

Analiza trošenja lančanika brdskog bicikla

Mandić, Stjepan

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:752331>

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

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

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Stjepan Mandić

Zagreb, 2023.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

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

Student:

Stjepan Mandić

Zagreb, 2023.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija uz navedenu literaturu te znanje iz vlastitog iskustva poznavanja odabrane teme.

Stjepan Mandić

Zahvaljujem se svom mentoru, prof.dr.sc. Darku Landeku na vođenju i stručnoj pomoći tijekom izrade završnoga rada i ukazanom povjerenju. Također, zahvaljujem asistentu Jurici Jačanu te tehničkom suradniku Ivanu Vovku na pomoći s praktičnim dijelom završnog rada.

Hvala mojoj obitelji na podršci i odricanju kako bi mi školovanje bilo što bezbrižnije.

Stjepan Mandić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 23 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 23 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Stjepan Mandić** JMBAG: **0035225791**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza trošenja lančanika brdskog bicikla**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of mountain bike sprocket wear**

Opis zadatka:

Pogonski sklop bicikla izložen je visokim mehaničkim naprezanjima, trošenju i koroziji. Ovisno o uvjetima uporabe, u eksploatacijskom vijeku bicikla s više brzina, se istroši najmanje jedan lanac i komplet lančanika. Pri tome su procesima trošenja najviše izloženi gonjeni lančanici s manjim brojem zubi na zadnjem kotaču bicikla zajedno sa zupčastom spojkom po kojoj klize tijekom promjene brzina.

U teorijskom dijelu rada treba opisati i usporediti konstrukcijske izvedbe lančanog prijenosnika brdskog bicikla i materijale za izradu lančanika. Na primjeru izabranog tipa brdskog bicikla treba opisati mehanizme i procese trošenja u tribosustavu „lanac – lančanik - glavina lančanika“ i metode koje će se koristiti za analizu trošenja.

U eksperimentalnom dijelu rada treba provesti ispitivanja hrapavosti površine, tvrdoće, kemijskog sastava i mikrostrukture te analizirati istrošene površine na lančaniku brdskog bicikla. Na temelju provedenih ispitivanja predložiti materijale, toplinsku obradu i zaštitne prevlake za izradu lančanika, otporne na visoka mehanička naprezanja, trošenje i koroziju.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2022.

Datum predaje rada:

1. rok: 20. 2. 2023.
2. rok (izvanredni): 10. 7. 2023.
3. rok: 18. 9. 2023.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 27. 2. – 3. 3. 2023.
2. rok (izvanredni): 14. 7. 2023.
3. rok: 25. 9. – 29. 9. 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Darko Landek

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

Sažetak

Bicikli su sastavni dio današnjeg prometa i sporta. U povijesnom razvoju bicikala, najvažniji napredak postignut je u području pogonskog sklopa. U ovom završnom radu iznesene su informacije o pogonskom sklopu bicikla, smještaju lančanika u sklopu bicikla, njihovim zadaćama, materijalu, konstrukciji i uvjetima eksploatacije. Opisane su metode karakterizacije materijala poput ispitivanja kemijskog sastava, mikrostrukture, debljine prevlake i tvrdoće. U sastavu eksperimentalnog dijela završnog rada, na uzorku tri korištena lančanika i tijela glavčine, provedena su navedena ispitivanja uz detaljan opis postupaka pripreme metalografskog uzorka i izvedbe analiza te diskusiju dobivenih rezultata.

Ključne riječi: bicikl, lančanik, adhezijsko trošenje, abrazija, umor površine, karakterizacija materijala

Summary

Bicycles are an integral part of today's sports and traffic. In bicycles historical development, the most important progress was made in its drivetrain area. In this final assignment, information about the bicycle drivetrain, the location of the sprockets in the bicycle assembly, their tasks, materials, construction and conditions of use is presented. Materials characterization methods such as chemical composition testing, microstructure, coating thickness and hardness are described. In the experimental part of the final assignment, on the sample of three used sprockets and a freehub body, mentioned tests were performed with a detailed description of the metallographic sample preparation procedure and analysis execution, as well as a discussion about obtained results.

Key words: bicycle, sprocket, adhesive wear, abrasion, surface fatigue, material characterization

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
1. UVOD.....	1
2. KONSTRUKCIJSKE IZVEDBE LANČANIKA.....	3
2.1 Pogonski sklop bicikla	3
2.2 Posebnosti eksploatacije brdskog bicikla	5
2.3 Metalni materijali u izradi lančanika.....	6
2.4 Konstrukcija kazete	7
3. OPIS METODA ZA KARAKTERIZACIJU MATERIJALA I TROŠENJA LANČANIKA ..	9
3.1 Ispitivanje hrapavosti površine	9
3.2 Ispitivanje kemijskog sastava lančanika	11
3.2.1 Metoda XRF.....	11
3.2.2 Metoda EDX/EDS	12
3.3 Ispitivanje tvrdoće.....	13
3.3.1 Vickersova metoda.....	13
3.3.2 Rockwellova metoda	16
3.4 Ispitivanje mikrostrukture i određivanje debljine prevlake.....	18
3.4.1 Svjetlosna mikroskopija	18
3.4.2 SEM mikroskopija	19
3.4.3 Kalotest.....	20
4. ANALIZA ISTROŠENE I OŠTEĆENE POVRŠINE LANČANIKA.....	23
4.1 Priprema uzorka	24
4.1.1 Brušenje	24
4.1.2 Poliranje	25
4.2 Rezultati XRF analize	27

4.3 Hrapavost površine tijela glavčine	28
4.4 Analiza trošenja zubi i oštećenja	29
4.5 Rezultati ispitivanja tvrdoće lančanika i tijela glavčine.....	32
4.6 Analiza mikrostrukture lančanika i tijela glavčine.....	35
4.7 Debljina zaštitne prevlake	37
4.8 Rezultati EDX/EDS analize	37
4.9 Diskusija rezultata	41
5. Zaključak	42
Literatura	43

POPIS SLIKA

Slika 1: Jednibrzinski pogonski sklop [2]	3
Slika 2: Višebrzinski pogonski sklop [3]	4
Slika 3: Prikaz raspodjele sila na okvir bicikla tijekom kretanja uzbrdo uz korištenje sjedala (lijevo) i bez korištenja sjedala (desno) [7].....	5
Slika 4: Shimano XTR kazeta u kojoj se primjenjuje više materijala za izradu lančanika [8]	7
Slika 5: Geometrija lančanika kazete [9].....	7
Slika 6: Kućište kazete i stezna kapica [10].....	8
Slika 7: Osnovne vrste odstupanja površine: a) neparalelnost, b) valovitost, c) izbrazdanost, d) hrapavost, e) rezultatna realna površina [11]	9
Slika 8: Prikaz visina neravnina y na referentnoj duljini l [11]	10
Slika 9: SEM-EDX analiza zrnaca praška [17].....	12
Slika 10: Odabir kuta od 136° [18].....	14
Slika 11: Princip mjerenja tvrdoće HRC metodom [19].....	16
Slika 12: SEM slika metalne pjene [20]	19
Slika 13: Kalotest, određivanje debljine prevlake [21].....	20
Slika 15: Otisak kalotesta [21]	21
Slika 16: Lančanici i tijelo glavčine za ispitivanje	23
Slika 17: Brusilica za brušenje metalografskog uzoraka.....	24
Slika 18: Polirka za poliranje metalografskog uzoraka	26
Slika 19: Polirani metalografski uzorak.....	26
Slika 20: Aparat za XRF analizu	27
Slika 21: Prikaz hrapavosti površine tijela glavčine	28
Slika 22: Tragovi utiskivanja lančanika u tijelo glavčine.....	30
Slika 23: Oštećenje lančanika u dodiru s tijelom glavčine	30
Slika 24: Veliki lančanik s vidljivom plastičnom deformacijom materijala zupca lančanika uslijed velikog naprezanja prenešenog s lanca i iskrivljenom geometrijom zupca.....	31
Slika 25: Veliki lančanik s vidljivim otkrnućem dijela zupca uzrokovano umorom površine (na slici desno), tragovi abrazivnog trošenja od dodira s lancem (na slici gore).....	31
Slika 26: Prikaz trošenja jednibrzinskog lančanika	32
Slika 27: Mjerenje tvrdoće jednibrzinskog lančanika	33
Slika 28: Otisak indentora u ispitivanju tvrdoće metodom Vickers.....	33

Slika 29: Vrijednosti tvrdoće lančanika od vrha zupca prema središtu	34
Slika 30: Mikrostruktura tijela glavčine.....	35
Slika 31: Mikrostrukura velikog lančanika	36
Slika 32: Mikrostruktura malog lančanika	36
Slika 33: Izmjerene vrijednosti debljine prevlake nikla.....	37
Slika 34: Područje EDX ispitivanja na tijelu glavčine	38
Slika 35: EDX spektar dobiven analizom tijela glavčine	38
Slika 36: Područje EDX ispitivanja na zupcu lančanika	39
Slika 37: EDX spektar dobiven analizom zupca lančanika	39
Slika 38: Područje EDX ispitivanja prevlake	40
Slika 39: EDX spektar dobiven analizom prevlake	40

POPIS TABLICA

Tablica 1: Podjela skala tvrdoće ispitanih prema metodi Vickers [18]	14
Tablica 2: Parametri brušenja metalografskog uzoraka.....	25
Tablica 3: Parametri poliranja metalografskog uzoraka	26
Tablica 4: Rezultati XRF analize lančanika.....	27
Tablica 5: Uvjeti mjerenja hrapavosti površine	28
Tablica 6: Rezultati analize hrapavosti površine tijela glavčine	29
Tablica 7: Rezultati mjerenja tvrdoće cijelih dijelova pogonskog sklopa bicikla	34
Tablica 8: Maseni udio pojedinih elemenata u čeliku tijela glavčine	38
Tablica 9: Maseni udio pojedinih elemenata u čeliku lančanika.....	39
Tablica 10: Maseni udio pojedinih elemenata u prevlaci	40

1. UVOD

Bicikl je prvo kopneno prijevozno sredstvo koje pokreće čovjek isključivo svojom snagom. U početku se bicikl pokretao odguravajući se nogama od poda, a zatim se dugi niz godina inoviralo u cilju pronalaska najboljeg načina prijenosa snage od čovjeka do kotača. Današnji pogonski sklop gdje se bicikl pokreće okretanjem poluga smještenim na dnu okvira, a snaga se prenosi na zadnji kotač pomoću lanca ili remena, najbolji je, najsigurniji te najefikasniji pogonski sklop zbog kojeg je bicikl pouzdano prijevozno sredstvo i sportski rekvizit. Najčešći pogonski sklop bicikla sastoji se od pedala, poluga pogona, prednjeg lančanika (ili više njih), lanca, stražnjih lančanika (kazete) te mjenjača koji pomiču lanac s jednog lančanika na drugi i uz to održavaju potrebnu napetost u lancu. Lanac i lančanici izloženi su velikim mehaničkim naprezanjima, trošenju i koroziji. Konstrukcija, izbor materijala, toplinska obrada i modifikacija površine lančanika imaju zadaću osigurati dug vijek trajanja u svim uvjetima eksploatacije. U radu će se provesti analiza trošenja lančanika i karakterizacija materijala dva tipa lančanika uz diskusiju o mogućnostima unaprjeđenja izrade lančanika.

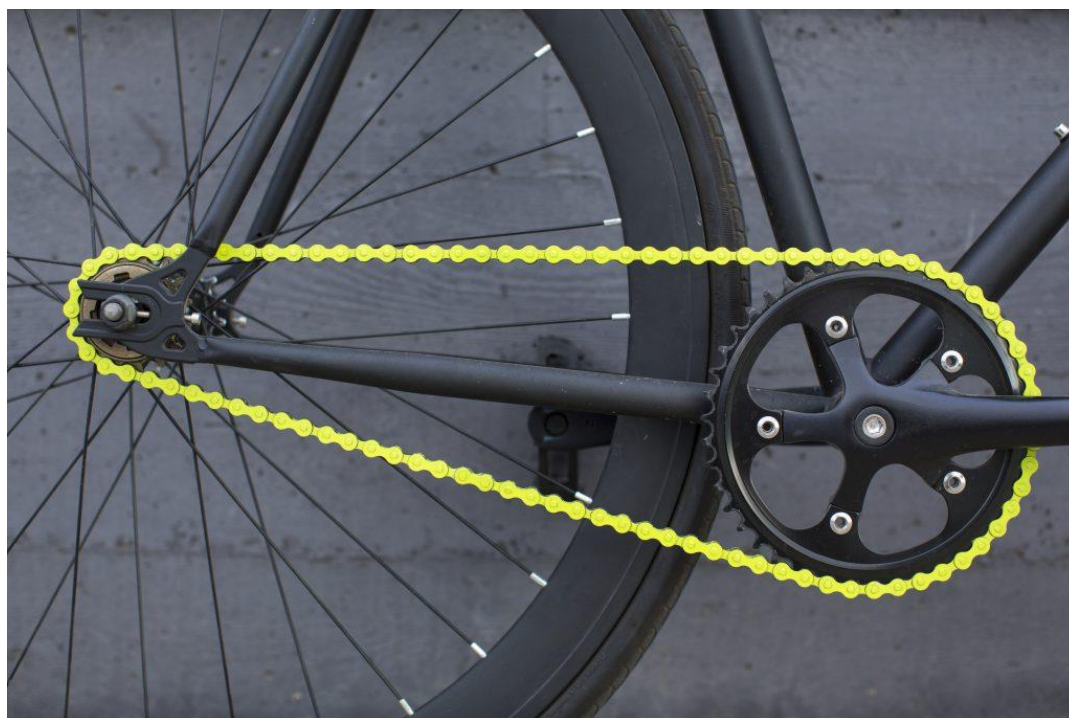
TEORIJSKI DIO

2. KONSTRUKCIJSKE IZVEDBE LANČANIKA

2.1 Pogonski sklop bicikla

Pogonski sklop ima zadaću pružiti i velik raspon prijenosnih omjera (brzina) kako bi se bicikl efikasno pogonio tijekom pokretanja, na uzbrdicama i na većim brzinama. Taj raspon dobiva se pomoću sustava lančanika različitog broja zubaca, promjenom zakretnog momenta na kotaču i broja okretaja kotača, u odnosu na broj okretaja poluga pogona.

Najčešći je pogonski sklop sa lancem i lančanicima. Razlikuju se jednobrzinski sustavi i oni sa više brzina. Jednobrzinski sustavi koriste se kada je jednostavnost najvažnija karakteristika bicikla, odnosno kada se mogućnost pojave kvarova pokušava minimalizirati odbacivanjem kompleksnih komponenata, ali time i njihovih dobrih strana. Primjeri takvih bicikala su gradski bicikli, BMX, „dirt jump“ bicikli. Jednostavnost čini sustav pouzdanim i jeftinim [1]. Pravilna napetost lanca postiže se postavljanjem lančanika na pravu udaljenost, a za to je potreban poseban dizajn okvira sa horizontalnim utorima za montažu stražnjeg kotača (slika 1).



Slika 1: Jednobrzinski pogonski sklop [2]

Višebrzinski sustavi imaju više lančanika povezanih u kazetu na stražnjem kotaču i obavezno koriste stražnji mjenjač. Postoje izvedenice kazeta sa od sedam pa do dvanaest lančanika. Današnje kazete od deset pa do dvanaest lančanika imaju raspon broja zubaca od 10 do 52, što je dovoljno velik raspon da budu uparene samo sa jednim pogonskim lančanikom (prednjim) i time čine sklop jednostavnijim, lakšim i više pouzdanim.

Kazete sa šest do devet lančanika (nekad i deset) uparaju se sa dva ili tri pogonska lančanika kako bi se postigao dovoljan raspon prijenosnih omjera. Takav sustav je jeftiniji, ali i skloniji ispadanju lanca sa lančanika (slika 2).

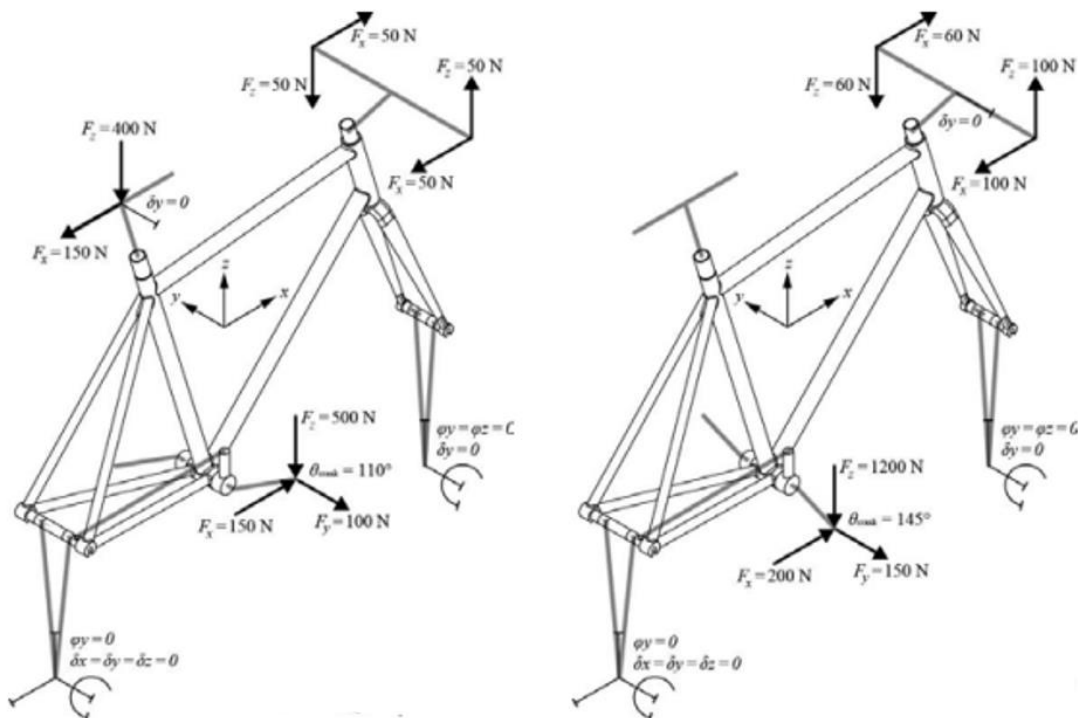


Slika 2: Višebrzinski pogonski sklop [3]

Osim lanca, kazete i ljudske snage, postoje i druge varijante pogonskog sklopa. Sve su popularniji novi električni bicikli koji u svom pogonskom sklopu imaju električni motor kojim pomažu vozaču u kretanju [4,5,6]. Postoje i izvedenice pogonskog sklopa gdje se zupčasti remen koristi za prijenos snage na stražnji kotač, a na dnu okvira bicikla nalazi se zatvoreni mjenjač sa zupčanicima poput onih na automobilima.

2.2 Posebnosti eksploatacije brdskog bicikla

Brdski bicikli, za razliku od onih cestovnih, dizajnirani su za neravne planinske i šumske terene. Oblik terena usko je povezan sa oblikom naprezanja u pogonskom sklopu bicikla. Vožnja na brdskom biciklu najčešće se sastoji od velikog uspona punog strmih i neravnih dijelova koji zahtijevaju kratkotrajna ubrzanja kako bi se vozač popeo preko njih, zatim slijedi sprinterski zalet u spust u kojemu nema mnogo pedaliranja.



Slika 3: Prikaz raspodjele sila na okvir bicikla tijekom kretanja uzbrdo uz korištenje sjedala (lijevo) i bez korištenja sjedala (desno) [7]

Podloga po kojoj se vozi često je ili blatnjava i mokra ili vrlo prašnjava. Blato i zemlja lako se nanese po pogonskom sklopu, kontaminiraju ga česticama i uklanjaju mazivo s lanca. Prašina koja se zalijepi na lanac djeluje kao prirodni abraziv. Sve to oštećuje elemente pogonskog sklopa i smanjuje njihov vijek trajanja.

Visoka naprezanja u pogonskom sklopu tijekom prethodno opisanih strmih uspona uz kombinaciju kontaminiranog stanja pogonskog sklopa eksponencijalno povećavaju trošenje lančanika i lanca brdskog bicikla u odnosu na relativno jednolično kontinuirano naprezanje u pogonskom sklopu cestovnog bicikla.

2.3 Metalni materijali u izradi lančanika

Kod konstruiranja lančanika bicikla i odabira materijala obraća se pažnja na nekoliko stvari: otpornost trošenju, masu i veličinu lančanika. Lančanici se u eksploataciji rotiraju, stražnji brže od prednjih, pa je bitno da se veći lančanici proizvode od materijala manje gustoće kako bi vozač trošio manje energije prilikom vožnje. Lančanici koji se često koriste ili oni s manjim brojem zubaca izloženi su većem trošenju od ostalih. Najviše korišteni materijali za izradu lančanika bicikla su čelik, legure aluminija i titana.

Najčešći materijal u izradi lančanika je čelik kao lako dostupan i svestran materijal za izradu, poput čelika 42CrMo4. Čelik je, među tri ovdje navedena, najjeftiniji i najotporniji trošenju, ali su lančanici napravljeni od čelika najteži. Kazete napravljene samo od čelika koriste se na jeftinijim biciklima. Na kazetama skupljih bicikala ili onih složenih za utrke, korištenje čeličnih lančanika ograničeno je na one lančanike s manjim brojem zubaca. Takvi lančanici malog su radijusa pa im je moment tromosti također mali te zbog toga ne utječu značajnije na efikasnost u vožnji. Otpornost na koroziju postiže se završnim prevlačenjem lančanika. Najjeftinije kazete se bruniraju, srednja klasa podvrgava se prevlačenju niklom, a najskuplje kazete prevučene su titan-nitridnom prevlakom zlatne boje.

Aluminijski lančanici najlakši su, ali nisu otporni na trošenje. Kao takvi koriste se na skupljim komponentama. Najčešće se upotrebljavaju kao pogonski lančanici (prednji) jer takvi lančanici imaju velik broj zubaca, izrađeni od aluminijske legure AW-7005. Kada je u sklopu samo jedan pogonski lančanik on se izrađuje s 28 do 36 zubaca, dok se u sustavu sa tri pogonska lančanika često koriste kombinacije s 22, 32, 42 ili 28, 38, 48 zubaca. Pogonske lančanike lakše je i jeftinije zamijeniti, jer se prodaju zasebno. U kazeti se često samo najveći lančanik izrađuje od aluminija zbog smanjenja mase, a trošenje je smanjeno velikim brojem zubaca koji jednoliko raspoređuju opterećenje lanca. U praksi se često upravo taj najveći aluminijski lančanik kazete prvi potroši jer ga vozač koji nije u treningu najviše koristi. Dodatno produljenje vijeka trajanja aluminijskih lančanika postiže se prevlačenjem.

Lančanici kazete napravljeni od titanskih legura imaju dobar omjer mase i otpornosti na trošenje. Koriste se isključivo na biciklima složenim za profesionalne utrke zbog svoje visoke cijene.

Popularni japanski proizvođač Shimano u svojoj dvanaest-brzinskoj kazeti izrađenoj za profesionalne utrke koristi sva tri spomenuta materijala. Za najmanje lančanike koji su najviše podložni trošenju koristi se čelik. Lančanici od titanijeve legure koriste se u sredini, dok su lančanici od aluminijevih legura oni s najvećim brojem zubaca. Slika 4 prikazuje takvu kazetu gdje se, iako prevučeni, materijali lančanika lako raspoznaju prema boji.



Slika 4: Shimano XTR kazeta u kojoj se primjenjuje više materijala za izradu lančanika [8]

2.4 Konstrukcija kazete

Kazeta nije jednostavno sustav lančanika poredanih od najmanjeg do najvećeg, već je cjelina koja funkcionira zajedno. Geometrija svakog lančanika posebna je, zupci nisu jednoliki po cijelom opsegu i na određenim mjestima dodani su utori pomoću kojih se lanac prebacuje s jednog lančanika na drugi (slika 5).



Slika 5: Geometrija lančanika kazete [9]

Način spajanja lančanika ovisi o proizvođaču. Neke kazete rade se od jednog komada metala (npr. kazete njemačkog proizvođača SRAM), dok se većina kazeta proizvodi spajanjem lančanika zakovicama na kućište u obliku paukove mreže (eng. spider), pri čemu jedan ili dva najmanja lančanika ostaju izdvojena i zamjenjiva (slika 6).



Slika 6: Kućište kazete i stezna kapica [10]

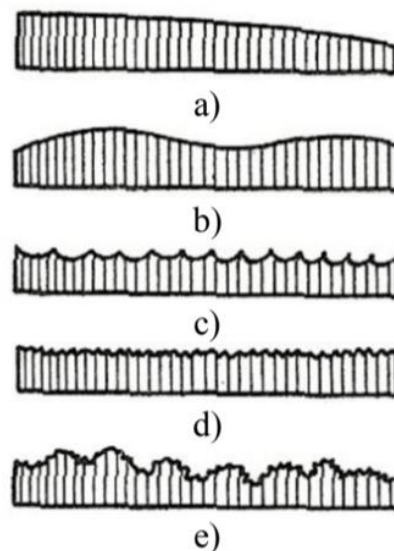
Kazeta se montira na tijelo glavčine (dio zadnjeg kotača sa sistemom kvačila). Centralni dio kućišta mora odgovarati obliku tijela glavčine. Stezna kapica (crvena, desno na slici 5) ima navoj za zatezanje i utor za poseban ključ koji se umeće kroz centar kapice. Poseban ključ potreban je jer kroz steznu kapicu prolazi osovina kotača.

3. OPIS METODA ZA KARAKTERIZACIJU MATERIJALA I TROŠENJA LANČANIKA

Za detaljniji uvid u problematiku konstrukcije lančanika, izrade i trošenja u eksploataciji u radu se primjenjuju metode ispitivanja hrapavosti površine, kemijskog sastava, kalotest za određivanje debljine prevlake te svjetlosna i skenirajuća elektronska mikroskopija.

3.1 Ispitivanje hrapavosti površine

Hrapavost, valovitost, neparalelnost i izbrazdanost predstavljaju odstupanja koja se javljaju na tehničkoj površini. Hrapavost se definira kao sveukupnost mikrogeometrijskih nepravilnosti na površini predmeta. Ove nepravilnosti nastaju kao posljedica postupaka obrade kao i nekih drugih utjecaja, prikazane su na slici 7.



Slika 7: Osnovne vrste odstupanja površine: a) neparalelnost, b) valovitost, c) izbrazdanost, d) hrapavost, e) rezultatna realna površina [11]

Na profilu hrapavosti površine određuju se sljedeći parametri hrapavosti:

1. Vertikalni

$R_y = R_{\max}$ → najveća visina izbočine profila

R_a → srednje aritmetičko odstupanje profila

R_z → prosječna visina neravnina

2. Horizontalni

R_{sm} → srednji korak neravnina profila

P_c → broj vrhova profila

3. Hibridni

R_{pk} → reducirana visina vrhova

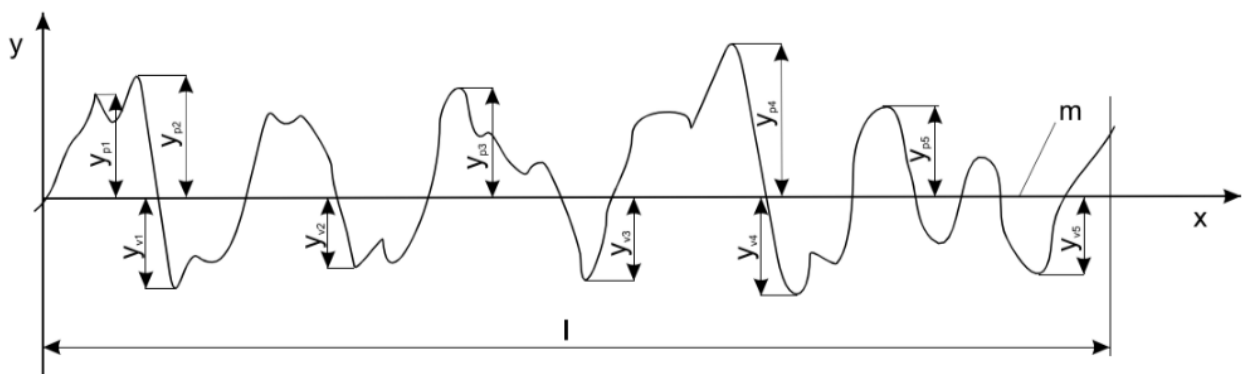
R_k → dubina jezgra hrapavosti

R_{vk} → reducirana dubina dolova

Parametri R_a i R_z najčešće se koriste u praksi te su opisani u sljedećim matematičkim izrazima:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l y(x) dx \quad (1)$$

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 |y_{pi}| + \sum_{i=1}^5 |y_{vi}|}{5} \quad (2)$$



Slika 8: Prikaz visina neravnina y na referentnoj duljini l [11]

Hrapavost površine određuje primjenom sljedećih metoda:

- Direktnim ili kontaktnim metodama
- Tehnikama uspoređivanja
- Bez kontaktnim metodama
- Metodama mjerenja profila

Uređaj na kojemu je, kasnije u praktičnom dijelu, izmjerena hrapavost površine tijela glavčine koristi se kontaktnom metodom. Sastoji se od dvije komponente: profilometra koji mjeri površinske neravnine pomoću ticala i profilografa koji zapisuje izmjereni profil na papir.

3.2 Ispitivanje kemijskog sastava lančanika

Poznavanje kemijskih sastava lančanika ključno je za razumijevanje njihovih mehaničkih svojstava. Iako se može vrlo lako zaključiti da se radi o čeliku kao materijalu izrade, bez sljedećih metoda ne može se odrediti točan udio legiranih elemenata i vrsta čelika.

3.2.1 Metoda XRF

Rendgenska difrakcija (XRF, eng. *X-ray fluorescence diffraction*) je nedestruktivna analitička metoda koja daje informacije o kristalnoj strukturi, kemijskom sastavu i fizičkim karakteristikama ispitanog materijala. Koristi se principom raspršivanja rendgenskih zraka na materijal i hvatanjem reflektiranih zraka.

Braggov zakon kaže da do konstruktivne interferencije dolazi kada se putovi koji dvije zrake prijeđu razlikuju za cjelobrojni višekratnik valne duljine, a opisuje se sljedećom jednačinom.

$$2d\sin\theta = n\lambda \quad (3)$$

gdje d označava razmak između ravnina u kristalnoj rešetci, λ označava valjnu duljinu rendgenskog zračenja i θ označava kut upadne i difraktirane zrake.

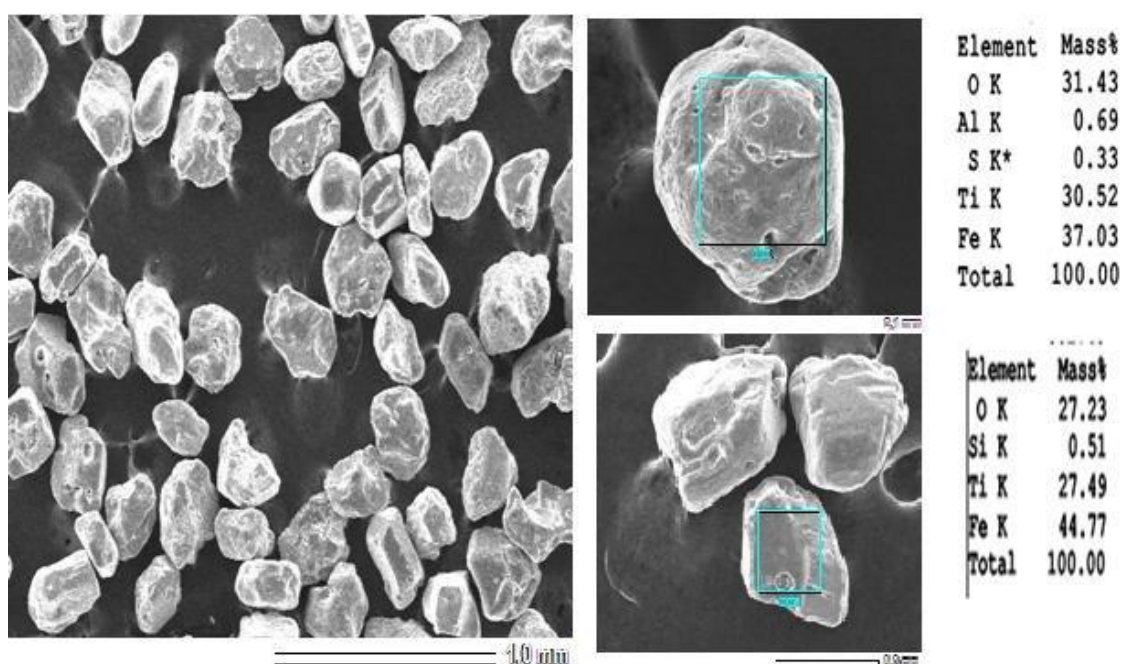
Ispitivanjem se dobije difraktogram koji se analizira u skladu sa Braggovim zakonom i dolazi se do konačnih rezultata.

Rendgenske zrake međudjeluju s elektronskim omotačem atoma te se „difraktirana snaga“ i apsorpcija rendgenskog zračenja povećavaju s brojem elektrona, odnosno atomskim brojem. Na temelju toga moguće je razlikovati različite elemente unutar materijala. [12, 13, 14]

3.2.2 Metoda EDX/EDS

Analiza pomoću energodisperzivnog detektora rendgenskih zraka (EDX, eng. *Energy Dispersive X-Ray Analysis*) koristi se za utvrđivanje kemijskog sastava ispitanog materijala. EDS sistemi zapravo su nastavci za SEM (eng. *Scanning Electron Microscopy*) i TEM (Transmission Electron Microscopy) sustave mikroskopa. [15]

Kada upadni elektron emitiran iz mikroskopa pogodi elektron u atomu materijala, stvori se praznina u elektronskoj orbiti (ljusci) konstitutivnog atoma te se elektroni premještaju iz vanjske ljuske u onu pogođenu kako bi je stabilizirali. X-zrake emitirane u tom procesu nazivaju se karakteristične X-zrake i imaju određenu energetska vrijednost za svaki element. Iz dobivene energije karakterističnih X-zraka, prisutnost pojedinih elemenata u uzorku može se identificirati u nekoliko sekundi. Intenzitet karakterističnih X-zraka također se može koristiti za mjerenje sadržaja svakog elementa i za analizu segregacije unutar vidnog polja (X-ray mapiranje) [16].



Slika 9: SEM-EDX analiza zrnaca praška [17]

SEM – EDX analiza pruža potpunu kontrolu okolišnih uvjeta pri ispitivanju, također omogućuje i elementarno mapiranje uzorka. Zbog toga ima brojne primjene poput:

- Detekcije, izolacije i identifikacije kontaminacije
- Kontrole kvalitete sirovina i krajnjeg proizvoda
- Procjene emisije čestica unutar postrojenja
- Istrage kvarova, utvrđivanje uzroka
- Istrage spornih potraživanja i vještačenja

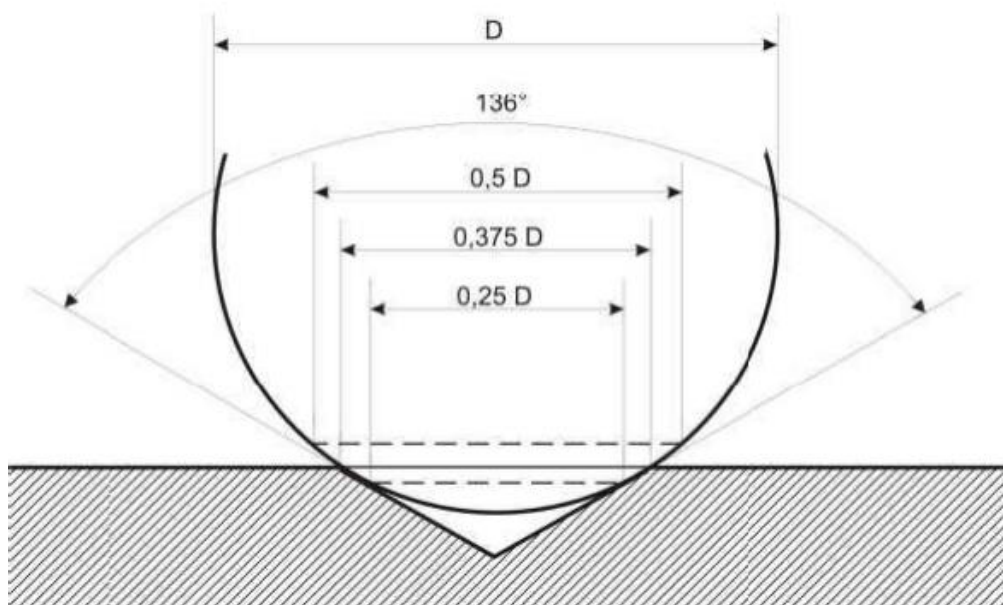
3.3 Ispitivanje tvrdoće

Definicija tvrdoće jest otpornost materijala prema prodiranju nekog drugog, znatno tvrdog tijela, u njegovu površinu. Tvrdoća je vrlo važna karakteristika materijala jer je usko povezana s otpornošću prema trošenju i čvrstoćom. Mjerenje tvrdoće obavlja se utiskivanjem indentora u površinu ispitnog uzorka te mjerenjem otiska. Postoje razne metode mjerenja tvrdoće od kojih su najčešće i najpoznatije: Brinell, Rockwell, Vickers i Knoop.

3.3.1 Vickersova metoda

Mjerenje tvrdoće po Vickersu standardna je metoda mjerenja tvrdoće metala, posebno onih s površinom visoke tvrdoće. Inženjeri tvrtke Vickers iz Velike Britanije razvili su tu metodu dvadesetih godina 20. stoljeća. Uspostavljena je skala vrijednosti koje točno odražavaju široko područje tvrdoće čelika. Određivanje tvrdoće (mikrotvrdoće) po Vickersu razvijena je iz metode Brinell.

Proces mjerenja tvrdoće ovom metodom počinje učvršćivanjem ispitnog uzorka na odgovarajući tvrdomjer. U površinu ispitnog uzorka utiskuje se dijamantni indentor sa vrhom oblika četverostrane piramide sa vršnim kutom od 136° . Taj kut odabran je jer predstavlja kut kojeg zatvaraju tangencijalne ravnine na Brinellovu kuglicu pri optimalnoj veličini otisnuća $d=0,375 \cdot D$ (slika 10). Korištenjem indentora napravljenog od dijamanta omogućeno je mjerenje tvrdoće najtvrdih materijala, a oblik indentora uklanja problem velike ovisnosti dobivene tvrdoće o primijenjenoj sili utiskivanja.



Slika 10: Odabir kuta od 136° [18]

Sila kojom se indentor utiskuje ovisi o odabranoj metodi. Veće sile ostavljaju veći trag na ispitnom uzorku pa se prema veličini uzorka ili dijela uzorka odabire metoda. Sile utiskivanja zajedno sa pripadajućom metodom navedene su u tablici 1.

Tablica 1: Podjela skala tvrdoće ispitanih prema metodi Vickers [18]

Konvencionalna tvrdoća		Semi – mikrotvrdoća		Mikrotvrdoća	
Oznaka	Sila utiskivanja F, N	Oznaka	Sila utiskivanja F, N	Oznaka	Sila utiskivanja F, N
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,1471
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2452
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,4903
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807

Izračun vrijednosti tvrdoće po Vickersu provodi se po sljedećoj formuli:

$$HV = \frac{F \cdot 0,102}{S} \quad (4)$$

gdje je F sila utiskivanja izražena u N, a S površina šuplje piramide otisnute u materijalu izražena u mm². Ukoliko se površina utisnuća izrazi preko dijagonale baze otiska (kvadrata), izraz izgleda ovako:

$$HV = 0,102 \cdot \frac{2 \cdot F \cdot \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} \quad (5)$$

odnosno:

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (6)$$

gdje d predstavlja duljinu dijagonale otiska indentora.

Iznos tvrdoće empirijska je vrijednost koja se mora promatrati zajedno s eksperimentalnom metodom uz korištenje odgovarajuće skale tvrdoće. Kod ispitivanja čelika te bakra i bakrenih legura, razmak između otisaka mora biti veći od 2,5 dijagonale otiska, a prilikom mjerenja olova, lakih metala, kositra i njihovih legura, razmak između otisaka mora biti veći od 3 dijagonale otiska zbog nepoželjnog utjecaja hladnog očvrnuća na područjima utiskivanja indentora.

Prednosti Vickersove metode:

- skala pokriva cjelokupni raspon tvrdoće
- ispitivanje je nerazoran postupak zbog vrlo sitnih tragova indentora
- raspon primjenjivih sila vrlo je širok i zadovoljava svako područje primjene
- iznos tvrdoće nije ovisan o sili utiskivanja, osim kod vrlo malih sila pri ispitivanju mikrotvrdoće

Mane Vickersove metode:

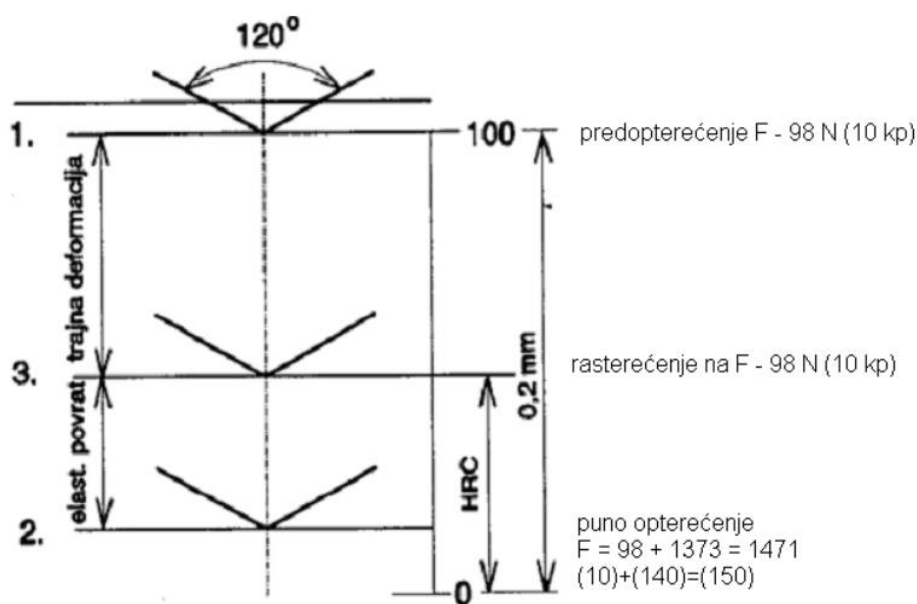
- potreban je mjerni mikroskop
- metoda je relativno spora
- površina ispitnog uzorka mora biti polirana

3.3.2 Rockwellova metoda

Kod metode ispitivanja tvrdoće po Rockwellu ne mjeri se površina otiska indentora, već se mjeri dubina prodiranja indentora. Zbog elastičnog povrata mjenjenog materijala, vrijednost tvrdoće na skali očitava se tek nakon rasterećenja.

Postoje dva tipa indentora u ovoj metodi. Prvi tip je dijamantni stožac sa vršnim kutom od 120° i radijusom zaobljenja od 0,2 mm. Takav indentor koristi se kod ispitivanja tvrdih metala (poput kaljenog čelika), a ispitivanje ima oznaku *HRC* (eng. *Hardness Rockwell Cone*). Drugi tip indentora je tvrda čelična kuglica promjera 1/8" ili 1/16" koja se koristi kod ispitivanja tvrdoće mekih metala (aluminij, bakar, meki čelik), a oznaka ispitivanja je *HRB* (eng. *Hardness Rockwell Ball*).

Postupak određivanja tvrdoće po Rockwellu započinje postavljanjem uzorka na tvrdomjer i opterećivanjem uzorka predopterećenjem F_0 , čime se dobije početna točka za mjerenje. Zatim se uzorak optereti glavnim opterećenjem F_1 , drži nekoliko sekundi i potom rastereti do predopterećenja F_0 . Dubina na kojoj se nalazi indentor nakon rasterećivanja i elastičnog povrata ispitanog uzorka definira vrijednost tvrdoće. Sile opterećenja zadane su metodom, a dubine prodiranja indentora direktno se očitavaju na mjerne skali tvrdomjera. Ovaj princip prikazan je u slici 11.



Slika 11: Princip mjerenja tvrdoće *HRC* metodom [19]

Za izračun vrijednosti *HRC* koristi se sljedeći izraz:

$$HRC = 100 - h/0,002 \quad (7)$$

gdje je *h* dubina prodiranja indentora mjerena u mm, a dobiva se izrazom:

$$h = h_2 - h_0 \quad (8)$$

gdje je *h*₂ dubina prodiranja indentora nakon rasterećenja, a *h*₀ dubina prodiranja indentora tijekom predopterećenja, oba mjerena u mm.

Dobivena skala poprima teoretske vrijednosti od 0 do 100 HRC, no u praksi vrijednosti ispitanih tvrdoća kreću se između 20 i 70 HRC.

Za izračun vrijednosti *HRB* koristi se sljedeći izraz:

$$HRB = 130 - h/0,002 \quad (9)$$

gdje je *h* dubina prodiranja kuglice mjerena u mm, a dobiva se izrazom:

$$h = h_2 - h_0 \quad (10)$$

gdje je *h*₂ dubina prodiranja kuglice nakon rasterećenja, a *h*₀ dubina prodiranja kuglice tijekom predopterećenja, oba mjerena u mm.

Dobivena skala poprima teoretske vrijednosti od 0 do 100 HRB, no u praksi vrijednosti ispitanih tvrdoća kreću se između 20 i 100 HRC.

Prednosti Rockwellove metode:

- vrlo brzo ispitivanje
- jednostavno ispitivanje
- za pripremu uzorka dovoljno je samo brušenje

Mane Rockwellove metode:

- nepreciznost
- slaba selektivnost, mjerno područje znatno manje od teorijskog

3.4 Ispitivanje mikrostrukture i određivanje debljine prevlake

Mehanička svojstva materijala potječu iz njegove mikrostrukture. Mikrostruktura podrazumijeva tip kristalne rešetke, veličinu i orijentiranost zrna te prisutnost i veličinu precipitata u strukturi materijala. Postupcima obrade materijala (mehaničkom, kemijskom, toplinskom) moguće je promijeniti mikrostrukturu u cilju poboljšavanja svojstava u eksploataciji ili prilagođavanja svojstava za jednu od obrada. Ispitivanje mikrostrukture lančanika pružit će informaciju o završnoj obradi.

Prevlačenjem lančanika produlje se njihov životni vijek, povećavajući otpornost koroziji ili trošenju. Debljina prevlake veličina je o kojoj ovise svojstva površine. Pretanak sloj prevlake mogao bi se istrošiti prebrzo, dok bi se predebeli sloj mogao naglo otrgnuti u procesima trošenja kao što je adhezija.

3.4.1 Svjetlosna mikroskopija

Svjetlosni mikroskop koristi snop svjetla kao medij za stvaranje slike. Uvećanje slike dobiva se optički preko uvećanja leće okulara pomnoženim sa uvećanjem objektivna, raspon uvećana koji je moguće dobiti je od 50:1 do 2000:1. Rezolucija mikroskopa također je vrlo važna karakteristika, a ona se definira kao najmanja udaljenost između dva predmeta za koju će mikroskop i dalje prepoznati da se radi o dva odvojena predmeta. Veliko ograničenje jest sam medij, odnosno svjetlost, koja ne može razviti rezoluciju manju od svoje valne duljine.

Za dobivanje slike mikrostrukture materijala na svjetlosnom mikroskopu, potrebno je pripremiti uzorak na slijedeći način:

1. pažljivo izrezati reprezentativan dio materijala za ispitivanje
2. uzorak uroniti u polimernu smolu za dobivanje standardizirane dimenzije i lakšeg rukovanja
3. brusiti, zatim polirati uzorak kako bi se odstranio deformirani sloj i dobila dovoljno sjajna površina za odbijanje svjetla
4. uzorak izložiti djelovanju otopine određenog kemijskog sastava, kako bi faze unutar mikrostrukture selektivno korodirale i razlika između njih postala jasno vidljiva

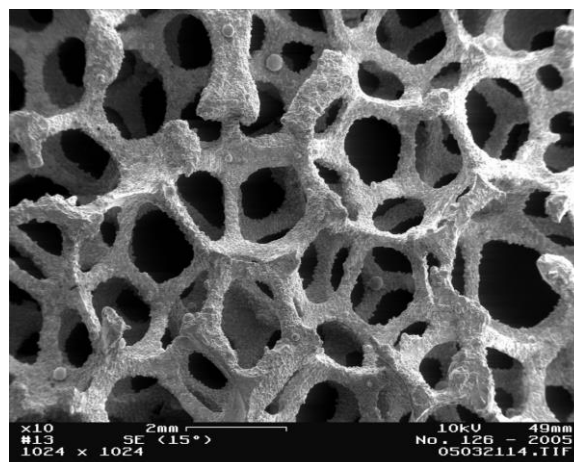
Potrebno je naglasiti da je čišćenje uzorka potrebno između svih koraka pripreme.

Pomoću svjetlosnog mikroskopa opremljenim mjernim uređajem, kamerom i računalnim programom moguće je vidjeti i izmjeriti veličinu zrna, udio faza, udio i veličinu precipitata te na temelju toga odrediti mikrostrukturno stanje materijala. Također, moguće je izmjeriti debljinu prevlake ukoliko je uzorak izrezan točno okomito na prevučenu površinu. Ovaj način određivanja debljine prevlake podložan je pogreškama jer je izrada uzorka većinski ručni rad. Unatoč tome, ukoliko se pazi, moguće je dobiti korisne rezultate.

3.4.2 SEM mikroskopija

Skenirajući elektronski mikroskop koristi snop elektrona kao medij za stvaranje slike. Elektroni se akceleriraju kroz magnetno polje unutar mikroskopa, udaraju o površinu materijala te se neki elektroni reflektiraju nazad (primarni elektroni), a neki elektroni izbiju elektrone iz površine (sekundarni elektroni), oba tipa skuplja detektor koji stvara sliku. Za pravilno dobivanje slike potrebno je uzorak staviti u vakuumsku komoru mikroskopa, kako elektroni ne bi pogađali molekule zraka. Važno je napomenuti da su samo električki vodljivi materijali pogodni za SEM analizu, iako postoje načini da se nevodljivi materijali pripreme za SEM (naparivanjen kontakt vodičima).

Elektroni se u vakuumu ponašaju kao valovi, ali s promjenjivom valnom duljinom. Valna duljina elektrona ovisi o naponu mikroskopa, povećanjem napona smanjuje se valna duljina elektrona te se time postiže bolja rezolucija. SEM mikroskopi imaju napon od 1 do 30 kV, postižu uvećanje slike do 5000000:1 uz rezoluciju od 3 nm. Uz sve to postiže se i velika dubinska oština pa je moguće stvarati slike impresivnog izgleda.

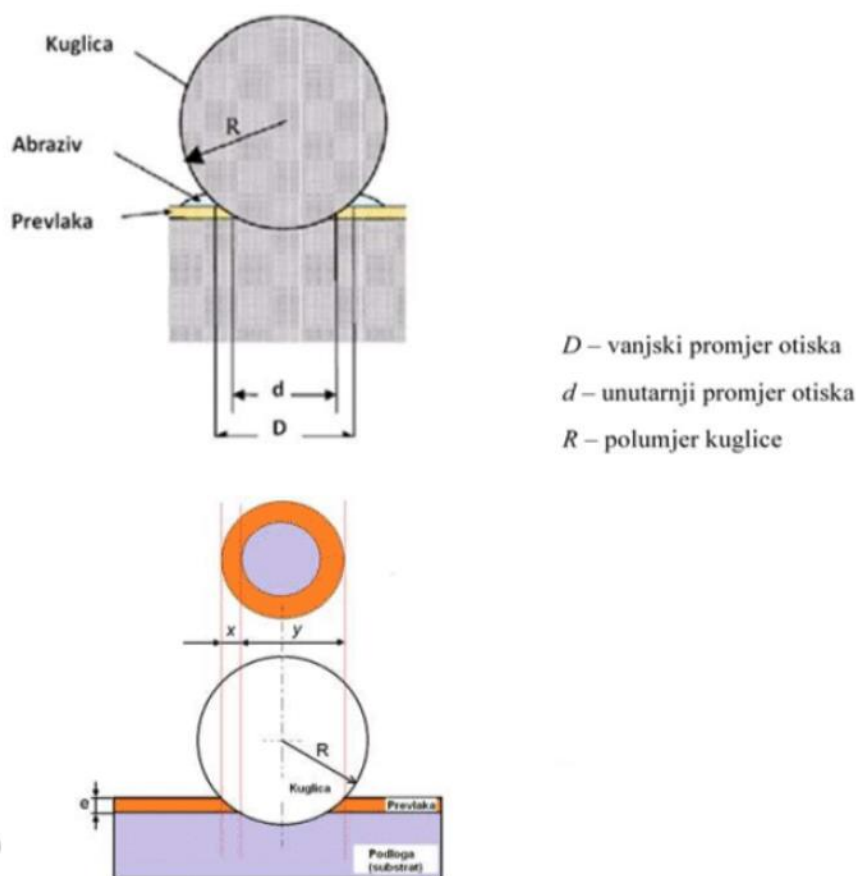


Slika 12: SEM slika metalne pjene [20]

SEM mikroskopija u metalografiji koristi se onda kada svjetlosni mikroskop nije dovoljan za dobivanje traženih informacija, odnosno kad je površina uzorka neravna i kad su za analizu mikrostrukture potrebna veća povećanja od 1000 puta. Prednosti ove metode su veliki izvor informacija o površini dobivene zbog visoke kvalitete slike, mogućnost izrade topografije površine (trodimenzionalne informacije) te mogućnost spajanja EDX uređaja za određivanje kemijskog sastava promatrane površine.

3.4.3 Kalotest

Za određivanje debljine prevlake na površini, bez da se ona okomito prereže, koristi se kalotest. Na površinu se naslanja rotirajuća kuglica koja uz pomoć abraziva troši sloj prevlake i osnovnog materijala, ostavljajući za sobom trag u obliku dvije koncentrične kružnice. Debljina prevlake označava se oznakom e , a način određivanja veličine e prikazan je na slici 13.

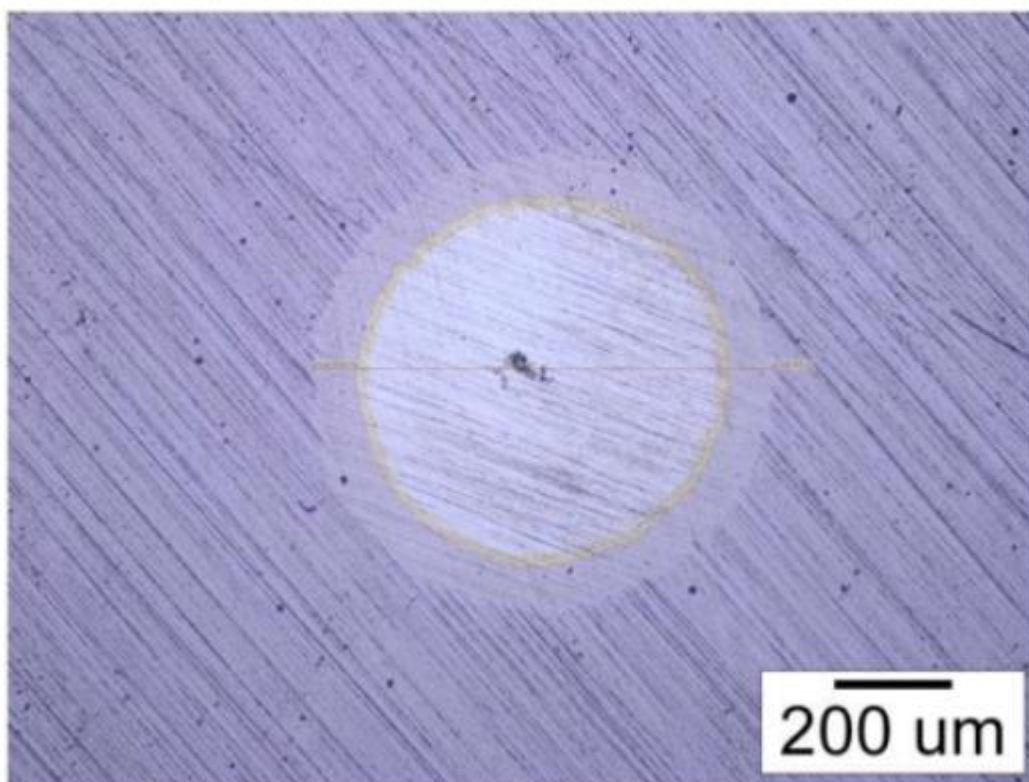


Slika 13: Kalotest, određivanje debljine prevlake [21]

$$e = \frac{D^2 - d^2}{8R} \quad (11)$$

$$e = \frac{xy}{2R} \quad (12)$$

Dobiveni otisak potrebno je pogledati na mikroskopu sa mjernim instrumentom i izmjeriti. Otisak na slici 14 nastao je kalotestom u kojemu se koristila kuglica promjera 25 mm.



Slika 14: Otisak kalotesta [21]

EKSPERIMENTALNI DIO

4. ANALIZA ISTROŠENE I OŠTEĆENE POVRŠINE LANČANIKA

U svrhu ispitivanja, odabrana su tri lančanika i tijelo glavčine. Jedan je lančanik sa bicikla s jednobrzinskim prijenosom još u uporabi, dva lančanika (veliki i mali) bili su dio iste osam-brzinske kazete brdskog bicikla te su bili montirani na tijelo glavčine. U jednom se trenutku tijekom vožnje pokvario sustav kvačila unutar tijela glavčine te je ono zamijenjeno novim, a ovo je iskorišteno u svrhu završnog rada.



Slika 15: Lančanici i tijelo glavčine za ispitivanje

Na slici 14, tijelo glavčine prikazano je u gornjem lijevom kutu (ono je crne boje, a kućište glavčine je srebrne), za lančanike sa osam-brzinske kazete od sada u tekstu koristit će se nazivi *veliki* (dolje lijevo na slici) i *mali* (gore desno na slici), dok će se lančanik prikazan na sredini slike nazivati *jednobrzinski*.

Za određivanje debljine prevlake, mikrotvrdoće po presjeku, EDX i analizu mikrostrukture potrebno je napraviti standardizirani uzorak uronjen u polimernu smolu, dok se ostala ispitivanja provode na cijelim lančanicima.

4.1 Priprema uzorka

Prvi korak kod pripreme uzorka jest izrezivanje. Od velikog lančanika izrezan je komad koji sadrži jedan zub te je brušenjem stanjen do polovice debljine, dobivena površina daje uvid u mikrostrukturu radijalno od centra prema vrhu zuba unutar središta lančanika. Mali lančanik prerezan je na način da daje obodni prikaz, odnosno pod kutom 90° na površinu velikog lančanika i dobivena površina daje uvid u mikrostrukturu po debljini lančanika te pravu debljinu prevlake. Komad tijela glavčine izrezan je i daje površinu u istom smjeru kao i veliki lančanik. Jednobrzinski lančanik nije izrezan za ispitivanje mikrostrukture jer je još u uporabi.

Svi izrezani uzorci zatim su pravilno orijentirani uronjeni u polimernu smolu. Nakon što je smola očvrstnula, krenulo se na daljnje korake pripreme uzorka.

4.1.1 Brušenje

Brušenje je proizvodni postupak strojne obrade odvajanjem čestica. U svrhu pripreme uzorka, služi za skidanje slojeva nečistoće, oksida i plastično deformiranih slojeva nastalih rijekom izrezivanja. Brušenje uzoraka izvodi se na brusilici prikazanoj na slici 16.



Slika 16: Brusilica za brušenje metalografskog uzorka

Brušenje se provodi u pet koraka. Za svaki korak brzina okretaja stroja pri brušenju je konstantna i iznosi 300 okretaja po minuti te se uzorak hladi i podmazuje mlazom vode. Kao abraziv za prvi korak koristi se brusni papir P320 na koji se uzorak pritisne umjerenom silom. U drugom koraku koristi se brusni papir P600 te se uzorak zakrene za 90°. Postupak se ponovi za korake tri, četiri i pet u kojima se koriste brusni papiri P1000, P2400, P4000 uz rotiranje uzorka između koraka.

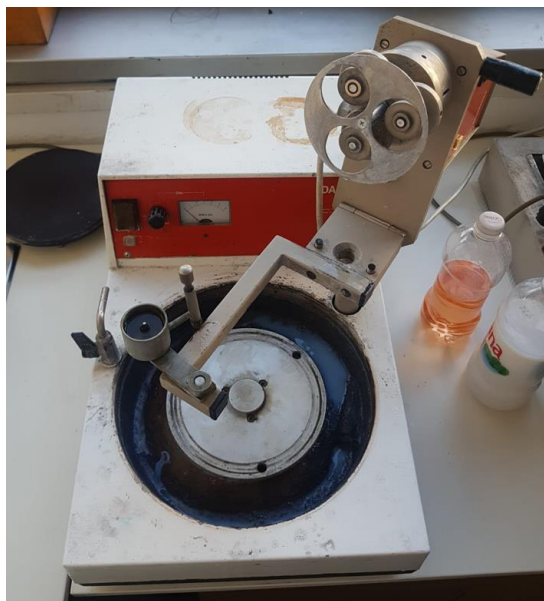
Tablica 2: Parametri brušenja metalografskog uzorka

Korak	1	2	3	4	5
Brusni papir	P320	P600	P1000	P2400	P4000
Hlađenje	Voda				
Smjer brušenja	Istosmjerno	Istosmjerno, okomito prethodnom			
Sila	Umjerena, ručna				

4.1.2 Poliranje

Poliranje je delikatan postupak obrade odvajanjem čestica kojim se dobiva sjajna površina te kao takav predstavlja završni korak u pripremi metalografskog uzorka. Aparat za poliranje (polirka) uzorka ima prihvat za uzorke uronjene u polimernu smolu te samostalno održava zadanu pritisnu silu (slika 17).

Postupak poliranja izvodi se u dva koraka. Brzina okretanja ploče za poliranje konstantna je i iznosi 130 okretaja po minuti. U prvom se koraku brušeni uzorak stavlja u polirku i namješta se pritisnu sila na 25N. Ploču za poliranje konstantno se podmazuje lubrikantom, dodaje se abrazivna dijamantna pasta veličine zrna 3 μ m i pokreće polirka. Nakon dvije minute u polirci uzorak se izvadi i opere. U drugom se koraku aparat očisti od lubrikanta i paste, uzorak se postavi u aparat te se doda abrazivna tekućina veličine zrna 0.03 μ m. Nakon jedne minute u polirci, uzorak je u potpunosti ispoliran.



Slika 17: Polirka za poliranje metalografskog uzoraka

Tablica 3: Parametri poliranja metalografskog uzoraka

Korak	1	2
Abraziv	Dijamantna pasta 3 μm	Abrazivna tekućina 0.03 μm
Hlađenje	Lubrikant	
Brzina rotacije stroja	130 okretaja po minuti	
Sila	25 N	
Vrijeme	2 min	1 min



Slika 18: Polirani metalografski uzorak

4.2 Rezultati XRF analize

Prilikom XRF analize potrebno je postaviti ispitne uzorke u otvorenu olovnu kutiju koja štiti operatera od negativnih utjecaja rendgenskih zraka. Na uzorke se prisloni aparat za XRF (slika 19) i pokrene se analiza.



Slika 19: Aparat za XRF analizu

Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 4:

Tablica 4: Rezultati XRF analize lančanika i tijela glavčine

	% Fe	% Ni	% Cr	% Mn	% Mo	% Co	% S	% Si	% P
Jednobrzinski lančanik	49,03	48,73	1,52	<1	0	<1	<1	0	0
Veliki lančanik	34,93	59,87	<1	0	0	<1	0	<1	<1
Mali lančanik	12,48	81,54	<1	0	<1	<1	0	<1	0
Tijelo glavčine	95,33	0	0	2,21	0	0	0	0	0

XRF analiza vrlo je brza metoda, ali ima svoje nedostatke. Pošto je analiza provedena na cijelim lančanicima, dobiveni rezultati odraz su sastava površine i sloja debljine do 1 mm ispod površine. Također, veliko ograničenje ove metode je nemogućnost detektiranja ugljika. Iz dobivenih rezultata možemo zaključiti da su svi lančanici napravljeni od niskolegiranog čelika i da je na njima prevlaka od nikla. Tijelo glavčine isto tako je čelično, ali bez prevlake.

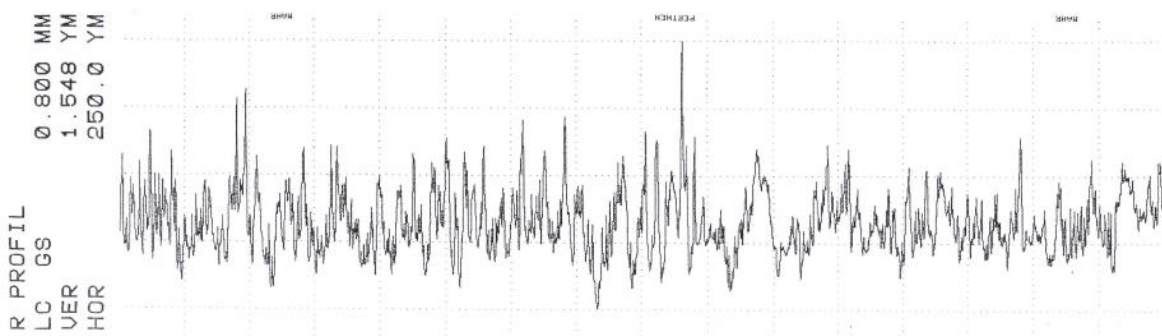
4.3 Hrapavost površine tijela glavčine

Provedena je analiza hrapavosti površine tijela glavčine kontaktnom metodom. Ispitana površina u stalnom je kontaktu s kazetom. Uvjeti mjerenja ispisani su u tablici 5.

Tablica 5: Uvjeti mjerenja hrapavosti površine

Uvjeti mjerenja:	
Mjeritelj:	Gorana Baršić
Datum mjerenja:	2.11. i 3.11.2022.
Radius ticala:	$r = 5 \mu\text{m}$
Filter:	Gauss
Cut-off vrijednost:	$\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$
Duljina vrednovanja:	$l_n = 4,00 \text{ mm}$

Ticalo je pratilo površinu tijela glavčine duž četiri dužine. Na slici 20 jedna je od četiri prikaza površine koju je profilograf zapisao.



Slika 20: Prikaz hrapavosti površine tijela glavčine

Nakon analize dobiveni su konačni rezultati prikazani u tablici 6.

Tablica 6: Rezultati analize hrapavosti površine tijela glavčine

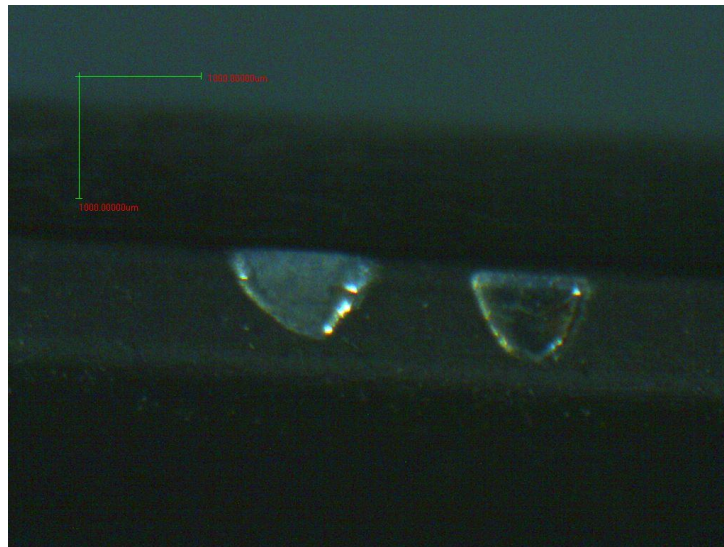
Trag br.	FH-RM30		
	R_a , μm	R_z , μm	R_p , μm
1	0.557	4.173	1.977
2	0.623	4.327	2.139
3	0.732	4.578	2.286
4	0.645	4.889	1.985
Prosjek	0.639	4.492	2.097
Raspon	0.175	0.716	0.309

Konačni rezultati; $R_a = 0,639 \mu\text{m}$, $R_z = 4,492 \mu\text{m}$ te $R_p = 2,097 \mu\text{m}$ jasno govore da se radi o običnoj brušenoj površini. Brušenjem se dobiva točna dimenzija dijela, što je vrlo važno za tijelo glavčine pošto se na nj montira kazeta. Također, hrapavost brušene površine omogućuje dobro prijanjanje masti korištene za sklapanje dijelova.

4.4 Analiza trošenja zubi i oštećenja

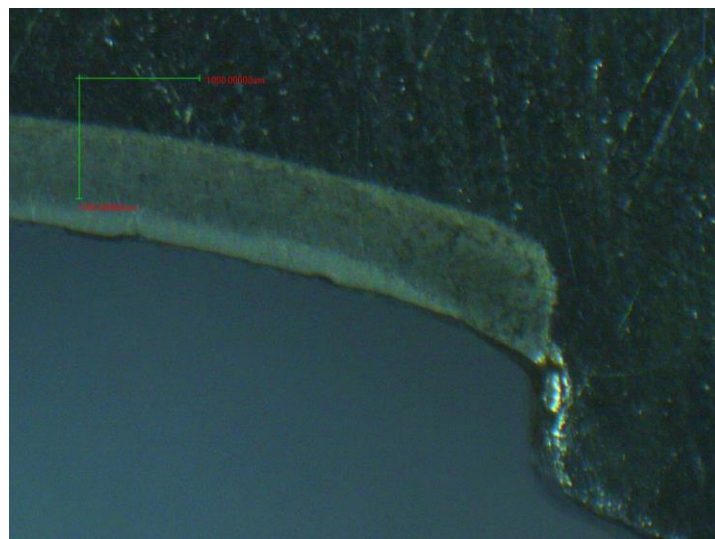
Pomoću stereomikroskopa pobliže su pregledani tragovi trošenja lančanika i tijela glavčine te su snimljene slike na kojima se vide tipični tragovi trošenja abrazijom, adhezijom i umorom površine. Sve slike snimljene su pri povećanju od 8:1.

Na tijelu glavčine vide se tragovi gdje su se lančanici utisnuli prilikom velikih opterećenja tijekom eksploatacije (slika 21). U ovom slučaju nastala udubljenja nisu problematična, no postoje slučajevi gdje se kazete toliko urežu u tijelo glavčine da ih kasnije nije moguće razdvojiti. Primarni načini trošenja tijela glavčine u ovom su slučaju adhezija i umor površine.



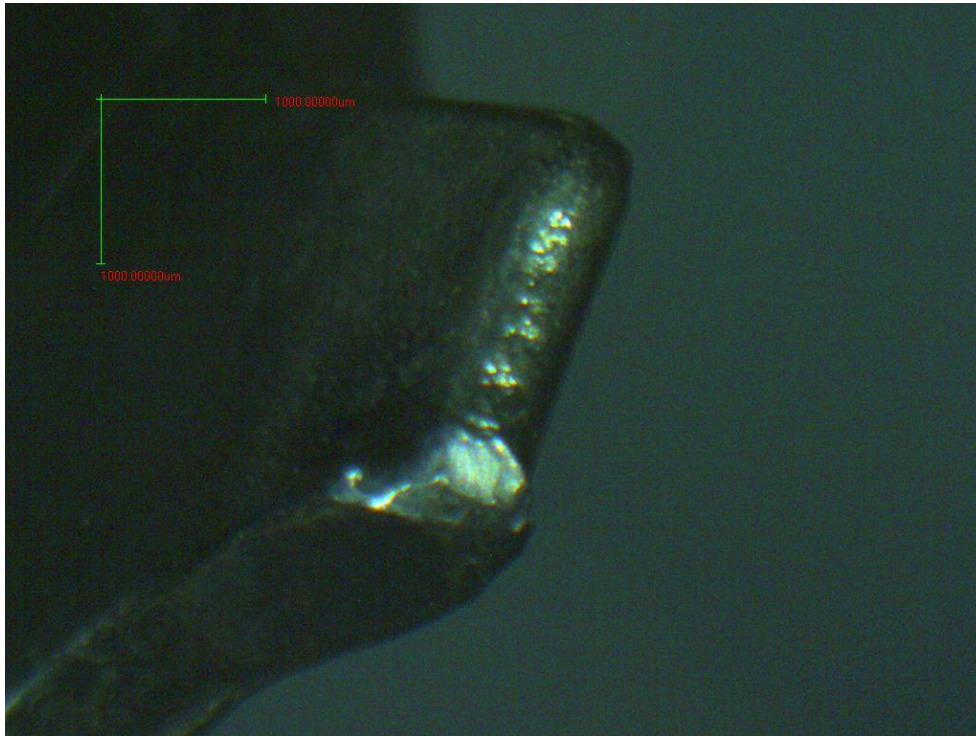
Slika 21: Tragovi utiskivanja lančanika u tijelo glavčine

Drugu stranu tribološkog para, na istom mjestu, oštećenje lančanika prikazano je na slici 22. Jasno je vidljiva deformirana i oštećena površina u donjem desnom kutu.

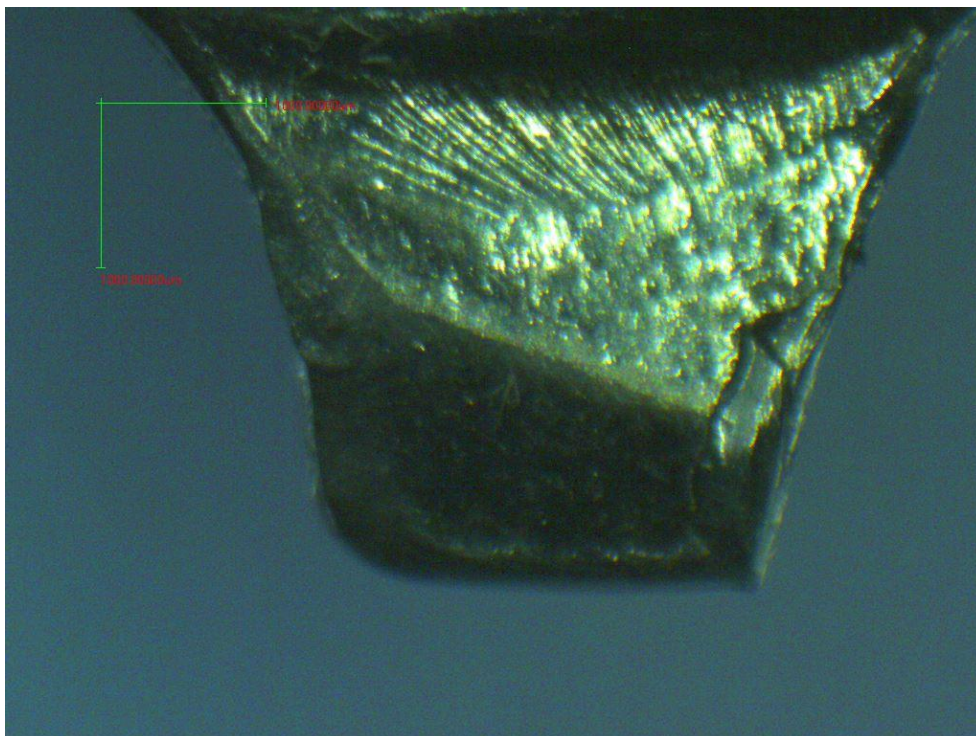


Slika 22: Oštećenje lančanika u dodiru s tijelom glavčine

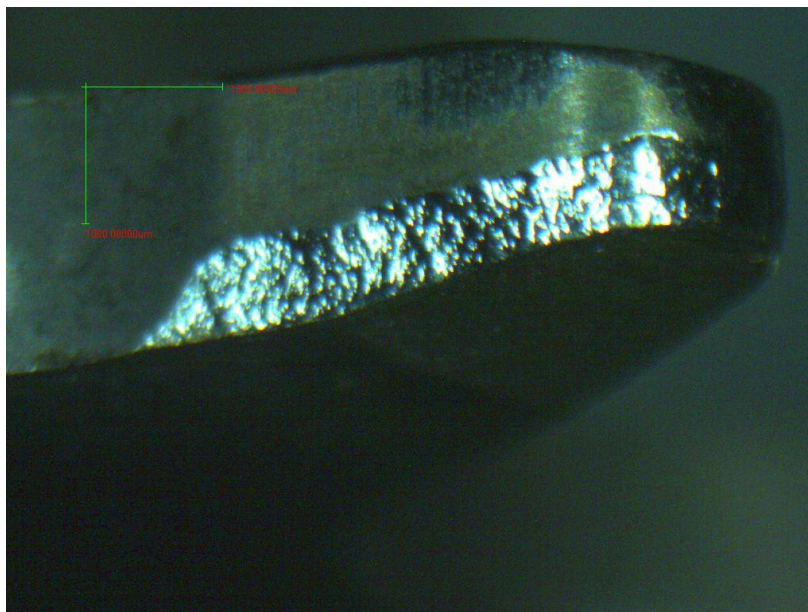
Ipak, najveća oštećenja lančanika nastalu u dodiru s lancem. Velika opterećenja i abrazivni mediji iz okoliša ostavljaju tragove na lančanicima. U potpunosti potrošeni lančanici ne mogu na sebi držati lanac, kazete ne mijenjaju brzine precizno, dolazi do ubrzanog trošenja lanca i ostalih dijelova pogonskog sklopa.



Slika 23: Veliki lančanik s vidljivom plastičnom deformacijom materijala zupca lančanika uslijed velikog naprezanja prenešenog s lanca i iskrivljenom geometrijom zupca



Slika 24: Veliki lančanik s vidljivim otkrnućem dijela zupca uzrokovano umorom površine (na slici desno), tragovi abrazivnog trošenja od dodira s lancem (na slici gore)



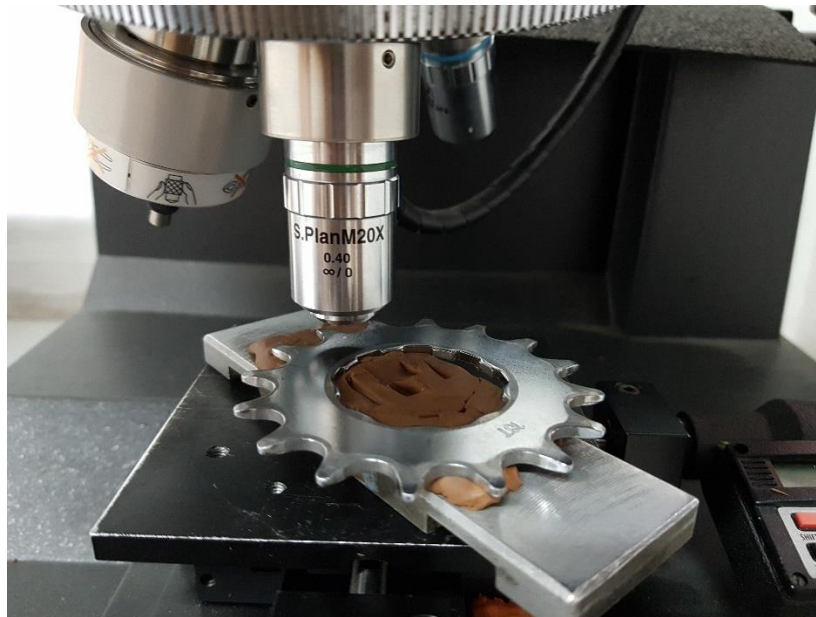
Slika 25: Prikaz trošenja jednobrzinskog lančanika

Na jednobrzinskom lančaniku vidi se da je trošenje intenzivno samo na jednoj strani. Ova pojava može se objasniti na sljedeći način: Os rotacije pogonskog lančanika i os rotacije kotača (jednobrzinskog lančanika) nisu paralelne. Neparalelnost ovih osi moguća je zbog dizajna okvira sa horizontalnim utorima za montažu stražnjeg kotača. Obruč kotača nije postavljen točno u sredini duljine glavčine, a prilikom postavljanja kotača u pravilu se pazi da je obruč u sredini okvira bicikla (cijev sjedala koristi se kao referentna). Lanac dotiče lančanik na jednoj strani i pritisak na površinu je povećan zbog smanjene dodirne površine. Rezultat je ubrzano trošenje.

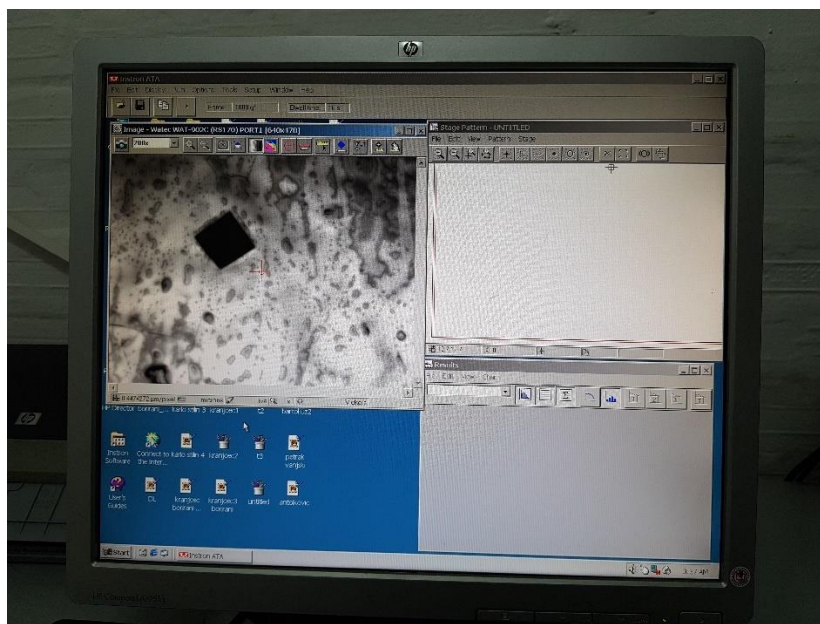
Trošenje dijelova pogonskog sklopa bicikla neizbježno je, ali može se usporiti održavanjem sklopa čistim i pravilno podmazanim. Konstrukcijski, prevlačenje površina i smanjenje pritiska na njih uvelike pridonosi dugotrajnosti dijelova.

4.5 Rezultati ispitivanja tvrdoće lančanika i tijela glavčine

Prvo mjerenje tvrdoće provedeno je na cijelim lančanicima i tijelu glavčine u cilju usporedbe jednobrzinskog i lančanika kazete. Drugi dio mjerenja tvrdoće provedeno je na pripremljenom uzorku u polimernoj smoli s ciljem dobivanja rasporeda tvrdoće po raznim presjecima lančanika.



Slika 26: Mjerenje tvrdoće jednobrzinskog lančanika



Slika 27: Otisak indentora u ispitivanju tvrdoće metodom Vickers

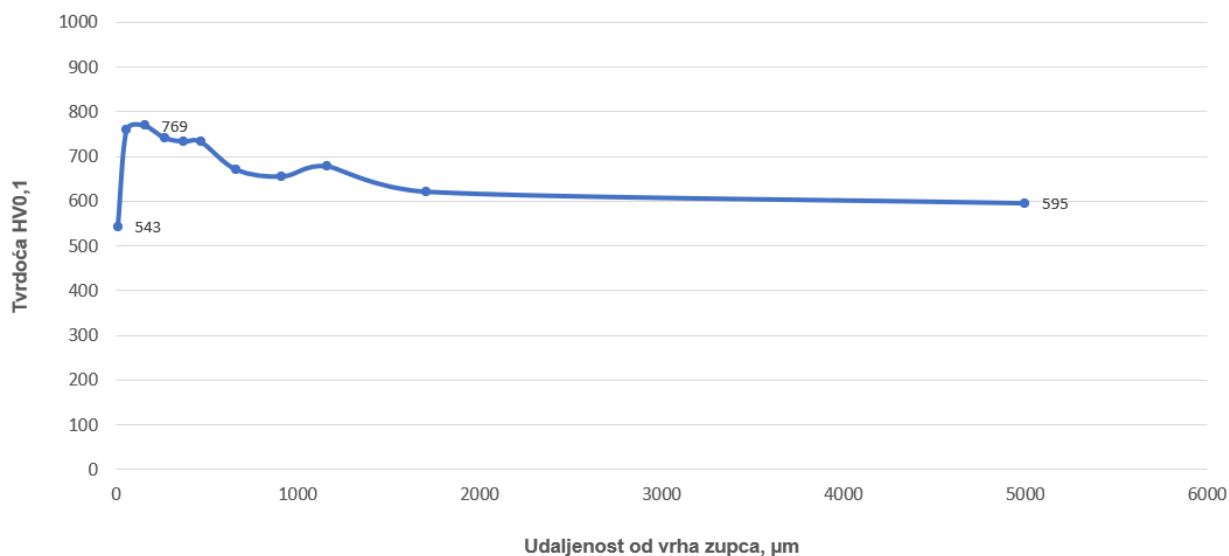
Prvo mjerenje tvrdoće provedeno je po Vickersovoj metodi HV1 na tvrdomjeru INSTRON Wilson-Wolpert Tukon 2100B. Mjerenje je ponovljeno pet puta i izračunata je srednja vrijednost dobivenog iznosa tvrdoće. Dobiveni rezultati prikazani su u tablici 7.

Tablica 7: Rezultati mjerenja tvrdoće cijelih dijelova pogonskog sklopa bicikla

HV1	Jednibrzinski lančanic	Veliki lančanic	Mali lančanic	Tijelo glavčine
Mjerenje 1	638	547	515	406
Mjerenje 2	633	565	565	469
Mjerenje 3	613	531	565	420
Mjerenje 4	638	556	531	412
Mjerenje 5	638	547	539	429
Srednja vrijednost	632	549	543	427

Iz visokih vrijednosti tvrdoća lančanika može se zaključiti da su lančanic kaljeni. Čelik korišten za izradu jednibrzinskog lančanika drugačiji je i u popuštenom stanju održava višu tvrdoću od lančanika s kazete. Tijelo glavčine ima nižu tvrdoću što konstrukcijski ima smisla jer ona nije izložena trošenju, nego dinamičkom naprezanju. Nižom tvrdoćom u pravilu dobiva se veća žilavost koja je ključna za dinamičku čvrstoću.

Nakon pripreme uzorka krenulo se s ispitivanjem tvrdoće po presjeku. Na izrezanom velikom lančanicu izmjerena je tvrdoća od vrha zupca pa do sredine lančanika, rezultati dobiveni prikazani su grafom na slici 28. Ispitane su tvrdoće središta malog lančanika i tijela glavčine.



Slika 28: Vrijednosti tvrdoće lančanika od vrha zupca prema središtu

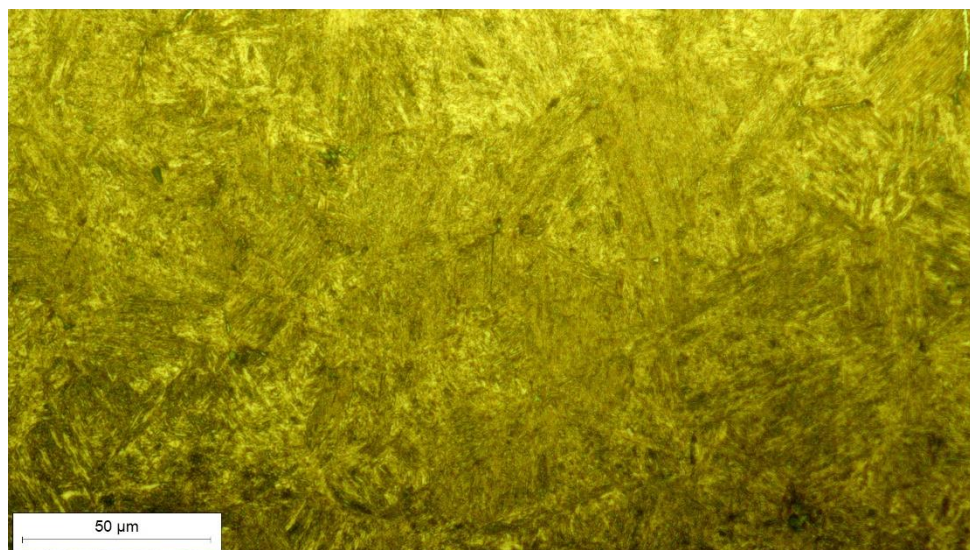
Na grafu su istaknute tri vrijednosti tvrdoće. Prva je vrijednost od 543 HV_{0,1} koja označava tvrdoću prevlake nikla. 769 HV_{0,1} najveća je vrijednost tvrdoće lančanika i izmjerena je uz vrh zupca, dok je tvrdoća središta lančanika 595 HV_{0,1}. Korištena je metoda HV_{0,1} zbog manjeg indentora s kojim je moguće izmjeriti tvrdoću prevlake nikla. Važno je napomenuti da nije moguće direktno uspoređivati vrijednosti tvrdoće HV₁ i HV_{0,1} jer se korištenjem manjeg indentora dobivaju veće vrijednosti. Stoga je jednobrzinski lančanik uistinu veće tvrdoće od velikog lančanika.

Rezultati mjerenja tvrdoće malog lančanika poklapaju se s mjerenjem tvrdoće velikog lančanika.

Za mjerenje tvrdoće tijela glavčine po presjeku korištena je metoda HV₁. Nakon 10 ponavljanja dobivena vrijednost tvrdoće iznosi 446 HV₁

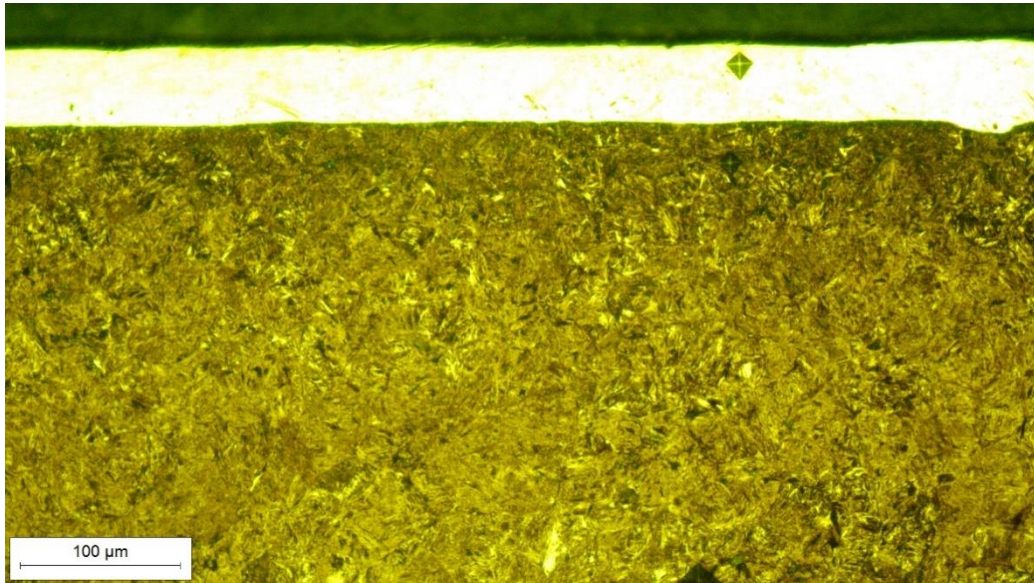
4.6 Analiza mikrostrukture lančanika i tijela glavčine

Nakon što se polirani uzorak nagrize otopinom 3% nitala i opere u vodi kako bi se zaustavila kemijska reakcija, uzorak je spreman za promatranje pod mikroskopom. Korištenje svjetlosnog mikroskopa s kamerom omogućuje snimanje slika mikrostrukture.

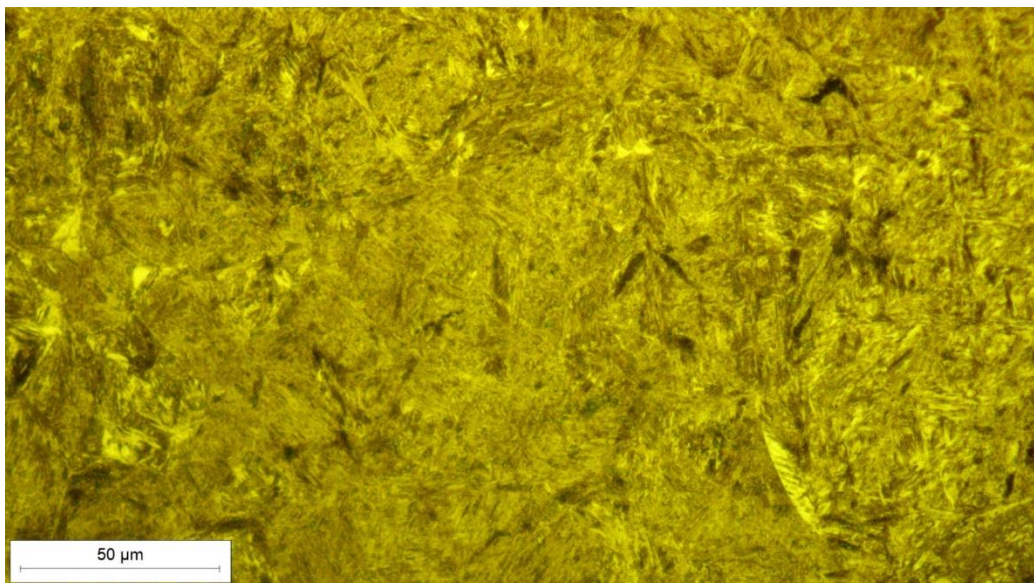


Slika 29: Mikrostruktura tijela glavčine

Slika mikrostrukture tijela glavčine jasno pokazuje igličast oblik martenzitnog zrna.



Slika 30: Mikrostrukura velikog lančanika



Slika 31: Mikrostrukura malog lančanika

Slike mikrostrukura lančanika pokazuju martenzit koji se dobiva toplinskom obradom u procesu kaljenja. Nakon kaljenja obavezno je provesti popuštanje kako čelik ne bi ostao krhak zbog velikog povećanja tvrdoće prilikom kaljenja.

4.7 Debljina zaštitne prevlake

Vrijednost debljine prevlake nikla dobivena je mjerenjem presjeka prevlake na vrhu zupca malog lančanika pomoću svjetlosnog mikroskopa. Rez je pažljivo napravljen točno okomito na površinu pa se vrijednosti debljine mogu smatrati točnim.

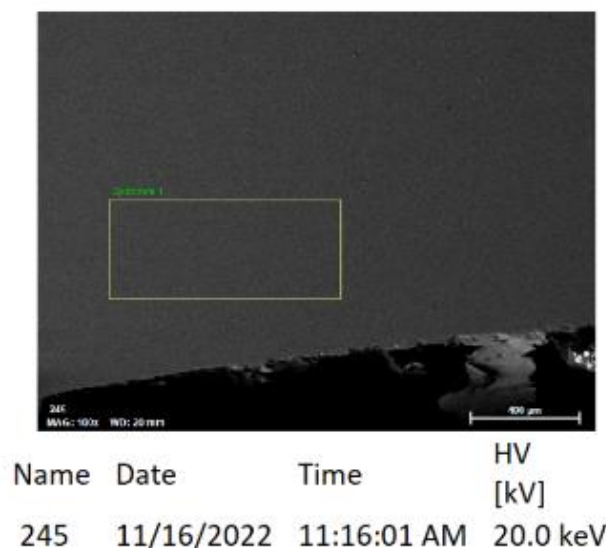


Slika 32: Izmjerene vrijednosti debljine prevlake nikla

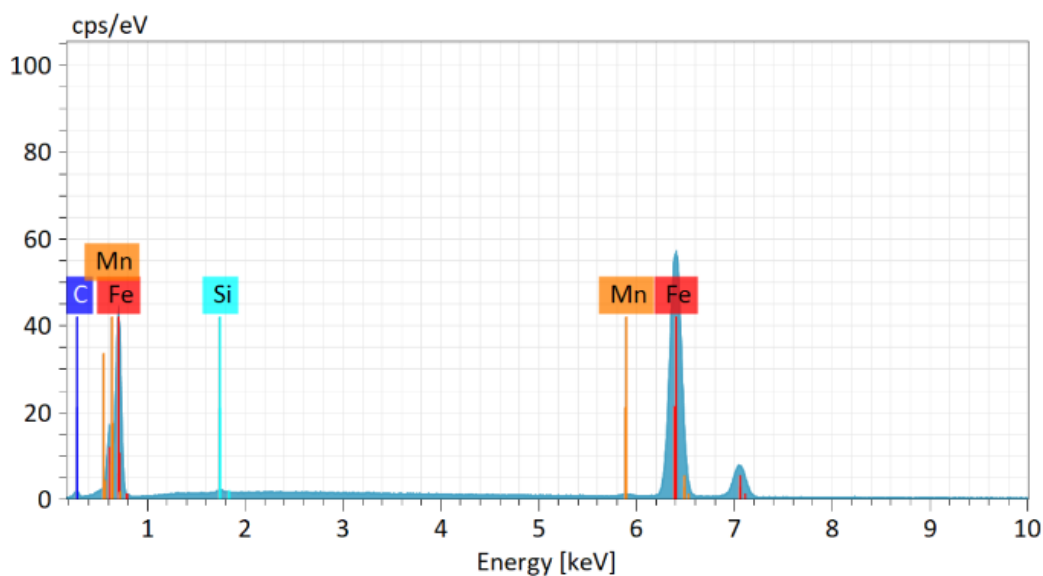
Iz osam izmjerenih vrijednosti dobivena je srednja vrijednost debljine prevlake koja iznosi 14,154 μm. Mjesto na lančaniku na kojemu je provedeno mjerenje (vrh zupca) nije izloženo trošenju jer nije u kontaktu s lancem. Prvenstvena zadaća prevlake nikla je osiguravanje korozijske postojanosti čeličnog lančanika.

4.8 Rezultati EDX/EDS analize

Na SEM elektronskom mikroskopu opremljenim EDS sustavom provedena je analiza kemijskog sastava pripremljenog metalografskog uzorka.



Slika 33: Područje EDX ispitivanja na tijelu glavčine



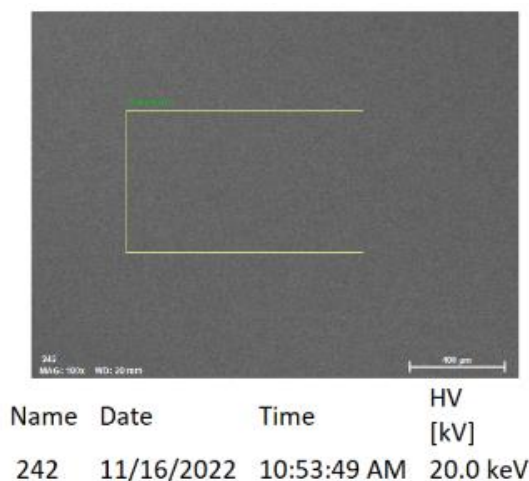
Slika 34: EDX spektar dobiven analizom tijela glavčine

EDX analizom tijela glavčine dobiveni su maseni udjeli pojedinih elemenata u strukturi čelika, prikazani u tablici 8. Iz dobivenog može se zaključiti da je riječ o niskolegiranom čeliku srednjeg udjela ugljika, pogodnom za poboljšavanje.

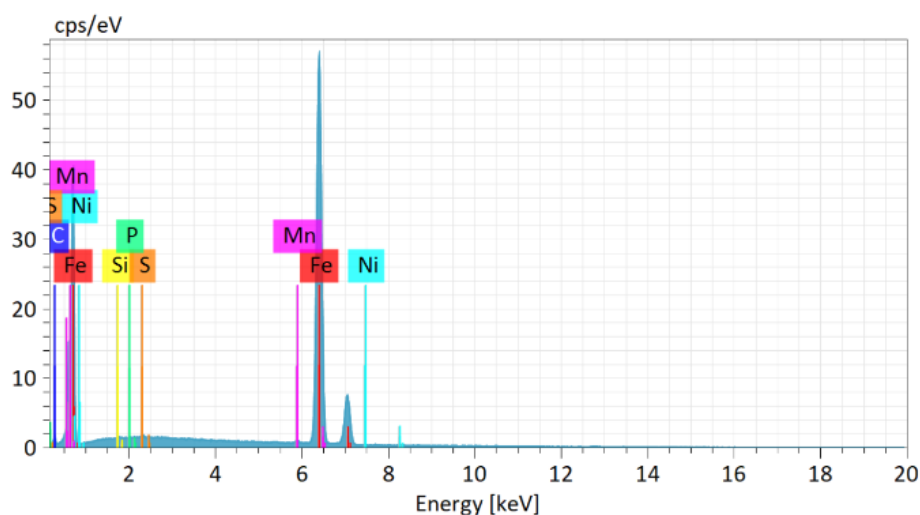
Tablica 8: Maseni udio pojedinih elemenata u čeliku tijela glavčine

Element	C	Si	Mn	Fe
Maseni udio, %	0,34	1,26	1,46	96,94

Na lančanicima provedeno je EDX ispitivanje na zupcu i na samoj prevlaci.



Slika 35: Područje EDX ispitivanja na zupcu lančanika

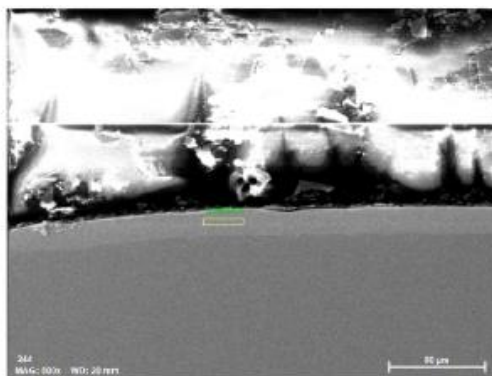


Slika 36: EDX spektar dobiven analizom zupca lančanika

EDX analizom zupca lančanika dobiveni su maseni udjeli pojedinih elemenata u strukturi čelika, prikazani u tablici 9. Iz dobivenog može se zaključiti da je riječ o niskolegiranom čeliku srednjeg udjela ugljika, pogodnom za poboljšavanje.

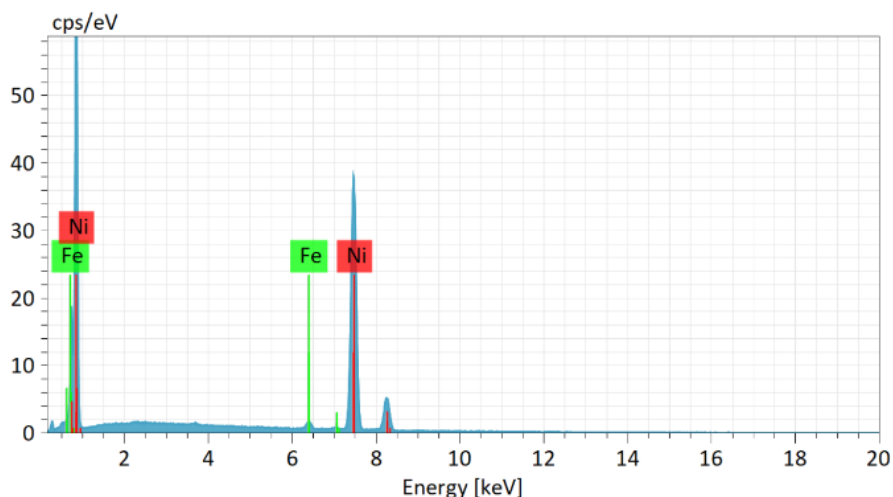
Tablica 9: Maseni udio pojedinih elemenata u čeliku lančanika

Element	C	Si	Mn	P	S	Ni	Fe
Maseni udio, %	0,34	0,51	0,91	0,52	0,52	0,56	96,94



Name	Date	Time	HV [kV]
244	11/16/2022	11:08:25 AM	20.0 keV

Slika 37: Područje EDX ispitivanja prevlake



Slika 38: EDX spektar dobiven analizom prevlake

Tablica 10: Maseni udio pojedinih elemenata u prevlaci

Element	Ni	Fe
Maseni udio, %	98,55	1,45

Iz dobivenih rezultata kemijskog sastava prevlake, zaključuje se da se radi o prevlaci od čistog nikla. Prevlačenje lančanika u proizvodnji obavljeno je uranjanjem u rastaljeni nikel.

4.9 Diskusija rezultata

Iz rezultata dobivenih u eksperimentalnom dijelu rada može se zaključiti sljedeće:

- Materijali za izradu lančanika i tijela glavčine su niskolegirani čelici srednjeg udjela ugljika, pogodni za poboljšavanje
- Martenzitna mikrostrukura i visoka tvrdoća potvrđuju primjenu toplinske obrade kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja
- Rasporedom vrijednosti tvrdoće od vrha zubaca do središta zaključuje se da su lančanici površinski kaljeni na vrhovima zubaca, najvjerojatnije indukcijski
- Tijelo glavčine ima različit kemijski sastav i nižu vrijednost tvrdoće od lančanika, što je poželjno jer je time povećana žilavost koja osigurava otpornost pri dinamičkom opterećenju kojemu je izloženo
- Jednobrzinski lančanik različitog je kemijskog sastava i više tvrdoće u svrhu povećanja otpornost trošenju zbog stalnog kontakta s lancem
- Prevlaka od čistog nikla najvjerojatnije je nanesena je uranjanjem lančanika u rastaljeni nikal
- Primarna zadaća prevlake je otpornost na koroziju, a ne na trošenje, što se zaključuje iz niže vrijednosti tvrdoće prevlake u odnosu na lančanik
- Oštećenja i trošenje lančanika u skladu su s vremenom korištenja (preko 10 godina)

5. ZAKLJUČAK

U radu su opisane karakteristike i posebnosti lančanika bicikla. U teorijskom dijelu rada opisan je smještaj lančanika u pogonskom sklopu bicikla, zahtjevi na rad i konstrukciju lančanika, materijali za izradu lančanika i uvjeti eksploatacije. Također su opisane metode ispitivanja hrapavosti površine, tvrdoće i kemijskog sastava

U eksperimentalnom dijelu rada ispitana je hrapavost tijela glavčine i utvrđeno je da odgovara brušenoj površini. Iz rezultata ispitivanja kemijskog sastava, tvrdoće i mikrostrukture lančanika i tijela glavčine zaključuje se da su lančanicima izrađeni od srednje ugljičnih niskolegiranih čelika za poboljšavanje koji se nalaze u poboljšanom stanju. Na lančanicima je nanosena prevlaka čistog nikla debljine 14,15 mikrometara, koja služi za zaštitu od korozije. Vrhovi zubi lančanika tvrdi su od središnjeg dijela lančanika, što upućuje na primjenu površinskog kaljenja lančanika, najvjerojatnije postupkom induksijskog kaljenja. Analizom oštećenih površina zubi lančanika stereo mikroskopijom utvrđeno je trošenje adhezijom, abrazijom i umorom površine.

Rezultati analize trošenja zajedno s rezultatima ispitivanja tvrdoće, kemijskog sastava i mikrostrukture lančanika daju reprezentativan uvid u izbor materijala i proizvodnih postupaka za izradu lančanika kazete dostupnih na tržištu. Dobiveni podaci o svojstvima materijala i kvaliteti površine komercijalno dostupnih lančanika mogu poslužiti za daljnje usavršavanje konstrukcije pogonskog sklopa bicikla i usporedbu s lančanicima vlastite izrade.

Literatura

- [1] Tsung-Yueh Lu: Competitive Price Strategy with Activity-Based Costing, Case Study of Bicycle Part Company, The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems
- [2] Jednibrzinski pogonski sklop (<https://www.peacebicycles.com/single-speed-commuter-bikes/>) (17.12.2022.)
- [3] Višebrzinski pogonski sklop (<https://www.theproscloset.com/products/cannondale-topstone-carbon-ultegra-rx-2-gravel-bike-2020-x-large>) (17.12.2022.)
- [4] Carmelina Abagnale: Model-based control for an innovative power-assisted bicycle, 69th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2014
- [5] C. Abagnale: Design and Development of an Innovative E-Bike, 71st Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2016, 14-16 September 2016, Turin, Italy
- [6] Ramis Zaripova, Pavels Gavrilovs: Study of dynamic characteristics of electric bicycles, ICTE in Transportation and Logistics 2018 (ICTE 2018)
- [7] Covill Derek: An Assessment of Bicycle Frame Behaviour under Various Load Conditions Using Numerical Simulations, 11th conference of the International Sports Engineering Association, ISEA 2016
- [8] Shimano XTR kazeta (<https://enduro-mtb.com/en/first-ride-review-shimano-xtr-m9100/>) (17.12.2022.)
- [9] Geometrija lančanika kazete (<https://airbike.uk/products/11-speed-mtb-cassette-fits-shimano-sram-11-46t-mountain-bike-bicycle-sprocket>) (17.12.2022.)
- [10] Kućište kazete i stezna kapica (<https://hopkinsoncycles.co.uk/wp-content/uploads/2020/12/Sunrace-MX8-11-Speed-Cassette-MTB-Mountain-Bike-Wide-Ratio-Range-Downhill-Enduro-372106703867-6-1.jpg>) (17.12.2022.)
- [11] K. Grilec, S. Jakovljević, G. Marić: Tribologija u strojarstvu, Sveučilište u Zagrebu, FSB, Zagreb, 2017
- [12] Strukturna istraživanja, part I: difrakcijske metode, PMF, Zagreb, 2013. (<http://www.phy.pmf.unizg.hr/~mpozek/PSEI/materijali/pxrd.pdf>)

- [13] Tonković Martina Eva: Sonokemijska sinteza nanostrukturiranog hidroksiapatita biološkog podrijetla, završni rad, FSB 2017.
(<https://repositorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A3653/datastream/PDF/view>)
- [14] Schmuck André: HH XRF for various applications, Bruker
- [15] Interek, Energy Dispersive X-Ray Analysis (EDX)
(<https://www.intertek.com/analysis/microscopy/edx/>)
- [16] Oxford instruments, What is EDS/EDX (<https://nano.oxinst.com/campaigns/what-is-eds/edx>)
- [17] SEM-EDX analiza zrnaca praška (https://www.researchgate.net/figure/Gambar-2-Analysis-SEM-EDX-bijih-ilmenit-PT-Timah-Bangka_fig1_337106706) (2.1.2023.)
- [18] Kamela Igor: Utjecaj sila opterećivanja na vrijednost izmjerene tvrdoće kod metode Vickers, završni rad, FSB 2008.
(<https://repositorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A169/datastream/PDF/view>)
- [19] Kamela Igor: Utjecaj hrapavosti površine na vrijednost izmjerene tvrdoće, diplomski rad, FSB 2009.
(<https://repositorij.fsb.unizg.hr/islandora/object/fsb%3A440/datastream/PDF/view>)
- [20] SEM slika metalne pjene (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Image-Metal_Foam_in_Scanning_Electron_Microscope,_magnification_10x_b.GIF) (5.1.2023.)
- [21] D. Krumes: Toplinska obrada, Sveučilište J.J. Strossmayer u Osijeku, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, Slavonski Brod, 2000.