijelova, posebno na onim mjestima gdje dolazi do dodira pojedinih elemenata.

Općenito, strojni dijelovi s manjom hrapavošću imaju veću dinamičku čvrstoću, veću otpornost na koroziju, veću sposobnost nalijeganja, bolje prenose toplinu itd.

U strojarstvu se za procjenjivanje hrapavosti površine najčešće upotrebljava srednje aritmetičko odstupanje profila R_a , koje je jednako srednjoj aritmetičkoj vrijednosti apsolutnih vrijednosti visine profila neravnina na mjernoj duljini l .

Kao parametar hrapavosti često se upotrebljava srednja visina neravnina R_z , 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 .

Važan parametar hrapavosti jest i najveća visina profila R_y , koja je definirana kao udaljenost između dva pravca paralelna sa srednjom linijom profila, provučena tako da u granicama mjerne duljine dodiruju najvišu, to jest, najnižu točku profila. Ovaj parametar jednak je parametru R_{max} . [13]

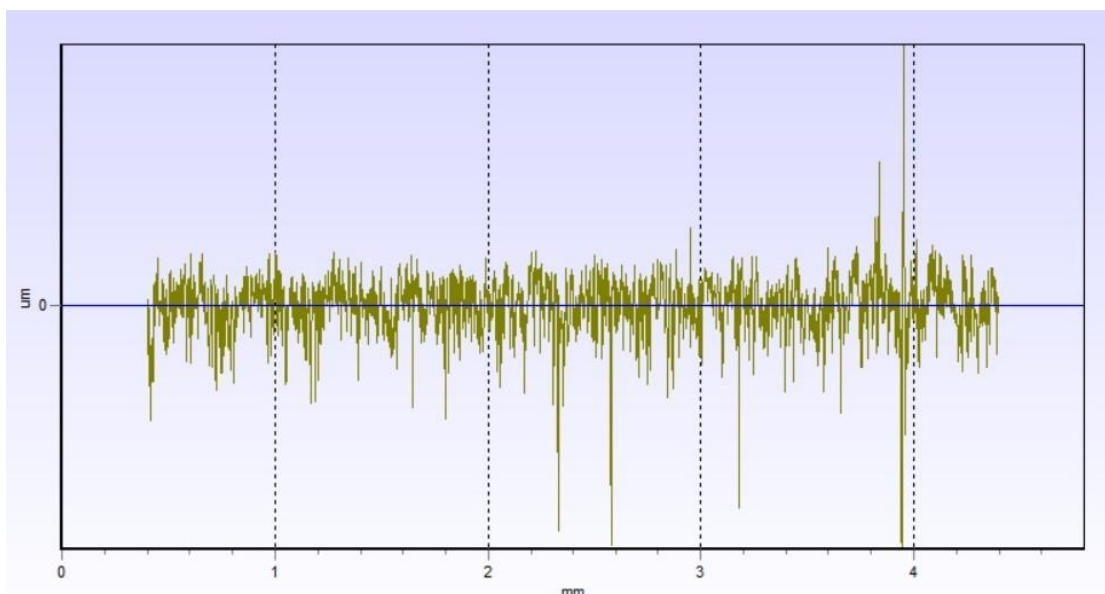
6.2.1. Mjerenje hrapavosti površine

Nakon što su izmjereni promjeri i odstupanje od kružnosti prstenova, sljedeći korak je izmjeriti hrapavost površine svakog prstena.

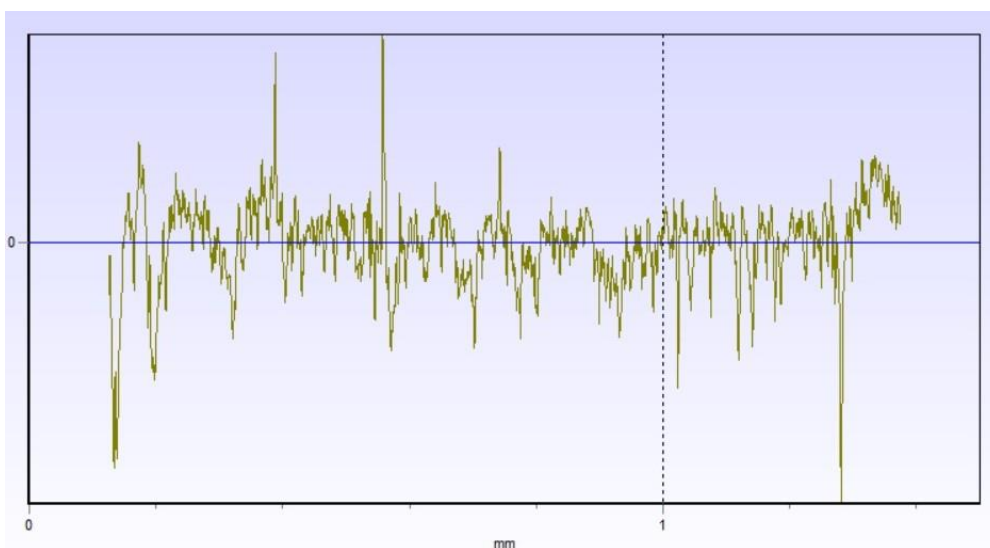
Mjerni uređaj na kojem je proedeno mjerenje hrapavosti površine je TIME 3202 Surface Roughness tester. (slika 11). Rezultati mjerenja hrapavosti svakog prstena prikazane su na slikama 12, 13, 14, 15 i 16.



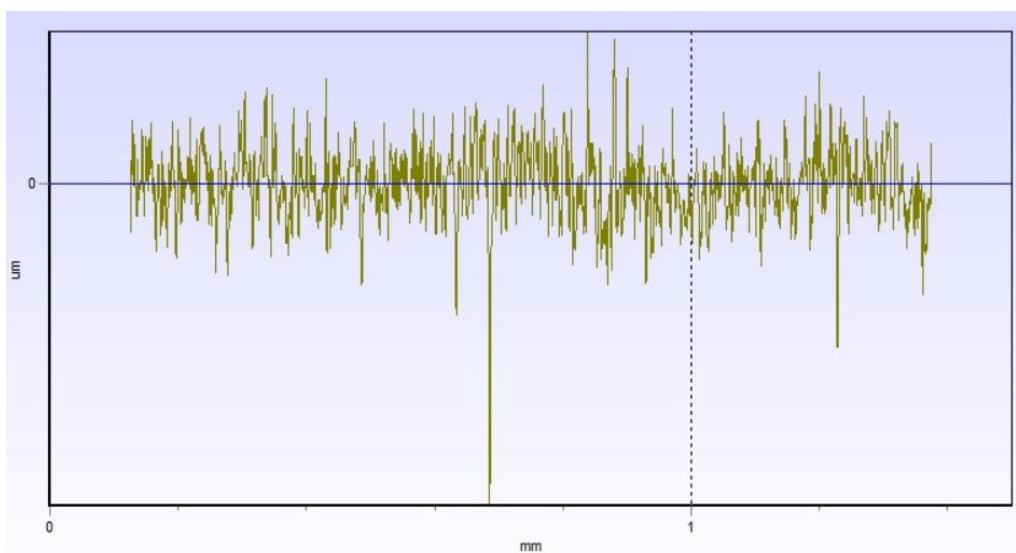
Slika 11. TIME 3202 Surface Roughness tester [17]



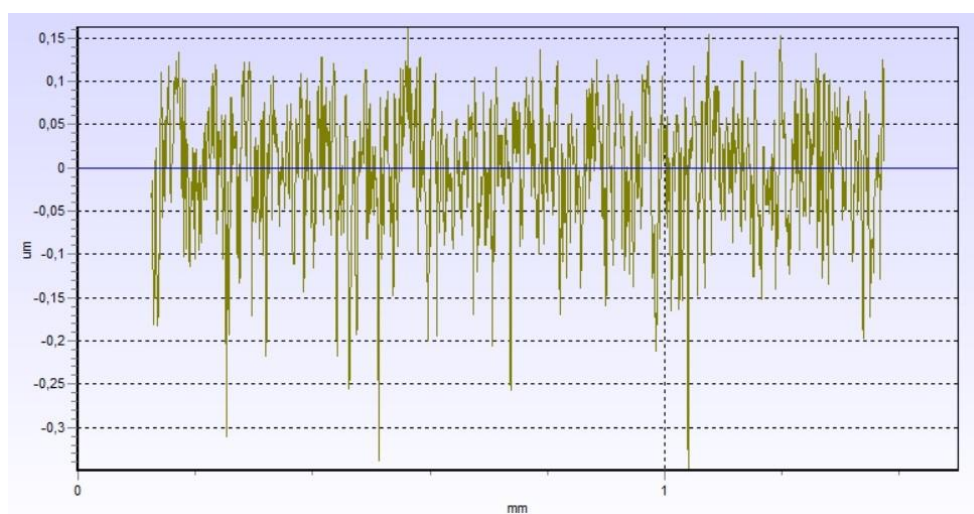
Slika 12. Hrapavost površine P0 uzorka



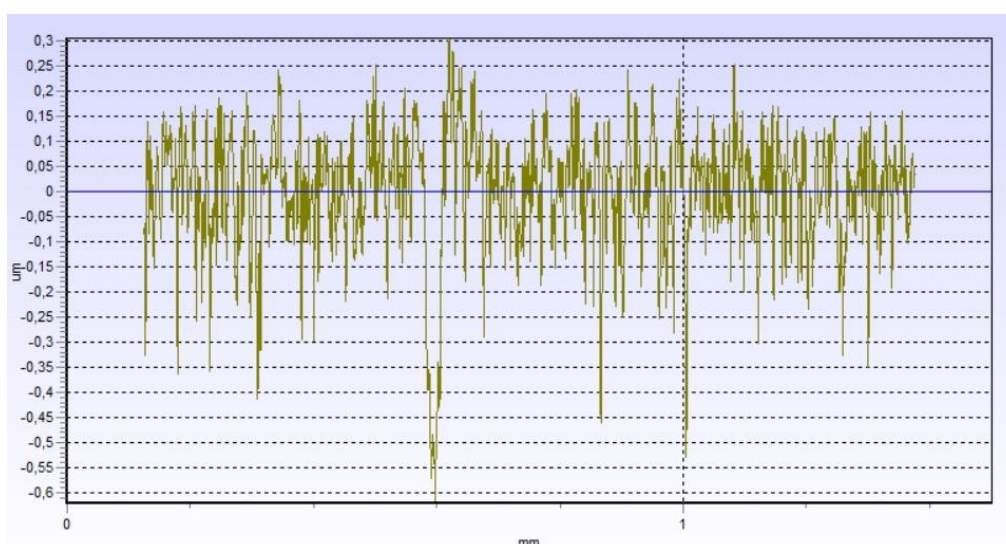
Slika 13. Hrapavost površine P1 uzorka



Slika 14. Hrapavost površine P2 uzorka



Slika 15. Hrapavost površine P3 uzorka



Slika 16. Hrapavost površine P4 uzorka

U tablici 7 navedene su srednje vrijednosti parametara hrapavosti R_a i R_z za svaki ispitani uzorak prstena.

Tablica 7. Vrijednosti hrapavosti površine ispitanih uzoraka

| | P0 | P1 | P2 | P3 | P4 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| R_a (μm) | 0,060 | 0,090 | 0,065 | 0,053 | 0,085 |
| R_z (μm) | 0,812 | 0,777 | 0,667 | 0,435 | 0,707 |

Najmanju vrijednost aritmetičkog odstupanja profila R_a imao je uzorak P3, a najveću vrijednost je imao uzorak P1.

Najmanju vrijednost srednje visine neravnina R_z imao je uzorak P3. Najveću vrijednost imao je uzorak P0, a zatim uzorak P1.

6.3. Mjerni postav i mjerenja vibracija igličastih ležaja

6.3.1. Mjerni postav

Nakon mjerenja hrapavosti površine proveden je glavni dio pokusa s istodobnim mjerenjem vibracija, buke i zagrijavanja prstena u igličastom ležaju. Na slici 17 prikazan je mjerni postav za provedbu mjerenja. Mjerni postav sastoji se od kućišta ležaja s rastavljivim igličastim ležajem čiji je unutarnji prsten navučen na osovinu od poliamida. Vanjski prste igličastog ležaja pritisnut je s tri vijaka postavljena pod kutom 120° u kućištu ležaja. Kućište je montirano na postolje ručne bušilice izrađeno od sivog lijeva. Unutarnji prsten igličastog ležaja u prijelaznom dosjedu je navučen na pogonsku osovinu koja rotira spojena s ručnom bušilicom preko fleksibilne osovine. Zadani broj okretaja ručne bušilice, odnosno unutarnjeg ležaja tijekom pokusa provjerava se tahometrom UNI-T UT373. Buka ležaja mjeri se mjeračem jačine zvuka UNI-T UT-352 koji je spojen na prijenosno računalo i računalni program Audicity. Istovremeno s mjerenjem buke mjere se vibracije na kućištu ležaja vibrometrom Schut VM – 6360 koji je također povezan s prijenosnim računalom i računalnim programom za prikupljanje podataka o ubrzanju, pomaku, brzini pomaka i frekvenciji mehaničkih vibracija.



Slika 17. Mjerni postav za ispitivanje vibracija igličastih ležaja

Ispitivanje rotacija igličastih ležaja se sastojalo od mjerenja vibracija, buke i zagrijavanja prstenova tijekom rotacije unutrašnjeg prstena na tri brzine vrtnje: 510 o/min, 725 o/min i 1500 o/min. U svim provedenim ispitivanjima igličasti ležaji su obavljali rotaciju u praznom hodu (bez opterećenja) i bez podmazivanja.

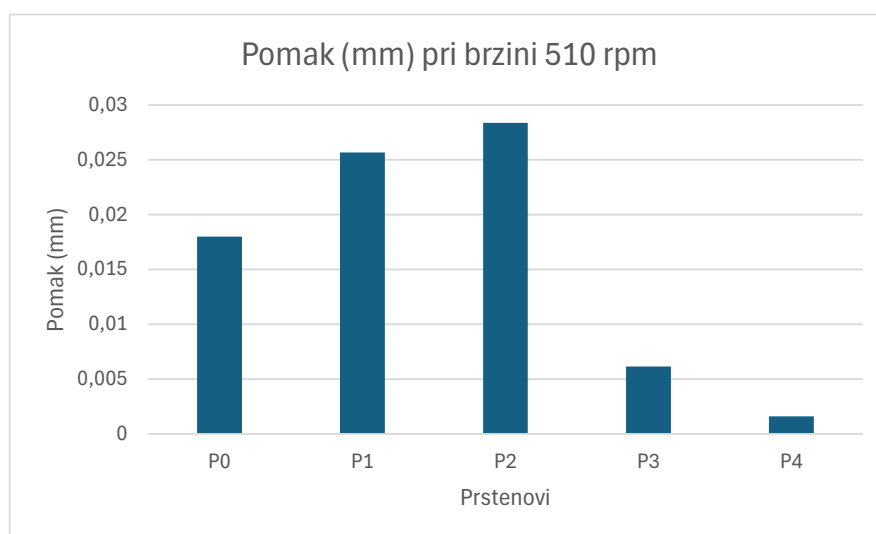
6.3.2. Mjerenja vibracija igličastih ležaja

Vibracije igličastog ležaja tijekom vrtnje zadanom brzinom izmjerene su na uređaju Vibration meter VM – 6360 tvrtke Schut Geometrical Metrology (slika 18)



Slika 18. Vibration meter VM – 6360

U grafikonu (slika 19) je prikazana srednja vrijednost pomaka ispitivanih prstena pri brzini rotacije 510 min^{-1} .

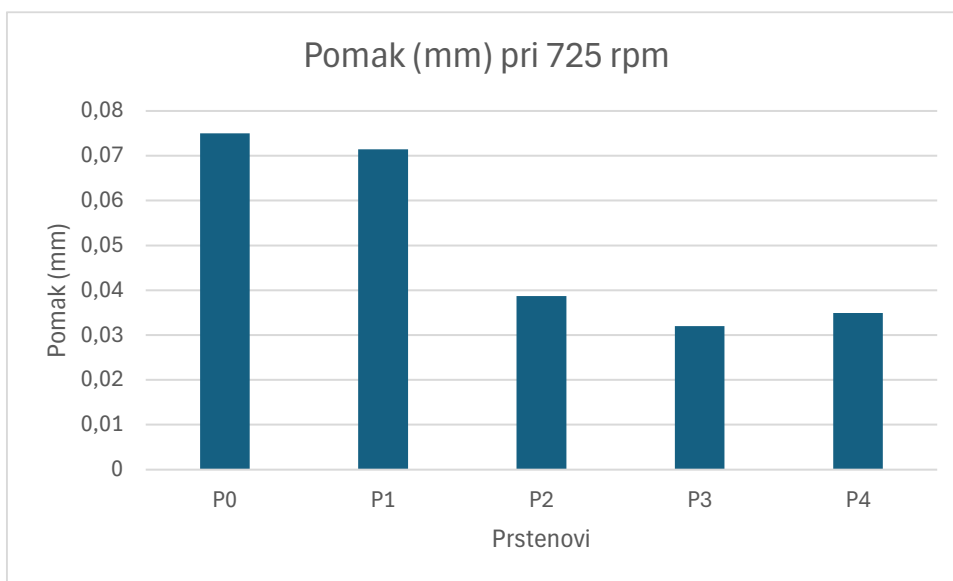


Slika 19. Srednje vrijednosti pomaka ležaja pri brzini vrtnje 510 min^{-1} .

Iz rezultata mjerenja se uočava da je pri brzini 510 min^{-1} najveću srednju vrijednost pomaka $0,027 \text{ mm}$ imao uzorak P2, a najnižu vrijednost pomaka imao je uzorak P4.

6.3.2.1. Pomak

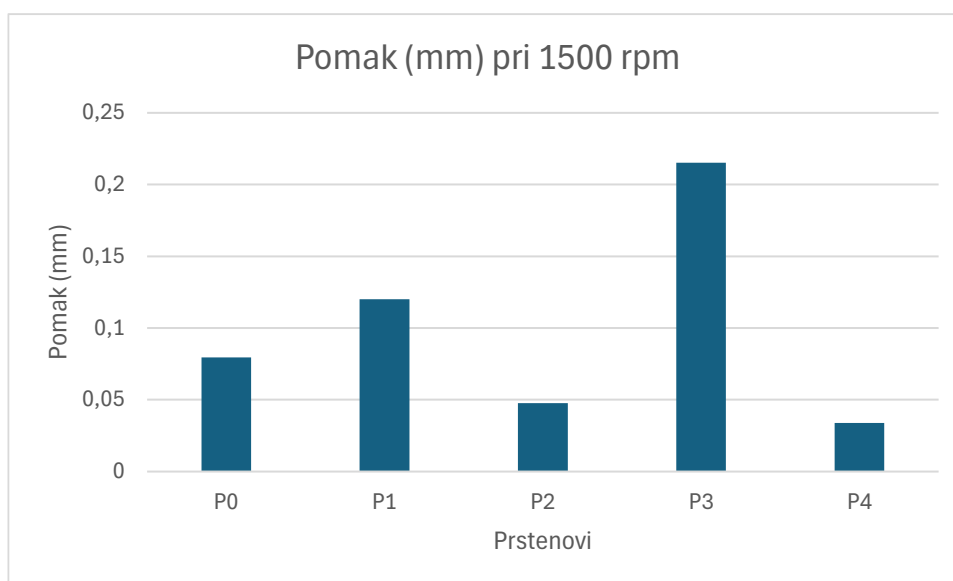
U donjem grafikonu (slika 20) je prikazana srednja vrijednost pomaka ispitivanih prstena pri brzini 725 min^{-1} .



Slika 20. Srednje vrijednosti pomaka ležaja pri brzini 725 min^{-1}

Pri brzini okretanja od 725 min^{-1} najveću srednju vrijednost pomaka $0,075 \text{ mm}$ imao je neprevučeni uzorak P0. Od prevučenih uzoraka najveću srednju vrijednost $0,071 \text{ mm}$ imao je uzorak P1. Najmanju srednju vrijednost pomaka imao je uzorak P3.

U sljedećem grafikonu (slika 21) je prikazana srednja vrijednost pomaka prstena pri najvećoj brzini rotacije u provedenim ispitivanjima 1500 min^{-1} .



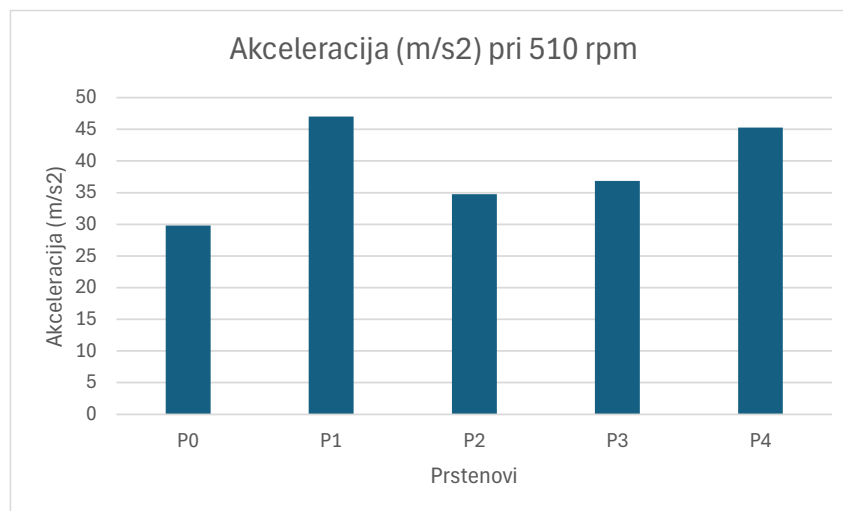
Slika 21. Srednje vrijednosti pomaka ležaja pri brzini vrtnje 1500 min⁻¹

Pri brzini od 1500 okretaja u minuti najmanju srednju vrijednost pomaka imao je uzorak P4, a najveću srednju vrijednost 0,21 mm je imao uzorak P3.

Usporedbom srednjih vrijednosti pomaka mjerne sonde vibrometra sa slika 19 do 21 ovisne o izboru i brzini vrtnje unutarnjeg prstena uočava se trend porasta pomaka, odnosno amplitude vibracija s povećanjem brzine vrtnje. Uočava se da je kod svih brzina vrtnje neprevučeni ležaj P0 i prevučeni prsten P1 vibrirao sa značajno većim pomakom od prstena P4.

6.3.2.2. Akceleracija

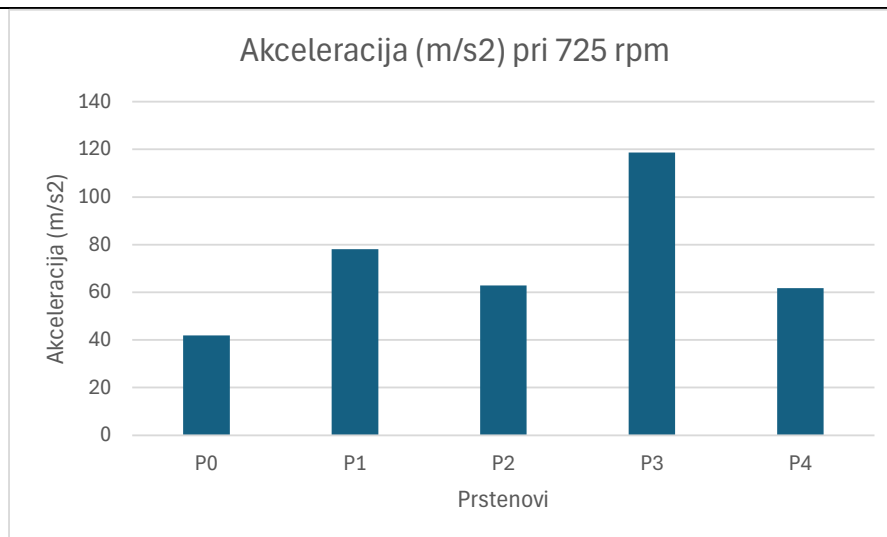
U grafikonu (slika 22) je prikazana srednja vrijednost ubrzanja ispitivanih pri rotaciji prstena brzinom 510 min^{-1} .



Slika 22. Srednje vrijednosti akceleracije ležaja pri brzini vrtnje 510 min^{-1}

Srednje vrijednosti akceleracije pri brzini vrtnje od 510 min^{-1} za sve ispitane prstene bile sličnih iznosa. Najmanju srednju vrijednost akceleracije je imao uzorak P0, a od prevučenih uzoraka najmanju srednju vrijednost imao je uzorak P2. Najveću srednju vrijednost akceleracije imao je uzorak P1.

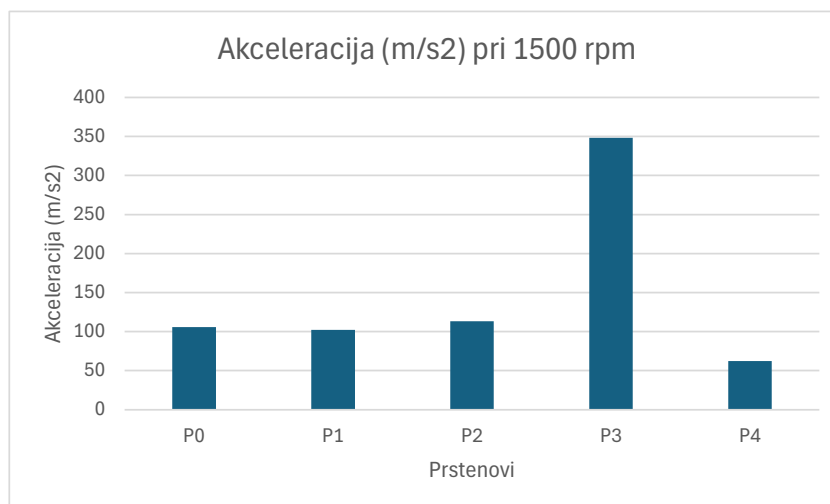
U slijedećem grafikonu (slika 23) je prikazana srednja vrijednost akceleracije ispitivanih prstena pri brzini vrtnje od 725 min^{-1} .



Slika 23. Srednje vrijednosti akceleracije ležaja pri brzini vrtnje 725 min⁻¹

Pri brzini vrtnje od 725 okretaja u minuti općenitu najmanju srednju vrijednost akceleracije imao je uzorak P0, a od prevučenih uzoraka najmanju vrijednost imao je uzorak P4. Najveću vrijednost akceleracije je imao uzorak P3.

U donjem grafikonu (slika 24) su prikazane srednje vrijednosti akceleracija prstena pri brzini vrtnje 1500 min⁻¹.

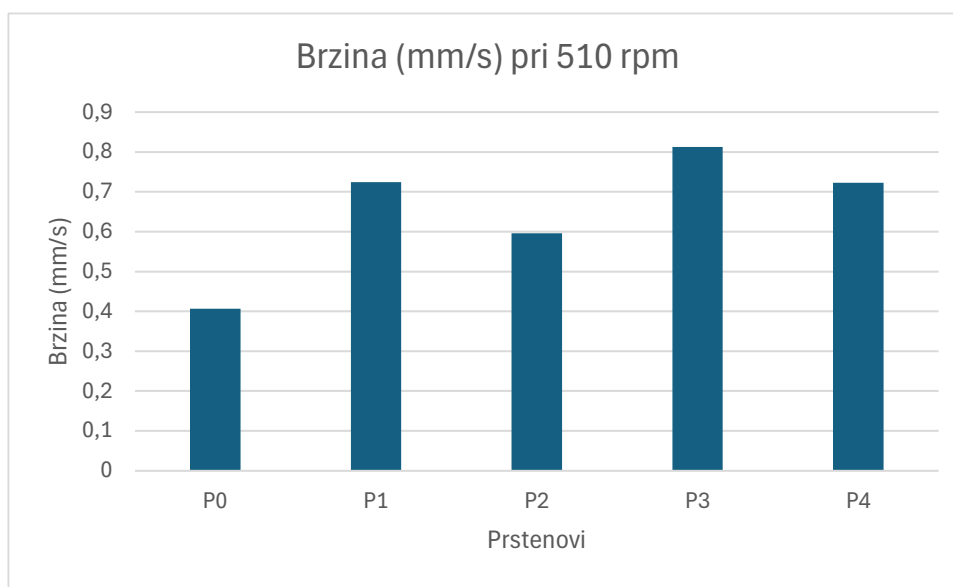


Slika 24. Srednje brzine akceleracije ležaja pri brzini vrtnje 1500 min⁻¹

Pri brzini vrtnje ležaja od 1500 min⁻¹ najviše je vibrirao uzorak P3 koji je imao i najveću srednju vrijednost akceleracije. Ostali uzorci su pokazali približno iste srednje vrijednosti akceleracija, a najmanju je imao uzorak P4.

6.3.2.3. Brzina udarca

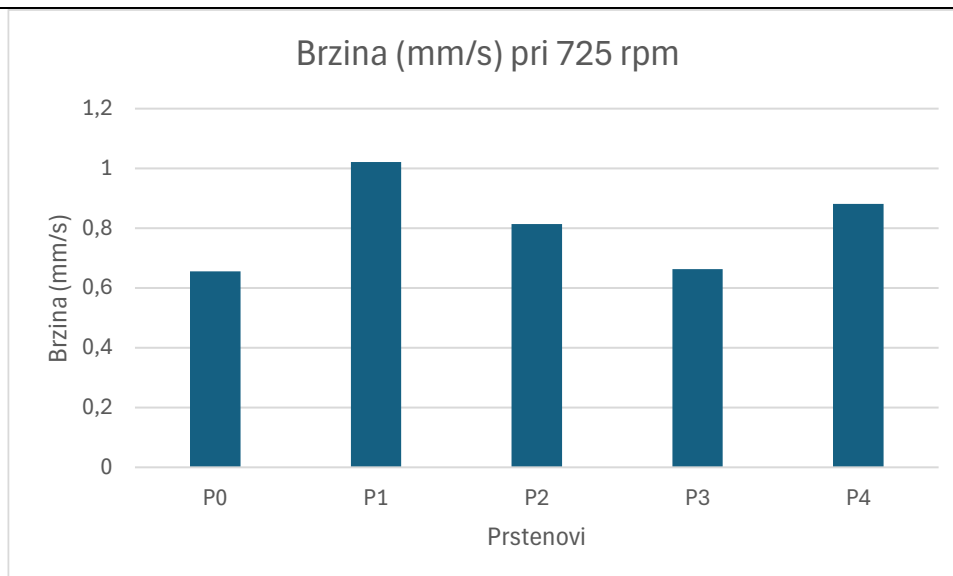
U donjem grafikonu (slika 25) su prikazane srednje vrijednosti brzine udarca iglica u vanjski prsten igličastog ležaja za ispitivane uzorke unutrašnjeg prstena pri brzini rotacije 510 min^{-1} .



Slika 25. Srednje vrijednosti brzine udarca pri brzini 510 rpm

Pri brzini od 510 min^{-1} najmanju brzinu udarca iglica u vanjski prsten ležaja pokazao je imao uzorak P0. Od prevučениh uzoraka najmanju vrijednost brzine udarca pokazao je uzorak P2, a najveću vrijednost je imao uzorak P3.

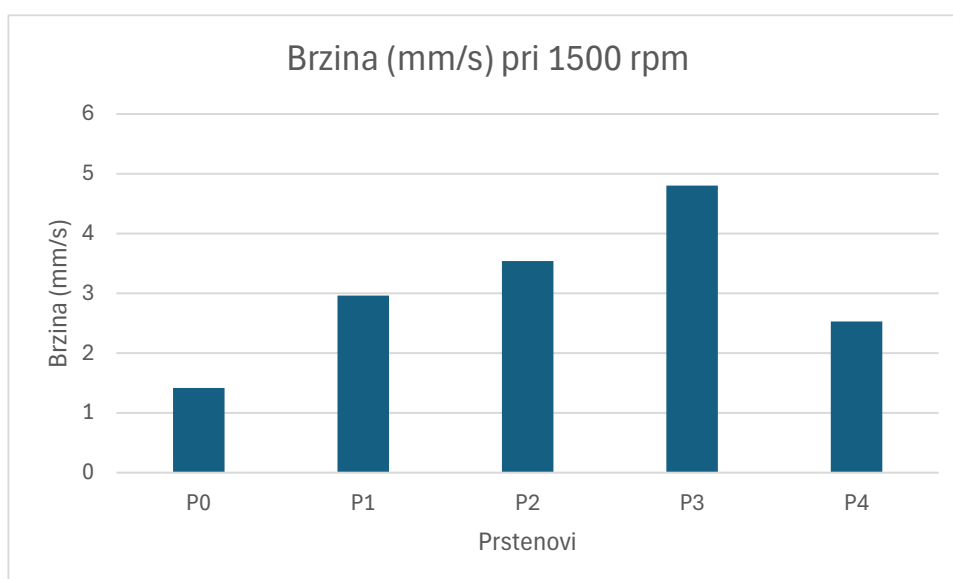
U sljedećem grafikonu (slika 26) su prikazane srednje vrijednosti brzine udarca rotirajućih iglica u vanjski prsten ležaja za ispitivane uzorke unutarnjeg prstena pri brzini rotacije 725 min^{-1} .



Slika 26. Srednje vrijednosti brzine udarca iglica ležaja u vanjski prsten pri brzini vrtnje ležaja 725 min^{-1}

Pri brzini rotacije ležaja od 725 min^{-1} najmanju srednju vrijednost brzine udarca su imali uzorci P0 i P3, a najveću vrijednost je pokazao uzorak P1.

U donjem grafikonu (slika 27) su prikazane srednje vrijednosti brzine udarca iglica u vanjski prsten ležaja za ispitivane uzorke unutarnjeg prstena pri brzini okretanja 1500 min^{-1} .



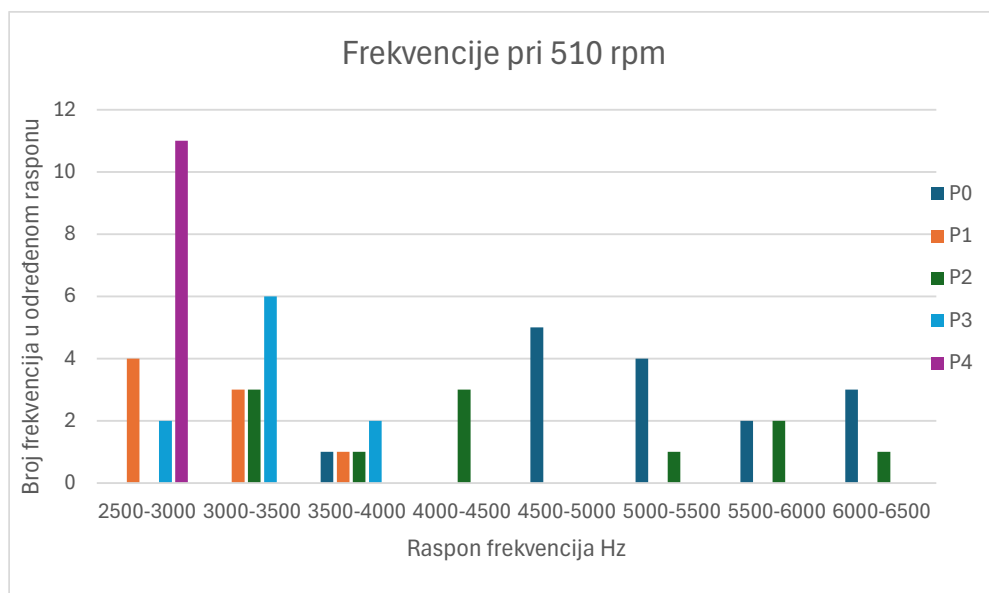
Slika 27. Srednje vrijednosti brzine udarca iglica ležaja u vanjski prsten pri brzini vrtnje ležaja 1500 min^{-1}

Pri brzini od 1500 min^{-1} najmanju srednju vrijednost brzine udarca unutarnjeg prstena i iglica u vanjski prsten ležaja imao je uzorak P0, a od prevučenih uzoraka najmanju brzinu udarca je pokazao uzorak unutarnjeg prstena P4. Najveću srednju vrijednost brzine udarca imao je uzorak unutarnjeg prsten P3.

6.3.2.4. Frekvencija mehaničkih vibracija

Tijekom rotacije ležaja senzor vibracija snima vibriranje kućišta ležaja s učestalosti bilježenja pomaka od 10 kHz. Krivulja pomaka se analizira metodom FFT kojom se određuje skup frekvencija osnovnog harmonika (najmanje frekvencije) i viših harmonika vibracija. U provednim ispitivanjima tijekom 3 min do 5 min vrtnje ležaja svake sekunde zabilježena je frekvencija vibracija izmjerena vibrometrom. U prikazima na slikama 28 do 30 ove frekvencije su analizirane određivanjem učestalosti pojave frekvencije vibracija u zadanom rasponu frekvencija, npr. 2500 Hz do 3000 Hz, 3000 Hz do 3500 Hz itd.

U donjem grafikonu (slika 28) prikazana je brojnost pojave frekvencija mehaničkih vibracija u rasponu od 2500 Hz do 6500 Hz pri brzini vrtnje ležaja 510 min^{-1} .

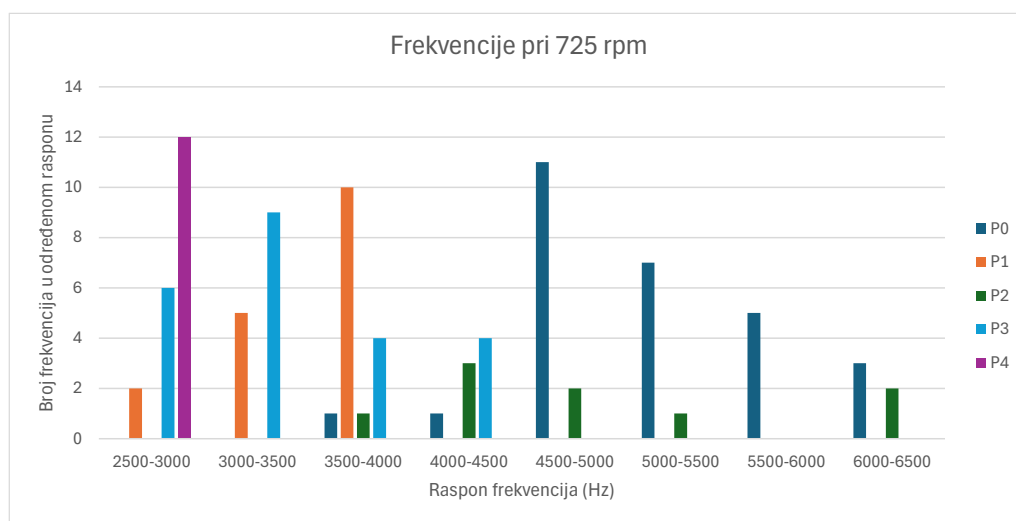


Slika 28. Raspon frekvencija vibracija prstenova pri brzini vrtnje ležaja od 510 min^{-1}

Pri brzini vrtnje od 510 min^{-1} uzorak P0 je najčešće imao raspon frekvencija mehaničkih vibracija između 4500 i 6500 Hz. Uzorak P1 je najčešće imao raspone

frekvencija od 2500 do 4000 Hz. Uzorak P2 je imao najveći broj frekvencija u rasponu od 3000 do 4500 Hz. Uzorak P3 je imao najveći broj frekvencija u rasponu 2500 do 4000 Hz. Najveći broj frekvencija u rasponu od 2500 do 3000 Hz je imao uzorak P4.

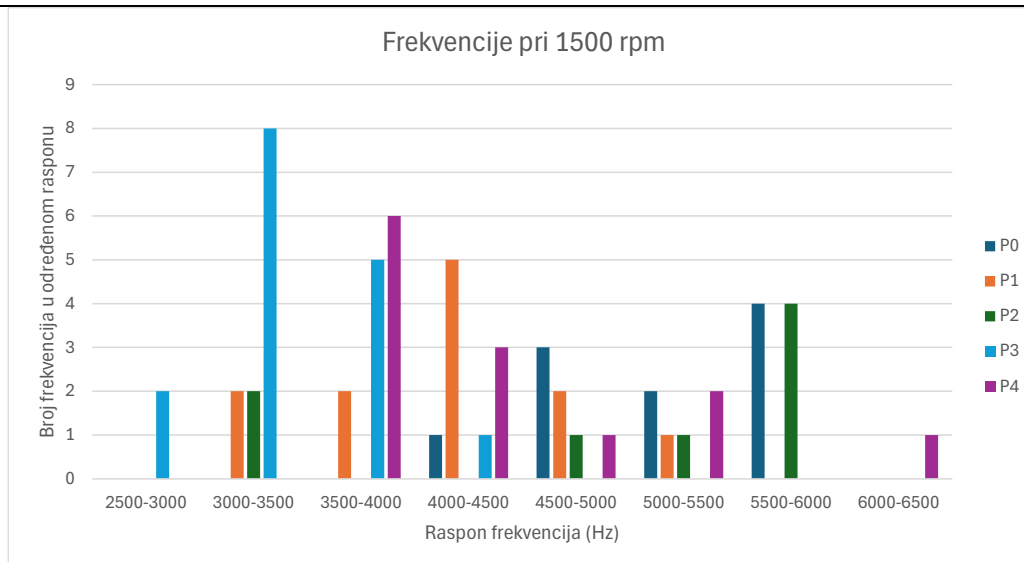
U donjem grafikonu (slika 29) prikazana je brojnost pojave frekvencija vibracija u rasponu od 2500 Hz do 6500 Hz pri brzini vrtnje ležaja od 725 min^{-1} .



Slika 29. Raspon frekvencija vibracija prstenova pri brzini vrtnje ležaja od 725 min^{-1}

Pri brzini vrtnje ležaja od 725 min^{-1} uzorak P0 je imao najveći broj frekvencija vibracija u rasponu od 4500 do 6500 Hz. Uzorak P1 je imao najveći broj frekvencija vibracija u rasponu od 2500 do 4000 Hz. Uzorak P2 je imao najveći broj frekvencija vibracija u rasponu od 3500 do 5500 Hz. Uzorak P3 je imao najveći broj frekvencija vibracija u rasponu od 2500 do 4500 Hz. Najveći broj frekvencija u rasponu od 2500 do 3000 Hz je imao uzorak P4.

U donjem grafikonu (slika 30) prikazana je brojnost pojave frekvencija vibracija u rasponu od 2500 Hz do 6500 Hz pri brzini vrtnje ležaja od 1500 min^{-1} .



Slika 30. Raspon frekvencije vibracija prstenova pri brzini vrtnje ležaja od 1500 min^{-1}

Pri brzini od 1500 min^{-1} uzorak P0 je imao najveći broj frekvencija vibracija u rasponu od 4000 do 6000 Hz. Uzorak P1 je imao najveći broj frekvencija vibracija u rasponu od 3000 do 5500 Hz. Uzorak P2 je imao najveći broj frekvencija vibracija u rasponu od 4500 do 6000 Hz. Uzorak P3 je najveći broj frekvencija vibracija imao u rasponu od 2500 do 4000 Hz. Najveći broj frekvencija vibracija u rasponu od 3500 do 5500 Hz imao je uzorak P4.

6.4. Ispitivanje buke igličastih ležaja

Buka rotirajućeg ležaja je ispitana mjerачem jačine zvuka UT – 352. (slika 31) postavljenim na udaljenosti 100 mm od kućišta ležaja.

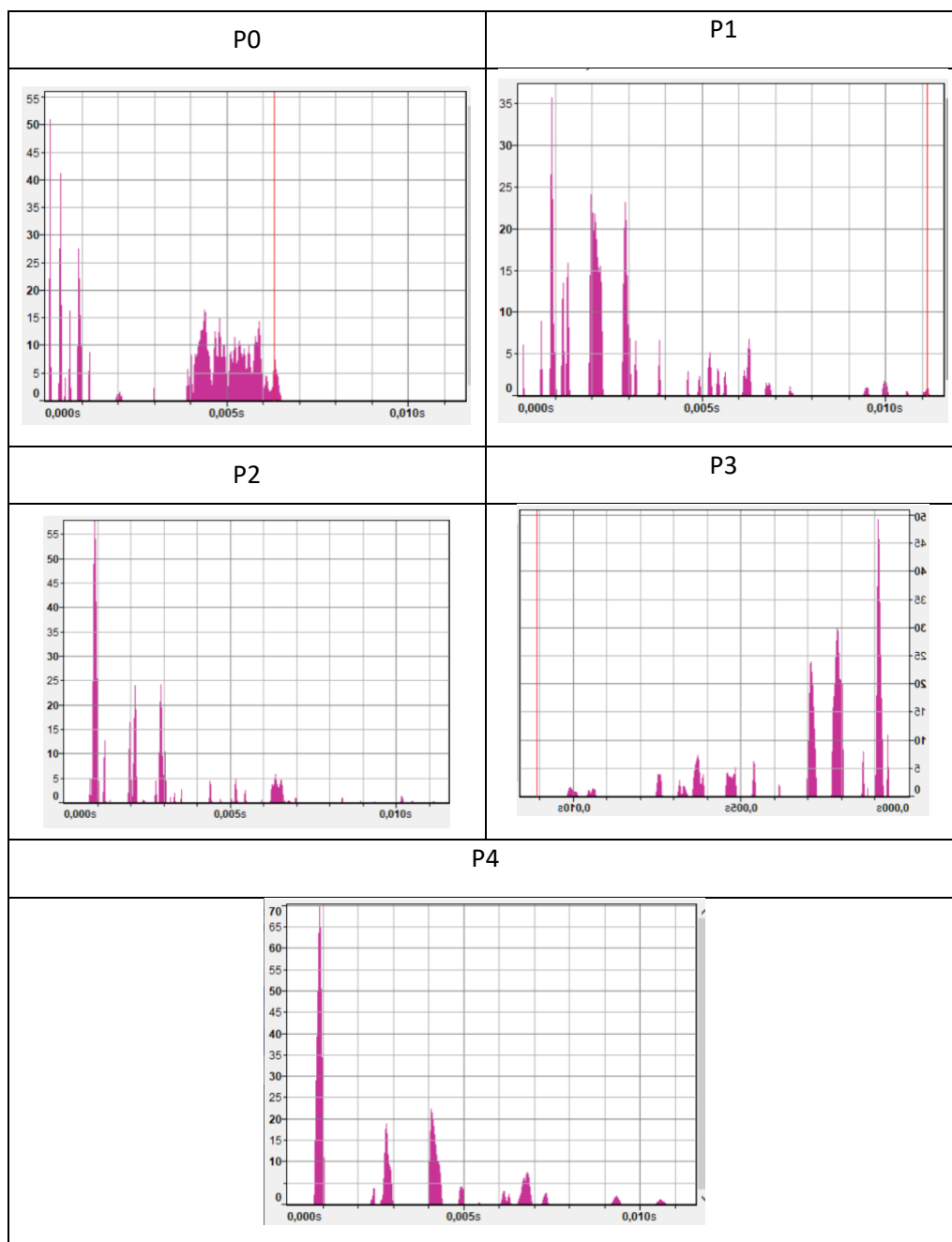


Slika 31. Mjerač jačine zvuka UT – 352

Analiza zvučnog zapisa buke za ve ispitivane uzorke unutrašnjeg prstena i brzine vrtnje igličastog ležaja (510 min^{-1} , 725 min^{-1} , 1500 min^{-1}) provedena je u računalnom programu Audacity prikazom intenziteta i frekvencije snimljene buke.

Za brzinu vrtnje ležaja od 510 min^{-1} usporedba spektra frekvencija zvučnog zapisa prikazana je u tablici 8.

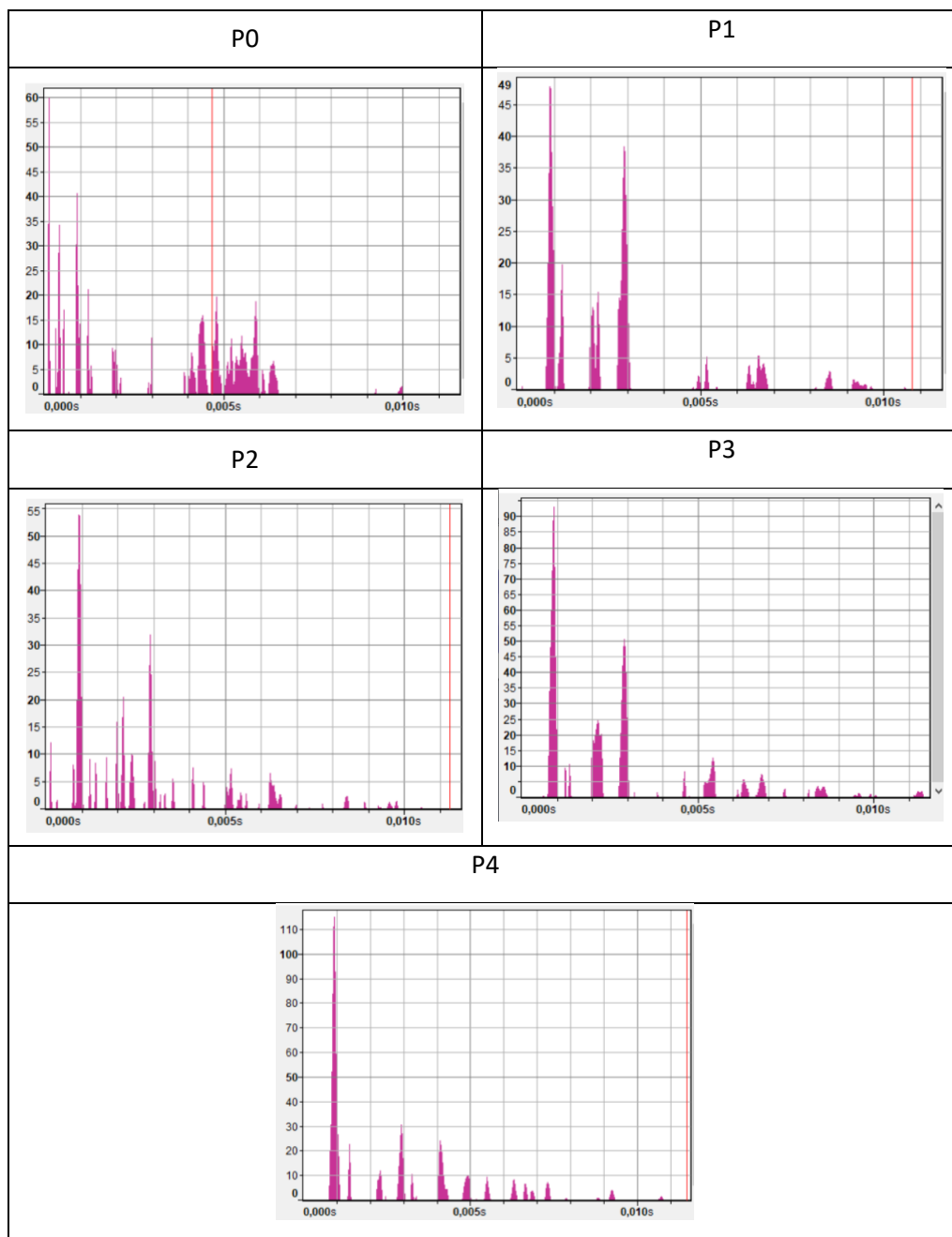
Tablica 8. Usporedba spektra frekvencije buke igličastog ležaja pri brzini 510 min⁻¹



Uspoređujući buku kod prstenova pri brzini vrtnje od 510 min⁻¹ može se zaključiti da je najbučniji bio uzorak P4, a najmirniji rad je imao uzorak P1.

Za brzinu vrtnje ležaja od 725 min^{-1} usporedba spektra frekvencija buke za svaki ispitivani prsten je u tablici 9.

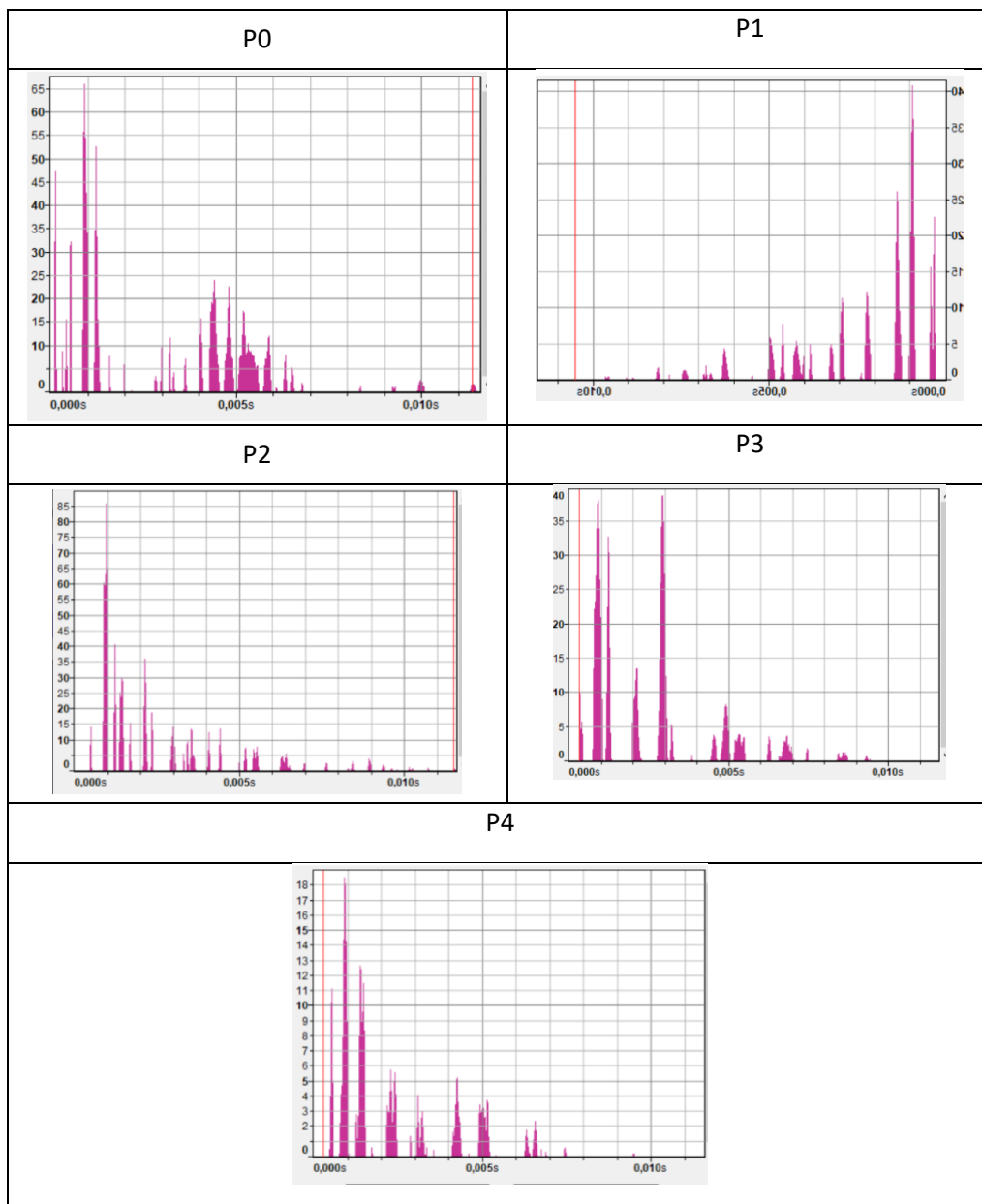
Tablica 9. Usporedba spektra frekvencije buke igličastog ležaja pri brzini 725 min^{-1}



Uspoređujući buku u radu pri brzini vrtnje ležaja od 725 min^{-1} svih ispitanih uzoraka, može se primijetiti da je uzorak P4 bio najbučniji dok je uzorak P1 imao najmirniji rad.

Za brzinu vrtnje ležaja od 1500 min^{-1} usporedba spektra frekvencija buke za svaki ispitivani prsten prikazana je u tablici 10.

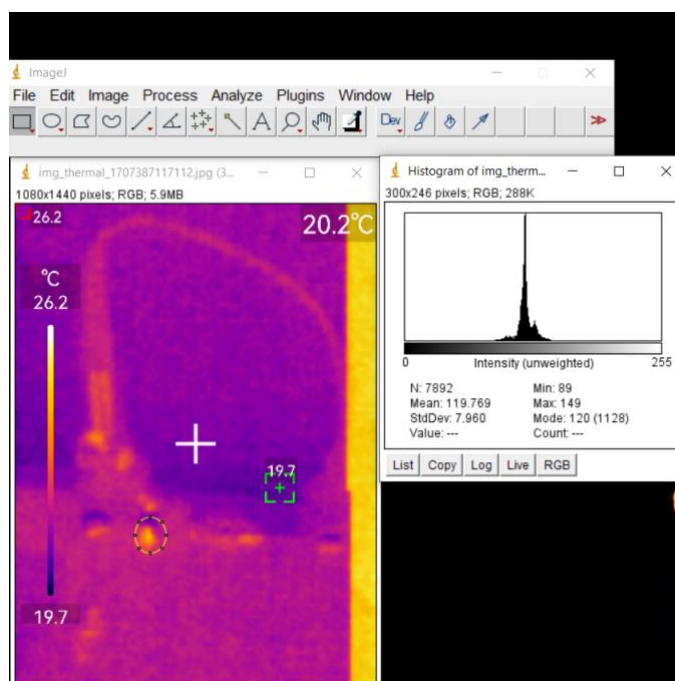
Tablica 10. Usporedba spektra frekvencija buke igličastog ležaja pri brzini od 1500 min^{-1}



Pri najvećoj brzini vrtnje ležaja od 1500 min^{-1} najbučniji je bio uzorak P2, a najmirniji je bio uzorak P4

6.5. Analiza zagrijavanja ležaja

Osim buke i vibracija, također je izmjerena temperatura, odnosno zagrijavanje ležaja tijekom ispitivanja. Temperature su se bilježile termalnom kamerom UNI-T UTI-120M spojenom na Android mobitel pri svim ispitanim brzinama vrtnje. Nakon toga su dobivene fotografije analizirane u programu ImageJ. Primjer analize termografske slike kućišta ležaja prikazan je na donjoj slici.



Slika 32. Primjer analize termalnih fotografija u računalnom programu ImageJ

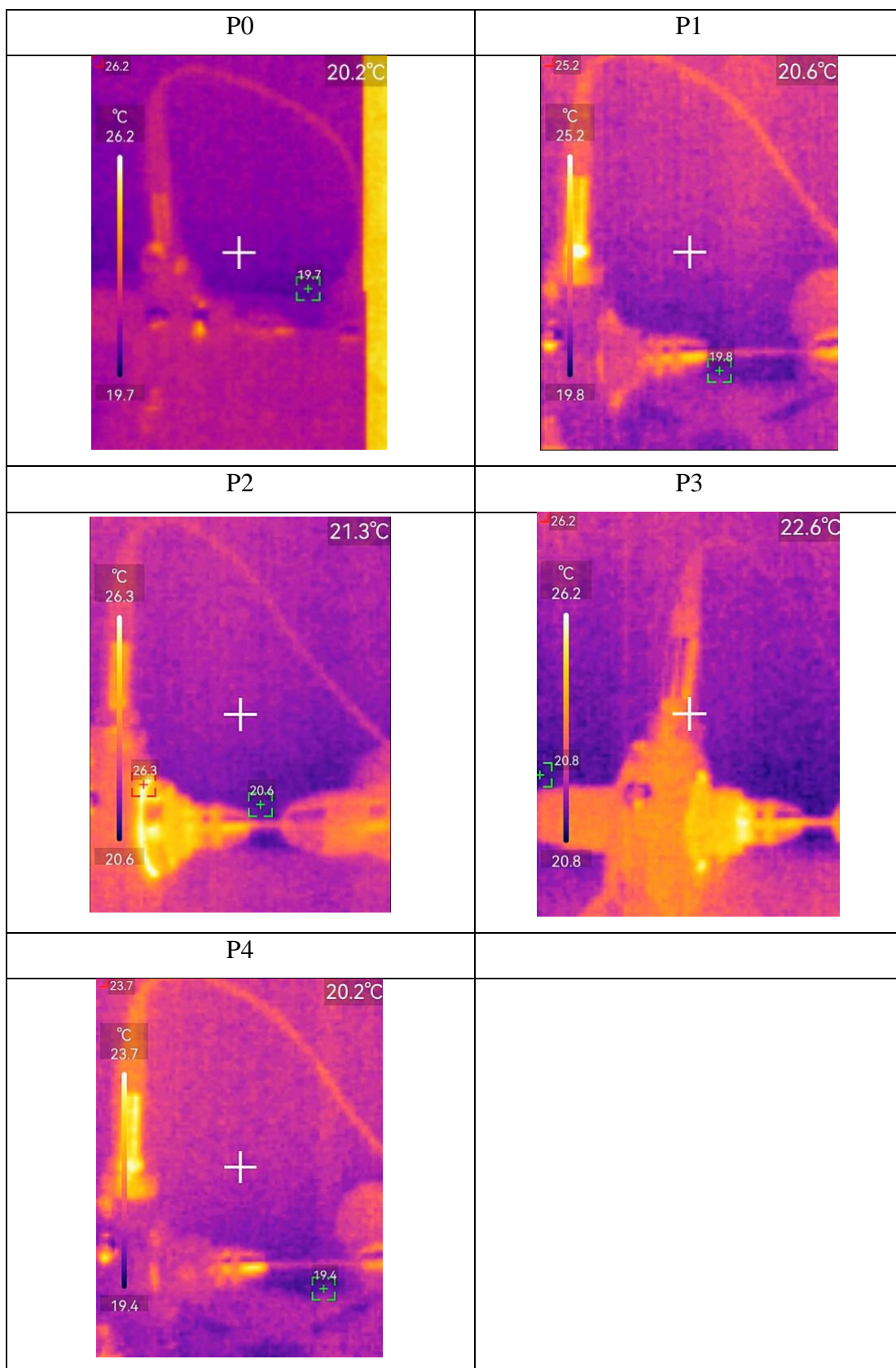
Analiza termografske slike je provedena tako da se svaka fotografija toplinskog polja ležaja, pri svakoj brzini vrtnje, analizirala u programu ImageJ prema rasponu najamnije i najveće temperature koju je zabilježila termokamera. Razlika gornje i donje vrijednosti temperature izmjerene u snimanju termalnom kamerom podijeljena je s 255. Ovaj broj označava broj nijansi sive boje koju može biti dodijeljena pojedinom pikselu na fotografiji. Najtamnija nijansa (crno obojeni piksel) ima vrijednost 1, dok je najsvjetlijem (bijelo obojenom pikselu) dodjeljena vrijednost 255. Prema skali temperature na lijevoj strani termalne slike 32 najhladnijem području na termalnoj slici je pridružena nijasa oznake 1, dok je najtoplijem pikselu pridružena vrijednost 255. promjena razine sive boje za iznos 1 ekvivalentna je za termalnu sliku 32 promjeni

temperature od 0,025 °C. Analizom raspodjele nijansi sive boje na površini unutarnjeg prstena u programu ImageJ određuje se srednja vrijednost razine sive boje i raspodjela razina sive boje prikazana histogramom na desnoj strani slike 32. Množenjem srednje vrijednosti razine sive boje s 0,025 dobiva se temperatura koju je registrirala termalna kamera na označenom području unutarnjeg prstena. U donjoj tablici 11 navedene su srednje vrijednosti temperature unutarnjeg prstana nakon 15 s rada. U tablici 12 su prikazane su termalne fotografije uzoraka pri brzinama vrtnje od 1500 min⁻¹.

Tablica 11. Temperature ležaja pri ispitanim brzinama vrtnje

| Oznaka uzorka | Brzina vrtnje ležaja | | |
|------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|
| | 510 min ⁻¹ | 725 min ⁻¹ | 1500 min ⁻¹ |
| P0 | 22,76 °C | 23,43 °C | 23,11 °C |
| P1 | 22,14 °C | 22,39 °C | 22,87 °C |
| P2 | 23,78 °C | 24,33 °C | 24,71 °C |
| P3 | 23,39 °C | 23,58 °C | 24,04 °C |
| P4 | 22,65 °C | 22,99 °C | 22,79 °C |

U tablici 12 su vidljive termalne fotografije uzoraka pri brzinama vrtnje 1500 min⁻¹.

Tablica 12. Termalne fotografije kućišta igličastog ležaja pri brzini vrtnje 1500 min⁻¹

Tijekom rada ležaja dolazi do zagrijavanja ležaja i kućišta . Što je veća brzina vrtnje to je veće zagrijavanje ležaja. No, to zagrijavanje neće trajati beskonačno dugo već do onog trenutka dok se ne dostigne radna temperatura ležaja i tada se temperatura ležaja ustali na određenoj konstantnoj vrijednosti.

Kod uzorka P0 je u usporedbi s najmanjom i najvećom brzinom vrtnje došlo je do zagrijavanja u iznosu od 0,35 °C. Uzorak P1 se od brzine 510 min⁻¹ do brzine 1500 min⁻¹zagrijao za 0,73 °C. Uzorak P2 se ugrijao za 0,93 °C uspoređujući brzinu 1500 min⁻¹u odnosu na brzinu 510 min⁻¹. Za 0,65 °C se ugrijao uzorak P3 od brzine okretanja 510 min⁻¹do brzine okretanja 1500 min⁻¹. Uzorak P4 se od najmanje brzine ispitivanja do najveće brzine ispitivanja ugrijao za 0,14 °C.

6.6. Analiza trošenja unutarnjeg prstena ležaja

Nakon obavljenih mjerenja provedena je analiza trošenja površine unutarnjeg prstena ležaja promatranjem na svjetlosnom mikroskopu. (slika 33) Za ovu namjenu korišten je USB svjetlosni mikroskop s kamerom Toolcraft Digimicro Profi s kontinuirano promjenljivim povećanjem od 20:1 do 200:1 spojen na prijenosno računalo i računalnim programom Micro Capture Plus.



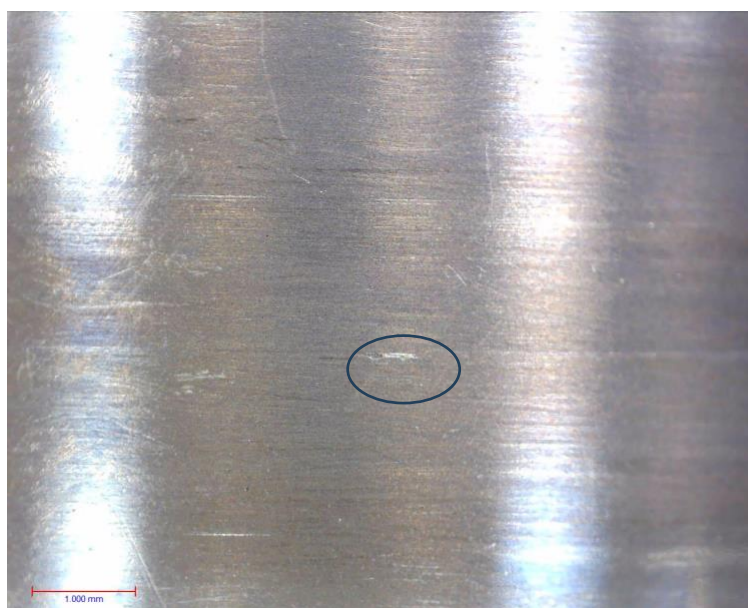
Slika 33. Analiza površine uzoraka primjenom svjetlosnog mikroskopa s kamerom

Na slici 34 prikazana je površina prstena neprevučenog uzorka P0 nakon 30 min rotacije u praznom hodu brzinama od 510 min^{-1} do 1500 min^{-1} . Na cijeloj površini prstena uočavaju se jamice koje predstavljaju početak trošenja umorom površine materijala. Na označenom području na slici 34 uočeno je adhezijsko trošenje nastalo klizanjem iglica između vanjskog i unutrašnjeg prstena ležaja. Klizanje iglica nastalo je kao posljedica vrtnje ležaj bez podmazivanja.

Na slici 35 prikazana je površina prstena P1 nakon ukupno 15 min ispitivanja s brzinama vrtnje 510 min^{-1} , 725 min^{-1} i 1500 min^{-1} u trajanju od oko 5 min na svakoj brzini vrtnje. Uzorak P1 nakon mjerenja nije pokazivao znakove umora površine, no vidljivi su tragovi adhezije koji su zaokruženi na slici 35.



Slika 34. Površina neprevučenog prstena P0 od čelika 100Cr6 nako n30 min trošenja



Slika 35. Površina prstena P1 s prevlakom PACVD TiN/TiCN nakon 15 min trošenja

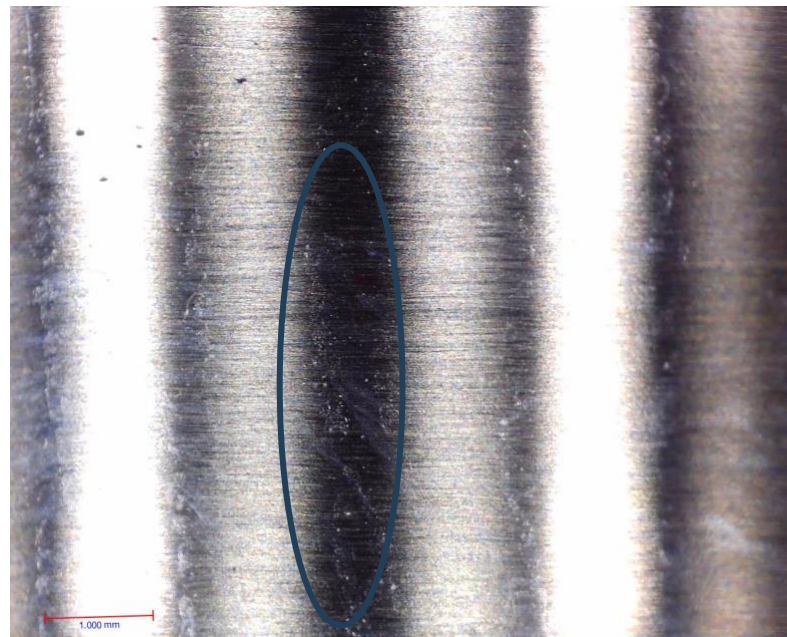
Na slici 36 prikazana je površina prstena P2 s prevlakom PACVD TiN nakon 15 min ispitivanja vrtnjom u praznom hodu s brzinama od 510 min^{-1} do 1500 min^{-1} . Jamice trošenja vidljive na slici 36 predstavljaju početak trošenja umorom površine. Prevlaka je na dijelovima površine slabije prionula na prsten te se pojavljuje početak ljuštenja.



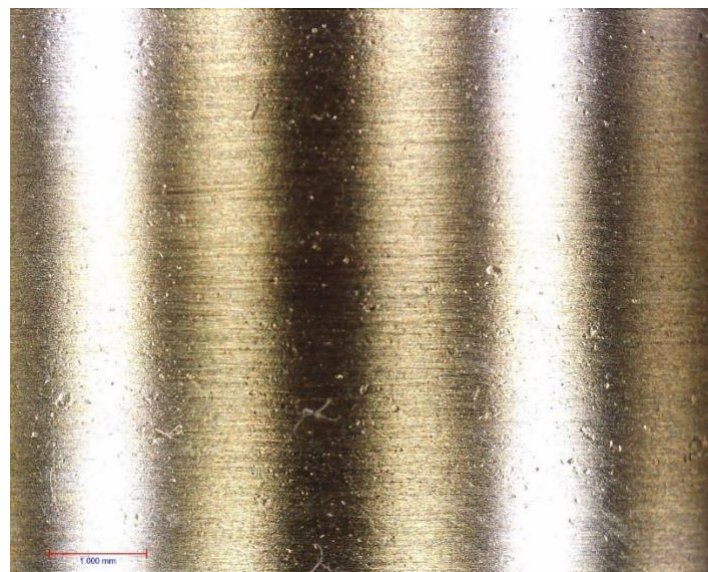
Slika 36. Površina prstena P2 s prevlakom PACVD TiN nakon 15 min trošenja

Na slici 37 prikazana je površina prstena P3 s prevlakom PACVD TiCN/TiN nakon 15 min ispitivanja vrtnjom u praznom hodu s brzinama od 510 min^{-1} do 1500 min^{-1} . Na površini se uočavaju jamice trošenja nastale trošenjem mehanizmom umora površine. Na slici 37 također je uočena površina (označena elipsom) na kojem se pojavilo adhezijsko trošenje zbog klizanja iglica između vanjskog i unutrašnjeg prstena ležaja.

Na slici 38 prikazana je površina prstena P4 s prevlakom PVD TiN nakon 15 min ispitivanja vrtnjom u praznom hodu s brzinama od 510 min^{-1} do 1500 min^{-1} . Na ovom uzorku je vidljivo da je tijekom ispitivanja započelo trošenje umorom površine. Na analiziranoj površini uzorka P4 nisu nađeni tragovi adhezijskog trošenja.



Slika 37. Površina prstena P3 s prevlakom PACVD TiCN/TiN nakon 15b min trošenja



Slika 38. Površina prstena P4 s prevlakom PVD TiN nakon 15 min trošenja

6.7. Diskusija rezultata

Svako mjerenje provedeno u eksperimentalnom dijelu rada se povezuje i nadopunjuje. Tako visoke frekvencije, odnosno vibracije znače da u ležaju dolazi do klizanja i adhezivnog ili abrazivnog trošenja, a samim time će se taj ležaj više zagrijavati u radu. Obrnuto, ako su zabilježene niske frekvencije u radu, onda su to u pitanju mehanički udarci i buka zbog kotrljanja i takav ležaj će se manje ugrijavati. Navedi rezultati mjerenja se dakako preslikavaju na završnu analizu trošenja ležaja svjetlosnom mikroskopijom gdje se onda može vidjeti da su bučniji ležaji pokazivali izraženije tragove početnog trošenja.

Pri brzini od 510 o/min najmanji vibracijski pomak imao je uzorak P4, a najveći uzorak P2. Najmanju akceleraciju vibracija imao je uzorak P0, a najveću uzorak P1. Najmanju brzinu udarca je imao uzorak P0, a najveću je imao uzorak P3. Uzorak P4 je radio pri nižim frekvencijama vibracija, u rasponu od 2500 Hz do 3000 Hz, dok je uzorak P0 radio pri višim frekvencijama vibracija, u rasponu od 4500 Hz do 6500 Hz.

Pri brzini od 725 o/min najmanji vibracijski pomak je imao uzorak P3, a najveći uzorak P0. Najmanju akceleraciju vibracija je imao uzorak P0, a najveću uzorak P3. Najmanju brzinu udarca imao je uzorak P0, a najveću uzorak P1. Uzorak P4 je radio pri frekvencijama vibracija u rasponu od 2500 Hz do 3000 Hz, dok je uzorak P0 radio pri frekvencijama vibracija u rasponu od 4500 Hz do 6500 Hz.

Pri brzini od 1500 o/min najmanji vibracijski pomak imao je uzorak P4, a najveći uzorak P3. Najmanju akceleraciju vibracija imao je uzorak P4, a najveću uzorak P3. Najmanju brzinu udarca imao je uzorak P0, a najveću uzorak P3. Uzorak P3 je radio pri frekvencijama vibracija od 2500 do 4000 Hz, dok je uzorak P2 radio pri frekvencijama vibracija u rasponu od 4500 do 6000 Hz.

Za analizu trošenja bitno je napomenuti da su se uzorci analizirali nakon što su bila provedena sva ispitivanja. Stoga je pod mikroskopom uočen početak trošenja kod svakog ispitanog uzorka.

Na uzorku P0 se nakon ispitivanja primijetilo da je došlo do kliznog (adhezijskog) trošenja tijekom ispitivanja i također su bili vidljivi počeci trošenja umorom površine. Na uzorku P1 se kao i na uzorku P0 pojavio umor površine, a osim toga vidljivi su bili i tragovi adhezijskog trošenja. Na uzorku P2 bili su vidljivi tragovi adhezije, na uzorku P3 su vidljivi tragovi klizanja i počeci umora materijala, a na uzorku P4 su vidljivi počeci umora materijala

7. ZAKLJUČAK

Na temelju dobivenih rezultata vide se razlike u uzorcima tokom provedenih ispitivanja. No, te razlike ne odstupaju znatno jedne od drugih. Svi prevučeni prstni pokazali su se otpornijim na umor površine od neprevučenog prstena.

Pri ispitivanju vibracija, najbolje rezultate je imao uzorak P4 (TiN prevlaka prevučena postupkom PVD), no zadovoljavajuće rezultate je imao i uzorak P3 (TiCN/TiN prevlaka prevučena postupkom PACVD). Dva naveden uzorka su imali najmanje pomake pri ispitivanim brzinama te su zate uzorke zabilježeni najniži rasponi frekvencija pri radu.

Tijekom ispitivanja buke uzorak P1 (TiCN prevlaka prevučena PACVD postupkom) je pokazao najmirniji rad pri brzinama od 510 i 725 okretaja u minuti, dok je pri brzini od 1500 okretaja u minuti ipak najmirniji rad imao uzorak P4.

Analizirajući uzorke svjetlosnim mikroskopom na uzorcima se uočavaju počeci umora površine i adhezijskog trošenja. Ovakva kombinacija mehanizama trošenja ukazuje da se uz kotrljanje iglica i unutarnjeg prstena javilo i klizanje kao posljedica rada režaja u uvjetima bez podmazivanja..

Sva ispitivanja provedena su bez podmazivanja te su zvučni zapisi ispitanih prstena bili bučniji, vibracije veće te su se umor površine i adhezija javili ranije no što bi to bio slučaj da se u ispitivanju koristilo i odgovarajuće mazivo.

Nakon provedenih ispitivanja može se zaključiti da se prevlačenjem prstena ležaja smanjuju buka i vibracija u radu ležaja, a najznačajnije smanjenje u usporedbi sa neprevučenim ležajem imala je prevlaka TiN prevučena PVD postupkom (P4). Također, prikladna bi bila i prevlaka TiCN/TiN prevučena PACVD postupkom.

LITERATURA

- [1] Landek, D.: Posebnosti proizvodnje i svojstva alatnih materijala, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.
- [2] Bhadeshia, H. K. D. H., (2011.) Steels for bearings. Progress in Material Science, str. 270 - 411
- [3] Gojić, M.: Površinska obradba materijala, Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet, Sisak, 2010.
- [4] Paskvale, S.: Properties of PVD hard coatings, University of Ljubljana, Faculty of mathematics and physics, Ljubljana, 2007.
- [5] Mahmood, S. T. (2010) Use of vibrations analysis technique in condition based maintenance. Mater of science thesis in the master degree programme production engineering and management. Stockholm, Sweden: School of industrial engineering and management
- [6] Strojopromet. URL: <https://strojopromet.com/alatni-celici-okrugli-i-plosnati/> (Pristupljeno 2024-01-17)
- [7] Steel navigator. URL: <https://steelnavigator.ovako.com/steel-grades/100cr6/> (Pristupljeno 2024-01-17)
- [8] Proizvodno strojarstvo. URL: <https://proizvodno-strojarstvo.blogspot.com/2011/09/postupci-cvd-chemical-vapour-deposition.html> (Pristupljeno 2024-01-17)
- [9] Manufacturing guide. URL: <https://www.manufacturingguide.com/en/plasma-assisted-chemical-vapor-deposition-pacvd> (Pristupljeno 2024-01-17)
- [10] Thierry. URL: <https://www.thierry-corp.com/plasma-knowledgebase/advantages-of-pecvd> (Pristupljeno 2024-01-17)
- [11] Gkvac. URL: <https://en.gkvac.com/news/4.html> (Pristupljeno 2024-01-17)
- [12] Wikipedija. URL: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Le%C5%BEaj> (Pristupljeno 2024-01-17)
- [13] Wikipedija. URL: https://hr.wikipedia.org/wiki/Hrapavost_povr%C5%A1ine (Pristupljeno 2024-02-17)
- [14] Wikipedija. URL: <https://hr.wikipedia.org/wiki/Alat> (Pristupljeno 2024-01-17)
- [15] Astaprom. URL: <https://astra-prom.hr/> (Pristupljeno 2024-01-17)
- [16] SKF. URL: <https://www.skf.com/ke/productinfo/productid-NKI%2090%2F26> (Pristupljeno 2024-01-17)

-
- [17] Checkline Europe. URL: <https://www.checkline.eu/prod/surface-roughness-testers/tr-200> (Pristupljeno 2024-02-18)
- [18] Landek, D., Zhao, L., Yang, Q., Dadouche, A. (2021.) Increasing wear resistance of steel rings for sliding bearings by surface engineering procedures. U: Ćorić, D. (ur.), Šolić, S. (ur.), Ivušić, F. (ur.) MATRIB 2021. Zagreb: Hrvatsko Društvo za Materijale i Tribologiju, str. 287 – 289.