

Ispitivaje svojstava nitriranih prstena valjnog ležaja

Režek, Ana Marija

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

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:235:299658>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-12**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ana Marija Režek

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Dr. sc. Darko Landek, dipl. ing.

Student:

Ana Marija Režek

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj završni rad izradila samostalno uz stručnu pomoć prof. dr. sc. Darka Landeka, koristeći znanja stečena tijekom studija te navedenu literaturu i rezultate dobivene ispitivanjem u eksperimentalnom dijelu.

Zahvaljujem se svima koji su mi pomagali prilikom izrade ovog rada, asistentima, profesorima. Posebno se zahvaljujem mentoru prof. dr. sc. Darku Landeku na stručnoj pomoći, savjetima, vremenu i strpljenju.

Najviše od sveg se zahvaljujem svojim roditeljima, braći, prijateljima i Leonu na svojoj podršci i strpljenju koje su mi pružili prilikom studiranja. . Velika hvala svima.

Ana Marija Režek



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za završne 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: | |
| Ur.broj: | |

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ana Marija Režek** Mat. br.: 0035202398

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Ispitivanje svojstava nitriranih prstena valjnog ležaja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Testing properties of the nitrided bearing rings**

Opis zadatka:

Prsteni valjnih ležaja u radu su izloženi visokim dinamičkim naprezanjima, kontaktnim pritiscima i trošenju. Primjenom postupaka nitriranja moguće je povećati otpornost na trošenje i kontaktne pritiske te time produljiti eksploatacijski vijek ležaja.

U teorijskom dijelu rada treba opisati tribosustav i mehanička naprezanja valjnih ležaja te predložiti varijante postupka nitriranja prikladne za primjenu na poboljšanim prstenovima od čelika EN 100Cr6.

U eksperimentalnom dijelu rada treba pripremiti uzorke od čelika EN 100Cr6 i provesti predložene postupke nitriranja. Na polaznim i nitriranim uzorcima provesti ispitivanje hrapavosti i mikrotvrdoće površine, određivanje efektivne dubine nitriranja, analizu mikrostrukture nitriranog sloja i određivanje otpornosti na adhezijsko trošenje.

Na temelju provedenih ispitivanja i diskusije rezultata predložiti varijantu postupka nitriranja najprikladniju za povišenje otpornosti na trošenje ispitivanih prstena.

U radu treba navesti korištenu literaturu i dobivenu stručnu pomoć.

Zadatak zadan:
29. studenog 2018.


Rok predaje rada:
1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Zadatak zadao:


 Prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:


 Prof. dr. sc. Branko Bauer

Sadržaj

| | |
|---|------|
| Popis slika | III |
| Popis tablica | V |
| POPIS OZNAKA | VI |
| SAŽETAK..... | VII |
| SUMMARY | VIII |
| 1. UVOD | 1 |
| Teorijski dio | 2 |
| 2.Valjni ležajevi | 3 |
| 2.1. Podjela valjnih ležajeva..... | 3 |
| 3.Tribosustav valjnih ležajeva..... | 4 |
| 3.1. Materijali za izradu dijelova valjnih ležajeva | 6 |
| 3.2. Trenje kod valjnih ležajeva | 6 |
| 3.3. Podmazivanje valjnih ležajeva | 7 |
| 4. Kontaktna naprezanja | 9 |
| 4.1. Vanjsko opterećenje valjnog ležaja | 9 |
| 4.2. Pritisak na dodirnim plohama valjkastog valjnog tijela ležaja..... | 10 |
| 4.2.1. Hertzov kontakt | 11 |
| 4.3. Oštećenje ležaja uslijed zamora materijala | 12 |
| 4.4. Vijek trajanja valjnog ležaja..... | 13 |
| 5. Modificiranje čelika EN 100Cr6 | 14 |
| 5.1. Toplinska obrada čelika EN 100Cr6 | 15 |
| 6. Nitiranje | 16 |
| 6.1. Izgled nitiranog sloja..... | 17 |
| 6.2. Dubina nitiranja i svojstva nitiranog sloja..... | 20 |
| 6.3. Plinsko nitiranje | 21 |
| 6.4. Nitiranje u solnim kupkama..... | 22 |

| | |
|--|----|
| 6.5. Nitiranje u plazmi | 23 |
| 7. Metode ispitivanja | 25 |
| 7.1. Mikrotvrdoća površine | 26 |
| 7.2. Ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje | 27 |
| 7.3. Metalografsko ispitivanje | 29 |
| 7.4. Hrapavost površine | 31 |
| 7.4.1. Osnovni pojmovi hrapavosti | 31 |
| Ekperimentalni dio | 34 |
| 8. Plan pokusa i priprema ispitnih uzoraka | 35 |
| 9. Rezultati ispitivanja | 37 |
| 9.1 Hrapavost površine | 37 |
| 9.2. Ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje | 40 |
| 9.3. Metalografska analiza | 45 |
| 9.4. Ispitivanje mikrotvrdoće | 49 |
| 10. Diskusija rezultata | 54 |
| 11. Zaključak | 56 |
| Popis literature | 57 |
| Prilog 1: Parametri hrapavosti | 59 |
| Prilog 2: Rezultati faktora trenja | 63 |

Popis slika

| | |
|---|----|
| Slika 1. Tribosustav valjnog ležaja [2]..... | 5 |
| Slika 2. Dijelovi valjnog ležaja [2]..... | 5 |
| Slika 3. Vrste trenja obzirom na stanje naliježućih površina [2] | 7 |
| Slika 4. Pritisak na dodirnim plohama dva valjka s paralelnim osima [2]..... | 10 |
| Slika 5. Pritisak na dodirnim plohama valjakastog valjnog tijela ležaja [2] | 11 |
| Slika 6. Najveće smično naprezanje [2] | 12 |
| Slika 7. Krivulja vijeka trajanja valjnog ležaja [2]..... | 13 |
| Slika 8. Slika 8: Toplinska obrada čelika EN 100Cr6 [11]..... | 16 |
| Slika 9. Dijagram stanja željezo- dušik [13] | 18 |
| Slika 10. Shematski prikaz nitriranog sloja..... | 19 |
| Slika 11. Sastav nitriranog sloja [13] | 19 |
| Slika 12. Shematski prikaz difuzije dušika [1]..... | 22 |
| Slika 13. Postrojenje za nitriranje u solnim kupkama [13] | 23 |
| Slika 14. Peć za plazmatsko nitriranje [16]..... | 24 |
| Slika 15. Ispitivanje mikrotvrdoće po Vickersu: a) uređaj koji je korišten pri ovom ispitivanju, b) izgled indentora i otiska | 27 |
| Slika 16. Uređaj korišten prilikom ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje..... | 28 |
| Slika 17. Izgled traga trošenja nastalog metodom prizma na prsten | 28 |
| Slika 18. Uređaj za brušenje..... | 29 |
| Slika 19. Uređaj za poliranje | 30 |
| Slika 20. Svjetlosni mikroskop (Olympus GX51) | 31 |
| Slika 21. Referentna duljina profila, l , srednje aritmetičko odstupanje profila, R_a , srednje kvadratno odstupanje, R_q [8] | 32 |
| Slika 22. Najveća visina profila, R_y , najveća visina izbočine, R_p , najveća dubina izbočine, R_m [8] | 32 |
| Slika 23. Dijagram postupaka nitriranja za obradu valjnih prstenova od čelika EN 100Cr6 .. | 36 |
| Slika 24. Tijek procesa nitriranja prstena valjnog ležaja u plazmi..... | 36 |
| Slika 25. Usporedba parametra hrapavosti..... | 38 |
| Slika 26. Profil hrapavosti za polazni prsten..... | 39 |
| Slika 27. Profil hrapavosti za prsten nitriran u plinu..... | 39 |
| Slika 28. Profil hrapavosti TENIFER | 39 |
| Slika 29. Profil hrapavosti za prsten nitriran u plazmi | 40 |

| | |
|--|----|
| Slika 30. Kalibracija opruge za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje polaznog prstena i nitriranog u plazmi | 41 |
| Slika 31. Kalibracija opruge za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje prstena nitriranog u plinu..... | 42 |
| Slika 32. . Kalibracija opruge za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje prstena nitriranog postupkom TENIFER..... | 42 |
| Slika 33. Faktor trenja za polazni prsten | 43 |
| Slika 34. Faktor trenja za prsten nitriran u plinu | 44 |
| Slika 35. Faktor trenja za prsten nitriran metodom TENIFER | 44 |
| Slika 36. Faktor trenja za prsten nitriran u plazmi | 44 |
| Slika 37. Debljina zone spojeva prstena nitriranog u plinu povećanja 500x | 46 |
| Slika 38. Debljina zone spojeva prstena nitriranog u solnoj kupci TENIFER povećanje 1000X | 46 |
| Slika 39. Prsten nitriran u plinu pod svjetlosnim mikroskopom: a) zona spojeva i difuzijska zona(povećanje 1000X), b) jezgra (povećanje 500X)..... | 47 |
| Slika 40. Prsten nitriran metodom TENIFER pod svjetlosnim mikroskopom: a) zona spojeva i difuzijska zona (povećanje 1000X), b) jezgra (povećanje 1000X)..... | 48 |
| Slika 41. Rubni sloj prstena nitriranog u plazmi pod svjetlosnim mikroskopom povećanja 1000X..... | 49 |
| Slika 42. . Efektivna dubina nitiranja prstena nitriranog u plinu | 51 |
| Slika 43. Efektivna dubina nitiranja prstena nitriranog metodom TENIFER..... | 52 |
| Slika 44. Slika 41. Efektivna dubina nitiranja prstena nitriranog u plazmi | 53 |
| Slika 45. Tragovi trošenja nastali ispitivanjem prstenova na adhezijsko trošenje: a)polazni prsten, b) plinski nitriran, c) nitriran u solnoj kupci TENIFER, d) nitriran u plazmi | 55 |
| Slika 46. Parametri hrapavosti za polazni prsten | 59 |
| Slika 47. parametri hrapavosti za prsten nitriran u plinu | 60 |
| Slika 48. Parametri hrapavosti za prsten nitriran metodom TENIFER..... | 61 |
| Slika 49. Parametri hrapavosti za prsten nitriran u plazmi | 62 |

Popis tablica

| | |
|---|----|
| Tablica 1. Kemijski sastav čelika EN 100Cr6 proizvođača- Ovako (7) | 15 |
| Tablica 2. Kemijski sastav čelika EN 100Cr6 proizvođača- IMS (8)..... | 15 |
| Tablica 3. Pregled postupka nitriranja i osnovnih značajki [13]..... | 17 |
| Tablica 4. Prikaz postizive dubine nitriranja u solnoj kupci | 20 |
| Tablica 5. Parametri nitriranja u plazmi | 35 |
| Tablica 6. Vrijednosti parametara hrapavosti za ispitivane prstenove valjnog ležaja | 37 |
| Tablica 7. Vrijednosti sile savijanja opruge u postupku kalibracije za polazni i prsten nitričan u plazmi | 41 |
| Tablica 8. Vrijednosti savijanja opruge u postupku kalibracije opruge za prsten nitričan u plinu..... | 41 |
| Tablica 9. Vrijednosti savijanja opruge u postupku kalibracije za prsten nitričan postupkom TENIFER | 42 |
| Tablica 10. Iznosi srednjih faktora trenja za svaki prsten pri normalnoj sili od 68,67 N | 43 |
| Tablica 11. Rezultati ispitivanja jezgre prstena | 50 |
| Tablica 12. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće od ruba prema jezgri prstena nitričanog u plinu | 50 |
| Tablica 13. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće od ruba prema jezgri prstena nitričanog u plinu | 51 |
| Tablica 14. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće od ruba prema jezgri prstena nitričanog u plinu | 52 |
| Tablica 15. Faktor trenja za polazni prsten | 63 |
| Tablica 16. Rezultati faktora trenja za plinsko nitriranje | 64 |
| Tablica 17. Faktor trenja za prsten nitričan metodom TENIFER..... | 65 |
| Tablica 18. Faktor trenja za prsten nitričan u plazmi | 66 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|-----------------|--|
| Z | kom | Ukupan broj vanjskih tijela |
| P | N | Vanjsko opterećenje |
| k_0 | | Faktor proporcionalnosti |
| F_n | N | Normalna sila |
| B | m | Širina dodira |
| E | Pa | Youngov modul elastičnosti |
| ρ | m | Srednji polumjer zaobljenja |
| ρ_{max} | Pa | Najveći dodirni pritisak |
| ρ_{up} | m | Vanjski polumjer unutarnjeg prstena |
| ρ_{vp} | m | Unutarnji polumjer vanjskog prstena |
| ρ_{vt} | m | Polumjer valjnog tijela |
| τ_{max} | Pa | Najveće smično naprezanje |
| σ^m | Pa | Normalno naprezanje |
| N | m^{-1} | Broj okretaja valjnog ležaja |
| ε | - | EkspONENT vijeka trajanja |
| L_{10} | h | Vijek trajanja valjnog ležaja pri 90-postotnoj pouzdanosti |
| R_a | μm | Srednje aritmetičko odstupanje |
| R_q | μm | Srednje kvadratno odstupanje |
| R_p | μm | Najveća visina izbočine profila |
| R_m | μm | Najveća dubina izbočine profila |
| R_y | μm | Najveća visina profila |
| R_z | μm | Prosječna visina neravnina |

SAŽETAK

Tema ovog rada je odrediti koja metoda nitriranja prstena valjnog ležaja daje najbolje rezultate. Nitriranje je provedeno u 3 različita medija: plazmi, solnoj kupci i plinu. U teorijskom dijelu rada opisane su metode nitriranja, tribosustav valjnog ležaja i mehanička naprezanja koja se javljaju prilikom rada ležaja. U eksperimentalnom dijelu su provedena ispitivanja adhezijskog trošenja metodom prizma na prstenu, mjerenje hrapavosti površine i mikrotvrdoće te je provedena i metalografska analiza prstena. Rezultati su pokazali kako je nitriranje u solnoj kupci TENIFER dalo najveću efektivnu dubinu nitriranja. Nitriranjem u plinu postigla se najviša površinska tvrdoća dok su se nitriranjem u plazmi parametri hrapavosti i faktor trenja najmanje povišali.

SUMMARY

The subject of this report is to examine which nitriding method produces best results when applied to the ring of a rolling bearing. The ring is nitrided in 3 different mediums: plasma, salt bath and gas. Nitriding methods, tribological system of the rolling bearing and mechanical stresses that appear in the bearing are described in the theoretical part of the report. Block-on-ring rolling wear test, surface roughness and microhardness measurements as well as the metallography analysis of the ring is conducted in the experimental part of the report. Based on results, nitriding in TENIFER salt bath has given the greatest effective depth of nitriding. Surface hardness was highest when using gas nitriding, while roughness parameters and friction coefficient were lowest when using nitriding in plasma

1. UVOD

Valjni ležajevi su strojni dijelovi koji omogućuju vođenje pokretnih strojnih dijelova poput osovine i vratila. Valjni ležajevi razlikuju se prema obliku valjnih tijela koja su umetnuta u kavez odgovarajućeg oblika. Kavez se nalazi između dva prstena. Obzirom na opterećenje koje prevladava dijele se na aksijalne, radijane i aksijalne i radijalne. Kao takvi izloženi su visokim dinamičkim naprezanjima, kontaktnim pritiscima i trošenju. Metodama nitriranja moguće je poboljšati svojstva čelika EN 100Cr6 od kojeg je načinjen prsten valjnog ležaja.

Nitriranje je toplinsko- kemijska obrada površine. Površina se modificira difuzijom dušika i stvaranjem nitrida u sloju obratka. Obradak za nitriranje isporučuje se u poboljšanom stanju. U radu je provedeno nitriranje u plinu, plazmi i solnoj kupci. Odabirom različitog postupka i parametra dobiva se drugačiji sastav, a time i struktura rubnog sloja. Ispitivanjem uzorka prstena valjnog ležaja na adhezijsko trošenje, mjerenjem mikrotvrdoće, metalografskim ispitivanjem i određivanjem hrapavosti površine predložit će se najbolja metoda nitriranja.

Teorijski dio

2. Valjni ležajevi

Valjni ležaj je strojni dio, umetnut u odgovarajuće kućište, koji kao i klizni omogućuje vođenje pokretnih strojnih dijelova (osovine, vratila). Valjni ležajevi mogu istodobno prenositi radijalno i aksijalno opterećenje, samo radijalno ili samo aksijalno opterećenje.

U usporedbi s kliznim ležajevima valjni ležajevi imaju sljedeće prednosti:

1. Koeficijent trenja je 25 - 30% niži zbog trenja valjanja
2. Višu nosivost pri relativno malim dimenzijama
3. Manje gubitke snage zbog manjeg trenja
4. Manje se zagrijavaju
5. Precizniji su zbog manje zračnosti među valjnim elementima
6. Jednostavnije održavanje
7. Upotrebljivi za sve položaje vratila
8. Standardizirani, jednostavna zamjena

Nedostaci valjnih ležajeva jesu sljedeći:

1. Osjetljivi na udarna opterećenja
2. Slaba otpornost na mehaničke vibracije
3. Skuplji od jednostavnijih kliznih ležajeva
4. Sastavljeni od velikog broja pojedinačnih dijelova
5. Zahtjevna ugradnja i rasklapanje
6. U slučaju kvara nije moguća zamjena već ugradnja čitavog novog ležaja

2.1. Podjela valjnih ležajeva

Valjni ležajevi dijele se prema [2]:

1. opterećenju koje prenose:
 - aksijalno opterećenje

- radijalno opterećenje
- aksijalno i radijalno

2. nazivnom kutu α :

Nazivni kut α definira se kao kut između ravnine okomite na os ležaja i smjera djelovanja rezultante sila, koje se s ležajnog prstena prenose na valjno tijelo.

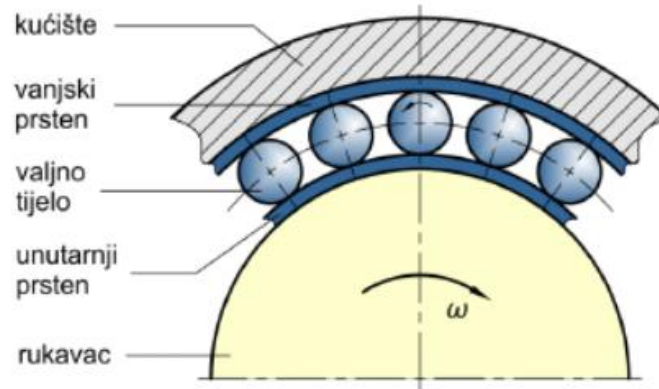
- radijalne ($0^\circ < \alpha < 45^\circ$)
- aksijalne ($45^\circ < \alpha < 90^\circ$)

3. obliku valjnih tijela:

- kuglasti
- valjni
- stožasti
- bačvasti
- igličasti

3. Tribosustav valjnih ležajeva

Valjni ležajevi su sastavljeni od dva prstena, unutarnjeg i vanjskog ili ploče kod aksijalnog. Između ta dva prstena smještena su valjna tijela koja se nalaze u odgovarajuće oblikovanom kavezu. Između valjnih tijela djeluje trenje valjanja. Valjna tijela su jednostavnih geometrijskih oblika, vođena u kavezu, koji sprječava njihov međusobni dodir a istovremeno ih jednako raspoređuje po obodu. Tribosustav sustav valjnog ležaja sastoji se od kućišta, kaveza, vanjskog prstena, valjnog tijela, unutarnjeg prstena i rukavca (Slika 1.). [2]



Slika 1. Tribosustav valjnog ležaja [2]

Kavezi za valjna tijela omogućuju vođenja valjnih tijela po stazi, sprječavaju njihov međusobni dodir te omogućuju ravnomjernu raspodjelu valjnih tijela po obodu ležaja. S obzirom na izvedbu dijele se na limene, masivne te kaveze sa zaticima. [2]

Tu su i brtvene ploče koje sprječavaju oštećenje valjnog sustava nekim stranim tijelima (Slika 2.). Isto tako brtvene ploče sprječavaju izlaz maziva iz ležaja čime se ušteduje brtvljenje na drugim mjestima. Razlikuju se brtvene ploče s niskim faktorom trenja te kontaktne brtvene ploče. [2]



Slika 2. Dijelovi valjnog ležaja [2]

3.1. Materijali za izradu dijelova valjnih ležajeva

Unutarnji i vanjski prsten te valjna tijela izrađuju se iz središnjeg dijela ingota. Elementi se nakon oblikovanja kale, bruse i poliraju. Zahtjevna tvrdoća tih dijelova je 58 - 65 HRC- a. Dijelovi se najčešće izrađuju od čelika legiranih kromom (100Cr2, 100Cr6, 100CrMn6, 100 CrMo7, 100CrMnMo8). Za stožaste i valjkaste ležajeve većih dimenzija koriste se čelici za cementiranje (17MnCr5, 19MnCr5, 16CrNiMo6, 17NiCrMo1- 4). Za valjne ležajevi koji se koriste u agresivnom okolišu upotrebljavaju se nehrđajući čelici (X45Cr13, X102CrMo17, X89CrMoV18- 1). Kod ekstremno visokih temperatura upotrebljavaju se temperaturno postojani čelici (80MoCrV42- 16, X82WCrMoV6-5-4). Za izradu kaveza upotrebljavaju se mjed, plastična masa (poliamid), legure aluminija i štancani čelični lim. [10]

3.2. Trenje kod valjnih ležajeva

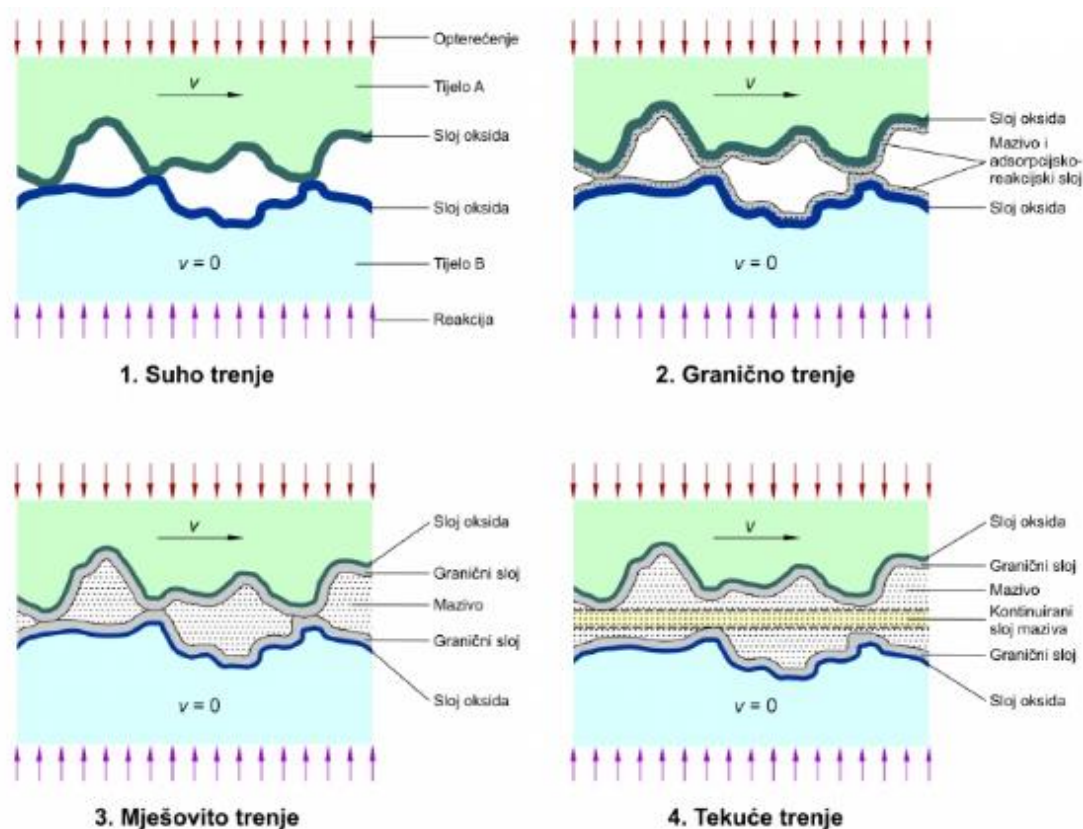
Valjni ležajevi rade na principu trenja valjanja. Važno je formiranje podmazivajućeg filma u odgovarajućim kontaktnim zonama valjnih tijela, prstenova i kaveza, tako da se kontakt između površina - što rezultira trenjem i trošenjem- smanjuje. [2]

Trenje je posljedica kemijskog i mehaničkog međudjelovanja tarnog para, odnosno ovisi o kemijskom sastavu i hrapavosti dodirnih površina. Razlikuju se dvije osnovne vrste trenja. A to je trenje mirovanja odnosno statičko trenje koje onemogućuje gibanje i trenje gibanja odnosno kinematičko trenje koje se nadalje dijeli na trenje klizanja i trenje valjanja. Kod ležajeva primarno značenje ima trenje gibanja. [5]

Prema stanju površina nalijeganja razlikujemo 4 osnovne vrste trenja (Slika 3.) [2]:

1. Suho trenje - nastaje kada između površina koje naliježu jedna na drugu nema dodirnog sloja odnosno maziva. Koristi se kod kočnica i tarnih spojki. Faktor trenje ovisi o vrsti i stanju površine a ne o brzini kao ni o veličini površine nalijeganja.
2. Granično trenje - nastaje kada su površine prekrivene tvrdim graničnim slojem maziva, oksida vlage i nečistoća, a dodiruju se samo u najizbočenijim točkama površinskih neravnina u kojima je isti granični sloj probijen.

3. Mješovito trenje - prijelazni je oblik između graničnog i tekućeg trenja u kojem se naliježuće površine dodiruju preko graničnih slojeva, a pritisak maziva još uvijek je nedostatan kako bi ih u potpunosti razdvojio.
4. Tekuće trenje - površine se ne dodiruju, a vrhove površinskih neravnina razdvaja kontinuirani sloj maziva



Slika 3. Vrste trenja obzirom na stanje naliježućih površina [2]

3.3. Podmazivanje valjnih ležajeva

U tribološkom sustavu valjnih ležajeva pojavljuju se velikokontaktne pritisci na površinama prstena i valjnih tijela uz niska opterećenja nastala djelovanjem sila klizanja između kontakata vajnih tijela i kaveza te kaveza i ležajnih prstenova. Stoga podmazivanje kod valjnih ležajeva ima manju važnost za nastanak kontaktnih pritisaka nego kod kliznih ležajeva te se dovoljno podmazivanje ostvaruje mastima i uljima u širokom rasponu

vrijednosti viskoznosti. Sloj maziva je važan kako bi se smanjilo trenje i trošenje, korozija i ostvarilo odvođenje topline trenja. Valjni ležajevi podmazuju se uglavnom mastima zbog jednostavnog brtvenja i laganog naknadnog podmazivanja. Razlikuju se tzv. mekane i tvrde masti. Mekane mast se koriste kada trenje u ležaju mora biti vrlo niskih vrijednosti, ako su potrebni mali pomaci namještanja ili ako pogonski stroj mora pretežno savladati trenje u ležajima. Kruće masti se primjenjuju ondje gdje mora biti što manja buka u radu ležaja ili gdje mazivo na izlazu vratila treba stvoriti vijenac za brtvenje, kako bi se spriječio ulazak prašine i nečistoća. Masti s dobrom prionjivošću koriste se tamo gdje postoji opasnost od izlaska masti iz ležaja. [7]

U konstrukcijama valjnih ležaja primjenjuje se nekoliko načina podmazivanja.

Najjednostavnija metoda podmazivanja je ona u uljnoj kupci gdje su valjna tijela do polovice uronjena u uljnu kupku, koja se primjenjuje kod niskih brzina vrtnje. Za srednje i velike brzine vrtnje primjenjuje se cirkulacijsko podmazivanje koje je isto tako primjereno za visoke temperature. Podmazivanje uljnom maglicom koristi se kod jako velikih brzina vrtnje ali nastoji se izbjegavati zbog štetnosti na okoliš. Isto tako podmazivanje brizganjem prikladno je za visoke brzine vrtnje a podmazivanje se vrši pomoću tlačne pumpe. Postoji i podmazivanje rasprskavanjem koje se obavlja pomoću specijalnih mlaznica ili ugrađenih rotirajućih strojnih dijelova. [7]

4. Kontaktna naprezanja

Kontaktna naprezanja nastaju na mjestu dodira dva elementa i uzajamno djeluju silom koja je okomita na dodirnu površinu. Dodirne površine malih su dimenzija te se zbog toga javljaju velika lokalna naprezanja. Kontaktni dodiri dijele se na nekonformne i konformne kontakte. Valjni ležajevi primjer su nekonformnog kontakta.

Nekonformni kontakt je kontakt bez prisutnosti vanjskog opterećenja pri kojem se dva tijela dodiruju u jednoj točki ili duž linije. Ukoliko se pojavi vanjsko opterećenje kontakt se uslijed deformacija počinje širiti oko točke dodira. Ako se kontakt ostvaruje samo uz elastične deformacije dimenzije kontaktnog mjesta su male u odnosu na dimenzije tijela u kontaktu. Kontaktna naprezanja često su vrlo velika u neposrednoj blizini zone kontakta i smatraju se određenom vrstom koncentracije naprezanja te ih se može razmatrati neovisno o drugim naprezanjima.

Kod valjnih ležajeva važno je odrediti iznos najvećeg dodirnog pritiska kako bi se odredio vijek trajanja ležaja te iznos i položaj najvećeg smičnog naprezanja, jer upravo na tom mjestu postoji najveća opasnost od nastajanja potpovršinskih pukotina.

4.1. Vanjsko opterećenje valjnog ležaja

Kako su valjni ležajevi sastavljeni od više valjnih tijela tako se i vanjsko opterećenja, P , raspodjeljuje na veći broj valjnih tijela. Uz pretpostavku da je ležaj bez zračnosti i da sva valjna tijela imaju jednak promjer, sila se raspodjeljuje na ona tijela koja se nalaze ispod meridijanske ravnine. A najveća sila nalazi se upravo na onom valjnom tijelu koji se nalazi na pravcu djelovanja vanjskog opterećenja P . [2]

Iznos najveće sile može se izračunati prema izrazu [2]:

$$F_0 = \frac{P}{Z} k_0$$

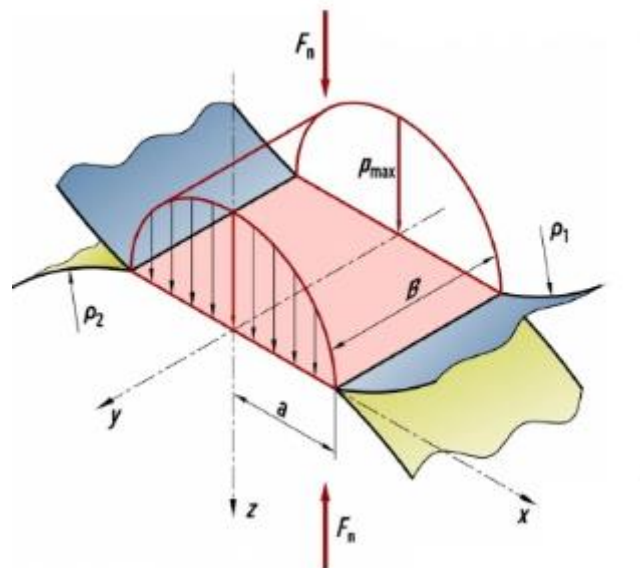
Pri čemu je Z ukupan broj valjnih tijela, P vanjsko opterećenje a k_0 faktor proporcionalnosti. k_0 za dodir u točki iznosi 5 a za dodir u liniji 4.

4.2. Pritisak na dodirnim plohama valjkastog valjnog tijela ležaja

Prema Hertzovom izrazu iznos najvećeg dodirnog pritiska između dva valjka iznosi [2]:

$$P_{\max} = \sqrt{\frac{F_n}{\pi \cdot \rho \cdot B \cdot \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right)}} \quad (1)$$

F_n predstavlja normalnu silu, B širinu dodira, E je Youngov modul elastičnosti a ρ srednji polumjer zaobljenja valjka.



Slika 4. Pritisak na dodirnim plohama dva valjka s paralelnim osima [2]

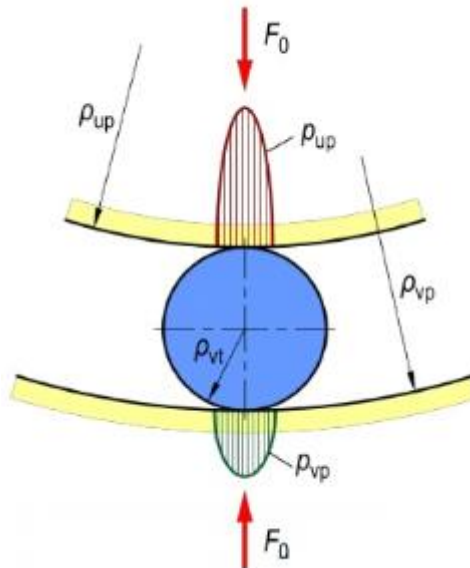
Kod valjkastog valjnog tijela ležaja sila F_n između najopterećenijeg valjnog tijela i unutarnjeg, odnosno vanjskog prstena ležaja iznosi [2]:

$$F_n = F_0 = k_0 \cdot \frac{P}{Z} \quad (2)$$

Uz pretpostavku da su valjna tijela te oba prstena valjnog ležaja izrađena iz čelika i imaju isti Poissonov faktor koji iznosi 0,3.

Hertzov izraz za određivanje najvećeg dodirnog pritiska valjkastog valjnog tijela i vanjskog, odnosno unutarnjeg prstena valjnog ležaja iznosi [2]:

$$p_{\max} = \sqrt{0,175 \cdot \frac{P \cdot E \cdot k_0}{Z \cdot B \cdot \rho}} \quad (3)$$



Slika 5. Pritisak na dodirnim plohama valjkastog valjnog tijela ležaja [2]

Srednji polumjer zaobljenja za dodir unutarnji prsten- valjno tijelo glasi, [2]

$$\rho = \frac{\rho_{up} \cdot \rho_{vt}}{\rho_{up} + \rho_{vt}} \quad (4)$$

a za vanjski prsten- valjno tijelo [2]

$$\rho = \frac{\rho_{vp} \cdot \rho_{vt}}{\rho_{vp} - \rho_{vt}} \quad (5)$$

4.2.1. Hertzov kontakt

Hertzov kontakt ima veliku primjenu u kontaknoj mehanici. Njime se uz zadovoljavajući stupanj točnosti u praksi može aproksimirati velik broj realnih nekonformnih problema. Kako bi neki kontakt bio Hertzov kontakt treba zadovoljavati sljedeće uvjete:

- Površine tijela u kontaktu neprekidna su funkcija prostornih koordinata do treće derivacije

- Profili kontaktnih površina tvore nekonforman kontakt
- Tijela su homogena i izotropna, a pomaci i deformacija mali
- Naprezanja i deformacije u tijelima u kontaktu se razmatraju na način da se svako tijelo odvojeno promatra kao elastični poluprostor na kojeg djeluje rezultirajući kontaktni pritisak
- Površine se smatraju idealno glatkima (nema trenja između njih)

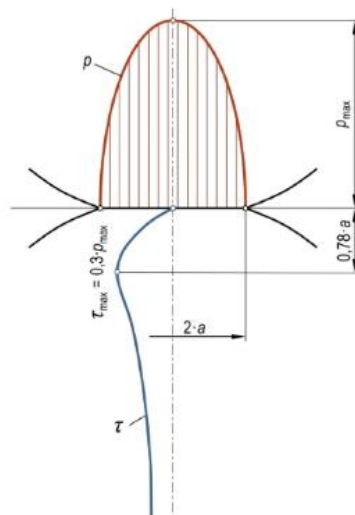
Raspodjela kontaktnih pritisaka uvijek su eliptična i na rubu kontaktne površine kontaktni pritisci poprimaju vrijednost nula.

4.3. Oštećenje ležaja uslijed zamora materijala

Zbog koncentracije naprezanja kojeg izazivaju dodirni pritisci na mjestima najvećih smičnih naprezanja τ_{\max} , zbog zamora materijala nastaje pitting.

Najveće smično naprezanje računa se prema izrazu [2]:

$$\tau_{\max} = 0,3 \cdot p_{\max} \quad (6)$$



Slika 6. Najveće smično naprezanje [2]

Najveće smično naprezanje javlja se ispod površine i prve pukotine ili rupice nastaju na mjestu koje nije vidljivo. Ako se postupcima površinskog kaljenja ili toplinsko kemijskom

obradom nastoji produljiti životni vijek valjnog ležaja mjesto pojave najvećeg smičnog naprezanja treba biti u difuzijskoj zoni na dubinama manjim od efektivne dubine površinskog kaljenja, nitriranja ili cementiranja.

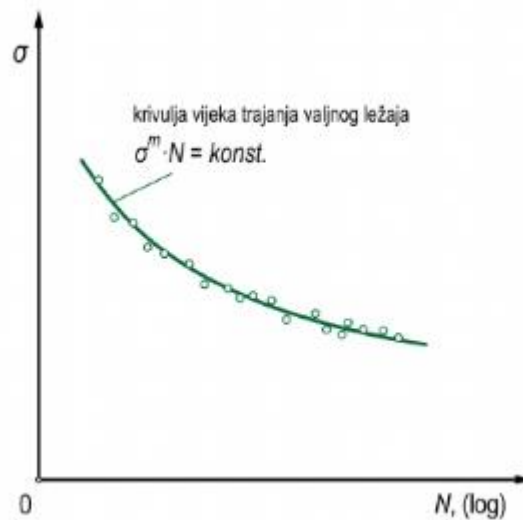
4.4. Vijek trajanja valjnog ležaja

Vijek trajanja valjnog ležaja definira se kao broj okretaja N jednog ležajnog prstena u odnosu na drugi prsten valjnog ležaja prije prve pojave znaka zamora u materijalu jednog ležajnog prstena. [2]

Krivulja vijeka trajanja (Slika 7.) utvrđena je eksperimentalno, a može se aproksimirati prema jednadžbi [2]:

$$\sigma^m \cdot N = konst, \quad (7)$$

gdje je σ normalno naprezanje, a N broj okretaja valjnog ležaja.



Slika 7. Krivulja vijeka trajanja valjnog ležaja [2]

Izjednači li se normalno naprezanje iz prethodne jednačbe s najvećim dodirnim pritiskom prema Hertzu dobiva se [2]:

$$\left(\sqrt{0,175 \cdot \frac{p \cdot k_0 \cdot E}{2 \cdot \rho \cdot B}} \right)^m \cdot N = konst. \quad (8)$$

Konstante se s lijeve prebace na desnu te se dobiva izraz

$$p^{\frac{m}{2}} \cdot N = konst. \quad (9)$$

odnosno uz supstituciju $\varepsilon = m/2$ izraz

$$P^\varepsilon \cdot N = konst., \quad (10)$$

gdje je ε eksponent vijeka trajanja i za ležajeve s teorijskim dodirom u točki iznosi 3, a za ležajeve s teorijskim dodirom u liniji 10/3.

Nadalje nazivni vijek trajanja ležaja L_{10} definira se kao vijek trajanja valjnog ležaja pri 90-postotnoj pouzdanosti, dok je dinamička nosivost valjnog ležaja C opterećenje nepromjenjive veličine koje valjni ležja može podnijeti pri nazivnom vijeku trajanja ležaja jednakom milijun okretaja. [2]

Iz definicija i jednadžbe (9) dobiva se izraz

$$P^\varepsilon \cdot L_{10} = C^\varepsilon \cdot 10^6. \quad (11)$$

Nazivni vijek trajanja u okretajima ležaja može se odrediti iz izraza (11)

$$L_{10} = 10^6 \left(\frac{C}{P} \right)^\varepsilon \quad (12)$$

dok je nazivni vijek trajanja u satima rada

$$L_{10h} = \frac{L_{10}}{60 \cdot n_m} = \frac{10^6}{60 \cdot n_m} \left(\frac{C}{P} \right)^\varepsilon, \quad (13)$$

Gdje je n_m brzina vrtnje ležaja u min^{-1} .

5. Modificiranje čelika EN 100Cr6

Čelik EN 100Cr6 pripada skupini niskolegiranih čelika koji se koristi i kao alatni i kao konstrukcijski čelik. Koristi se za izradu alata i kotrljajućih ležajeva zbog visoke otpornosti na trošenje i kontaktne pritiske (do 500 MPa). Čelik EN 100Cr6 sadrži od 1 do 1.5% ugljika i od 0,5 do 1.5% Cr (Tablica 1., Tablica 2.).

Tablica 1. Kemijski sastav čelika EN 100Cr6 proizvođača- Ovako (7)

| Varijanta čelika | C% | Si% | Mn% | P% | S% | Cr% | Ni% | Mn% |
|------------------|---------------|---------------|---------------|--------|-----------------|---------------|-------|-------|
| 803P | 0,98- 1,05 | 0,20- 0,35 | 0,25- 0,40 | -0,020 | 0,003- 0,008 | 1,35- 1,60 | -0,20 | -0,06 |

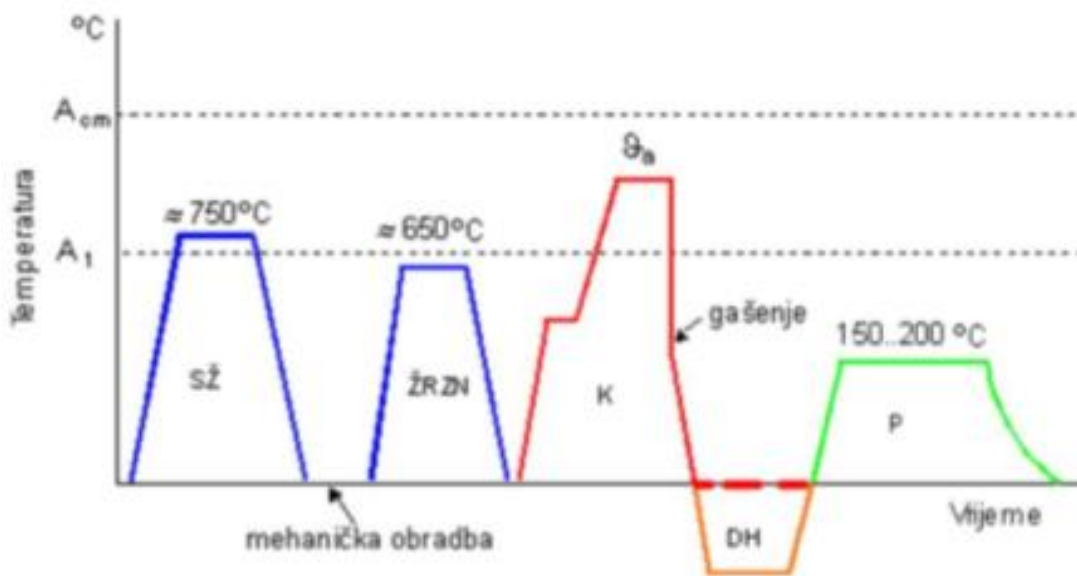
Tablica 2. Kemijski sastav čelika EN 100Cr6 proizvođača- IMS (8)

| C% | Si% | Mn% | Mo | Ni | Cr% | Ostali |
|---------------|---------------|---------------|----|----|---------------|--------|
| 0,95- 1,10 | 0,15- 0,35 | 0,25- 0,45 | - | - | 1,40- 1,60 | - |

5.1. Toplinska obrada čelika EN 100Cr6

Čelik 100Cr6 prije modificiranja nitriranjem treba biti poboljššan. Čelik se uobičajeno kali i popušta na temperaturama koje su više za 30 °C od temperature nitriranja. Čelik je nadeutektoidnog sastava te nakon kaljenja postiže mikrostruktura martenzita (M), kromova karbida (Fe_2Cr)₃C i zaostalog austenita koji se eliminira dubokim hlađenjem ili visokotemperaturnim popuštanjem.

Toplinska obrada čelika EN 100Cr6 započinje sferoidizacijom na temperaturi između 760 i 800 °C. Nakon toga slijedi gruba obrada i žarenje za redukciju zaostalih naprezanja na temperaturi od oko 600°C. Niskolegirani čelici za hladni rad austenitiziraju se na temperaturi od 790 - 820°C odnosno 820 - 860°C (između linije A₁ i A_{cm}) uz jedno predgrijavanje na temperaturi od oko 550°C. Nakon čega slijedi gašenje u ulju ukoliko je debljina obratka manja od 30 mm. Čelici ove grupe mogu biti kaljeni i u vodi. Pri gašenju su dimenzijski stabilni ali osjeljivi su na razugljeničenje. Nakon kaljenja provodi se popuštanje na temperaturi između 150 – 200°C. Zaostali austenit je nepoželjan kod čelika koji su izloženi tlačnim naprezanjima u radu stoga se on eliminira dubokim hlađenjem na temperaturi od - 196°C. Čeliku EN 100Cr6 kaljenjem se povisuje tvrdoća a time i otpornost na trošenje.



Slika 8: Toplinska obrada čelika EN 100Cr6 [11]

Slika 8.

6. Nitriranje

Nitriranje je toplinsko- kemijska obrada površine. Površina se modificira difuzijom dušika. Ukoliko se površinski sloj obogaćuje i ugljikom govorimo o nitrokarburiranju. Sam postupak provodi se na temperaturama između 500 i 600°C u sredstvima koja otpuštaju dušik. Prije samog procesa nitriranja predmeti se podvrgavaju kaljenju te popuštaju na temperaturama većim od temperature nitriranja. Time se postiže sitnozrnata mikrostruktura koje olakšava difuziju dušika. Proces nitriranje može trajati do 100 sati. Postižu se dubine do 0,6 mm. Međutim zahtjevi za ovom najvećom dubinom nitriranja nisu uobičajeni u industrijskoj primjeni, zbog opasnosti od dobivanja porozne i krhke zone spojeva i neekonomičnosti postupka. [1]

Postupci nitriranja i nitrokarburiranja primjenjuju se na čelicima, čeličnim ljevovima, sivim ljevovima i titanijevim legurama. Za optimalnu primjenu nitriranja razvijena je posebna skupina čelika legirana aluminijem, kromom, molibdenom, vanadijem i volframom. Navedeni elementi tvore stabilne nitride dok molibden kao glavni nitridotvorac sprječava pojavu krhkosti. Spoj aluminija i dušika očvršćuje feritnu rešetku te na taj način sprečava gibanje dislokacija. Titan i krom povećavaju površinsku tvrdoću ali isto tako rastom njihovih udjela opada dubina nitriranja.

Nitriranje i nitrokarburiranje primjenjuje se tamo di želimo postići sljedeća svojstva:

- Poboljšana otpornost trošenju (prvenstveno adhezija)
- Povećanje tvrdoće u površinskom sloju
- Veća dinamička izdržljivost (manja osjetljivost na urez)
- Veća vlačna čvrstoća
- Veća granica razvlačenja
- Poboljšana otpornost na koroziju (osim kod nehrđajućih čelika)
- Postizanje površinske otpornosti na popuštanje (sve do temperature nitriranja)

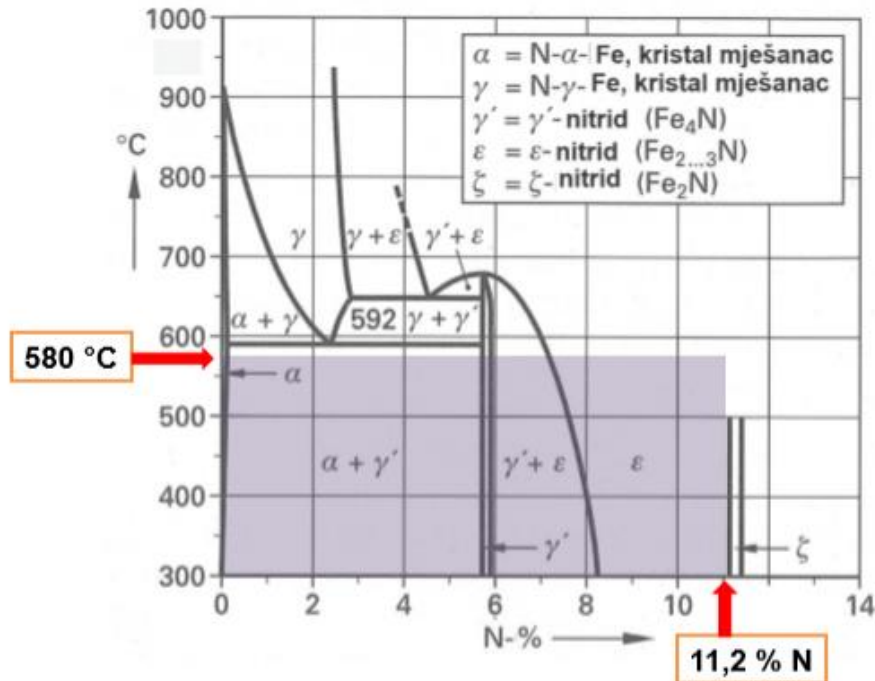
Glavna podjela postupaka nitriranja u literaturi se uobičajeno provodi prema aktivnom mediju koji je izvor dušika. Aktivni medij može biti plinoviti (ugljikovodici, endopljin), tekući (solne kupke npr. Tenifer), čvrsti (kalcijum cijanamid s aktivatorom) i ionizirane plinske atmosfere (NH_3 , N_2 , METAN). Svaki od navedenih medija daje drugačija svojstva i strukturu nitriranog sloja

Tablica 3. Pregled postupka nitriranja i osnovnih značajki [13]

| | Nitriranje u plinu | Nitriranje u plazmi | Nitriranje u solnoj kupci |
|---------------------------------------|--|--------------------------------------|---------------------------|
| Temperatura °C | 500- 550 | 350- 660 | 570- 580 |
| Trajanje postupka, h | 4- 100 | Nekoliko min. do više sati | 1- 3 (10) |
| Difuzija | N, (H) | N, (H) | N, C |
| Medij | NH_3 - plin+ N_2 i/ ili H_2 | N_2 ili H_3 - plin | Smjesa CH, CNO |

6.1. Izgled nitriranog sloja

Postupkom nitriranja dušik difuzijom ulazi u osnovni materijal i veže se s elementima tvoreći nitride. Nitridi povisuju površinsku tvrdoću i na taj način povisuju otpornost na trošenje. Vežanjem željeza i dušika nastaju željezni nitridi a tip nitrida prikazan je u Fe- N dijagramu (Slika 9.).



Slika 9. Dijagram stanja željezo- dušik [13]

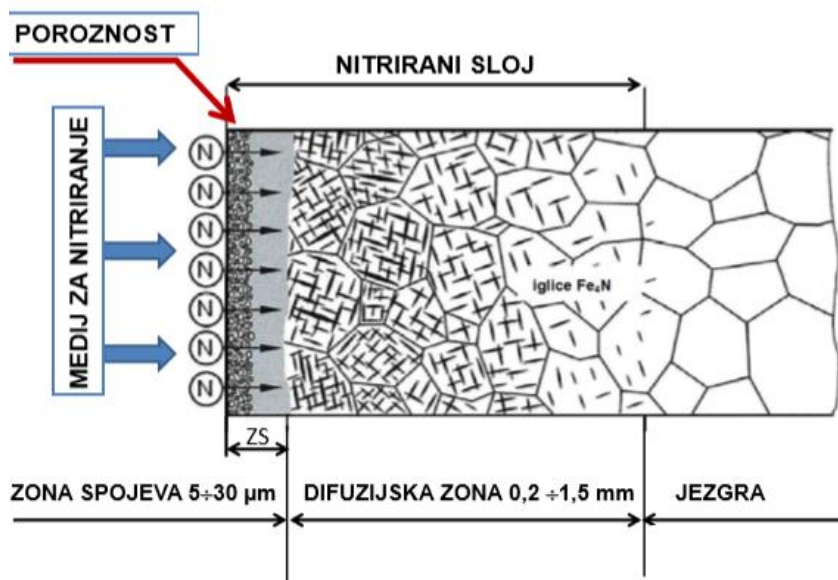
Temperature nitriranja niže su od linije A_1 stoga ne dolazi do austenitne transformacije. Iznad 590 °C stvaraju se krhki nitridi koji su ujedno i neupotrebljivi stoga se nitriranje provodi na temperaturama ispod 590°. Dijagram Fe - N prikazuje četiri tipa željeznih nitrida koji mogu nastati tijekom postupka nitriranja:

1. α željezni nitrid nastaje spajanjem željeza i intersticijskih atoma dušika
2. γ - željezni nitrid Fe_4 (FCC rešetka) udio dušika između 5.7 i 6.1%
3. ϵ - željezni nitridi (hekagonalna rešetka) udio dušika od 7.8% do 11.3% nastaju Fe_3N nitridi a od 11.3% nastaju nitridi Fe_2N
4. ζ - željezni nitridi Fe_2N (ortorombska rešetka) vrlo visoki udio dušika i vrlo krhka zona spojeva pa se rijetko primjenjuju

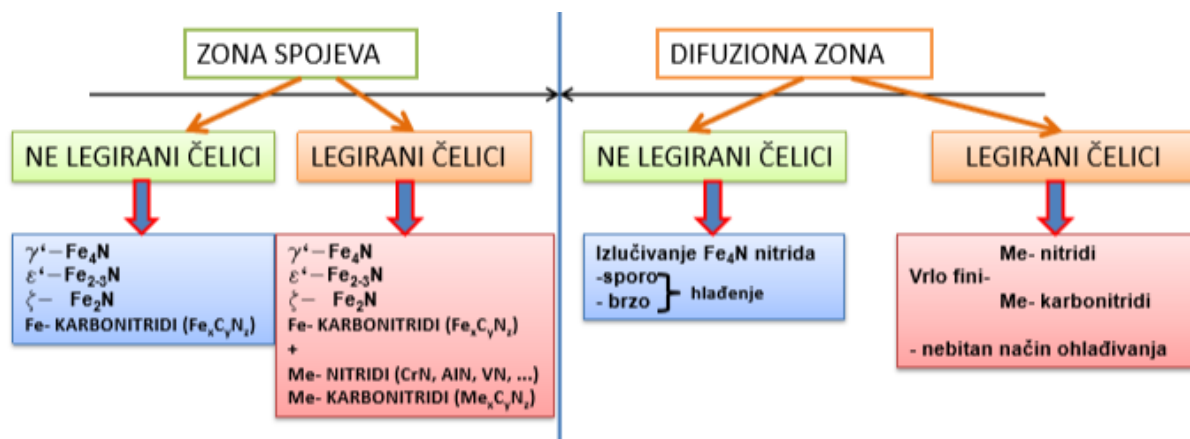
Površina dobivena nitriranjem sastoji se od zone spojeva i difuzijske zone (Slika 10.). Zona spojeva nalazi se na površini obratka dok se difuzijska zona nalazi ispod nje. Zona spojeva mjeri se od površine i debljine je oko 5 - 30 μm i sadrži 6 - 10% dušika u obliku nitrida i karbonitrida. U zoni spojeva moguća je prisutnost pora čija količina ovisi o vrsti

nitiranja i materijalu. Porozni dio zone spojeva obično je nepoželjan te se nakon postupka nitiranja otklanja. Moguće je provesti lepanje, superfiniš ili honovanje za uklanjanje poroznog djela ili brušenje za potpuno uklanjanje zone spojeva. Nakon zone spojeva slijedi difuzijska zona. Zona u kojoj dolazi do izlučivanja legiranih elemenata te zbog toga dolazi do značajnog povišenja tvrdoće u odnosu na osnovni materijal. Dubina difuzijske zone ovisi o trajanju i temperaturi procesa. Dužim trajanjem procesa kao i višom temperaturom moguće je dobiti deblje zone. Osim povišenja tvrdoće, difuzijsku zonu karakterizira i povišena dinamička izdržljivost, vlačna čvrstoća i granica razvlačenja. Otpornost na koroziju povećava se kod nelegiranih i niskolegiranih čelika, dok se ona kod nehrđajućih smanjuje.

Na slici 10 prikazan je shematski izgled nitiranog sloja, dok je na slici 11 prikazan sastav nitiranog sloja u zoni spojeva kao i u difuzijskoj zoni ovisno o legiranosti čelika.



Slika 10. Shematski prikaz nitiranog sloja



Slika 11. Sastav nitiranog sloja [13]

6.2. Dubina nitriranja i svojstva nitriranog sloja

Kao što je već spomenuto, svojstva i dubina nitriranog sloja ovisit će od temperaturi i vremenu nitriranja, kao i o osnovnom materijalu.

Tablica 4 prikazuje postizive dubine nitriranog sloja ovisno o tipu materijala u solnim kupkama (cijanidima).

Tablica 4. Prikaz postizive dubine nitriranja u solnoj kupci

| MATERIJAL | DUBINA NITRIRANOG SLOJA |
|---------------------------------------|-------------------------|
| Ugljični i niskolegirani čelici | 4- 30 μm |
| Alatni i kalupni čelici | 4- 30 μm |
| Brzorezni čelici | - 30 μm |
| Korozijski i toplinski otporni čelici | 4- 30 μm |
| Praškasti | 4- 30 μm |
| Lijevovi | 4- 30 μm |

Nitrirani slojevi imaju bolju otpornost na koroziju i štite osnovni materijal od djelovanja octene, fosfatne i klorne kiseline. Ispitivanje korozijske postojanosti određuje se u slanim komorama gdje se otopina natrijevog klorida raspršuje u obliku maglice ili elektrokemijskom metodom gdje se uspoređuje gubitak mase. Kod čelika otpornih na koroziju dolazi do smanjenja otpornosti zato što se dio kroma veže s dušikom i dolazi do osiromašnja kroma na površini osnovnog materijala.

Nitrirani slojevi također pokazuju visoku otpornost na trošenje pri čemu se najveći udio povišenja otpornosti na trošenje odnosi na djelovanje zone spojeva. Visoka otpornost na trošenje posljedica je stvaranja određenih vrsta nitrida. Heksagonalna rešetka ϵ - faze pokazuje inkompatibilnost prema drugim oblicima kristalnih rešetki te se u triboparovima s npr. FCC ili BCC rešetkama postiže visoka otpornost na adhezijsko trošenje.

Za razliku od kaljenja, metode kojom se također žele postići više tvrdoće u odnosu na osnovni materijal, nitriranjem ne dolazi do značajnih deformacija predmeta ako je prethodno optimalno kaljen i popušten. Temperature nitriranja čelika (između 450 i 580 °C), su

uobičajeno niže od temperature A_1 te ne dolazi do transformacije jezgre niti do promjene volumena predmeta. Zbog navedenog, nitriranje je pogodan postupak za čelike koji su osjetljivi na promjenu volumena kao i za predmete koji imaju uske tolerancije mjera.

Nitrirani i nitrokarburirani čelici imaju povećanu dinamičku izdržljivost zbog zajedničkog djelovanja visokih tlačnih naprezanja u površinskom sloju i povišenih čvrstoća. Postupak nitriranja uz povišenje tvrdoće (visoke tvrdoće i pri povišenim temperaturama) smanjuje koeficijent trenja i sklonost naljepljivanju. Nitrirani čelici su također su postojani pri povišenim temperaturama (500- 550°C)

6.3. Plinsko nitriranje

Plinsko nitriranje je toplinsko- kemijski postupak u kojem disocijacijom amonijaka dušik difundira u površinu osnovnog materijala, pri temperaturama između 500 i 550°C u trajanju od 4 do 100 sati. U praksi postoje dva načina plinskog nitriranja. Prvi od njih je nitriranje u disociranom amonijaku, a drugi od njih je onaj u kojem se osim disociranog amonijaka upotrebljava i još neki plin ($\text{CO}_2, \text{CO}, \text{O}_2$, endo ili egzo plin). [15]

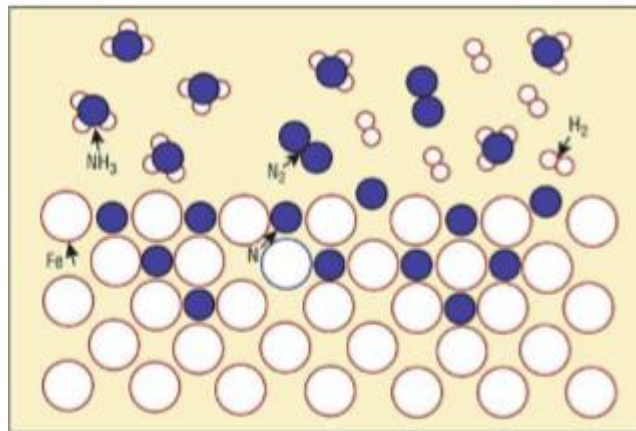
U slučaju u kojem se nitriranje provodi samo u disociranom amonijaku pretežno se dobivaju γ' - nitridi. Kako je ta zona vrlo krhka i tvrda, prije eksploatacije potrebno je skinuti tu zonu brušenjem. Ovom vrstom nitriranja postižu se vrlo duboke dubine nitriranja. [15]

Amonijak disocira u peći po jednadžbi [1]:



Tako dobiveni dušik ulazi u α - Fe, u početku čvrstu otopinu, kako bi se kasnije spojio u Fe_4N i difundirao u dubinu. U peći je potrebno konstantno dovoditi amonijak jer neiskorišteni dušik (N) prelazi u molekularno stanje (N_2). U slučaju nitriranja, gdje se osim amonijaka koriste i drugi plinovi, moguće je dobiti zonu spojeva koja se sastoji ϵ i γ' nitrida. Varijacijom različitih količina plinova moguće je dobiti nitridni sloj bez zone spojeva. Ovakvom vrstom nitriranja osim dušika, u osnovni materijal difundiraju kisik, kao i ugljik. Ovim načinom mogu se nitrirati svi čelici kao i lijevovi. Isto tako, postoje i dvije vrste plinskog nitriranja - jednostruko i dvostruko nitriranje. Jednostrukim nitriranjem postiže se vrlo krhki i čvrsti, dušikom bogati površinski sloj bijele boje. Dvostrukim nitriranjem smanjuje se debljina

bijelog sloja i postižu se veće dubine nitriranog sloja. Slika 12 prikazuje disocijaciju amonijaka i difuziju dušika u površinski sloj.



Slika 12. Shematski prikaz difuzije dušika [1]

Nitriranjem u plinu obratku se povisuje otpornost na trošenje, kontaktna čvrstoća i dinamička izdržljivost. Ta svojstva bitna su kod prstenastih ležajeva zbog izloženosti visokim dinamičkim naprežanjima kao i kontaktnim pritiscima.

6.4. Nitriranje u solnim kupkama

Nitriranje u solnim kupkama je termokemijski postupak kojim se obradak uranja u soli koje sadrže cijanide (NaCN) s kalcijevim cijanatom (KCNO). Ovaj postupak jedan je od najjednostavnijih i najraširenijih postupka toplinske obrade. Postupak se može provoditi ili u ručnim ili u potpuno automatiziranim postrojenjima. [15]

Najuobičajeniji postupak nitriranja u solnim kupkama je TENIFER.

Kod TENIFER postupka kupka treba sadržavati od 2 do 4% kalijeva cijanida (KCN) i oko 36% kalcijeva cijanata, dok sadržaj željeza (onečišćivač) u solnoj kupci ne smije biti veći od 0, 2%. Ukoliko željeza ima više od 0, 2% kupke je potrebno odmuljiti. [15]

Samo proces nitriranja kreće od pregrijavanja obratka u zračnoj atmosferi pri oko 400°C nakon čega se obradak uranja u solnu kupku koja je temperature 480 do 630°C. Solna kupka drži se u posebno izrađenom loncu od titana ili titanove legure. Tijekom cijelog postupka u kupku se upuhuje zrak radi održavanja potrebnog omjera cijanida i cijanata. Nakon što se

obradak drži u solnoj kupci koliko je potrebno (obično jedan do dva sata) on se vadi van i hladi u različitim medijima (zrak, dušik, voda, ulje, polimerne otopine), ovisno o debljini obratka i željenim svojstvima. Solne kupke iznimno su otrovne te rukovanje obratkom treba izvoditi uz velike zaštitne mjere. Prije odlaganja u okolinu treba provesti postupak neutralizacije vode koja se koristila za pranje dijelova, te neutralizaciju otpadnih soli i vezica za vezanje. [15]

TENIFER postupkom mogu se nitrirati svi čelici kao i lijevovi a zona spojeva nastala ovim postupkom pretežno se sastoji od ϵ - nitrida i vrlo je otporna na adhezijsko trošenje.



Slika 13. Postrojenje za nitriranje u solnim kupkama [13]

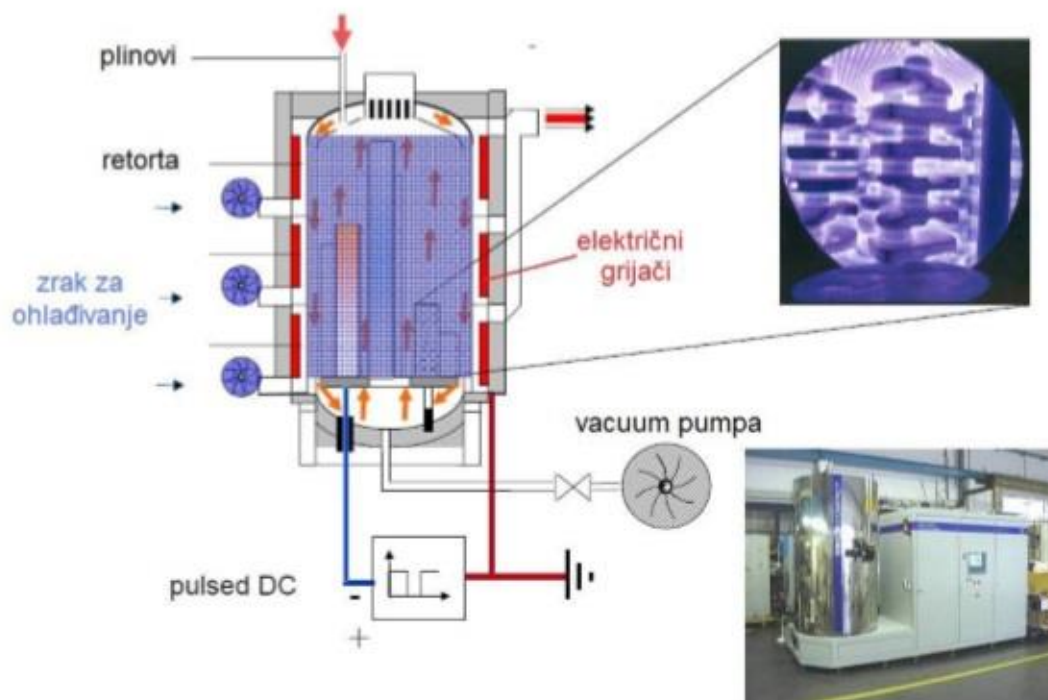
Postoji nekoliko vrsta TENIFER postupka s obzirom na obradu nakon samog postupka nitriranja. Kod TENIFER QP nakon ohlađivanja obradak se polira finim brusnim papirom te mu se skida dio poroznog sloja i na taj način smanjuje trenje. Razlikujemo i TENIFER QPQ postupak. Kod tog postupka provode se dva uranjanja u različite kupke gdje obradak oksidira te mu se na taj način povisuje korozivna otpornost. Prvo uranjanje provodi se odmah nakon ohlađivanja s temperature nitriranja u kupci AB1, nakon čega se obradak polira i ponovno uranja u kupku AB1 s ciljem da mu se dodatno povisi otpornost na koroziju.

6.5. Nitriranje u plazmi

Nitriranje u plazmi je termokemijski postupak koji se provodi na temperaturama od 350 do 660 °C (najčešće 500 - 550 °C). u vremenu od 5 do 40 sati, u pećima koje su ispunjene dušikom (N₂) ili amonijakom (NH₃), pod niskim tlakom (2 do 10 Pa). Ukoliko se radi o nitrokarburiranju osim dušika ili amonijaka u smjesu se dodaje ugljikov dioksid (CO₂) ili plinovita smjesa ugljikovodika, najčešće metan (CH₄). [16]

Molekule plina dovode se u komoru te pod visokim naponom (400 - 1200V) disociraju i ioniziraju. Nastali ioni dušika pod djelovanjem elektrostatskog polja udaraju u površinu obratka velikom brzinom. Pod djelovanjem kinetičke energije dolazi do zagrijavanja predmeta i izbijanja atoma. Izbijeni atomi željeza vežu se s visokoreaktivnim atomima dušika stvarajući željezne nitride koji se talože na površinu obratka. [16]

Slika 14 prikazuje peć u kojoj se vrši plazmatsko nitriranje u kojoj oplošje peći djeluje kao anoda, dok obradak koji se nitrira predstavlja katodu.



Slika 14. Peć za plazmatsko nitriranje [16]

Nitriranjem u plazmi može se postići zona spojeva s ϵ - nitridima bez pora ili sa slabom poroznošću smjesa ϵ i γ' . Isto tako, može se dobiti nitridni sloj bez zone spojeva, samo difuzijska zona s γ' - nitridima. Zona koja je vrlo tvrda, ali i relativno žilava.

Nitriranje u plazmi je najnovije razvijen postupak nitriranja i kao takav ima brojne prednosti pred nitriranjem u solnim kupkama i plinskim nitriranjem. To su: [16]

1. Kraća vremena nitriranja (ekonomičnije)
2. Široke mogućnosti variranja parametara, a time i dobivanje različitih svojstva nitriranog sloja, lakša i preciznija kontrola parametara
3. Ekološki prikladan, za razliku od nitriranja u solnim kupkama di su kupke iznimno otrovne
4. Postupak je prikladan za dijelove i velikih i malenih masa
5. lakša automatizacija
6. Mogućnost nitriranja svih čelika i lijevova na bazi željeza
7. Mogućnost parcijalnog nitriranja
8. Manje deformacije
9. Mogućnost kontroliranja dubine nitriranog sloja

Postoje i nedostaci a to je prije svega iznimno skupa i složena oprema kao i poteškoće s homogenošću predmeta veće mase i kompliciranije geometrije.

Nitrirani dijelovi najčešće se primjenjuju za: [11]

1. rezne alate
2. dijelove motornih vozila (zupčanici, osovine, radilice)
3. alate za topli rad (prešanje, lijevanje, kovanje)
4. vodilice
5. dijelove pumpi (rotori, osovine)
6. alate za preradu polimera (ubrizgavanje)
7. dijelove u industriji precizne mehanike

7. Metode ispitivanja

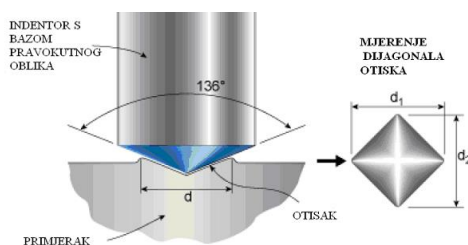
Prsteni valjnih ležajeva od čelika EN 100Cr6 nitrirani su trima različitim metodama, odnosno u različitim medijima. Nitrirani su u plinu, plazmi i solnoj kupci. U eksperimentalnom dijelu radu su napravljena ispitivanja mikrotvrdoće površine kako bi se odredila efektivna dubina nitriranja, otpornost na adhezijsko trošenje, mikrostrukturna analiza i površinska hrapavost.

7.1. Mikrotvrdoća površine

Za ispitivanje mikrotvrdoće korištena je metoda po Vickersu oznake HV. Tvrdoća po Vickersu je mjera otpornosti što ga neki materijal pruža prodiranjem indentora, koji je u ovom slučaju četverostrana dijamantna piramida s vršnim kutom 136° , opterećen silom $F(N)$. Utiskivanjem indentora ostavlja se trag u materijalu oblika kvadrata. Osnovni princip je mjerenje obje dijagonale kvadrata i uzimanje srednje vrijednosti zbog nesavršenosti uzorka ili iskrivljenog oblika kvadrata. Indentor se opterećuje silom koja za isti materijal može biti različita, a vrijeme opterećenja za čelik kreće se od 10 do 15 sekundi. Ovom metodom mogu se ispitivati i meki i tvrdi materijali. Tvrdoća ne ovisi o primijenjenoj sili zbog same geometrije utiskivanja. Metoda je vrlo precizna te je moguće mjeriti tvrdoću pojedinih kristalnih zrna. Prije mjerenja potrebna je metalografska priprema uzorka što se smatra nedostatkom ove metode, kao i upotreba mjernog mikroskopa za mjerenje veličine otiska.



a)



b)

Slika 15. Ispitivanje mikrotvrdoće po Vickersu: a) uređaj koji je korišten pri ovom ispitivanju, b) izgled indentora i otiska

Mjerenjem tvrdoće uzorka moguće je odrediti efektivnu dubinu nitriranja. Efektivna dubina nitriranja je okomita udaljenost od površine obratka do dubine na kojoj tvrdoća iznosi 50 HV više od tvrdoće jezgre.

7.2. Ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje

Metoda korištena prilikom ovog ispitivanja je metoda prizme po prstenu. Ispitivanje se provodi po normi ASTM G77. Sustav se sastoji od rotirajućeg ispitnog prstena koji je opterećen zadanom silom $F(N)$, preko stacionarnog ispitnog uzorka, bloka (Slika 16.). Trag trošenja koji nastaje prilikom ispitivanja je linija na rotirajućem prstenu (slika 17.). Ispitivanje se provodi dok se ne postigne zadani broj okretaja prstena ili dok se ne postigne zadano vrijeme ispitivanja. Blok je povezan oprugom koju je prije početka ispitivanja potrebno kalibrirati. Prilikom ispitivanja prati se otklon kazaljke svakih 10 sekundi. Cilj je dobiti koeficijent trenja čelika EN 100Cr6. Koeficijent trenja izračunava se iz sile trenja koja je podijeljena sa silom opterećenja na prsten. Sila trenja izračunava se iz otklona kazaljke i konstante opruge. Ovom metodom određuje se i kompatibilnost materijala za rad u kliznom paru. Tada se rezultat prikazuje kao gubitak volumena i za ispitni uzorak (blok) i za prsten. Materijal koji je otporniji na trošenje imat će manji gubitak volumena. Također, moguće je ispitivati maziva te se tada temperatura ispitnog uzorka mjeri korištenjem termopara koji je postavljen u posebnu udubinu u ispitnom uzorku. [8]

Ovom metodom prilikom ispitivanja mjeri se: [8]

- gubitak mase ispitne prizme
- širina traga trošenja
- sila trenja
- izdržljivost mazivnog filma



Slika 16. Uređaj korišten prilikom ispitivanja otpornosti na adhezijsko trošenje



Slika 17. Izgled traga trošenja nastalog metodom prizma na prsten

7.3. Metalografsko ispitivanje

Metalografska analiza daje informacije o sastavu materijala, mikrostrukturnim fazama, veličini zrna, homogenosti mikrostrukture i sastava, strukturi i debljini prevlake, nepravilnostima, pukotinama i slično.

Metalografska priprema uzorka kreće od izrezivanja reprezentativnog dijela obratka (prstena valjnog ležaja). Uzorak je potrebno rezati tako da se zahvati i jezgru i nitrirani sloj. Prilikom rezanja uzorak se hladi vodom kako ne bi došlo do prevelikog zagrijavanja, što može rezultirati promjenom strukture. Tako izrezani uzorak zalijeva se u polimernu masu radi lakšeg rukovanja. Uzorak u polimernoj masi se brusi kako bi se otklonile nepravilnosti nastale rezanjem te sloj oksida i nečistoća. Brušenje se provodi na uređaju za brušenje s brusnim papirom. Brušenje kreće od grubljeg zrna prema finijem (Slika 18.).



Slika 18. Uređaj za brušenje

Nadalje, uzorak je potrebno polirati kako bi se otklonili tragovi brušenja. Poliranje se vrši na uređaju pomoću dijamantne paste (Slika 19.).



Slika 19. Uređaj za poliranje

Tako polirani uzorak potrebno je nagrčiti kako bi se vidjele pojedine mikrostrukturne faze. Sredstvo nagrčivanja bira se obzirom na efekt koji se želi postići. U ovom slučaju nagrčivanje je provedeno nitalom (3% - tna otopina klorovodične kiseline u etilnom alkoholu). Nagrčivanje traje svega nekoliko sekundi. Nakon nagrčivanja uzorak je spreman za promatranje na svjetlosnom mikroskopu (Slika 20.).



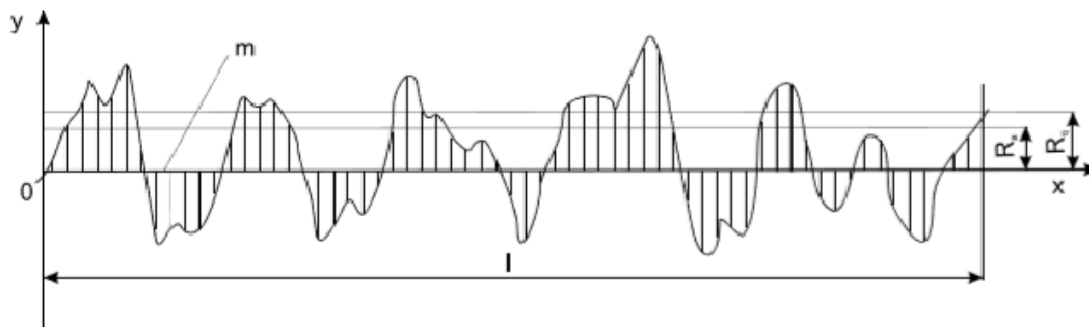
Slika 20. Svjetlosni mikroskop (Olympus GX51)

7.4. Hrapavost površine

Hrapavost površine definira se kao mikrogeometrijska nepravilnost površine koja je nastala prilikom obrade. Hrapavost površine bitno utječe na radna svojstva strojnih dijelova, a to je najbolje vidljivo na mjestima na kojima se spajaju pojedini elementi. Strojni dijelovi s manjom hrapavošću imaju veću dinamičku čvrstoću, otpornost na koroziju, bolje prenose toplinu i imaju veću sposobnost nalijeganja. [4]

7.4.1. Osnovni pojmovi hrapavosti

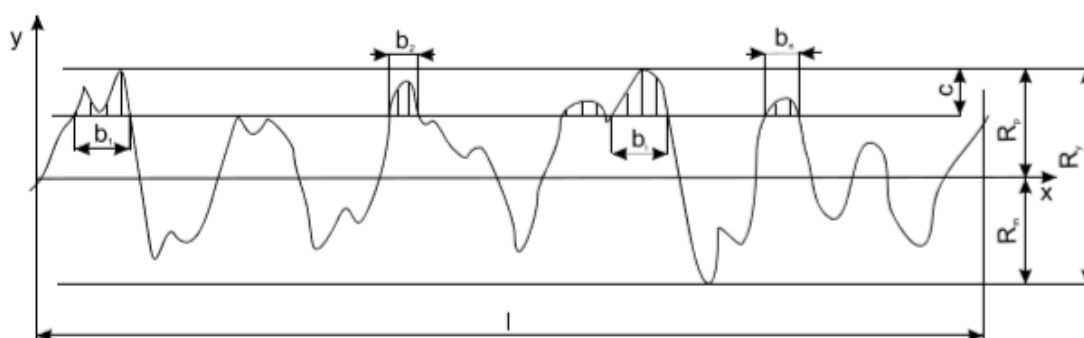
Izgled površine prikazuje se u dvije dimenzije u obliku profila hrapavosti, p , odnosno presjek s ravninom okomitom na promatranu površinu (Slika 21.). Profil hrapavosti promatra se na referentnoj duljini, l , dogovorenoj duljini obzirom na vrstu i finoću obrade te mjernoj metodi. [8]



Slika 21. Referentna duljina profila, l , srednje aritmetičko odstupanje profila, R_a , srednje kvadratno odstupanje, R_q [8]

Osnovni pojmovi: [8]

- m - srednja linija profila - linija koja siječe profil p tako da je, u granicama referentne duljine l , zbroj kvadrata udaljenosti y svih točaka profila od srednje linije minimalan
- R_a - srednje aritmetičko odstupanje - srednja aritmetička vrijednost apsolutnih vrijednosti profila y u granicama referentne duljine l
- R_q - srednje kvadratno odstupanje - srednja kvadratna vrijednost apsolutnih vrijednosti profila y u granicama referentne duljine



Slika 22. Najveća visina profila, R_y , najveća visina izbočine, R_p , najveća dubina izbočine, R_m [8]

- R_p - najveća visina izbočine profila
- R_m - najveća dubina izbočine profila

- R_y - najveća visina profila - razmak između dva pravca, paralelna sa srednjom linijom profila, u granicama referentne duljine, koji dotiču najvišu odnosno najnižu točku profila p (Slika 22.)
- R_z - prosječna visina neravnina - srednja vrijednost apsolutnih vrijednosti 5 najviših izbočina i 5 najdubljih udubina u granicama referentne dubine l

Eksperimentalni dio

8. Plan pokusa i priprema ispitnih uzoraka

Čelik EN 100Cr6 standardni je materijal za izradu prstenova valjnih ležajeva. Metodama nitriranja promijenjena je struktura, a time i svojstva čelika. U eksperimentalnom djelu rada provedena su ispitivanja za svaku od metoda nitriranja. Prstenovima je mjerena tvrdoća, hrapavost površine, otpornost na adhezijsko trošenje te su uzorci prstena metalografski pripremljeni i analizirani pod svjetlosnim mikroskopom.

Proizvođač prstena valjnog ležaja je NTN oznake 1R30X35X17. Iz oznake su vidljive dimenzije prstena čiji je vanjski promjer 35 mm, unutarnji 30 mm a debljina 17 mm. Prsten je isporučen u poboljšanom i fino brušenom stanju (obodno brušenje). Nitriran je u plinu, solnoj kupci (TENIFER) i plazmi (Slika 23.).

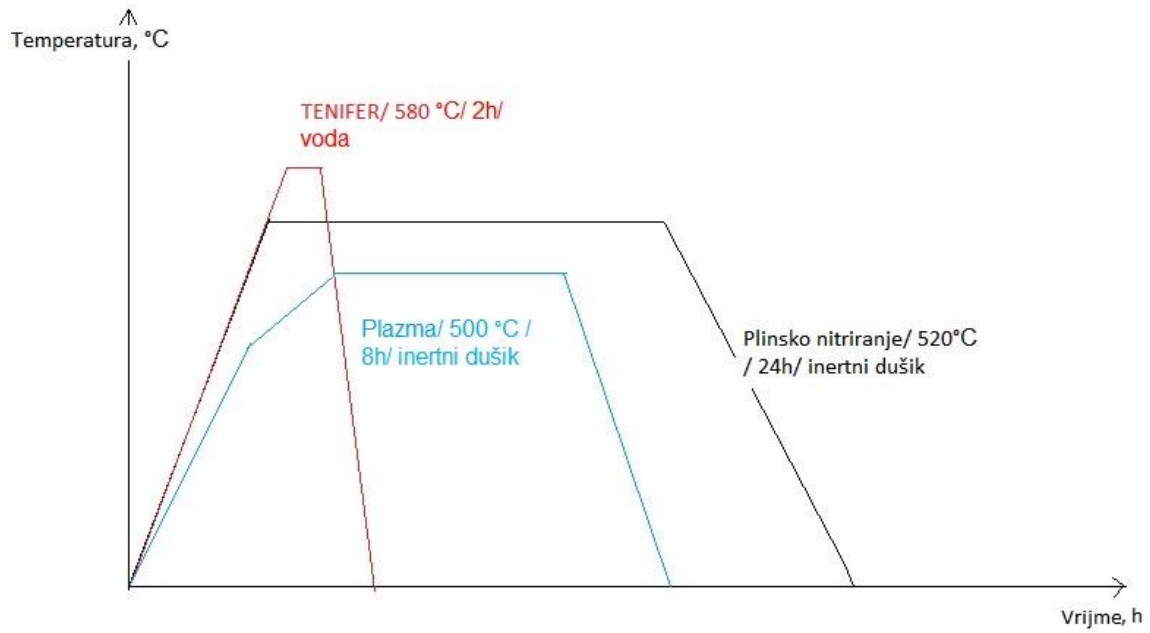
Nitriranje u plinu provedeno je na temperaturi od 520°C u trajanju od 24 sata. Plinovi koju su bili prisutni za vrijeme nitriranja su dušik (N₂) i amonijak (NH₃). Prsten je hlađen u dušiku.

Metoda nitriranja u solnoj kupci je TENIFER. Prsten je nitriran na temperaturi od 580°C u trajanju od 2 sata i potom hlađen u vodi.

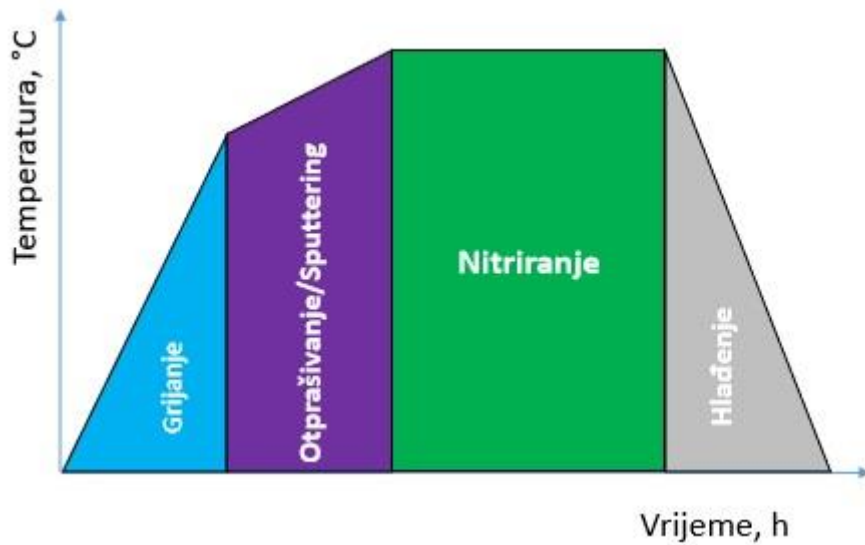
Parametri nitriranja u plazmi dani su u tablici 5, a tijek procesa prikaza je na slici 24.

Tablica 5. Parametri nitriranja u plazmi

| Parametri | Grijanje | Otprašivanje | Nitriranje | Hlađenje |
|------------------|---------------------|--|---|---------------------|
| Temperatura °C | 20°C → 430°C | 430°C → 500°C | 500°C | 500°C → 20°C |
| Vrijeme, h | - | 2h | 6h | - |
| Tlak, mbar | 2 mbar | 2 mbar | 2 mbar | 2 mbar |
| Sastav atmosfere | 100% H ₂ | 87% H ₂ , 4% Ar, 9% N ₂ | 85% H ₂ , 5% Ar, 10% N ₂ | 100% N ₂ |
| Napon, V | - | 500 → 540 V | 560 V | - |
| Snaga plazme, W | - | 500 → 1000 W | 1800 W | - |



Slika 23. Dijagram postupaka nitriranja za obradu valjnih prstenova od čelika EN 100Cr6



Slika 24. Tijek procesa nitriranja prstena valjnog ležaja u plazmi

9. Rezultati ispitivanja

9.1 Hrapavost površine

Hrapavost površine je sveukupnost mikrogeometrijskih nepravilnosti na površini predmeta koje su uzrokovane postupkom obrade ili nekim drugim utjecajima (osnovni pojmovi hrapavosti dani su prema normi ISO 4287). Hrapavost površine 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. Dimenzije i oblik ticala moraju biti odabrani tako da ne utječu na rezultate mjerenja.

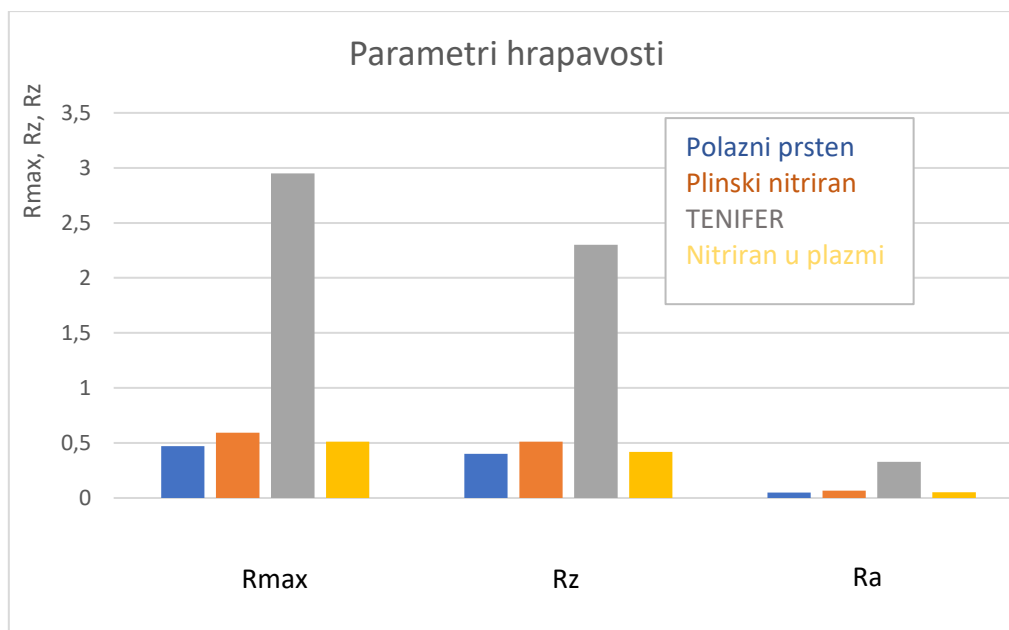
Ispitivanje hrapavosti provedeno je na fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za precizna mjerenja dužina.

Hrapavost površine određena je na polaznom prstenu, nitriranom u plinu, nitriranom u solnoj kupci (TENIFER) i nitriranom u plazmi. Za svaki od uzoraka napravljeno je 6 mjerenja izračunata je srednja vrijednost. U donjoj tablici 6, dani su rezultati za srednje aritmetičko odstupanje (R_a), prosječnu visinu neravnina (R_z) i najveću visinu neravnina (R_{max}), te profili hrapavosti, a ostali podaci nalaze se u dodatku.

Tablica 6. Vrijednosti parametara hrapavosti za ispitivane prstenove valjnog ležaja

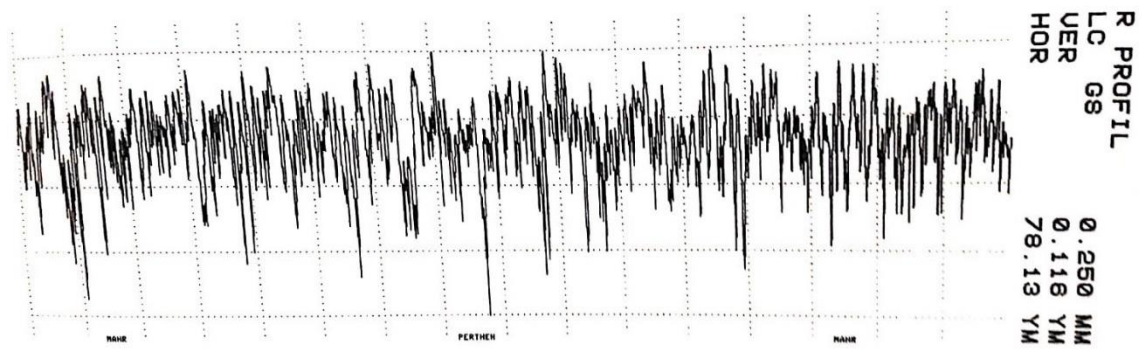
| Parametri hrapavosti | Polazni prsten | Plinsko nitriran | TENIFER | Nitriran u plazmi |
|-------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| R_{max} , (μm) | $0,470 \pm 0,059$ | $0,593 \pm 0,049$ | $2,950 \pm 0,290$ | $0,513 \pm 0,075$ |
| R_z , (μm) | $0,400 \pm 0,039$ | $0,513 \pm 0,021$ | $2,301 \pm 0,246$ | $0,418 \pm 0,056$ |
| R_a , (μm) | $0,050 \pm 0,003$ | $0,066 \pm 0,002$ | $0,330 \pm 0,023$ | $0,052 \pm 0,003$ |

Slika 25 pokazuje kako je nitriranje u plazmi najmanje utjecalo na promjenu hrapavosti, skoro da uopće i nije. Postupkom TENIFER hrapavost površine znatno se povisila, Rz je za više od 5 puta veći od polaznog stanja. Takvo povećanje nije poželjno za prstenove valjnih ležajeva. Plinskim nitriranje parametar Rz se povećao tek za 1,3 puta što je prihvatljivo za industrijsku primjenu.

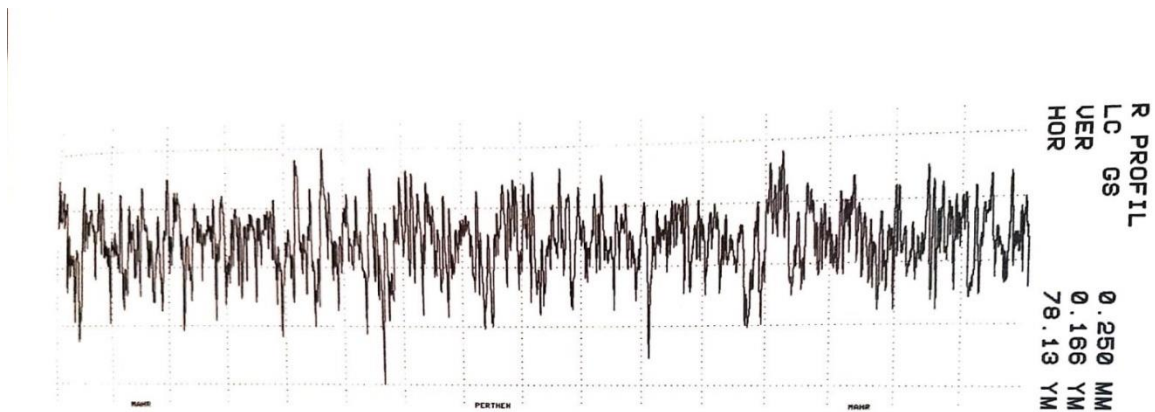


Slika 25. Usporedba parametra hrapavosti

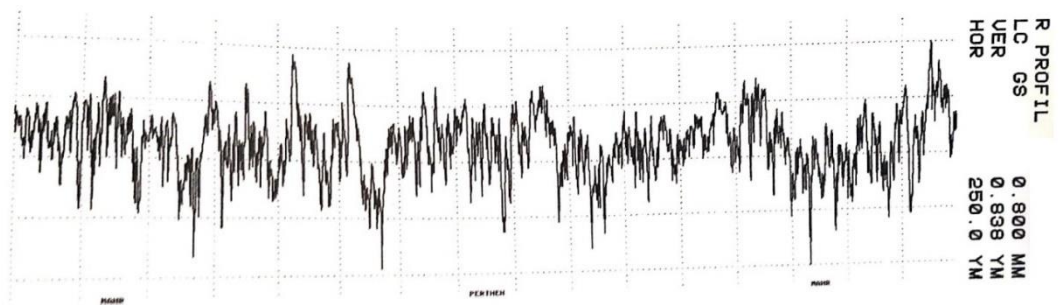
Na slikama od 26 do 29 prikazani su profili hrapavosti za sve ispitane uzorke. Profil hrapavosti za prsten nitriran u plinu (Slika 27.) ima nešto više brjegova za razliku od polaznog prstena (Slika 26.) . Polazni prsten (Slika 26.) fino je brušen te zbog toga ima više dolova nego brjegova. Na profilu hrapavosti prstena nitriranog postupkom TENIFER (Slika 28.) ima najviše poroznosti (širi dolovi) što je za ovaj način nitriranja uobičajeno. Na profilu hrapavosti za prsten nitriran u plazmi (Slika 29.) površina je najzaglađenija i brjegovi su ujednačeni, što je rezultat primjene procesa otprašivanja (eng. sputtering) prije nitriranja.



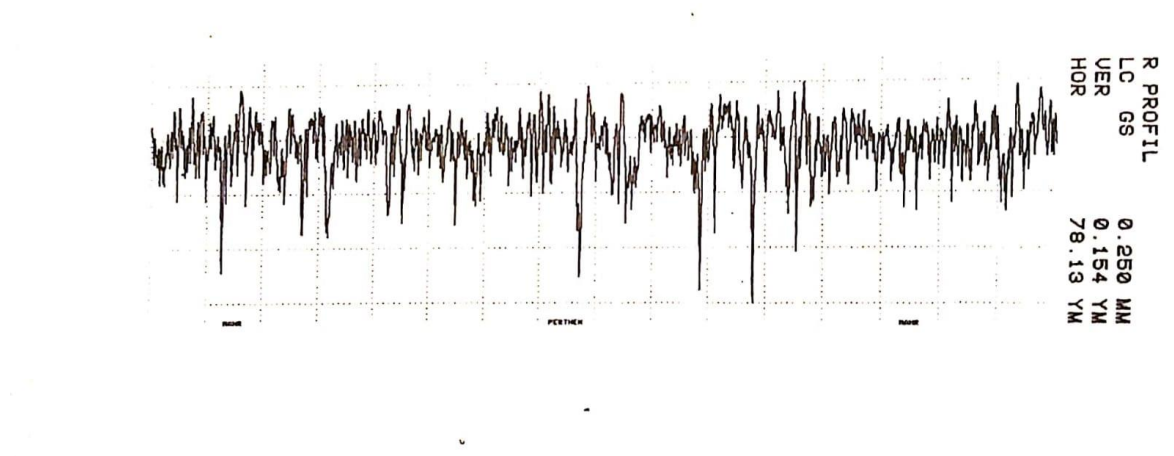
Slika 26. Profil hrapavosti za polazni prsten



Slika 27. Profil hrapavosti za prsten nitriran u plinu



Slika 28. Profil hrapavosti TENIFER



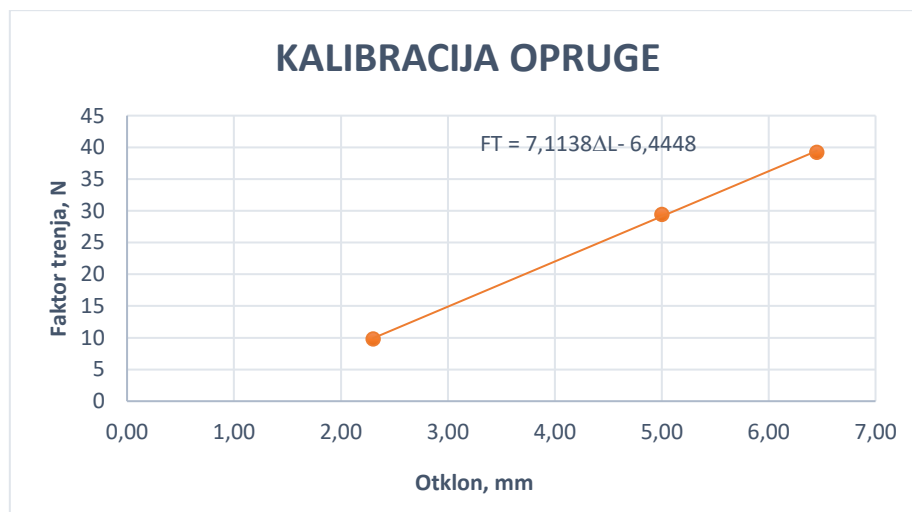
Slika 29. Profil hrapavosti za prsten nitriran u plazmi

9.2. Ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje

Za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje korištena je metoda „Blok na prstenu“. Ispitivanje je provedeno na polaznom prstenu, nitriranom u plinu, nitriranom u solnoj kupci i nitriranom u plazmi. Prije početka svakog ispitivanja provedena je kalibracija opruge kojom se određuje vrijednost sile trenja između bloka i ispitnog uzorka (prstena). Vrijednost sile trenja proporcionalna je otklonu savojne opruge na uređaju. Kalibracija opruge provedena je prije svakog ispitivanja prstena. Podaci o kalibraciji navedeni su u tablicama 7 do 9 i na slikama 30 do 33.. Iz omjera eksperimentalno određenih vrijednosti sile trenja FT i konstantne vrijednosti normalne sile $F_N = 68,67$ N određen je faktor trenja između bloka i prstena nakon svakih 10 s trošenja. Za sve pokuse trošenja korišten je isti blok dimenzija 7x7x10 mm izrađen od austenitnog čelika EN X5CrNi18-10 s tankom prevlakom PACVD TiN/TiCN debljine 3 mm. Zbog visoke tvrdoće i otpornosti na trošenje ove prevlake te malog opterećenja F_N tijekom ispitivanja na bloku nisu zamijećeni tragovi trošenja, dok su isti nastajali na ispitnim prstenovima. Prije svakog ispitivanja blok i prsteni su očišćeni u 95%-tnom etilnom alkoholu.

Tablica 7. Vrijednosti sile savijanja opruge u postupku kalibracije za polazni i prsten nitiran u plazmi

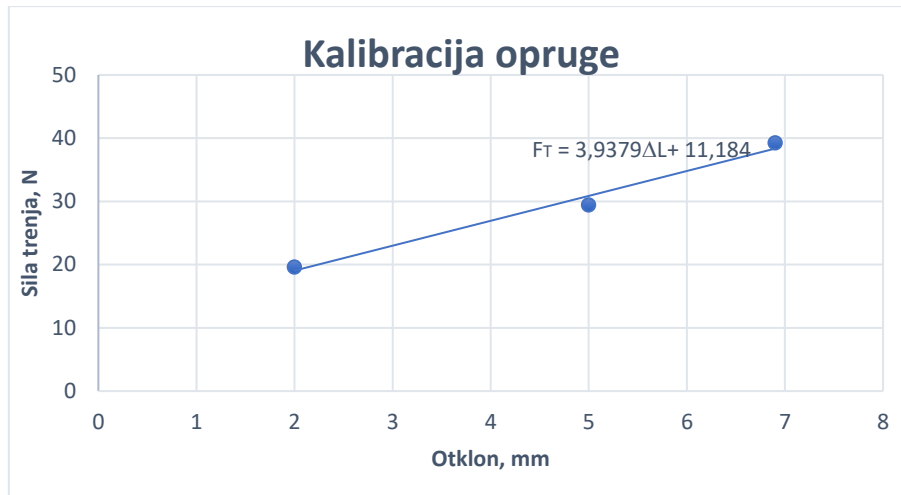
| ΔL , mm | F_T , N |
|-----------------|-----------|
| 2,30 | 9,81 |
| 5 | 29,43 |
| 6,45 | 39,24 |



Slika 30. Kalibracija opruge za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje polaznog prstena i nitiranog u plazmi

Tablica 8. Vrijednosti savijanja opruge u postupku kalibracije opruge za prsten nitiran u plinu

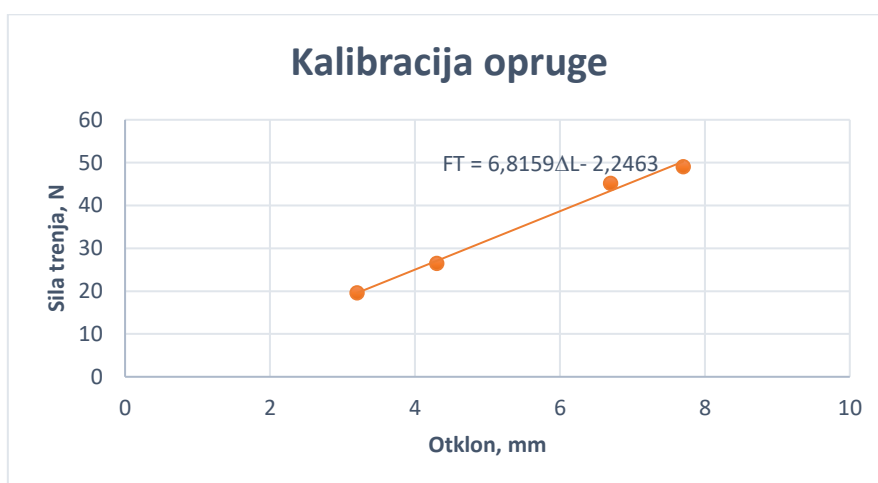
| ΔL , mm | F_T , N |
|-----------------|-----------|
| 2 | 19,62 |
| 5 | 29,43 |
| 6,9 | 39,24 |



Slika 31. Kalibracija opruge za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje prstena nitriranog u plinu

Tablica 9. Vrijednosti savijanja opruge u postupku kalibracije za prsten nitroran postupkom TENIFER

| ΔL , mm | F_T , N |
|-----------------|-----------|
| 3,2 | 19,62 |
| 4,3 | 26,487 |
| 6,7 | 45,126 |
| 7,7 | 49,05 |

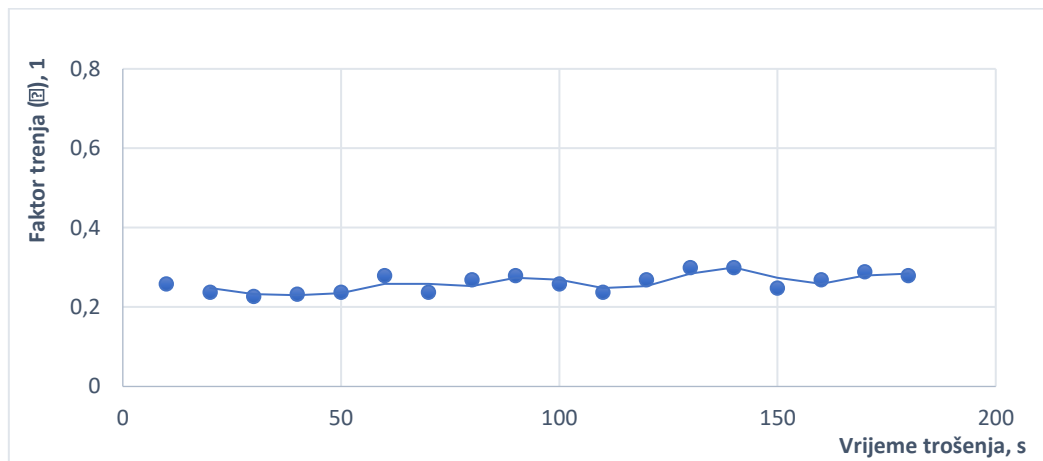


Slika 32. . Kalibracija opruge za ispitivanje otpornosti na adhezijsko trošenje prstena nitriranog postupkom TENIFER

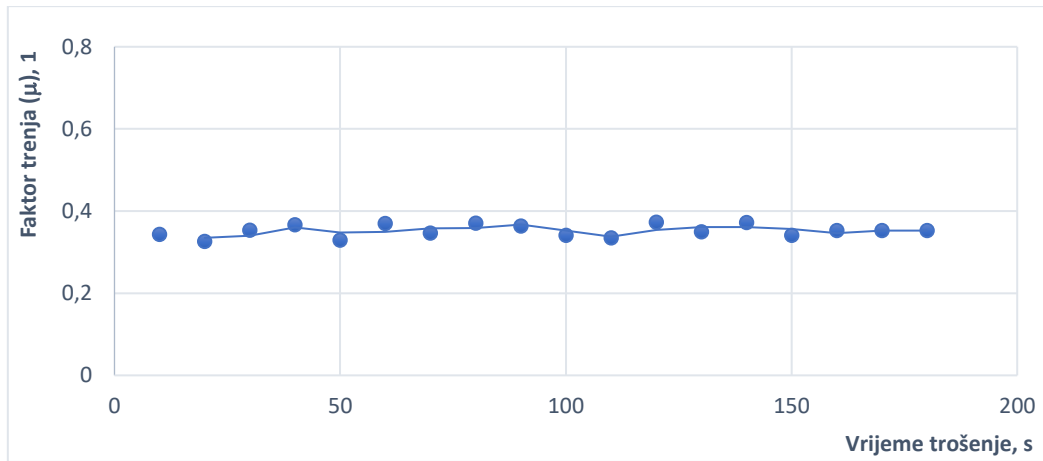
Nakon kalibracije svaki od prstenova ispitivan je 180 sekundi, a otklon kazaljke mjerne ure zabilježen je svakih 10 sekundi. Rezultati ispitivanja prikazani su u Tablici 10.

Tablica 10. Iznosi srednjih faktora trenja za svaki prsten pri normalnoj sili od 68,67 N

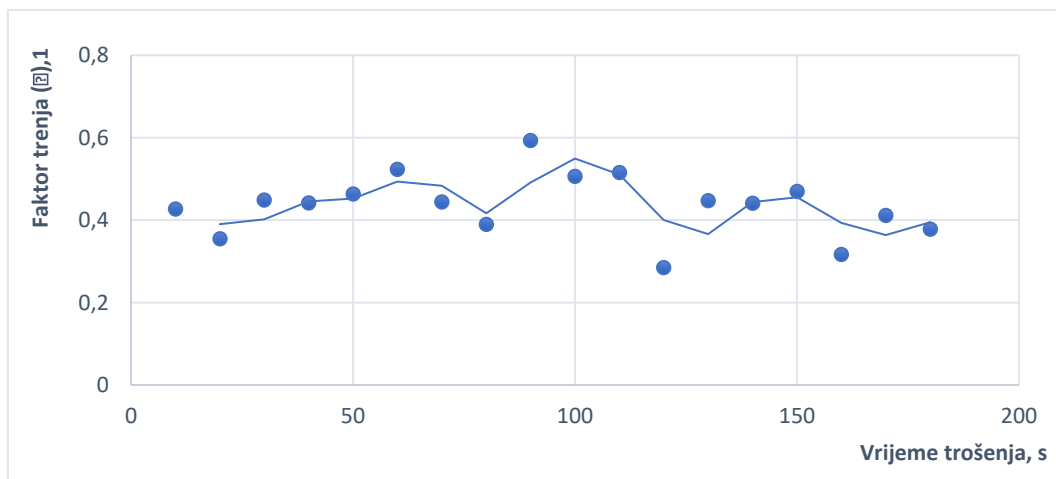
| | |
|-----------------------------------|---------------------|
| Polazni prsten | $0,261533 \pm 0,11$ |
| Prsten nitriran u plinu | $0,351978 \pm 0,12$ |
| Prsten nitriran postupkom TENIFER | $0,436275 \pm 0,12$ |
| Prsten nitriran u plazmi | $0,282827 \pm 0,11$ |



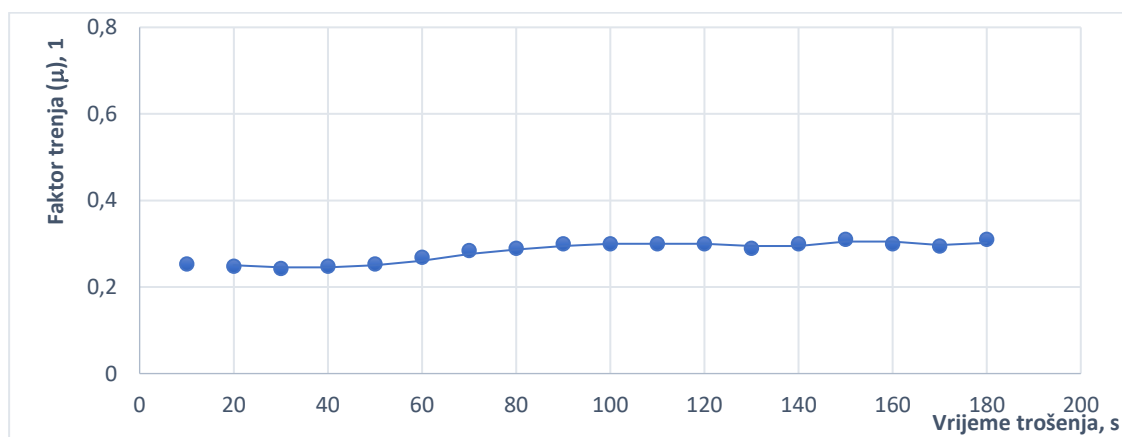
Slika 33. Faktor trenja za polazni prsten



Slika 34. Faktor trenja za prsten nitriran u plinu



Slika 35. Faktor trenja za prsten nitriran metodom TENIFER



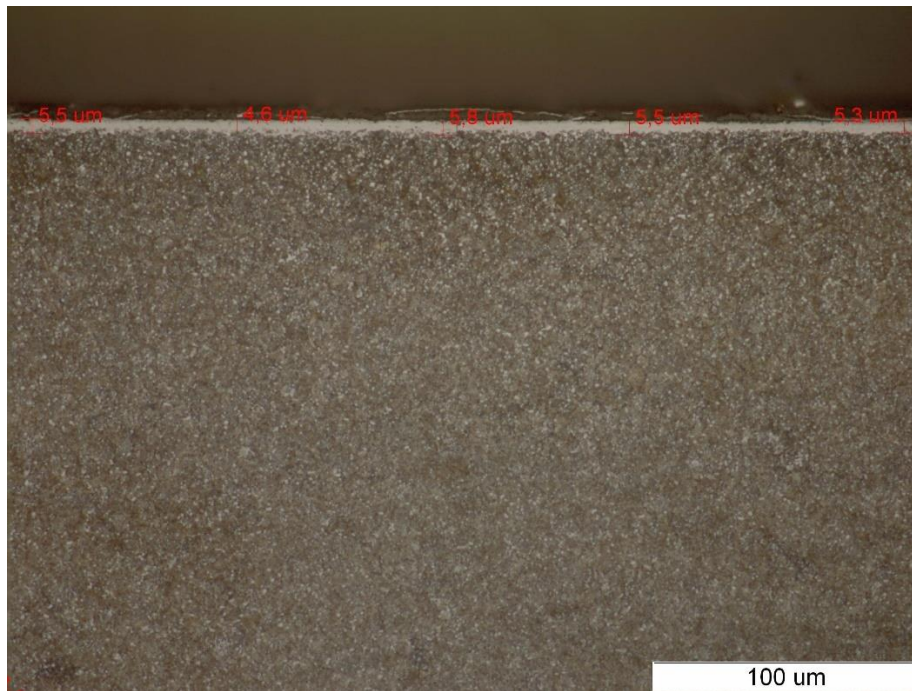
Slika 36. Faktor trenja za prsten nitriran u plazmi

Srednje vrijednosti faktora trenja pokazale su kako je svaki od postupaka nitriranja povećao faktor trenja u intervalu od 180 sekundi. Postupkom TENIFER faktor trenja najviše se povećao dok se postupkom nitriranja u plazmi faktor trenja povećao tek za 8%. Nitriranjem u plinu faktor trenja povećao se za nešto više od 25%. Nitriranje u solnoj kupci TENIFER pokazuje oscilacije u iznosu faktora trenja što je posljedica otkidanja čestica, hladnog zavarivanja istih i ponovnog otkidanja.

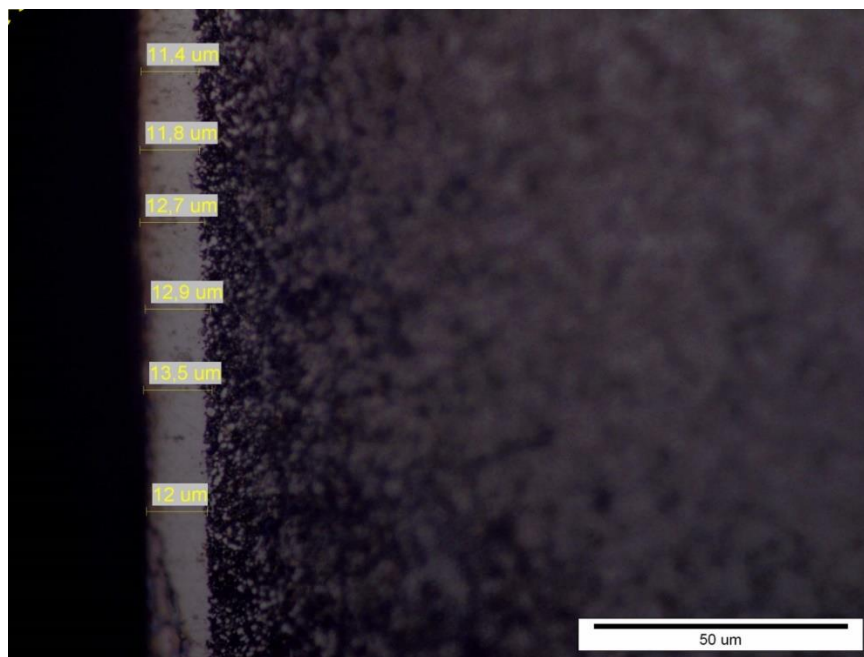
9.3. Metalografska analiza

Metalografskom analizom nitriranih prstenova utvrđena je debljina i struktura zone spojeva. Prstenovi su izrezani na metalografskoj rezalici te zaliveni u polimernu masu. Nakon brušenja i poliranja svaki od uzoraka je nagrižen 3%-tnim NITAL-om. Nagrizanje traje svega nekoliko sekundi, a kemijska reakcija je prekinuta u vodi. Uzorci su analizirani na svjetlosnom mikroskopu marke Olympus GX51. Izgled nitriranog sloja prikazan je na slikama 37 do 41. Srednje vrijednosti debljine zone spojeva određene na slikama 37 i 38 iznose :

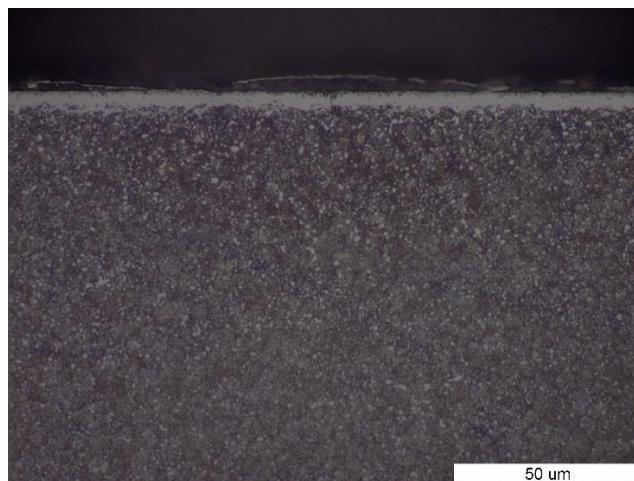
- 5,0 μm za plinski nitrirani prsten
- 12,0 μm za prsten nitriran u solnoj kupci postupkom TENIFER
- 0 μm za prsten nitriran u plazmi



Slika 37. Debljina zone spojeva prstena nitriranog u plinu povećanja 500x



Slika 38. Debljina zone spojeva prstena nitriranog u solnoj kupci TENIFER povećanje 1000X

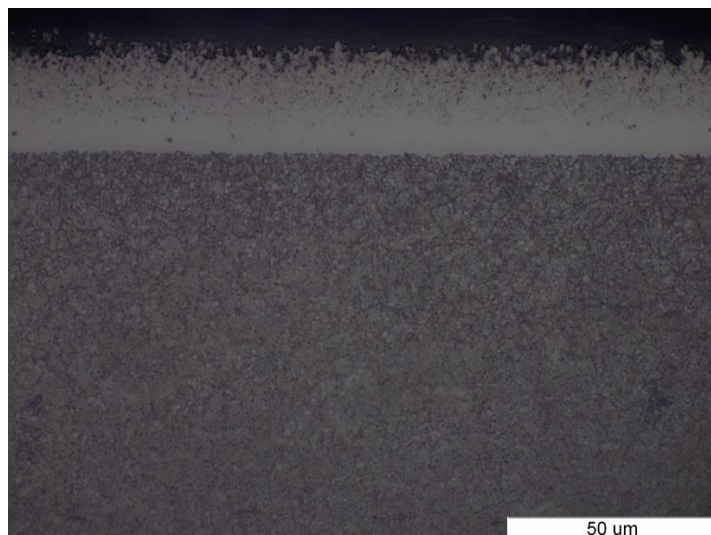


a)

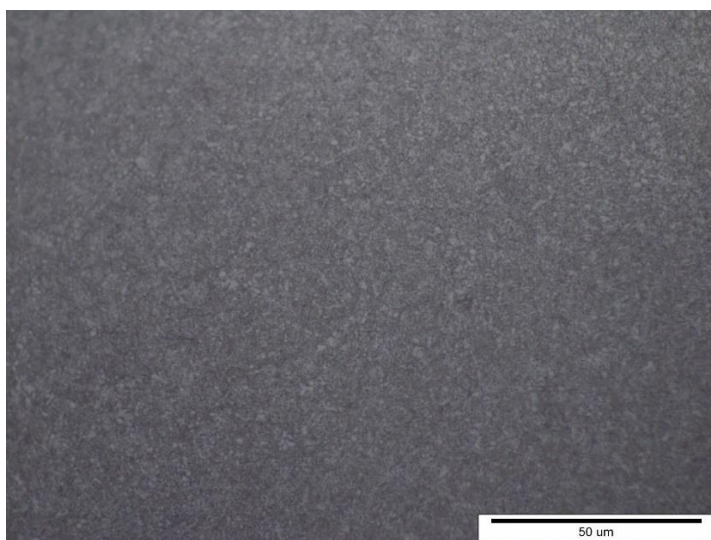


b)

Slika 39. Prsten nitriran u plinu pod svjetlosnim mikroskopom: a) zona spojeva i difuzijska zona (povećanje 1000X), b) jezgra (povećanje 500X)

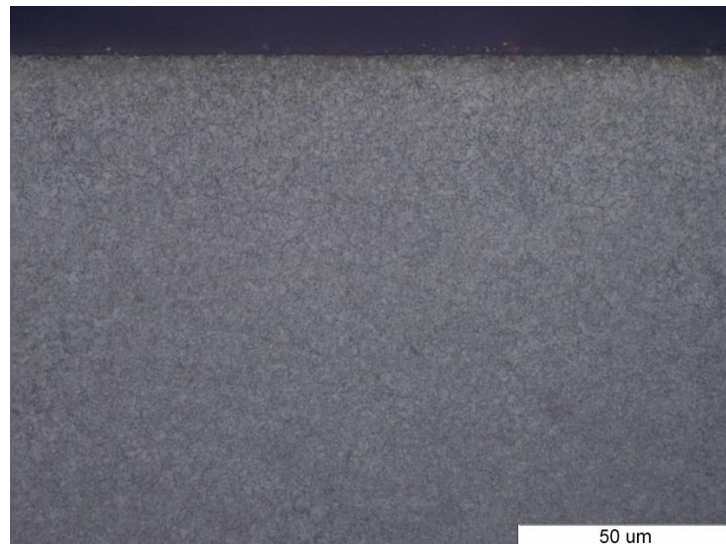


a)



b)

Slika 40. Prsten nitriran metodom TENIFER pod svjetlosnim mikroskopom: a) zona spojeva i difuzijska zona (povećanje 1000X), b) jezgra (povećanje 1000X)



Slika 41. Rubni sloj prstena nitriranog u plazmi pod svjetlosnim mikroskopom povećanja 1000X

Srednja vrijednost debljine zone spojeva prstena nitriranog u plinu iznosi 5,34 μm . Zona spojeva je kompaktna, porozna samo pri vrhu što može služiti za svojstvo samopodmazivanja ležaja. Srednja vrijednost zone spojeva prstena nitriranog u solnoj kupci TENIFER iznosi 12,38 μm , što je dvostruko u odnosu na nitriranje u plinu. Zone spojeva na prstenu nitriranom u plazmi nema. Jezgra svih prstenova sastoji se od visokopopuštenog martenzita (matrica), cementita i karbida popuštanja. U difuzijsko zoni nalaze se kromovi nitridi i nitridi željeza dok je kod difuzijske zone prstena nitriranog u plazmi došlo do pojave karbonitrida zbog dugotrajnosti procesa.

9.4. Ispitivanje mikrotvrdoće

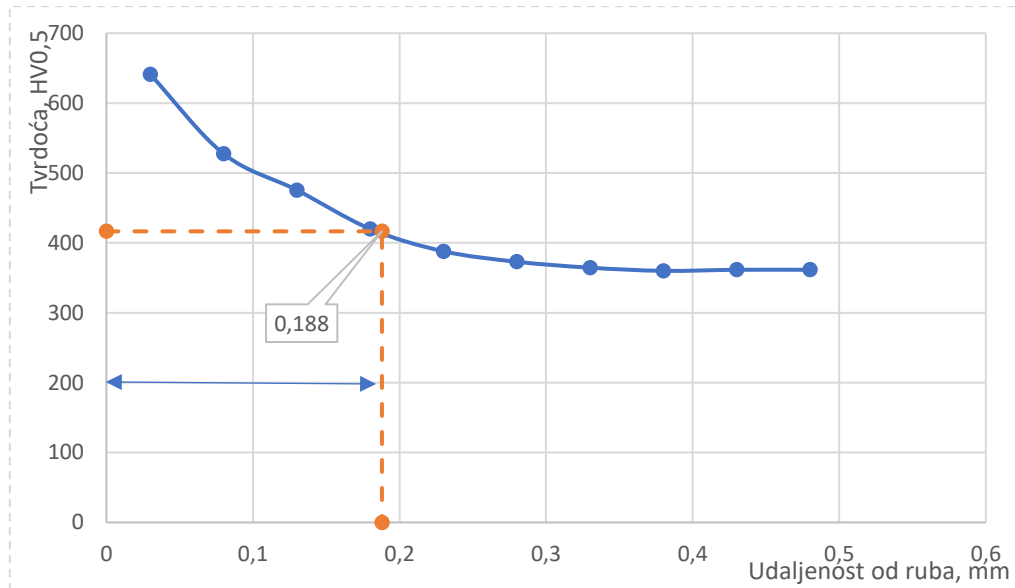
Na metalografski pripremljenim uzorcima mjerena je mikrotvrdoća i određena efektivna dubina nitriranja. Mikrotvrdoća je mjerena na tvrdomjeru „Wilson – Wolpert Tukon 2018“ metodom po Vickersu HV0,5. Prvo je mjerena tvrdoća jezgre, potom 5 mjerenja od ruba prema jezgri. Rezultati ispitivanja tvrdoće jezgre nitriranih prstenova prikazani su u tablicama 11, 13 i 15. Srednje vrijednosti tvrdoće ispitane po dubini nitriranog sloja navedene su u tablicama 12, 14 i 16. Raspored tvrdoće u difuzijskoj zoni prikazan je na slikama 41 do 43.

Tablica 11. Rezultati ispitivanja jezgre prstena

| Broj mjerjenja | HV0,5 |
|--------------------|---------------|
| 1. | 330 |
| 2. | 335 |
| 3. | 405 |
| 4. | 401 |
| 5. | 401 |
| 6. | 337 |
| Srednja vrijednost | 366,5 ± 74,55 |

Tablica 12. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće od ruba prema jezgri prstena nitriranog u plinu

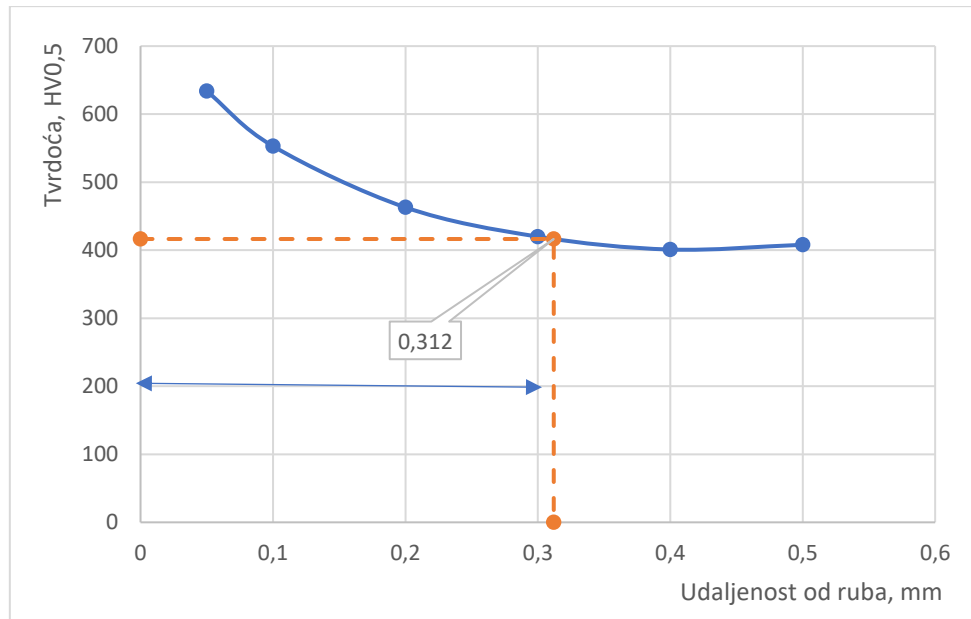
| Broj mjerjenja | HV0,5 |
|----------------|-------|
| 0,03 | 641 |
| 0,08 | 527,5 |
| 0,13 | 475,5 |
| 0,18 | 420 |
| 0,23 | 388 |
| 0,28 | 373 |
| 0,88 | 364,5 |
| 0,38 | 360 |
| 0,43 | 361,5 |
| 0,48 | 361,5 |



Slika 42. . Efektivna dubina nitriranja prstena nitriranog u plinu

Tablica 13. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće od ruba prema jezgri prstena nitriranog u plinu

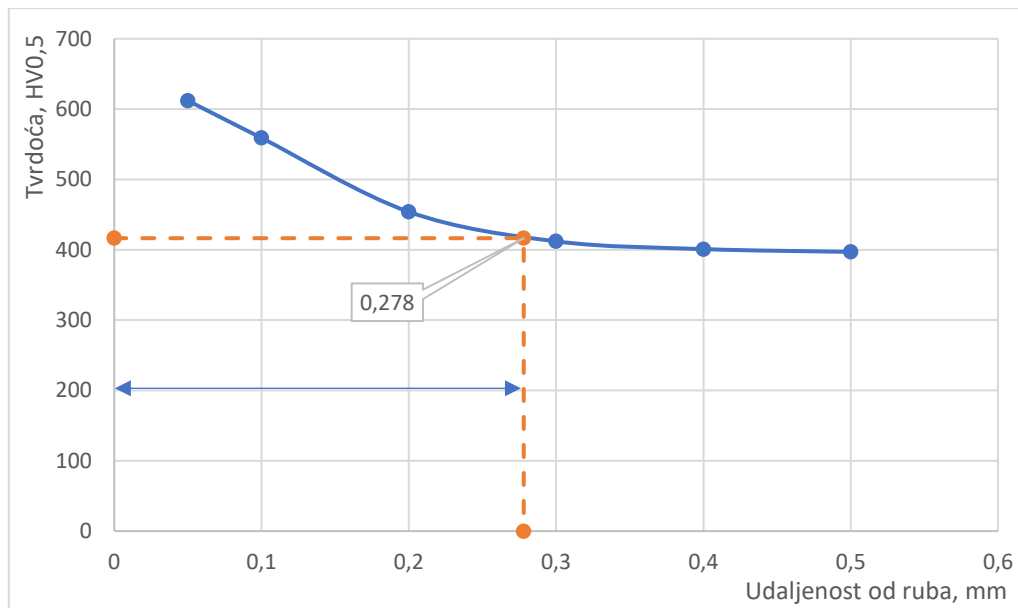
| Udaljenost od ruba, mm | Tvrdoća, HV |
|------------------------|-------------|
| 0,05 | 634 |
| 0,1 | 553 |
| 0,2 | 463 |
| 0,3 | 420 |
| 0,4 | 401 |
| 0,5 | 408 |



Slika 43. Efektivna dubina nitriranja prstena nitriranog metodom TENIFER

Tablica 14. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće od ruba prema jezgri prstena nitriranog u plinu

| Udaljenost od ruba, mm | Tvrdoća, HV |
|------------------------|-------------|
| 0,05 | 612 |
| 0,1 | 559 |
| 0,2 | 454 |
| 0,3 | 412 |
| 0,4 | 401 |
| 0,5 | 397 |



Slika 44. Slika 41. Efektivna dubina nitriranja prstena nitriranog u plazmi

Iz provedenih ispitivanja zaključuje se sljedeće:

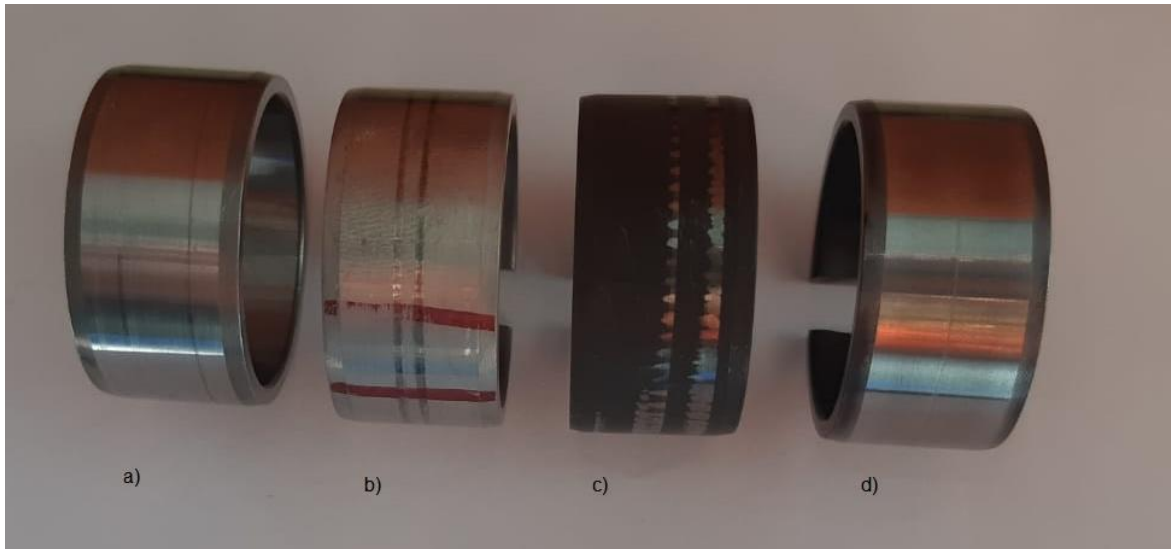
- Efektivna dubina nitriranja prstena nitriranog u plinu iznosi 0,188 mm
- Efektivna dubina nitriranja prstena nitriranog postupkom TENIFER iznosi 0,312 mm
- Efektivna dubina nitriranja prstena nitriranog u plazmi iznosi 0,278 mm
- Površinska tvrdoća prstena nitriranog u plinu iznosi 641 HV0,5
- Površinska tvrdoća prstena nitriranog postupkom TENIFER iznosi 634 HV0,5
- Površinska tvrdoća prstena nitriranog u plazmi iznosi 612 HV0,5
- Tvrdoća jezgre prstena iznosi $366,5 \pm 74,55$ HV0,5

10. Diskusija rezultata

Prsten nitriran u plinu za razliku od polaznog prstena ima višu hrapavost, veći faktor trenja i najmanju efektivnu dubinu nitriranja. Površinska tvrdoća ovog prstena nešto je veća od prstena nitriranog u solnoj kupci i nitriranog u plazmi. Vrijeme nitriranja u plinu iznosilo je 24 sata, a temperatura nitriranja bila je 520°C. Zbog niske temperature nitriranja ova metoda ima najmanju efektivnu dubinu nitriranja, a najveću površinsku tvrdoću zbog nastanka karbonitrida, što je posljedica dugotrajnosti procesa. Nastala zona spojeva tanja je od one nastale nitriranjem u solnoj kupci. Zona spojeva je kompaktna i porozna na vrhu što je poželjno kod ležajeva. Takva zona spojeva ima samopodmazujuće svojstvo, a prsten štiti od nastanka korozije. Zbog male poroznosti hrapavost površine nešto je veća nego kod polaznog prstena.

Visoka temperatura nitriranja (580°C) u solnoj kupci TENIFER za posljedicu ima i najveću efektivnu dubinu nitriranja. Kako su valjni ležajevi izloženi visokim dinamičkim naprezanjima i kontaktnim pritiscima poželjno je da efektivna dubina nitriranja bude što veća. Izuzetno velika i porozna zona spojeva za posljedicu ima vrlo visoko povećanje hrapavosti i velike oscilacije u iznosima faktora trenja. Povećanje hrapavosti očituje se u većem broju brjegovna na profilu hrapavosti, a širi dolovi ukazuju na poroznost zone spojeva. Takav učinak nepoželjan je kod valjnih ležajeva zbog mogućnosti nastanka adhezijskog trošenja. Također, faktor trenja je viši u odnosu na polazni prsten i vrijednost faktora trenja osciliraju zbog otkidanja čestica, trag trošenja (Slika 45.), koji je širi od ostalih, to pokazuje.

Prsten nitriran u plazmi ima nešto manju efektivnu dubinu nitriranja za razliku od prstena nitriranog u solnoj kupci TENIFER i nešto nižu površinsku tvrdoću zato što ovaj način nitriranja nije dao zonu spojeva. Uspoređujući s polaznim prstenom hrapavost površine povećala se neznatno, a metoda otprašivanja dodatno je zagladila površinu prstena. Faktor trenja također se neznatno povišio obzirom na onaj u polaznom stanju zato što nije nastala zona spojeva.



Slika 45. Tragovi trošenja nastali ispitivanjem prstenova na adhezijsko trošenje: a) polazni prsten, b) plinski nitriran, c) nitriran u solnoj kupci TENIFER, d) nitriran u plazmi

11. Zaključak

Na temelju rezultata dobivenih ispitivanjem prstenova valjnih ležajeva, koji su napravljeni od čeliak EN 100Cr6 te isporučeni u poboljšanom stanju, na adhezijsko trošenje, hrapavost površine, analizom mikrostrukture rubnog sloja te određivanje efektivne dubine nitriranja i mikrotvrdoće rubnog sloja dolazi se do sljedećih zaključaka.

Nitriranjem prstenova povećala se površinska hrapavost kod prstenova nitriranih u plinu (1,3 puta) i u solnoj kupci TENIFER (više od 5 puta), dok se nitriranjem u plazmi površinska hrapavost povećala neznatno. Profili hrapavosti nitriranih prstenova također su promijenjeni u odnosu na polazni prsten čiji je profil rezultat finog brušenja. Najbolju promjenu profila hrapavosti pokazuje prsten nitriran u plazmi čija je površina ostala zaglađena.

Faktor trenja pokazuje povišenje na svim nitriranim prstenovima s obzirom na polazni. Takav rezultat posljedica je nastajanja krhke zone spojeva kod prstenova nitriranih u plinu i solnoj kupci TENIFER. Faktor trenja kod prstena nitriranog u plazmi povišio se manje zato što ovim postupkom nitriranja nije nastala zona spojeva. Također, prstenovi nitrirani u plinu i metodom TENIFER pokazuju oscilacije iznosa faktora trenja.

Mikrostrukturnom analizom prstenova utvrđeno je da je nitriranjem u plinu i solnoj kupci TENIFER nastala zona spojeva. Zona spojeva kod plinskog nitriranja je manja i manje porozna dok je ona nastala nitriranjem metodom TENIFER deblja i poroznija. Nitriranjem u plazmi nije došlo do nastanka zone spojeva.

Ispitivanje mikrotvrdoće utvrđeno da je površinska tvrdoća prstena nitriranog u plinu 641 HV_{0,5}, a efektivna dubina nitriranja 0,188 mm. Kod prstena nitriranog u solnoj kupci TENIFER površinska mikrotvrdoća iznosi 634 HV_{0,5}, a efektivna dubina nitriranja 0,312 mm dok je kod prstena nitriranog u plazmi površinska tvrdoća 612 HV_{0,5}, a efektivna dubina nitriranja 0,278.


Popis literature

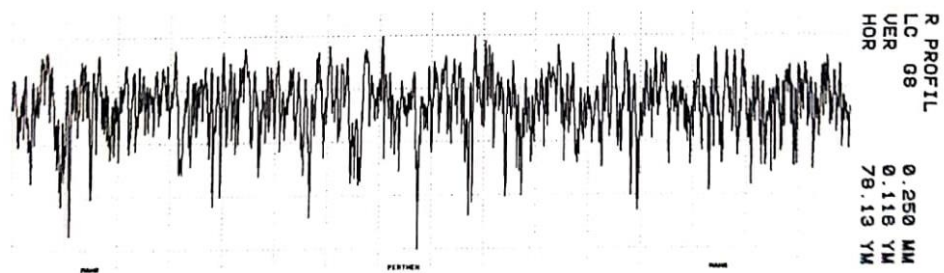
- [1] „Nitriranje“ *Wikipedia*, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Nitriranje>, 2.1.2019.
- [2] Milan O., Podloge uz predavanje iz kolegija „*Elementi konstrukcija II*“, dio „*Ležajevi*“, FSB, Zagreb, 2013.
- [3] „Valjni ležaj“ *Wikipedia*, https://hr.wikipedia.org/wiki/Valjni_ležaj, 3.1.2019.
- [4] „Hrapavost površine“ *Wikipedia*, https://hr.wikipedia.org/wiki/Hrapavost_površine, 4.1.2019.
- [5] „Trenje“ *Wikipedia*, <https://hr.wikipedia.org/wiki/Trenje>, 5.1.2019.
- [6] „Rolling-element bearing“ *Wikipedia*, https://en.wikipedia.org/wiki/Rolling-element_bearing, 7.1.2019.
- [7] Decker K. H., *Elementi strojeva*, Golden marketing – Tehniška knjiga, Zagreb, 2000.
- [8] Grilec K., Jakovljević S., Marić G., *Tribologija u strojarstvu*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [9] Landek D., Predavanje iz kolegija „*Posebni metalni materijali*“, dio „*Alatni materijali*“, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2017.
- [10] Filetin T., Kovačiček F., Indof J., *Svojstva i primjena materijala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [11] Novosel M., Cajner F., Krumes D., *Alatni materijali*, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 1996.
- [12] Krumes D., *Toplinska obradba*, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2000.
- [13] Matijević B., Predavanja iz kolegija „*Toplinska obrada*“, Toplinsko-kemijsko modificiranje površine čelika, karbonitriranje, nitiranje, nitrokarburiranje, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2016.
- [14] Alar Ž., Predavanja iz kolegija „*Materijali I*“, treći dio Mehanička svojstva materijala, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2016.
- [15] Darko L., Vježbe iz kolegija „*Toplinska obrada*“, vježba 10, FSB, Zagreb, 2016.

[16] Saša K., Vježbe iz kolegija „*Tribologija i inženjerstvo površina*“, vježba 4, FSB, Zagreb, 2016.

Prilog 1: Parametri hrapavosti


perthometer 58P 4.5

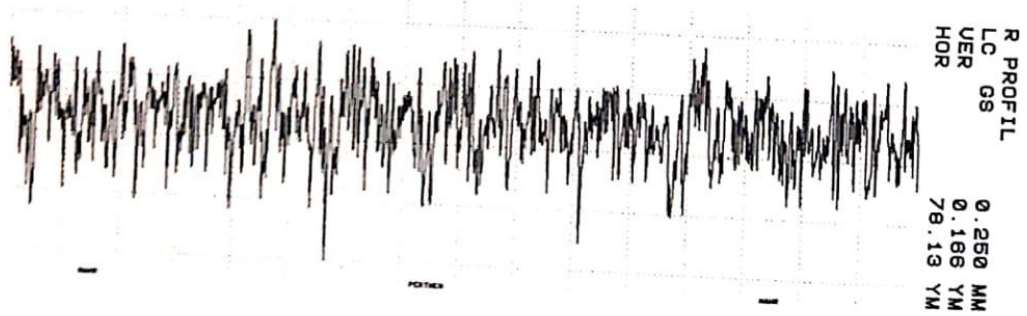
|  LT 1.750 MM LM 1.250 MM UB 12.50 YM | LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB | OBJEKT: UZORAK 0 NR.: 18.2.2019. NAME: G.BARSIC MESS.-HR.: 6 TI RHT 6-50 50 6 | | | | | | | | | |
|--|---|---|-----------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|----|--|
| KENNWERT | | | STATISTIK N = 6 | | | | | | | | |
| | LC | GS | Ø. 250 MM | X | S | R | MAX | MIN | HH | TH | |
| 1 | | | RMAX | YH | 0.470 | 0.059 | 0.167 | 0.535 | 0.368 | | |
| 2 | | | RZ | YH | 0.400 | 0.039 | 0.098 | 0.451 | 0.353 | | |
| 3 | | | RA | YH | 0.050 | 0.003 | 0.008 | 0.053 | 0.046 | | |
| 4 | | | RP | YH | 0.150 | 0.003 | 0.008 | 0.154 | 0.146 | | |
| 5 | | | RPM | YH | 0.138 | 0.007 | 0.019 | 0.146 | 0.127 | | |
| 6 | | | WT | YH | 0.051 | 0.023 | 0.060 | 0.095 | 0.034 | | |
| 7 | | | RT | YH | 0.478 | 0.048 | 0.135 | 0.542 | 0.407 | | |
| 8 | | | PT | YH | 0.498 | 0.038 | 0.092 | 0.556 | 0.464 | | |



Slika 46. Parametri hrapavosti za polazni prsten


perthometer S81 4.5

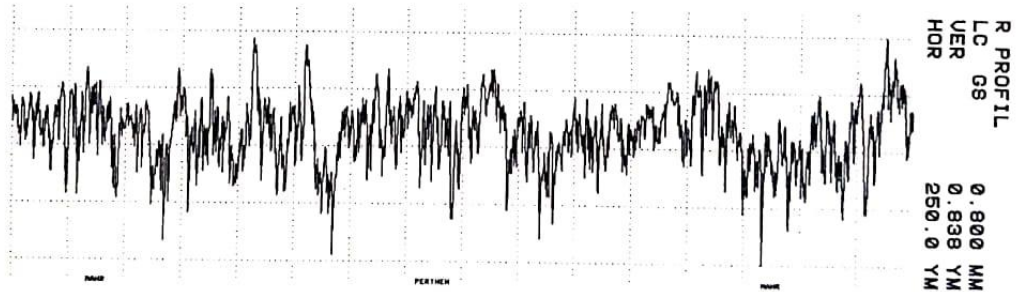
|  | | LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB | | OBJEKT: UZORAK 1 NR.: 18.2.2019. NAME: G.BARSIC MESS.-HR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6 | | | | | |
|---|----------|---|-------|---|-------|-------|-------|----|----|
| LT | 1.750 MM | | | | | | | | |
| LM | 1.250 MM | | | | | | | | |
| UB | 12.50 YM | | | | | | | | |
| KENNWERT | | STATISTIK N = 6 | | | | | | | |
| LC | GS | 0.250 MM | X | S | R | MAX | MIN | IN | TH |
| 1 | RHAX | YM | 0.593 | 0.049 | 0.130 | 0.665 | 0.535 | | |
| 2 | RZ | YM | 0.513 | 0.021 | 0.050 | 0.539 | 0.489 | | |
| 3 | RA | YM | 0.066 | 0.002 | 0.006 | 0.070 | 0.064 | | |
| 4 | RP | YM | 0.268 | 0.015 | 0.048 | 0.293 | 0.245 | | |
| 5 | RPH | YM | 0.220 | 0.009 | 0.028 | 0.236 | 0.208 | | |
| 6 | WT | YM | 0.064 | 0.023 | 0.061 | 0.101 | 0.040 | | |
| 7 | RT | YM | 0.635 | 0.067 | 0.174 | 0.738 | 0.564 | | |
| 8 | PT | YM | 0.664 | 0.087 | 0.233 | 0.827 | 0.594 | | |



Slika 47. parametri hrapavosti za prsten nitriran u plinu


perthometer 58P 4.5

|  | | LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB | | OBJEKT: UZORAK 2 HR.: 10.2.2019. NAME: G. BARSIC MESS.-HR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6 | | | | | |
|---|----------|---|-----------------|--|-------|-------|-------|----|----|
| LT | 5.600 MM | | | | | | | | |
| LM | 4.000 MM | | | | | | | | |
| UB | 12.50 YM | | | | | | | | |
| KENNWERT | | | STATISTIK N = 6 | | | | | | |
| LC | GS | Ø. 800 MM | X | S | R | MAX | MIN | HH | TH |
| 1 | RMAX | YM | 2.950 | 0.290 | 0.767 | 3.354 | 2.587 | | |
| 2 | RZ | YM | 2.301 | 0.246 | 0.783 | 2.760 | 2.058 | | |
| 3 | RA | YM | 0.330 | 0.023 | 0.063 | 0.363 | 0.301 | | |
| 4 | RP | YM | 1.454 | 0.277 | 0.652 | 1.761 | 1.109 | | |
| 5 | RPM | YM | 1.043 | 0.118 | 0.282 | 1.168 | 0.886 | | |
| 6 | WT | YM | 1.805 | 0.454 | 1.287 | 2.293 | 1.806 | | |
| 7 | RT | YM | 3.018 | 0.219 | 0.682 | 3.354 | 2.752 | | |
| 8 | PT | YM | 4.579 | 0.571 | 1.590 | 5.231 | 3.642 | | |

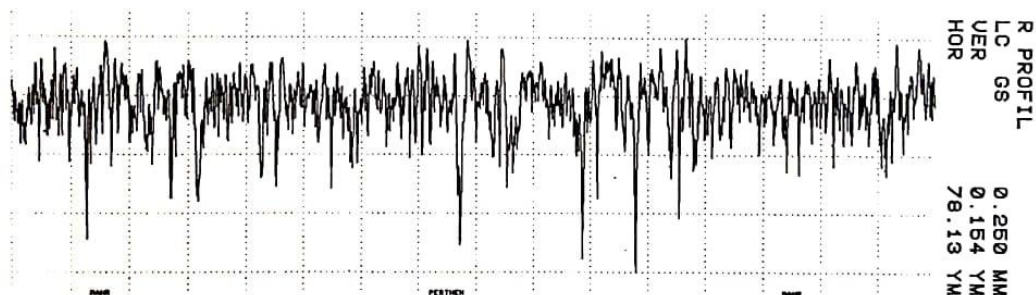


Slika 48. Parametri hrapavosti za prsten nitriran metodom TENIFER

perthometer S8P 4.5

| | | | | | |
|---|----------|---|--|--|--|
|  | | LABORATORIJ ZA PRECIZNA MJERENJA DUZINA FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE ZAGREB | | OBJEKT: UZORAK 3 NR.: 18.2.2019. NAME: G. BARSIC MESS.-HR.: 6 T1 RHT 6-50 50 6 | |
| LT | 1.750 MM | | | | |
| LM | 1.250 MM | | | | |
| UB | 12.50 YM | | | | |

| KENNWERT | | | STATISTIK N = 6 | | | | | | | |
|----------|------|----|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|----|----|
| | LC | GS | Ø.250 MM | X | S | R | MAX | MIN | NN | TN |
| 1 | RMAX | | YM | 0.513 | 0.075 | 0.168 | 0.615 | 0.447 | | |
| 2 | RZ | | YM | 0.418 | 0.056 | 0.133 | 0.497 | 0.365 | | |
| 3 | RA | | YM | 0.052 | 0.003 | 0.005 | 0.055 | 0.050 | | |
| 4 | RP | | YM | 0.167 | 0.014 | 0.044 | 0.190 | 0.146 | | |
| 5 | RPM | | YM | 0.143 | 0.012 | 0.031 | 0.153 | 0.122 | | |
| 6 | WT | | YM | 0.093 | 0.005 | 0.225 | 0.265 | 0.040 | | |
| 7 | RT | | YM | 0.523 | 0.072 | 0.168 | 0.615 | 0.447 | | |
| 8 | PT | | YM | 0.571 | 0.105 | 0.256 | 0.698 | 0.443 | | |



Slika 49. Parametri hrapavosti za prsten nitiran u plazmi

Prilog 2: Rezultati faktora trenja*Tablica 15. Faktor trenja za polazni prsten*

| Vrijeme | Otklon | Sila trenja | Normalna sila | Faktor trenja |
|---------|-----------------|-------------|---------------|---------------|
| t, s | ΔL , mm | F_T , N | F_N , N | μ |
| 10 | 3,4 | 17,74212 | 68,67 | 0,258368 |
| 20 | 3,2 | 16,31936 | | 0,237649 |
| 30 | 3,1 | 15,60798 | | 0,22729 |
| 40 | 3,15 | 15,96367 | | 0,232469 |
| 50 | 3,2 | 16,3194 | | 0,23765 |
| 60 | 3,6 | 19,1648 | | 0,279085 |
| 70 | 3,2 | 16,3194 | | 0,23765 |
| 80 | 3,5 | 18,4535 | | 0,268727 |
| 90 | 3,6 | 19,1648 | | 0,279085 |
| 100 | 3,4 | 17,7421 | | 0,258368 |
| 110 | 3,2 | 16,3194 | | 0,23765 |
| 120 | 3,5 | 18,4535 | | 0,268727 |
| 130 | 3,8 | 20,58764 | | 0,299805 |
| 140 | 3,8 | 20,58764 | | 0,299805 |
| 150 | 3,3 | 17,03074 | | 0,248008 |
| 160 | 3,5 | 18,4535 | | 0,268727 |
| 170 | 3,7 | 19,87626 | | 0,289446 |
| 180 | 3,6 | 19,1648 | | 0,279085 |

Tablica 16. Rezultati faktora trenja za plinsko nitriranje

| Vrijeme | Otklon za 1. mjerenje | Otklon za 2. mjerenje | Srednja vrijednost oba mjerjenja | Sila trenja | Normalna sila | Faktor trenja |
|---------|-----------------------|-----------------------|----------------------------------|-------------|---------------|---------------|
| t,s | ΔL , mm | ΔL , mm | ΔL , mm | F_T , N | F_N , N | μ |
| 10 | 3,5 | 2,8 | 3,15 | 23,58839 | 68,67 | 0,3435 |
| 20 | 2,8 | 2,9 | 2,85 | 22,40702 | | 0,3263 |
| 30 | 3,8 | 2,85 | 3,325 | 24,27752 | | 0,353539 |
| 40 | 3,7 | 3,4 | 3,55 | 25,16355 | | 0,366442 |
| 50 | 2,5 | 3,3 | 2,9 | 22,60391 | | 0,329167 |
| 60 | 3,7 | 3,5 | 3,6 | 25,36044 | | 0,369309 |
| 70 | 3,3 | 3,1 | 3,2 | 23,78528 | | 0,346371 |
| 80 | 3,8 | 3,45 | 3,625 | 25,45889 | | 0,370743 |
| 90 | 3,8 | 3,2 | 3,5 | 25 | | 0,363574 |
| 100 | 2,7 | 3,5 | 3,1 | 23,39149 | | 0,340636 |
| 110 | 2,9 | 3,1 | 3 | 22,9977 | | 0,334902 |
| 120 | 3,8 | 3,52 | 3,66 | 25,59671 | | 0,37275 |
| 130 | 3,7 | 2,8 | 3,25 | 23,98218 | | 0,349238 |
| 140 | 3,8 | 3,5 | 3,65 | 25,55734 | | 0,372176 |
| 150 | 3 | 3,2 | 3,1 | 23,39149 | | 0,340636 |
| 160 | 2,8 | 3,8 | 3,3 | 24,17907 | | 0,352105 |
| 170 | 3,4 | 3,2 | 3,3 | 24,17907 | | 0,352105 |
| 180 | 3,2 | 3,4 | 3,3 | 24,17907 | | 0,352105 |

Tablica 17. Faktor trenja za prsten nitiran metodom TENIFER

| Vrijeme | Otklon | Sila trenja | Normalna sila | Faktor trenja |
|---------|-----------------------|-----------------|-----------------|---------------|
| t,s | $\Delta L, \text{mm}$ | F_T, N | F_N, N | μ |
| 10 | 4,63 | 29,31162 | 68,67 | 0,42685 |
| 20 | 3,9 | 24,33601 | | 0,35439 |
| 30 | 4,85 | 30,81112 | | 0,44868 |
| 40 | 4,78 | 30,334 | | 0,44174 |
| 50 | 5 | 31,8335 | | 0,46357 |
| 60 | 5,6 | 35,92304 | | 0,52313 |
| 70 | 4,8 | 30,47032 | | 0,44372 |
| 80 | 4,25 | 27 | | 0,38913 |
| 90 | 6,3 | 40,69417 | | 0,5926 |
| 100 | 5,43 | 34,76434 | | 0,50625 |
| 110 | 5,52 | 35,37777 | | 0,51519 |
| 120 | 3,2 | 19,56488 | | 0,28491 |
| 130 | 4,83 | 30,6748 | | 0,4467 |
| 140 | 4,77 | 30,26584 | | 0,44074 |
| 150 | 5,06 | 32,24245 | | 0,46952 |
| 160 | 3,52 | 21,74567 | | 0,316669 |
| 170 | 4,47 | 28,22077 | | 0,410962 |
| 180 | 4,14 | 25,97153 | | 0,3782 |

Tablica 18. Faktor trenja za prsten nitriran u plazmi

| Vrijeme | Otklon | Sila trenja | Normalna sila | Faktor trenja |
|---------|-----------------|-------------|---------------|---------------|
| t, s | ΔL , mm | F_T , N | F_N , N | μ |
| 10 | 3,35 | 17,38643 | 68,67 | 0,25319 |
| 20 | 3,3 | 17,03074 | | 0,248008 |
| 30 | 3,25 | 16,67505 | | 0,242829 |
| 40 | 3,3 | 17,0307 | | 0,248008 |
| 50 | 3,35 | 17,3864 | | 0,253188 |
| 60 | 3,5 | 18,4535 | | 0,268727 |
| 70 | 3,65 | 19,52057 | | 0,284266 |
| 80 | 3,7 | 19,87626 | | 0,289446 |
| 90 | 3,6 | 19,16488 | | 0,299805 |
| 100 | 3,8 | 20,58764 | | 0,299805 |
| 110 | 3,8 | 20,58764 | | 0,299805 |
| 120 | 3,8 | 20,58764 | | 0,299805 |
| 130 | 3,7 | 19,8763 | | 0,289447 |
| 140 | 3,8 | 20,58764 | | 0,299805 |
| 150 | 3,9 | 21,29902 | | 0,310165 |
| 160 | 3,8 | 20,5876 | | 0,299805 |
| 170 | 3,75 | 20,23195 | | 0,294626 |
| 180 | 3,9 | 21,29902 | | 0,310165 |