Utjecaj sigma-faze na abrazijsku otpornost nehrđajućeg dupleks čeličnog lijeva

Marić, Davor

Undergraduate thesis / Završni 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:235:628012

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

ZAVRŠNI RAD

Davor Marić

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor: Student:

Prof. dr. sc. Vera Rede, dipl. ing. Davor Marić

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem se mentorici, profesorici dr. sc. Veri Rede na uloženom trudu i vremenu tijekom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem svim djelatnicima Fakulteta strojarstva i brodogradnje koji su mi pomogli u eksperimentalnom dijelu rada te roditeljima, prijateljima i ostatku obitelji na podršci tijekom studija.

Davor Marić

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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: **602 - 04 / 21 - 6 / 1**	
Ur.broj: **15 - 1703 - 21 -**	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Davor Marić** Mat. br.: 0035212279

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj sigma-faze na abrazijsku otpornost nehrđajućeg dupleks čeličnog lijeva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of sigma phase on abrazion resistance of duplex cast stainless steel**

Opis zadatka:

Mikrostruktura dupleks nehrđajućih čelika i čeličnih ljevova sastavljena je od podjednakih udjela feritne i austenitne faze. Takva izbalansirana mikrostruktura zaslužna je za optimalnu kombinaciju mehaničkih, korozijskih i ostalih svojstva. Ako se ovako izbalansirana mikrostruktura naruši i ako se osim ferita i austenita izluče i neke druge mikrostrukturne faze, to će utjecati na promjenu navedenih svojstava.
U završnom radu potrebno je ispitati kako izlučivanje sigma-faze u mikrostrukturi utječe na tvrdoću i abrazijsku otpornost nehrđajućeg dupleks čeličnog lijeva oznake GX2CrNiMoN 25-6-3. Na ispitnim uzorcima treba provesti kvalitativnu i kvantitativnu analizu mikrostrukture, a otpornost na abraziju ispitati normiranom metodom „suhi pijesak - gumeni kotač" prema normi ASTM G 65.
Na temelju dobivenih rezultata donijeti odgovarajuće zaključke.

Zadatak zadan:
30. studenoga 2020.

Zadatak zadala:
Rede
Prof. dr. sc. Vera Rede

Datum predaje rada:
1. rok: 18 veljače 2021.
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ I

POPIS SLIKA III

POPIS TABLICA V

POPIS OZNAKA VI

SAŽETAK VII

SUMMARY VIII

1. UVOD 1

2. NEHRĐAJUĆI ČELIČNI LJEVOVI 2

2.1. Korozijska postojanost nehrđajućih čeličnih ljevova 2

2.2. Utjecaj legirnih elemenata na svojstva nehrđajućih čeličnih ljevova 3

2.3. Podjela nehrđajućih čeličnih ljevova 4

3. Dupleks nehrđajući čelični ljevovi 5

3.1.1. Podjela dupleks nehrđajućih čeličnih ljevova 6

3.1.2. Proizvodnja dupleks nehrđajućih ljevova 6

3.1.3. Mikrostruktura dupleks nehrđajućih čeličnih ljevova 7

3.1.3.1. Krom 8

3.1.3.2. Nikal 8

3.1.3.3. Dušik 8

3.1.3.4. Molibden 8

3.1.3.5. Bakar, volfram i silicij 8

3.1.4. Režim hlađenja nakon primarne kristalizacije 9

3.1.4.1. Karbidi 11

3.1.4.2. Nitridi 11

3.1.4.3. Sigma-faza 11

3.1.4.4. Chi-faza (χ-faza) 12

3.1.5. Mehanička svojstva 12

4. TROŠENJE MATERIJALA 14

4.1. Abrazijsko trošenje materijala 14
4.2. Otpornost na abrazijsko trošenje dupleks čelika i ljevova 20
5. EKSPERIMENTALNI DIO 23
5.1. Cilj rada 23
5.2. Materijal za ispitivanje 23
5.3. Provođenje ispitivanja 25
5.3.1. Toplinska obrada dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva u vakuumskoj peći 25
5.3.2. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje 28
5.3.3. Mjerenje tvrdoće HV10 31
5.3.4. Analiza mikrostrukture 33
5.4. Rezultati provedenih ispitivanja 35
5.4.1. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje 35
5.4.2. Rezultati mjerenja tvrdoće 36
5.4.3. Rezultati analize mikrostrukture 37
5.5. Analiza rezultata 42
5.5.1. Utjecaj toplinske obrade na intenzitet abrazijskog trošenja 42
5.5.2. Utjecaj toplinske obrade na tvrdoću HV10 44
6. ZAKLJUČAK 45
LITERATURA 46

POPIS SLIKA

Slika 1. Kućište pumpe izliveno iz dupleks nehrđajućeg lijeva [3] 1
Slika 2. Nastajanje pasivnog filma na nehrđajućem čeličnom lijevu 2
Slika 3. Prikaz karakteristične mikostrukture za dupleks nehrđajući čelik (a) i lijev (b) [7] 5
Slika 4. Mikrostruktura dupleks čeličnog lijeva [8] 7
Slika 5. Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe [2] 9
Slika 6. Shematski prikaz djelovanja legirnih elemenata na kinetiku nastanka pojedinih faza [2] 10
Slika 7. Model nastanka i rasta sigma faze [2] 11
Slika 8. Abrazija pri dodiru dvaju tijela (a) i triju tijela (b) [13] 15
Slika 9. Mikrobrazdanje [14] 16
Slika 10. Mikrorezanje [14] 16
Slika 11. Mikornaprsnuća [14] 16
Slika 12. Mikroumor [14] 17
Slika 13. Čista abrazija [11] 17
Slika 14. Izgled trošene površine i čestica trošenja kod čiste abrazije [11] 18
Slika 15. Selektivna abrazija [11] 18
Slika 16. Izgled trošene površine i čestica trošenja kod selektivne abrazije [11] 19
Slika 17. Nulta abrazija [11] 19
Slika 18. Izgled trošene površine i čestica trošenja kod nulte abrazije [11] 20
Slika 19. Srednja vrijednost gubitka mase uzoraka prije i poslije provedene toplinske obrade na brusnom papiru P500 [8] 21
Slika 20. Srednja vrijednost gubitka mase uzoraka prije i poslije provedene toplinske obrade na brusnom papiru P220 [8] 21
Slika 21. Rezultati ispitivanja otpornosti na trošenje metodom "valjčić po disku" [16] 22
Slika 22. Odljevak nehrđajućeg dupleks čeličnog lijeva iz kojeg su izrezani uzorci 23
Slika 23. Izrezani ispitni uzorci 24
Slika 24. Vakuumska peć 25
Slika 25. Postavljanje ispitnih uzoraka u vakuumsku peć 26
Slika 26. Režim toplinske obrade uzoraka 26

Slika 27. Ispitni uzorci nakon toplinske obrade 27
Slika 28. Suhi pijesak gumeni kotač 28
Slika 29. Uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje 29
Slika 30. Detalj sa slike 29 29
Slika 31. Trag trošenja na uzorku 30
Slika 32. Vaga za mjerenje mase 30
Slika 33. Uređaj za mjerenje tvrdoće 31
Slika 34. Detalj sa slike 33 32
Slika 35. Pneumatska preša Buehler Pneumet Press [8] 33
Slika 36. Ispitni uzorci zaliveni u polimernu masu 34
Slika 37. Optički mikroskop Olympus GX51 [8] 34
Slika 38. Mikrostruktura toplinski neobrađenog lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3, snimljena pri povećanju 50× 37
Slika 39. Mikrostruktura toplinski neobrađenog lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3, snimljena pri povećanju 100× 38
Slika 40. Mikrostruktura toplinski neobrađenog lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3, snimljena pri povećanju 200× 38
Slika 41. Mikrostruktura toplinski neobrađenog lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3, snimljena pri povećanju 500× 39
Slika 42. Mikrostruktura toplinski obrađenog lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3, snimljena pri povećanju 50× 40
Slika 43. Mikrostruktura toplinski obrađenog lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3, snimljena pri povećanju 100× 40
Slika 44. Mikrostruktura toplinski obrađenog lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3, snimljena pri povećanju 200× 41
Slika 45. Mikrostruktura toplinski obrađenog lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3, snimljena pri povećanju 500× 41
Slika 46. Srednja vrijednost gubitka mase za toplinski neobrađene i toplinski obrađene uzorke 42
Slika 47. Srednje vrijednosti tvrdoće HV10 za toplinski obrađene i neobrađene uzorke 44

POPIS TABLICA

Tablica 1. Podjela dupleks nehrđajućih ljevova po sadržaju bakra, dušika i molibdena [6] 6
Tablica 2. Kemijski sastav lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3 [8].....23
Tablica 3. Varijante postupka „Suhi pijesak gumeni kotač“ 28
Tablica 4. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje toplinski neobrađenih uzoraka.....35
Tablica 5. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje toplinski obrađenih uzoraka 35
Tablica 6. Rezultati mjerenja tvrdoće toplinski neobrađenih uzoraka 36
Tablica 7. Rezultati mjerenja tvrdoće toplinski obrađenih uzoraka 36
Tablica 8. Srednje vrijednosti tvrdoće HV10 toplinski obrađenih i toplinski neobrađenih uzoraka.....36

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ASTM		American Society for Testing and Materials
F_N	N	normalna komponeneta sile
F_t	N	tangencijalna komponenta sile
H_a	HV	tvrdoća abraziva
H_1	HV	tvrdoća abradiranog materijala
H_β	HV	tvrdoća tvrđe faze abradiranog materijala
HV	HV	tvrdoća prema Vickersu
α		ferit
σ		sigma-faza
γ_2		sekundarni austenit

SAŽETAK

Osnovni cilj rada bio je istražiti utjecaj sigma-faze na abrazijsku otpornost dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva oznake GX2CrNiMoN 25-6-3. U teorijskom dijelu rada opisana su svojstva, mikrostruktura, podjela te korozijska postojanost nehrđajućih čeličnih ljevova. Detaljno su opisani dupleks nehrđajući čelični ljevovi i mehanizam abrazijskog trošenja.

U eksperimentalnom dijelu rada prikazani su rezultati mikrostrukturne analize, mjerenja tvrdoće HV10 i ispitivanja abrazijske otpornosti. Sva ispitivanja provedena su na uzorcima s osnovnom dupleks strukturom te na uzorcima kod kojih je žarenjem na 750˚C/1h u mikrostrukturi izlučena sigma-faza. Ispitivanje otpornosti na abraziju provedeno je metodom suhi pijesak gumeni kotač. Utvrđeno je da formiranje sigma-faze u mikrostrukturi dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva povećava tvrdoću, ali unatoč tome smanjuje otpornost na abrazijsko trošenje.

Ključne riječi: nehrđajući dupleks čelični lijev, sigma-faza, abrazijska otpornost

SUMMARY

The main objective of this study was to analyse the influence of sigma-phase on the abrasion resistance of duplex cast stainless steel grade GX2CrNiMoN 25-6-3. In the theoretical part of this study, characteristics, microstructure, classification and corrosion resistance of cast stainless steels were described. Duplex cast stainless steels and abrasion wear mechanisms were thoroughly described.

Results of microstructure analysis, HV10 hardness measurement and abrasive wear resistance test were shown in the experimental part of this study. All tests were carried out on both samples with regular duplex structure and on samples with sigma-phase formed in microstructure by annealing at 750°C/1h. Abrasion resistance test was carried out by dry sand/rubber wheel method. It was determined that, despite the increased hardness by formation of sigma-phase in the microstructure of duplex cast stainless steel, the abrasion resistance was reduced.

Key words: duplex cast stainless steel, sigma-phase, abrasion resistance

1. UVOD

Razvoj novih visokolegiranih čeličnih ljevova potaknut je sve strožijim zahtjevima vezanim uz mehaničku otpornost, otpornost na koroziju i otpornost na povišene i visoke temperature.
Nehrđajući čelični ljevovi predstavljaju posebnu skupinu ljevova koju odlikuje visoka otpornost na koroziju. Zbog svoje korozijske postojanosti koja je rezultat njihovog kemijskog sastava i odgovarajuće mikrostrukture te dobrih mehaničkih svojstava, često se primjenjuju u raznim granama industrije poput industrije nafte i plina te u prehrambenoj i farmaceutskoj industriji.
Jedan od uvjeta za postizanje korozijske otpornosti jest monofazna mikrostruktura čijim se postojanjem izbjegava opasnost od nastanka galvanskih članaka odnosno korozijskog trošenja materijala. Ovaj uvjet ne mora nužno biti zadovoljen. Osim nehrđajućih čeličnih ljevova koji imaju monofaznu mikrostrukturu koja može biti austenitna ili martenzitna, postoje i dupleks nehrđajući čelični ljevovi čiju mikrostrukturu čine dvije faze [1].
Dupleks nehrđajući čelični ljevovi razvijeni su s ciljem dobivanja materijala koji će imati što višu otpornost na koroziju, posebno na one oblike korozije koji nastaju u medijima koji sadrže kloride. Također trebaju imati što višu granicu razvlačenja i vlačnu čvrstoću. Naziv su dobili po mikrostrukturi sastavljenoj od približno 50 % ferita i 50 % austenita. Zbog visokog udjela kroma i molibdena otporni su na lokalnu koroziju. U primjeni, gdje se zahtijeva visoka otpornost na napetosnu i rupičastu koroziju te u medijima koji sadrže kloride, imaju bolju korozijsku postojanost od austenitnih nehrđajućih ljevova [2].
Otpornost na trošenje jedno je od važnijih svojstava dupleks nehrđajućih čeličnih ljevova. U eksploataciji, često su izloženi raznim mehanizmima trošenja od kojih je najčešće abrazijsko trošenje. Upravo zbog toga potrebno je poznavati utjecaj određenih mikrostrukturnih promjena na otpornost na trošenje. Na slici 1. prikazano je kućište pumpe izliveno iz dupleks čeličnog lijeva koje je u primjeni opterećeno korozijski, tribološki i mehanički.



Slika 1. Kućište pumpe izliveno iz dupleks nehrđajućeg lijeva [3]

2. NEHRĐAJUĆI ČELIČNI LJEVOVI

Nehrđajući čelični ljevovi pripadaju skupini visokolegiranih FeC-legura koje su otporne na kemijsku i elektrokemijsku koroziju.

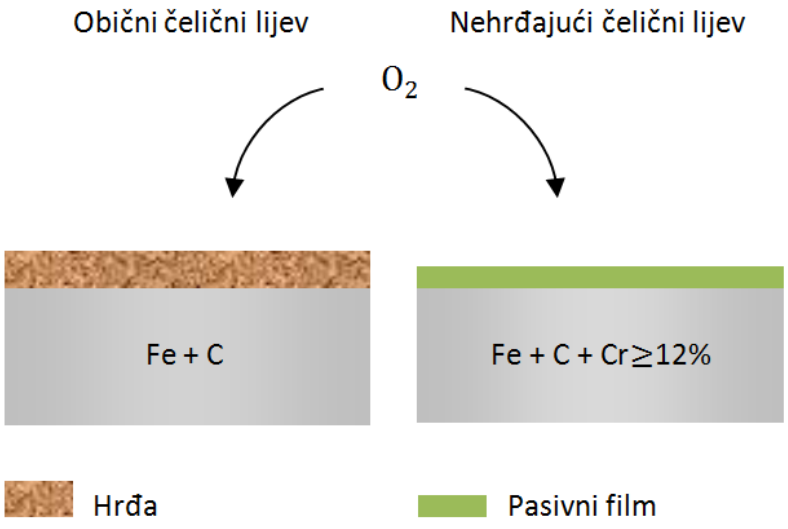
2.1. Korozijska postojanost nehrđajućih čeličnih ljevova

Korozijska postojanost definira se kao sposobnost materijala da se suprotstavi korozijskoj agresiji medija odnosno okoline, većim ili manjim usporenjem njegova djelovanja.

Kako bi čelici odnosno čelični ljevovi bili korozijski postojani, moraju biti ispunjeni određeni uvjeti.

Prvi uvjet korozijske postojanosti odnosi se na maseni udio kroma u sastavu materijala koji mora iznositi najmanje 12 %. Pri tome je bitno naglasiti da krom u potpunosti mora biti otopljen u kristalu mješancu. Krom s kisikom iz zraka reagira brže od željeza te na površini lijeva formira stabilni oksidni sloj.

Na slici 2 prikazana je reakcija kisika na površini običnog i nehrđajućeg čeličnog lijeva, odnosno stvaranje pasivnog filma ili hrđe ovisno o sastavu lijeva. Oksidni sloj koji nastaje na površini nehrđajućeg čeličnog lijeva poznat je pod nazivom pasivni film, izrazito je tanak (1 do 5 nm) te jako dobro prijanja uz površinu lijeva.



Slika 2. Nastajanje pasivnog filma na nehrđajućem čeličnom lijevu

Drugi uvjet korozijske postojanosti odnosi se na monofaznost mikrostrukture. Ako je u materijalu prisutna samo jedna faza, izbjegnuta je opasnost od nastanka galvanskih članaka odnosno korozijskog trošenja materijala. Ovaj uvjet ne mora nužno biti zadovoljen, pa tako osim nehrđajućih čeličnih ljevova koji imaju monofaznu mikrostrukturu postoje i nehrđajući čelični ljevovi čiju mikrostrukturu čine dvije faze [1].

2.2. Utjecaj legirnih elemenata na svojstva nehrđajućih čeličnih ljevova

Legirni elementi i njihov udio u sastavu utječu na mikrostrukturu, mehanička svojstva te korozijsku postojanost nehrđajućih čeličnih ljevova. Osim već spomenutog kroma, korozijska postojanost može se poboljšati dodavanjem nikla i molibdena. Krom, nikal i molibden predstavljaju osnovne legirne elemente kod većine nehrđajućih ljevova [1].

Općenito se svi legirni elementi mogu podijeliti u dvije skupine:

1. gamageni legirni elementi
2. alfageni legirni elementi

Gamageni legirni elementi stabiliziraju austenit, dok alfageni legirni elementi promiču odnosno stabiliziraju ferit [1].

Krom je alfageni element koji zajedno s kisikom iz zraka na površini materijala formira stabilni oksidni sloj koji sprječava daljnju oksidaciju i koroziju u normalnim uvjetima. Debljina oksidnog sloja iznosi svega 1 do 5 nm te dobro prijanja uz površinu lijeva. Dodavanjem kroma može se također poboljšati i otpornost na puzanje, a u nekim ljevovima legiranje kromom smanjuje opasnost od pougljičavanja [1].

Nikal je gamageni legirni element koji u čeličnim ljevovima promiče austenitnu mikrostrukturu. On poboljšava žilavost, duktilnost i zavarljivost. Njegovim dodavanjem također se poboljšava i otpornost na oksidaciju, pougljičavanje i difuziju dušika. Nikal povisuje korozijsku postojanost u jakim, osobito reducirajućim kiselinama te otpornost na umor na povišenoj temperaturi [1].

Dodatkom molibdena raste otpornost na rupičastu koroziju i koroziju u procjepu u kloridnom okruženju, povećava se otpornost na sumpornu, klornu i fosfornu kiselinu. Također se poboljšavaju mehanička svojstva austenitnih i martenzitnih nehrđajućih ljevova na povišenoj temperaturi [1].

Dušik je uglavnom prisutan kao nečistoća, ali se ponekad kontrolirano dodaje kao gamageni legirni element. On poboljšava otpornost na rupičastu koroziju te odgađa formiranje sigma-faze [1].

Osim legiranja na formiranje mikrostrukture utječu i parametri toplinske obrade poput temperature žarenja i brzine hlađenja.

2.3. Podjela nehrđajućih čeličnih ljevova

Svi nehrđajući čelični ljevovi mogu se svrstati prema dva kriterija:

- prema temperaturi primjene
- prema mikrostrukturi.

Prema temperaturi primjene svi nehrđajući čelični ljevovi dijele se na ljevove za rad do 650 °C i ljevove za rad na temperaturi iznad 650 °C. Nehrđajući čelični ljevovi za primjenu do 650 °C imaju niži sadržaj ugljika (0,02 do 0,03 %) i bolju korozijsku postojanost. Ljevovi za primjenu iznad 650 °C imaju viši sadržaj ugljika te bolju otpornost na puzanje pri povišenim temperaturama, ali zbog višeg sadržaja ugljika imaju nešto lošiju korozijsku postojanost.

Prema mikrostrukturi nehrđajući čelični ljevovi dijele se na:

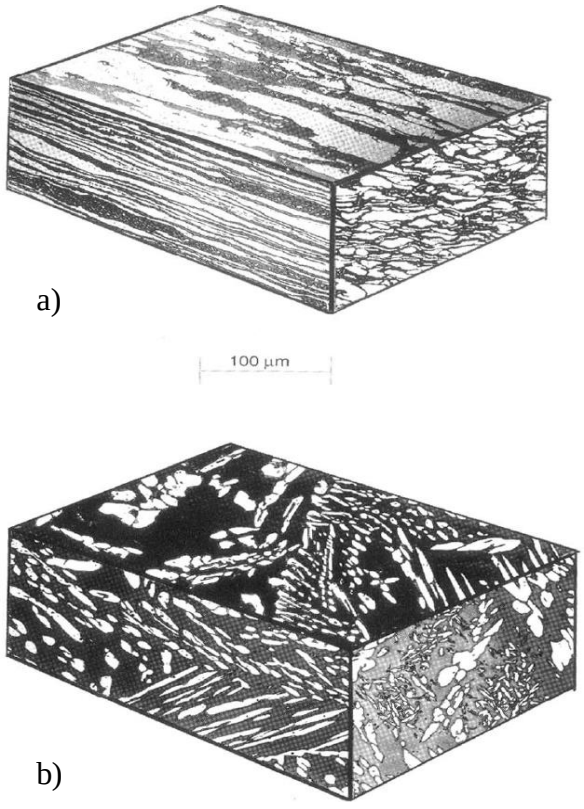
- austenitne
- martenzitne
- dupleks ljevove [1][4].

3. Dupleks nehrđajući čelični ljevovi

Za razliku od ostalih nehrđajućih čeličnih ljevova, dupleks nehrđajući čelični ljevovi nemaju monofaznu mikrostrukturu. Njihova mikrostruktura, po kojoj su i dobili ime, sastavljena je od ferita i austenita. Omjer ferita i austenita ovisi o sastavu i toplinskoj obradi, ali najčešće iznosi 50:50. Zahvaljujući takvoj strukturi dupleks nehrđajući ljevovi imaju bolja određena mehanička svojstva i bolju otpornost prema koroziji od nehrđajućih austenitnih čeličnih ljevova u određenim medijima.

Korozijska postojanost dupleks nehrđajućih čeličnih ljevova podjednaka je korozijskoj postojanosti dupleks nehrđajućih čelika ako u sastavu i mikrostrukturi lijeva nema mikrosegregacija, nečistoća i nehomogenosti. Postupci toplinske obrade i zavarivanje mogu također negativno utjecati na korozijsku postojanost [5].

Na slici 3 prikazana je razlika u izgledu mikrostrukture dupleks nehrđajućeg čelika i dupleks nehrđajućeg lijeva.



Slika 3. Prikaz karakteristične mikostrukture za dupleks nehrđajući čelik (a) i lijev (b) [7]

Dupleks nehrđajući čelični ljevovi predstavljalju najmlađu skupinu nehrđajućih čeličnih ljevova. Jedan od razloga njihovog razvoja bila je nedovoljna otpornost monofaznih nehrđajućih austenitnih čeličnih ljevova na djelovanje morske vode te jako oksidirajućih kiselina. U početnom razdoblju njihovog razvoja manje su se primjenjivali zbog problema sa krhkošću i zavarljivošću. Problemi su uspješno riješeni kontroliranim legiranjem dušikom te danas dupleks ljevovi imaju najveći trend rasta u proizvodnji među nehrđajućim čeličnim ljevovima [2].

3.1.1. Podjela dupleks nehrđajućih čeličnih ljevova

Prema sadržaju bakra, dušika i molibdena, dupleks nehrđajuće čelične ljevove možemo svrstati u pet glavnih grupa prikazanih u tablici 1.

Tablica 1. Podjela dupleks nehrđajućih ljevova po sadržaju bakra, dušika i molibdena [6]

Grupa	%C	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%N
bez Cu i N	<0,07	24-26	5-8	2-3	-	-
bez Cu, s N	<0,04	22-25	6-7	2,5-3	-	0,15-0,25
bez N, s Cu	<0,07	25-26	5-6	2-3	2-3	-
s Cu i N	<0,04	21-27	5-8,5	2-3,5	1-3	0,1-0,25
povišen Mo	<0,04	24-25	5,5-7	4,5-5,5	<2,5	0,15-0,25

3.1.2. Proizvodnja dupleks nehrđajućih ljevova

Tijekom proizvodnje dupleks nehrđajućih čeličnih ljevova važno je obratiti pozornost na procese taljenja, lijevanja, ohlađivanja i toplinske obrade jer oni utječu na konačna svojstva odljevaka. Također je važno da sama taljevina ima visok stupanj čistoće te je poželjno što manje rasipanje vrijednosti udjela legirnih elemenata [6].

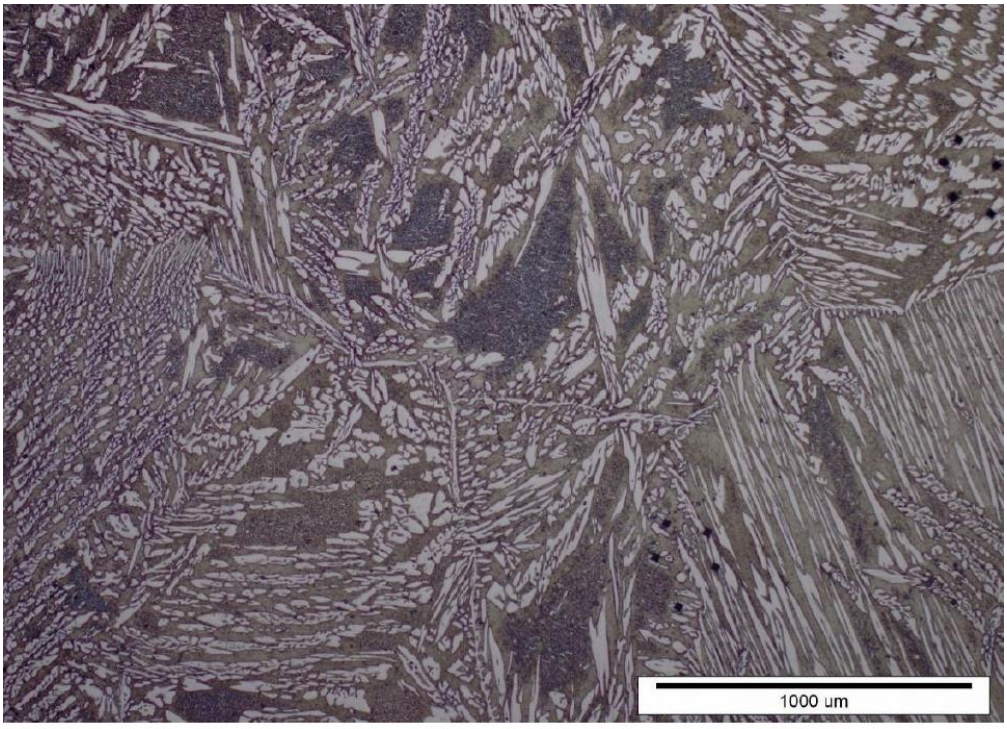
Kako bi se spriječilo izlučivanje nepoželjnih faza, a posebno to vrijedi za debelostjene odljevke, potrebno je nakon rastvornog žarenja hladiti dovoljno brzo. Tijekom toplinske obrade cilj je istovremeno zadržati željeni omjer ferita i austenita te izbjeći stvaranje toplinski induciranih pukotina. Ukoliko se lijev naglo hladi s previsoke temperature dolazi do smanjenog udjela kroma u krutoj otopini te zbog toga može doći do stvaranja kromovog nitrida po granicama zrna. Formiranje kromovih nitrida može dovesti do pojave selektivne

korozije. Kako bi se izbjegla ova pojava potrebno je ohlađivanje provesti postupno, držanjem na temperaturi koja leži neposredno iznad temperature početka izlučivanja sigma-faze [6].

3.1.3. Mikrostruktura dupleks nehrđajućih čeličnih ljevova

Na sobnoj temperaturi, mikrostruktura dupleks nehrđajućih čeličnih ljevova sastoji se od ferita i austenita u podjednakim volumnim udjelima, čiji najpovoljniji i najčešći omjer iznosi 50:50 [2].

Na slici 4 prikazan je izgled mikrostrukture dupleks čeličnog lijeva. Svijetla faza na slici predstavlja austenit, a tamna faza predstavlja ferit.



Slika 4. Mikrostruktura dupleks čeličnog lijeva [8]

Osim kroma i nikla, koji su osnovni legirni elementi u dupleks nehrđajućim čeličnim ljevovima, u formiranju mikrostrukture vrlo važnu ulogu imaju i molibden, dušik, bakar, mangan, silicij te volfram. Kod ove vrste nehrđajućih ljevova najvažnije je postići izbalansiran odnos ferita i austenita. U cilju postizanja tog odnosa, a i zbog same složenosti međusobnog utjecaja legirnih elemenata, mora se paziti na količinu svakog elementa [2].

3.1.3.1. Krom

Krom je alfageni legirni element čiji sadržaj u dupleks nehrđajućim čeličnim ljevovima iznosi između 21 i 33 %. Za stvaranje pasivnog oksidnog filma na površini potrebno je minimalno 12% kroma u sastavu lijeva. Ovaj pasivni film sprječava atmosfersku koroziju. Povećanjem udjela kroma raste i otpornost na koroziju. Krom također povisuje otpornost prema oksidaciji na povišenim temperaturama, ali s povećanjem sadržaja kroma povećava se i sklonost nastajanju štetnih intermetalnih faza [2].

3.1.3.2. Nikal

Sadržaj nikla u dupleks čeličnim ljevovima iznosi između 4 i 9 %. Nikal je gamageni legirni element koji promiče austenitnu mikrostrukturu koja je zaslužna za dobru žilavost dupleks ljevova. Njegovim dodavanjem smanjuje se opasnost od izlučivanja nepoželjnih intermetalnih faza [2].

3.1.3.3. Dušik

Dušik je jaki gamageni element koji zajedno s niklom osigurava dovoljnu količinu austenita u strukturi dupleks čelika odnosno dupleks nehrđajućih čeličnih ljevova. Dušik sprječava nastanak nepoželjne sigma-faze kod dupleks ljevova koji imaju visok sadržaj kroma i molibdena. Dušik značajno povisuje čvrstoću te otpornost na rupičastu koroziju i koroziju u procijepu. Također sprječava formiranje intermetalnih faza pri povišenim temperaturama [2].

3.1.3.4. Molibden

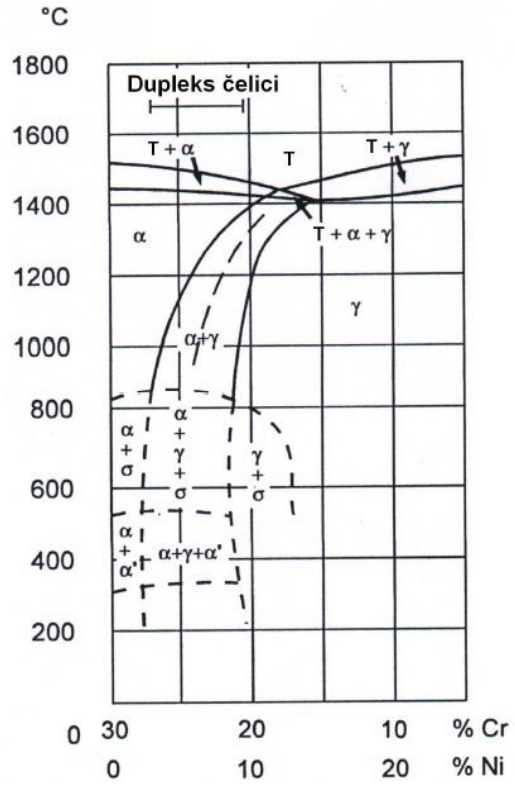
Molibden je alfageni legirni element čiji sadržaj u dupleks nehrđajućim čeličnim ljevovima iznosi do 4%. Molibden zajedno s kromom poboljšava otpornost na koroziju u kloridnim medijima. Povećanjem njegovog sadržaja raste opasnost od izlučivanja nepoželjnih intermetalnih faza [2].

3.1.3.5. Bakar, volfram i silicij

Bakar kao gamageni te volfram i silicij kao alfageni legirni elementi dodaju se zbog poboljšanja otpornosti na rupičastu koroziju te koroziju u procijepu [2].

3.1.4. Režim hlađenja nakon primarne kristalizacije

Kako bi se mogla formirati izbalansirana dupleks mikrostruktura iznimno je bitan režim hlađenja nakon primarne kristalizacije. Kao što je vidljivo na slici 5, svi dupleks čelici odnosno dupleks ljevovi primarno kristaliziraju kao 100 %-tni ferit. Daljnjim hlađenjem formira se austenitna faza, najprije po granicama, a zatim i unutar feritnog zrna. Tijekom procesa pretvorbe ferita u austenit dolazi do difundiranja gamagenih legirnih elemenata poput ugljika, nikla, dušika i bakra u austenit. Istovremeno dolazi do otapanja alfagenih legirnih elemenata u feritu [2].



Slika 5. Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe [2]

Faktori koji utječu na količinu austenita u mikrostrukturi su:

-brzina ohlađivanja ferita

-vrsta i udio legirnih elemenata

-brzina difuzije pojedinog legirnog elementa.

Kako bi se postigla optimalna fazna ravnoteža mora se osigurati da volumni udjeli ferita i austenita budu podjednaki. Zbog toga se brzina ohlađivanja podešava tako da u temperaturnom intervalu između 1050 i 1150 °C u mikrostrukturi ima 50 % ferita i 50 %

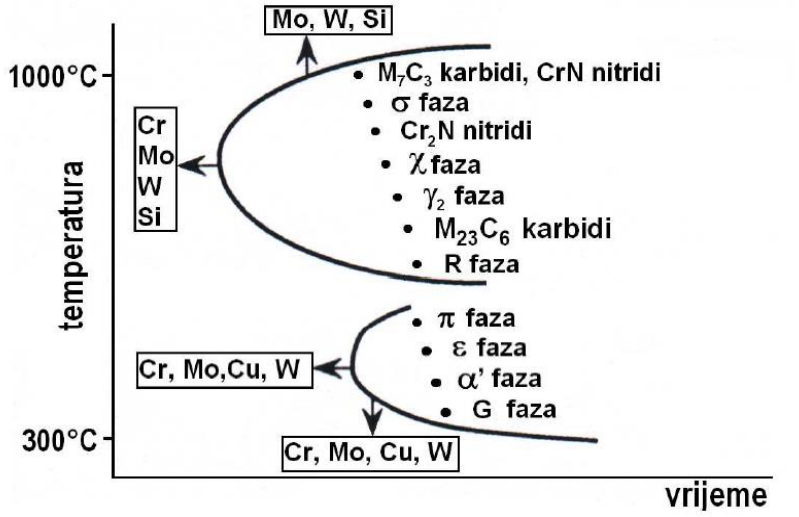
austenita. Hlađenje se dalje nastavlja gašenjem u vodi. Time se osigurava zadržavanje postignutog faznog omjera i na sobnoj temperaturi [2].

Gašenje također sprječava nastanak nepoželjnih mikrostrukturnih faza koje se mogu formirati pri sporom hlađenju na temperaturama ispod 1000 °C. Njihova vrsta i količina ovise o brzini hlađenja te temperaturi. Izlučivanje štetnih mikrostrukturnih faza ima za posljedicu snižavanje korozijske postojanosti i mehaničkih svojstava materijala [2].

Zbog visokog udjela kroma i molibdena te povećane difuzije u feritnoj fazi, dupleks nehrđajući čelični ljevovi skloniji su stvaranju nepoželjnih precipitata u usporedbi s austenitnim nehrđajućim čeličnim ljevovima. Nepoželjne strukturne izlučevine odnosno precipitati mogu se, ovisno o temperaturi na kojoj nastaju, svrstati u dva temperaturna područja:

- područje između 300 °C i 550 °C gdje se mogu izlučiti π-faza, bakrom bogate ε-faza, G-faza te α'-faza
- područje između 600 °C i 1300 °C gdje mogu nastati karbidi (M23C6, M7C3), nitridi (CrN, Cr2N), sigma-faza (σ), Chi-faza (χ), Lavesova faza (η), R-faza (Fe2Mo) te sekundarni austenit(γ_2) [2].

Na slici 6 prikazano je kako pojedini legirni elementi djeluju na kinetiku nastanka navedenih faza.



Slika 6. Shematski prikaz djelovanja legirnih elemenata na kinetiku nastanka pojedinih faza [2]

3.1.4.1. Karbidi

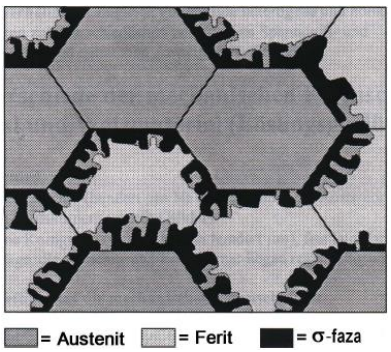
Karbidi mogu nastati sporim ohlađivanjem ili zadržavanjem lijeva na temperaturi između 820 i 480 °C. Budući da noviji dupleks čelici i dupleks čelični ljevovi imaju snižen udio ugljika, sklonost izlučivanja karbida i pojava senzibilizacije je smanjena. Karbidi koji mogu biti izlučeni jesu karbidi tipa $M_{23}C_6$, M_7C_3, M_6C, i M_3C kao i monokarbidi tipa MC te karbonitridi tipa M(C,N). Za kemijsku postojanost lijeva navažniji je karbid tipa $M_{23}C_6$ koji nastaje na granici između feritnog i austenitnog zrna. Ukoliko na faznoj granici dođe do nastanka kromom bogatih karbida, u području oko granice zrna smanjuje se udio kroma. Smanjenje udjela kroma intenzivnije je u feritu nego u austenitu zbog toga što je difuzija kroma u feritu oko 100 puta brža nego u austenitu [2].

3.1.4.2. Nitridi

Kromov nitrid tipa Cr_2N nastaje zbog prezasićenja feritne faze dušikom. On dovodi do smanjenja žilavosti i otpornosti na rupičastu koroziju. Kromov nitrid izlučuje se u krupnim feritnim zrnima tijekom naglog hlađenja s temperature od oko 1200 °C [2].

3.1.4.3. Sigma-faza

Sigma-faza je intermetalna faza koja nastaje duljim zadržavanjem dupleks čeličnih ljevova na temperaturi između 560 i 980 ºC, pri čemu se najbrže izlučivanje odvija između 800–850 °C. Sadrži puno kroma, tvrda je, krhka i nemagnetična. Ukoliko je povišen sadržaj kroma i molibdena, bit će povećana i mogućnost stvaranja sigma-faze. Pri tome, molibden ima 4 do 5 puta veći utjecaj od kroma. Osim kroma i molibdena i ostali alfageni elementi također pospješuju nastajanje sigma-faze. Ona nastaje eutektoidnom pretvorbom ferita, pri čemu ferit prekristalizira u sigma-fazu i sekundarni austenit ($\alpha \rightarrow \sigma + \gamma_2$) [2].
Model nastanka i rasta sigma-faze prikazan je na slici 7.



Slika 7. Model nastanka i rasta sigma faze [2]

Sigma-faza najprije se formira na granicama faza ferita i austenita. Gamageni legirni elementi poput nikla i dušika nemaju utjecaj na formiranje sigma-faze. S druge strane, alfageni legirni elementi kao što su krom i molibden, promiču stvaranje sigma-faze. Iz tog razloga ona nastavlja daljnje širenje i taloženje u feritu [9].

Njenim stvaranjem u krutoj otopini se smanjuje udio kroma što rezultira smanjenom otpornošću na koroziju, posebice na jamičastu. Sigma-faza ne utječe štetno samo na korozijsku otpornost već i na mehanička svojstva. Čak i vrlo male količine sigma-faze značajno smanjuju udarni rad loma i istezljivost. S druge strane sigma-faza povećava tvrdoću, što bi za posljedicu trebalo imati i povećanje otpornosti na trošenje [2].
Može se eliminirati kratkotrajnim žarenjem iznad 800 °C [10].

3.1.4.4. Chi-faza (χ-faza)

Ukoliko u dupleks lijevu ima dovoljno molibdena, može se formirati i krhka, intermetalna chi-faza. Ona nastaje na temperaturi između 730 i 1010 °C. Formira se brže od sigma-faze te predstavlja nukleus nastanka sigma-faze. Do potpune pretvorbe chi-faze u sigma-fazu doći će duljim zadržavanjem na povišenim temperaturama. Ako u dupleks lijevu nije prisutan volfram, sastav chi-faze najčešće je 20 do 28 % Cr, 3 do 5,5 % Ni i 9 do 22 % Mo. Ukoliko dupleks lijev sadrži volfram, chi-faza će osim kroma i nikla sadržavati i 4 do 17 % Mo te 3 do 16 % W. I ova faza negativno djeluje na žilavost [2].

3.1.5. Mehanička svojstva

Dupleks nehrđajući čelični ljevovi imaju relativno visoku čvrstoću, ali i dobru istezljivost te žilavost. Pokazuju bolju otpornost koroziji i imaju bolja mehanička svojstva od nehrđajućih austenitnih čeličnih ljevova. Tako primjerice granica razvlačenja kod austenitnih nehrđajućih ljevova iznosi oko 190 N/mm^2 što je duplo manje u odnosu na dupleks nehrđajuće čelične ljevove kod kojih ona iznosi od 420 do 480 N/mm^2. Tvrdoća dupleks nehrđajućih čeličnih ljevova uglavnom se kreće od 250 do 350 HV, ali može biti i povišena uslijed toplinske obrade i izlučenih (nepoželjnih) faza. Zbog mogućih segregacija pri lijevanju ili pri zavarivanju, pokazuju nešto nižu korozijsku otpornost u usporedbi s dupleks čelicima. S druge strane, pokazuju bolju otpornost na trošenje u usporedbi dupleks čelicima.

Dupleks nehrđajući čelični ljevovi uglavnom se primjenjuju na temperaturi između –50 °C i +350 °C. Kako bi se izbjegla opasnost od pojave krhkosti, gornja granica temperature primjene ne smije se prekoračiti kroz dulje vrijeme [6].

4. TROŠENJE MATERIJALA

Trošenje materijala definira se kao proces u kojem dolazi do postupnog gubitka materijala s površine krutog tijela prilikom dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama [11].

Jedna od posljedica trošenja materijala može biti odstranjenje materijala s jedne ili obje strane dviju površina koje su u dinamičkom dodiru. Ono se također može očitovati u vidu oštećenja površine gdje dolazi do premještanja materijala s jedne na drugu dodirnu površinu [12].

Razlikuju se četiri osnovna mehanizma trošenja:

- abrazija
- adhezija
- tribokorozija
- umor površine.

U najvećem broju realnih slučajeva mehanizmi trošenja se ne pojavljuju pojedinačno već se svaki realni proces trošenja sastoji od više mehanizama trošenja. Oni mogu djelovati istovremeno ili u vremenskom slijedu. Svaki od navedenih mehanizama trošenja može se opisati jediničnim događajima. Oni predstavljaju procese koji dovode do gubitka jedinične čestice s trošene površine [11].

4.1. Abrazijsko trošenje materijala

Abrazijsko trošenje materijala jedan je od mehanizama trošenja pri kojem dolazi do istiskivanja materijala. Ono je uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama hrapave površine koje klize po mekšoj površini te ju oštećuju.

Kod abrazijskog trošenja jedinični događaj se odvija u dvije faze:

- u prvoj fazi dolazi do prodiranja abraziva u površinu mekšeg materijala pod utjecajem normalne komponente opterećenja F_N
- u drugoj fazi dolazi do istiskivanja materijala u obliku čestica trošenja pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja F_t. [11]

Mehanizam abrazije moguće je analizirati na nekoliko načina:

- s obzirom na strukturu tribosustava u kojem se abrazija odvija
- s obzirom na međusobno djelovanju abrazijskih čestica i trošene površine
- s obzirom na međusobni odnos tvrdoće abraziva i materijala

S obzirom na strukturu tribosustava u kome se zbiva abrazija, moguća su dva pojavna oblika abrazije:

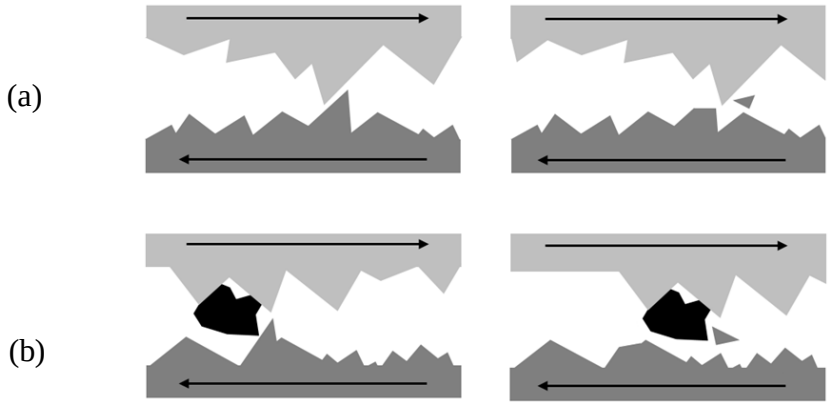
a) **Abrazija pri dodiru dvaju tijela**

Predstavlja oblik abrazije u kojem se tribosustav sastoji od dva funkcionalna dijela odnosno od abrazivnog tijela i abrazijskog protutijela.

b) **Abrazija pri dodiru triju tijela**

Predstavlja oblik abrazije u kojem se tribosustav sastoji od dvaju funkcionalnih dijelova i međutijela koje se slobodno giba između njih [11].

Na slici 8a prikazana je abrazija pri dodiru dvaju tijela, a abrazija pri dodiru triju tijela prikazana je na slici 8b.

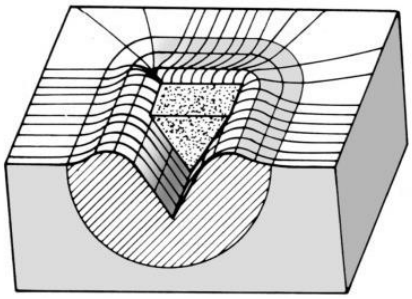


Slika 8. Abrazija pri dodiru dvaju tijela (a) i triju tijela (b) [13]

S obzirom na međusobno djelovanje abrazijskih čestica i trošene površine mogu nastati četiri vrste odnošenja materijala:

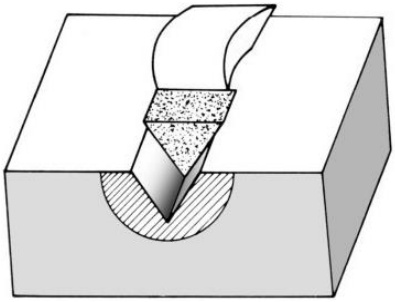
- mikrobrazdanje
- mikrorezanje
- mikronaprsnuće
- mikroumor.

Mikrobrazdanje je odnošenje materijala koje nastaje plastičnom deformacijom pri prolazu jedne abrazijske čestice. Proporcionalno je volumenu brazde uz uvjet da se rubovi brazde odvoje od površine u obliku produkata trošenja [11]. Shematski prikaz mikrobrazdanja vidi se na slici 9.



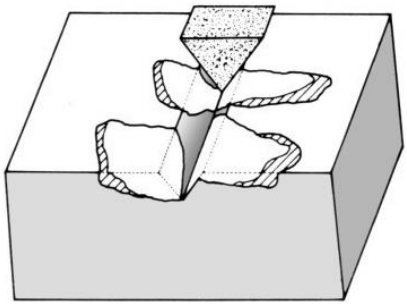
Slika 9. Mikrobrazdanje [14]

Mikrorezanje je odnošenje materijala koje je jednako volumenu zareza koji nastaje prolaskom abrazivne čestice kroz materijal na površini [11]. Odnošenje materijala mikrorezanjem prikazano je na slici 10.



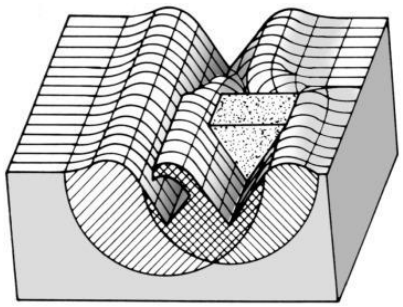
Slika 10. Mikrorezanje [14]

Mikronaprsnuća predstavljaju odnošenje većih čestica materijala s krhke površine mehanizmom nastanka i širenja mikropukotina [11]. Shematski prikaz mikronaprsnuća vidi se na slici 11.



Slika 11. Mikornaprsnuća [14]

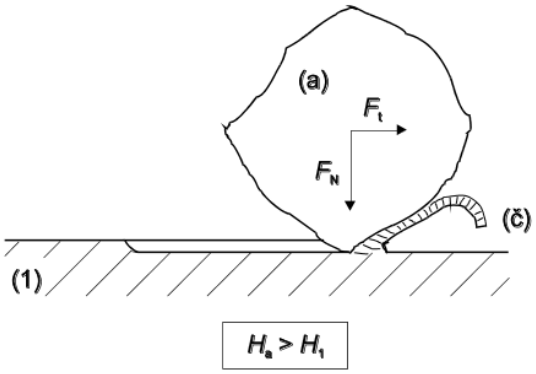
Mikroumor može nastati kao posljedica višestrukog učestalog mehanizma mikrobrazdanja, ali uglavnom nastaje zbog učestalog izmjeničnog opterećenja. Mikropukotine koje su nastale zbog trenutnih deformacija kojima je materijal izložen šire se i na kraju dovode do odnošenja materijala s površine. Na slici 12 vidi se shematski prikaz mikroumora.



Slika 12. Mikroumor [14]

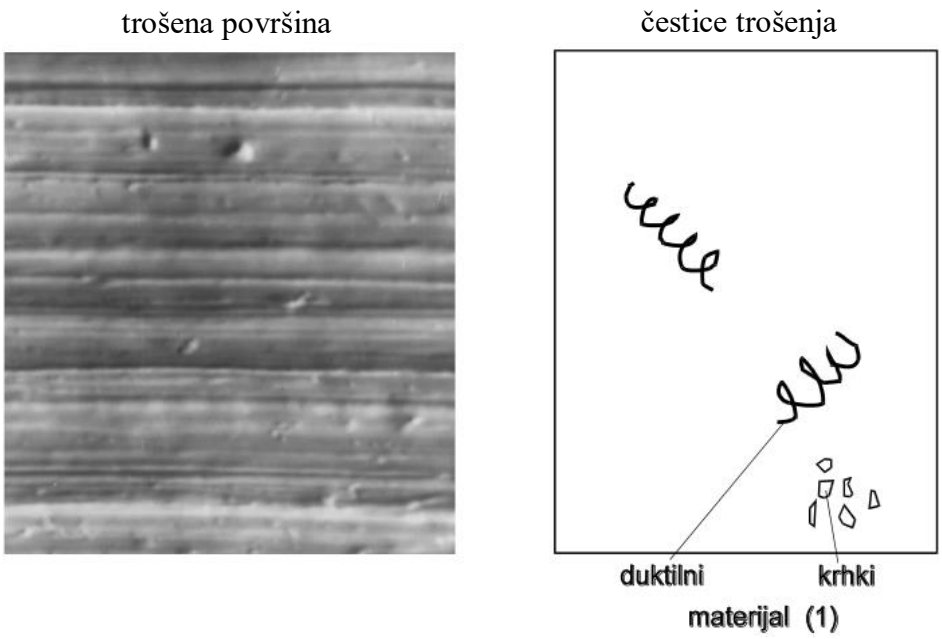
S obzirom na međusobni odnos tvrdoće abraziva i materijala abrazija može biti čista, selektivna i nulta.

Čista abrazija nastaje u slučaju kada je tvrdoća abraziva H_a veća od tvrdoće trošene površine H_1, slika 13.



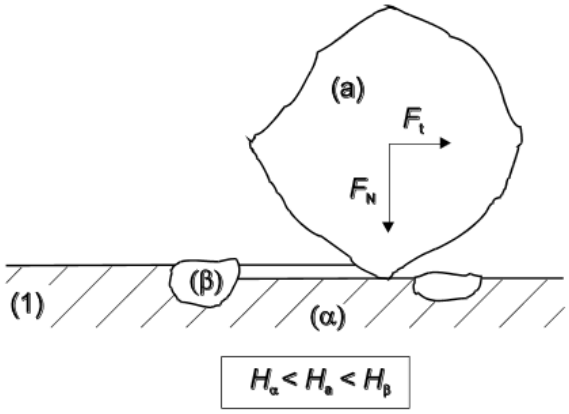
Slika 13. Čista abrazija [11]

Trošena površina će biti izbrazdana, a oblik čestica trošenja ovisit će o materijalu koji se troši. Kada je trošeni materijal krhak, čestice trošenja imat će oblik lomljenje strugotine, dok za duktilne abradirane materijale čestice trošenja imaju oblik spiralne strugotine. Izgled trošene površine materijala i čestica trošenja kod čiste abrazije prikazan je na slici 14.



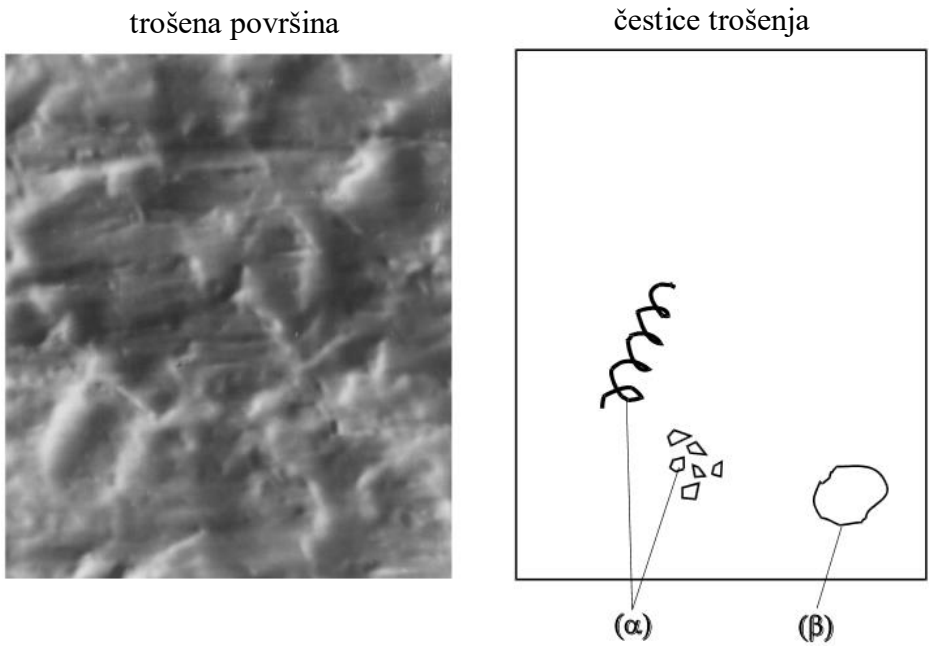
Slika 14. Izgled trošene površine i čestica trošenja kod čiste abrazije [11]

Selektivna abrazija nastupa u slučaju da u abradiranom materijalu postoji β-faza čija je tvrdoća H_β veća od tvrdoće samog abraziva H_a. Selektivna abrazija prikazana je na slici 15.



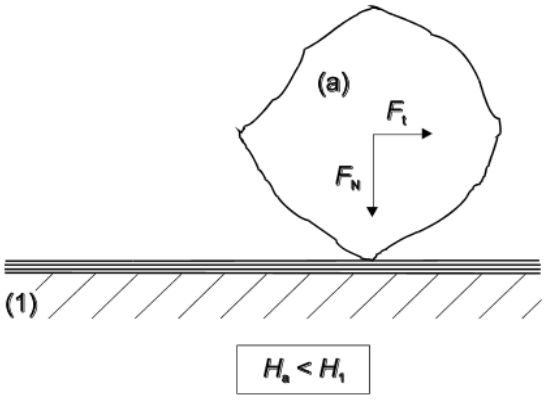
Slika 15. Selektivna abrazija [11]

Površina abradiranog materijala neće biti izbrazdana u području β-faze već samo na dijelovima materijala koji su mekši od abraziva. Čestice trošenja uglavnom potječu od mekše faze te mogu biti u obliku lomljene i spiralne strugotine, ali ponekad mogu biti i od tvrđe faze. Izgled trošene površine i čestica trošenja uslijed selektivne abrazije prikazan je na slici 16.



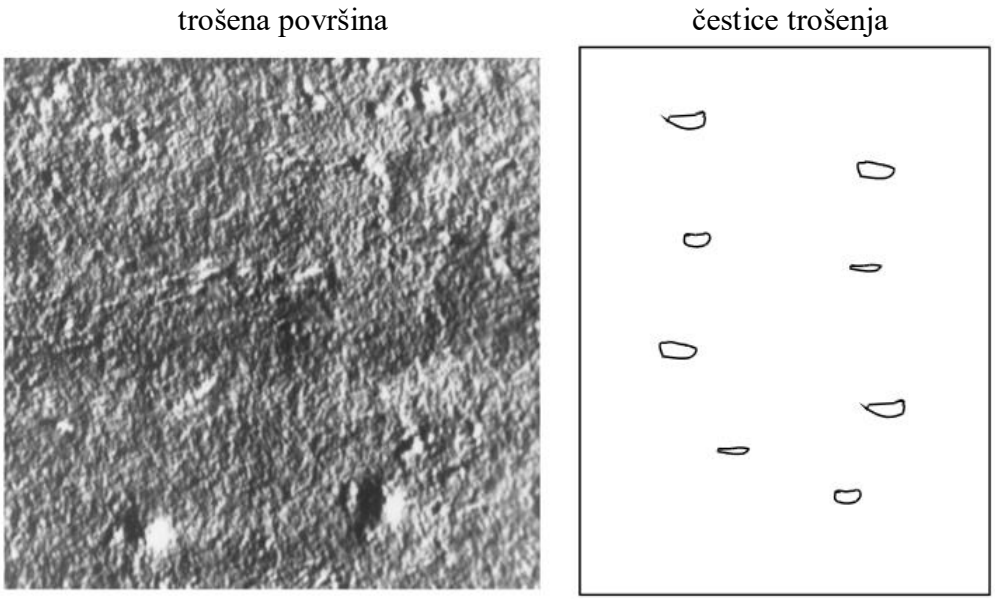
Slika 16. Izgled trošene površine i čestica trošenja kod selektivne abrazije [11]

Nulta abrazija nastaje kada cijela površina materijala koji se troši ima veću tvrdoću od abraziva, slika 17.



Slika 17. Nulta abrazija [11]

Abradirana površina ima polirani izgled, a čestice trošenja iz vanjskog graničnog sloja imaju oblik sitnih ljuskica. Nulta abrazija najčešće se javlja na površinski modificiranim slojevima, primjerice posupkom boriranja ili vanadiranja. Izgled trošene površine i čestica trošenja kod nulte abrazije prikazan je na slici 18.

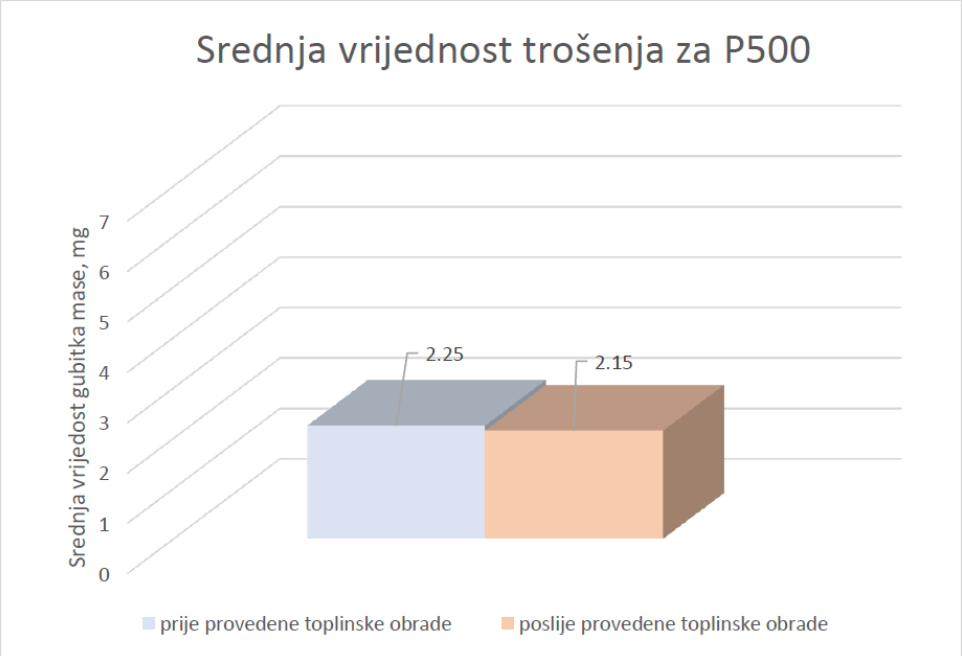


Slika 18. Izgled trošene površine i čestica trošenja kod nulte abrazije [11]

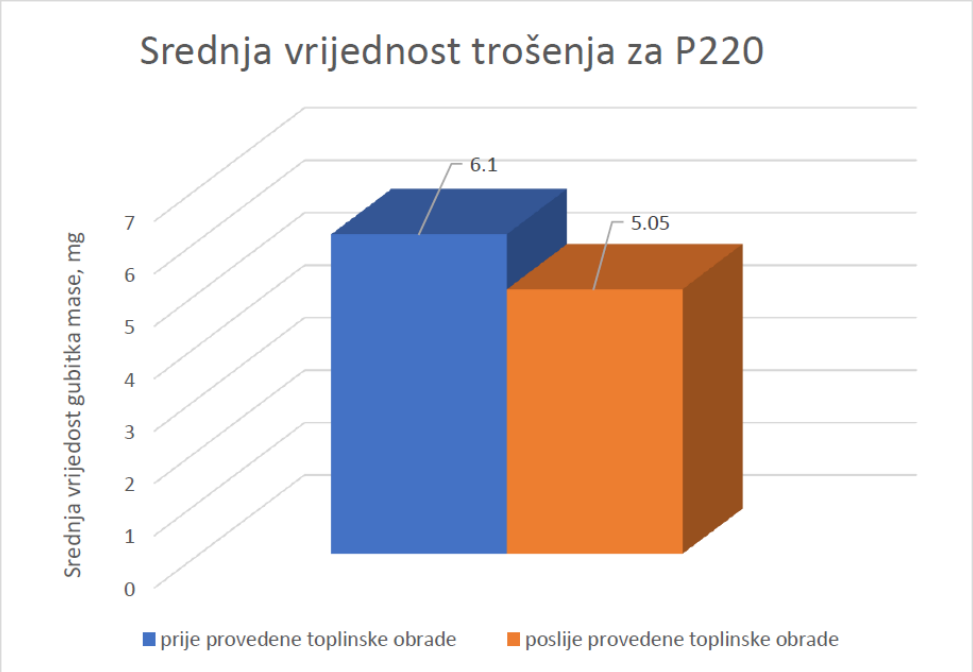
4.2. Otpornost na abrazijsko trošenje dupleks čelika i ljevova

Dupleks nehrđajući ljevovi imaju znatno bolju otpornost na trošenje u usporedbi s dupleks nehrđajućim čelicima. Jedna od najčešćih primjena dupleks čeličnih ljevova je u industriji nafte. Sirova nafta koja se tijekom izvlačenja i transporta provodi cjevovodima, u sebi sadrži sitne abrazivne čestice različitog sastava. Te čestice mogu oštetiti površinski pasivni sloj što dovodi do slabljenja antikorozivnih svojstava, a isto tako mogu uzrokovati i tribološka oštećenja.

U sklopu završnog rada I. Halužana ispitivan je utjecaj formiranja sigma-faze na abrazijsko trošenje nehrđajućeg dupleks čeličnog lijeva oznake GX2CrNiMoN 25-6-3. [8] Ispitivanje je provedeno na uređaju Taber abrader na različitim kvalitetama brusnih papira. Utvrđeno je da se formiranjem sigma-faze smanjuje intenzitet abrazijskog trošenja te da je razlika u srednjoj vrijednosti gubitka mase između toplinski obrađenih i toplinski neobrađenih uzoraka izraženija kod brusnog papira s većim abrazivnim zrnom. Na slikama 19 i 20 prikazani su rezultati ispitivanja otpornosti na abraziju za određene kvalitete brusnog papira.



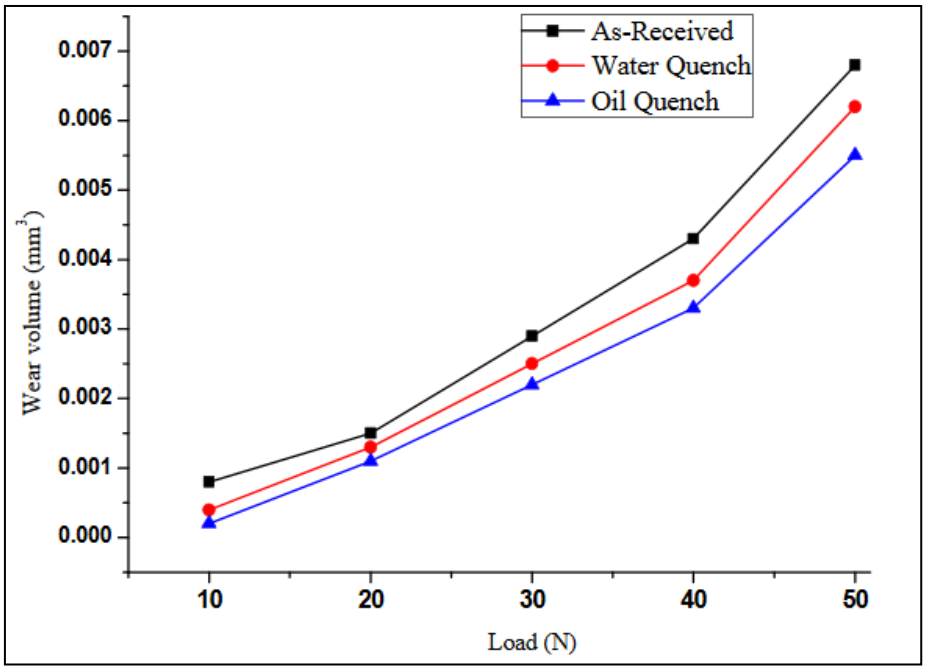
Slika 19. Srednja vrijednost gubitka mase uzoraka prije i poslije provedene toplinske obrade na brusnom papiru P500 [8]



Slika 20. Srednja vrijednost gubitka mase uzoraka prije i poslije provedene toplinske obrade na brusnom papiru P220 [8]

Sličnom tematikom bavili su se Davanageri, Narendranath i Kadoli [16]. Oni su istraživali kako formiranje sigma-faze utječe na otpornost na trošenje super dupleks nehrđajućeg čelika

X2CrNiMoN 25-7-4. Otpornost na trošenje ispitana je metodom "valjčić po disku" (engl. "pin on disc") prema standardu ASTM G 99. Ispitivanje je provedeno na toplinski neobrađenim i toplinski obrađenim uzorcima. Rezultati pokazuju da formiranje sigma-faze dovodi do povećanja otpornosti na trošenje i manjeg gubitka volumena materijala. Na slici 21 vide se rezultati navedenog ispitivanja.



Slika 21. Rezultati ispitivanja otpornosti na trošenje metodom "valjčić po disku" [16]

5. EKSPERIMENTALNI DIO

5.1. Cilj rada

Osnovni cilj ovog rada bio je ispitati utjecaj formiranja sigma-faze na abrazijsku otpornost i tvrdoću dupleks nehrđajućih čeličnih ljevova. Kako bi došlo do izlučivanja sigma-faze, dio ispitnih uzoraka bio je podvrgnut toplinskoj obradi. Nakon toplinske obrade uslijedilo je ispitivanje abrazijske otpornosti i mjerenje tvrdoće na toplinski obrađenim i toplinski neobrađenim uzorcima.

5.2. Materijal za ispitivanje

Ispitivanje je provedeno na dupleks nehrđajućem čeličnom lijevu oznake GX2CrNiMoN 25-6-3. Kemijski sastav lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3 prikazan je u tablici 2.

Tablica 2. Kemijski sastav lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3 [8]

Kemijski element	C	Cr	Ni	Mo	N	Mn	P	S	Si	Fe
Udio, %	max 0,03	24,5-26,5	5,5-7	2,5-3,5	0,12-0,25	max 2	max 0,035	max 0,025	max 1	ostatak

Za potrebe planiranog istraživanja, svi ispitni uzorci izrezani su iz odljevka prikazanog na slici 22. Izrezivanje uzoraka obavljeno je u Laboratoriju za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



Slika 22. Odljevak nehrđajućeg dupleks čeličnog lijeva iz kojeg su izrezani uzorci

Na slici 23 prikazana su četiri uzorka za ispitivanje abrazijske otpornosti. Dimenzije uzoraka propisane su standardom ASTM G 65-85 i iznose 25×75×10 mm.



Slika 23. Izrezani ispitni uzorci

5.3. Provođenje ispitivanja

U okviru planiranog istraživanja provedena su sljedeća ispitivanja:

-ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

-analiza mikrostrukture

-mjerenje tvrdoće.

Navedena ispitivanja provedena su u toplinski neobrađenom stanju i u toplinski obrađenom stanju. Toplinska obrada sastojala se od žarenja koje je imalo za cilj izlučivanje sigma-faze u mikrostrukturi dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva.

5.3.1. Toplinska obrada dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva u vakuumskoj peći

Polovica ispitnih uzoraka podvrgnuta je toplinskoj obradi. Postupak toplinske obrade uzoraka proveden je u Laboratoriju za toplinsku obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, u vakuumskoj peći prikazanoj na slici 24.



Slika 24. Vakuumska peć

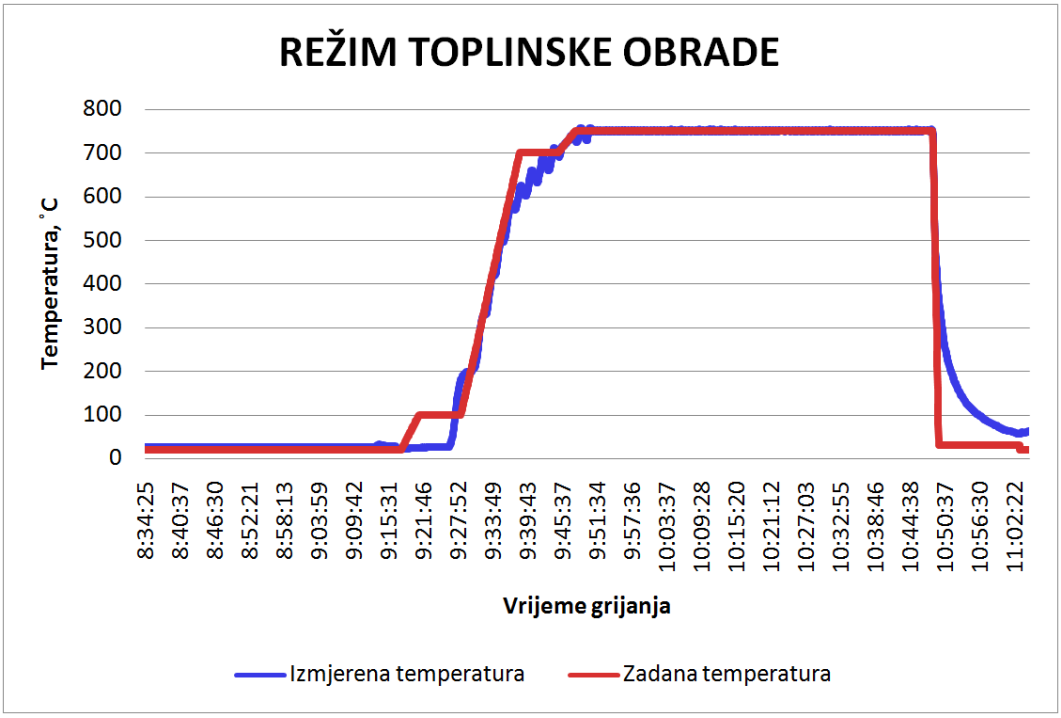
Cilj obrade je promjena mikrostrukture dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva odnosno izlučivanje sigma-faze. Na slici 25 prikazani su ispitni uzorci postavljeni u komoru vakuumske peći. Kako bi se omogućila obrada uzorka bez oksidacije površine i razugljičenja

iz vakuumske komore peći uklanja se zrak. Nakon toga počinje predgrijavanje uzoraka u trajanju od dvadesetak minuta dok se ne postigne temperatura od 750˚C. Na toj temperaturi uzorci se drže jedan sat. Nakon toga uzorci se naglo hlade u struji inertnog plina dušika.



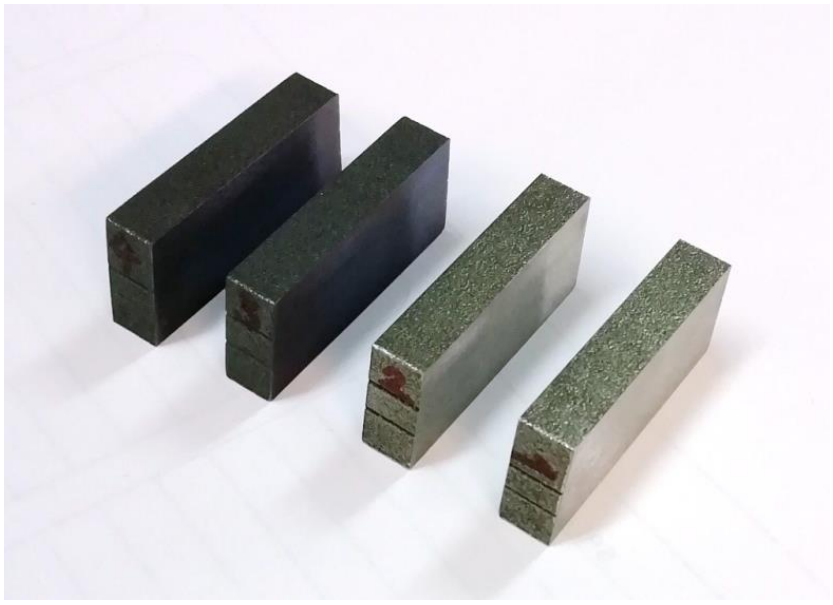
Slika 25. Postavljanje ispitnih uzoraka u vakuumsku peć

Režim toplinske obrade uzoraka prikazan je na slici 26.



Slika 26. Režim toplinske obrade uzoraka

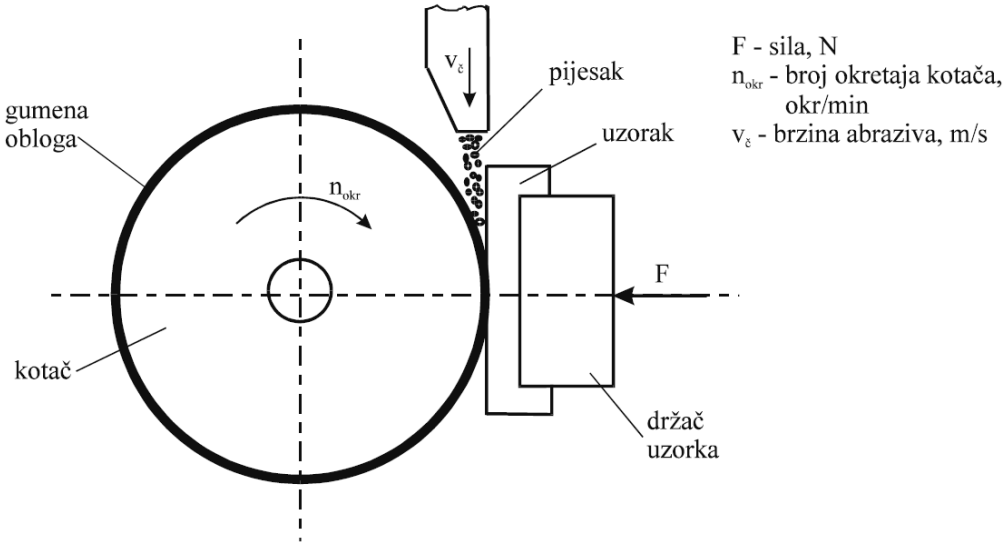
Na slici 27 prikazani su ispitni uzorci nakon provedene toplinske obrade.



Slika 27. Ispitni uzorci nakon toplinske obrade

5.3.2. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je u Laboratoriju za tribologiju Zavoda za materijale, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanje je provedeno standardnom metodom „suhi pijesak/gumeni kotač“. Shematski prikaz ispitivanja vidi se na slici 28.



Slika 28. Suhi pijesak gumeni kotač

Ova metoda temelji se abradiranju ispitnog uzorka standardnim zaobljenim kvarcnim pijeskom koji u slobodnom padu izlazi iz sapnice. Brzina prolaska pijeska kroz sapnicu mora biti između 250 i 400 g/min. Ispitni uzorak se postavlja u držač te potom naslanja na kotač obložen gumom. S druge strane koljenaste poluge na kojoj se nalazi držač ispitnog uzorka i sam uzorak, postavljaju se utezi kako bi se osigurala sila koja će pritiskati uzorak na gumeni kotač. Iznos sile ovisi o varijanti metode postupka, a može iznositi 45 ili 130 N. Osim vrijednosti sile i broj okretaja kotača također ovisi o odabranoj varijanti metode te može iznositi 100, 600, 2000 ili 6000 okretaja.

U tablici 3 prikazane su različite varijante postupka

Tablica 3. Varijante postupka „Suhi pijesak gumeni kotač“

Varijanta postupka	Sila, N	Broj okretaja kotača
A	130	6000
B	130	2000
C	130	100
D	45	600

U ovom radu korištena je metoda B gdje je sila iznosila 130 N, a broj okretaja kotača bio je 2000. Svaki ispitni uzorak abradiran je po dvjema površinama (a i b) dimenzija 25×75 mm. Uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje prikazan je na slici 29, a na slici 30 vidi se međusobni položaj ispitnog uzorka, sapnice i kotača neposredno prije ispitivanja.

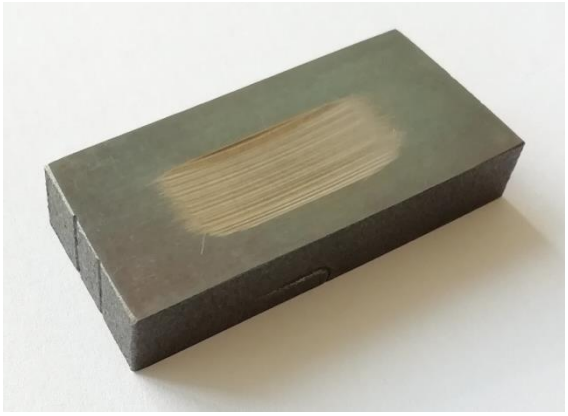


Slika 29. Uređaj za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje



Slika 30. Detalj sa slike 29

Ispitni uzorak nakon jednog ciklusa ispitivanja abrazijske otpornosti prikazan je na slici 31.



Slika 31. Trag trošenja na uzorku

Uobičajeno je da se intenzitet abrazijskog trošenja iskazuje preko gubitka volumena, ali budući da ispitni uzorci imaju jednaku gustoću, intenzitet trošenja može se iskazati i preko gubitka mase. Kako bi se mogao odrediti gubitak mase, izmjerena je masa uzoraka prije i nakon svakog ciklusa trošenja. Uređaj za mjerenje mase prikazan je na slici 32.



Slika 32. Vaga za mjerenje mase

5.3.3. Mjerenje tvrdoće HV10

Otpornost materijala na abrazijsko trošenje uvelike je povezana s njegovom tvrdoćom. Što je tvrdoća materijala veća, materijal bi trebao imati veću otpornost na abrazijsko trošenje. Ispitivanje makrotvrdoće uzoraka provedeno je kako bi se analizirala povezanost između otpornosti na abraziju i tvrdoće uzoraka.

Mjerenje tvrdoće HV10 provedeno je metodom prema Vickersu u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.
Ispitivanje tvrdoće prema Vickersu provodi se na način da se dijamantni šiljak u obliku četverostrane piramide utisne u čistu površinu ispitnog uzorka. Tvrdoća se računa iz sile pritiska i dijagonala baze piramide otisnute u materijalu.
Tvrdoća uzoraka izmjerena je na tvrdomjeru Zwick prikazanom na slici 33. Sila utiskivanja iznosila je 98,1N (HV10). Mjerenje je provedeno na toplinski obrađenim i toplinski neobrađenim uzorcima. Na svakom uzorku provedeno je po 6 mjerenja, na istim plohama na kojima je ispitana otpornost na abrazijsko trošenje.



Slika 33. Uređaj za mjerenje tvrdoće



Slika 34. Detalj sa slike 33

5.3.4. Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Analizirana je mikrostruktura toplinski obrađenih i toplinski neobrađenih uzoraka u poliranom i nagriženom stanju.

Da bi se dobili kvalitetni metalografski uzorci potrebno je izrezati uzorke odgovarajuće veličine. Izrezani uzorci zaliveni su u polimernu masu na pneumatskoj preši za zalijevanje Buehler Pneumet Press. Pneumatska preša prikazana je na slici 35.



Slika 35. Pneumatska preša Buehler Pneumet Press [8]

Kako bi površina uzorka bila dovoljno kvalitetna za analizu mikrostrukture uzorak se nakon zalijevanja brusi i polira. Površina toplinski neobrađenog uzorka nagrižena je elektrokemijski, a površina toplinski obrađenog uzorka nagrižena je u Murakami otopini.

Sastav Murakami otopine je sljedeći:

10 g kalijevog fericijanida

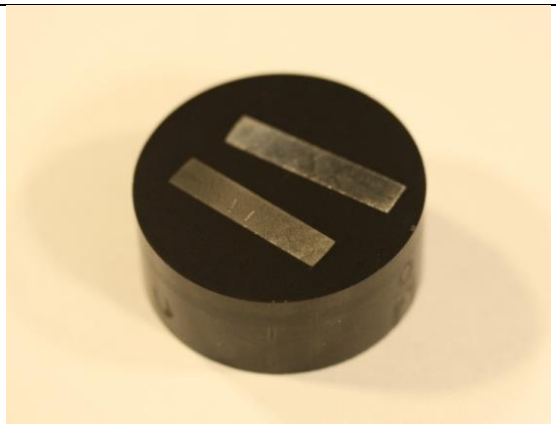
10 g kalijevog hidroksida

100 ml vode.

Pri nagrizanju otopina je bila zagrijana na 50 ºC, a nagrizanje je trajalo 40 sekundi. Nakon toga uzorci su isprani u vodi, a zatim u alkoholu i sušeni u struji toplog zraka.

Analiza mikrostrukture provodi se u poliranom i nagriženom stanju.

Na slici 36 prikazan je metalografski uzorak s toplinski obrađenim i toplinski neobrađenim dupleks čeličnim lijevom.



Slika 36. Ispitni uzorci zaliveni u polimernu masu

Analiza mikrostrukture provedena je na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51, prikazanom na slici 37, pri povećanjima 50×, 100×, 200×, 500× i 1000×.



Slika 37. Optički mikroskop Olympus GX51 [8]

5.4. Rezultati provedenih ispitivanja

5.4.1. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje

Rezultati provedenih ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje prije toplinske obrade prikazani su u tablici 4, a nakon toplinske obrade u tablici 5.

Tablica 4. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje toplinski neobrađenih uzoraka

	CILKUS TROŠENJA	GUBITAK MASE, g
Uzorak 1	1	0,9932
	2	1,1334
Uzorak 2	1	-
	2	1,1285
Srednja vrijednost gubitka mase		**1,0850**

Tijekom provedbe prvog ciklusa ispitivanja na ispitnom uzorku 2 došlo je do nejednolikog protoka pijeska kroz sapnicu. Zbog toga se dobiveni rezultat gubitka mase nije koristio u izračunu srednje vrijednosti gubitka mase.

Tablica 5. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje toplinski obrađenih uzoraka

	CILKUS TROŠENJA	GUBITAK MASE, g
Uzorak 3	1	1,3135
	2	1,0695
Uzorak 4	1	1,1973
	2	1,1152
Srednja vrijednost gubitka mase		**1,1739**

5.4.2. Rezultati mjerenja tvrdoće

Rezultati mjerenja tvrdoće HV10 na toplinski neobrađenim uzorcima prikazani su u tablici 6, a za toplinski obrađene uzorke u tablici 7.

U tablici 8 prikazane su ukupne srednje vrijednosti tvrdoće HV10 toplinski obrađenih i toplinski neobrađenih uzoraka.

Tablica 6. Rezultati mjerenja tvrdoće toplinski neobrađenih uzoraka

Mjerenje	**Tvrdoća HV10**			
	Uzorak 1 (a)	**Uzorak 1 (b)**	**Uzorak 2 (a)**	**Uzorak 2 (b)**
1	266,1	247,0	261,1	254,4
2	246,1	236,5	264,1	259,2
3	252,5	256,3	254,4	253,4
Srednja vrijednost tvrdoće	**254,9**	**246,6**	**259,9**	**255,7**

Tablica 7. Rezultati mjerenja tvrdoće toplinski obrađenih uzoraka

Mjerenje	**Tvrdoća HV10**			
	Uzorak 3 (a)	**Uzorak 3 (b)**	**Uzorak 4 (a)**	**Uzorak 4 (b)**
1	477,8	439,1	414,6	441,3
2	430,7	434,9	386,7	445,6
3	422,5	459,0	395,6	428,6
Srednja vrijednost tvrdoće	**443,7**	**444,3**	**399,0**	**438,5**

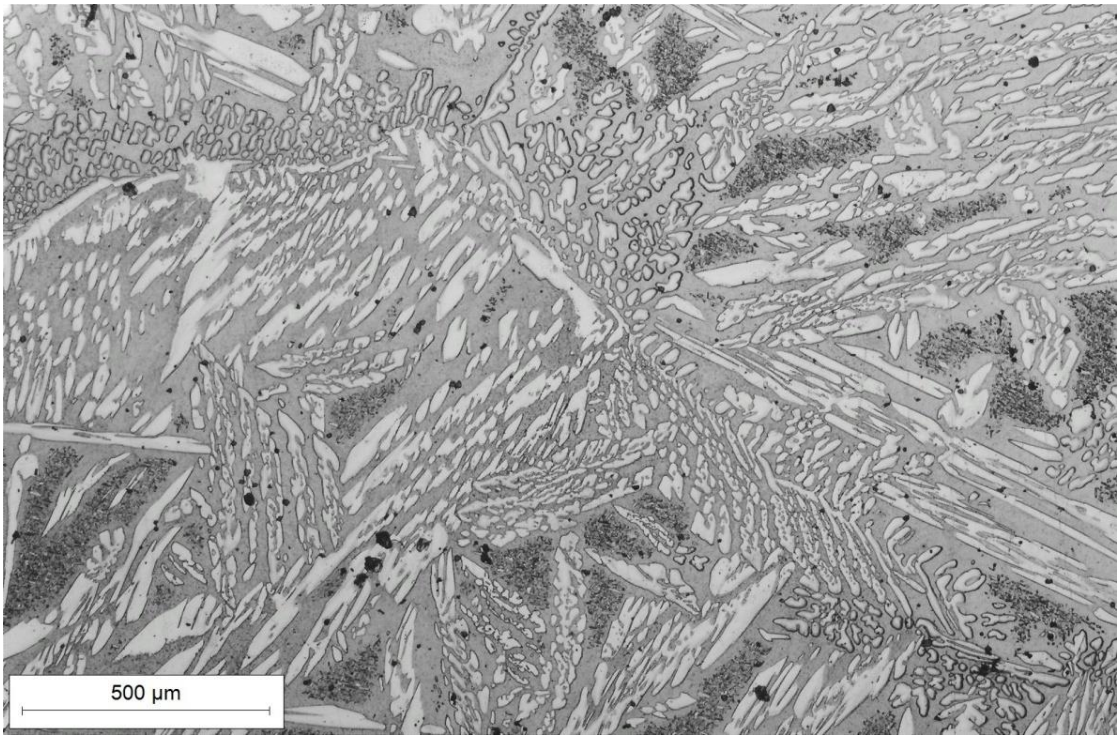
Tablica 8. Srednje vrijednosti tvrdoće HV10 toplinski obrađenih i toplinski neobrađenih uzoraka

Uzorci	**Srednja vrijednost tvrdoće HV10**
Toplinski neobrađeni	254,3
Toplinski obrađeni	431,4

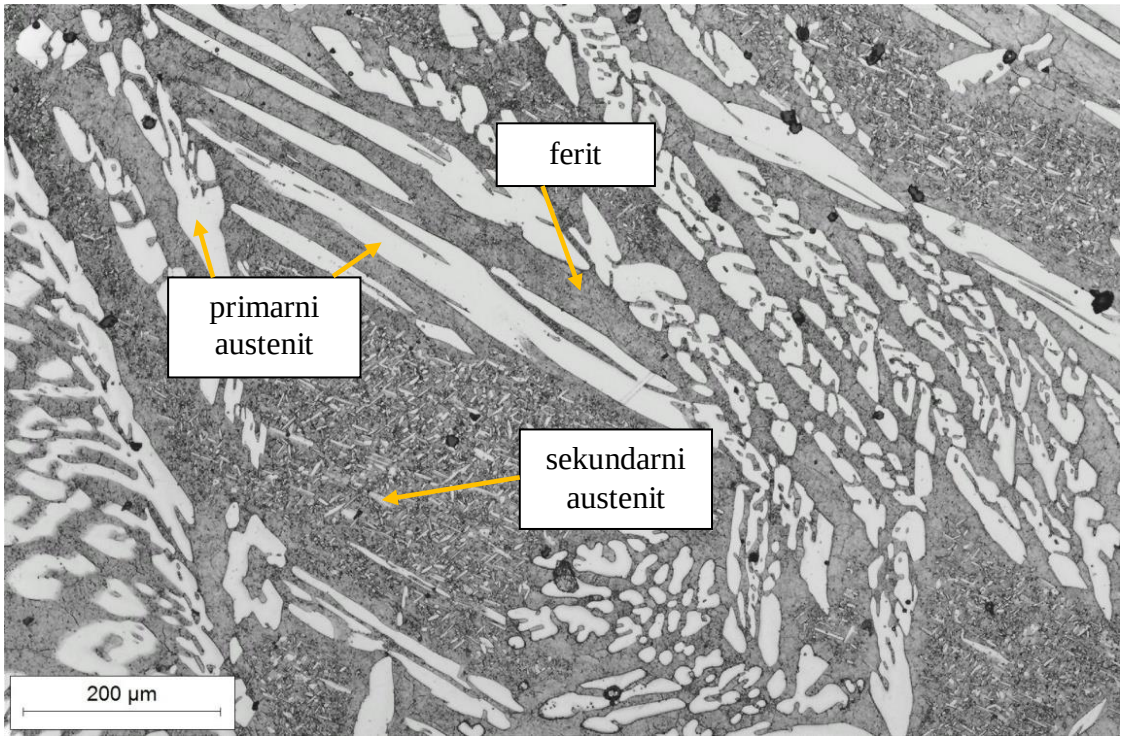
5.4.3. Rezultati analize mikrostrukture

Na slikama od 38 do 41 prikazana je mikrostruktura toplinski neobrađenog nehrđajućeg čeličnog lijeva u nagriženom stanju. Mikrostruktura je fotografirana pri različitim povećanjima od 50 do 500×.

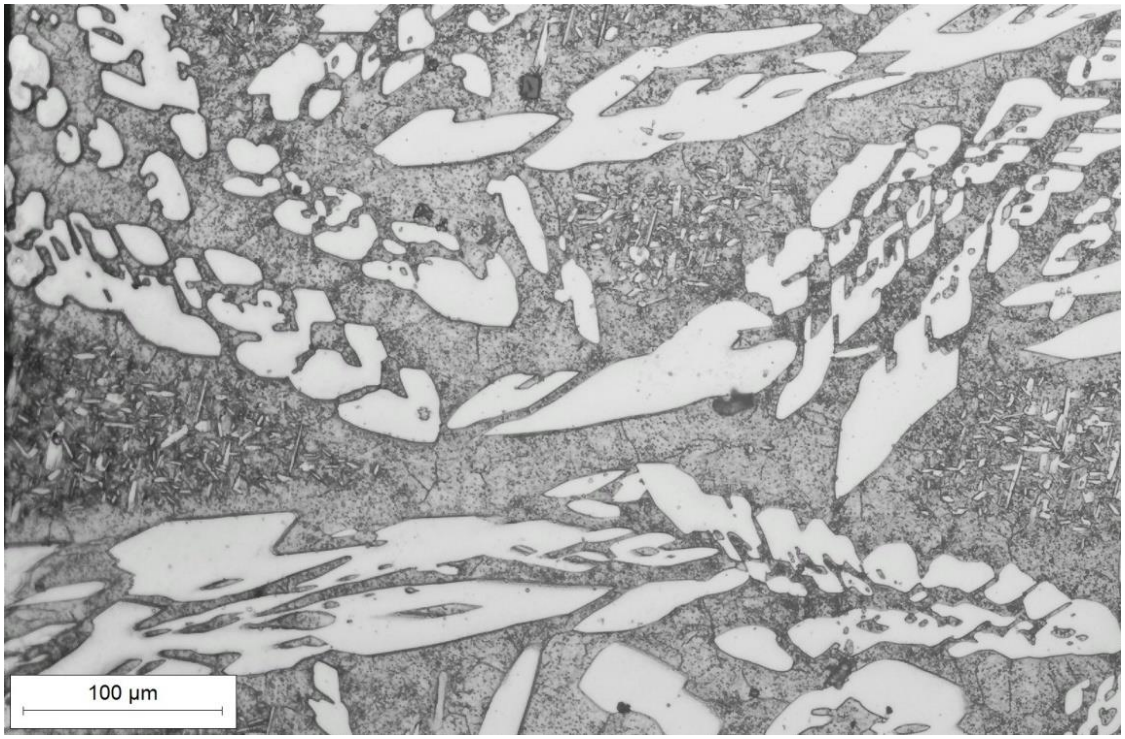
Mikrostruktura ima sve karakteristike tipične ljevačke dupleks strukture, a sastoji se od ferita i austenita u podjednakim volumnim udjelima (50:50). Kristalna zrna primarnog i sekundarnog austenita nisu nagrižena i vide se kao svijetla područja na slici, a feritna faza je nagrižena i tamno je obojena.



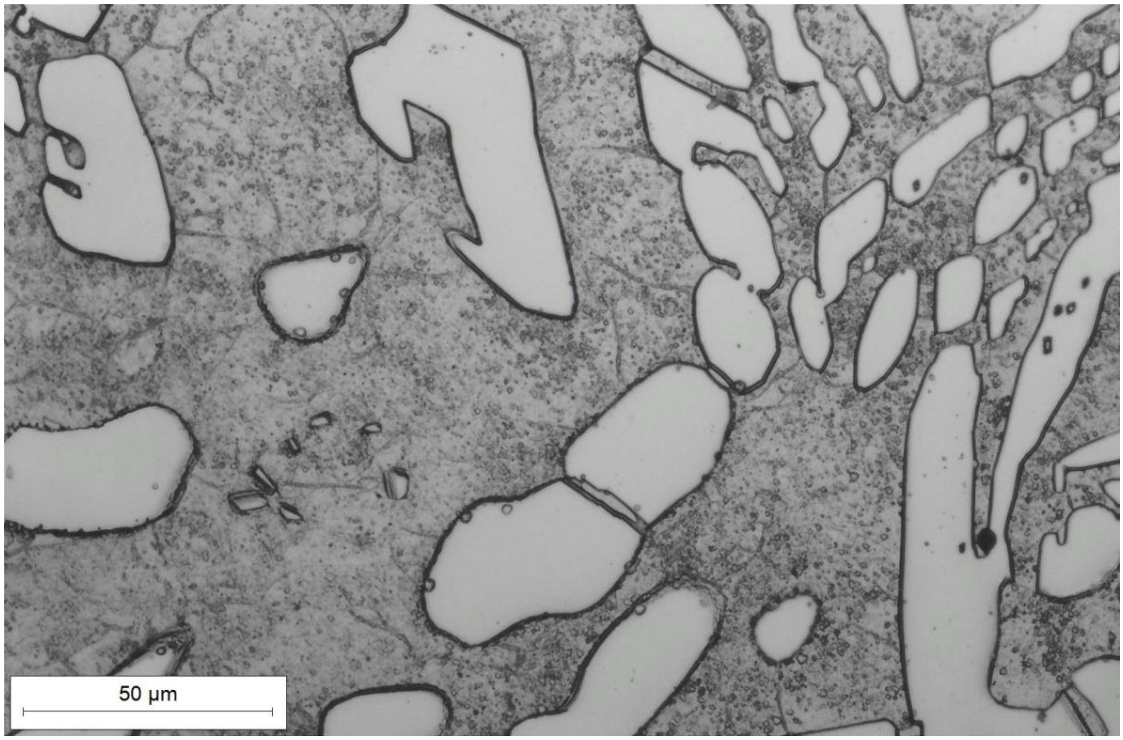
Slika 38. Mikrostruktura toplinski neobrađenog lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3, snimljena pri povećanju 50×



Slika 39. Mikrostruktura toplinski neobrađenog lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3, snimljena pri povećanju 100×



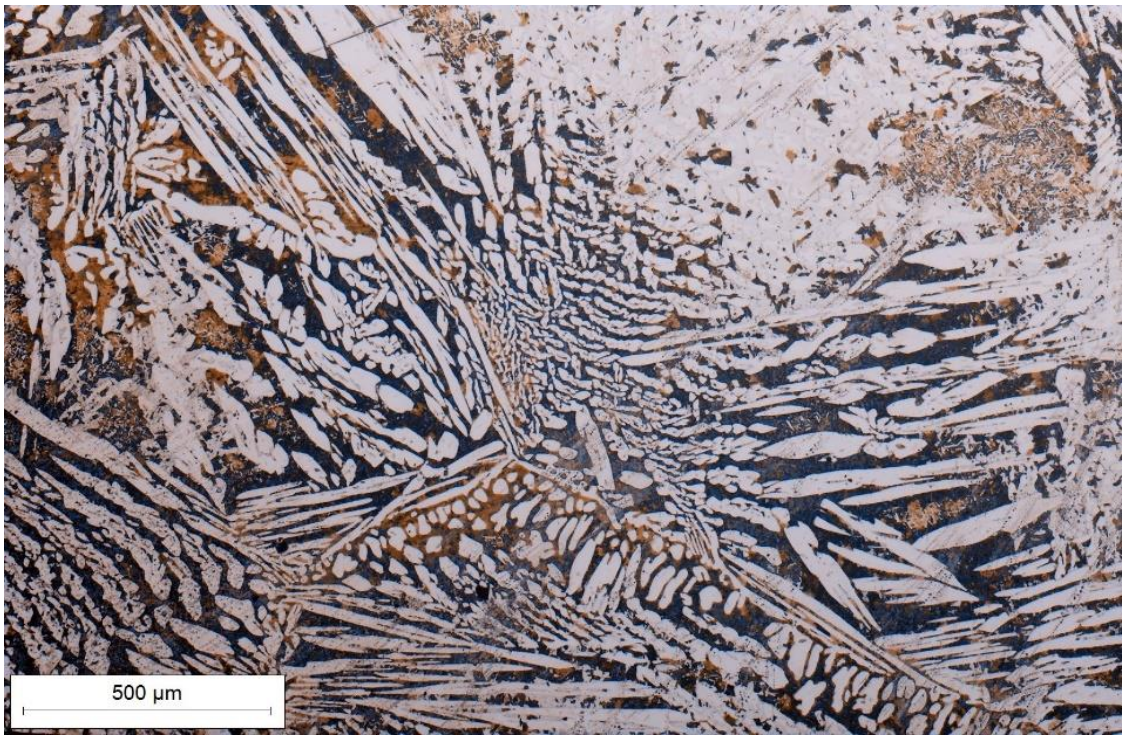
Slika 40. Mikrostruktura toplinski neobrađenog lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3, snimljena pri povećanju 200×



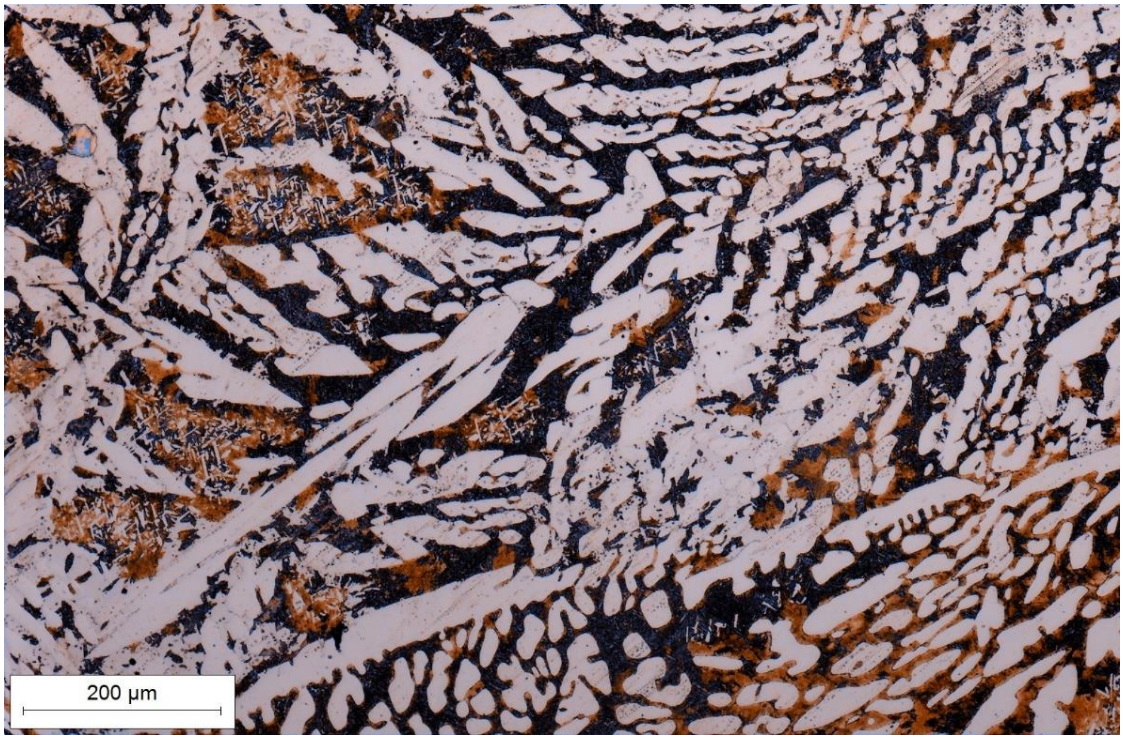
Slika 41. Mikrostruktura toplinski neobrađenog lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3, snimljena pri povećanju 500×

Na slikama od 42 do 45 prikazana je mikrostruktura toplinski obrađenih uzoraka dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3, snimljena pri povećanjima od 50 do 500×. Na svim povećanjima može se uočiti da je narušen izbalansirani omjer ferita i austenita te da se uz austenit i ferit izlučila još jedna faza. Riječ je o sigma-fazi koja je najtamnije obojena na slici. Svijetla faza je austenit, a smeđe-crvena faza je ferit. Žarenjem na 750ºC u trajanju od 60 minuta izlučila se sigma-faza, povećao se udio austenita, a značajno se smanjio udio ferita.

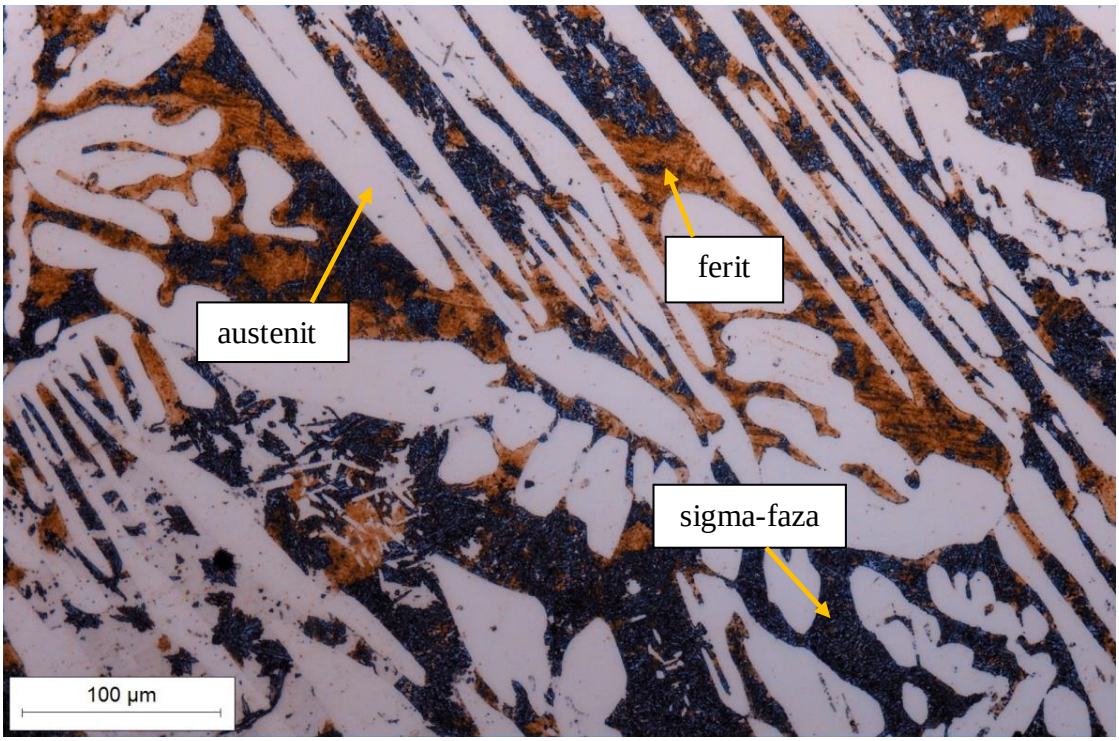
Volumni udio sigma-faze izmjeren je metodom s točkama i iznosi oko 23%. Volumni udio austenita je oko 57%, a volumni udio ferita svega oko 20%.



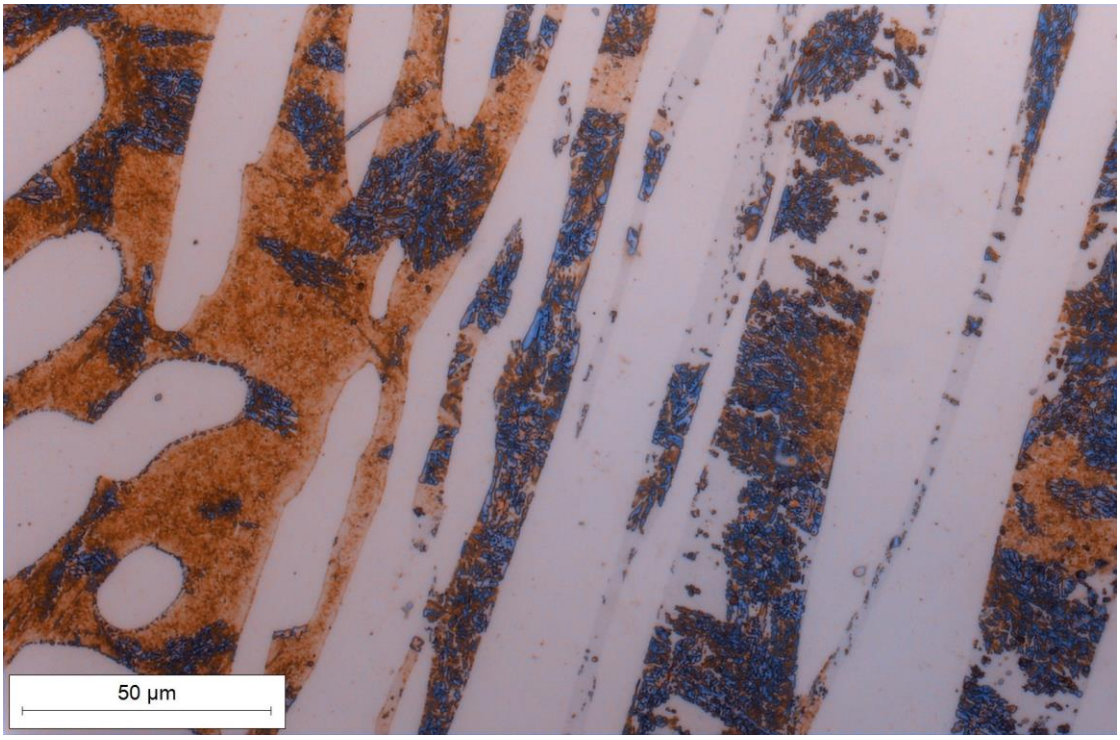
Slika 42. Mikrostruktura toplinski obrađenog lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3, snimljena pri povećanju 50×



Slika 43. Mikrostruktura toplinski obrađenog lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3, snimljena pri povećanju 100×



Slika 44. Mikrostruktura toplinski obrađenog lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3, snimljena pri povećanju 200×

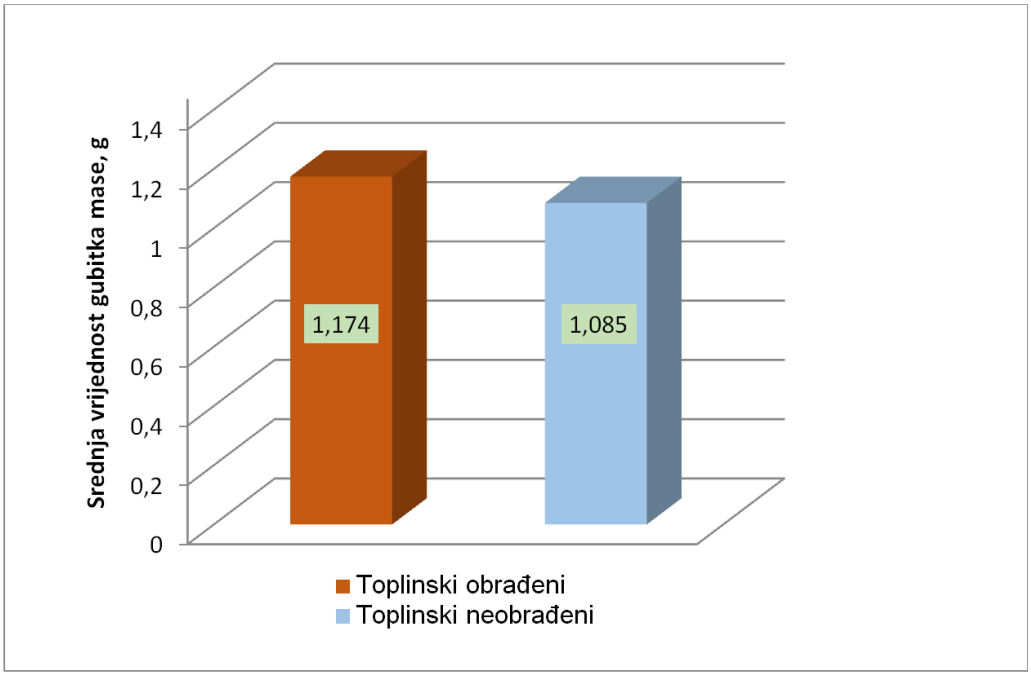


Slika 45. Mikrostruktura toplinski obrađenog lijeva GX2CrNiMoN 25-6-3, snimljena pri povećanju 500×

5.5. Analiza rezultata

5.5.1. Utjecaj toplinske obrade na intenzitet abrazijskog trošenja

Na slici 46 dijagramski je prikazana srednja vrijednost gubitka mase za toplinski neobrađene i toplinski obrađene uzorke. Iz dijagrama možemo uočiti da je kod toplinski obrađenih uzoraka povećano abrazijsko trošenje. Iako je kod uzoraka koji su bili podvrgnuti toplinskoj obradi došlo do izlučivanja sigma-faze i povećanja tvrdoće, nije ostvarena povećana otpornost na abrazijsko trošenje. Jedan od mogućih uzroka za ovaj neočekivani rezultat jest nastanak sigma-faze koja se najprije formira na faznim granicama ferit/austenit odakle se dalje nastavlja širiti u ferit. Formiranjem sigma-faze drastično se smanjuje udio ferita i značajno povećava udio austenita koji je najmekši od te tri faze. Istodobno se nastankon sigma-faze smanjuje žilavost lijeva, što također može doprinijeti povećanom trošenju.



Slika 46. Srednja vrijednost gubitka mase za toplinski neobrađene i toplinski obrađene uzorke

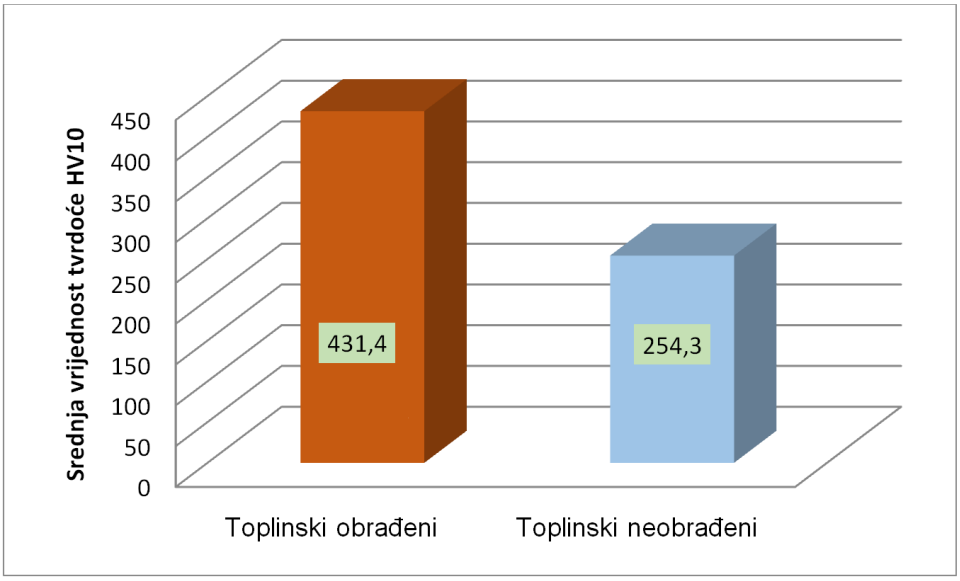
Slični rezultati dobiveni su i u istraživanju u okviru doktorskog rada V. Rede gdje je otpornost na abraziju ispitana istom metodom uz nešto višu temperaturu žarenja (800˚C). Navedena ispitivanja provedena su na dupleks čeliku X2 CrNiMoN 22-5-3.

Do suprotnih rezultata, gdje se abrazijsko trošenje uslijed izlučivanja sigma-faze smanjilo, došli su istraživači Davanageri, Narendranath i Kadoli [16]. Treba napomenuti da je ovdje otpornost na trošenje ispitana metodom "valjčić po disku". Ispitivanje je provedeno na

toplinski neobrađenim i toplinski obrađenim uzorcima super dupleks nehrđajućeg čelika X2CrNiMoN 25-7-4. Došli su do zaključka da je kod toplinski obrađenih uzoraka, zbog formiranja sigma-faze, došlo do povećanja otpornosti na trošenje i manjeg gubitka volumena materijala.

5.5.2. Utjecaj toplinske obrade na tvrdoću HV10

Na slici 47 prikazana je razlika srednje vrijednosti tvrdoće HV10 za toplinski obrađene i toplinski neobrađene uzorke. Može se primjetiti da toplinski obrađeni uzorci imaju znatno veću tvrdoću, upravo zahvaljujući izlučenoj sigma-fazi u mikrostrukturi dupleks lijeva.



Slika 47. Srednje vrijednosti tvrdoće HV10 za toplinski obrađene i neobrađene uzorke

6. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja te analize dobivenih rezultata, može se zaključiti sljedeće:

- Žarenjem dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva oznake GX2CrNiMoN 25-6-3 na 750ºC u trajanju od 60 minuta narušava se početna izbalansirana mikrostruktura načinjena od ferita i austenita. Dolazi do povećanja volumnog udjela austenita, smanjenja volumnog udjela ferita te izlučivanja sigma-faze. Volumni udio austenita povećao se s 50 na 57 %, udio ferita smanjio se na 20 %, a udio novoformirane sigma-faze iznosio je 23 %.
- Izlučivanje sigma-faze u mikrostrukturi dupleks lijeva utjecalo je na povećanje tvrdoće s 254 HV10 u toplinski neobrađenom stanju na 429 HV10 u toplinski obrađenom stanju.
- Formiranjem sigma-faze smanjila se otpornost na abrazijsko trošenje dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva, iako se zbog povećanja tvrdoće mogla očekivati povećana otpornost na abraziju.

LITERATURA

[1] V. Rede: Nehrđajući čelici, Fakultet strojarstva i brodogradnje, autorizirana predavanja Zagreb, 2017.

[2] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1357631301-0-ssnc_9i10_pred_tekst.pdf (dostupno 27.1.2021.)

[3] https://www.forcebeyond.com/duplex-stainless-steel-pump-casing-super-duplex-stainless-steel-pump-casing/ (dostupno 27.1.2021.)

[4] V. Rede: Posebni metalni materijali, autorizirana predavanja, Zagreb 2019.

[5] https://www.stainless-steel-world.net/pdf/11022.pdf (dostupno 27.1.2021.)

[6] http://titan.fsb.hr/~tfiletin/pdf/duplex_ege.pdf (dostupno 27.1.2021.)

[7] https://core.ac.uk/download/pdf/212843938.pdf (dostupno 27.1.2021.)

[8] Halužan, I.:Utjecaj mikrostrukturnih promjena na tribološka svojstva nehrđajućeg dupleks čeličnog lijeva, završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2020.

[9] https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/202/1/012039/pdf (dostupno 27.1.2021.)

[10] https://core.ac.uk/download/pdf/79433555.pdf (dostupno 27.1.2021.)

[11] K. Grilec, S. Jakovljević, G. Marić: Tribologija u strojarstvu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

[12] https://www.fkit.unizg.hr/_download/repository/Nastavni_materijali_za_kolegij_Inzenjerstvo_povrsina_poglavlje_TRIBOLOGIJA.pdf (dostupno 27.1.2021.)

[13] https://onyxinsight.com/wind-turbine-failures-encyclopedia/gear-failures/abrasive-wear/ (dostupno 27.1.2021.)

[14] https://www.zkg.de/en/artikel/zkg_2009-10_Basic_principles_of_wear_protection_technology_for_bulk_materials_Part_1__322551.html (dostupno 27.1.2021.)

[15] Rede, V.: Utjecaj mikrostrukture zavara dupleks čelika na otpornost prema trošenju, Doktorska disertacija, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2004.

[16] Mahesh B. D., Narendranath S., Ravikiran K.: Effect of Sigma (σ) phase on Mechanical and Dry sliding wear, Materials Today: Proceedings, Volume 4, Issue 9, 2017.