Karakterizacija materijala tribološki oštećenog zupčanika

Ljubek, Mihaela

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:235:252997

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

Mihaela Ljubek

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Student:

Mihaela Ljubek

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na svim savjetima i pomoći.

Mihaela Ljubek

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: 602-04/21-6/1	
Ur. broj: 15-1703-21	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MIHAELA LJUBEK** Mat. br.: 0035205545

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Karakterizacija materijala tribološki oštećenog zupčanika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Materials characterization of tribological damaged gear**

Opis zadatka:

Tribološka oštećenja površine predstavljaju jedan od uzroka koji može dovesti do prekida njihovog funkcioniranja strojnih dijelova. Trenje i trošenje mogu se određenim mjerama smanjiti na prihvatljive iznose, ali se nikako ne mogu potpuno izbjeći. Dio čimbenika kojima se može utjecati na tribološka zbivanja u određenom tribosustavu odnose se na materijal dijelova koji su u kontaktu i koji se gibaju jedan u odnosu na drugoga.
U diplomskom radu potrebno je odrediti kemijski sastav te analizirati mikrostrukturu i izmjeriti mikrotvrdoću zupčanika izuzetog sa stroja za proizvodnju vreća za pakiranje cementa. Površina bokova zubi navedenog zupčanika oštećena je nakon vrlo kratkog vremena eksploatacije. Na temelju dobivenih rezultata potrebno je donijeti odgovarajuće zaključke o utjecaju sastava i strukture materijala na tribološka oštećenja površine zuba zupčanika.
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i stručnu pomoć.

Zadatak zadan: 6. svibnja 2021.

Rok predaje rada: 8. srpnja 2021.

Predviđeni datum obrane: 12. srpnja do 16. srpnja 2021.

Zadatak zadao: Rede

prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA II
POPIS TABLICA III
POPIS OZNAKA IV
SAŽETAK V
SUMMARY VI
1. UVOD 1
2. ZUPČANICI 2
2.1. Općenito o zupčanicima 2
2.2. Trošenje zupčanika 5
2.3. Lomovi zupčanika 6
3. ČELICI ZA CEMENTIRANJE I ČELICI ZA POBOLJŠAVANJE 7
3.1. Čelici za cementiranje 7
3.2. Čelici za poboljšavanje 9
4. TRIBOLOŠKO OŠTEĆIVANJE POVRŠINE 12
5. KARAKTERIZACIJA MATERIJALA 15
6. EKSPERIMENTALNI DIO 17
6.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja 17
6.2. Materijal za ispitivanje 17
6.3. Kvalitativna i kvantitativna analiza mikrostrukture 20
6.3.1. Priprema uzoraka 20
6.3.2. Izrezivanje uzoraka 20
6.3.3. Ulijevanje uzoraka u polimernu masu 22
6.3.4. Brušenje uzoraka 23
6.3.5. Poliranje 24
6.3.6. Nagrizanje 26
6.3.7. Analiza mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu 26
6.3.7.1. Analiza mikrostrukture uzoraka u poliranom stanju 26
6.3.7.2. Analiza mikrostrukture uzoraka u nagrizenom stanju 32
6.4. Analiza kemijskog sastava 36
6.5. Mjerenje mikrotvrdoće HV 38
7. ANALIZA REZULTATA 42
8. ZAKLJUČAK 45
LITERATURA 46
PRILOZI 47

POPIS SLIKA

Slika 1. Valjkasti zupčanik [2] 2
Slika 2. Efektivna dubina cementiranog sloja [9] 8
Slika 3. Zub zupčanika nakon cementiranja [9] 9
Slika 4. Mikrostruktura visokopopuštenog martenzita [6] 10
Slika 5. Shematski prikaz faza abrazije [10] 12
Slika 6. Shematski prikaz faza adhezije [10] 13
Slika 7. Shematski prikaz faza umora površine [10] 14
Slika 8. Shematski prikaz faza tribokorozije [10] 14
Slika 9. Proizvodni pogon za proizvodnju vreća za pakiranje cementa 17
Slika 10. Analizirani zupčanik u postrojenju 18
Slika 11. Analizirani zupčanik izuzet iz botomera 18
Slika 12. Tribološki oštećeni zubi analiziranog zupčanika 19
Slika 13. Odabir mjesta za izrezivanje uzoraka 20
Slika 14. Strojna pila na kojoj su izrezani uzorci 21
Slika 15. Izrezivanje uzoraka iz zupčanika 21
Slika 16. Izrezani uzorci za analize 22
Slika 17. Uzorci u kalupima prije ulijevanja polimerne mase 23
Slika 18. Uzorci nakon zalijevanja polimernom masom 23
Slika 19. Brušenje uzoraka na automatskom uređaju za brušenje 24
Slika 20. Uređaj za poliranje uzoraka 25
Slika 21. Uzorci nakon poliranja 25
Slika 22. Uzorak na svjetlosnom mikroskopu 26
Slika 23. Tribološka oštećenja na površini boka zuba s gornje strane 27
Slika 24. Isto kao na slici 20 uz veće povećanje 27
Slika 25. Tribološka oštećenja na površini boka zuba s donje strane 28
Slika 26. Isto kao na slici 22 uz veće povećanje 28
Slika 27. Tribološka oštećenja na površini boka drugog zuba s gornje strane 29
Slika 28. Isto kao na slici 24 uz veće povećanje 29
Slika 29. Tribološka oštećenja na površini boka drugog zuba s donje strane 30
Slika 30. Isto kao na slici 26 uz povećanje 30
Slika 31. Polirana površina uzorka 2 u rubnom sloju 31
Slika 32. Polirana površina uzorka 2 u sredini presjeka 31
Slika 33. Mikrostruktura zuba analiziranog zupčanika snimljena pri povećanju 50× 32
Slika 34. Mikrostruktura zuba analiziranog zupčanika snimljena pri povećanju 100×. 32
Slika 35. Mikrostruktura zuba analiziranog zupčanika snimljena pri povećanju 200×. 33
Slika 36. Mikrostruktura zuba analiziranog zupčanika snimljena pri povećanju 50×. 33
Slika 37. Mikrostruktura zuba analiziranog zupčanika snimljena pri povećanju 100×. 34
Slika 38. Mikrostruktura zuba analiziranog zupčanika snimljena pri povećanju 200×. 34
Slika 39. Mikrostruktura zuba analiziranog zupčanika snimljena pri povećanju 500×. 35
Slika 40. Ispitna komora uređaja GDS 850 A, LECO 36
Slika 41. Uzorak nakon analize kemijskog sastava 37
Slika 42. Mikrotvrdomjer PMT-3 38
Slika 43. Uzorak 1 nakon poliranja 39
Slika 44. Uzorak 2 nakon poliranja 39
Slika 45. Mikrostruktura uzoraka s vidljivim otiscima 40
Slika 46. Mikrostruktura uzorka s udaljenostima od ruba zuba 40
Slika 47. Promjena mikrotvrdoće uz rub boka zuba 43
Slika 48. Promjena mikrotvrdoće od ruba prema jezgri 43

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrste čelika za zupčanike[4].....4
Tablica 2. Kemijski sastav materijala zupčanika 37
Tablica 3. Promjena mikrotvrdoće s udaljenošću od ruba boka zuba 41
Tablica 4. Mikrotvrdoća uzorka 2 41

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
F_N	N	Normalna komponenta sile
F_T	N	Tangencijalna komponenta sile
HV0,1		Tvrdoća po Vickersu

SAŽETAK

Cilj ovog rada bio je utvrditi uzrok prebrzog tribološkog oštećivanja zupčanika izuzetog iz stroja za proizvodnju vreća za pakiranje cementa.

U teorijskom dijelu rada opisani su zupčanici i glavni uzroci njihova dotrajavanja. Navedeni su i opisani čelici koji se najčešće koriste za izradu zupčanika i toplinske obrade koje se primjenjuju za postizanje optimalnih svojstava.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena je analiza kemijskog sastava, analiza mikrostrukture i mjerenje mikrotvrdoće oštećenog zupčanika.

Zupčanik je izrađen od ugljičnog čelika s masenim udjelom ugljika od ≈ 0,5 %. Mikrostruktura čelika sastoji se od ferita (56 %) i perlita (44 %), a ista je na ruba zuba i u jezgri zupčanika. Mikrotvrdoća uz površinu bokova zubi je relativno niska i iznosi 228 HV0,1, a mikrotvrdoća u jezgri je još niža i iznosi 144 HV0,1. Prema svemu navedenom uzrok preranog trošenja bokova zubi analiziranog zupčanika je izostanak odgovarajuće toplinske obrade koja bi dovoljno povisila tvrdoću i otpornost na trošenje.

Ključne riječi: zupčanik, tribološko oštećenje, karakterizacija

SUMMARY

The aim of this work was to determine the cause of too fast tribological damage of gears excluded from the machine for the production of cement packing bags.

The theoretical part of the paper describes the gears and the main causes of their wear. The steels most commonly used for gear fabrication and heat treatment that are applied to achieve optimal properties are listed and described.

In the experimental part of the work, the analysis of chemical composition, analysis of the microstructure and measurement of microhardness of the damaged gear were performed.

The gear is made of carbon steel with a carbon content of ≈ 0.5%. The microstructure of steel consists of ferrite (56%) and perlite (44%) and it is the same at the tooth edge and in the gear core. The microhardness along the surface of the flanks of the teeth is relatively low and amounts to 228 HV0.1, and the microhardness in the core is even lower and amounts to 144 HV0.1. According to all the above, the cause of premature wear of the flanks of the teeth of the analyzed gear is the lack of appropriate heat treatment that would sufficiently increase the hardness and wear resistance.

Key words: gear, tribological damage, characterization

1. UVOD

Zupčanici su jedinstveni i nezamjenjivi elementi u radu mnogih strojeva i uređaja u različitim industrijskim granama. Prema arheološkim nalazima koriste se više od 3 tisuće godina. Širinu njihove primjene dokazuje činjenica da skoro svi uređaji, mehanizmi i strojevi, koji koriste rotacijsko gibanje, koriste neku od vrsta zupčanika. Njihovu primjenu karakteriziraju jednostavnost, izdržljivost i pouzdanost, ako su pri radu zadovoljeni svi traženi parametri.

Kao i svi elementi u strojevima imaju svoj vijek trajanja. Najčešće dotrajavaju zbog utjecaja različitih mehanizama trošenja, kao što su abrazija, adhezija, umor površine ili tribokorozija. Navedeni mehanizmi zajedničkim djelovanjem smanjuju radnu sposobnost, učinkovitost i u konačnici vijek trajanja zupčanika. Istraživanja pokazuju kako je preko 50 % zastoja i kvarova u proizvodnim sustavima izazvano oštećenjima nastalima zbog trošenja. Trošenje zupčanika ne može se izbjeći, ali se pravilnim izborom materijala, podmazivanjem ili nekim drugim načinom može smanjiti. U današnje vrijeme tome se pridaje sve više pažnje. Iz tog razloga bitno je kod prebrzog trošenja napraviti karakterizaciju materijala te pronaći razloge brzog trošenja kako bi pronašli nova i bolja rješenja.

Zupčanici se najčešće proizvode od čelika za cementiranje i čelika za poboljšavanje. Različitim toplinskim obradama postižu se optimalna svojstva čelika. Od zupčanika se traži visoka otpornost na trošenje površine te dobra žilavost i dobra dinamička izdržljivost. To su pomalo kontradiktorna svojstva i teško se postižu. Ipak postoje toplinske obrade kojima se ova kombinacija svojstava može postići. Najčešće se primjenjuju cementiranje i poboljšavanje, a vrlo često površinsko kaljenje i nitriranje.

2. ZUPČANICI

2.1. Općenito o zupčanicima

Zupčanik je komponenta stroja valjkastog ili stožastog oblika s ravnomjerno raspoređenim zubima po obodu i služi za prijenos snage između vratila. Najčešći je izbor za mehanički prijenos snage u strojevima jer prijenos snage pomoću zupčanika ima gotovo stopostotnu učinkovitost.

Na slici 1 prikazan je primjer valjkastog zupčanika s označenim dijelovima. [1]



Slika 1. Valjkasti zupčanik [2]

Postoji nekoliko vrsta zupčanika:

- zupčanici s vanjskim i unutarnjim ozubljenjem
- čelnici s ravnim zubima
- čelnici s kosim zubima
- čelnici sa strelastim zubima
- stožnici s ravnim ili kosim zubima
- stožnici sa zakrivljenim zubima
- pužni prijenosnik

- mehanizam sa zupčastom letvom
- planetarni prijenosnik. [1]

Područje primjene zupčanika su višestruke, kao npr.:

- mali, jeftini zupčanici za igračke
- zupčanici za bicikle
- zupčanici alatnih strojeva
- automobilski zupčanici. [3]

Prednosti zupčanika:

- visoka učinkovitost
- velika trajnost
- kompaktna konstrukcija
- može se koristiti za male i velike brzine vrtnje
- može se koristiti za prijenos od najmanjih do najvećih snaga.

Zupčanici imaju neke nedostatke od kojih su najznačajniji:

- visoka cijena
- zahtijevaju vrlo točno obradu
- pri velikom brzinama može doći do buke i vibracije
- potrebno je podmazivanje.[3]

Izbor materijala za zupčanike ovisi o potrebnim svojstvima. Najčešći materijali za zupčanike su čelici. U tablici 1 naveden je pregled vrsta čelika za zupčanike i toplinske obrade koje se najčešće primjenjuju na zupčanicima.

Tablica 1. Vrste čelika za zupčanike[4]

MATERIJAL	TOPLINSKA OBRADA
Konstrukcijski čelik	-
Čelici za poboljšavanje	poboljšavanje
Čelici za poboljšavanje, plameno ili indukcijski kaljeni	površina zakaljena, uključujući korijen zuba
Čelici za poboljšavanje, nitrirani	nitriranje
Čelici za cementiranje	cementiranje i kaljenje

Općenito o toplinskim obradama čelika za zupčanike

Zupčanici moraju biti izvana tvrdi i otporni na trošenje, a iznutra žilavi i dinamički izdržljivi. Ova svojstva su međusobno suprotstavljena i teško se postižu u istom materijalu. Ipak postoje čelici kod kojih se odgovarajućim postupcima toplinske obrade postiže upravo takva kombinacija svojstava.

Vrste toplinske obrade koje se najčešće provode na zupčanicima su:

- cementiranje
- poboljšavanje
- površinsko kaljenje (indukcijsko i plameno)
- nitriranje.

Cementiranje i poboljšavanje bit će detaljnije opisano u sljedećem poglavlju.

Nitriranje je postupak toplinske obrade koji se izvodi za otvrdnjavanje površine uvođenjem dušika u površinu čeličnih dijelova. Kvaliteta nitriranih slojeva veća je ukoliko čelik sadrži aluminij, krom ili molibden. Tijekom nitriranja, na površini zupčanika stvara se nitridni sloj debljine od 0,1 mm do 1 mm. Nitriranje može povećati tvrdoću više od ostalih postupaka toplinske obrade, a nitrirani sloj je tanji od slojeva dobivenih ostalim obradama. Izvodi se u posljednjoj fazi obrade zupčanika jer ne uzrokuje deformacije niti pukotine.

Površinsko kaljenje primjenjuje se za otvrdnjavanje površine zupčanika kada se želi postići velika otpornost na trošenje i dinamička izdržljivost površinskih slojeva. Površinsko kaljenje zahtijeva čelik s minimalno 0,35 % ugljika, a najčešće se provodi nakon poboljšavanja. Kod zupčanika je indukcijsko kaljenje učinkovito za otvrdnjavanje na području zuba, uključujući površinu i vrh

zuba. Međutim, korijen u nekim slučajevima ne otvrdne. Svojstva koja se postižu slična su svojstvima cementiranih dijelova, ali s puno boljim svojstvima u sredini zupčanika. Indukcijskim kaljenjem smanjuje se preciznost zupčanika pa je nakon postupka potrebno primijeniti brušenje. [5]

Površinski se mogu kaliti nelegirani i niskolegirani čelici od 0,35 do 0,60 % ugljika. Toplinska vodljivost ovih čelika je visoka i zbog toga se mogu dovoljno brzo grijati i hladiti što je nužno kod površinskog kaljenja. Pri tome neće doći do značajnijih toplinskih naprezanja i površinskih pukotina.

Vrste čelika za površinsko kaljenje su: C35G, C45G, C53G, 46Cr2, 42CrMo4. [6]

2.2. Trošenje zupčanika

Do oštećenja na površinama zuba može doći na razne načine. Problem kod trošenja javlja se kada se s površine zuba troši mala količina materijala. Ako se trošenje nastavlja oblik zuba se izmijeni te zupčanik više ne može pravilno obavljati svoju funkciju.

Problemi koji mogu ubrzati trošenje zupčanika su:

1. pojačane vibracije
2. povišene temperature u stroju u kojem se nalazi zupčanik
3. nedovoljno podmazivanje
4. povećanje zazora.

Najčešći uzroci triboloških oštećenja zubi su:

1. nedovoljna tvrdoća površine zuba u odnosu na opterećenja
2. nepravilan kontakt između zubi zupčanika zbog loše montaže
3. loše podmazivanje.

Navedeni uzroci oštećenja mogu se otkloniti ili svesti na prihvatljive mjere primjenom različitih rješenja. Ako je uzrok oštećenja nedovoljna tvrdoća materijala treba primijeniti materijal veće tvrdoće ili različitim postupcima toplinske obrade povećati tvrdoću postojećeg materijala. Ponekad je moguće i smanjenjem opterećenja utjecati na smanjenje oštećenja. Ako je uzrok oštećenja nepravilan kontakt između zuba zupčanika zbog loše montaže problemi se mogu riješiti ponovnim podešavanjem. Za pravilan rad i sprječavanje oštećenja zupčanika jako je važno osigurati kontinuirano podmazivanje odgovarajućim mazivom.

2.3. Lomovi zupčanika

Zupčanici mogu dotrajati i zbog loma uslijed prevelikog mehaničkog opterećenja.

Uzroci loma zupčanika najčešće su:

1. puknuće zuba zbog udarnog opterećenja
2. umor materijala zbog cikličkog opterećenja
3. puknuće nastalo zbog stanjivanja zuba uslijed trošenja.

Puknuće zbog udarnog opterećenja može se spriječiti primjenom materijala koji imaju veću žilavost, a ponekad se može pozitivno djelovati i prijeko smanjenjem brzine vrtnje zupčanika (ako je izvedivo).

Kod dugotrajnog cikličkog opterećenja može doći do umora materijala i do pojave pukotina koje se šire i smanjuju nosivu površinu zupčanika, što se može spriječiti primjenom materijala koji ima bolju dinamičku izdržljivost ili treba smanjiti brzinu vrtnje zupčanika (ako je izvedivo).

Mehaničkim istrošenjem zuba smanjuje se nosiva površina što može dovesti do loma zuba zupčanika i uništenja zupčanika, što se može izbjeći sprječavanjem trošenja. [7]

3. ČELICI ZA CEMENTIRANJE I ČELICI ZA POBOLJŠAVANJE

3.1. Čelici za cementiranje

Osnovna karakteristika čelika za cementiranje jest mali sadržaj ugljika koji nije dovoljan za postizanje zadovoljavajuće tvrdoće pri kaljenju. Zato se takvi čelici podvrgavaju cementiranju - toplinsko kemijskom postupku koji se sastoji od pougljičenja, odnosno obogaćivanja površinskih slojeva proizvoda ugljikom, kaljenja pougljičenog proizvoda i niskotemperaturnog popuštanja.

Osnovni cilj cementiranja je postizanje visoke tvrdoće i visoke otpornosti na trošenje u površinskim slojevima strojnih dijelova, a da pri tome jezgra strojnog dijela ostane žilava i ima što veću otpornost na udarna opterećenja.

Najprikladniji čelici za cementiranje su:

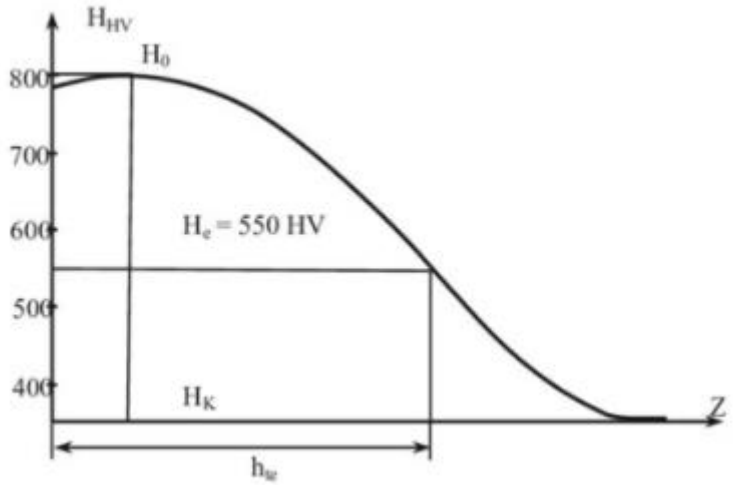
- ugljični čelici
- niskolegirani čelici s maksimalno 0,25 % ugljika.

Primjeri strojnih dijelova koji se najčešće cementiraju su zupčanici i bregaste osovine automobila.

Kod cementiranja nositelj otpornosti na udarna opterećenja je jezgra, a nositelj otpornosti na trošenje njegovi površinski dijelovi. Za cementiranje se koriste čelici s niskim udjelom ugljika. Postupak pougljičavanja provodi se u sredstvu koje je u stanju da na temperaturi austenitizacije čelika (900 do 950 °C) predaje čeliku ugljik. Dubina površinskih slojeva koji su obogaćeni ugljikom iznosi od 0,5 do 1,5 mm. Udio ugljika u vanjskom dijelu površinskog sloja narastao je na oko 0,7 do 0,8 %. Taj udio postupno pada od površine prema jezgri, a padom udjela ugljika pada i postignuta tvrdoća nakon cementiranja. Nakon pougljičavanja proizvod se austenitizira i gasi kako bi došlo do stvaranja martenzita i do otvrdnuća u površinskim slojevima. [8]

Potrebnu efektivnu dubinu cementiranja definira konstruktor ili tehnolog na osnovi očekivane intenzivnosti trošenja. Prema normama, efektivna dubina cementiranja definirana je kao udaljenost od površine na kojoj se postiže tvrdoća od 550 HV. Efektivne dubine cementiranja iznose od 0,2 do 3 mm. Potrebne efektivne dubine cementiranja postižu se promjenom trajanja pougljičavanja. Otpornost na trošenje cementiranog sloja približno je jednaka za sve čelike pa su zbog toga za izbor čelika odlučujuća mehanička svojstva jezgre. Svojstva jezgre cementiranog dijela ovise o postotku ugljika osnovnog materijala i prokaljivosti. Najbolja mehanička svojstva postižu potpuno prokaljivi čelici i zbog toga se za veće dimenzije, radi potrebe za čim većim prokaljivanjem, koriste više legirani čelici. Može se zaključiti da je za izbor čelika za cementiranje odlučujuća visina naprezanja strojnog dijela i njegove dimenzije. Za veće dimenzije i visoka dinamička opterećenja treba primijeniti legirane čelike za cementiranja. [6]

Na slici 2 je prikazano određivanje efektivne dubine cementiranog sloja.



Slika 2. Efektivna dubina cementiranog sloja [9]

Glavne vrste čelika za cementiranje:

Čelici za cementiranje mogu biti ugljični i niskolegirani. I jedni i drugi imaju vrlo nizak maseni udio ugljika.

Niskolegirani čelici za cementiranje najčešće su legirani kromom, manganom, molibdenom, a u nekim slučajevima i niklom. Ti se elementi dodaju u niskim udjelima, niti jednog elementa nema u količini većoj od 5 %. Najčešće ni ukupna količina legirnih elemenata ne prelazi 5 %.

U usporedbi s ugljičnim čelicima, niskolegirani imaju bolju prokaljivost i stabilniju mikrostrukturu na visokim temperaturama.

1. Ugljični čelici

   C10, C10E ili C15

   Kako nemaju legirnih elemenata ovi čelici imaju slabu prokaljivost. Zbog toga se primjenjuju za dijelove malih presjeka koji nisu jako udarno opterećeni, npr. male osovine i zupčanici, poluge, svornjaci, čahure i slični dijelovi.

2. Niskolegirani čelici

   a) Čelici legirani kromom: npr. 15Cr2

   Ovi su čelici skloni pogrubljenju zrna i stvaranju karbida u rubnim slojevima, dobro su zakaljivi i prokaljivi. Primjenjuju se za poluosovine, bregaste osovine, manje zupčanike, itd.

b) Čelici legirani manganom i kromom: npr. 16MnCr5 ili 20MnCr5

Dobro su prokaljivi i prikladni za izradu dijelova srednjih dimenzija, npr.: zupčanici, bregaste osovine, osovine alatnih strojeva.

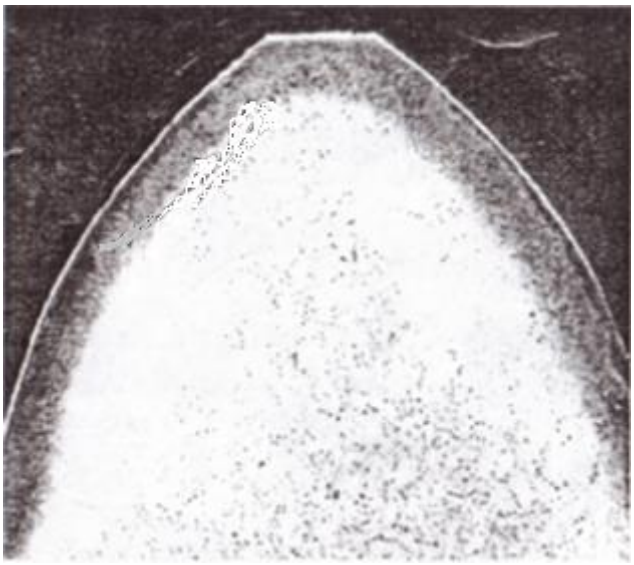
c) Čelici legirani kromom i molibdenom: : npr. 20CrMo5 ili 20MoCr5

Kod ovih čelika krom i molibden povisuju prokaljivost, a molibden stvara karbide vrlo otporne na trošenje, ali sklone nejednolikoj raspodjeli po presjeku. Primjenjuju se za zupčanike mjenjačkih kutija, kardanske zglobove i bregaste i koljenaste osovine.

d) Čelici legirani kromom i niklom: npr. 14CrNi6 ili 18CrNi8

Dobro su prokaljivi, skloni zaostajanju austenita u rubnim slojevima pa se zbog toga gase s nižih temperatura i nakon gašenja duboko hlade. Prikladni za izradu dijelova najvećih dimenzija, npr.: visokooptrećenih zupčanika i vratila, osovina u zrakoplovima i kamionima, koljenastih osovina i dr. [6]

Na slici 3 prikazan je cementirani zub zupčanika.



Slika 3. Zub zupčanika nakon cementiranja [9]

3.2. Čelici za poboljšavanje

Poboljšavanje je jedan od postupaka toplinske obrade, a sastoji se od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja. Razlozi poboljšavanja čelika su dobivanje čelika visoke žilavosti i visoke granice tečenja. Žilavost je važno svojstvo kod strojnih dijelova koji su prilikom eksploatacije podvrgnuti dinamičkim ili udarnim opterećenjima. Rezultati poboljšavanja su bolji

što je čelik jednoličnije prokaljen. Čelici koji se obrađuju ovim postupkom su ugljični čelici s udjelom ugljika od 0,3 do 0,6 % i niskolegirani čelici za poboljšavanje.[8]

Kod čelika za popuštanje vrlo je važno svojstvo prokaljivosti čelika pa se iz tog razloga za male dimenzije može upotrebljavati ugljični čelik, ali za veće dimenzije odabiru se niskolegirani čelici jer imaju veću prokaljivost u odnosu na ugljične.

Čelici za poboljšavanje moraju imati točan kemijski sastav s niskim masenim udjelom nečistoća, odnosno fosfora i sumpora. Mikrostruktura poboljšanih čelika je visokopopušteni martenzit koji može podnijeti velika i složena naprezanja za vrijeme rada.

Poboljšani čelici primjenjuju se za zupčanike, osovine, poluosovine, vijke i matice.[6]

Na slici 4 prikazana je mikrostruktura visokopopuštenog martenzita nastala nakon kaljenja i popuštanja.



Slika 4. Mikrostruktura visokopopuštenog martenzita [6]

Vrste čelika koje se primjenjuju za poboljšavanje su:

1. Ugljični čelici - C45

   Ovi su čelici male prokaljivosti i iz tog razloga se primjenjuju za slabije opterećene dijelove do promjera od 40 mm. Primjenjuju se za osovine, vijke, veće zupčanike u paru dr.

2. Čelici legirani manganom - 40Mn4

   Zbog veće prokaljivosti u odnosu na ugljične čelike primjenjuju se za slabo i srednje opterećene dijelove s promjerom do 40 mm. Čelici legirani manganom skloni su krhkosti popuštanja.

3. Čelici legirani kromom - 34Cr4

   Dobro su prokaljivi i primjenjuju se za dinamički opterećene dijelove s promjerom do 100 mm.

4. Čelici legirani kromom i molibdenom - 42CrMo4

   Primjenjuju se za dijelove većih dimenzija i velikih opterećenja.

5. Čelici legirani kromom i vanadijem - 50CrV4

   Primjenjivi su za sve dimenzije i za dinamički opterećene dijelove izložene trošenju.

6. Čelici legirani niklom i molibdenom - 36CrNiMo4

   Najbolje prokaljivi čelici koji se koriste za dijelove s promjerom većim od 150 mm. Upotrebljavaju se za dijelove kod kojih je tražena visoka granica razvlačenja i udarni rad loma. [6]

4. TRIBOLOŠKO OŠTEĆIVANJE POVRŠINE

Tribologija je znanstvena disciplina koja se bavi i kontrolira probleme vezane uz trenje i trošenje. Trošenje je postupni gubitak materijala s površine tijela pri dodiru s drugim tijelom. Svaki proces trošenja sastoji se od jednog ili više mehanizama trošenje. Osnovni mehanizmi trošenja su:

- abrazija
- adhezija
- tribokorozija
- umor površine. [10]

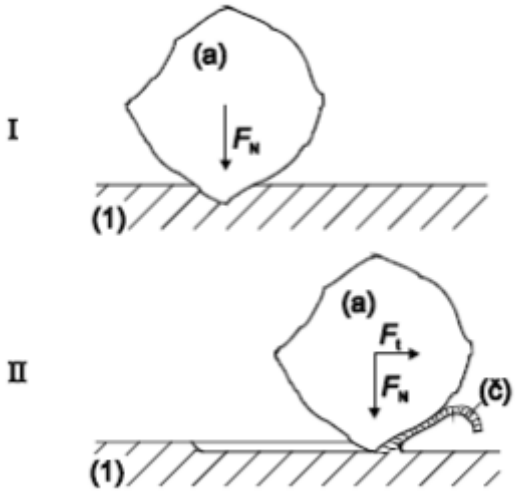
1. Abrazija

Abrazija je trošenje materijala nastalo istiskivanjem materijala uzrokovano tvrdim česticama ili izbočinama.

Abrazija se sastoji od dvije faze:

1. faza: prodiranje abraziva u površinu materijala uslijed djelovanja normalne komponente sile F_N
2. faza: istiskivanje materijala u obliku čestica uslijed djelovanja tangencijalne komponente sile $F_{T.}$ [10]

Na slici 5 prikazan je jedinični događaj nastanka abrazivne čestice.



Slika 5. Shematski prikaz faza abrazije [10]

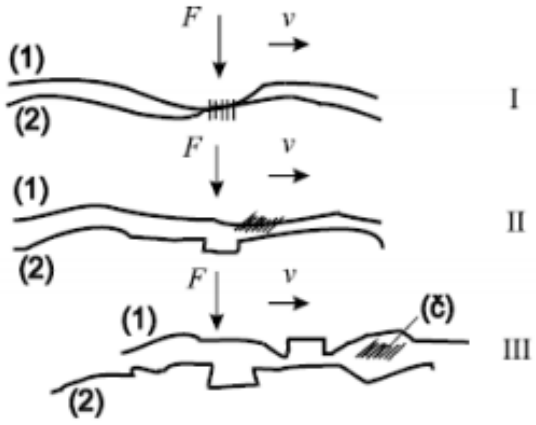
2. Adhezija

Adhezija je mehanizam trošenja kod kojeg dolazi do prelaska materijala s jedne plohe na drugu pri relativnom gibanju.

Adhezija se sastoji od tri faze:

1. faza: na mjestu dodira izbočina koje klize jedna po drugoj nastaje mikrozavareni spoj
2. faza: raskida se netom ostvareni spoj
3. faza: pri raskidu mikrozavarenog spoja uvijek dolazi do prelaska materijala s jedne na drugu površinu jer se spoj ne raskida po liniji spajanja. [10]

Na slici 6 shematski je prikazan jedinični događaj pri adheziji.



Slika 6. Shematski prikaz faza adhezije [10]

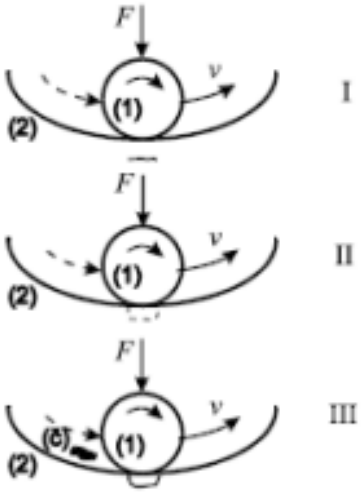
3. Umor površine

Umor površine je mehanizam trošenja koji karakterizira odvajanje čestica uslijed cikličkih koncentriranih promjena naprezanja.

Umor površine sastoji se od tri faze:

1. faza: zbog prevelikog i koncentriranog naprezanja ispod površine stvara se mikropukotina
2. faza: mikropukotina se širi i napreduje prema površini
3. faza: kad se širenjem pukotina dio materijala odvoji od osnovnog materijala nastaje čestica trošenja i ispada iz površine.[10]

Na slici 7 shematski su prikazane faze nastanka čestice trošenja pri umoru površine.



Slika 7. Shematski prikaz faza umora površine [10]

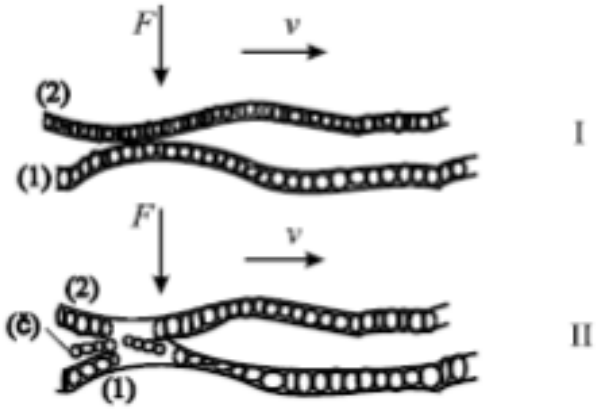
4. Tribokorozija

Tribokorozija je mehanizam trošenja kod kojeg uz mehanizam mehaničkog istrošenja istodobno djeluje i kemijsko trošenje.

Proces tribokorozije odvija se u dvije osnovne faze:

1. faza: stvaranje korozijskih slojeva na površini materijala
2. faza: mehaničko razaranje produkata korozije na površini. [10]

Na slici 8 prikaz je jedinični događaj kod tribokorozijskog mehanizma trošenja.



Slika 8. Shematski prikaz faza tribokorozije [10]

5. KARAKTERIZACIJA MATERIJALA

Karakterizacija materijala je cijela skupina postupaka kojima se analiziraju i kvantificiraju struktura i svojstva materijala. Često se provodi s ciljem otkrivanja uzroka različitih grešaka u materijalu, a isto tako se koristi za otkrivanja uzroka oštećenja materijala. Danas je na raspolaganju širok raspon znanstvenih tehnika koje nam omogućuju proučavanje fizikalnih i kemijskih svojstava materijala. Najvažniji aspekti karakterizacije materijala su analiza makrokrostrukture i mikrostukture materijala, mjerenje mikrotvrdoće i analiza kemijskog sastava materijala. Ovaj postupak dovodi do razumijevanja i rješavanja važnih problema, kao što su uzroci kvarova, te proizvođačima omogućuje donošenje odluka o izboru materijala.

Ispitivanja koja se provode u svrhu karakterizacije materijala mogu se podijeliti na nerazorna i razorna.

Materijalografija je pojam koji se usko povezuje uz pojam karakterizacije materijala. Odnosi se na analizu makrostrukture i mikrostrukture, ali uključuje i postupke uzimanja i pripreme uzoraka za analizu. Makroskopska analiza strukture podrazumijeva promatranje golim okom ili promatranje uz pomoć slabijih optičkih pomagala. Pruža veliku količinu informacija o boji materijala, sjaju, obliku, pukotinama, hrapavosti i poroznosti. Često makroskopsko ispitivanje daje naznake koja bi se druga ispitivanja mogla provesti kako bi se u potpunosti identificirao materijal ili riješio problem.

Nakon makroskopskog slijedi mikroskopsko promatranje materijala na optičkom ili elektronskom mikroskopu. Mikroskopsko promatranje je postupak koji u kombinaciji s drugim postupcima omogućuje određivanje sastava i strukture materijala. Neophodan je postupak jer je neke karakteristike materijala moguće uočiti tek mikroskopom. Analizom mikrostrukture mogu se dobiti podaci o veličini kristalnih zrna, prisutnim fazama i njihovim udjelima, raspodjeli faza, eventualno prisutnim pukotinama ili deformaciji strukture. Kako bi bili sigurni u rezultate analize mikrostrukture vrlo je važno imati kvalitetno pripremljen materijalografski uzorak. Kvalitetno pripremljen uzorak je uzorak s ravnom i glatkom površinom. [11]

Priprema materijalografskih uzoraka obavlja se u nekoliko koraka:

1. izrezivanja reprezentativnog uzorka koji dobro predstavlja materijal ili dio iz kojeg je izrezan
2. ulijevanje uzorka u polimernu masu kako bi se zaštitio i poprimio uniformni oblik jer se u tom obliku lakše manipulira s uzorkom - kod nezalivenih uzoraka najčešće kod daljnje pripreme dođe do zaobljenja rubova što onemogućuje njihovu kvalitetnu analizu

3. brušenjem se skida površinski sloj koji je dosta oštećen izrezivanjem uzorka i koji može biti dosta ugnječen, a sve sa ciljem da površina bude što ravnija
4. poliranje slijedi nakon brušenja i njime se dodatno ravna površina na kojoj će se analizirati mikrostruktura
5. nagrizanjem površine ispoliranog uzorka otkriva se struktura materijala.

Vrste nagrizanja:

- kemijsko
- elektrolitičko
- obojeno
- termičko

Mikrostruktura se uvijek analizira u poliranom i u nagrizenom stanju.

6. EKSPERIMENTALNI DIO

6.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

Osnovni cilj rada bio je provesti karakterizaciju materijala zupčanika u svrhu određivanja uzroka prevelikog tribološkog oštećenja na bokovima zubi. Karakterizacija materijala je uključivala analizu kemijskog sastava, kvalitativnu i kvantitativnu analizu mikrostrukture i mjerenja mikrotvrdoće. Na temelju dobivenih rezultata utvrdit će se uzrok prevelikog trošenja bokova zubi zupčanika.

6.2. Materijal za ispitivanje

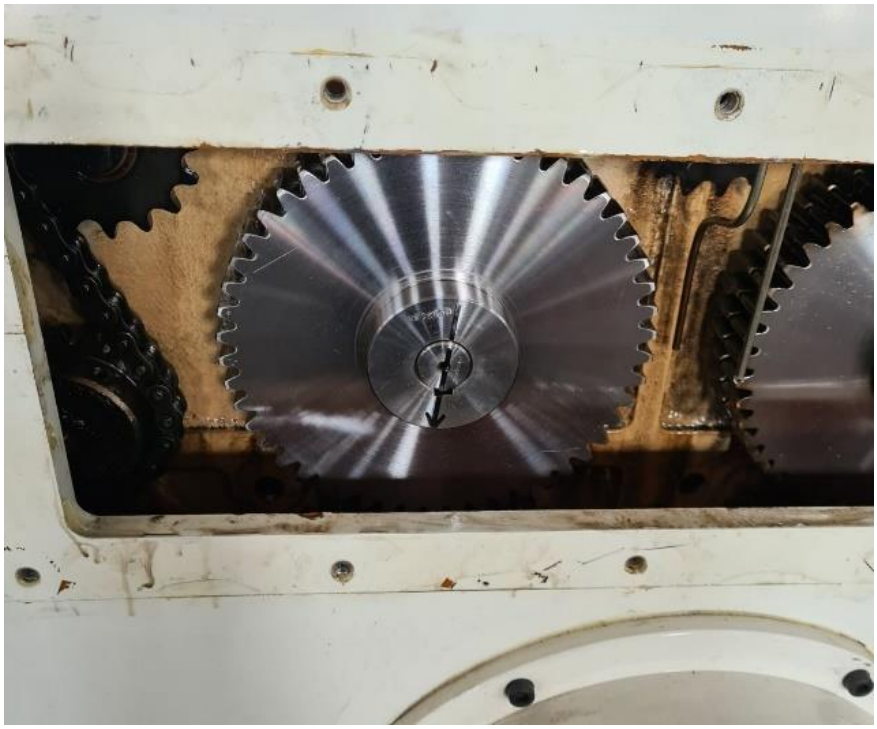
Svi potrebni uzorci za ispitivanje izrezani su iz zupčanika izuzetog s botomera, stroja za proizvodnju vreća za pakiranje cementa. Na slici 9 prikazano je postrojenje za proizvodnju vreća za pakiranje cementa, a na slici 10 prikazan je analizirani zupčanik u botomeru.

Osnovni podaci o zupčaniku:

- promjer: 250 mm
- u radu je od 2019. godine
- redovito podmazivan uljem.



Slika 9. Proizvodni pogon za proizvodnju vreća za pakiranje cementa



Slika 10. Analizirani zupčanik u postrojenju



Slika 11. Analizirani zupčanik izuzet iz botomera



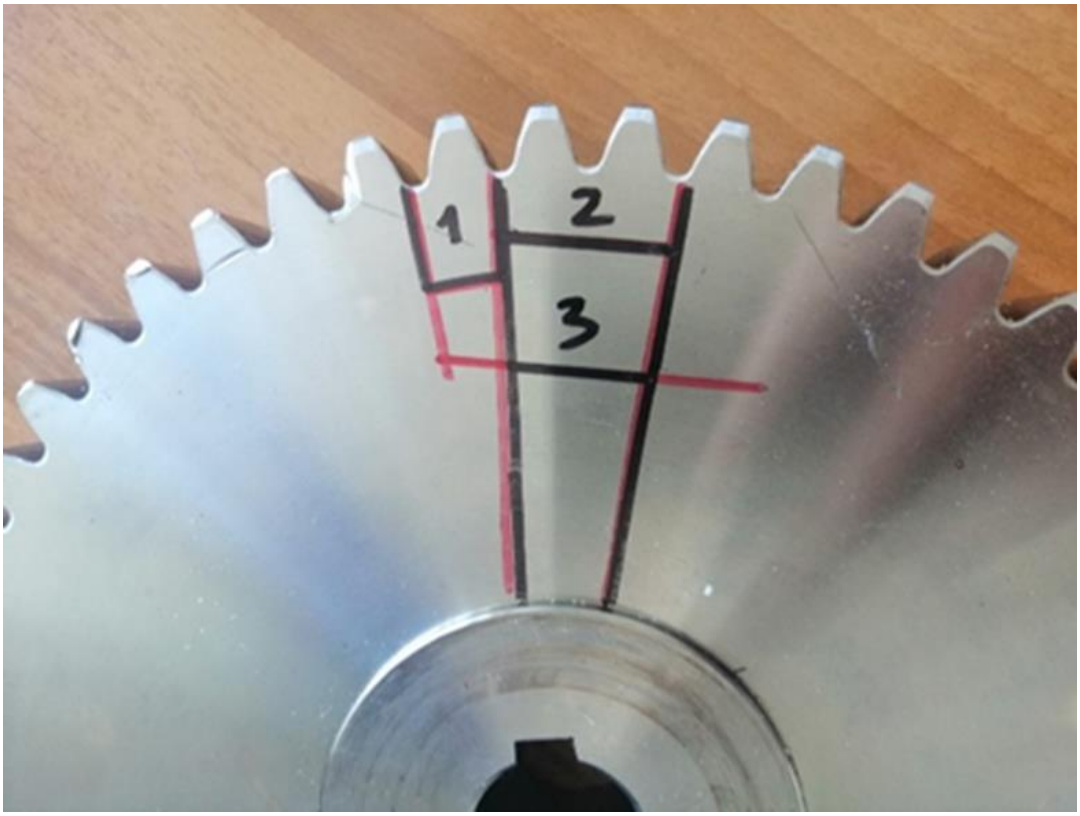
Slika 12. Tribološki oštećeni zubi analiziranog zupčanika

Na slici 11 prikazan je analizirani zupčanik izdvojen iz botomera, a na slici 12 prikazani su tribološki oštećeni zubi analiziranog zupčanika.

6.3. Kvalitativna i kvantitativna analiza mikrostrukture

6.3.1. Priprema uzoraka

Kod uzimanja uzoraka za kvalitativnu i kvantitativnu analizu mikrostrukture treba osobitu pozornost posvetiti reprezentativnosti uzoraka. Na slici 13 prikazan je dio analiziranog zupčanika s ucrtanim uzorcima koji su poslije izrezani u svrhu određivanja kemijskog sastava, analize mikrostrukture i mjerenja mikrotvrdoće. Uzorak označen brojem 3 korišten je za analizu kemijskog sastava, a na uzorcima označenim brojevima 1 i 2 analizirana je mikrostruktura i mjerena mikrotvrdoća.



Slika 13. Odabir mjesta za izrezivanje uzoraka

6.3.2. Izrezivanje uzoraka

U Laboratoriju za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu izrezani su uzorci na strojnoj pili prikazanoj na slici 14.

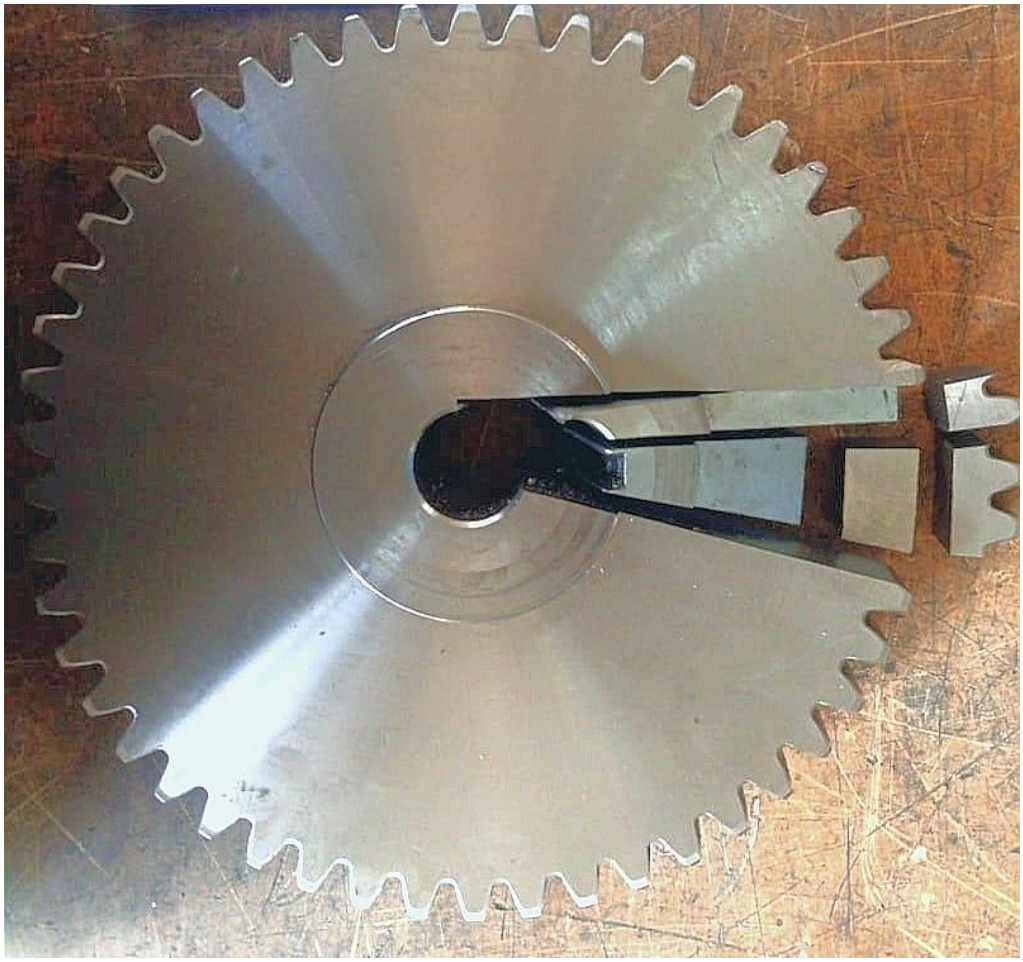
Na slici 15 prikazan je postupak izrezivanja uzoraka iz zupčanika, a na slici 16 su prikazani izrezani uzorci. Tijekom izrezivanja područje rezanja intenzivno je hlađeno kako ne bi došlo do promjene mikrostrukture na uzorcima.



Slika 14. Strojna pila na kojoj su izrezani uzorci



Slika 15. Izrezivanje uzoraka iz zupčanika



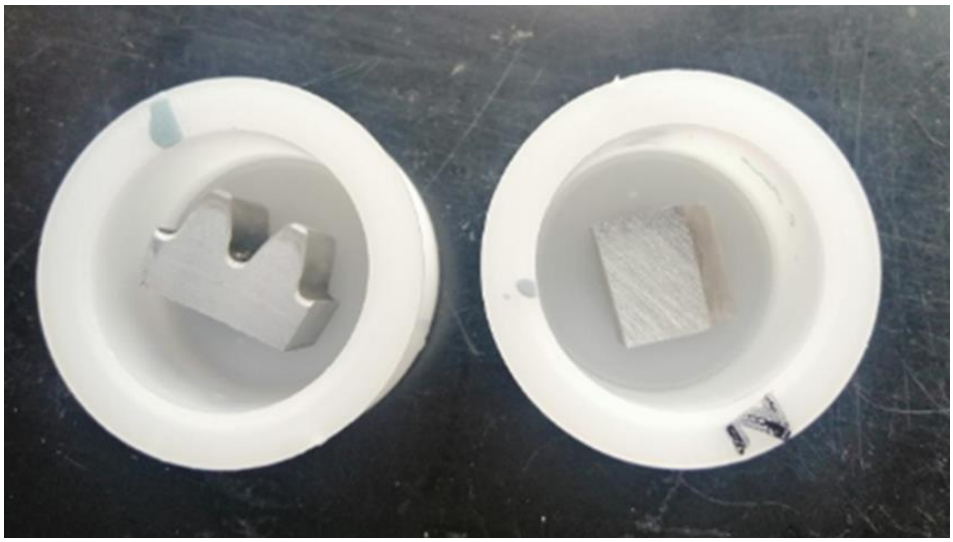
Slika 16. Izrezani uzorci za analize

6.3.3. Ulijevanje uzoraka u polimernu masu

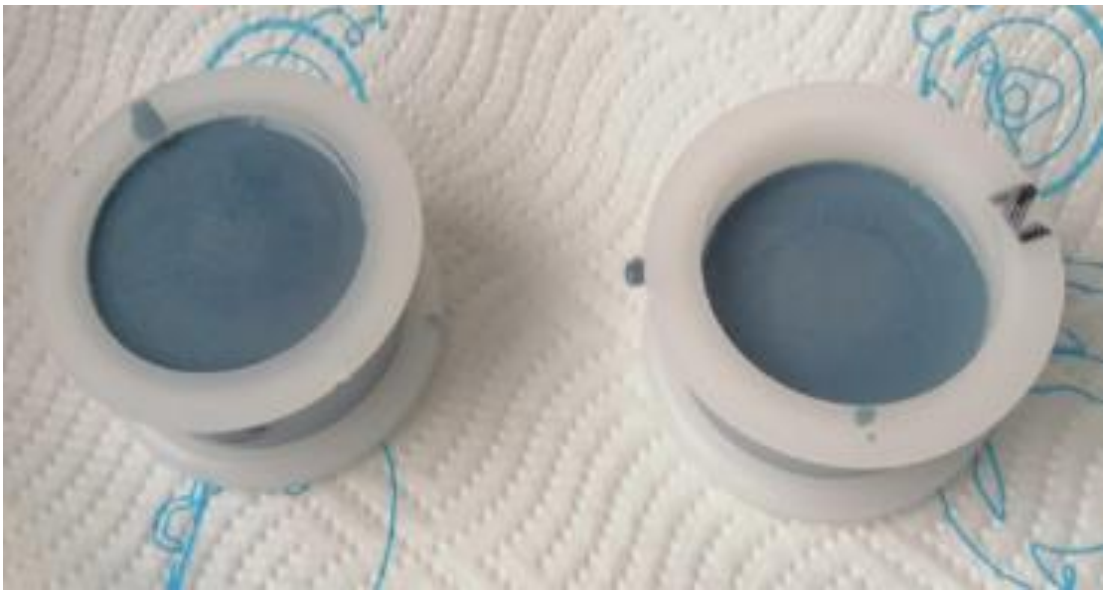
Daljnja priprema uzorka obavljena je u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Uzorci se postavljaju u kalupe i zalijevaju polimernom masom kako bi poprimili uniformni oblik i kako bi se njima lakše rukovalo tijekom daljnje pripreme i ispitivanja. Prah i smola se izmiješaju u pravilnom omjeru prema uputama proizvođača, dvije mjerice praha i jedna mjerica smole. Nakon što se izmiješa, prelije se preko uzorka koji je postavljen na dno kalupa. Potrebno je pričekati 30-ak minuta da se polimerna masa stvrdne.

Nakon što se skrutnu, uzorci se vade iz kalupa i može se nastaviti daljnja priprema – brušenje i poliranje.

Na slici 17 prikazani su uzorci u kalupima, a na slici 18 zaliveni uzorci.



Slika 17. Uzorci u kalupima prije ulijevanja polimerne mase



Slika 18. Uzorci nakon zalijevanja polimernom masom

6.3.4. Brušenje uzoraka

Kad se uzorci u kalupima stvrdnu vade se i može se krenuti s brušenjem površine koja će se poslije analizirati. Brušenjem se otklanja ugnječeni materijal od rezanja i poravnava se površina uzorka za promatranje i analizu mikrostrukture.

Brušenje se odvijalo u 6 koraka, a za hlađenje i podmazivanje koristila se voda. Kod svih koraka brzina brušenja iznosila je 300 okretaja u minuti. Za svaki sljedeći korak brušenja mijenjao se

brusni papir od grubljeg prema finijem. Abrazivne čestice na brusnom papiru bile su od silicijevog karbida.

Korištene su sljedeće kvalitete brusnog papira: P120, P320, P600, P1200, P2400, P4000.

Na slici 19 prikazano je brušenje uzoraka.



Slika 19. Brušenje uzoraka na automatskom uređaju za brušenje

6.3.5. Poliranje

Poliranje se odvijalo u 2 koraka:

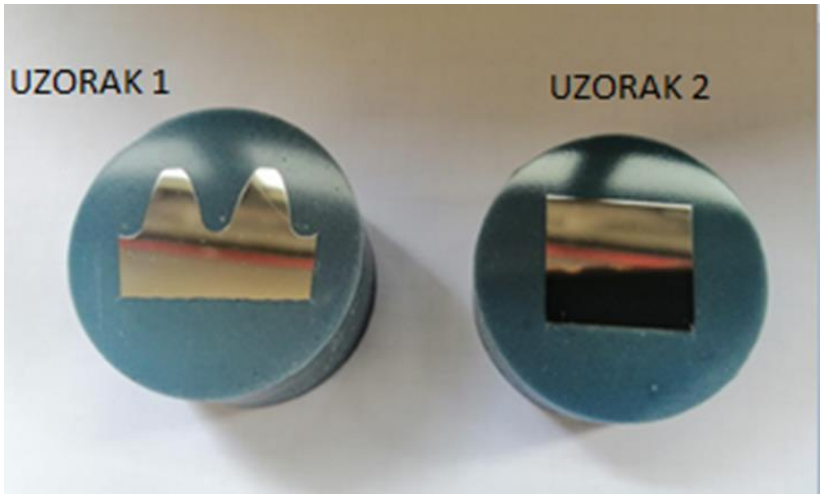
1. korak:
   - brzina: 150 okretaja u minuti
   - tekući lubrikant za hlađenje i podmazivanje
   - dijamantna pasta finoće 3 mikrometra
   - vrijeme poliranja: 1,5 minuta.
2. korak:
   - brzina: 150 okretaja u minuti

- tekući lubrikant za hlađenje i podmazivanje
- dijamantna pasta finoće ¼ mikrometra
- vrijeme poliranja: 1,5 minuta

Uređaj za poliranje prikazan je na slici 20, a na slici 21 prikazani su ispolirani uzorci.



Slika 20. Uređaj za poliranje uzoraka



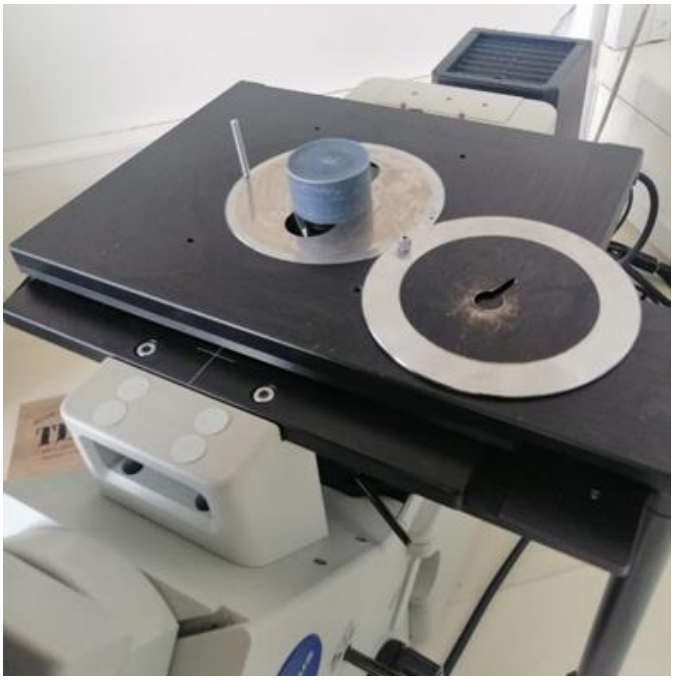
Slika 21. Uzorci nakon poliranja

6.3.6. Nagrizanje

Nagrizanjem se površina uzorka priprema za analizu mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu. Za nagrizanje se koristila 3 postotna otopina dušične kiseline u etilnom alkoholu poznata pod nazivom Nital. Uzorak se na 3 sekunde uroni u Nital, a nakon toga u vodu kako bi se prekinula kemijska reakcija.

6.3.7. Analiza mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu

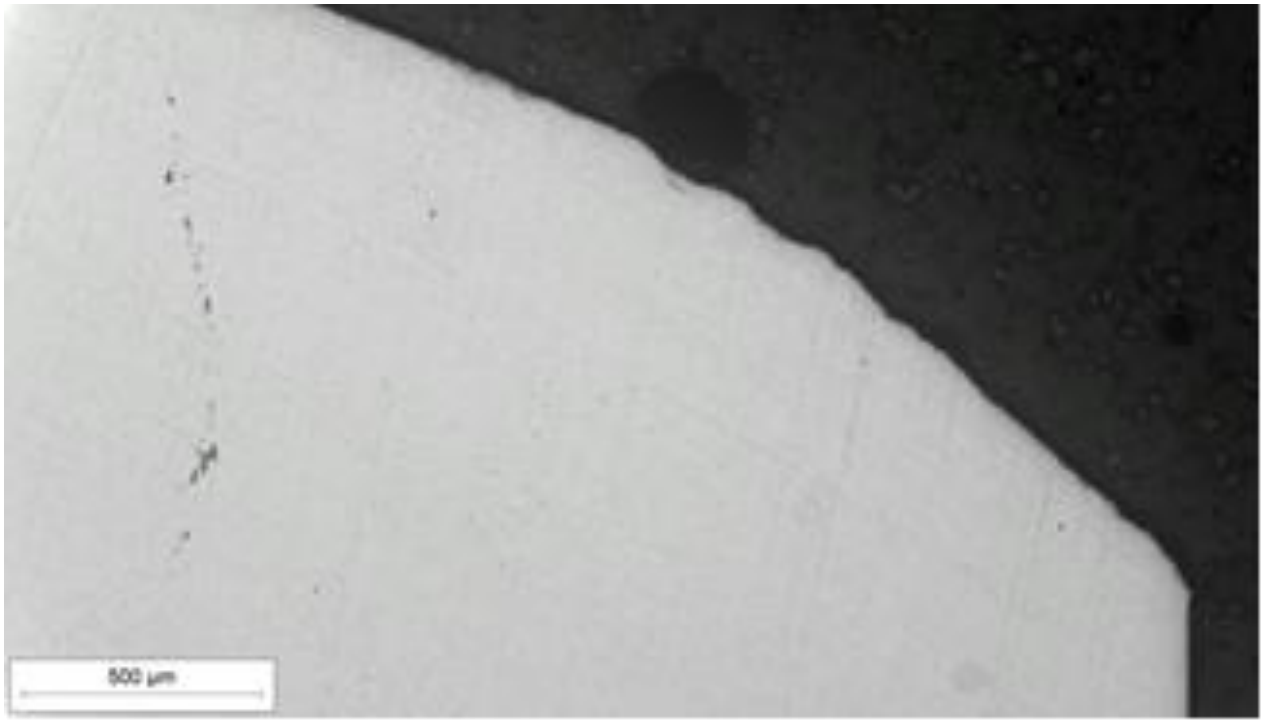
Mikrostruktura je analizirana na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51 prikazanom na slici 22. Površina uzorka promatrana je u poliranom i nagrizenom stanju s različitim povećanjima, od 50 do 1000 ×.



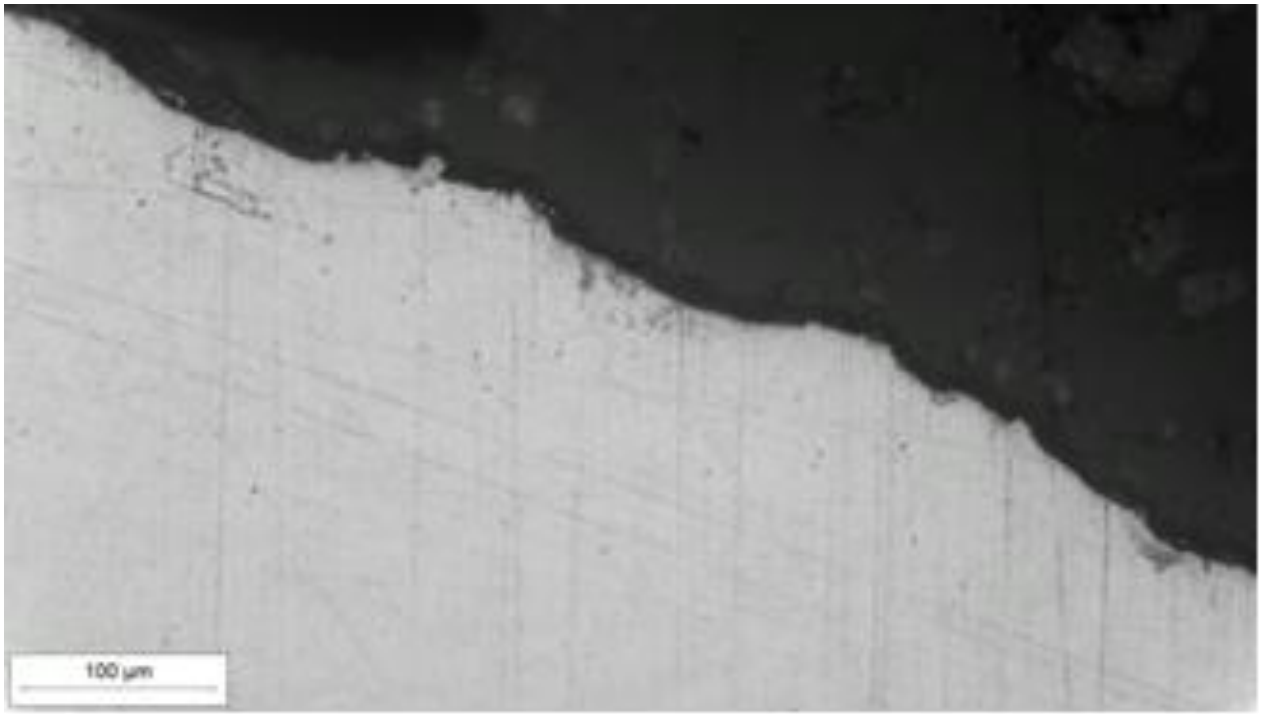
Slika 22. Uzorak na svjetlosnom mikroskopu

6.3.7.1. Analiza mikrostrukture uzoraka u poliranom stanju

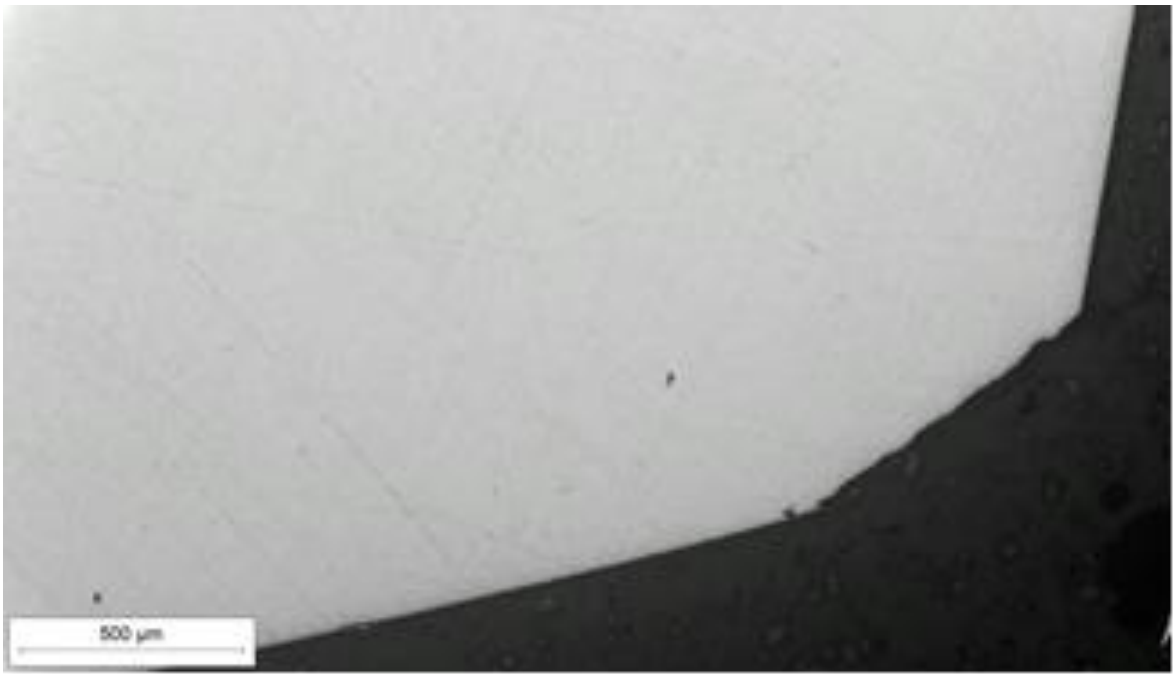
U poliranom stanju, na bokovima oba analizirana zuba na uzorku 1, uočena su tribološka oštećenja i prikazana na slikama od 23 do 30.



Slika 23. Tribološka oštećenja na površini boka zuba s gornje strane



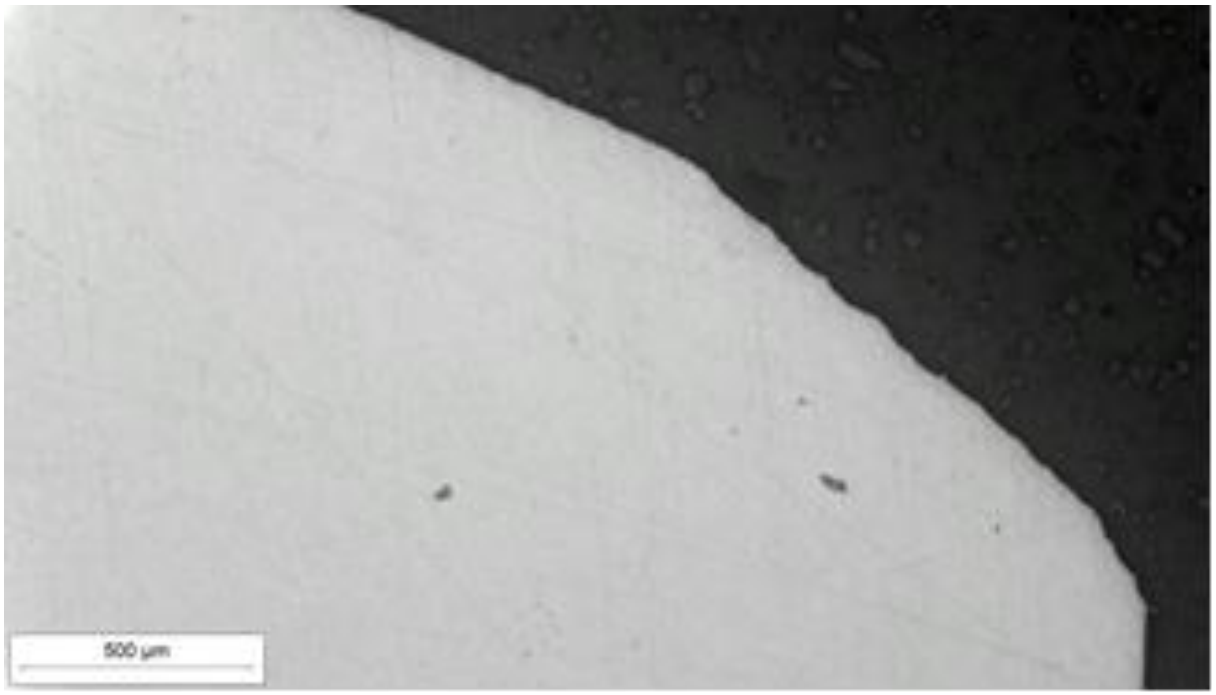
Slika 24. Isto kao na slici 20 uz veće povećanje



Slika 25. Tribološka oštećenja na površini boka zuba s donje strane



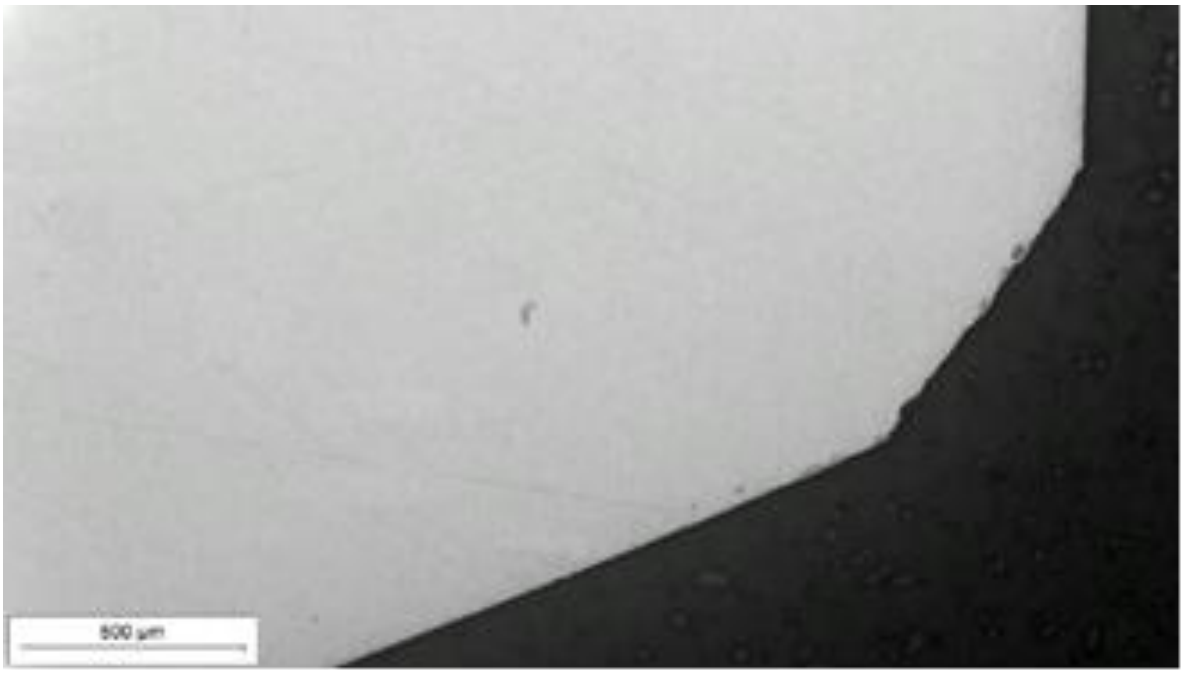
Slika 26. Isto kao na slici 22 uz veće povećanje



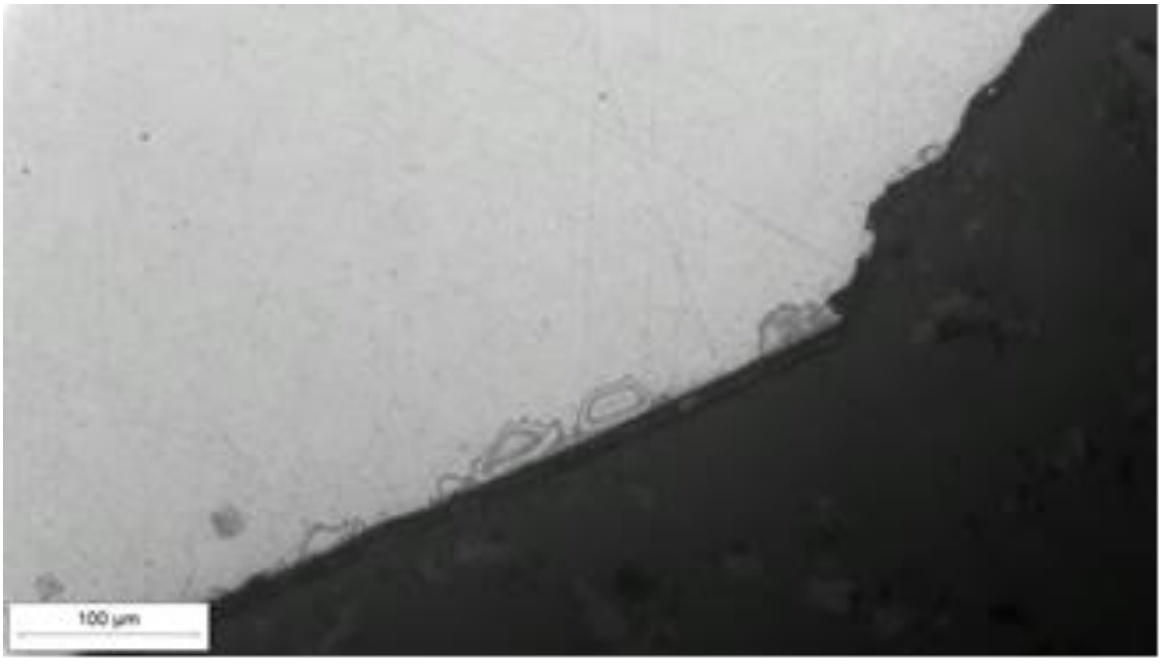
Slika 27. Tribološka oštećenja na površini boka drugog zuba s gornje strane



Slika 28. Isto kao na slici 24 uz veće povećanje

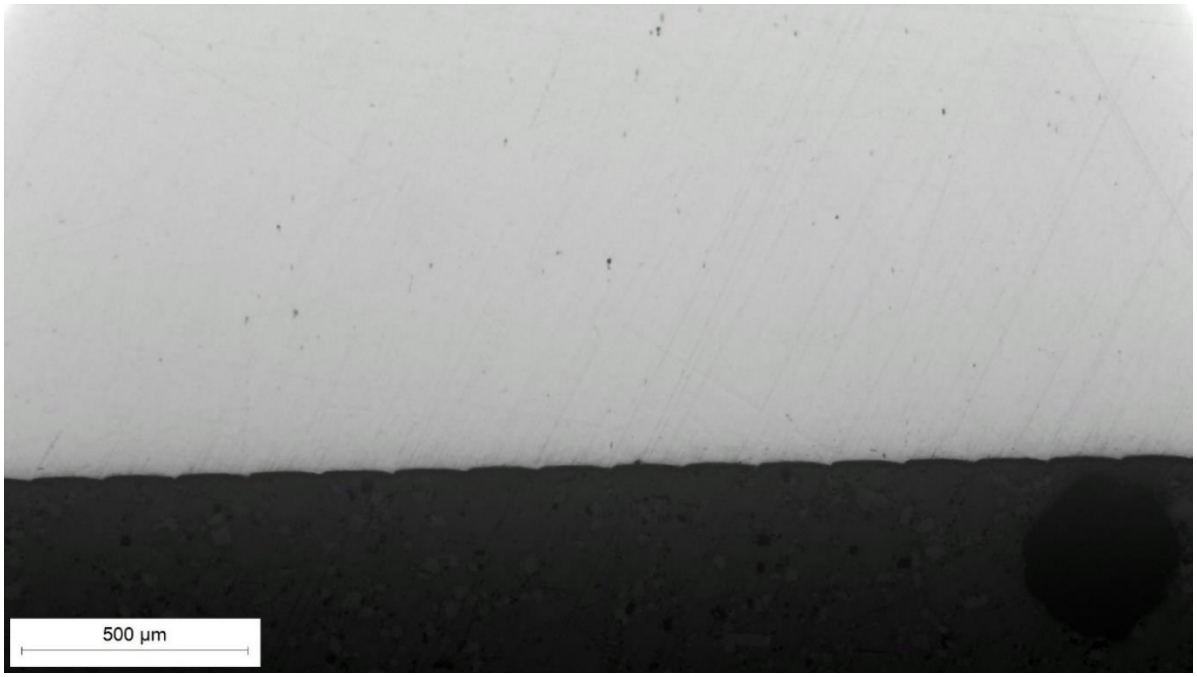


Slika 29. Tribološka oštećenja na površini boka drugog zuba s donje strane

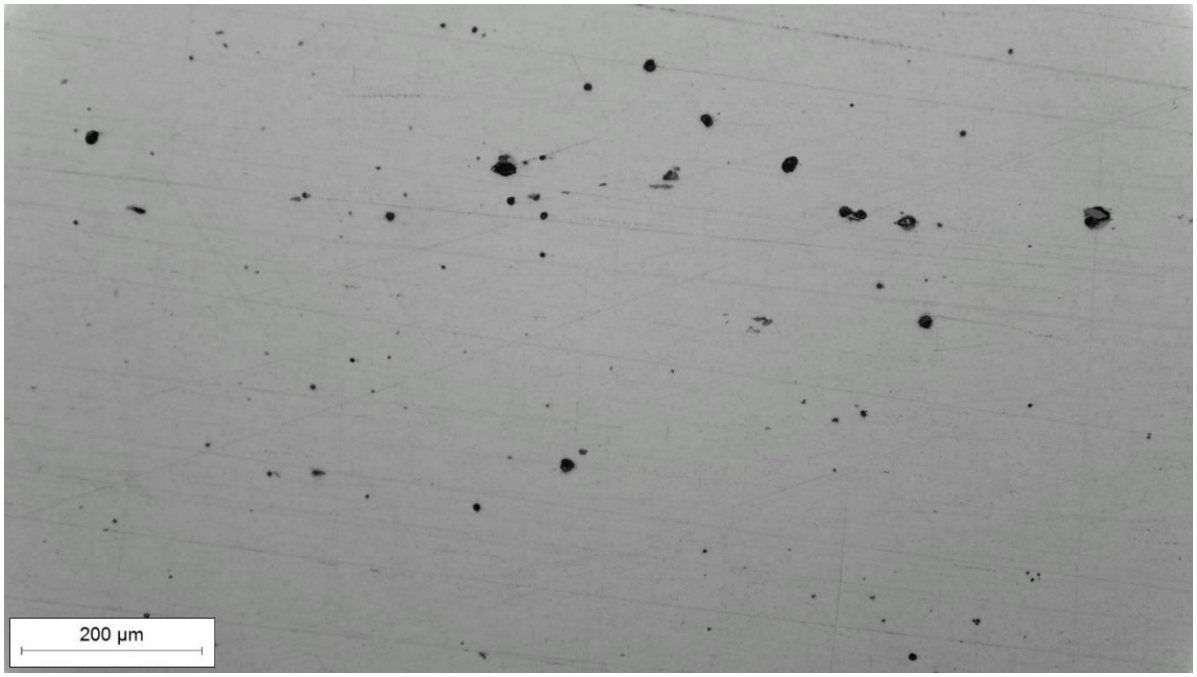


Slika 30. Isto kao na slici 26 uz povećanje

Na slici 31 prikazana je polirana površina uzorka 2 u rubnom sloju zupčanika, a na slici 32 polirana površina istog uzorka u sredini presjeka.



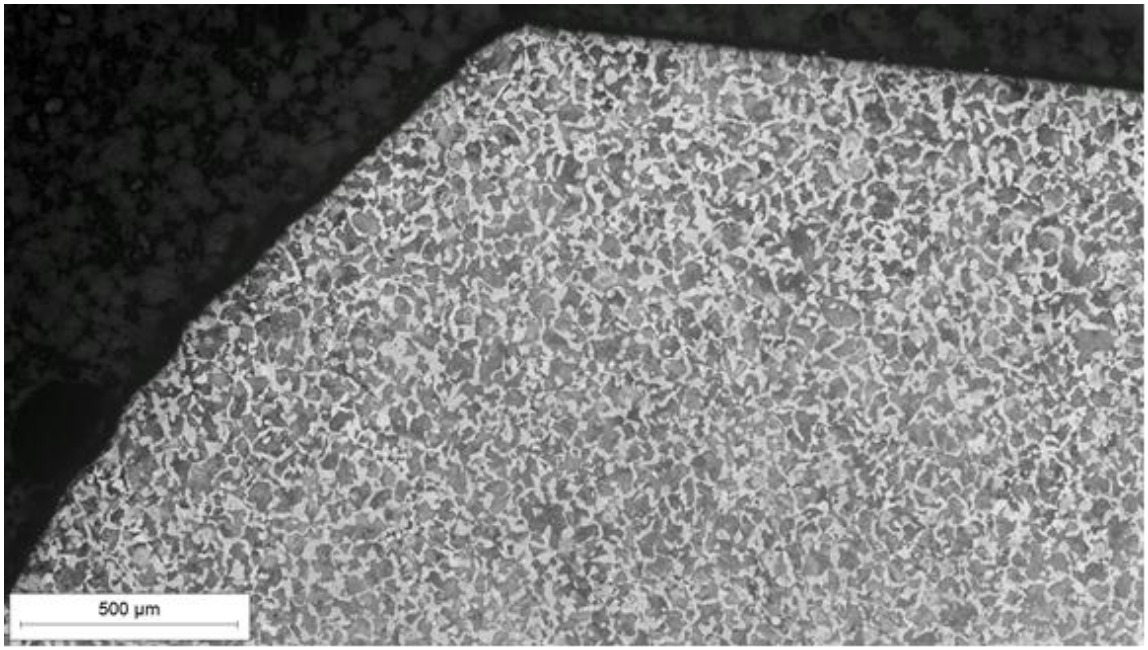
Slika 31. Polirana površina uzorka 2 u rubnom sloju



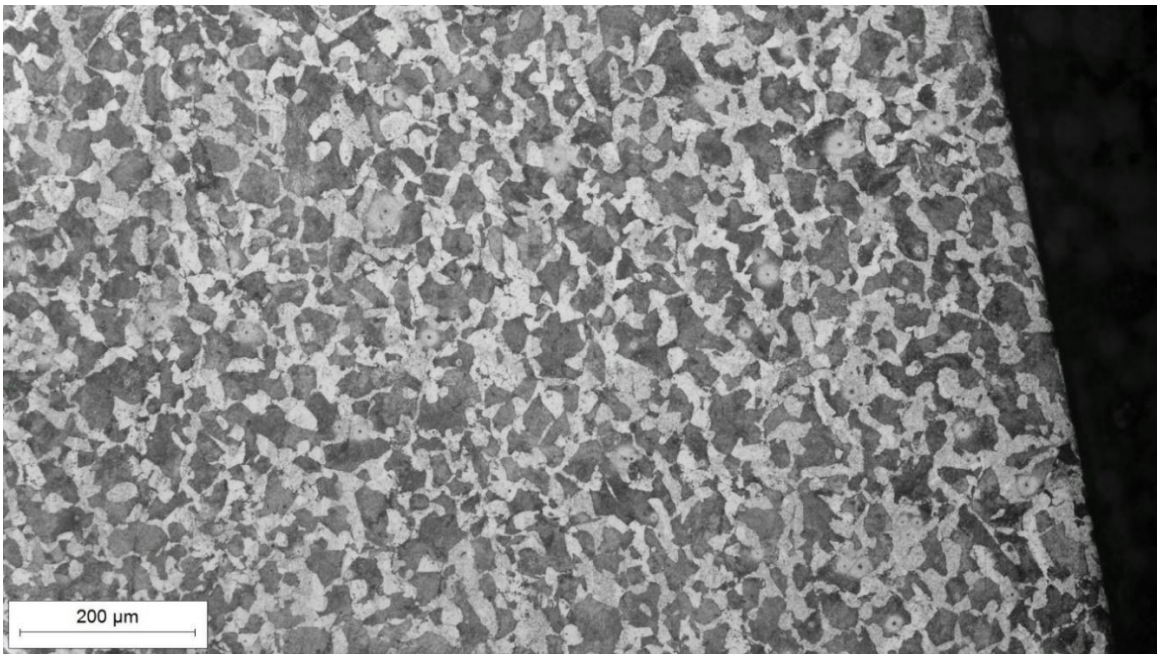
Slika 32. Polirana površina uzorka 2 u sredini presjeka

6.3.7.2. Analiza mikrostrukture uzoraka u nagrizenom stanju

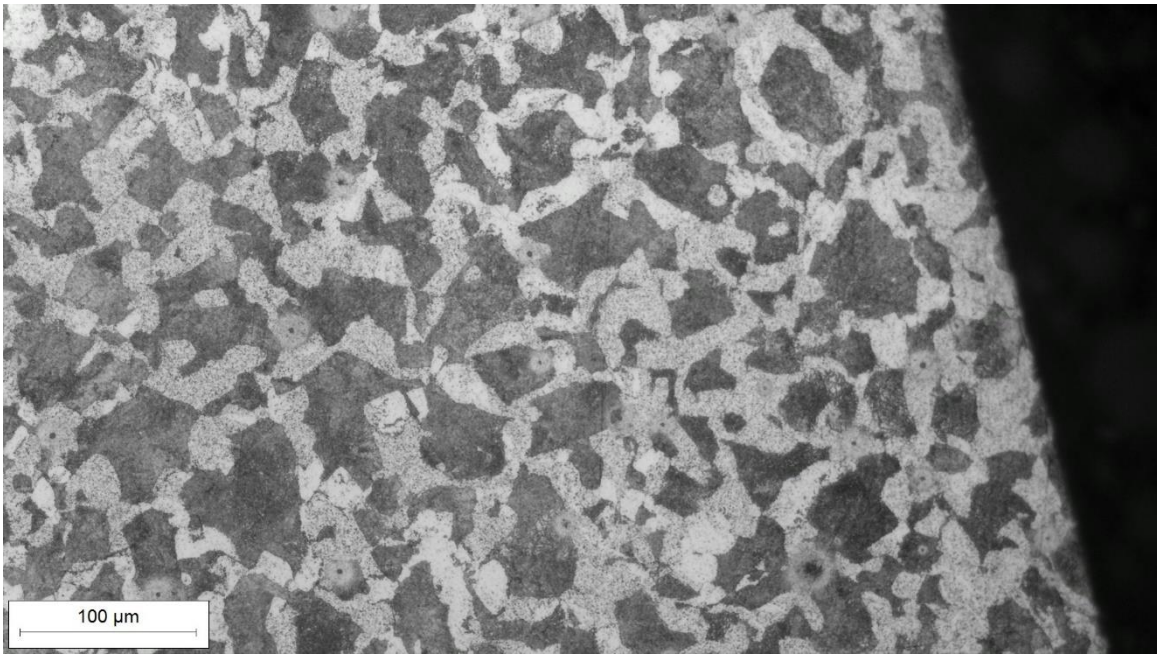
Na slikama od 33 do 35 prikazana je mikrostruktura prvog uzorka u nagrizenom stanju pri različitim povećanjima. Po cijelom presjeku zuba može se uočiti ujednačena feritno-perlitna mikrostruktura, s podjednakim udjelima ferita i perlita. Na površini, uz rub boka zuba, ne vidi se cementirani sloj.



Slika 33. Mikrostruktura zuba analiziranog zupčanika snimljena pri povećanju 50×

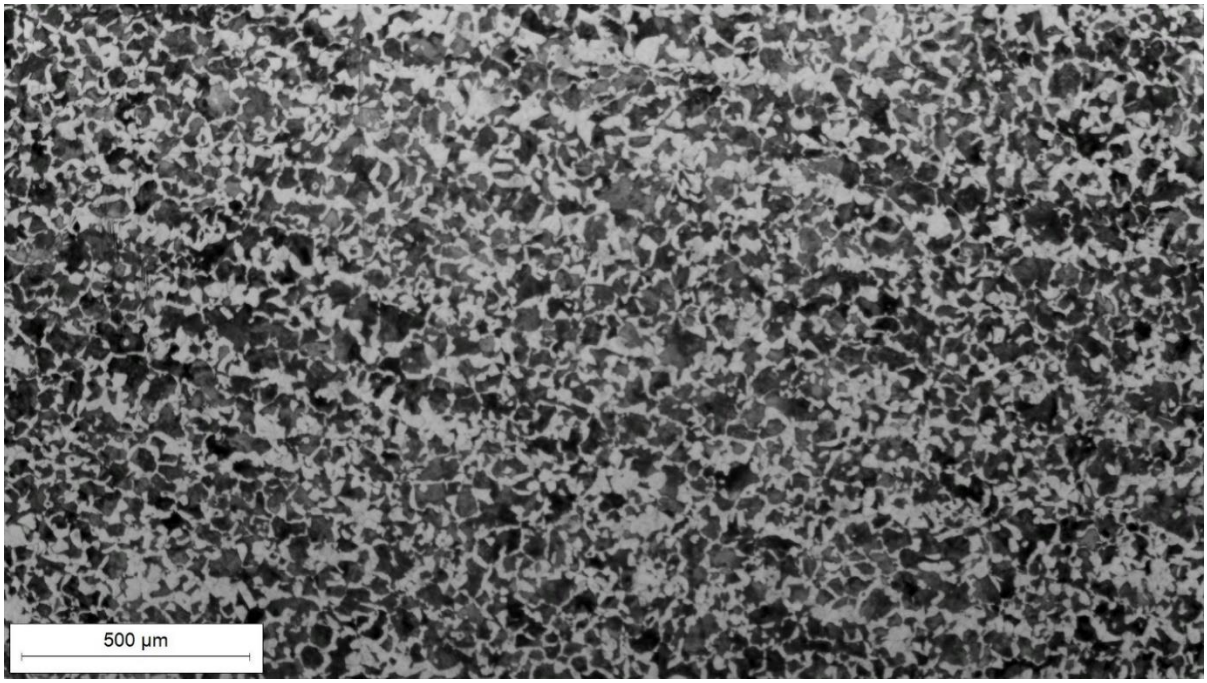


Slika 34. Mikrostruktura zuba analiziranog zupčanika snimljena pri povećanju 100×.

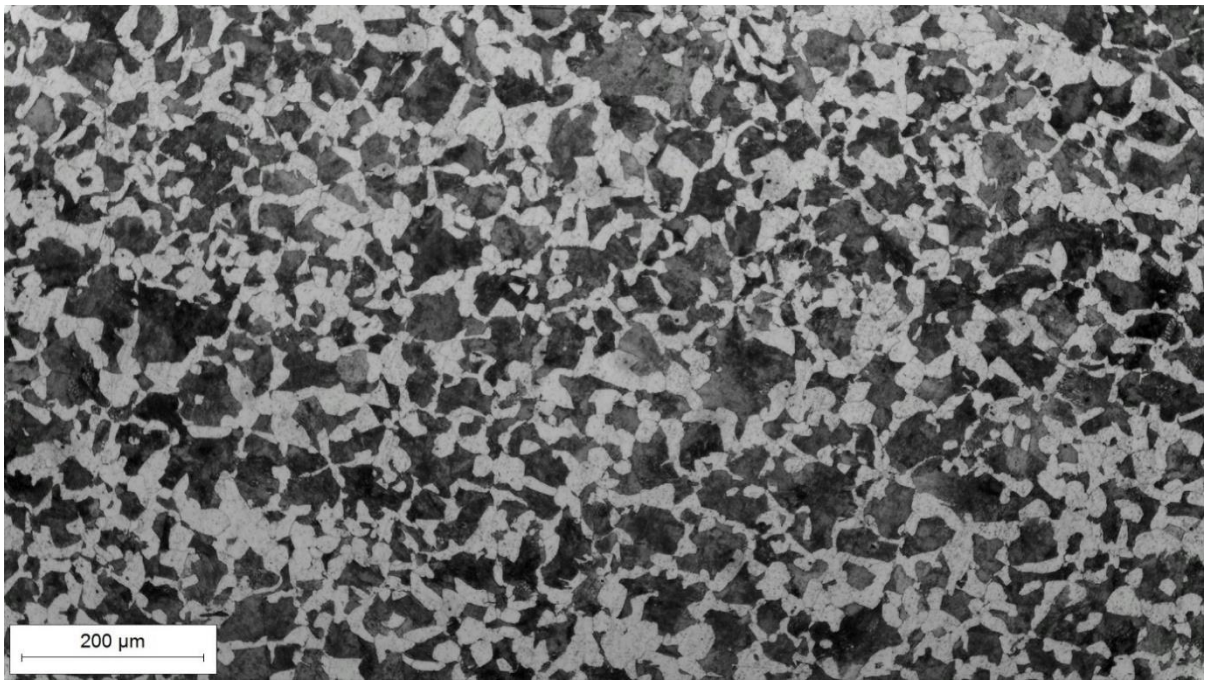


Slika 35. Mikrostruktura zuba analiziranog zupčanika snimljena pri povećanju 200×.

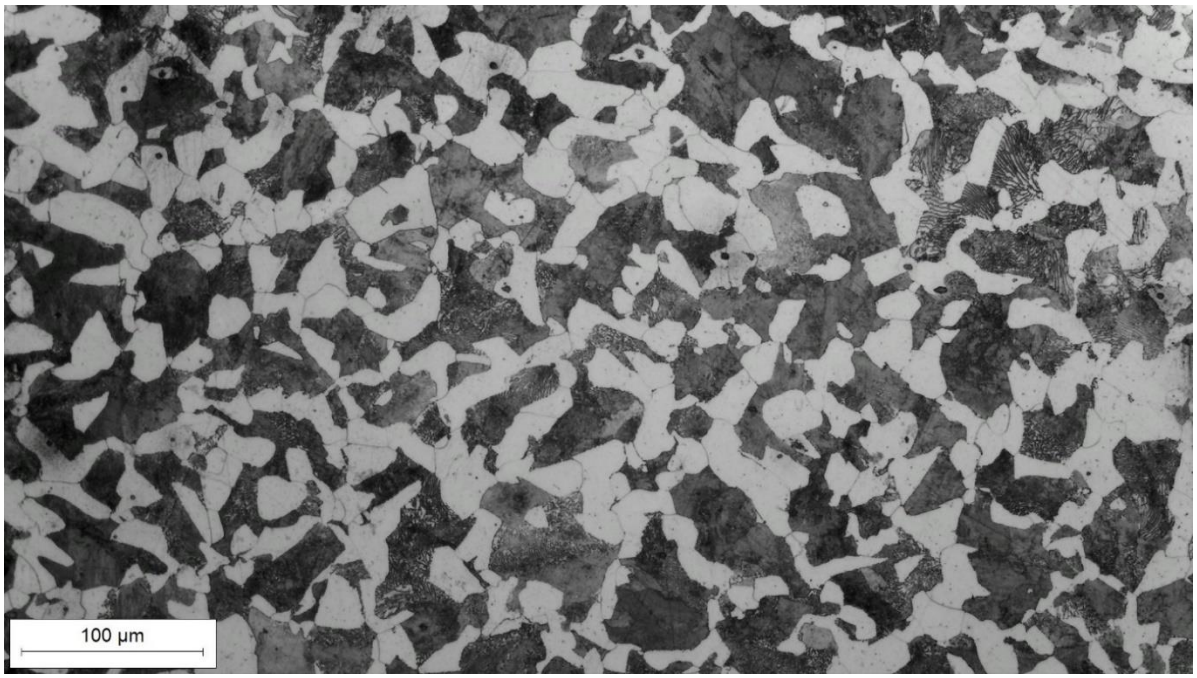
Na slikama 36-39 prikazana je mikrostruktura drugog uzorka nakon nagrizanja. Promatrana površina na ovom uzorku, u odnosu na uzorak 1 zakrenuta je za kut od 90°, a prikazuje također mikrostrukturu u zubu zupčanika. Ne može se uočiti razlika u mikrostrukturi između uzoraka 1 i 2.



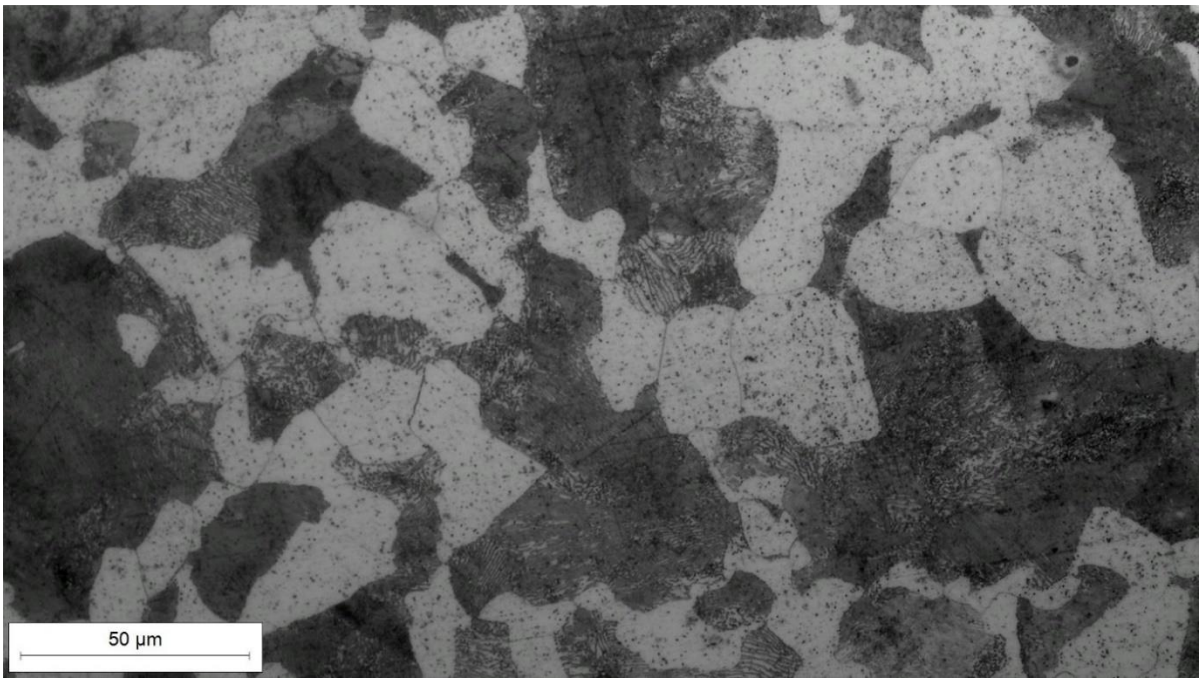
Slika 36. Mikrostruktura zuba analiziranog zupčanika snimljena pri povećanju 50×.



Slika 37. Mikrostruktura zuba analiziranog zupčanika snimljena pri povećanju 100×.



Slika 38. Mikrostruktura zuba analiziranog zupčanika snimljena pri povećanju 200×.



Slika 39. Mikrostruktura zuba analiziranog zupčanika snimljena pri povećanju 500×.

6.4. Analiza kemijskog sastava

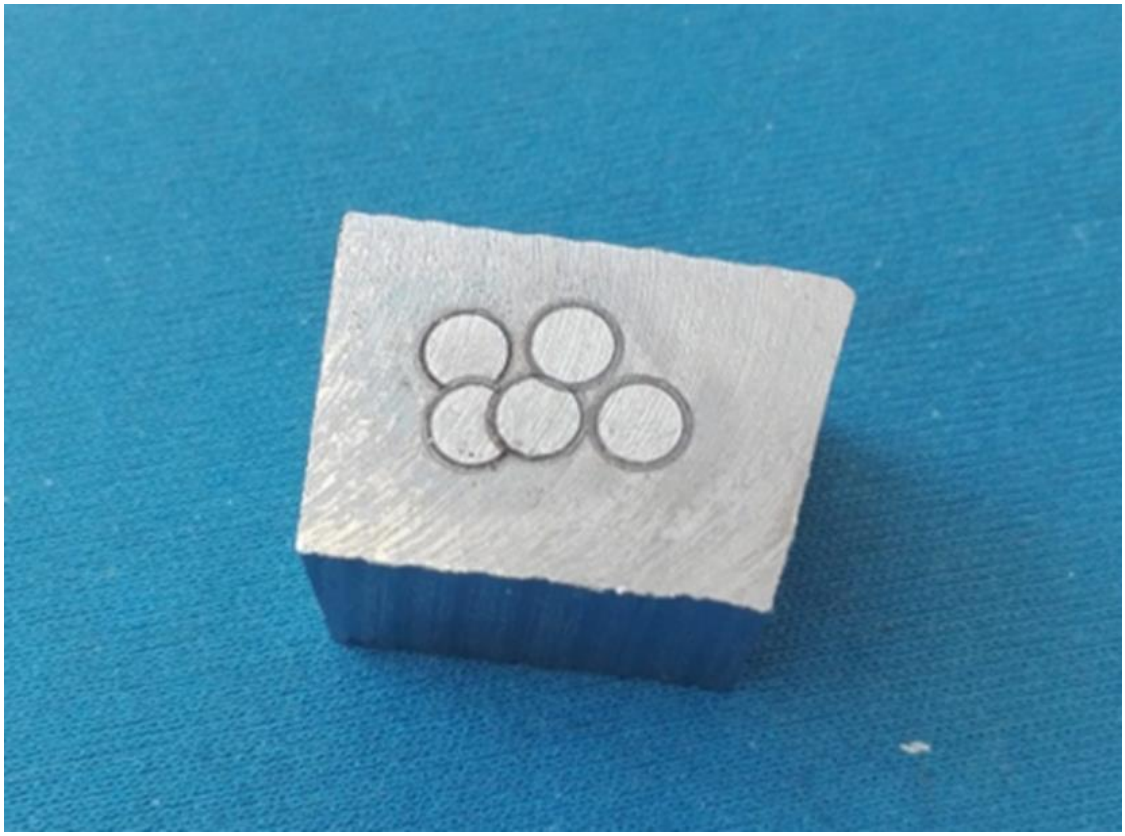
U Laboratoriju za analizu metala Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu napravljena je kvantitativna kemijska analiza dostavljenog uzorka. Analiza je provedena na optičkom emisijskom spektometru GDS 850 A, LECO. Na slici 40 prikazana je komora uređaja u koju se postavlja uzorak. Napravljeno je nekoliko mjerenja iz kojih su izračunate srednje vrijednosti za pojedine kemijske elemente.

Na slici 41 prikazan je uzorak nakon provedenog kemijskog ispitivanja.

U tablici 2 prikazan je kemijski sastav analiziranog čelika dobiven optičkom emisijskom spektroskopijom.



Slika 40. Ispitna komora uređaja GDS 850 A, LECO



Slika 41. Uzorak nakon analize kemijskog sastava

Tablica 2. Kemijski sastav materijala zupčanika

Udio elemenata %								
C	***Si***	***Mn***	***P***	***S***	***Cr***	***Mo***	***Ni***	***Fe***
0,49-0,53	0,17	0,69-0,71	<0,05	<0,02	0,11-0,12	0,018-0,019	0,04-0,05	ostatak

6.5. Mjerenje mikrotvrdoće HV

Mjerenje mikrotvrdoće provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Korištena je metoda mjerenja po Vickersu na uređaju PMT-3, prikazanog na slici 42. Mikrotvrdoća je izmjerena na oba uzorka u poliranom stanju. Opterećenje pri mjerenju mikrotvrdoće iznosilo je 100 grama, a to znači da je mjerena mikrotvrdoća HV0,1.

Na prvom uzorku, prikazanom na slici 43, mikrotvrdoća je mjerena od rubova zuba prema središnjem dijelu.

Drugi uzorak, prikazan na slici 44, uzet je iz tijela zupčanika i na njemu je također izmjerena mikrotvrdoća HV0,1. Mikrotvrdoća je izmjerena u tri niza – uz površinu i u sredini presjeka.

Na slici 45 vide se otisci mjerenja tvrdoće na površini prvog uzorka. Nakon što su izmjerene dijagonale otisaka i izračunata mikrotvrdoća, izmjerena je i udaljenost svakog otiska od ruba boka zuba, kako je prikazano na slici 46.

U tablici 3 prikazane su udaljenosti od ruba boka zuba i pripadajuće mikrotvrdoće HV0,1.

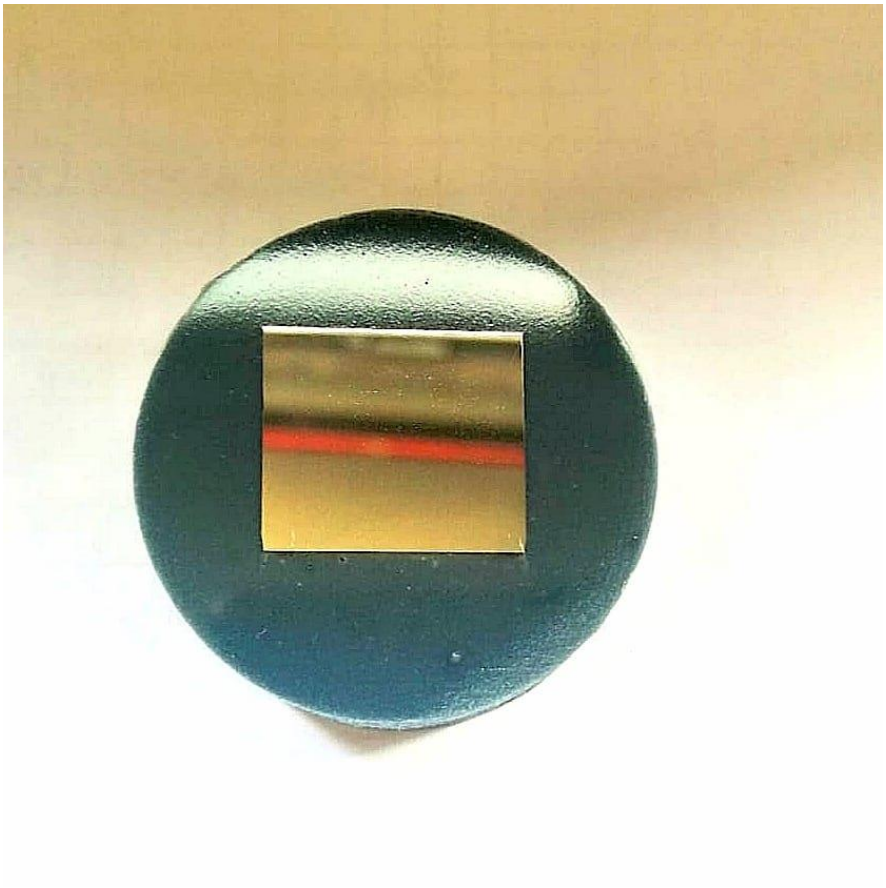
U tablici 4 prikazane su vrijednosti mikrotvrdoće izmjerene na drugom uzorku.



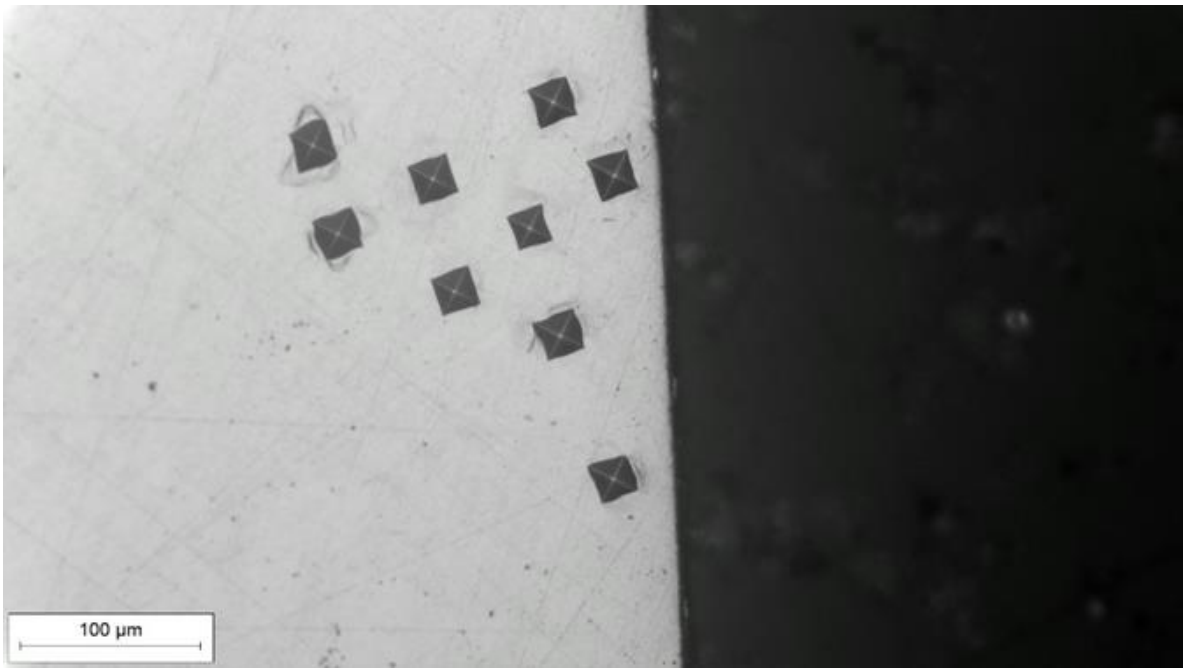
Slika 42. Mikrotvrdomjer PMT-3



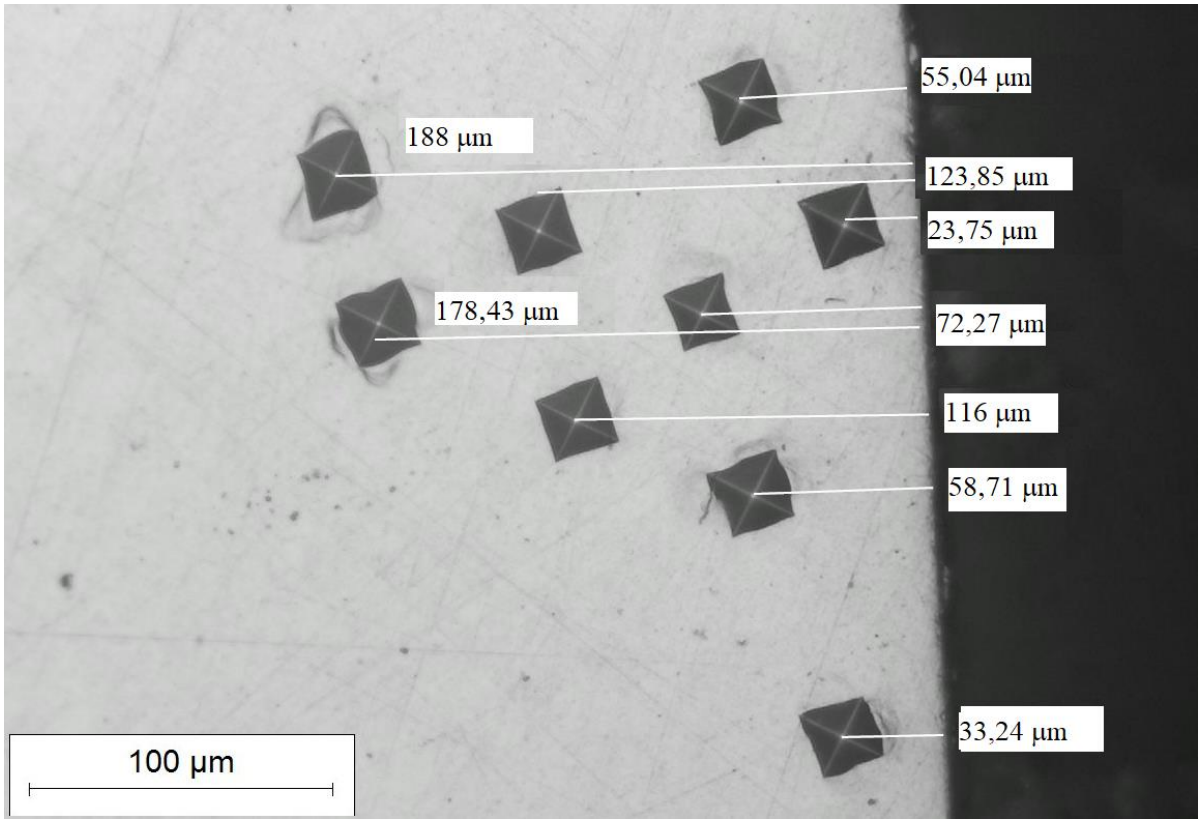
Slika 43. Uzorak 1 nakon poliranja



Slika 44. Uzorak 2 nakon poliranja



Slika 45. Mikrostruktura uzoraka s vidljivim otiscima



Slika 46. Mikrostruktura uzorka s udaljenostima od ruba zuba

Tablica 3. Promjena mikrotvrdoće s udaljenošću od ruba boka zuba

UZORAK 1									
Udaljenost od ruba boka zuba, μm	24	33	55	59	72	116	124	178	189
Mikrotvrdoća HV0,1	247	209	247	209	253	232	203	213	237

Tablica 4. Mikrotvrdoća uzorka 2

UZORAK 2	Tvrdoća HV0,1	
	Pojedinačna mjerenja	Srednja vrijednost
GORNJI RUB	157	156
	146	
	149	
	144	
	185	
SREDINA	126	144
	157	
	149	
	139	
	149	
LIJEVI RUB	137	157
	165	
	171	
	149	
	162	

7. ANALIZA REZULTATA

Osvrt na rezultate analize kemijskog sastava

Analiza kemijskog sastava pokazuje da je zupčanik izrađen iz ugljičnog čelika s masenim udjelom ugljika između 0,49 i 0,53 %. Osim silicija i mangana koji su pratioci u svim čelicima te sumpora i fosfora koji su nečistoće i koji se nalaze u dopuštenim količinama, u sastavu je otkriven i vrlo mali udio kroma, molibdena i nikla. Njihovi udjeli su manji od graničnih masenih udjela elemenata koji odjeljuju nelegirane od legiranih čelika, prema normi HRN EN 10020. [12]

Prema udjelu ugljika ovaj čelik mogao bi se svrstati u čelike za poboljšavanje, a nikako ne pripada čelicima za cementiranje, što se prema vrsti analiziranog strojnog dijela moglo očekivati.

Osvrt na rezultate analize mikrostrukture

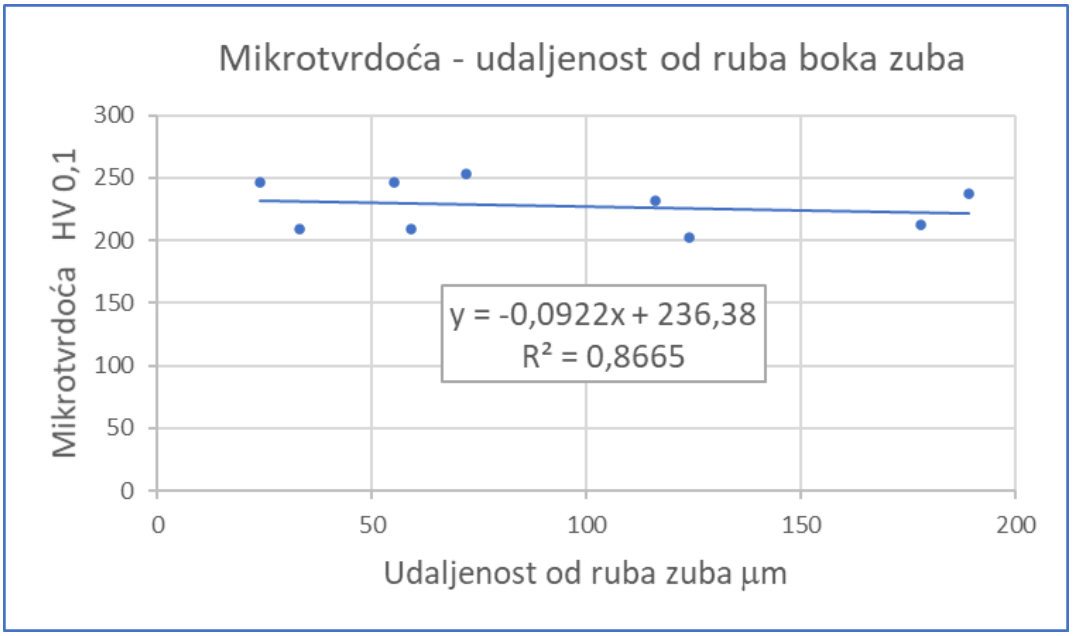
Pri analizi mikrostrukture u poliranom stanju na bokovima oba analizirana zuba uočena su oštećenja na površini koja su najvjerojatnije izazvana tribološkim opterećenjem materijala.

Nagrizanjem površine metalografskih uzoraka Nitalom otkrivena je feritno-perlitna mikrostruktura, što je prema udjelu ugljika očekivana mikrostruktura. Udio perlitne faze iznosio je 44,4 %, a ostatak je činio ferit. Navedena mikrostruktura uočena je po cijelom presjeku i nije bilo razlike između mikrostrukture jezgre i mikrostrukture na rubovima zuba analiziranog zupčanika. Kako bi se isključila mogućnost bilo koje druge mikrostrukture provedeno je ispitivanje mikrotvrdoće.

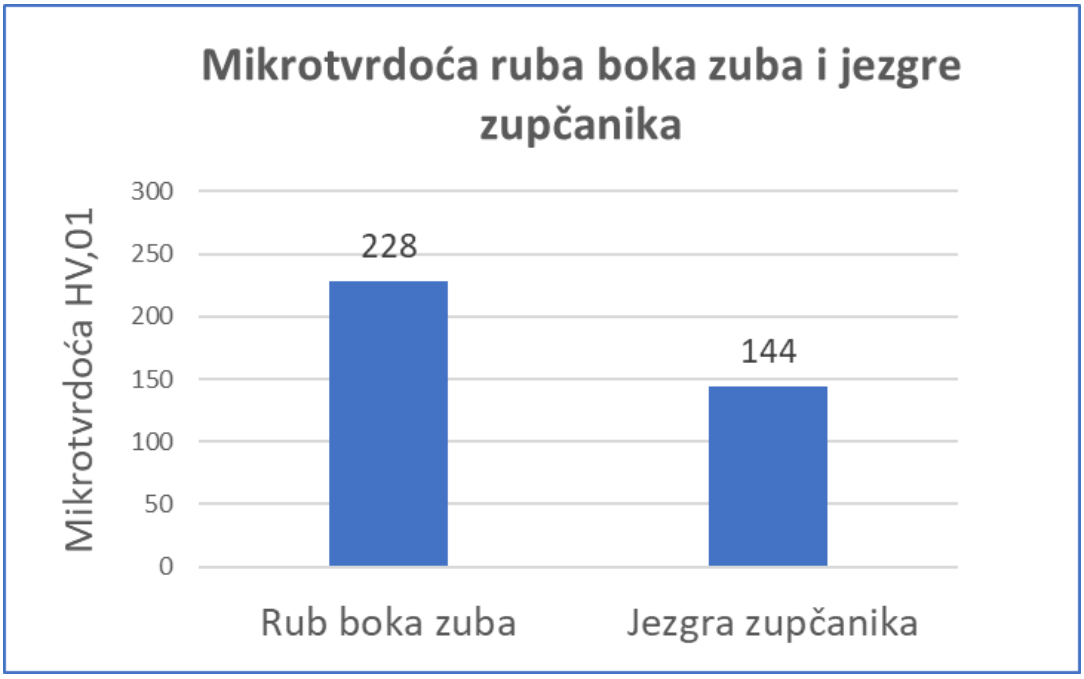
Osvrt na rezultate mjerenja mikrotvrdoće

Mikrotvrdoća uzoraka izmjerena je u poliranom stanju kako bi se preciznije izmjerile dijagonale otisaka dijamantne četverostrane piramide. Mikrotvrdoća je mjerena od ruba boka zuba prema jezgri kako bi se otkrio mogući cementirani sloj te na nešto većoj udaljenosti od boka zuba što bi, u slučaju da je provedeno cementiranje, bio osnovni materijal.

Na slici 47 prikazana je promjena vrijednosti mikrotvrdoće od ruba boka zuba prema jezgri. Vrijednosti mikrotvrdoće nalaze se između 203 HV0,1 i 253 HV0,1 (srednja vrijednost 228 HV0,1). Izmjerene vrijednosti su puno niže od tvrdoće koja se uobičajeno mjeri u martenzitnoj mikrostrukturi cementiranog sloja. Navedene vrijednosti više odgovaraju tvrdoći feritno-perlitne mikrostrukture što se podudara s rezultatima analize mikrostrukture. Kako se vidi u dijagramu, vrijednosti tvrdoće ne razlikuju se bitno, ali se ipak uočava vrlo blagi trend pada mikrotvrdoće od ruba do dubine od 0,2 mm.



Slika 47. Promjena mikrotvrdoće uz rub boka zuba



Slika 48. Promjena mikrotvrdoće od ruba prema jezgri

Na slici 48 prikazane su izmjerene vrijednosti mikrotvrdoće uz rub boka zuba gdje je srednja vrijednost mikrotvrdoće 228 HV0,1 i na malo većoj udaljenosti od ruba zuba (jezgra zupčanika) gdje je srednja vrijednost mikrotvrdoće 144 HV0,1. Na slici se jasno vidi značajna razlika u mikrotvrdoći između navedenih područja.

Feritno-perlitna mikrostruktura sa svojom relativno niskom tvrdoćom potpuno je neprikladna za zupčanike od kojih se očekuje velika otpornost na različite mehanizme trošenja i to je sigurno razlog prebrzog mehaničkog istrošenja površine zuba. Jedino martenzitna mikrostruktura na površini zuba zupčanika ima dovoljno dobra svojstva tvrdoće i otpornosti na trošenje.

8. ZAKLJUČAK

Na temelju rezultata dobivenih analizom kemijskog sastava, analizom mikrostrukture i mjerenjem mikrotvrdoće, može se zaključiti sljedeće:

- na analiziranom zupčaniku nije provedena odgovarajuća toplinska obrada koja bi dovoljno povisila tvrdoću i otpornost na trošenje zbog čega je došlo do mehaničkog trošenja bokova zubi
- feritno-perlitna mikrostruktura ugljičnog čelika od kojeg je izrađen analizirani zupčanik ne može osigurati dovoljnu tvrdoću i otpornost na trošenje
- nema razlike između mikrostrukture jezgre i mikrostrukture na rubovima zuba analiziranog zupčanika, ali je mikrotvrdoća uz površinu bokova zubi (228 HV0,1) značajno viša od mikrotvrdoće u jezgri (144 HV0,1)
- izmjerena tvrdoća je višestruko niža od tvrdoće koja bi se mogla postići odgovarajućom toplinskom obradom (npr. kaljenjem i naknadnim popuštanjem), a koja se mogla provesti s obzirom na maseni udio ugljika od oko 0,5 %.

LITERATURA

[1] *Zupčanik,* https://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=67526, Datum preuzimanja: 27.5.2021.

[2] *Zupčanici prijenosnici* https://www.ffri.hr/~mdundjerElementi%20strojeva%20II/14-ZupcaniPrijenosnici.pdf, Datum preuzimanja : 28.5.2021.

[3] J.R. Davis, J.R.: Davis & Associates; GEAR MATERIALS, PROPERTIES, AND MANUFACTURE, ASM International, 2005

[4] Jelaska, D.: Cilindrični zupčanici : uputstvo za proračun, Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje, Split, 2003.

[5] *Gear materials and heat treatments,* https://khkgears.net/new/gear_knowledge/abcs_of_gears-b/Gear_Materials_and_Heat_Treatments.html,, Datum preuzimanja: 29.5.2021.

[6] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof J.: *Svojstva i primjena materijala*; Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2011.

[7] *Gear: Definition, Advantages, Disadvantages, Types, Applications* https://clubtechnical.com/gear , Datum preuzimanja: 29.5.2021.

[8] Stupnišek, M., Cajner, F.: *Osnove toplinske obrade metala*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2001.

[9] Beskopylny, A., Meskhi, B., Onishkov, N., Korotkin, V.: *Strength Characteristics Analysis of Structurally Inhomogeneous Steel Gears*, International Scientific Siberian Transport Forum. Springer, Cham, 2019.

[10] Grilec, K., Ivušić, V.: *Tribologija*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.

[11] Sharma, S. K., Verma, D. S., Khan, L. U., Kumar, S., Khan, S. B.: *Handbook of materials characterization*. Springer International Publishing, New York, 2018

[12] HRN EN 10020:2008, Definicija i razredba vrsta čelika

PRILOZI

I. CD-R disk