Eksploatacijsko ispitivanje trošenja nitriranog lančanika bicikla

Marinović, Bartol

Master's thesis / Diplomski 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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:687122

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Bartol Marinović

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

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

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru dr.sc. Darku Landeku, dr. sc. Ivanu Kumiću, tehničkom suradniku Ivanu Vovku, mag. ing. Dini Bogdanoviću, dr. sc. Ivanu Stojanoviću i dr. sc. Marku Katiću na stručnoj pomoći. Također se zahvaljujem svojoj obitelji i zaručnici na podršci i razumijevanju.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **BARTOL MARINOVIĆ** Mat. br.: 0035198200

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Eksploatacijsko ispitivanje trošenja nitriranog lančanika bicikla**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Exploitation testing of wear on a nitrided bicycle chainwheel**

Opis zadatka:

Postupcima nitriranja moguće je povećati otpornost na trošenje elemenata konstrukcija za prijenos gibanja. U radu treba opisati konstrukcijske izvedbe lančanog prijenosnika bicikla i pojave trošenja u tribosustavu „lanac-lančanik". Na temelju spoznaja o mjestima pojave intenzivnog trošenja izabrati lančanik prikladan za primjenu nitriranja u plazmi i solnoj kupci.

U eksperimentalnom dijelu rada treba provesti nitriranje izabranih lančanika te ispitati promjene dimenzija ozubljenja, mase i tvrdoće nakon nitriranja i jednako dugotrajnih perioda eksploatacijskog trošenja. Ispitana svojstva usporediti sa svojstvima lančanika u polaznom stanju. Na istrošenim lančanicima provesti analizu procesa trošenja te ispitati mehanička i mikrostrukturna svojstva nitriranog sloja.

Na temelju provedenih ispitivanja i diskusije rezultata predložiti postupak toplinske obrade za povišenje otpornosti na trošenje lančanika bicikla.

U radu treba navesti korištenu literaturu i dobivenu stručnu pomoć.

Zadatak zadan:
02. svibnja 2019.

Rok predaje rada:
04. srpnja 2019.

Predviđeni datum obrane:
10. srpnja 2019.
11. srpnja 2019.
12. srpnja 2019.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

1. UVOD 9

2. BICIKL 11

2.1. Povijesni razvoj bicikla 11

2.2. Podjela bicikala 13

2.3. Konstrukcija bicikla 14

2.3.1. Okvir bicikla 15

2.3.2. Kotači bicikla 17

2.3.3. Prijenos bicikla 18

3. NITRIRANJE U PLAZMI 25

3.1. Opis procesa 25

3.2. Kemijske reakcije pri nitriranju u plazmi 25

3.3. Prednosti i nedostaci nitriranja u plazmi 29

3.3.1. Prednosti 29

3.3.2. Nedostatci 30

3.4. Pulzirajuća plazma 31

4. NITROKARBURIRANJE POSTUPKOM TENIFER 33

5. PLAN POKUSA 37

5.1. Tribosustav „lanac - lančanik“ 37

5.1.1. Mehanizmi trošenja u tribosustavu „lanac - lančanik“ 37

5.1.2. Čelični lančanik podvrgnut obradi postupkom nitriranja 39

5.2. Opis testnih bicikala 41

5.3. Opis eksploatacijskih uvjeta 44

6. ISPITIVANJE LANČANIKA 47

6.1. Određivanje mase 47

6.2. Određivanje debljine 50

6.3. Mjerenje ravnosti 51

6.4. Mjerenje i vizualna usporedba profila zuba 52

6.4.1. Mjerenja profila zuba lančanika alatnim mikroskopom.....53
6.4.2. Vizualna usporedba fotografija ozubljenja.....61
6.4.3. Analiza trošenja zubi lančanika.....62
6.5. Analiza mikrostrukture nitriranog sloja.....66
6.5.1. Rezultati ispitivanja mikrostrukture jezgre lančanika.....67
6.5.2. Rezultati ispitivanja mikrostrukture rubnog sloja.....69
6.6. Ispitivanje mikrotvrdoće.....75
7. ZAKLJUČAK.....78
8. PRILOZI.....81

POPIS SLIKA

Slika 1. Karl von Drais na svom originalnom trkaćem stroju[1] 11
Slika 2. J.K. Starleyjev Rover Safety Bicycle[2] 12
Slika 3. Skica podjele bicikala[4] 13
Slika 4. Dijagram dijelova bicikla 14
Slika 5. Shematski prikaz dijagonalne putanje lanca (eng. cross chaining)[7] 19
Slika 6. Shematski prikaz Renoldova lanca s valjčićima [7] 20
Slika 7. KMC X9 lanac korišten na testnim biciklima[9] 20
Slika 8. Koraci proizvodnog procesa SRAM kazeta iz jednog komada čelika[10] 23
Slika 9. SRAM kazeta iz jednog komada čelika[11] 23
Slika 10. SRAM XD nosač kazete i SRAM kazeta u presjeku[12] 24
Slika 11. Koebelov model mehanizma plazma nitriranja[16] 26
Slika 12. Nastanak zone spojeva[18] 28
Slika 13. Shema mehanizma efekta šuplje katode[20] 30
Slika 14. Shema nepravilnosti ruba pri plazma nitriranju[21] 31
Slika 15. Prikaz ulazne i izlazne karakteristike generatora plazme[23] 32
Slika 16. Osnovne kemijske reakcije u solnoj kupci TENIFER 33
Slika 17. Utjecaj trajanja postupka na poroznost zone spojeva [5] 34
Slika 18. Struktura nitrokarburiranog sloja [5] 35
Slika 19. Fotografija lanca u zahvatu s lančanikom kazete 38
Slika 20. Lančanik u neobrađenom stanju fotografiran za vrijeme mjerenja ravnosti na koordinatnom mjernom uređaju 40
Slika 21. Lančanik nitriran plazma potpomognutim proces fotografiran nakon ugradnje na pogonski sklop prije početka eksploatacijskog trošenja 40
Slika 22. Fotografija cross-country bicikala prilagođenih za putovanja sa svom opremom. 41
Slika 23. Fotografija 3 x 9 prijenosa cross-country brdskog bicikla 42
Slika 24. Fotografija short travel trail brdskih bicikli 43
Slika 25. Fotografija prijenosa 2 x 9 short travel trail brdskog bicikla 43
Slika 26. Prikaz očitavanja rezultata s analogne mehaničke vage 47
Slika 27. Princip očitavanja rezultata mjerenja [25] 48
Slika 28. Presjek vage [25] 48

Slika 29. Prikaz vage [25] 48
Slika 30. Rezultati promjena mase lančanika nakon obrade i nakon trošenja 49
Slika 31. Mjerenje debljine lančanika 50
Slika 32. Prikaz vrijednosti mjerenja debljine lančanika 50
Slika 33. Mjerenje odstupanja od ravnosti lančanika 51
Slika 34. Prikaz vrijednosti odstupanja od ravnosti 52
Slika 35. Prikaz alatnog mikroskopa i mjerenja profila zuba 53
Slika 36. Prikaz ispitivanja mikrostrukture 66
Slika 37. Prikaz metalografskih uzoraka 66
Slika 38. Presjek zuba lančanika 4 (povećanje 50:1) 67
Slika 39. Martenzitna mikrostruktura jezgre lančanika 4 (povećanje 500:1) 67
Slika 40. Presjek zuba lančanika 1 (povećanje 50:1) 68
Slika 41. Martenzitna mikrostruktura jezgre lančanika 1 (povećanje 500:1) 68
Slika 42. Fotografija abrazijskog trošenja i odlamanja prevlake na lančaniku u isporučenom stanju od strane proizvođača (povećanje 50:1) 69
Slika 43. Fotografija abrazijskog trošenja prevlake na lančaniku u isporučenom stanju od strane proizvođača (povećanje 100:1) 70
Slika 44. Otisak intentora za provođenje analize metodom VDI 3198 (povećanje 50:1) 70
Slika 45. Izgled deblje galvanske prevlake nikal na izloženim rubnim područjima 71
Slika 46. Prikaz mjerenja debljine rubnog sloja 72
Slika 47. Krivulja tvrdoće uzorka izrezanog iz plazma nitriranog lančanika 75
Slika 48. Krivulja tvrdoće uzorka izrezanog iz lančanika nitriranog u TENIFER solnoj kupci 76
Slika 50. Kemijski spojevi dušika i nikla[29] 77

POPIS TABLICA

Tablica 1. Parametri postupka otpraševanja i nitriranja u plazmi 39
Tablica 2. Tablica eksploatacijskih uvjeta 45
Tablica 3. Fotografije prvih znakova trošenja ispitnih lančanika 46
Tablica 4. Rezultati mjerenja profila prvog zuba lančanika 1 54
Tablica 5. Rezultati mjerenja profila drugog zuba lančanika 1 55
Tablica 6. Rezultati mjerenja profila prvog zuba lančanika 2 56
Tablica 7. Rezultati mjerenja profila drugog zuba lančanika 2 57
Tablica 8. Rezultati mjerenja profila prvog i drugog zuba lančanika 3 58
Tablica 9. Rezultati mjerenja profila prvog zuba lančanika 4 59
Tablica 10. Rezultati mjerenja profila drugog zuba lančanika 4 60
Tablica 11. Usporedba slika zuba prije i nakon obrade te nakon eksploatacijskog trošenja 61
Tablica 12. Izgled obje strane lančanika nakon trošenja 63
Tablica 13. Izgled dijela ozubljenja lančanika (1. dio) 64
Tablica 14. Izgled dijela ozubljenja lančanika (2. dio) 65
Tablica 15. Prikaz površinskog sloja i vrijednosti njegove debljine u slučaju lančanika nitriranog u plazmi (Nagriženo 3% NITAL) 73
Tablica 16. Prikaz površinskog sloja i njegova debljina nakon nitriranja u solnoj kupci TENIFER 580°C/2h/voda (Nagriženo 3% NITAL) 74

POPIS OZNAKA

ε- faza	Fe_2N ili Fe_3N
γ`-faza	Fe_4N
T_{ra}	Odstupanje od ravnosti
HG	Granična tvrdoća
NHD	Efektivna dubina nitrokarburiranja

Sažetak

Tema istraživanja obuhvaća detaljan opis postupka plazmom potpomognutog nitriranja i nitriokarburiranja u solnoj kupci TENIFER te njihovu primjenu u svrhu poboljšavanja mehaničkih i triboloških svojstava lančanika bicikla. Rad opisuje povijesni razvoj i podjelu bicikala ovisno o njihovoj namjeni te konstrukciju bicikla uzimajući u obzir kritične dijelove sklopa. Naglasak će biti stavljen na tribološka i mehanička svojstva prijenosa bicikla, odnosno tribosustav „lanac-lančanik“. Kao predmet eksperimentalnog dijela rada izdvojen je lančanik s 22 zuba koji predstavlja najlakši prijenosni omjer pogonskog sklopa bicikla. Na dva takva lančanika provedena je toplinska obrada postupkom nitriranja u plazmi te nitriranja u solnoj kupci TENIFER na još jednom identičnom lančaniku. Tri obrađena lančanika uspoređena su s četvrtim u neobrađenom stanju nakon eksploatacijskog trošenja u identičnim uvjetima. Na svim lančanicima provedena su mjerenja mase, ravnosti i dimenzija profila ozubljenja prije i nakon obrade te nakon eksploatacijskog trošenja. Po završetku eksploatacijskog trošenja provedena su metalografska ispitivanja zone spojeva, difuzijske zone i jezgre lančanika nitriranog u plazmi i lančanika nitriranog TENIFER postupkom. Usporedbom dobivenih rezultata dolazi se do zaključka da je nitriranje u plazmi prikladniji postupak toplinske obrade za povećanje otpornosti trošenja lančanika bicikla od nitriranja u solnoj kupci.

Ključne riječi: plazma potpomognuto nitriranje, proces nitrokarburiranja, TENIFER, lančanik, bicikl.

Summary

The following study covers a detailed description of the plasma enhanced nitrating process and salt bath nitrocarburising TENIFER process as well as their use as a means to improve mechanical and tribological features of a bicycle chainring. The study deals with the historical development of the bicycle and bicycle types according to their purpose, taking into consideration critical components of a bicycle. The stress will be put on the tribological and mechanical features of a drivetrain, i.e. chainring-chain tribological system. The main focus of the experimental part of this study is a 22-tooth chainring which reprisents the low range gear ratio on a bicycle. Two of such chainrings have undergone a heat treatment as a part of a plasma enhanced nitrating process and one has undergone a salt bath nitrocarburising TENIFER process. The three of the processed chainrings were then directly compared to the fourth, which has not undergone a process of any sort, but has undergone exploitation wear test in similar conditions as the previous three chainrings. Afterwards, the four chainrings have undergone measurings of weight, flatness, and the dimensions of the profiles of the teeth before and after the exploitation wear test. Moreover, metallographic examinations of compound layer and diffusion zones have been conducted. By comparing these results, we have come to a conslusion that the plasma enhanced nitrating process is a better heat treatment process for enhancing wear resistance of a bicycle chainring as opposed to salt bath nitrocarburising TENIFER process.

Key words: plasma enhanced nitrating, nitrocarburising process, TENIFER, chainring, bicycle.

1. UVOD

Bicikl danas postaje prvi izbor prijevoza za sve veći broj ljudi na njihovim dnevnim putovanjima do radnog mjesta, fakulteta ili škole. U vrijeme kada smo suočeni s problemima globalnog zatopljenja, sve učestalijim prometnim zastojima u metropolama te visokom cijenom energenata bicikl nudi ekološki prihvatljiv način prometovanja, uštedu vremena i novca te slobodu osobnog prijevoza. Kao i svaki mehanički sklop, bicikl podliježe okolišnim utjecajima i trošenju kritičnih dijelova uslijed njegove uporabe. Pod kritične dijelove bicikla ubrajamo lanac i lančanike prijenosnog sustava te ležajeve pogona i kotača. Ovih nekoliko komponenti izložene su najvećim opterećenjima tijekom vožnje te predstavljaju mjesta na kojima možemo očekivati trošenje. Ako u obzir uzmemo kvalitetan bicikl srednje kategorije i vozača rekreativca, izuzevši potrošne dijelove kao što su pneumatici i kočione pločice, uz redovno održavanje jedinu preostalu investiciju u prvih nekoliko godina korištenja predstavljat će zamjena lanca i lančanika. Niski troškovi održavanja i trajni bicikli u budućnosti privući će još veći broj ljudi za svakodnevno putovanje biciklom.

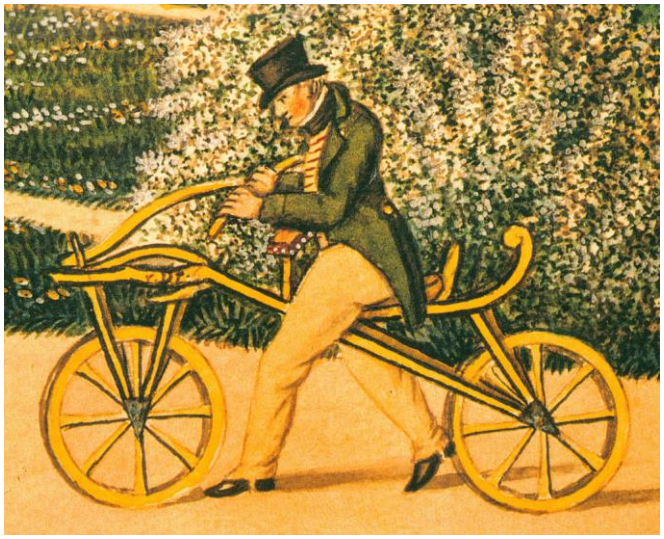
Predmet istraživanja u radu je praćenje trošenja lančanika bicikla s ciljem preporuke prikladne toplinske obrade za produljenje trajnosti lančanika. U radu su primjenejni postupci nitriranja u plazmi i nitrokarburiranja u solnoj kupci TENIFER. Ispitivanje eksploatacijskog trošenja bit će provedeno na četiri identična čelična lančanika pogonskog sklopa, od kojih su dva obrađena nitriranjem u plazmi, jedan nitrokarburiranjem TENIFER procesom te jedan koji je ostavljen u neobrađenom stanju. Završetkom jednakih perioda eksploatiranja sviju lančanika ponovljena su mjerenja dimenzija ozubljenja, ravnosti i mase. Rezultati su uspoređeni s istim mjerenjima provedenima prije i nakon toplinske obrade. Iz plazma nitriranog lančanika i lančanika nitrokarburiranog u solnoj kupci TENIFER izrezani su i pripremljeni metalografski uzorci. Usporedbom provedenih mjerenja i analizom mikrostruktura donesen je zaključak o optimalnoj toplinskoj obradi lančanika bicikla u svrhu poboljšanja otpornosti na trošenje.

Teorijski dio

2. BICIKL

2.1. Povijesni razvoj bicikla

Tambora je 2,722 metra visok vulkan na otoku Sumbawa u Indoneziji poznat po erupciji iz 1815.g. koja je bila jedna od najvećih vulkanskih erupcija u povijesti, koja je pridonijela klimatskim anomalijama 1816.g. zbog čega je ta godina nazvana „godina bez ljeta“. Usjevi su propali diljem svijeta, ljudi su gladovali, a za stoku nije bilo spasa. Ljudi nisu mogli prehraniti čak ni konje. Javlja se problem transporta. Njemački izumitelj Karl von Drais prvi je uvidio ovaj problem. Dolazi na ideju proizvodnje „mehaničkog konja“ koji bi omogućio brže kretanje u odnosu na hodanje. Draisov Laufmachine imao je veliki nedostatak, a to je nepostojanje pogonskog sustava.



Slika 1. Karl von Drais na svom originalnom trkaćem stroju[1]

Sljedeći veliki korak prema biciklu kakvog poznajemo danas napravio je engleski industrijalist i izumitelj John Kemp Starley. Starley 1885. predstavlja svijetu svoj bicikl pod nazivom „Rover Safety Bicycle“, odnosno „sigurnosni bicikl“. Ime je odlično opisivalo odmak od *high wheelera* koji su zbog svog dizajna ograničenog direktnim prijenosom morali

imati čim veći pogonski kotač kako bi se postigla čim veća brzina. Visok položaj sjedenja te pogon na prednjem kotaču koji umanjuje upravljivost *high wheeler*a zaslužan je za lošu reputaciju bicikla u 19-om stoljeću. Starleyjev *safety bike,* sa svojim okvirom dijamantnog oblika, ostaje zapamćen u povijesti kao jedan od najutjecajniji izuma svih vremena.

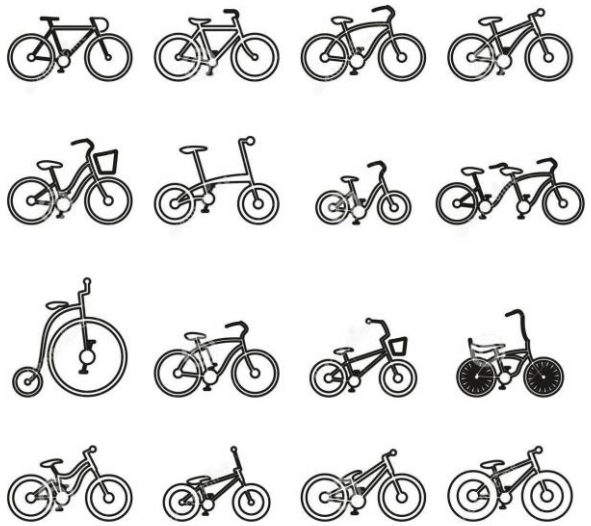


Slika 2. J.K. Starleyjev Rover Safety Bicycle[2]

Danas, gotovo 150 godina kasnije, većina bicikala ima okvir dijamantnog oblika. Unatoč raznim pokušajima konstruiranja boljeg okvira za bicikl, niti jedna izvedba nije bila uspješna poput ove [3].

2.2. Podjela bicikala

Podjelu bicikala prvenstveno diktira njihova namjena. Najjasniju razliku između bicikala raznih namjena u većini slučajeva činit će okvir, odnosno njegov oblik i geometrija, te veličina kotača i tip guma. Danas bicikle dijelimo na cestovne, brdske, gradske, sklopive, teretne, dječje, trekking, hibridne, električne, bmx, tandem… Svaka od osnovnih skupina ima svoju daljnju podjelu; tako se primjerice cestovni bicikli dijele na trkaće bicikle za duge etape, trkaće bicikle za urbane utrke, triatlon trkaće bicikle, trkaće bicikle za utrke na vrijeme, dvoranske trkaće bicikle popularno zvane fixie, cestovne bicikle za putovanja, cyclocross bicikle i gravel bicikle. Brdski bicikli također se dijele po disciplinama u kojima se koriste, no oni su jedina vrsta bicikala koja se uz tu podjelu dijele i po izvedbi okvira na bicikle „krutog repa“ i bicikle s potpunim ovjesom.



Slika 3. Skica podjele bicikala[4]

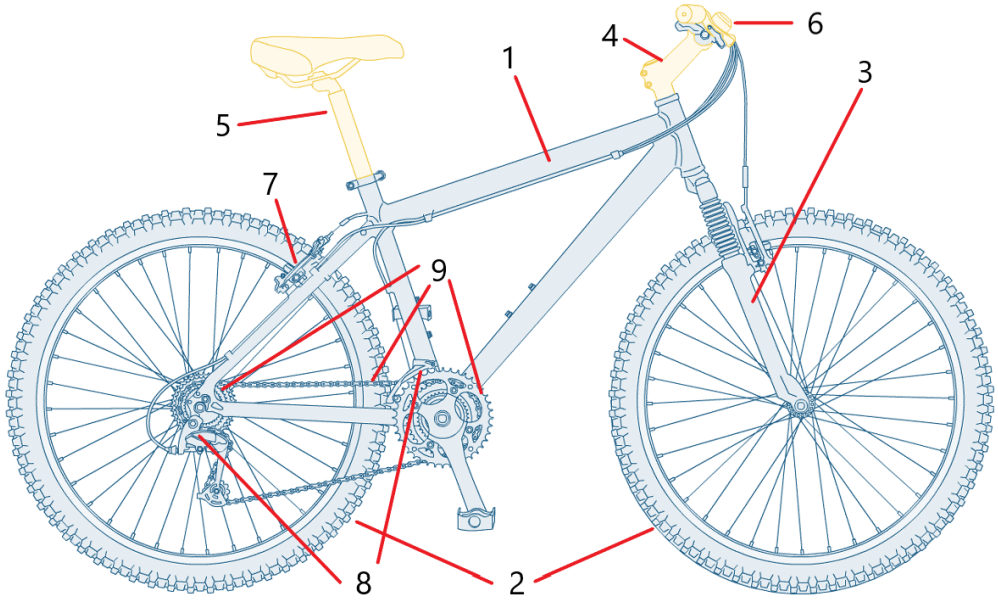
U ovome će radu sva testiranja biti provedena na dva slična *cross-country* brdska bicikla s „krutim repom“ te na dva brdska bicikla s potpunim ovjesom. *Cross-country* bicikli predstavljaju moderni ekvivalent Starlyjevom *saftey bikeu*. Nakon što se bicikl kao pojam usavršio u svakome smislu, *cross-country* bicikli zadržavaju neke od osnovnih značajki

klasičnog bicikla kao što su udobnost, sposobnost putovanja grubim terenom, brzinu te prilagodljivost svakodnevnom korištenju.

2.3. Konstrukcija bicikla

Dvije najvažnije komponente bicikla su okvir i set kotača. Bicikl je sastavljen iz sljedećih dijelova ili pod-sklopova:

1. Okvir
2. Kotači
3. Vilica (može biti kruta ili amortizacijska)
4. Sustav upravljanja: volan, lula volana i ležaj vilice
5. Sjedala, cijevi sjedala i obujmice cijevi sjedala
6. Ergonomski rukohvati te ručice mjenjača i kočnica
7. Kočnice (mogu biti disk kočnice, bubanj kočnice ili V-kočnice, te mogu biti mehaničke ili hidrauličke)
8. Mjenjač
9. Prijenosni sklop (pogon s pedalama, lanac i kazeta)



Slika 4. Dijagram dijelova bicikla

2.3.1. Okvir bicikla

Okvir bicikla nosivi je dio na koji se montiraju sve ostale komponente. Točnost dimenzija, kvaliteta materijala i izrade okvira direktno će utjecati na vozne karakteristike, ali i na kvalitetu rada svih ostalih komponenti montiranih na isti. Kao što je navedeno, upravo okvir određuje namjenu bicikla, vozne karakteristike i položaj vozača. S obzirom na to da je namjena bicikla odavno prerasla ideju jednostavnog prometala, opterećenja na okvir koja treba uzeti u obzir više nisu toliko jednostavna.

Zahtjevi na okvir bicikla:

- Dinamička promjenjiva opterećenja i dozvoljeno elastično savijanje
    - Vertikalno savijanje
    - Torzijsko savijanje
    - Savijanje osovine pogona i linije prijenosa
- Korozijska postojanost
- Masa
- Postojanost dimenzija i oblika
- Mehanička otpornost
- Apsorbiranje vibracija
- Estetika, trendovi i aerodinamika
- Ekonomičnost, tehnologičnost i recikličnost

Detaljnije će se opisati tri tipa dozvoljenog elastičnog savijanja pošto je njihov utjecaj na rad prijenosa uz svojstvo postojanosti oblika i dimenzija daleko najveći.

2.3.1.1. Dinamička promjenjiva opterećenja i dozvoljeno elastično savijanje

U tri tipa savijanja i dozvoljenih pomaka ubrajamo vertikalno savijanje, torzijsko savijanje i savijanje kućišta osovine pogona i linije prijenosa. Sva tri tipa savijanja i dozvoljenih pomaka usko su povezana. Ukrućivanje okvira u jednom smjeru odrazit će se u određenom porastu krutosti i u drugim smjerovima.

2.3.1.2. Vertikalno savijanje

Još u ranim fazama razvoja bicikla bilo je jasno da će upravo vertikalno savijanje omogućiti veću udobnost i bolje prianjanje guma uz podlogu. Okvir bicikla mora dozvoliti elastičnu deformaciju između dvije osi osovine kotača kako bi se pospješila količina vremena koju kotači provode u dodiru sa podlogom, što ujedno pospješuje trenje, čini bicikl udobnim i sigurnim za vožnju.

2.3.1.3. Torzijsko savijanje

Torzijsko savijanje rezultira pomakom *head tubea* i *seat tubea* u odnosu na ravninu u kojoj oboje leže. Najlakše ga je primijetiti na biciklima koji nose veliku količinu tereta na prednjem i stražnjem nosaču koji su pričvršćeni za okvir, drugim riječima, na *touring* biciklima. Ovakve elastične deformacije poželjne su samo s minimalnim dozvoljenim pomacima kako bi na taj način pospješili trenje za vrijeme promjene smjera kretanja bicikla.

2.3.1.4. Savijanje kućišta osovine pogona i linije prijenosa

O ovom tipu savijanja najčešće se govori s obzirom na to da se direktno povezuje s krutošću okvira. Kada vozač u stojećem položaju u gornjoj mrtvoj točci okretaja pedala optereti desnu nogu, kućište osovine pogona započinje svoj pomak ulijevo jer prirodni položaj

vozača diktira položaj bicikla koji je u tom trenutku nagnut na lijevu stranu. Ova vrsta savijanja godinama je smatrana nepoželjnom te se svaka elastična deformacija u liniji prijenosa prevodila u količinu energije koja je nepovratno izgubljena. Iako je svaka teorija i dalje diskutabilna, neki od vodećih *brandova* pokazali su kako minimalni dozvoljeni pomaci osovine pogona rezultiraju ujednačenijom krivuljom prijenosa snage tijekom okretaja pedala[5]. U okviru ovog rada savijanje kućišta osovine pogona i linije prijenosa najbitniji je zahtjev na okvir bicikla. Prekomjerno savijanje u ovoj liniji dovodi do povećanog trenja u ključnim trenutcima, odnosno u trenutcima kada je opterećenje na prijenos najveće te su ujedno i sile trenja najveće.

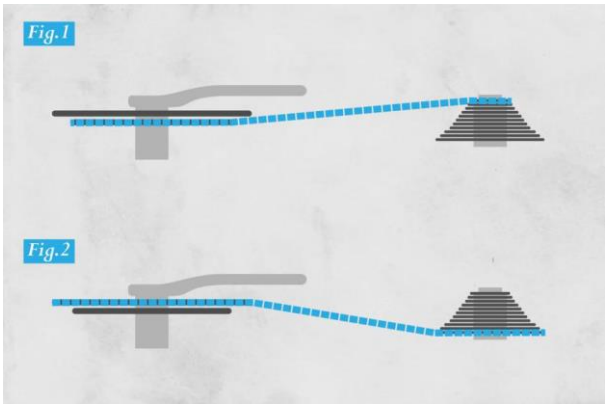
2.3.2. Kotači bicikla

Kotači također značajno određuju namjenu bicikla. Kotači se razlikuju prema gumi koja je montirana na njih i dvije dimenzije: promjeru obruča i širini obruča. Kotači brdskih bicikala danas dolaze u tri promjera: 29“ (700c obruč), 27,5“ (650b obruč) i tradicionalni 26“ kotač. Širina obruča varira od tradicionalnih 19mm do 100mm kod takozvanih „fat bike“ brdskih bicikala dizajniranih za vožnju pješčanim terenom ili zimske vožnje snijegom. Kotači moraju imati zadovoljavajuću čvrstoću uz što manju masu. Masa obruča i gume ima najveći efekt na ubrzanje i okretnost bicikla. Ovakva rotirajuća masa uzrokuje moment inercije odnosno tromosti koji vozač mora premostiti kako bi pokrenuo bicikl. Također, žiroskopski efekt – pojava koja nam dozvoljava vožnju na dva kotača – direktno je povezan s masom kotača. Ako bismo dali istom vozaču isti bicikl sa setom jako laganih kotača, a potom na bicikl stavili set znatno težih kotača, te proveli test ubrzanja i slalom vožnje, rezultat bi pokazao da bicikl s lakšim setom kotača ubrzava i mijenja smjer kretanja znatno brže. Nažalost svaki kotač može imati samo dvije od tri osnovne karakteristike: visoku čvrstoću, nisku masu i povoljnu cijenu.

2.3.3. Prijenos bicikla

Prijenos bicikla sastoji se od lanca, lančanika pogona i seta lančanika stražnjeg kotača odnosno kazete. U daljnjem tekstu rada set lančanika stražnjeg kotača nazivat ćemo isključivo kazeta, a na lančanike pogona referirati ćemo se samo s nazivom lančanik. Prema tipu prijenosa bicikle dijelimo na bicikle s brzinama i bicikle s jednim prijenosnim omjerom. Bicikli s brzinama mogu imati do 3 lančanika na pogonu i kazetu s maksimalno 12 lančanika na stražnjem kotaču. Naravno, kako bismo mogli odabrati različite prijenosne omjere moramo imati mjenjače. Napredak u tehnologiji i želja za jednostavnosti pri korištenju doveli su do novog trenda. Većina boljih bicikala današnjice odbacila je treći lančanik s pogona, te sada koristi kombinaciju manjeg lančanika (22 ili 24 zuba) koji omogućuje sporohodne prijenose za penjanje i većeg lančanika (32, 34 ili 36 zubi) koji pokriva prijenose potrebne za ugodno kretanje ravnim terenom ili spuštanje nizbrdo. Također, velik broj bicikala dolazi opremljen kazetama koje omogućuju raspon prijenosnih omjera od 500%. Ovakav sistem predstavlja tehnološki doseg kada su u pitanju bicikli. Sastoji se od kazete s 11 ili 12 lančanika od kojih najveći ima čak 50 zubi, a najmanji 10 zubi. Nešto više o tehnologiji koja je omogućila ovakve kazete reći ćemo u poglavlju *2.3.3.2. Lančanici i kazete.* Lančanik pogona ovog sistema ima naizmjenično postavljene tanke i debele zube koji su dizajnirani kako bi radili u paru s užim i širim karikama lanca. Prednosti ovog sistema su: uklanjanje prednjeg mjenjača i višestrukih lančanika na pogonu predstavlja uštedu na masi od oko 350 grama ili trećine kilograma (ova promjena mase uzima u obzir korištenje kazete veće mase), takozvani *narrow-wide* lančanik pogona gotovo u potpunosti eliminira problem padanja lanca, a najveća prednost ovog sistema je jednostavnost pri korištenju i održavanju. Jednostavnost korištenja očituje se korištenjem samo stražnjeg mjenjača, odnosno samo desne ručice mjenjača. Bitno je napomenuti da je ovakav prijenos moguć zbog napretka u tehnologiji koja je omogućila da lanci budu jači te da bolje podnose dijagonalnu putanju između prednjeg i zadnjih lančanika. Naime, bicikli do nedavno nisu dobro podnosili dijagonali položaj lanca (eng. *cross-chaining*) – kombiniranje najvećeg lančanika pogona s najvećeg lančanika kazete ili najmanjeg lančanika pogona s najmanjim lančanikom kazete bilo je strogo zabranjeno. Ovakva prijenosna kombinacija uzrokuje dodatno trenje između lanca i lančanika te nejednako opterećenje na valjčićima, kliznim prstenima i karikama lanca. Campagnolo i Shimano, dva najstarija proizvođača više brzinskih prijenosa za bicikle, i dalje ne preporučaju kombinacije

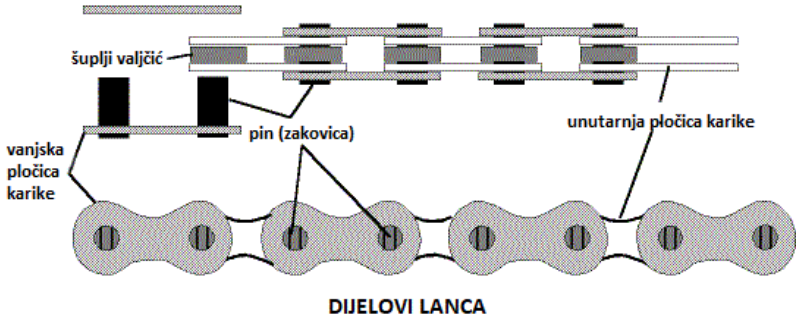
prijenosnika u kojima lanac putuje dijagonalno, dok SRAM, mlada i inovativna firma iz Njemačke, daje zeleno svijetlo svojim korisnicima da koriste sve prijenosne kombinacije[6].



Slika 5. Shematski prikaz dijagonalne putanje lanca (eng. cross chaining)[7]

2.3.3.1. Lanac

Bicikl je višestruko zapisan u povijest inovacijskih proizvoda. Britanski inženjer, biciklist i jedan od prvih industijalaca H.J. Lawson 1879. ponovno je upisao bicikl u povijesne knjige, ovog puta kao prvi stroj s lančanim prijenosom i pogonom na stražnjem kotaču. Nažalost u tom trenutku ograničenje je predstavljala loša kvaliteta tadašnjih lanaca. Iste je godine Švicarski inženjer Hans Renold migrirao u Manchester i tamo kupio malu proizvodnju lanaca za strojeve u tekstilnoj industriji. Hans Renold je zaslužan za dizajn lanca bicikla (i mnogih drugih strojeva) kakav poznajemo danas. Renoldov lanac s valjčićima (eng. *Renold's roller chain*) sastoji se od klinova, valjčića i pločica. Valjčići su u direktnom kontaktu sa zubima lančanika te drže pločice užih karika na pravilnom razmaku. Klinovi prolaze kroz valjčiće i spajaju dvije pločice te tako dobivamo šire i uže karike lanca. Renoldov dizajn lanca omogućio je bolje zadržavanje maziva, manje trenja, dugotrajnost i višu vlačnu čvrstoću. Suština Renoldova dizajna ostaje ne promijenjena do danas [3].



Slika 6. Shematski prikaz Renoldova lanca s valjčićima [7]

Tehnološki napredak ipak je doveo do mnogih poboljšanja ovog provjerenog dizajna. Pri izradi lanaca koriste se mnoge tehnologije toplinske obrade kao što su niklanje, nitriranje i prevlačenje titan-nitridnom prevlakom. Ovi postupci daju površinu otporniju na tribo-mehaničko trošenje, osiguravaju rad uz manje trenja te otpornost na koroziju atmosferskim uvjetima koji uključuju vlagu, dodir s vodom i blatom te slanom vodom u neposrednoj blizini mora. Čitav niz sitnih promjena primijenjen je na Renoldov lanac s ciljem boljeg prianjanja lanaca na lančanik i preciznijeg odabira brzina. Jedan od vodećih proizvođača lanaca za bicikl je KMC. Dalje će biti navedene pojedinosti KMC-ova dizajna s obzirom na to da bicikli na kojima će trošenje lančanika biti provedeno koriste ove lance. Najočitije promjene u odnosu na klasične lance su skošenja na unutarnjim i vanjskim pločicama karika te X-Bridge tehnologija. Većina modela zajedno s modelom na ispitnim biciklima posjeduju ove inovacije. X-Bridge je tehnologija pomoću koje se pločice karika proizvode prešanjem, te iako izgledaju potpuno ravne, zapravo nisu. Između dva provrta pločica vanjskih karika proteže se oblik sličan slovu „X“. Ovakav oblik karike omogućuje bolju promjenu brzina i osigurava višu vlačnu čvrstoću. Također pločice karika skupljih lanaca imaju provrt u centru zbog bolje odvodnje blata iz lanca. Klinovi ili zakovice KMC-ovih lanaca mogu biti šuplji ili zaobljenih krajeva s udubljenjem u centru[8].



Slika 7. KMC X9 lanac korišten na testnim biciklima[9]

2.3.3.2. Lančanici i kazeta

Prijenos većine bicikala današnjice sastoji se od lanca, seta lančanika na stražnjem kotaču koji nazivamo kazeta, lančanika pogona i mjenjača. Tehnološka dostignuća u pogledu kazeta i lančanika već su spomenuta u podnaslovu *2.3.3. Prijenos bicikla*. Lančanici i kazete bicikla mogu biti izrađeni od čelika, aluminijevih legura ili legura titanija. Čelični lančanici i kazete najotporniji su na trošenje, no također imaju i najveću masu što rezultira većom ukupnom rotacionom masom na biciklu koju vozač mora premostiti u obliku momenta tromosti. Za natjecateljske svrhe koriste se lančanici i kazete od legura titanija i aluminija, no takve komponente imaju manji životni vijek od čeličnih. Bitno je napomenuti kako pogonski sklop srednje klase bicikala (kao što su bicikli korišteni pri trošenju lančanika u ovom radu) također imaju jedan lančanik načinjen od aluminijske legure. Radi se o najvećem lančaniku s 44 zuba. Ostatak prijenosa bicikala na kojima su izvršena testiranja načinjen je od čelika. Postupak izrade lančanika i kazeta u suštini je sličan. Najveća razlika u procesu izrade lančanika uvjetovana je materijalom od kojeg je isti načinjen.

Koraci izrade lančanika načinjenih od čelika ili legura titanija su:

1. Konstruiranje lančanika u CAD softveru
2. Izrezivanje željenog oblika, odnosno vanjske nazubljene konture, ili otkivanje korištenjem žiga
3. Izrezivanje provrta i šupljina i dodatna obrada uz pomoć CNC stroja
4. Zakivanje takozvanih rampi i zakovica koje pomažu pri penjanju lanca na veći lančanik, odnosno promjeni prijenosne kombinacije na teži prijenos (ovaj postupak nije uobičajen na čeličnim lančanicima pošto se oni koriste za najmanji prijenosnik pogona s više prijenosnih kombinacija ili na biciklima s jednom prijenosnom kombinacijom)
5. Dodatna obrada laserskim jetkanjem te lasersko ispisivanje oznaka
6. Završna obrada poliranjem te u nekim slučajevima anodiziranje.

Koraci izrade lančanika načinjenih od aluminijevih legura su:

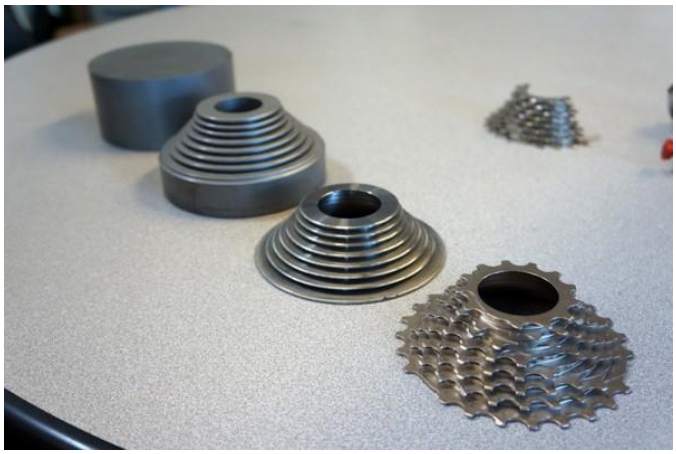
1. Konstruiranje lančanika u CAD softveru
2. Izrezivanje željenog oblika
3. Potencijalna toplinska obrada kovanjem
4. Izrezivanje provrta i šupljina i dodatna obrada uz pomoć CNC stroja
5. Postupak anodiziranja
6. Zakivanje takozvanih rampi i zakovica koje pomažu pri penjanju lanca na veći lančanik, odnosno promjeni prijenosne kombinacije
7. Završna obrada laserskim jetkanjem te lasersko ispisivanje oznaka

Za mnoge lančanike postupak anodiziranja provodi se prije obrade na CNC stroju. Ovakav redoslijed koraka omogućuje da pojedine površine zadrže sirovu aluminijsku površinu.

Većina kazeta izrađena je iz čelika. Tradicionalne se kazete montiraju na dio kotača koji sadrži sistem jednostavnog kvačila i tijelo glavčine (eng. *free hub body*). Postupak izrade tradicionalnih kazeta sličan je postupku izrade lančanika pogonskog sklopa, odnosno kazete se sastoje od niza lančanika poredanih od većeg prema najmanjem. Pojedinačni lančanici koji čine kazetu najčešće su izrađeni iz čelika istim postupkom izrade kao i najmanji prijenosnik pogonskog sklopa. Nakon izrade pojedinačnih lančanika isti se razdvajaju polimernim ili metalnim distancama. Svaki lančanik i distanca ima nekoliko provrta promjera od oko 3mm kroz koje prolaze vijci ili zakovice koji ih spajaju u cjelinu i na taj način dobivamo kazetu. Bitno je napomenuti da se pri proizvodnji kazeta višeg ranga koriste aluminijski ili magnezijski nosači lančanika. Ovakav pristup izradi kazete drastično smanjuje masu uz zadržavanje visokog životnog vijeka proizvoda. Na takav nosač montiraju se veći lančanici zaključno s lančanikom reda veličine 14 zuba, dok su ostali manji lančanici i dalje u potpunosti načinjeni od čelika.

Njemački proizvođač komponenti za biciklističku industriju SRAM uveo je novitete u izradu kazeta. Razvoj nove kazete započeo je od potpuno novog dizajna nosača kazete odnosno dijela kotača zvanog tijelo glavčine. Ovakvo konstrukcijsko rješenje omogućuje smanjenje kontaktne površine između kazete i tijela glavčine, odnosno više nije potrebno svaki od lančanika kazete zasebno vezati na tijelo glavčine. Sama kazeta se proizvodi iz jednog komada čelika. Proizvodni proces započinje na CNC stroju gdje se oblikuje stepenasti stožac. Nakon toga CNC stroj glodalom na svakoj od stepenica oblikuje vanjsku konturu

lančanika. Sljedeći je korak CNC obrada u ravnini okomitoj na prvotnu obradu. U ovom koraku dolazi do fizičkog razdvajanja lančanika i dovođenja istih na zadanu debljinu. U ovom koraku dolazi do uklanjanja velike količine materijala, odnosno svog materijala mimo debljine lančanika i mjesta spojeva gdje su lančanici međusobno vezani. Naposljetku dolazi do uklanjanja većeg dijela materijala iz središta kazete te bušenja dodatnih šupljina u lančanicima. Ovakve kazete omogućuju veliki raspon prijenosa u kombinaciji sa samo jednim lančanikom na pogonskom sklopu bez velikog rasta mase. Također, spojevi između velikih lančanika postavljeni su znatno bliže ozubini u odnosu na tradicionalne kazete koje su vezane na samom tijelu glavčine. Ovakvo konstrukcijsko rješenje rezultira kazetom puno veće krutosti što pospješuje preciznost pri promjeni brzina. Štoviše, šuplja unutrašnjost i mnogobrojni otvori omogućuju puno bolje odvođenje blata iz prijenosnog sklopa.



Slika 8. Koraci proizvodnog procesa SRAM kazeta iz jednog komada čelika[10]



Slika 9. SRAM kazeta iz jednog komada čelika[11]



Slika 10. SRAM XD nosač kazete i SRAM kazeta u presjeku[12]

Čelične kazete rijetko se koriste bez prethodnog površinskog prevlačenja. Najjeftiniji cjenovni rang kazeta prevlači se bromiranjem, srednja klasa podvrgava se procesu niklovanja te naposljetku najskuplje kazete nose titan-nitridne prevlake zlatne boje.

3. NITRIRANJE U PLAZMI

Strojni dijelovi i alati vrlo su često izloženi složenim mehaničkim opterećenjima, trošenju i djelovanju korozije. Nitriranje je jedan od najuobičajenijih postupaka kojim se značajno produljuje vijek upotrebe čeličnih dijelova korištenih u teškim eksploatacijskim uvjetima [13].

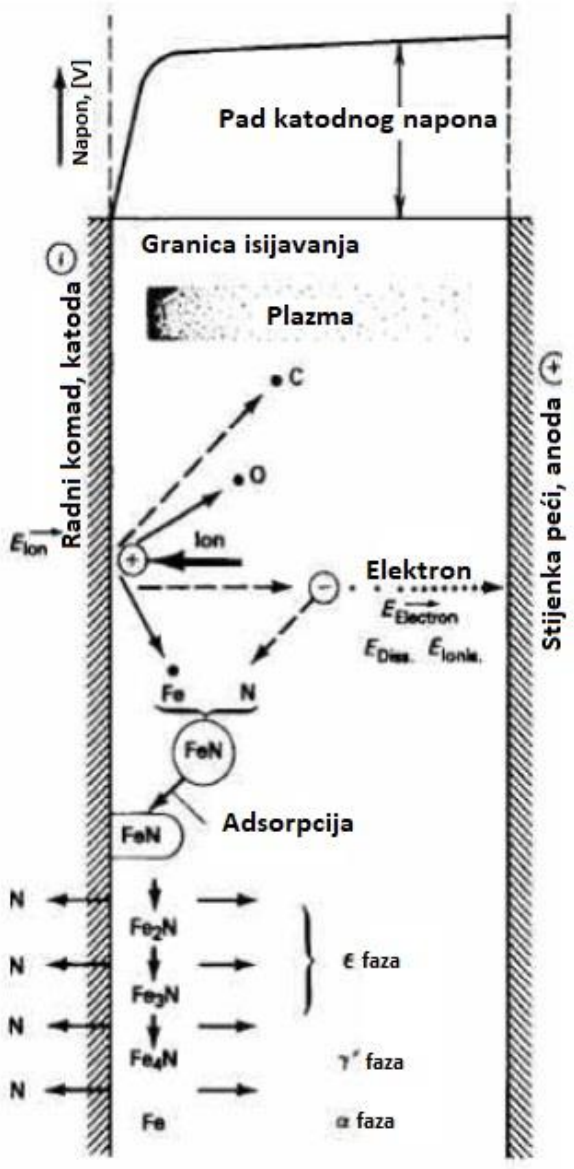
3.1. Opis procesa

Nitriranje u plazmi dobro je utemeljen komercijalni postupak otvrdnuća površine s ciljem povećanja otpornosti na trošenje, sprječavanja zamora materijala i povećanja korozijske otpornosti. Plazma je smjesa vrućih plinova koji se zagrijavaju pod utjecajem elektropotencijala te isijavaju svjetlost i bivaju ionizirani. Radni komad koji podvrgavamo postupku nitriranja spaja se u strujni krug kao katoda, dok stjenke peći predstavljaju anodu. Vrijednosti elektropotencijala imaju iznos između 0,3kV i 1kV. Čestice plina ubrzavaju prema katodi što zahtjeva razumno dug čisti put, iz ovog razloga većina se plazma procesa izvodi u vakuumu. Tlak pri kojem se proces nitriranja u plazmi provodi obično iznosi između 100Pa i 1000Pa. Ovakav raspon tlaka smatra se grubim vakuumom. Plinovi potrebni za proces dovode se odvojeno, jednu od uobičajenih kombinacija čine vodik (H_2) i dušik (N_2). Argon (Ar) se koristi u početnim fazama procesa kao plin za prskanje sa zadaćom čišćenja površine od supstrata[14]. Pomoću izbijanja isijavanjem u smjesi plinova dušik (N) penetrira površinu čelične katode prethodno zagrijane na temperaturu reda 500°C i difundira u čelik. Ovisno o parametrima procesa i sastavu nastaje difuzijska zona debljine do 0,7*mm*. Ovisno o parametrima postupka može , ali i ne mora nastati zona spojeva.

3.2. Kemijske reakcije pri nitriranju u plazmi

U difuzijskoj zoni dolazi do promjene mikrostrukture s dovođenjem prvog intersticijskog atoma dušika (N) u čvrstu otopinu. Kada je granica topljivosti dosegnuta, dolazi do stvaranja vrlo čistih koherentnih precipitata nitrida. Značajna promjena u čvrstoći pojavljuje se tek pri stvaranju precipitata nitrida, a dobivene vrijednosti tvrdoće ovisit će o

udjelu legirnih elemenata koji pogoduju stvaranju nitrida. Zona spojeva sastoji se od intermetalnih spojeva γ′-faze (Fe_4N) i ε-faze ($Fe_{2-3}N$) te nitrida legirnih elemenata[15]. Debljina zone spojeva iznosi najviše 20 μm. Najbolja otpornost na trošenje zapažena je kod slojeva koji se pretežno sastoje od ε-faze. Veći udio legirnih elemenata smanjuje debljinu zone spojeva te sveukupnu dubinu nitriranja[16]. Zona spojeva još se naziva i bijeli sloj zbog bijele boje polirane i jetkane površine.



Slika 11. Koebelov model mehanizma plazma nitriranja[16]

Prema Koebelovu modelu za vrijeme nitriranja u plazmi dolazi do pada napona u tzv. korici plazme (eng. *plasma sheath*) koja predstavlja pozitivno nabijeno područje gdje ioni

ubrzavaju prema katodi te posjeduju najviše nivoe kinetičke energije. Za vrijeme nitriranja odvijaju se tri reakcije na površini tretiranog materijala.

Za vrijeme prve reakcije, željezo i nečistoće uklanjaju se s površine postupkom zvanim prskanje ili reakcijom redukcije vodikom. Udaranjem iona vodika ili argona u radnu površinu dolazi do uklanjanja nečistoća koje vakuumski sustav potom odvodi iz peći. Uklanjanje ovih nečistoća dozvoljava difuziju dušika na površinu.

Tijekom druge reakcije kao rezultat udara ispranih ioniziranih atoma dolazi do formiranja željezo nitrida (1).

$$Fe + N \longrightarrow FeN \quad \textbf{(1)}$$

Tijekom treće reakcije započinje raspad željezo nitrida pod kontinuiranim prskanjem plazme. To uzrokuje nestabilnost željezo nitrida koje se raspada na ε-fazu, γ′-fazu te željezo-dušik zonu spojeva. Ovaj proces opisuje *slika 11.* te jednadžbe (2),(3),(4) i (5) [16].

$$2FeN \longrightarrow Fe_2N + N \quad \textbf{(2)}$$

$$3Fe_2N \longrightarrow 2Fe_3N + N\ (\varepsilon\text{-faza}) \quad \textbf{(3)}$$

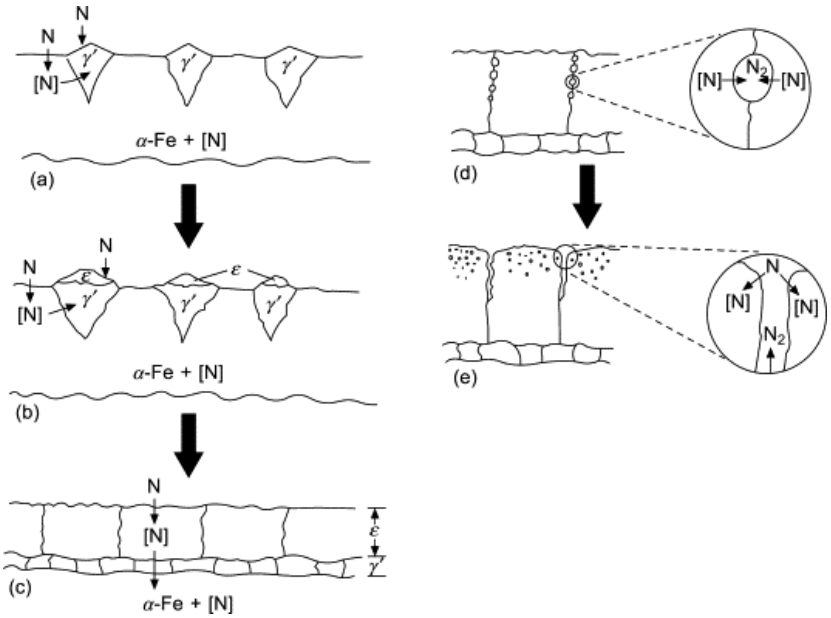
$$4Fe_3N \longrightarrow 3Fe_4N + N\ (\gamma'\text{-faza}) \quad \textbf{(4)}$$

$$Fe_4N \longrightarrow 4Fe + N\ (\text{željezo/dušik zona spojeva}) \quad \textbf{(5)}$$

Slika 2. prikazuje formiranje zone spojeva za vrijeme nitriranja. U plazmi ubrzani se elektroni sudaraju s česticama dušika. Pri nižim nivoima energije elektrona ovakvi su sudari elastični, no povisi li se energija elektrona, kao na primjer pri plazma pražnjenju isijavanjem, takvi sudari postaju plastični. Takvi plastični sudari molekula ili atoma rezultiraju njihovim pobuđivanjem. Pobuđena molekula može spontano započeti jedan od slijedećih procesa:

- Otpuštanje elektrona, te povratak na temeljno stanje,
- disocijaciju ili
- ionizaciju.

Ovi fenomeni temeljni su razlog zašto je moguć plazmom potpomognuti proces nitriranja. Udari elektrona s molekulama plina rezultiraju stvaranjem iona slobodnih radikala i molekula u pobuđenom stanju koje pridonose reaktivnosti površine te difuziji dušika [17].



Slika 12. Nastanak zone spojeva[18]

Prskanje dijela koji treba nitrirati druga je velika prednost plazma procesa pošto ujedno dolazi do čišćenja te se udarna energija koristi za grijanje dijela i aktivaciju njegove površine. Vodik također ima važne uloge u početnoj fazi čišćenja te tijekom procesa difuzije dušika. U drugoj fazi, vodik sudjeluje u reakciji redukcije, ali također utječe na sastav zone spojeva putem razrjeđivanja i spuštanja potencijala u atmosferi komore [16].

Iako kisik nije prisutan zbog vakuuma korištenog za vrijeme procesa, ipak može doći do pojave razugljičenja uslijed reakcije atoma ugljika iz čelika te aktivnih vodikovih skupina iz plazme. Njihova reakcija rezultira pojavom CH_3 skupina. Ovakvo razugljičenje može biti korisno, pošto odvođenjem ugljika s površine čelika jača difuznost dušika u čelik. U slučaju prisutnosti kisika u komori dolazi do jačeg efekta razugljičenja zbog stvaranja CO_2, no ako koncentracija kisika naraste iznad 3%, tada dolazi do stvaranja sloja oksida koji onemogućuje prolazak ugljika iz jezgre na površinu čelika te djelomično zaustavlja proces razugljičenja [19].

Argon se također koristi u prvoj fazi procesa plazma nitriranja kao sredstvo za čišćenje. Ovakva primjena argona moguća je zato što je argon teži plin od dušika i vodika. Kada ioni argona ubrzaju njihova je kinetička energija viša od kinetičke energije ostalih iona što pojačava efekt čišćenja pri sudaru sa supstratom. Posebna pažnja posvećuje se omjeru plinova pošto prekomjerna primjena argona može rezultirati jetkanjem površine. Uobičajeni omjer plinova iznosi 95% H_2 i 5% Ar ili 90% H_2 i 10% Ar što ujedno predstavlja i maksimalnu primjenjivu količinu Ar [16].

3.3. Prednosti i nedostaci nitriranja u plazmi

3.3.1. Prednosti

Plazma nitriranje najmlađa je tehnologija nitriranja, iako je bila zapostavljana prvih 50 godina nakon njezina otkrića; napredak u tehnologiji omogućio je pad cijena opreme i implementaciju tehnologije na industrijskoj razini. Neke od prednosti ove tehnologije su :

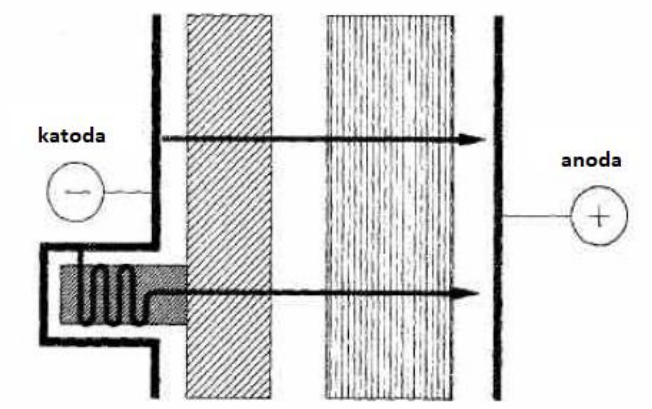
- Korištenje ekološki prihvatljivih plinova poput dušika, vodika i argona koji ne predstavljaju opasnost za ljude i okoliš. Ovaj aspekt plazma nitriranja predstavlja veliki napredak naspram nitriranju u solnoj kupci koja kao nusproizvod razvija niz toksičnih plinova.
- Ne postoji rizik od zapaljenja. Iako vodik može biti opasan, u slučaju plazma nitriranja ne postoji rizik od izbijanja plamena zbog vakuuma u komori.
- Kratkotrajni ciklusi. Svojstva plazme pojačavaju stopu deponiranja dušika unutar površine čelika zbog bombardiranja ionima i prisutnosti visoko aktivnih skupina. Kratko vrijeme zagrijavanja također skraćuje vrijeme ciklusa u nekim slučajevima.
- Automatizacija. Automatizacijom se smanjuje utjecaj ljudskog faktora, odnosno smanjuje se mogućnost greške te raste pouzdanost i ponovljivost procesa s metalurškog gledišta.
- Niska potrošnja plinova potrebnih za proces i niska potrošnja energije rezultiraju niskim operativnim troškovima.
- Mogućnost primjene na većinu čelika. Proces također omogućuje nitriranje aluminija i nehrđajućih čelika dok to nije moguće postići drugim procesima nitriranja.
- Plazma nitriranje omogućuje selektivno nitriranje, odnosno nitriranje samo određenih površina.

- Niska stopa razugljičenja. Zbog odvijanja procesa u vakuumu koncentracija kisika u komori je niska. Na ovaj način izbjegavamo reakciju kisika i ugljika što rezultira smanjenim razugljičenjem površine čelika.
- Niski troškovi održavanja opreme i vrlo niski operativni troškovi [16].

3.3.2. Nedostatci

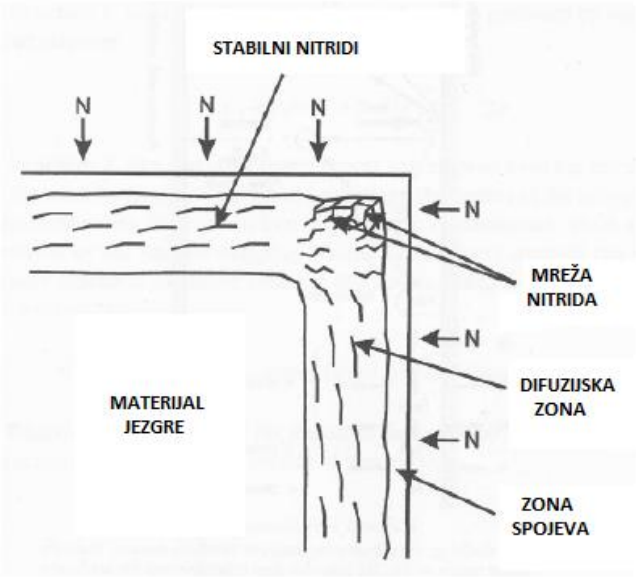
Plazma procesne tehnologije intenzivno su razvijane u posljednjih 20 godina. Ove tehnologije omogućuju provođenje zavarivanja i procesa difuzijskog prevlačenja na velikom spektru materijala. Dostupne su različite varijante ovog procesa, no mnoge još nisu komercijalno primjenjive. Glavni je razlog tome visoka cijena opreme na tržištu koja čini procese ekonomski neisplativima za mnoge industrijske primjene. Zbog ovih razloga inicijalno ulaganje u opremu za plazmom potpomognuto nitriranje predstavlja najveći nedostatak u odnosu na procese nitriranja u solnoj kupci ili konvencionalni proces nitriranja u plinu.

Drugi nedostatak ovog procesa je efekt šuplje katode. Šuplja katoda naziv je za područje niske vrijednosti vakuuma gdje porub plazma isijavanja ne prati konturu dijela na kojem se provodi proces. Ovaj se efekt obično pojavljuje u slijepim rupama gdje dolazi do zarobljavanja elektrona te njihove migracije kroz stjenke rupe. Ovaj efekt uzrokuje visok nivo ionizacije, što uključuje pojačani intenzitet ionskog bombardiranja, te rezultira pregrijavanjem tih područja čelika što može dovesti do spaljivanja ili prekomjernog prskanja dijela u zahvatu[20]. *Slika 13.* shematski prikazuje mehanizam efekta šuplje katode pomoću trajektorija elektrona u plazmi.



Slika 13. Shema mehanizma efekta šuplje katode[20]

Slika 14. prikazuje nepravilnost ruba kakva se može javiti tokom plazma nitriranja. Do ovog defekta može doći zbog lokalnog rasta temperature uzrokovanog električnim pražnjenjem uz izraženi rub (eng. *corona discharge*). Ovakav porast temperature omogućuje visoku difuznost dušika što rezultira stvaranjem mreže nitrida. Ovaj efekt češća se javlja pri postupcima prevlačenja[21].

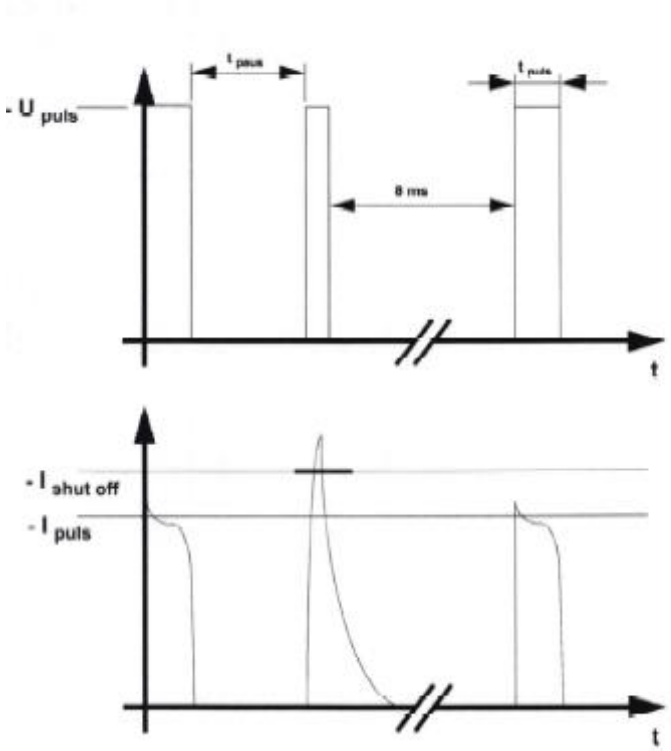


Slika 14. Shema nepravilnosti ruba pri plazma nitriranju[21]

3.4. Pulzirajuća plazma

Stvaranje plazme ovisi o niskom pritisku i kontroli smjese plinova u komori, te naponu električne struje. Tijekom samih početaka primjene plazma procesa za stvaranje i kontroliranje plazme korišten je generator istosmjerne struje. Problem takvog procesa je pojava električnog luka između anode i katode [22]. Sredinom 1970-ih, znanstvenici na sveučilištu u Aachenu u Njemačkoj razvili su pulsirajuću tehnologiju istosmjerne struje. Ova tehnologija je omogućila kontrolu trajanja dužine pulsa i razmaka između dva pulsa. Na ovaj način spriječeno je zatvaranje električnog luka između anode i katode. Obično je trajanje pulsa zadani parametar, dok razmak između dva pulsa konstantno varira kako bi temperatura

obratka ostala u zadanim granicama. Ovakva je oprema danas široko dostupna te može raditi na frekvenciji od 1kHz do 10kHz.



Slika 15. Prikaz ulazne i izlazne karakteristike generatora plazme[23]

4. NITROKARBURIRANJE POSTUPKOM TENIFER

Postupak TENIFER jedan je od jednostavnijih postupaka nitrokarburiranja. Provodi se u solnoj kupci, sačinjenoj od lužine cijanida i lužine karbonata kao glavnih konstituenata.



Slika 16. Osnovne kemijske reakcije u solnoj kupci TENIFER

Temperatura kupke može varirati u intervalu od 480°C do 630°C, no kao standardna vrijednost obično se koristi 580°C. Dijelovi su predgrijani na temperaturu od 350°C do 400°C pri normalnim atmosferskim uvjetima. Predgrijavanjem se osigurava da u kupku ulaze potpuno suhi dijelovi te da njena temperatura ne padne ispod 540°C što može negativno utjecati na zonu spojeva. Nakon što vrijeme istekne, dijelovi se hlade.

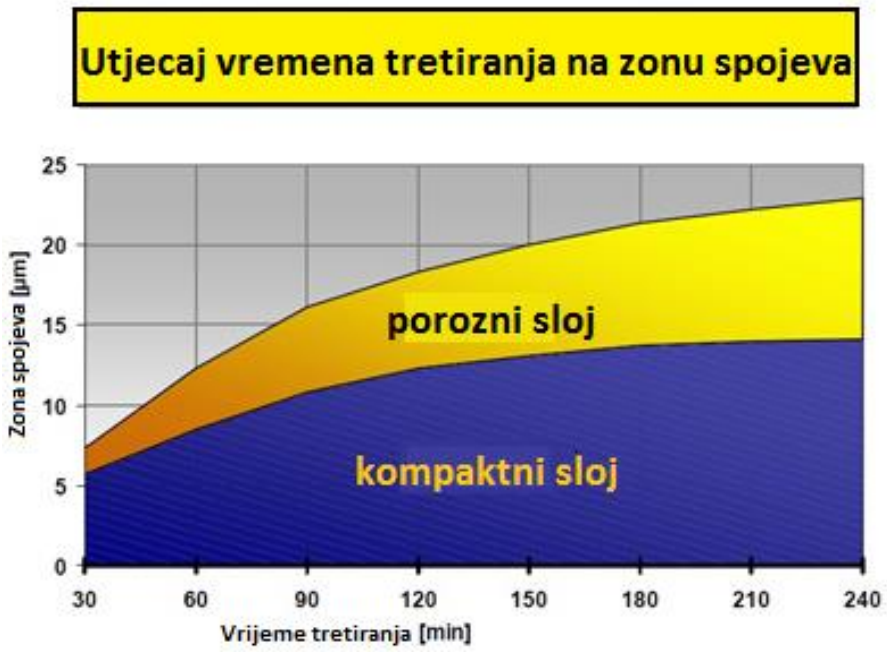
Hlađenje je moguće izvesti u više medija:

1. Vodom
2. Oksidirajućom kupkom AB1
3. Strujanjem zraka
4. Uljem za hlađenje
5. Dušikom

Postupak je prihvaćen u širokom nizu primjena jer na ekonomičan način može zadovoljiti tražena svojstva.

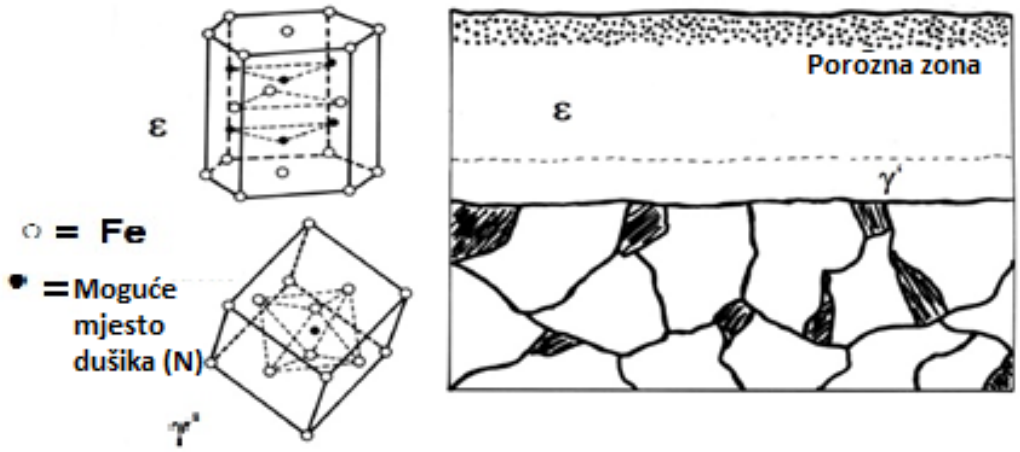
Nitrokarburirana površina dijeli se na dvije zone – zonu spojeva i difuzijsku zonu. Ukupna debljina difuzijske zone ovisi o površinskoj pripremi nitrokarburiranog dijela, temperaturi i sastavu kupke, te trajanju procesa.

Zona spojeva nalazi se na samoj površini dijela. Nastaje kada dušik dosegne granicu topivosti u feritu. Zona spojeva se nakon nitrokarburiranja u solnoj kupci TF1 obično sastoji od ε+ γ` nitrida. Po kemijskom sastavu ε -faza je $Fe_3N$ ili $Fe_2N$, a γ `-faza je Fe_4N. Također, mogu biti prisutni oksidi željeza Fe_2O_3, Fe_2O_4 i karbonitridi. Debljina zone spojeva iznosi najviše do 20 μm. Najbolja otpornost na trošenje zapažena je kod slojeva koji se pretežno sastoje od ε-faze Fe_3N. Na debljinu zone spojeva utječe temperatura kupke, udio cijanida, materijal te vrijeme trajanja postupka. Veći udio legirnih elemenata smanjuje debljinu zone spojeva te sveukupnu dubinu nitriranja. Porastom vremena tretiranja površine dolazi do rasta poroznog sloja zone spojeva [5].



Slika 17. Utjecaj trajanja postupka na poroznost zone spojeva [5]

Difuzijska zona nalazi se ispod zone spojeva. Dušik je automatski otopljen u željeznu rešetku. Difuzijska zona sadrži kemijske elemente dušik, ugljik, kisik (u čvrstom ili djelomično precipitiranom stanju) dovedene u materijal tijekom nitrokarburiranja. Debljina difuzijske zone ovisi o topivosti dušika u kristalnoj rešetci α -željeza. Topivost je ovisna o temperaturi nitrokarburiranja, a maksimalno može iznositi 0,1 % N. Strukturu difuzijske zone čine α mješanci, γ' željezni nitridi, te karbidi i karbonitridi.



Slika 18. Struktura nitrokarburiranog sloja [5]

Eksperimentalni dio

5. PLAN POKUSA

5.1. Tribosustav „lanac - lančanik“

Većina bicikala od povijesnog trenutka kada je J.K. Starley konstruirao revolucionarni *Rover Safety Bicycle* do danas koristi lančani prijenos, uz iznimku malog broja gradskih bicikala koji koriste remeni prijenos. Povijesni razvoj, konstrukcijske izvedbe i tehnološki napredak ovog sistema detaljno je opisan u poglavlju 2.3. Konstrukcija bicikla. U nastavku će biti objašnjeni mehanizmi triboloških trošenja koji se javljaju za vrijeme rada ovog sustava.

5.1.1. Mehanizmi trošenja u tribosustavu „lanac - lančanik“

Lanac se koristi za prijenos snage i gibanja s lančanika pogonskog sklopa na lančanik stražnjeg kotača ili kazetu. Pri kontaktu lanca s lančanicima najveća se naprezanja javljaju na mjestima dodira zubi lančanika koji su trenutno u zahvatu s lancem. Na svakom od zubi lančanika u zahvatu s lancem dolazi do kontaktnih pritisaka. Rolandov lanac s valjčićima kakav koriste bicikli minimalizira trenje klizanja na ovim dodirnim točkama, odnosno većinski govorimo o trenju kotrljanja. Mjesta kontaktnih pritisaka nakon nekog vremena bivaju plastični deformirana, te vrlo često pokazuju tragove naljepljivanja materijala lanca. Drugo kritično mjesto trošenja predstavljaju bočne stranice svakog zuba koje u kontaktu s unutarnjim površinama karika lanca preuzimaju manji dio naprezanja. Na ovim mjestima dolazi do pojave trenja klizanja. Kod bicikala s više prijenosnika na pogonskom sklopu te kazetom na stražnjem kotaču ovu pojavu možemo minimalizirati korištenjem kombinacija koje eliminiraju dijagonalnu putanju lanca.



Slika 19. Fotografija lanca u zahvatu s lančanikom kazete

Očekivani mehanizmi trošenja koji se javljaju u tibosustavu „lanac - lančanik“ jesu:

- adhezijsko trošenje,
- abrazijsko trošenje,
- umor površine i
- tribokorozija.

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Adhezijsko trošenje karakterizira prijelaz materijala s jedne klizne plohe na drugu pri relativnom gibanju zbog procesa zavarivanja krutih faza. Umor površine predstavlja odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena naprezanja. Tribokorozija ili tribokemijsko trošenje je mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem [24]. Udio adhezijskog i abrazijskog trošenja direktno je povezan s uvjetima u kojima je bicikl korišten. Ako je bicikl vožen makadamskim putevima i šumskim stazama, odnosno podlogama koje rezultiraju velikim unosom čestica blata, pijeska ili prašine, zastupljeniji će biti abrazijski mehanizam trošenja. U slučaju kada je bicikl vožen isključivo po asfaltiranim podlogama, uz pretpostavku da je prijenos redovno održavan i podmazivan, prevladavat će adhezijski mehanizam trošenja. Umor površine pojavit će se nakon predviđenog broja ciklusa koje prijenosni sklop mora izdržati. Umor površine rezultira odvajanjem čestica metala, odnosno ivera, koje zadržane mazivom pojačavaju trošenje mehanizmom abrazije. Do ovakvog rezultata dolazi zbog manjkavog održavanja, odnosno zanemarivanja potrošenosti lanca, lančanika i njihove zamjene. Tribokorozija kod prijenosa

modernog bicikla rijetka je pojava s obzirom na to da većina dijelova prijenosa poznatih proizvođača ima visoku korozijsku postojanost neovisno o rangu opreme. Obično je uzrokovana manjkavim održavanjem, agresivnom atmosferom u blizini mora, skladištenjem bicikla na vlažnom mjestu i njegovom rijetkom uporabom.

5.1.2. Čelični lančanik podvrgnut obradi postupkom nitriranja

Lančanici koji su objekt ovog rada načinjeni su od čelika. Proizvođač potencijalnu toplinsku obradu lančanika drži tajnom. U svrhu ovog rada stanje u kojem su lančanici isporučeni nazivat ćemo neobrađenim stanjem. Eksploatacijskom trošenju podvrgnuta su četiri lančanika. Dva lančanika su nitrirana plazma potpomognutim procesom, dok je jedan nitrokarburiran TENIFER procesom. Plazma potpomognutom procesu prethodilo je čišćenje površine ionima argona u trajanju od dva sata. Sam proces proveden je na temperaturi od 470°C u atmosferi relativno malog udjela dušika u trajanju od šest sati. TENIFER postupak proveden je na temperaturi od 580°C u trajanju od dva sata.

Tablica 1. Parametri postupka otprašivanja i nitriranja u plazmi

Parametri procesa	**Ugrijavanje**	**Otprašivaanje**	**Plazmatsko nitriranje**
Temperatura	20 – 420	420 – 450 °C	470 °C
Vrijeme	1 h	1 h	6 h
Sastav plinova	100% H_2	90% H_2, 5% N_2, 5% Ar	85% H_2, 5% N_2, 10% Ar
Snaga plazme	-	1000 W	1800 W
Napon	-	420 V	560 V
Tlak	2 mbar	2 mbar	2mbar

Cilj nam je ispitati i usporediti nitrirane lančanike s lančanikom u isporučenom stanju, koji za nas predstavlja početno ili neobrađeno stanje. Očekivani rezultat je dulji eksploatacijski vijek lančanika.



Slika 20. Lančanik u neobrađenom stanju fotografiran za vrijeme mjerenja ravnosti na koordinatnom mjernom uređaju



Slika 21. Lančanik nitriran plazma potpomognutim proces fotografiran nakon ugradnje na pogonski sklop prije početka eksploatacijskog trošenja

5.2. Opis testnih bicikala

Eksploatacijsko trošenje lančanika provedeno je na četiri bicikla. S namjerom podvrgavanja lančanika najtežim mogućim uvjetima korištenja test je podijeljen u dva dijela. Za prvi dio testa korištena su dva bicikla prilagođena za duga putovanja po svim podlogama i gotovo svim terenima. Radi se o *cross-country* brdskim biciklima bez stražnjeg ovjesa. Ova dva bicikla imaju ugrađene nosače tereta kako bi omogućili prijevoz opreme, zaliha hrane i vode, te ostalih potrepština na dugom putovanju.



Slika 22. Fotografija cross-country bicikala prilagođenih za putovanja sa svom opremom

Ovi bicikli opremljeni su KMC-ovim početnim modelom devet brzinskog lanca izrađenim od nehrđajućeg čelika bez dodatnih prevlaka s X-Bridge tehnologijom izrade pločica karika i punim pinovima zaobljenih krajeva s udubljenjem u centru. Set lančanika stražnjeg kotača, odnosno kazeta ispitnih bicikala, ima raspon od 12 do 36 zuba. Ovakve kazete predviđene su za korištenje na biciklima s 29 inča kotačima, dok bicikli s 26 inča kotačima obično dolaze opremljeni kazetama s rasponom od 11 do 32 zuba. Pošto testni bicikli imaju kotače veličine 26 inča, ove kazete omogućuju veći broj lakših prijenosnih omjera i znatno lakši krajnji sporohodni prijenos. Ovakva kazeta u kombinaciji s lančanikom pogona veličine 22 zuba omogućuje vozaču uspon uz velike nagibe unatoč velikoj masi tereta

na biciklu. Kazeta ispitnih bicikala načinjena je od čelika, te je prevučena niklanjem. Pogonski sklop ispitnih bicikala na sebi nosi tri lančanika. Najveći veličine 42 zuba načinjen je od aluminijske legure i prevučen je postupkom anodiziranja, srednji lančanik ima 32 zuba, načinjen je od čelika i ima nikal prevlaku samo s lijeve strane po kojoj se lanac penje pri promjeni brzine. Predmet ovog rada je čelični lančanik pogona veličine 22 zuba o kojem ćemo reći više nešto kasnije.



Slika 23. Fotografija 3 x 9 prijenosa cross-country brdskog bicikla

Druga dva bicikla korištena za eksploatacijska ispitivanja pripadaju u skupinu short travel trail brdski bicikl. Radi se o biciklima koji imaju ovjes na oba kotača s hodom između 110mm i 140mm, te nešto agresivniju geometriju okvira u odnosu na klasični cross-country bicikl. Ova dva bicikla dizajnirana su za penjanje i spuštanje planinskim, odnosno stazama za brdski biciklizam. Šire gume s većim i razmaknutijim izbočinama gaznog sloja na ovim biciklima omogućuju vožnju po svim podlogama i prelazak svih prepreka čak i pri velikim nagibima, no također povećavaju otpor kotrljanju.



Slika 24. Fotografija short travel trail brdskih bicikli

Ovi bicikli opremljeni su identičnim KMC lancima s X-Bridge tehnologijom, no za razliku od prva dva bicikla ova dva imaju kazete s rasponom od 11 zuba do 32 zuba. Pogonski sklop ovih bicikala nosi samo dva lančanika, čelični lančanik s 22 zuba koji je predmet istraživanja ovog rada i čelični lančanik s 36 zubi. Ovakva kombinacija prijenosnika omogućuje jednostavnost uporabe. Prijenosnike pogonskog sklopa i prednji mjenjač možemo shvatiti kao reduktor na terenskim vozilima. Oni omogućuju odabir sporohodnog ili brzohodnog prijenosa. Prednosti korištenja pogonskog sklopa s dva lančanika od kojih veći ima 36 zubi su jednostavnija uporaba i veće odstojanje od tla. Nedostatak ovakvog pogonskog sklopa su veći razmaci u prijenosnim omjerima i manji broj prijenosnih kombinacija.



Slika 25. Fotografija prijenosa 2 x 9 short travel trail brdskog bicikla

5.3. Opis eksploatacijskih uvjeta

Prvi dio testa eksploatacijskog trošenja predstavlja uporaba lančanika na višednevnim putovanjima uz dodatno opterećenje teretom. Uz pomoć dva cross-country brdska bicikla sva četiri ispitna lančanika će biti vožena dio kilometara po cesti i bijelim putevima uz dodatni teret od oko 30kg. Na ovakvim višednevnim putovanjima lančanici su izloženi svim vremenskim uvjetima, velikoj količini prašine te čišćenju u ograničenim uvjetima prije svakodnevnog podmazivanja. Zbog velike mase natovarenih bicikala lančanik s 22 zuba bit će uključen na uzbrdicama koje premašuju 5% nagiba (ovisno o podlozi), ali također i pri prolasku preko ravnih blatnih dijelova makadama.

Drugi dio eksploatacijskog trošenja biti će proveden u još težim uvjetima. Testne vožnje provoditi će se na planinarskim stazama na Sljemenu gdje će bicikli biti suočeni sa zahtjevnim i neujednačenim terenom, velikim nagibom te velikom količinom prašine i blata. Prosječni nagibi planinske staze obično premašuju 12%, a mjestimice znaju dostizati i preko 20%. Penjanje ovakvim stazama predstavlja izuzetno dinamički promjenjivo opterećenje. Od vozača se uz konstantno opterećenje samog penjanja uzbrdo očekuju i povremeni kratkotrajni 100%-tni napori. Ovakvi kratkotrajni naleti eksplozivne snage potrebni su za zadržavanje momenta kretanja pri penjanju preko prepreka kao što su korijeni, stijene ili dijelovi meke podloge na kojima je otpor koturanja i do nekoliko puta veći no na tvrdoj i kompaktnoj podlozi. U žaru borbe sa tehnički zahtjevnim djelom staze vozač će često izazvati trzaje pedalama koji rezultiraju udarnim opterećenjem. Iz vlastitog dugogodišnjeg iskustva smatram kako je ovo najgori scenarij za prijenosnike snage na biciklu iako je inicijalno opterećenje manje nego na biciklu pod punim teretom opreme, potrepština i vozača za vrijeme putovanja.

Tablica 2. Tablica eksploatacijskih uvjeta

Oznaka lančanik	L1	L2	L3	L4
Obrada	Plazma nitriranje	Plazma nitriranje	Neobrađeno stanje	TENEFER
Duljina ispitivanja	70 km	70 km	70 km	70 km
Opterećenje	130 kg	75 kg (+ 25kg tokom 7km)	95kg	95kg
Način eksploatacije	-višednevno putovanje	-brdski biciklizam -višednevno putovanje	-brdski biciklizam	-brdski biciklizam
Podloga	-40% makadamski i zemljani putevi -60% cesta -mekane, poplavljene i rastresite podloge	-80% planinarske staze i makadamski putevi -20% cesta -korijenje i stijene	-80% planinarske staze i makadamski putevi -20% cesta -korijenje i stijene	-80% planinarske staze i makadamski putevi -20% cesta -korijenje i stijene
Teren	-korišten na nagibima od 5% do 22% (prosječni nagib ≈10%)	-korišten na nagibima od 5% do 25% (prosječni nagib ≈15%)	-korišten na nagibima od 5% do 25% (prosječni nagib ≈15%)	-korišten na nagibima od 5% do 25% (prosječni nagib ≈15%)
Okolišni uvjeti	-blato -prašina -velika količina oborina	blato -prašina	blato -prašina	blato -prašina

Tablica 3. Fotografije prvih znakova trošenja ispitnih lančanika

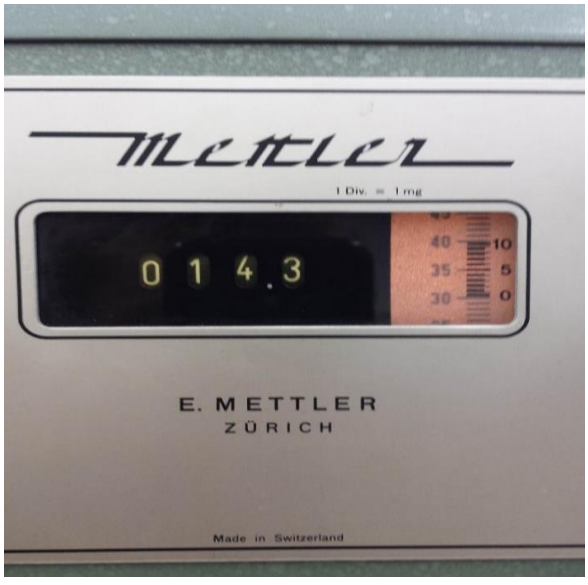
Opis fotografije	Fotografija
Prvi znakovi trošenja na lančaniku nitriranom plazma potpomognutim procesom nakon 15 kilometara. Fotografija je fotografirana na višednevnom putovanju nakon čišćenja i podmazivanja prijenosa.	
Prvi znakovi trošenja na neobrađenom lančaniku nakon 15 kilometara.	
Prvi znakovi trošenja na lančaniku nitriranom TENIFER postupkom nakon 15 kilometara.	

6. ISPITIVANJE LANČANIKA

U sklopu ovog rada provedena je toplinska obrada triju čeličnih lančanika pogonskog sklopa veličine 22 zuba. Dva lančanika su podvrgnuta procesu plazma potpomognutog nitriranja, dok je treći nitrokarburiran u solnoj kupci TENEFER. Tri obrađena lančanika biti će direktno uspoređena sa lančanikom u neobrađenom stanju u stvarnim eksploatacijskim uvjetima. Sva ispitivanja na lančanicima provedena su prije toplinske obrade, nakon toplinske obrade te nakon eksploatacijskog trošenja u svrhu određivanja promjena na istima.

6.1. Određivanje mase

Za vaganje lančanika korištena je digitalna vaga kako bi se odredila masa uzoraka zaokružena na desetinu grama [$g*10^{-1}$]. Za određivanje četvrte decimale grama [$g*10^{-4}$] korištena je analogna vaga sa sistemom poluga i utega.



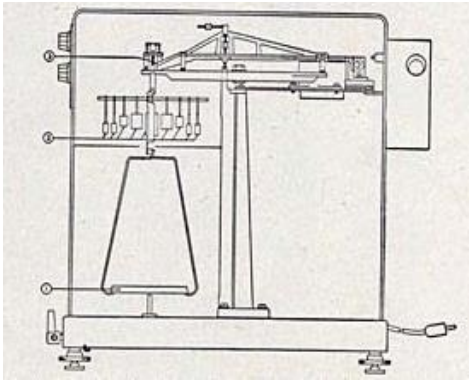
Slika 26. Prikaz očitavanja rezultata s analogne mehaničke vage

Na analognu se vagu unosi rezultat mjerenja s digitalne vage; drugu i treću decimalu prikazuje lijeva skala, a četvrtu decimalu čitamo s desne skale. Na *slici 27.* rezultat mjerenja na vagi iznosi 14.3305[g].



Slika 27. Princip očitavanja rezultata mjerenja [25]

Vaga koristi sistem poluga i utega kako bi došlo do uspostavljanja mehaničke ravnoteže nakon opterećivanja posude predmetom koji važemo.

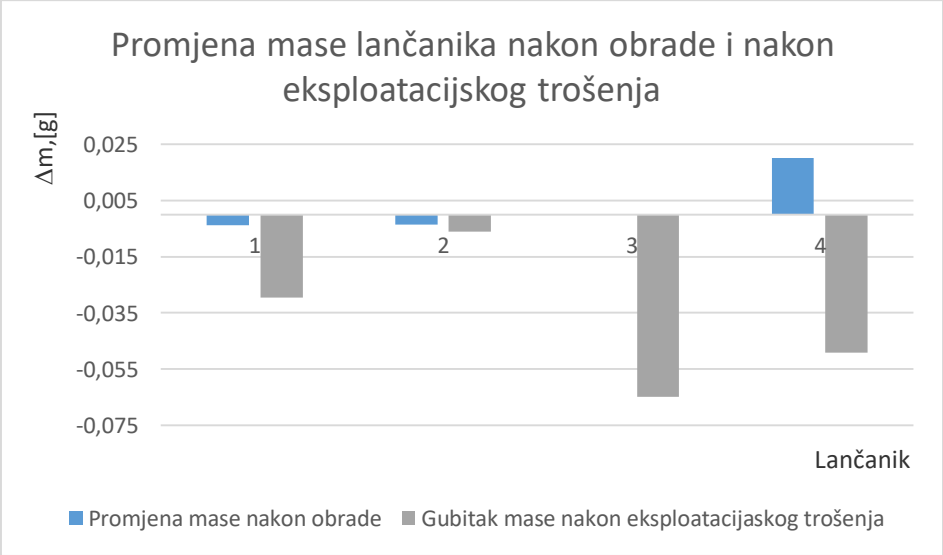


Slika 28. Presjek vage [25]



Slika 29. Prikaz vage [25]

Vaganjem lančanika utvrđena je njihova masa. Dobiveni su rezultati prikazani u *slici 30.*. Lančanici su blago modificirani zbog ugradnje na pogonski sklop s eksternim ležajem osovine. Brušenjem su uklonjena četiri pera s unutarnjeg oboda. Ovo je razlog zašto početna masa lančanika varira u ovako širokom intervalu. Vaganje je ponovljeno nakon toplinske obrade te još jednom nakon eksploatacijskog trošenja. Vaganjem smo utvrdili gubitak/dobitak mase nakon toplinske obrade i gubitak mase nakon eksploatacijskog trošenja.



Slika 30. Rezultati promjena mase lančanika nakon obrade i nakon trošenja

Gubitak mase nakon toplinske obrade kod nitriranja plazma potpomognutim procesom rezultat je čišćenja površine lančanika Ar atomima (eng. *sputtering*). Prirast mase nakon toplinske obrade lančanika TENIFER procesom pripisujemo stvaranju zone spojeva. Gubitci mase nakon eksploatacijskog trošenja kreću se u očekivanim intervalima. Lančanici 1 i 2 nitrirani plazma potpomognutim procesom pokazali su najveću otpornost trošenju odnosno bilježe najmanji gubitak mase. Lančanik 4 nitrokarburiran u solnoj kupci TENIFER bilježi nešto manji gubitak mase od lančanika 3 koji predstavlja neobrađeno stanje.

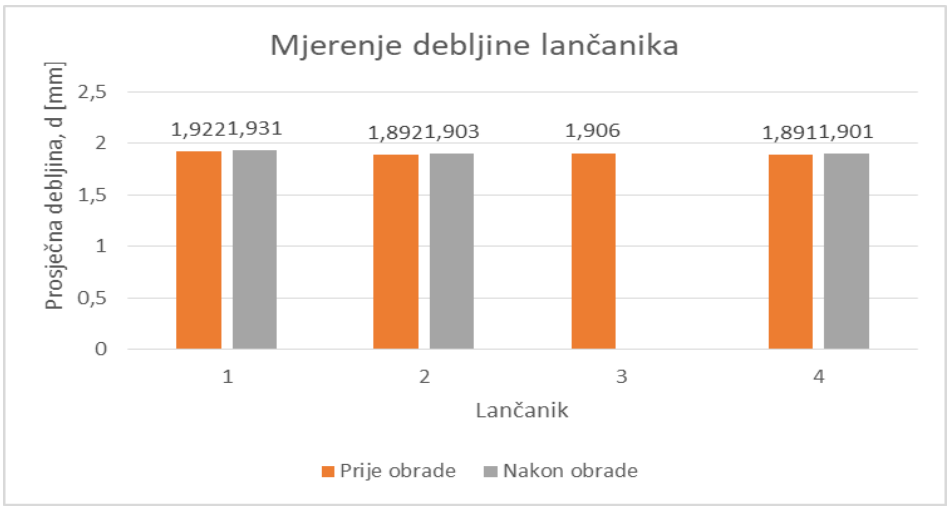
6.2. Određivanje debljine

Debljina lančanika mjerena je digitalnim mikrometrom. Mikrometar korišten za izvođenje mjerenja proizvod je kompanije Mitutoyo izrađen prema standardu IP-65 što ga čini otpornim na rad u dodiru s uljima i sredstvima za hlađenje. Mjerno područje ovog mikrometra iznosi od 0mm do 25mm,a točnost mu je 0,001mm.

Mjerenje debljine lančanika provedeno je na četiri pozicije na svakom od lančanika. Iz četiri mjerenja izračunata je srednja vrijednost koju ćemo koristiti za usporedbu rezultata u daljnjem radu. Srednje vrijednosti debljina lančanika prikazani su u dijagramu na *slici 32.*. Iz dobivenih rezultata možemo zaključiti da je debljina lančanika neznatno promijenjena. Veličina promjene debljine nema nikakav utjecaj na funkcionalnost lančanika.



Slika 31. Mjerenje debljine lančanika



Slika 32. Prikaz vrijednosti mjerenja debljine lančanika

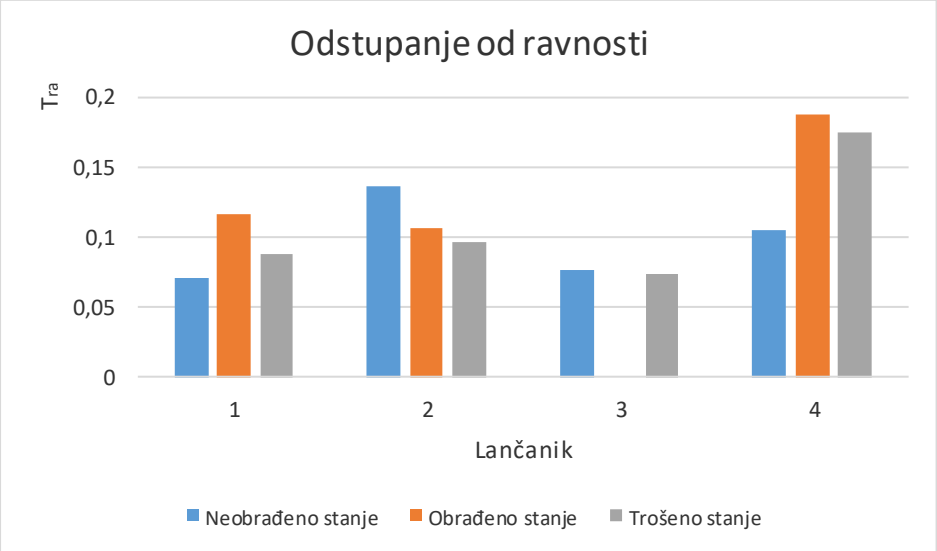
6.3. Mjerenje ravnosti

Ravnost lančanika izmjerena je na koordinatnom mjernom uređaju. Ravnost je stanje površine kod koje su sve točke u jednoj ravnini. Dozvoljeno odstupanje od ravnosti određeno je prostorom između dvije ravnine, koje su udaljene za vrijednost naznačenog odstupanja T_{ra}[26]. Zbog visokih temperatura provođenja TENIFER procesa postoji opravdan rizik od savijanja uzrokovanog temperaturnim širenjem. Proces plazma potpomognutog nitriranja provodi se na puno nižim temperaturama, te rizik od savijanja nije velik. Pošto veliko odstupanje od ravnosti čini lančanik neuporabljivim, provedeno je mjerenje odstupanja od ravnosti prije obrade kako bi dobili referentnu vrijednost. Nakon obrade i nakon eksploatacijskog trošenja provedena su također mjerenja ravnosti.



Slika 33. Mjerenje odstupanja od ravnosti lančanika

Vrijednosti odstupanja od ravnosti sva tri mjerenja prikazana su na *slici 34.*. Rezultati mjerenja pokazali su neznatne razlike između izmjerenih vrijednosti uz prihvatljivo odstupanje od ravnosti svih lančanika. Bitno je napomenuti da je na lančaniku 4 zabilježena najveća promjena parametra odstupanja od ravnosti, odnosno sumnja na utjecaj visoke temperature procesa je opravdana.



Slika 34. Prikaz vrijednosti odstupanja od ravnosti

6.4. Mjerenje i vizualna usporedba profila zuba

Alatnim mikroskopom precizno su izmjerena po dva nasuprotna zuba svakog od četiri lančanika. Sa pedesetak točaka mjerenja uzetih sa svakog od promatranih zubi dobiveni su profili svakog zuba. Ovakvo mjerenje ponovljeno je prije i nakon provođenja postupka nitriranja te nakon eksploatacijskog trošenja. Podatci su obrađeni u nekoliko koraka. Zadnji korak koji predstavlja preklapanje obavljen je vizualnom procjenom zbog nedostatka odgovarajućeg softwarea. Preklapanjem dobivenih profila prije i nakon obrade te profila dobivenog nakon eksploatacijskog trošenja omogućeno je vizualno određivanje mjesta i dubina trošenja ozubljenja.



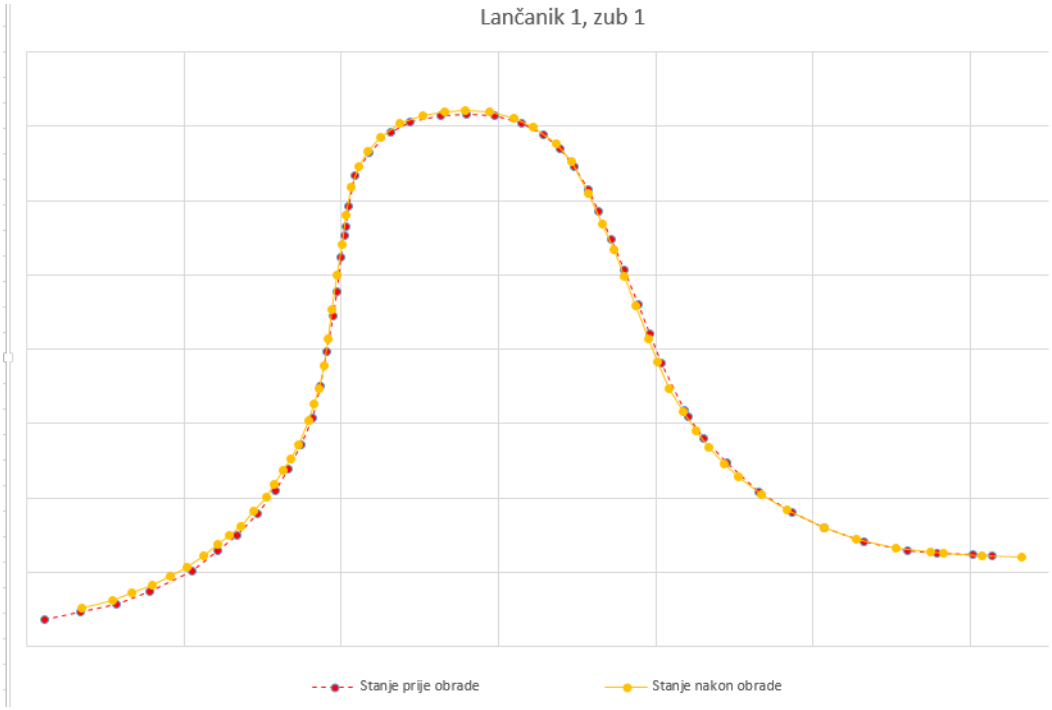
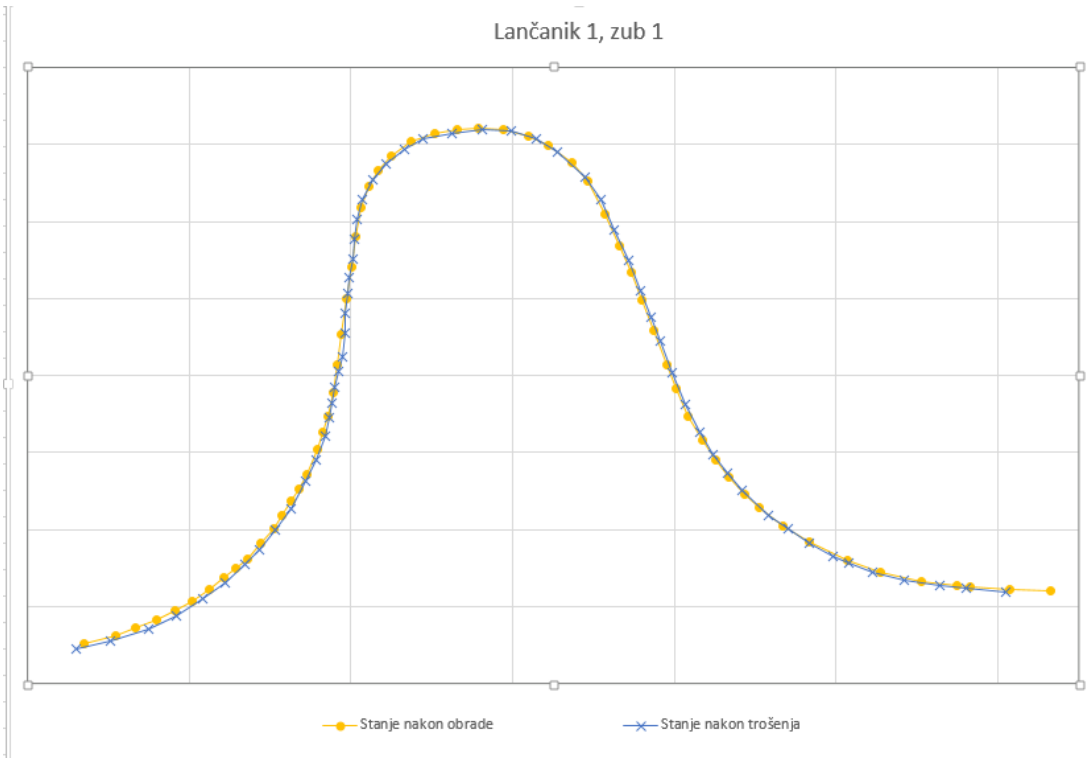
Slika 35. Prikaz alatnog mikroskopa i mjerenja profila zuba

6.4.1. Mjerenja profila zuba lančanika alatnim mikroskopom

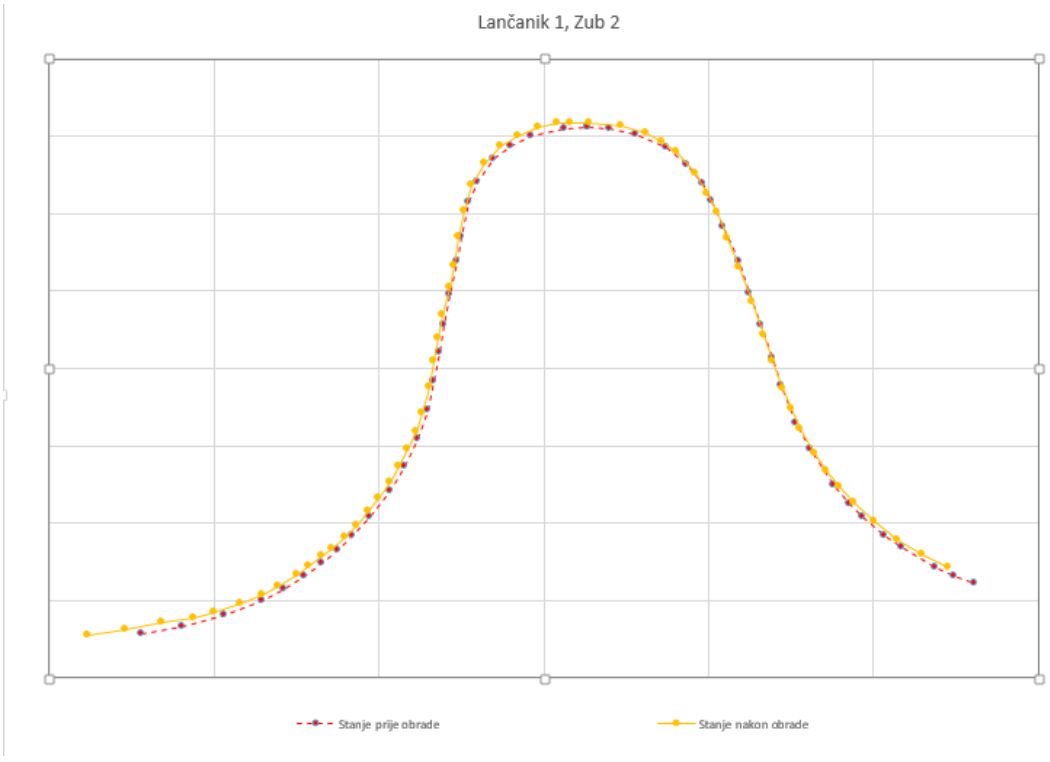
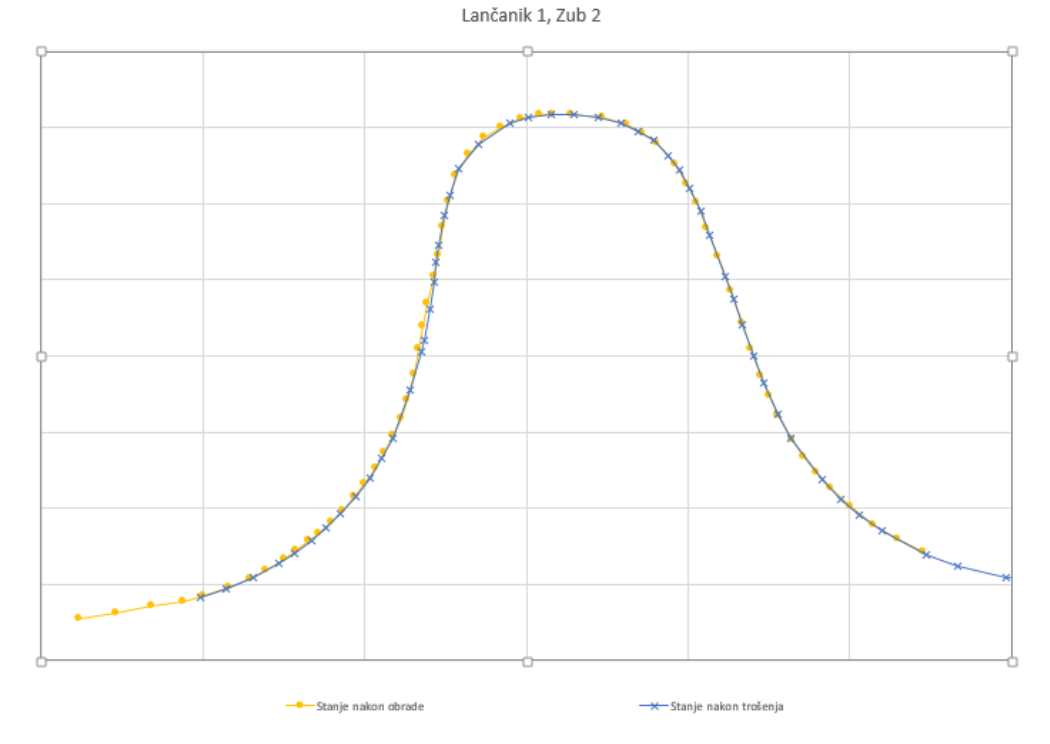
Iz grafičkih prikaza mjerenja u nastavku možemo donijeti sljedeće zaključke:

- Plazma nitrirani lančanici jedini nisu podlegli plastičnim deformacijama uslijed kontaktnih pritisaka, dok preostali pokazuju znakove deformiranja s lijeve strane profila na 2/3 visine zuba.
- Plazma nitrirani lančanici pokazuju minimalne znakove prilično ravnomjernog trošenja na lijevoj strani profila zuba.
- Na neobrađenom lančaniku izmjerena je daleko najveća promjena profila uslijed trošenja.
- Lančanik nitrokarburiran u solnoj kupci TENIFER se nije pokazao otpornim na deformiranje uslijed kontaktnih pritisaka zuba i valjčića lanca.

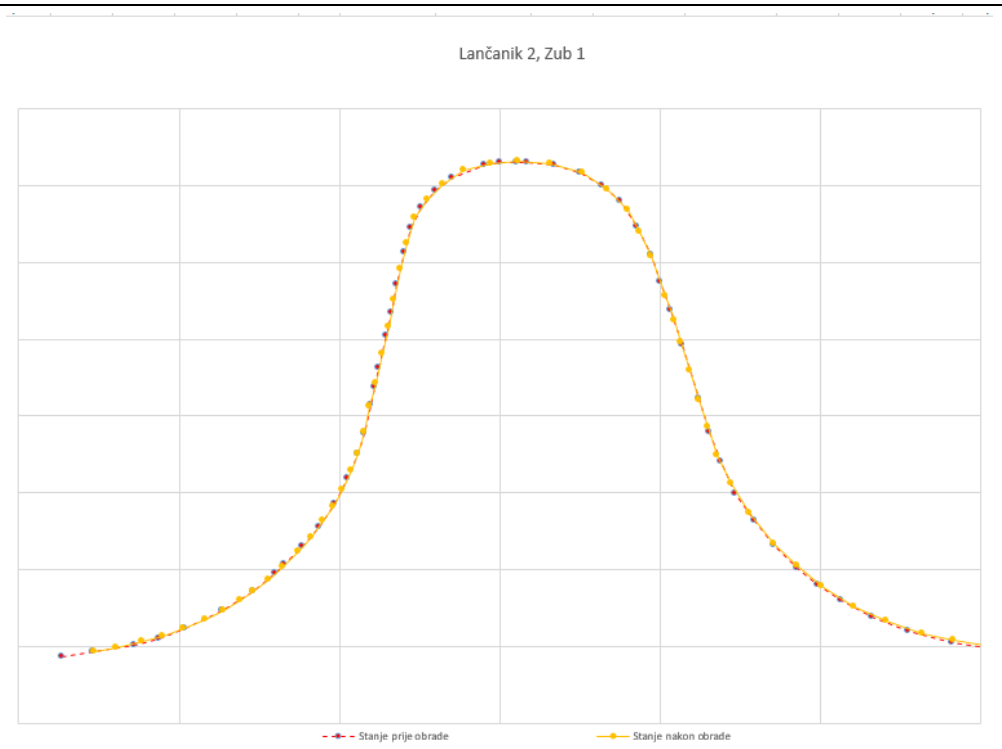
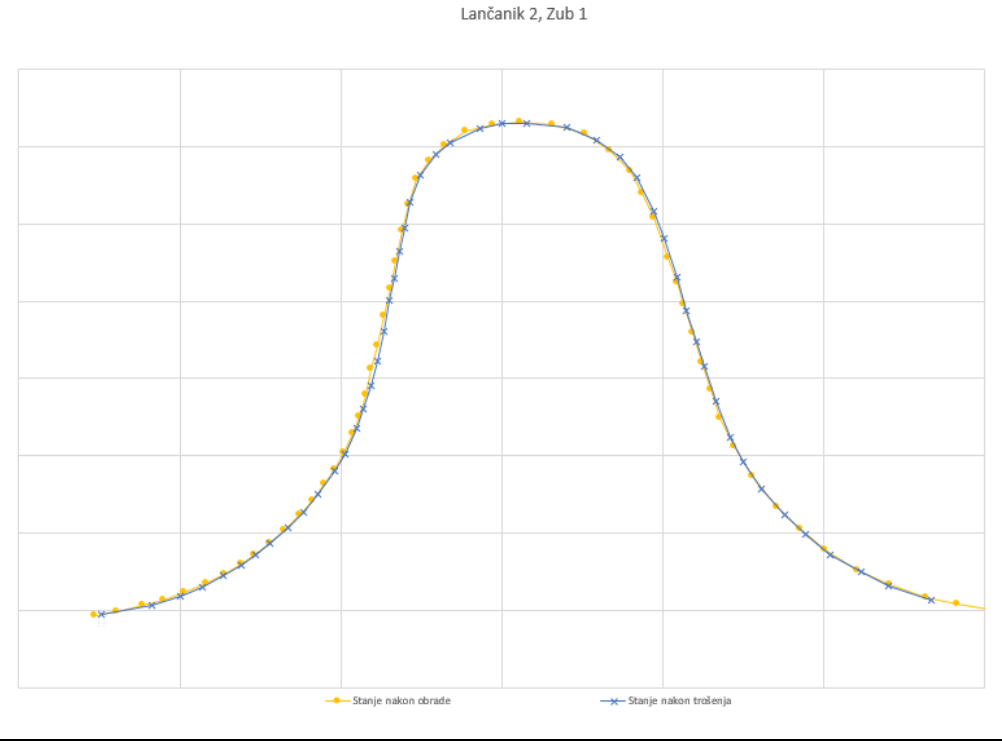
Tablica 4. Rezultati mjerenja profila prvog zuba lančanika 1

Lančanik 1 (plazma), zub 1; prije/nakon obrade	
Lančanik 1 (plazma), zub 1; prije/nakon trošenja	

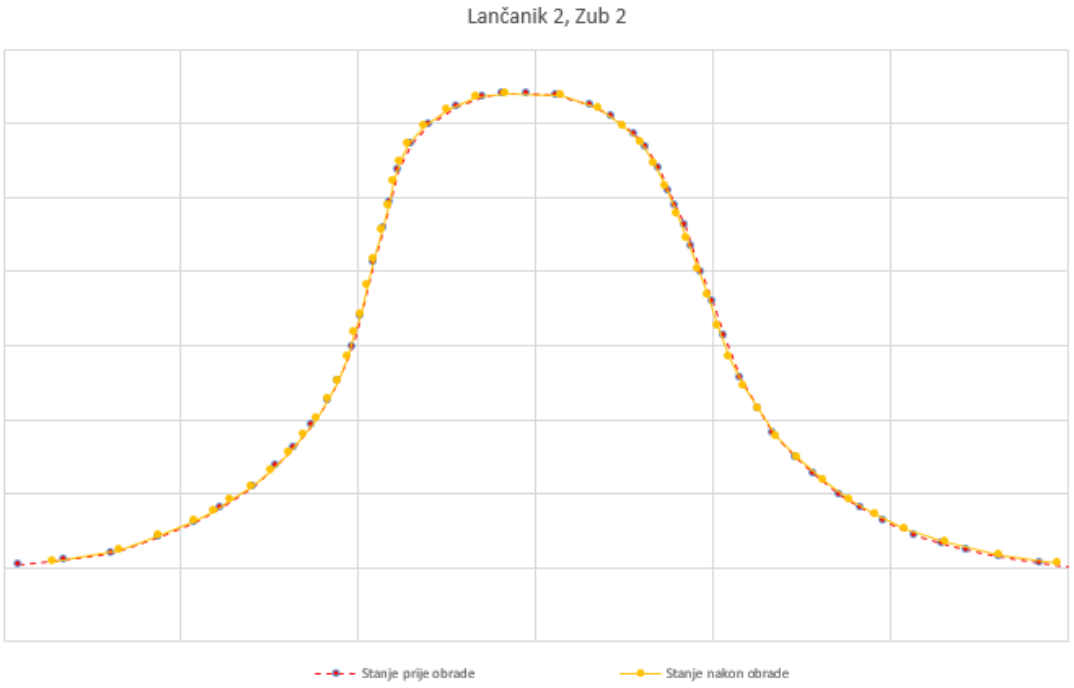
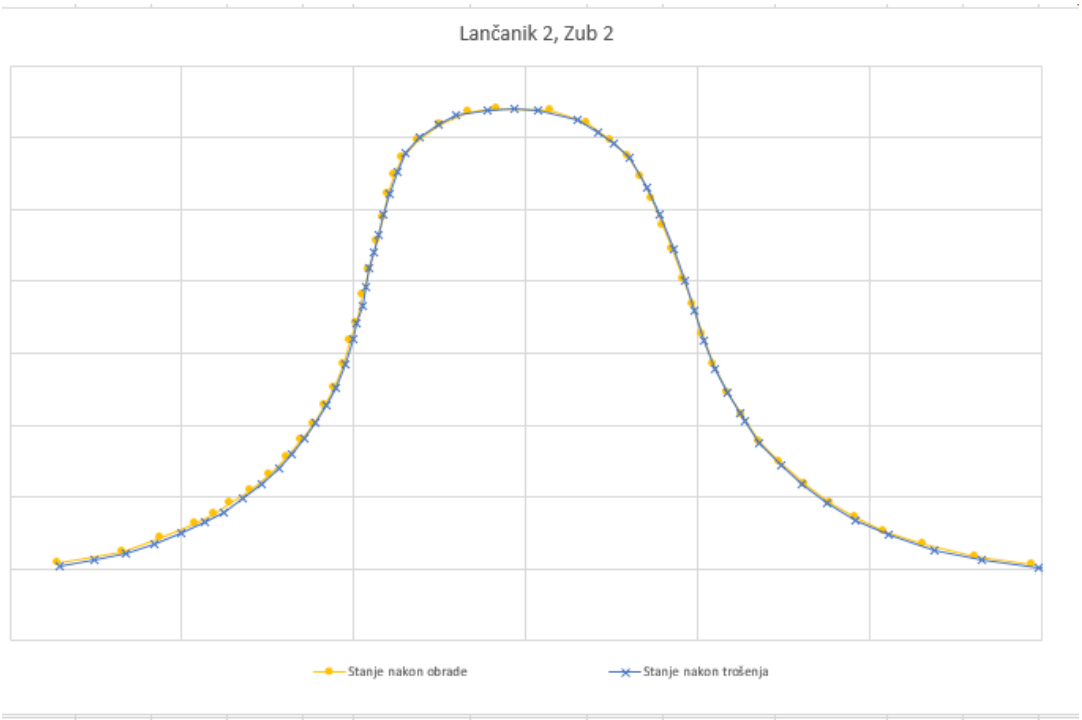
Tablica 5. Rezultati mjerenja profila drugog zuba lančanika 1

Lančanik 1 (plazma), zub 1; prije/nakon obrade	
Lančanik 1 (plazma), zub 2; prije/nakon trošenja	

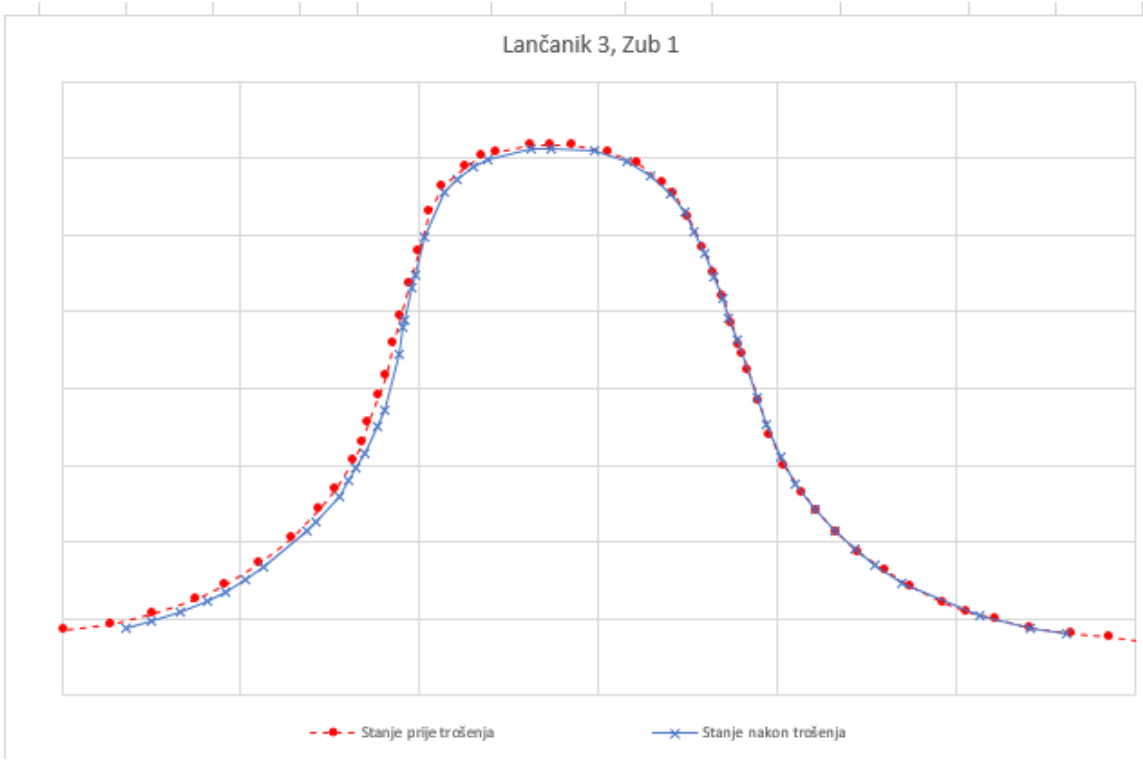
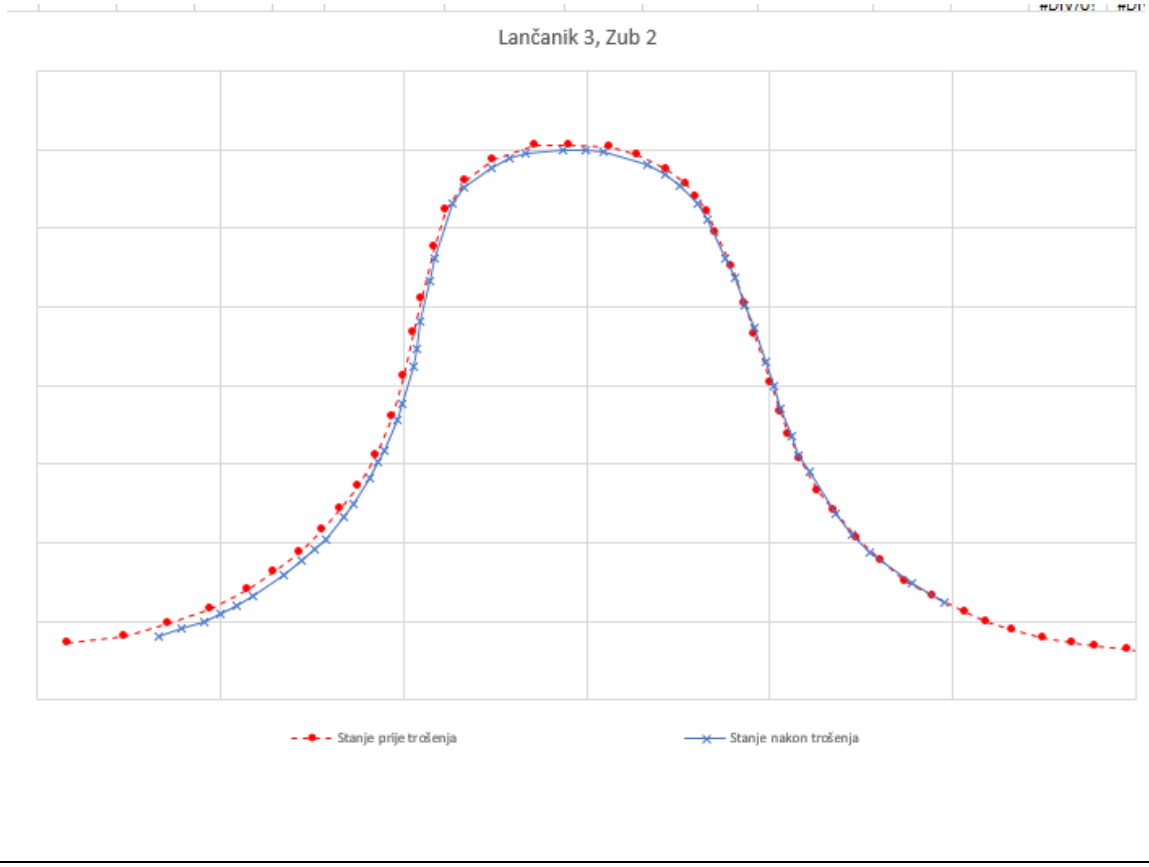
Tablica 6. Rezultati mjerenja profila prvog zuba lančanika 2

Lančanik 2 (plazma), zub 1; prije/nakon obrade	
Lančanik 2 (plazma), zub 1; prije/nakon trošenja	

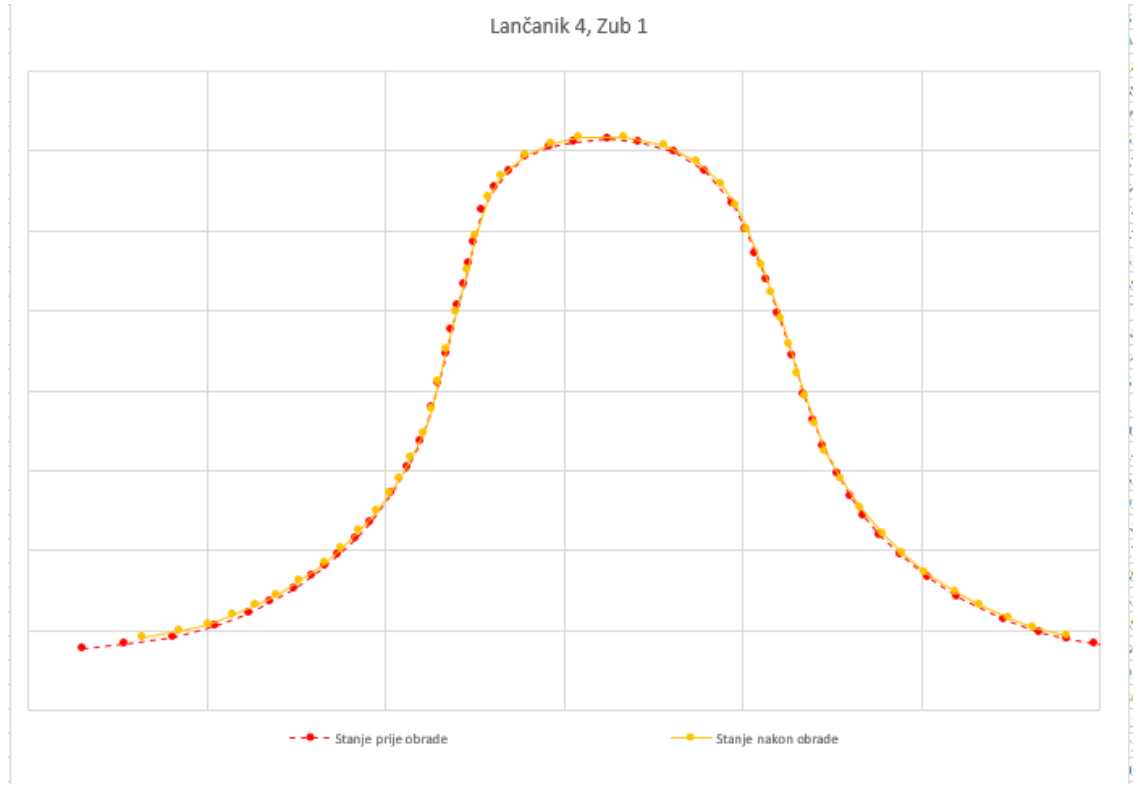
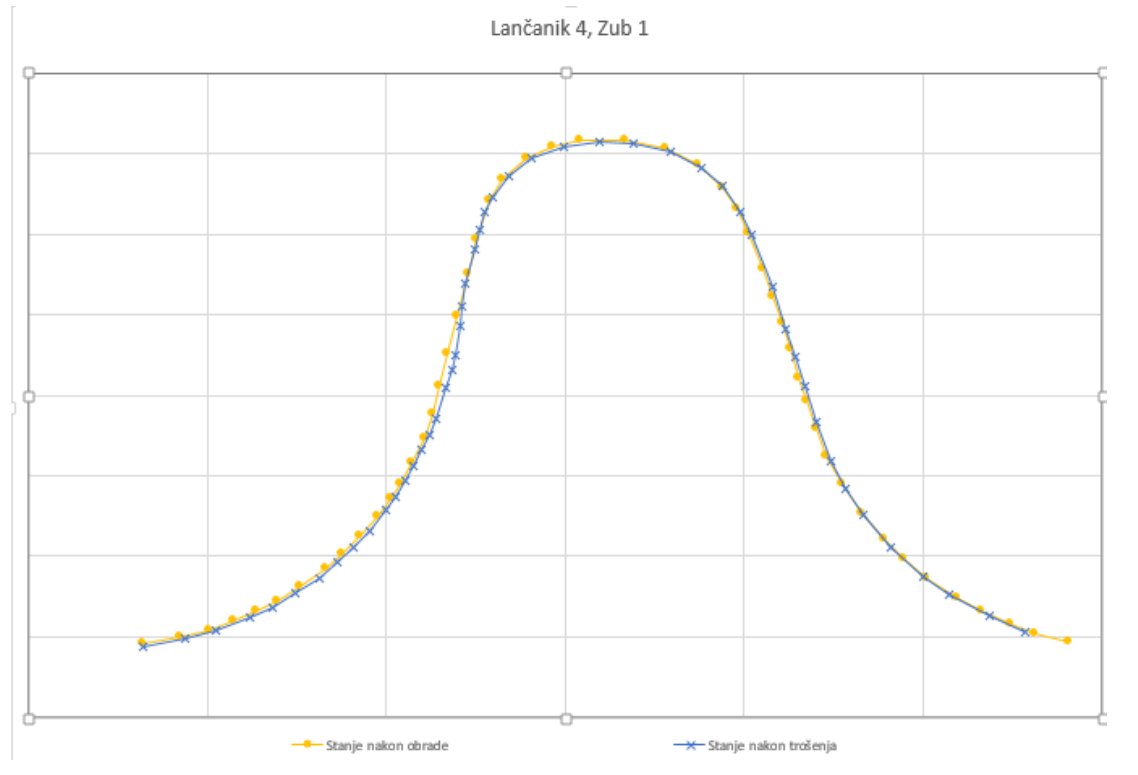
Tablica 7. Rezultati mjerenja profila drugog zuba lančanika 2

Lančanik 2 (plazma), zub 2; prije/nakon obrade	
Lančanik 2 (plazma), zub 2; prije/nakon trošenja	

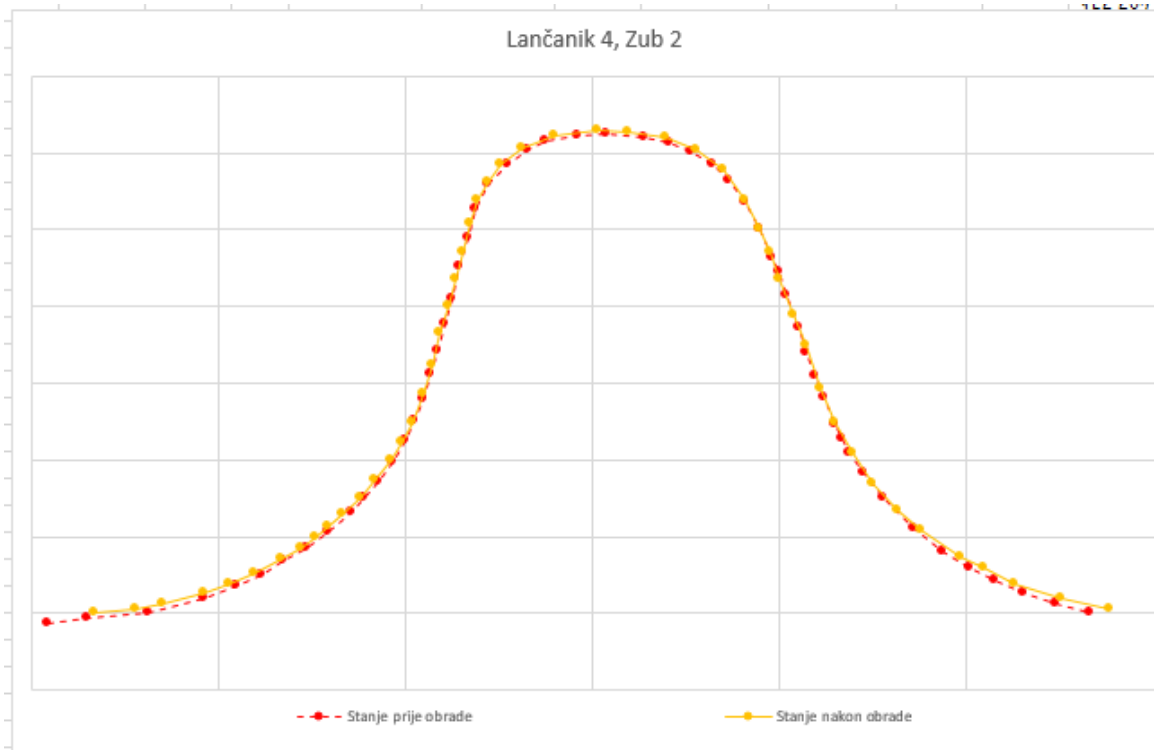
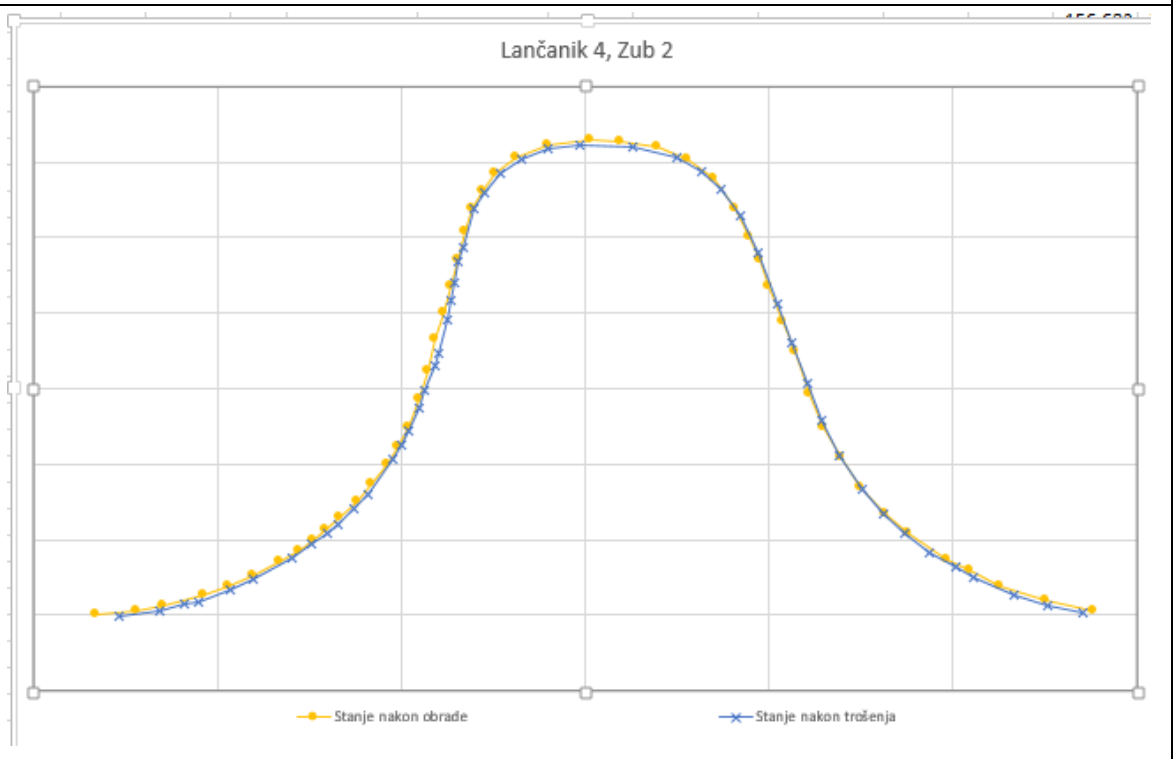
Tablica 8. Rezultati mjerenja profila prvog i drugog zuba lančanika 3

Lančanik 3 (neobrađeni), zub 1; prije/nakon trošenja	
Lančanik 3 (neobrađeni), zub 2; prije/nakon trošenja	

Tablica 9. Rezultati mjerenja profila prvog zuba lančanika 4

Lančanik 4(TENIFER) zub 1; prije/nakon obrade	
Lančanik 4(TENIFER), zub 1; prije/nakon trošenja	

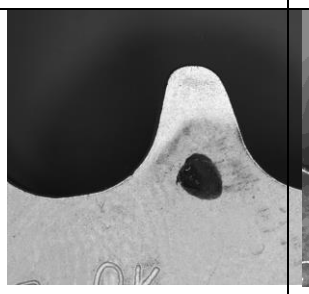
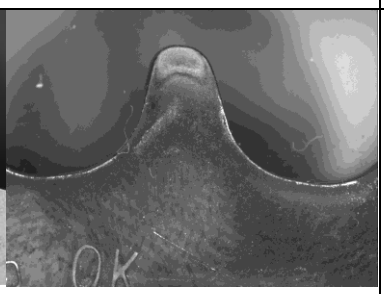
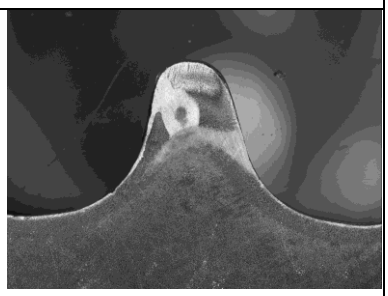
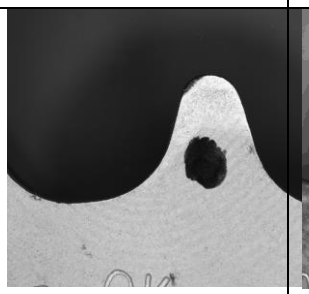
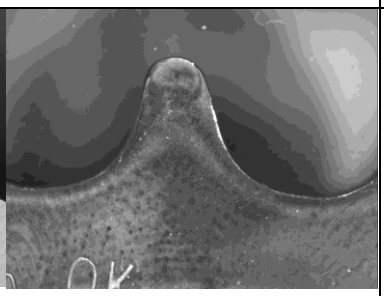
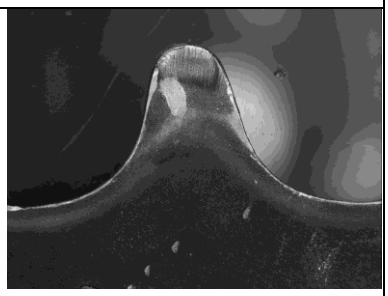
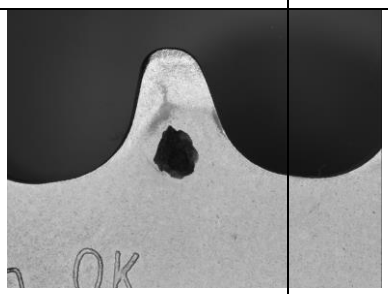
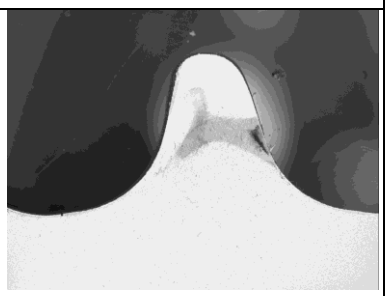
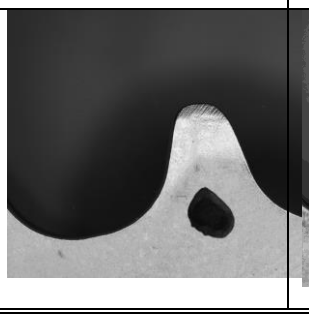
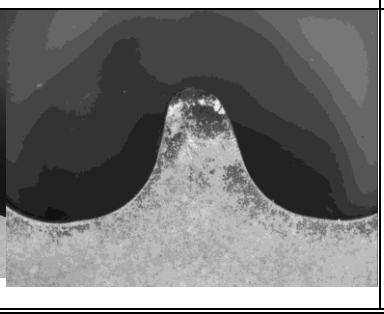
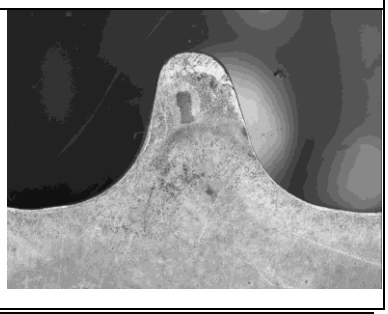
Tablica 10. Rezultati mjerenja profila drugog zuba lančanika 4

Lančanik 4(TENIFER) zub 2; prije/nakon obrade	
Lančanik 4(TENIFER), zub 2; prije/nakon trošenja	

6.4.2. Vizualna usporedba fotografija ozubljenja

Mjereni zubi lančanika fotografirani su kamerom spojenom na alatni mikroskop prije i nakon obrade te nakon eksploatacijskog trošenja. Vizualnom usporedbom fotografija moguće je odrediti mjesto i intenzitet trošenja.

Tablica 11. Usporedba slika zuba prije i nakon obrade te nakon eksploatacijskog trošenja

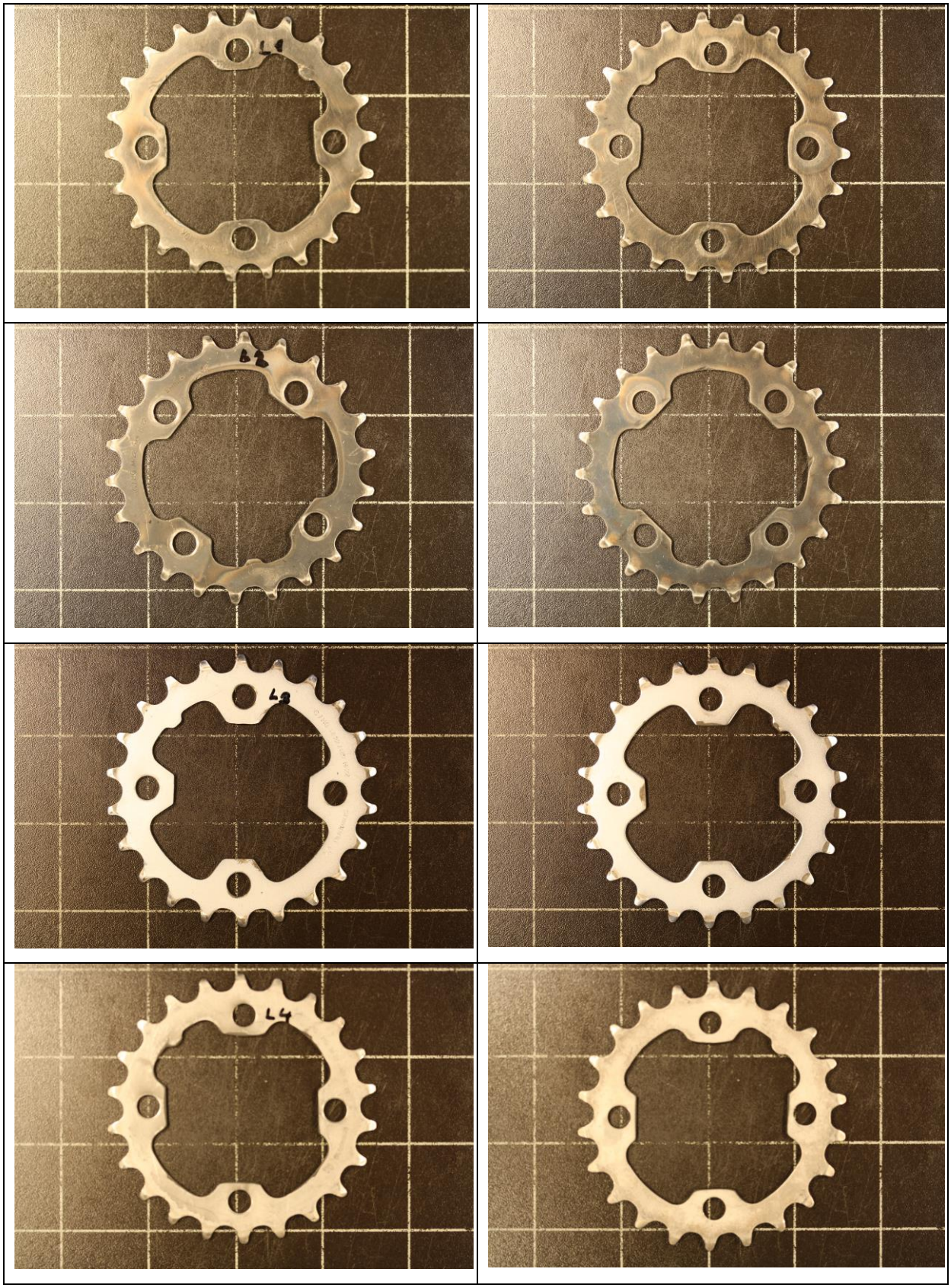
Lančanik	Stanje		
	Neobrađeno	Obrađeno	Trošeno
1			
2			
3			
4			

Iz fotografija s alatnog mikroskopa možemo zaključiti kako su smična naprezanja između bočne površine zuba i karika lanca rezultirala abrazijskim trošenjem. Zasigurno je ova komponenta ukupnog trošenja odgovorna za velik dio gubitka mase. Abrazijsko trošenje bočne strane zuba prilično je izraženo na lančaniku 1 u odnosu na lančanik 2. Pošto su lančanik 1 i 2 oba obrađena plazma potpomognutim procesom nitriranja ovu pojavu objašnjava utjecaj većeg opterećenja pod kojim je lančanik 1. Naime, zbog dodatnog tereta na biciklu i učestalog korištenja središnjih prijenosnika kazete pri blažim usponima asfaltiranim cestama ovakav rezultat možemo pripisati dijagonalnoj putanji lanca (eng. *cross chaining)* objašnjenom u poglavlju *2.3.3. Prijenos bicikla.* Ako se pažljivo pogledaju fotografije zuba lančanika 3 i 4, već pri malom povećanju moguće je uočiti mjesto pojave trošenja uz korijen zuba, dok fotografije zuba lančanika 1 i 2 pri ovakvom povećanju ne daju jasan uvid u promjenu profila.

6.4.3. Analiza trošenja zubi lančanika

Fotografiranje lančanika provedeno je u laboratoriju za materijalografiju digitalnom kamerom postavljenom na stativ. Analizom fotografija može se utvrditi ravnomjerno trošenje duž ozubljenja svih lančanika. Daljnjom vizualnom inspekcijom fotografija lančanika nakon eksploatacijskog trošenja vidljiva su mjesta prelaska lanca na drugi prijenosnik, odnosno zarezi koji su nastali tijekom promjene prijenosna omjera pogonskog sklopa. Svi lančanici, uključujući i neobrađeni, pokazali su visoku korozijsku otpornost unatoč teškim eksploatacijskim uvjetima.

Tablica 12. Izgled obje strane lančanika nakon trošenja



Tablica 13. Izgled dijela ozubljenja lančanika (1. dio)



Lančanik 1



Lančanik 2

Tablica 14. Izgled dijela ozubljenja lančanika (2. dio)



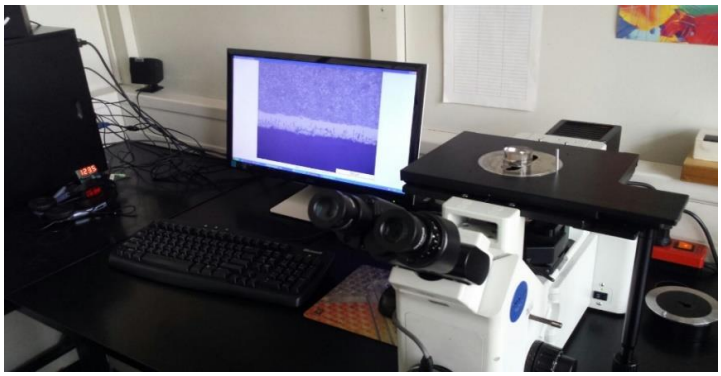
Lančanik 3



Lančanik 4

6.5. Analiza mikrostrukture nitriranog sloja

Kako bi se provela analiza mikrostrukture lančanike je potrebno prerezati. Presjeci su izrezani na rezalici uz hlađenje vodom. Izrezan je lančanik 1 nitriran plazma potpomognutim procesom i lančanik 4 nitriran u solnoj kupci TENIFER. Površina presjeka uzorka za materijalografska ispitivanja prolazi sredinom zuba lančanika. Nakon izrezivanja provedeno je brušenje vodenim brusnim papirima gradacija #600 i #1200, te poliranje dijamantnom pastom. Ovako pripremljene površine zalivene su masom za uzorke. Posljednji korak prije analize mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu s kamerom je nagrizanje promatranih presjeka 3%-tnim NITAL-om.

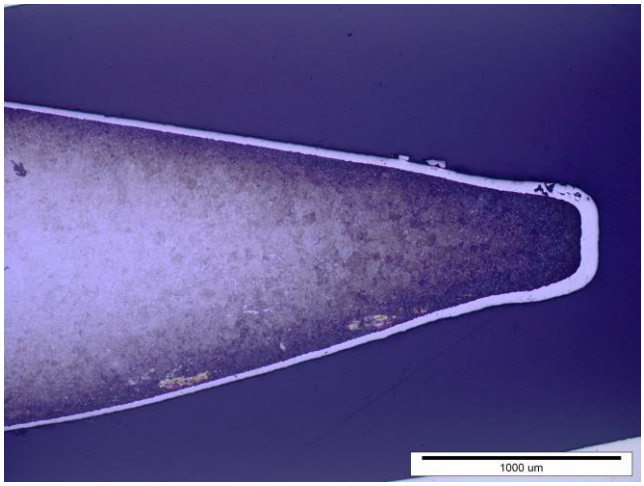


Slika 36. Prikaz ispitivanja mikrostrukture



Slika 37. Prikaz metalografskih uzoraka

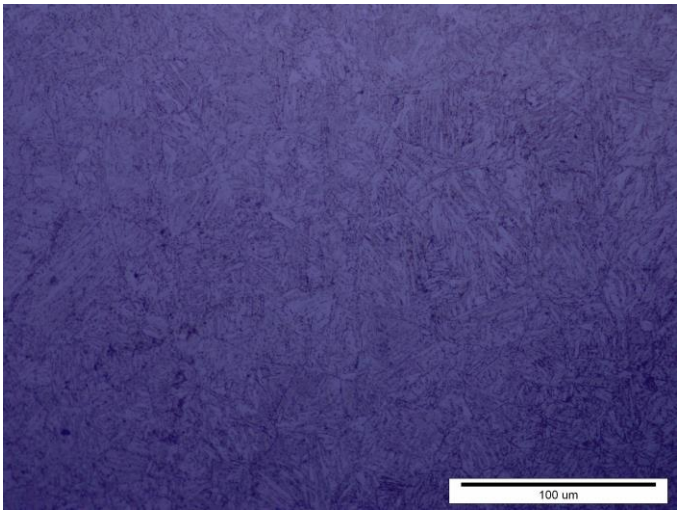
6.5.1. Rezultati ispitivanja mikrostrukture jezgre lančanika



Nagriženo 3% NITAL

Slika 38. Presjek zuba lančanika 4 (povećanje 50:1)

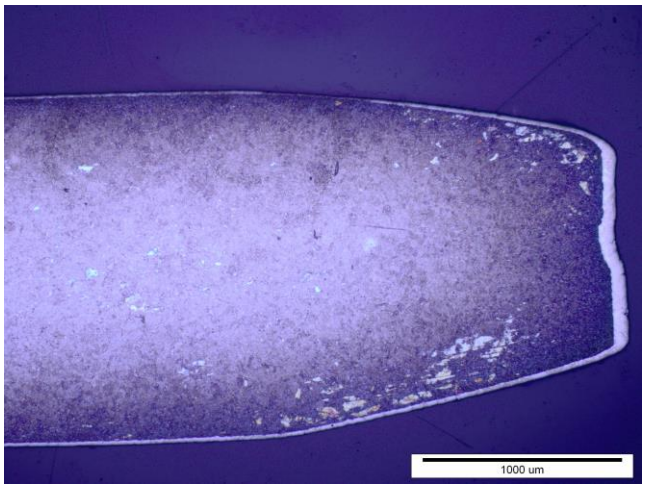
Iz analize mikrostrukture jezgre lančanika 4, nitriranog u solnoj kupci TENIFER, može se zaključiti kako se radi o mikrostrukturi većinski načinjenoj od popuštenog martenzita uz prisustvo karbida popuštanja.



Nagriženo 3% NITAL

Slika 39. Martenzitna mikrostruktura jezgre lančanika 4 (povećanje 500:1)

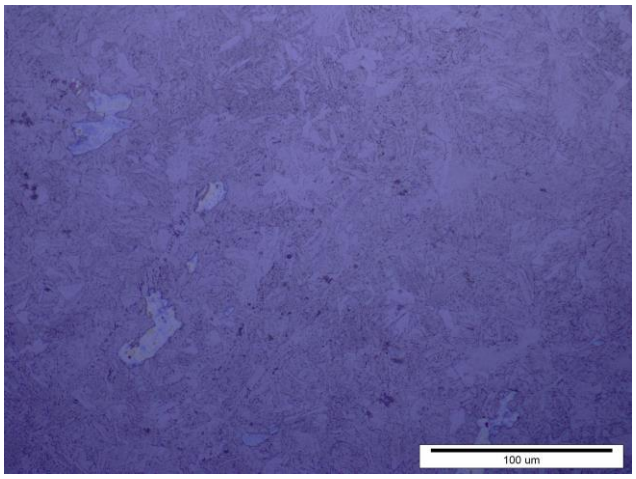
Fotografije jezgre lančanika 1 nitriranog plazma potpomognutim procesom otkrivaju pojavu trakavosti u mikrostrukturi.



Nagriženo 3% NITAL

Slika 40. Presjek zuba lančanika 1 (povećanje 50:1)

Mikrostruktura jezgre ovog lančanika sastavom je popušteni martenzit, dok je ferit izlučen u već spomenutoj trakavosti. Karbidi popuštanja su vidljivi kao sitne bijele točkice kao i u slučaju prethodnog lančanika. Na fotografijama lančanika 1 i lančanika 4 došlo je do početka korozije koja je vidljiva kao krupnije crne točkice uz mjestimičnu pojavu žućkastih nijansi. Pojava korozije nešto je intenzivnija na lančaniku 1, no to ne implicira na različit materijal korišten za izradu lančanika, već je samo rezultat kasnijeg provođenja ispitivanja mikrostrukture na lančaniku 1.



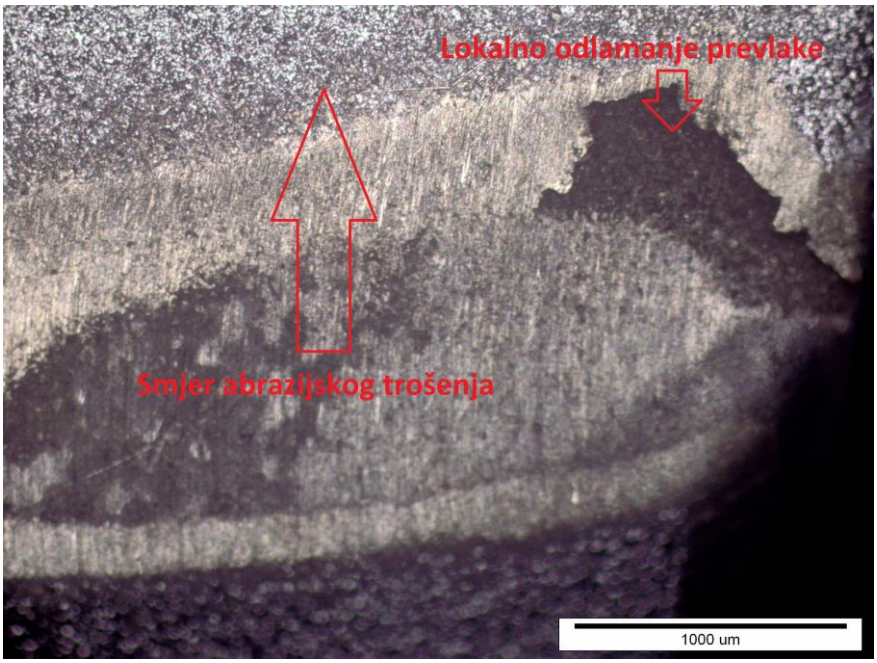
Nagriženo 3% NITAL

Slika 41. Martenzitna mikrostruktura jezgre lančanika 1 (povećanje 500:1)

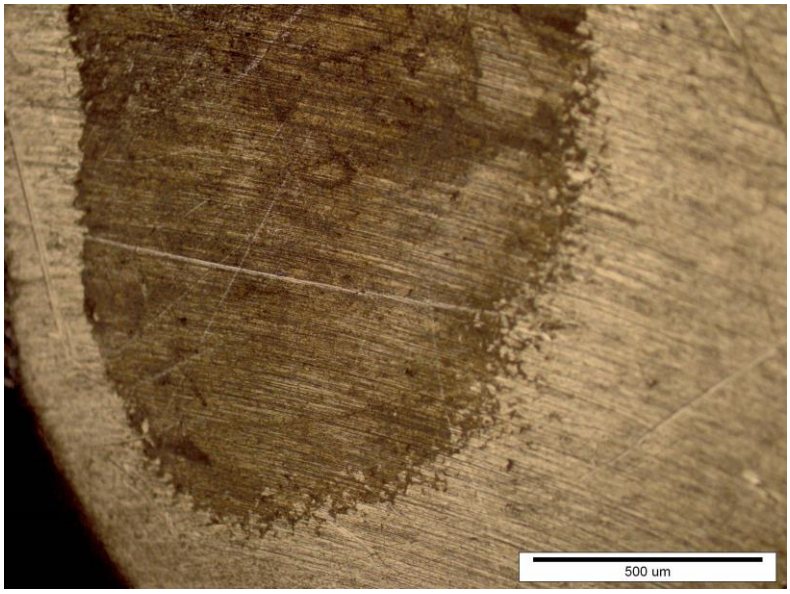
6.5.2. Rezultati ispitivanja mikrostrukture rubnog sloja

Nakon nagrizanja ispitne površine metalografskih uzoraka 3% NITAL-om rubni sloj ostao je gotovo potpuno nenagrižen. Na fotografiji sa svjetlosnog metalurgijskog mikroskopa rubni sloj jasno je vidljiv kao bijeli sloj na površini. Iako ovaj bijeli sloj izgledom odgovara zoni spojeva koja nastaje pri nitriranju, njegova debljina neuobičajeno je velika za oba primijenjena postupka toplinske obrade, a pogotovo za plazma potpomognuto nitriranje. Ovakav rezultat analize doveo je u pitanje sumnju da su čelični lančanici prevučeni na neki način od strane proizvođača. XRF analizom na Katedri za zaštitu materijala utvrđen je 87% maseni udio nikla na površini neobrađenog lančanika. Velika otpornost na nagrizanje rubnog sloja te relativno brzo nastajanje produkata korozije u jezgri nakon nagrizanja 3% NITAL-om potvrđuje sumnju da su lančanici isporučeni od strane proizvođača nekim postupkom galvanskog prevlačenja, odnosno da je bijeli površinski sloj galvanska prevlaka nikla.

Analizom površine neobrađenog lančanika (isporučeno stanje od strane proizvođača) u potrošenom stanju na svjetlosnom mikroskopu potvrđeno je postojanje galvanske prevlake nikla.

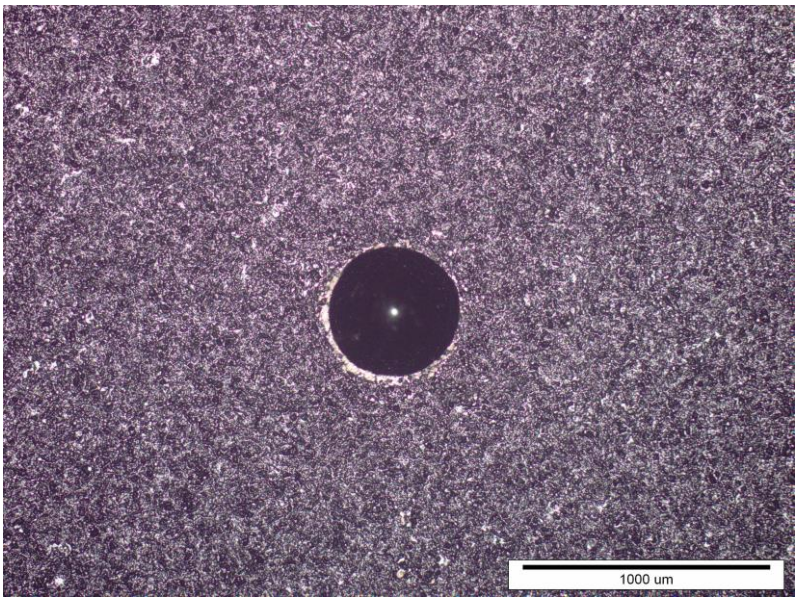


Slika 42. Fotografija abrazijskog trošenja i odlamanja prevlake na lančaniku u isporučenom stanju od strane proizvođača (povećanje 50:1)



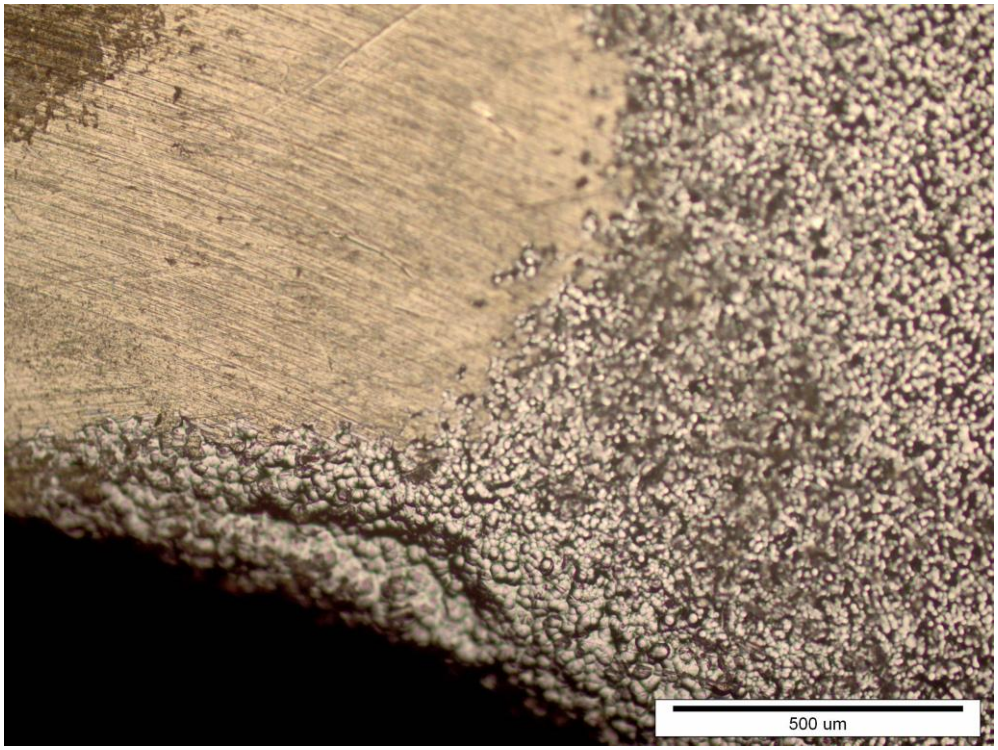
Slika 43. Fotografija abrazijskog trošenja prevlake na lančaniku u isporučenom stanju od strane proizvođača (povećanje 100:1)

Nakon utvrđivanja sastava prevlake, na površini neobrađenog lančanika provedeno je ispitivanje adhezivnosti prevlake metodom VDI 3198[27]. Analizom otiska indentora utvrđujemo plastično deformiranje prevlake bez pojave delaminacije, što potvrđuje dobru adhezivnost prevlake na podlogu.



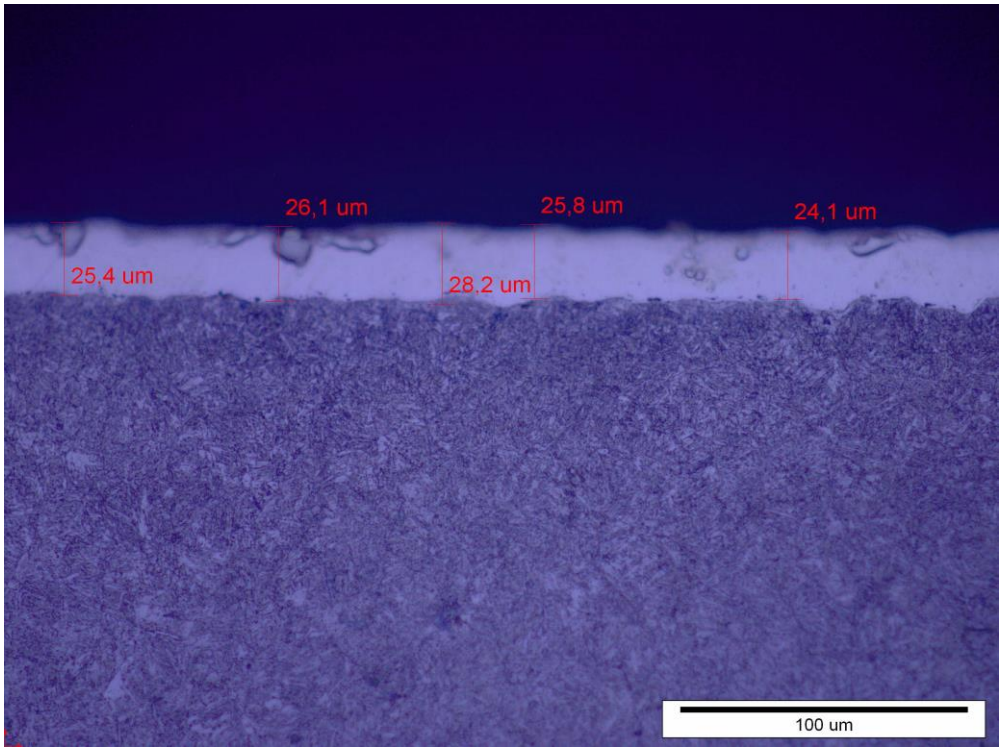
Slika 44. Otisak intentora za provođenje analize metodom VDI 3198 (povećanje 50:1)

Daljnjom analizom prevlake utvrđeno je jače nanošenje kapljica nikla uz rubne dijelove zubi. Uzrok tomu može biti jače električno polje oko izloženijih dijelova kao što su vrhovi zuba u odnosu na uzubinu. Ova pojava objašnjava deblju galvansku prevlaku na vrhu zuba plazma nitriranog lančanika.



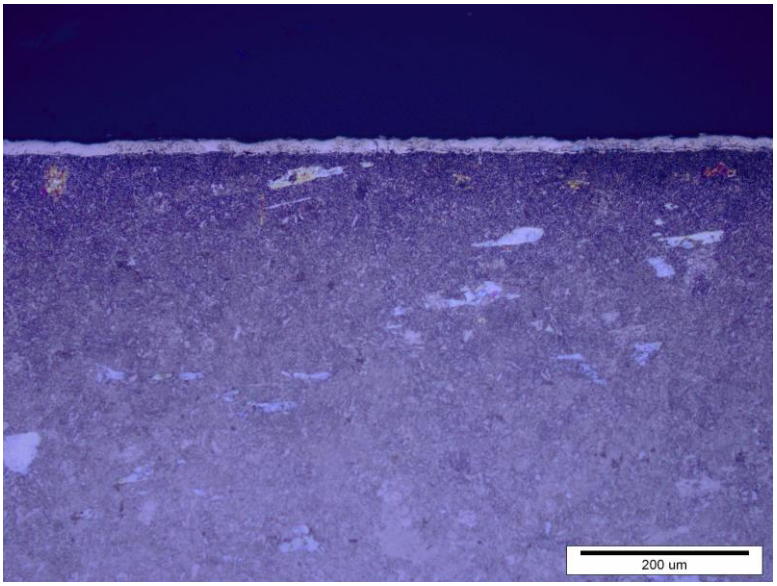
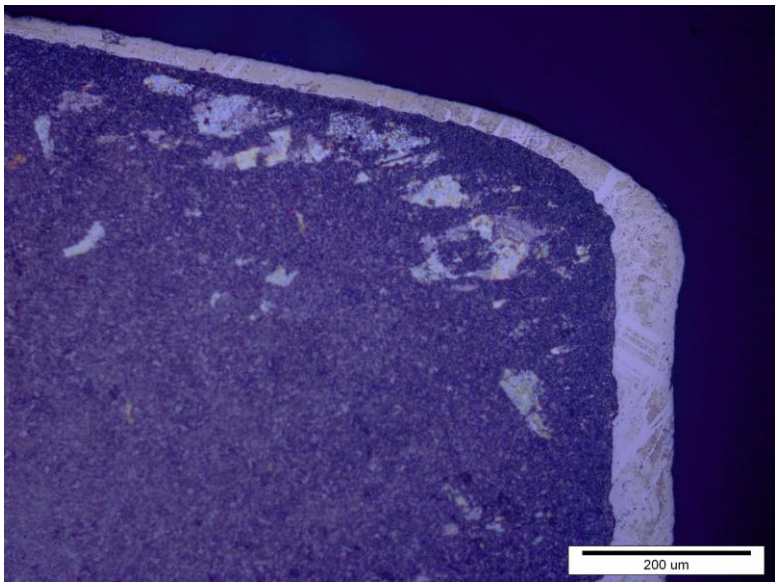
Slika 45. Izgled deblje galvanske prevlake nikal na izloženim rubnim područjima (povećanje 50:1)

Na svakom uzorku provedeno je desetak mjerenja debljine rubnog sloja. Računanjem aritmetičke sredine dolazi se do njezine debljine, dok standardna devijacija opisuje hrapavost rubnog sloja. Rezultati mjerenja su prikazani u *tablici 15.* za plazma nitrirani lančanik, te u *tablici 16.* za lančanik nitriran u solnoj kupci TENIFER.

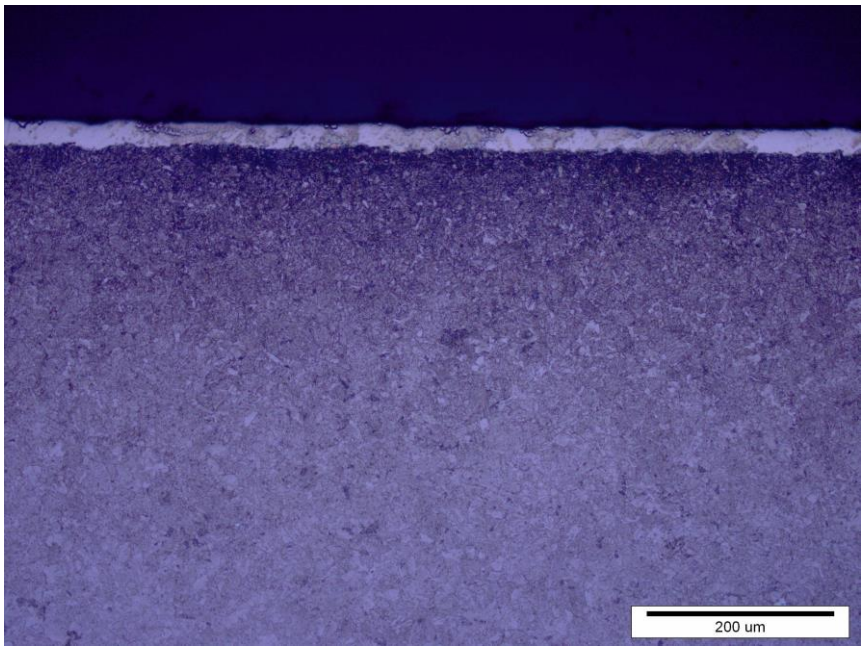


Slika 46. Prikaz mjerenja debljine rubnog sloja

Tablica 15. Prikaz površinskog sloja i vrijednosti njegove debljine u slučaju lančanika nitriranog u plazmi (Nagriženo 3% NITAL)

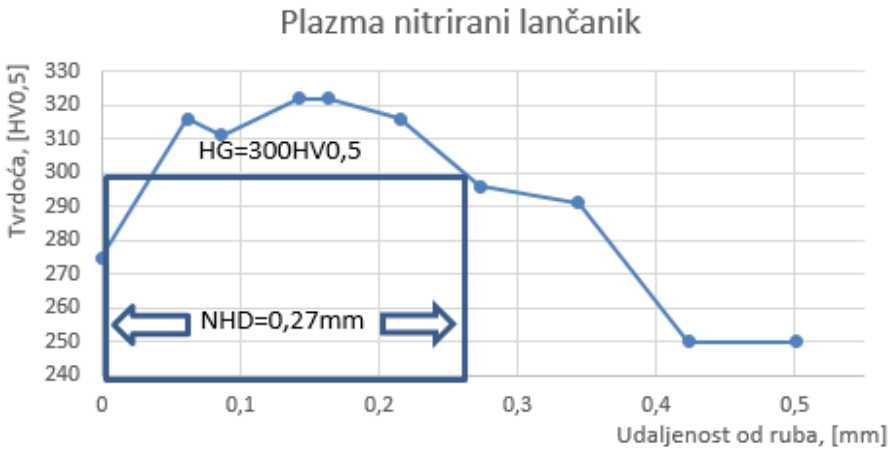
Lančanik 1

d = 19,92 ± 1,15 μm
Lančanik 1 (vrh zuba)

d = 79,37 ± 7,57 μm

Tablica 16. Prikaz površinskog sloja i njegova debljina nakon nitriranja u solnoj kupci TENIFER 580°C/2h/voda (Nagriženo 3% NITAL)

Lančanik 4

d= 25,21 ±1,52 μm

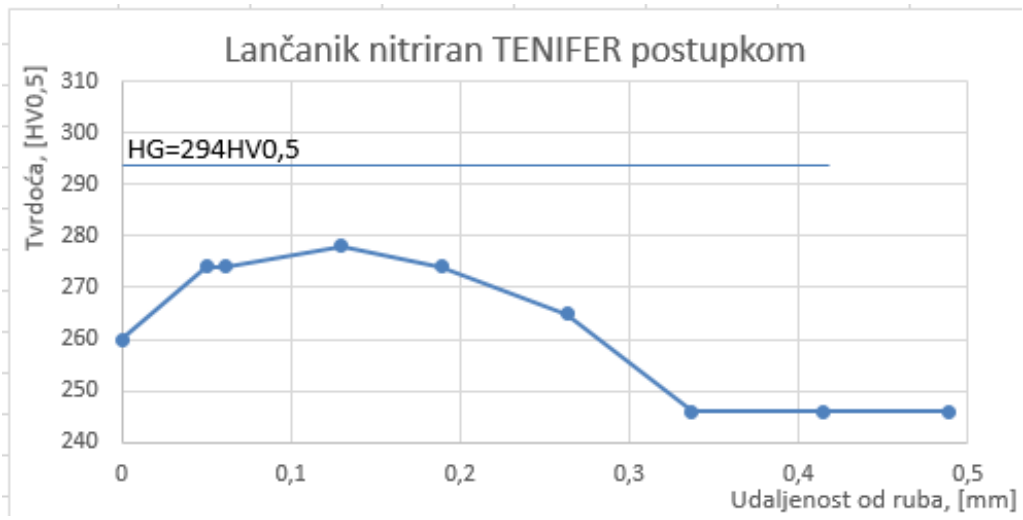
6.6. Ispitivanje mikrotvrdoće

Nakon analize mikrostrukture, na istim poprečnim presjecima provedeno je ispitivanje mikrotvrdoće. Za ispitivanje mikrotvrdoće korišten je poluautomatski tvrdomjer koji se služi Vickersovom metodom HV0,5 te metodom HV0,05 i HV0,025 koje su korištene za ispitivanje rubnih slojeva uzorka izrezanih iz lančanika obrađenog u solnoj kupci TENIFER i lančanika nitriranog u plazmi. Rezultati ovog ispitivanja daju uvid u debljinu difuzijske zone. Prema normi DIN 50190-3 provedeno je određivanje efektivne dubine nitriranja na uzorku izrezanom iz lančanika nitriranog u plazmi.



Slika 47. Krivulja tvrdoće uzorka izrezanog iz plazma nitriranog lančanika

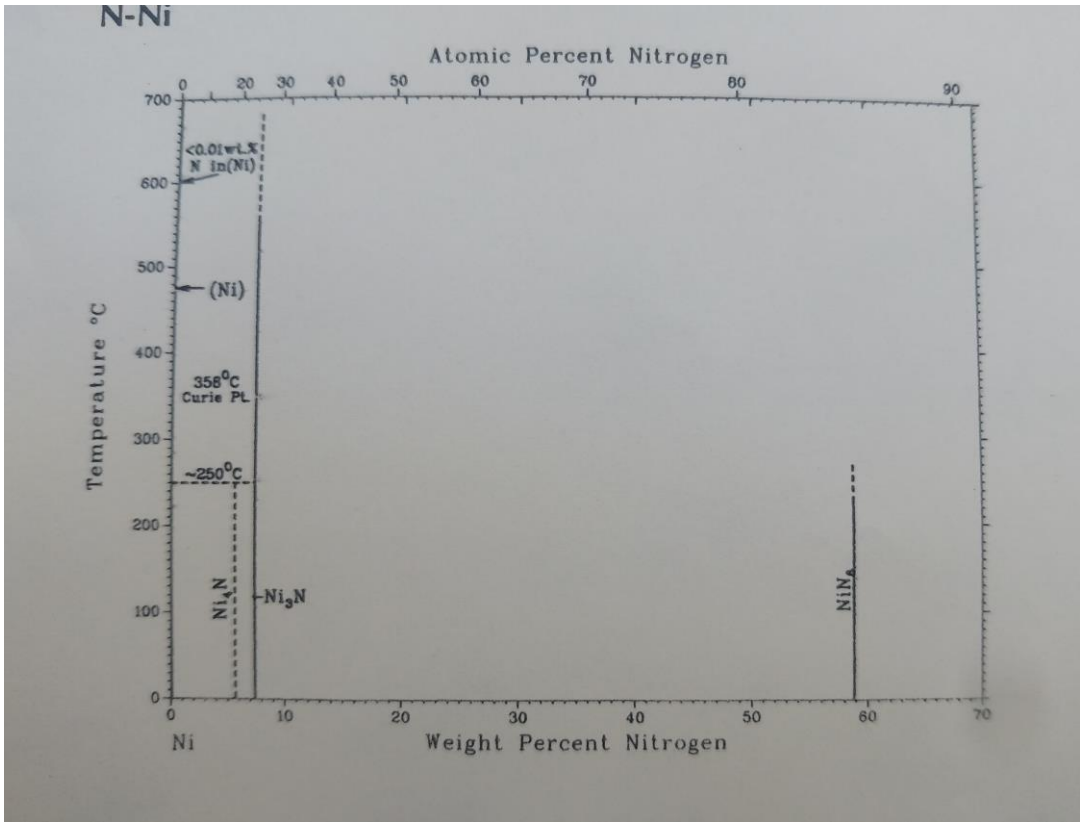
Uz pomoć grafičkog prikaza određena je efektivna dubina nitriranja lančanika obrađenog plazma potpomognutim procesom čiji je iznos 0,27mm, a granična tvrdoća iznosi 300HV0,5. Prosječna izmjerena vrijednost tvrdoće rubnog sloja plazma nitriranog uzorka iznosi 275HV0,05. Ukupna dubina nitriranja plazma nitriranog lančanika iznosi 0,423mm.



Slika 48. Krivulja tvrdoće uzorka izrezanog iz lančanika nitriranog u TENIFER solnoj kupci

Uzorak izrezan iz lančanika 3 nitriranog u solnoj kupci TENIFER nije postigao efektivnu dubinu nitriranja postupkom propisanim normom DIN 50190-3, odnosno tvrdoća difuzijske zone nije premašila vrijednost tvrdoće jezgre uvećanu za 50HV. Prosječna vrijednost tvrdoće rubnog sloja na površini iznosi 260HV0,025. Ukupna dubina nitriranja lančanika nitriranog u solnoj kupci TENIFER iznosi 0,337mm. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće objašnjavaju zašto su promjena dimenzija ozubljenja i gubitak mase utvrđen na ovom lančaniku samo neznatno manji u odnosu na lančanik u neobrađenom stanju. Rezultati mjerenja tvrdoće rubnog sloja podupiru zaključak da je u pitanju galvanska prevlaka na bazi nikla. Očekivane tvrdoće galvanskih prevlaka na bazi nikla kreću se u intervalu od 130HV do 400HV [28].

Hlađenje u postupku nitriranja u plazmi s temperature od 470°C do 200°C traje 3h, dok je hlađenje kod nitriranja u solnoj kupci TENIFER vrlo brzo i provodi se u vodi. Iz navedenog možemo zaključiti da je tijekom hlađenja u postupku plazma nitriranja vjerojatno došlo do povratne difuzije dušika. Povratna difuzija dušika može objasniti sniženje tvrdoće uz prevlaku nikla, te možemo zaključiti da je tijekom ovog procesa došlo do stvaranja spojeva dušika i nikla (Ni_4N, Ni_3N, NiN_6). koje bi trebalo dokazati u daljnjim istraživanjima primjenom EDS metode.



Slika 49. Kemijski spojevi dušika i nikla[29]

7. ZAKLJUČAK

U radu je provedeno nitriranje čeličnih lančanika pogonskog sklopa bicikla te ispitivanje njihovog eksploatacijskog trošenja. Lančanici su nitrirani plazma potpomognutim procesom te nitrokarburirani u solnoj kupci TENIFER. Teorijski dio rada opisuje konstrukciju bicikla i njihovu podjelu uz naglasak na konstrukcijsku izvedbu prijenosnog sklopa bicikla. U sklopu teorijskog dijela također je sadržan opis postupaka nitriranja u plazmi i nitrokarburiranja u solnoj kupci TENIFER. Eksperimentalni dio rada sadrži opis mjerenja provedenih u trenutku prije i nakon toplinske obrade nitriranjem te nakon ispitivanja eksploatacijskog trošenja. Iz rezultata mjerenja ustanovljene su promjene nastale nakon jednakih intervala trošenja nitriranih lančanika i neobrađenog lančanika te je provedena njihova direktna usporedba. Naposljetku su provedena metalografska ispitivanja mikrostrukture i nitriranog sloja toplinski obrađenih lančanika.

Iz provedenih ispitivanja zaključuje se sljedeće:

- Nitriranjem u plazmi stvorena je difuzijska zona koja služi kao potporna zona relativno mekanoj prevlaci nikla. Iako se postupci toplinske obrade i prevlačenja inače ne bi provodili ovim redoslijedom, meku prevlaku možemo shvatiti kao duplex sloj.
- Plazma nitrirani lančanici pokazali su superiornu otpornost na deformiranje uslijed djelovanja kontaktnih pritisaka između valjčića lanca i zuba lančanika. Ovakva otpornost nastanku deformacija predstavlja preduvjet za daljnje ravnomjerno trošenje.
- Abrazijsko i adhezijsko trošenje bočnih strana zuba lančanika može biti znatno manje uz pravilno korištenje prijenosa, odnosno izbjegavanjem dijagonalne putanje lanca. Bočne strane zubi lančanika ujedno predstavljaju i lokaciju na kojoj dolazi do prvih pojava znakova trošenja.
- Trajnost prijenosa bicikla uvelike ovisi o razini održavanja, dobrom podmazivanju, uvjetima eksploatacije te naravno opterećenju nametnutom na sami bicikl. Gubitak mase plazma nitriranog lančanika testiranog na višednevnom putovanju uz dodatni teret, manjkavo čišćenje te veliku količinu padalina višestruko je veći u usporedbi

s identičnim lančanikom na kojem je provođeno redovno čišćenje te koji je ispitivan pod manjim opterećenjem za vrijeme suhog vremena.

Uzevši u obzir sve bitne čimbenike kao optimalnu toplinsku obradu u svrhu povećanja trajnosti lančanika bicikla preporučuje se nitriranje u plazmi uz parametre koji će osigurati minimalnu ili u potpunosti eliminirati tvrdu i krhku zonu spojeva na površini.

Prilozi

8. PRILOZI

Prilog 1. Masa lančanika

Masa [g]	Lančanik 1	Lančanik 2	Lančanik 3	Lančanik 4
Neobrađeno stanje (m_1)	38,0206	37,1211	39,6916	37,162
Obrađeno stanje (m_2)	38,0169	37,1175	-	37,1821
Potrošeno stanje (m_3)	37,9873	37,1114	39,6267	37,133
Razlika nakon obrade ($\Delta m_1=m_2-m_1$)	-0,0037	-0,0036	-	0,0201
Razlika nakon trošenja ($\Delta m_2=m_3-m_2$)	-0,0296	-0,0061	-0,0649	-0,0491

Prilog 2. Rezultati mjerenje debljine lančanika prije obrade

	Lančanik			
Mjerenje	1	2	3	4
1	1,910	1,889	1,901	1,906
2	1,931	1,883	1,905	1,873
3	1,940	1,891	1,899	1,888
4	1,907	1,906	1,919	1,896
Δd [mm]	1,922	1,892	1,906	1,891

Prilog 3. Rezultati mjerenje debljine lančanika nakon obrade

	Lančanik			
Mjerenje	1	2	3	4
1	1,931	1,887	-	1,895
2	1,947	1,908	-	1,897
3	1,927	1,924	-	1,907
4	1,917	1,892	-	1,905
Δd [mm]	1,931	1,903	-	1,901

Prilog 4. Tablica rezultata mjerenja odstupanja od ravnosti

Lančanik	1	2	3	4
$T_{ra\ 1\ (neobrađeno\ stanje)}$	0,071	0,136	0,077	0,105
$T_{ra\ 2\ (obrađeno\ stanje)}$	0,117	0,107	-	0,188
$T_{ra\ 3\ (tošeno\ stanje)}$	0,088	0,097	0,074	0,175

Prilog 5. Rezultati određivanja debljine zone spojeva

Lančanik 1 (vrh zuba) [μm]	Lančanik 1 [μm]	Lančanik 4 [μm]
73,2	18,1	22,7
69,3	19,1	25,8
75,4	19,6	24,1
73,9	20,9	25,8
86,1	20,5	24,9
86,8	19,1	25,5
94,3	20,3	23,9
77,1	18,6	23,0
78,2	21,8	27,7
	21,2	25,4
		26,1
		28,2
		25,8
		24,1
Avg. [μm] =	Avg. [μm] =	Avg. [μm] =
79,37	19,92	25,21
St. Dev. [μm] =	St. Dev. [μm] =	St. Dev. [μm] =
7,57	1,15	1,52

Prilog 6. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće plazma nitriranog uzorka

Udaljenost od ruba [mm]	Tvrdoća [HV0,5]
0,062	316
0,086	311
0,142	322
0,164	322
0,215	316
0,273	296
0,344	291
0,423	250
0,501	250

Prilog 7. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće nitrokarburiranog uzorka

Udaljenost od ruba [mm]	Tvrdoća [HV0,5]
0,05	274
0,061	274
0,13	278
0,189	274
0,263	265
0,337	246
0,414	246
0,489	246

Prilog 8. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće površinskog sloja uzoraka

Tvrdoća			
Lančanik 1 [HV0,05]	312	250	263
Lančanik 3 [HV0,025]	275	266	241

LITERATURA

[1] https://en.wikipedia.org/wiki/Karl_Drais (3.7.2019.)

[2] https://en.wikipedia.org/wiki/John_Kemp_Starley (3.7.2019.)

[3] R. Penn: It's All About the Bike: The Pursuit of Happiness on Two Wheels, Penguin Books Limited, 2011.

[4] https://de.dreamstime.com/fahrrad-oder-verschiedene-arten-von-ikonen-verd%C3%BCnnen-linie-vektor-illustrations-satz-image108736108 (3.7.2019.)

[5] B. Marinović: Izbor materijala okvira bicikla, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.

[6] https://road.cc/content/feature/213468-cross-chaining-it-really-all-bad (3.7.2019.)

[7] https://www.genesisbicycles.com/how-to/chain-replacement-and-repair-pg371.htm (3.7.2019.)

[8] http://kmcchain.us/technologies/ (3.7.2019.)

[9] https://www.evanscycles.com/kmc-x9-73-9-speed-chain-EV150882 (3.7.2019.)

[10] https://bikerumor.com/2012/08/10/sram-world-headquarters-tour/ (3.7.2019.)

[11] https://r2-bike.com/SRAM-RED-Cassette-10-speed-XG-1090-Cyclocross-12-27-Teeth (3.7.2019.)

[12] https://enduro-mtb.com/en/press-release-sram-xd-driver-body/ (3.7.2019.)

[13] B. Marinović: Završni Rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2018.

[14] A. Bernal: Investigation on Nitriding with Enphasis in Plasma Nitriding Process, Current Technology and Equipment: Review Article, KTH Stockholm, 2006.

[15] M. Berg, C.V. Budtz-Jøgensen, H. Reitz, K.O. Schweitz, J. Chevallier, K. Kringhøj, J. Bøttiger: Surface and Coatings Tehnology 124, Elsevier Science S.A., 2000.

[16] D. Pye: Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing , ASM International, 2003.

[17] L. D. Smith: Thin-Film deposition – Principles and Practice, McGraw-Hill Inc.,1995.

[18] https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857095923500082 (3.7.2019.)

[19] P. Egert, A. M. Maliska, H. R. T. Silva, C. V. Speller: Decarburation during plasma nitriding, On: Surface and Coating Technology 221 33-38, 1999.

[20] K. Koch, L. J. Friedrich, V. Hinkel, F. Ludwig, B. Politt, T. Schuring: Hollow cathode discharge sputtering device for uniform large area thin film deposition, J. Vac. Sci. Technol. A 9, 2374, 1991.

[21] J. Lelièvre, N. Dubreuil, J.-L. Brisset: Electrolysis Processes in D.C. Corona Discharges in Humid Air.Journal de Physique III, EDP Sciences, 1995.

[22] C. Alves Jr., J.A. Rodrigues, A. E. Martinelli: The effect of pulse widht on the microstructure of d.c.-plasma-nitrided lyers, On: Surface and Coating Technology 221, 1999.

[23] Rubig engineering: Plasma generator MAP 300 Instruction manual, 2007.

[24] Krešimir Grilec, Suzana Jakovljević: Tribologija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[25] https://www.mt.com/us/en/home.html

[26] D. M. Anthony, Engineering Metrology, Pergamon Press, New York, 1986.

[27] N. Vidakis, A. Antoniadis, N. Bilalis: Journal of Materials Processing Technology 143–144,481–485,The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds, 2003.

[28] C. M. Cotell, J.A. Sprague, F. A. Smidt, Jr.: ASM Handbook Volume 5, ASM International, 1999.

[29] G.A. Di Bari: ASM Handbook, Volume 3, Nickel Plating, ASM International, 1999.