

# Utjecaj mikrostrukturnih promjena na tribološka svojstva nehrđajućeg duplex čeličnog lijeva

---

Halužan, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2020

*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:235:228369>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-11**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Ivan Halužan**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Student:

Ivan Halužan

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na uloženom trudu i vremenu pri izradi rada te svim djelatnicima fakulteta koji su mi pomogli oko izvedbe eksperimentalnog dijela rada. Također, zahvaljujem se obitelji i prijateljima koji su mi bili podrška tijekom preddiplomskog studija.

Ivan Halužan



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 / 20 - 6 / 3        |         |
| Ur. broj: 15 - 1703 - 20 -          |         |

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Halužan**

Mat. br.: 0035212008

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj mikrostrukturnih promjena na tribološka svojstva nehrđajućeg dupleks čeličnog lijeva**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of microstructural changes on tribological properties of duplex cast stainless steel**

Opis zadatka:

Nehrđajući dupleks ljevovi su posebna skupina nehrđajućih čeličnih ljevova koja se izdvaja od ostalih po dvojnjoj odnosno dupleksnoj mikrostrukтури. Sve druge skupine imaju monofaznu mikrostrukтуру na čemu je utemeljena njihova izvrsna korozivna postojanost. Dupleks struktura se sastoji od austenita i ferita u podjednakim omjerima ili barem u omjeru 60:40 u korist jedne ili druge faze. Ovi ljevovi se ističu po izvanrednoj kombinaciji mehaničkih i korozivskih svojstava. Njihova mikrostrukтура se postiže brižljivo podešenim sastavom i precizno provedenom toplinskom obradom u fazi dobivanja čelika. Ako se iz nekog razloga naruši izbalansirani omjer austenita i ferita ili ako se u mikrostrukтури izluče neke štetne faze, narušit će se mehanička i korozivna svojstva.

U radu je potrebno ispitati kako nepoželjne strukturne promjene utječu na tribološka svojstva nehrđajućeg dupleks čeličnog lijeva. Potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:  
15. svibnja 2020.

Datum predaje rada:  
**2. rok (izvanredni):** 1. srpnja 2020.  
**3. rok:** 17. rujna 2020.

Predviđeni datumi obrane:  
**2. rok (izvanredni):** 3.7.2020.  
**3. rok:** 21.9. - 25.9.2020.

Zadatak zadala:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Vera Rede

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. KOROZIJSKI POSTOJANI ČELIČNI LJEVOVI .....                                | 2    |
| 2.1. Označivanje .....   | 5    |
| 2.2. Podjela korozijski postojanih ljevova .....                             | 6    |
| 2.3. Dupleks nehrđajući čelični ljevovi .....                                | 7    |
| 2.4. Legirni elementi u dupleks nehrđajućim čeličnim ljevovima .....         | 8    |
| 2.5. Formiranje mikrostrukture .....   | 8    |
| 3. TROŠENJE .....  | 13   |
| 3.1. Abrazija .....  | 13   |
| 3.2. Otpornost na abraziju .....   | 18   |
| 4. EKSPERIMENTALNI DIO .....   | 20   |
| 4.1. Cilj rada .....   | 20   |
| 4.2. Materijal za ispitivanje .....  | 20   |
| 4.3. Provođenje ispitivanja .....  | 22   |
| 4.3.1. Ispitivanje abrazijske otpornosti .....                               | 22   |
| 4.3.2. Mjerenje mikrotvrdoće HV0,2 .....                                     | 24   |
| 4.3.3. Mikrostrukturna karakterizacija .....                                 | 24   |
| 4.3.4. Toplinska obrada .....  | 26   |
| 4.4. Rezultati ispitivanja .....   | 29   |
| 4.4.1. Rezultati ispitivanja prije provedene toplinske obrade .....          | 29   |
| 4.4.2. Rezultati ispitivanja nakon provedene toplinske obrade .....          | 32   |
| 4.5. Analiza rezultata .....   | 37   |
| 4.5.1. Analiza rezultata ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje ..... | 37   |
| 4.5.2. Analiza rezultata mjerenja mikrotvrdoće .....                         | 41   |
| 4.5.3. Analiza rezultata mikrostrukturne karakterizacije .....               | 42   |
| 5. ZAKLJUČAK .....   | 43   |

---

|                 |    |
|-----------------|----|
| LITERATURA..... | 44 |
| PRILOZI .....   | 45 |

**POPIS SLIKA**

|           |  |    |
|-----------|--|----|
| Slika 1.  | Kućišta pumpi izlivena iz dupleks nehrđajućeg lijeva GX2CrNiMoCuN 26-6-3-3 [3]                 | 2  |
| Slika 2.  | Stvaranje oksidnog sloja na običnom i nehrđajućem čeliku [2]                                   | 3  |
| Slika 3.  | Schaefflerov dijagram [1]  | 4  |
| Slika 4.  | Sadržaj kroma i nikla u standardnim vrstama nehrđajućih čeličnih ljevova [3]                   | 5  |
| Slika 5.  | Mikrostruktura dupleks čeličnog lijeva [3]   | 7  |
| Slika 6.  | Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70 % Fe [2]  | 9  |
| Slika 7.  | Shematski prikaz tipičnih precipitacija u dupleks strukturi [2]                                | 10 |
| Slika 8.  | Shematski prikaz formiranja sigma-faze eutektoidnom pretvorbom ferita u dupleks strukturi [4]. | 11 |
| Slika 9.  | Sigma-faza po granicama ferit/austenit [2]   | 12 |
| Slika 10. | TTT-dijagram nastanka štetnih faza za dupleks čelik X2CrNiMoN 22-5-3 [2]                       | 12 |
| Slika 11. | Jedinični događaj abrazije [5]   | 13 |
| Slika 12. | Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b) [5]  | 14 |
| Slika 13. | Trošenje mehanizmom mikrobrazdanja (a) i mikrorezanja (b) [5]                                  | 15 |
| Slika 14. | Trošenje mehanizmom mikronaprskuća (c) i mikroumora (d) [5]                                    | 15 |
| Slika 15. | „Čista“ abrazija [5]   | 16 |
| Slika 16. | Selektivna abrazija [5]  | 17 |
| Slika 17. | „Nulta“ abrazija [5]   | 18 |
| Slika 18. | Ovisnost abrazijskog trošenja o tvrdoćama abraziva i materijala [5]                            | 19 |
| Slika 19. | Odljevak dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva iz kojeg su izrezani uzorci za ispitivanje        | 21 |
| Slika 20. | Izrezani uzorci za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje                               | 21 |
| Slika 21. | Taber abrader  | 23 |
| Slika 22. | Uređaj za mjerenje mase Mettler Zürich   | 23 |
| Slika 23. | Uređaj za mjerenje tvrdoće   | 24 |
| Slika 24. | Optički mikroskop OLYMPUS GX51   | 25 |
| Slika 25. | Preša za zalijevanje uzoraka   | 26 |
| Slika 26. | Vakuumska peć Ipsen  | 27 |
| Slika 27. | Režim grijanja uzoraka   | 28 |
| Slika 28. | Mikrostruktura snimljena pri povećanju 50×   | 32 |
| Slika 29. | Mikrostruktura snimljena pri povećanju 50×   | 35 |



---

|           |   |    |
|-----------|---|----|
| Slika 30. | Mikrostruktura snimljena pri povećanju 200×.....  | 36 |
| Slika 31. | Mikrostruktura snimljena pri povećanju 1000×.....   | 36 |
| Slika 32. | Mikrostruktura snimljena pri povećanju 1000×.....   | 37 |
| Slika 33. | Srednja vrijednost gubitka mase uzoraka prije i poslije provedene toplinske obrade na brusnom papiru P500 ..... | 38 |
| Slika 34. | Srednja vrijednost gubitka mase uzoraka prije i poslije provedene toplinske obrade na brusnom papiru P220 ..... | 39 |
| Slika 35. | Srednja vrijednost trošenja na oba brusna papira prije provedene toplinske obrade .                             | 40 |
| Slika 36. | Srednja vrijednost trošenja na oba brusna papira poslije provedene toplinske obrade .....                       | 40 |
| Slika 37. | Srednja vrijednost mikrotvrdoće prije i poslije toplinske obrade .....  | 41 |

**POPIS TABLICA**

|                    |   |    |
|--------------------|---|----|
| Tablica 1.         | Kemijski sastav dupleks nehrđajućeg lijeva oznake oznake GX2CrNiMoN 25-6-3 [6]<br>..... | 20 |
| Tablica 2.<br>P500 | Gubitak mase uzoraka pri ispitivanju abrazijskog trošenja na brusnom papiru<br>.....    | 29 |
| Tablica 3.<br>P220 | Gubitak mase uzoraka pri ispitivanju abrazijskog trošenja na brusnom papiru<br>.....    | 30 |
| Tablica 4.         | Rezultati mjerenja mikrotvrdoće prije provedene toplinske obrade HV0,2.....             | 31 |
| Tablica 5.<br>P500 | Gubitak mase uzoraka pri ispitivanju abrazijskog trošenja na brusnom papiru<br>.....    | 33 |
| Tablica 6.<br>P220 | Gubitak mase uzoraka pri ispitivanju abrazijskog trošenja na brusnom papiru<br>.....    | 34 |
| Tablica 7.         | Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 nakon provedene toplinske obrade .....            | 35 |

**POPIS OZNAKA**

| Oznaka | Jedinica        | Opis                          |
|--------|-----------------|-------------------------------|
| $F_N$  | N               | Normalna komponenta sile      |
| $F_t$  | N               | Tangencijalna komponenta sile |
| $w$    | mm <sup>3</sup> | Intenzitet trošenja           |
| $H_a$  | HV              | Tvrdoća abraziva              |
| $H_m$  | HV              | Tvrdoća materijala            |

## SAŽETAK

Osnovni cilj ovoga rada bio je opisati utjecaj mikrostrukturnih promjena na tribološka svojstva nehrđajućeg dupleks čeličnog ljevova oznake GX2CrNiMoN 25-6-3.

U teorijskom dijelu rada opisana je korozijska postojanost čeličnih ljevova, njihova podjela i označivanje. Detaljnije su navedeni kemijski sastav, formiranje mikrostrukture i primjena dupleks nehrđajućih čeličnih ljevova. Također je opisan abrazijski mehanizam trošenja i faktori koji utječu na abrazijsku otpornost.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je ispitivanje otpornosti na abraziju, na uređaju Taber abrader, na dvije različite kvalitete brusnih papira, P220 i P500. Ispitivanje je provedeno na uzorcima sa izbalansiranom dupleks mikrostrukturom i na uzorcima kod kojih je žarenjem na 750 °C u mikrostrukтури formirana sigma-faza (~13%), smanjen udio ferita (~16%) i povećan udio austenita (~71%). Analizom rezultata utvrđeno je da formiranje sigma-faze u mikrostrukтури dupleks nehrđajućih čeličnih ljevova smanjuje intenzitet abrazijskog trošenja i povećava tvrdoću ljevova. Također je utvrđeno da veličina abrazivnih čestica utječe na intenzitet abrazijskog trošenja. Utjecaj veličine abrazivnih čestica je jače izražen kod uzoraka bez sigma-faze.

**Ključne riječi:** nehrđajući dupleks čelični ljevi, mikrostruktura, sigma-faza, abrazija

## SUMMARY

The main goal of this study was to describe the impact of microstructural changes on tribological properties of duplex cast stainless steel grade GX2CrNiMoN 25-6-3.

In the theoretical part of this work, corrosion resistance, classification and designation system of the cast stainless steels were described. Chemical composition, formation of microstructure and application of duplex cast stainless steels were listed in detail. The abrasion wear mechanism and factors that affect abrasion resistance were also described.

In the experimental part of this study, an abrasion resistance test was performed using the device Taber abrader with two different qualities of sandpaper, P220 and P500. The test was performed on samples with a balanced duplex microstructure and on samples in which the sigma-phase (~ 13%), reduced ferrite content (~ 16%) and increased austenite content (~ 71%) were formed in the microstructure by annealing at 750 °C. The analysis of the results showed that the formation of the sigma-phase in the microstructure of duplex cast stainless steel castings reduces the intensity of abrasion wear and increases the hardness of the cast iron. It was also found that the size of the abrasive particles affects the intensity of abrasive wear. The influence of abrasive particle size is more noticeable in samples without sigma-phase.

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

## 1. UVOD

Nehrđajući čelični ljevovi primjenjuju se u odljevenom stanju i to najčešće u petrokemijskoj, farmaceutskoj i prehrambenoj industriji. Koriste se u agresivnijim medijima nego ostali čelični ljevovi. Izvrsne su korozijske postojanosti jer sadrže minimalno 12 % kroma, a osim kroma sadrže i legirne elemente kojima se postiže povoljna kombinacija korozijskih, mehaničkih i tehnoloških svojstva. Svojstva nehrđajućih čeličnih ljevova prije svega ovise o kemijskom sastavu. Legirni elementi koje nalazimo u nehrđajućim čeličnim ljevovima su: nikal, molibden, dušik, titanij, bakar i aluminij. Određeni spomenuti elementi mogu biti alfaženi ili gamaženi, to jest promiču feritnu ili austenitnu mikrostrukturu. Neki od navedenih elemenata utječu i na nastanak nepoželjnih strukturnih promjena tijekom toplinske obrade. Stoga na formiranje mikrostrukture, osim precizno određenog kemijskog sastava, bitno utječe i režim toplinske obrade.

Najnovija skupina nehrđajućih čeličnih ljevova su dupleks nehrđajući čelični ljevovi. Mikrostruktura dupleks čeličnih ljevova uglavnom se sastoji od ferita i austenita u podjednakim volumnim udjelima, 50:50. Takva mikrostruktura istodobno omogućava visoku čvrstoću, dobru žilavost, visoku tvrdoću i izvrsnu korozijsku postojanost. Dupleks nehrđajući ljevovi ne primjenjuju se na temperaturama višim od 315 °C zbog izlučivanja nepoželjnih mikrostrukturnih faza koje mogu narušiti mehanička svojstva i korozijsku postojanost [1].

Spomenute nepoželjne mikrostrukturne faze imaju velik utjecaj i na tribološka svojstva nehrđajućih ljevova. Razlog tome je što ove faze često imaju vrlo visoku tvrdoću, a tvrdoća utječe na abrazijsku otpornost materijala. U pravilu, što je viša tvrdoća materijala, to je veća i njegova otpornost na abrazijsko trošenje. Odljevci od dupleks nehrđajućeg čeličnog ljeva su u eksploataciji često izloženi trošenju, osobito abrazijskom mehanizmu trošenja, stoga je potrebno utvrditi kako neke mikrostrukturne promjene utječu na abrazijsko trošenje.

## 2. KOROZIJSKI POSTOJANI ČELIČNI LJEVOVI

Čelični ljevovi su Fe-C legure koje nisu plastično deformirane nakon skrućivanja, za razliku od čelika koji se nakon lijevanja podvrgavaju toplom ili hladnom oblikovanju deformiranjem. Čelični se ljevovi mogu naknadno doraditi obradom odvajanjem čestica kako bi postigli konačni oblik proizvoda.

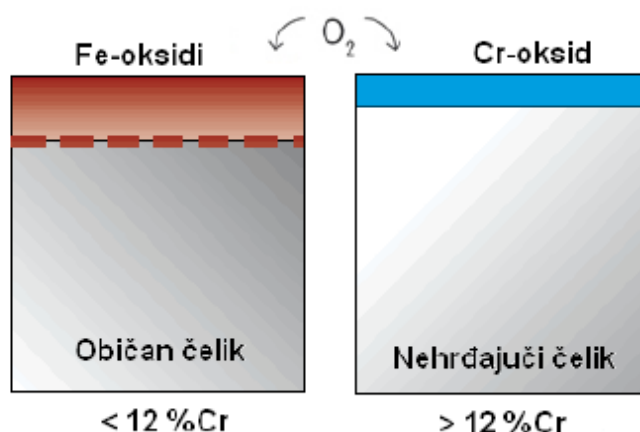
Na slici 1 prikazano je kućište pumpi izliveno iz dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva.

Korozijska postojanost definira se kao sposobnost materijala da se suprotstavi korozijskoj agresiji medija ili okoline, većim ili manjim usporenjem njegova djelovanja. Dva su glavna uvjeta koja čelični ljev mora ispunjavati da bi bio korozijski postojan. Prvi uvjet korozijske postojanosti je da maseni udio kroma u Fe-C lijevu mora biti barem 12 %. Krom mora biti potpuno otopljen u metalnoj osnovi, a ne smije biti sastavni dio karbida ili drugih strukturnih tvorevina. Spomenuti udio kroma osigurava stvaranje stabilnog oksidnog sloja na površini koji sprječava daljnju oksidaciju i koroziju u normalnim uvjetima.

Na slici 2 prikazano je stvaranje oksidnog sloja na običnom i nehrđajućem čeliku [2].



**Slika 1.** Kućišta pumpi izlivena iz dupleks nehrđajućeg lijeva GX2CrNiMoCuN 26-6-3-3 [3]



**Slika 2.** Stvaranje oksidnog sloja na običnom i nehrđajućem čeliku [2]

Drugi uvjet korozijske postojanosti je monofazna mikrostruktura. Ako je u mikrostrukturi čelika prisutna samo jedna faza (austenitna, feritna ili martezitna) izbjegnuta je opasnost od nastanka galvanskih članaka koji u vodljivom mediju mogu prouzročiti korozijsko trošenje materijala. Uvjet monofaznosti mikrostrukture nije nužan jer postoje nehrđajući čelici i čelični ljevovi čija se mikrostruktura sastoji od dvije i više faza. Primjer takve mikrostrukture su duplex nehrđajući čelični ljevovi [2].

Nehrđajući čelični ljevovi pripadaju skupini visokolegiranih Fe-C legura, a njihovo osnovno svojstvo je odlična otpornost na koroziju. Glavnina nehrđajućih čeličnih ljevova sadrži i više od minimalnog spomenutog sadržaja kroma od 12 %. Određeni nehrđajući ljevovi sadrže čak oko 30 % kroma, a većina ih sadrži i između 1 i 30 % nikla. Osim kroma i nikla u čeličnim ljevovima nalaze se i drugi legirni elementi precizno određenog sadržaja s ciljem postizanja priželjkivane mikrostrukture i najpovoljnije kombinacije korozijske postojanosti, mehaničkih i drugih svojstava. Korozijska postojanost i druga svojstva ljevova postižu se dodavanjem nikla, molibdena i dušika. Nikal, uz otpornost na koroziju, dobro djeluje na žilavost, a molibden, dušik, titanij, bakar i aluminij povisuju čvrstoću. Selenij se dodaje čeličnim ljevovima kako bi se poboljšala obradivost odvajanjem čestica. Dodavanjem ugljika, koji je osnovni element u čeličnom ljevu, također se može povisiti čvrstoća, posebice kod ljevova koji su namijenjeni radu na višim temperaturama [1]. Na formiranje mikrostrukture, osim kemijskog sastava, veoma utječe i režim toplinske obrade pa se temperatura žarenja i brzina hlađenja moraju pažljivo kontrolirati da se postigne priželjkivana mikrostruktura.

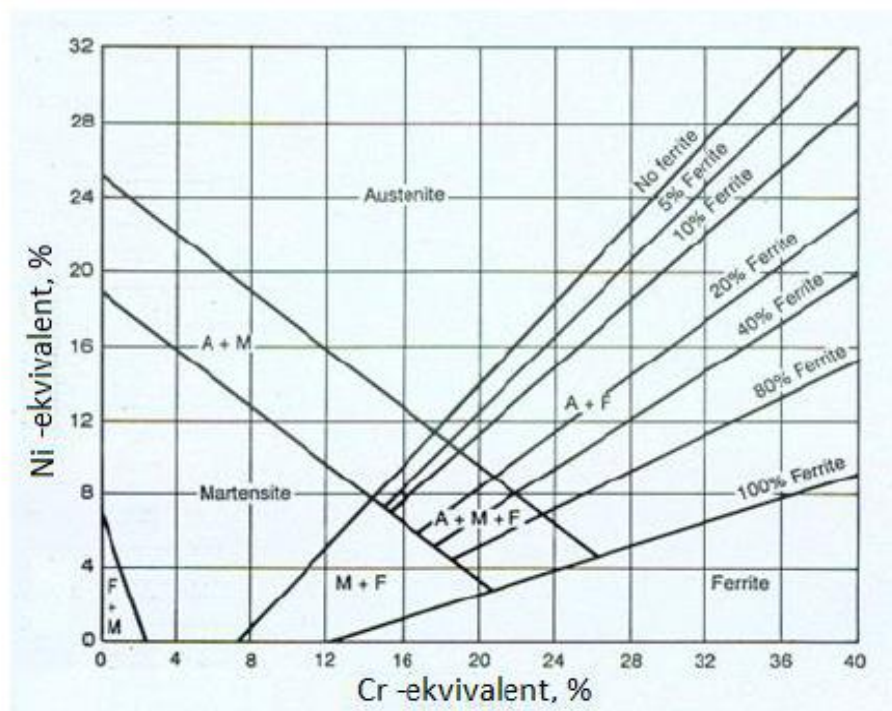


Poznavanjem kemijskog sastava, mikrostruktura lijeva može se odrediti pomoću Schaefflerovog dijagrama prikazanog na slici 3. U dijagramu se na x-osi nalaze vrijednosti Cr-ekvivalenta, a na y-osi vrijednosti Ni-ekvivalenta. Cr- i Ni-ekvivalenti određuju se prema sljedećim izrazima:

$$Cr_{ekv} = \%Cr + 2(\%Si) + 1,5(\%Mo) + 5(\%V) + 5,5(\%Al) + 1,75(\%Nb) + 1,5(\%Ti) + 0,75(\%W)$$

$$Ni_{ekv} = \%Ni + \%Co + 30(\%C) + 25(\%N) + 0,5(\%Mn) + 0,3(\%Cu)$$

Prikazani dijagram nije ravnotežni, a prikazuje mikrostrukturu dobivenu gašenjem s temperature od 1050°C do sobne temperature [1].



Slika 3. Schaefflerov dijagram [1]

## 2.1. Označivanje

Prema hrvatskoj i europskoj normi oznaka nehrđajućih čeličnih ljevova prema kemijskom sastavu počinje velikim slovom G. S obzirom da se radi o visokolegiranim čeličnim ljevovima zajamčenog kemijskog sastava, oznaka se nastavlja znakom „X“ iza kojeg slijedi sadržaj ugljika pomnožen sa 100 te kemijski simboli i maseni udjeli legiranih elemenata poredani po veličini masenih udjela.

Na primjer:

GX2CrNiMoN 25-6-3 - oznaka za visokolegirani čelični ljev s 0,02 % C, oko 25 % Cr, oko 6 % Ni, oko 3 % Mo i manje od 1 % N

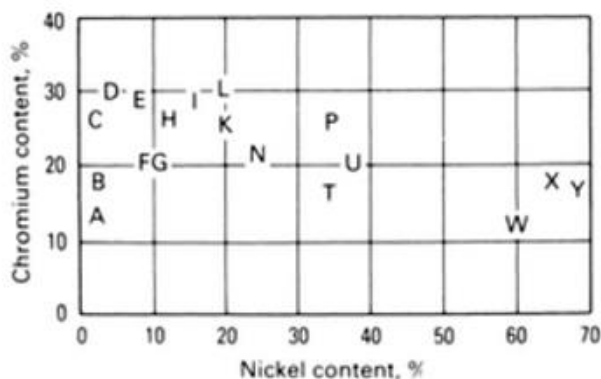
GX5CrNiNb 19-10 – oznaka za visokolegirani čelični ljev s 0,05 % C, oko 19 % Cr, oko 10 % Ni i manje od 1 % Nb

Prema američkom sustavu označivanja ACI (American Concrete Institute) i ASTM (American Society for Testing and Materials) svi nehrđajući čelični ljevovi podjeljeni su na: korozijski postojane ljevove za primjenu do 650 °C i na korozijski postojane ljevove za primjenu iznad 650 °C. Oznaka za korozijski postojane ljevove za primjenu do 650 °C počinje slovnim simbolom C, a za korozijski postojane ljevove za primjenu iznad 650 oznaka počinje slovnim simbolom H. Na drugom mjestu je slovni simbol koji ukazuje na kemijski sastav (udio kroma i nikla), prema slici 4. Slijedi broj koji ukazuje na sadržaj ugljika pomnožen sa 100. Iza toga slijedi slovo koje ukazuje na ostale legirne elemente [3].

Na primjer:

CF-8M - korozijski postojan ljev, 17-21 % Cr, 8-12 % Ni, najviše 0,08 % C, prisutan molibden

HD - korozijski i toplinski postojan ljev, 26-30 % Cr, 4-7 % Ni



Slika 4. Sadržaj kroma i nikla u standardnim vrstama nehrđajućih čeličnih ljevova [3]

## 2.2. Podjela korozijski postojanih ljevova

Nehrđajući čelični ljevovi mogu se podijeliti se na tri načina: prema temperaturi promjene, prema kemijskom sastavu i prema tipu mikrostrukture.

*Prema temperaturi primjene* nehrđajući čelični ljevovi dijele se u dvije skupine:

- korozijski postojani ljevovi za primjenu do 650 °C
- korozijski i toplinski postojani ljevovi za primjenu iznad 650 °C.

Osnovna razlika između ove dvije skupine je u sadržaju ugljika. Ljevovi za primjenu do 650°C sadrže puno manji udio ugljika (manje od 0,2 %, a ponekad manje i od 0,03 %) i imaju jako dobru korozijsku otpornost. Ljevovi za primjenu iznad 650 °C sadrže više ugljika radi bolje otpornosti na puzanje i veće čvrstoće na višim temperaturama, ali su osjetljiviji na koroziju od prethodne skupine.

*Prema kemijskom sastavu* nehrđajući čelični ljevovi dijele se na:

- ljevove legirane kromom
- ljevove legirane kromom i niklom kod kojih je krom dominantni legirni element
- ljevove legirane niklom i kromom kod kojih je nikal dominantni legirni element.

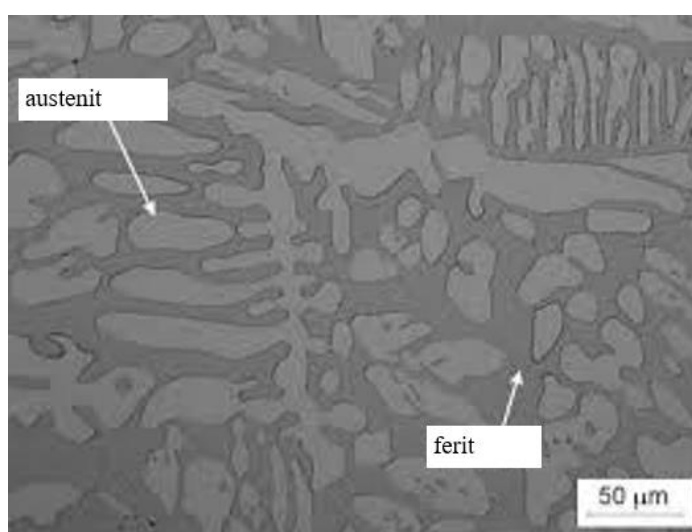
*Prema osnovnoj mikrostrukтури* nehrđajući čelični ljevovi mogu se podijeliti na:

- austenitne
- martenzitne
- dupleks.

### 2.3. Dupleks nehrđajući čelični ljevovi

Dupleks čelici su poznati od 1930. godine, no intenzivnijom primjenom zahvaćeni su tek 80-ih godina prošlog stoljeća. Razlog tome su problemi sa zavarivanjem, korozijskom postojanošću i krhkošću. Navedeni problemi riješeni su dodavanjem dušika te se od tada počinju naglo razvijati i primjenjivati. Ime su dobili po mikrostrukturi koja se sastoji od ferita i austenita u podjednakim volumnim udjelima. Najpovoljniji omjer je 50:50, ali zadovoljavajuća svojstva dupleks ljevovi imaju i ako je omjer 60:40 u korist ferita ili austenita.

Mikrostruktura dupleks čeličnog lijeva prikazana je na slici 5.



Slika 5. Mikrostruktura dupleks čeličnog lijeva [3]

Danas se dupleks čelici i ljevovi primjenjuju na mnogim mjestima zbog izvanredne korozijske postojanosti i dobrih mehaničkih svojstava. Zbog relativno visoke čvrstoće dupleks čelični ljevovi su odličan izbor za konstrukcije izložene koroziji. Imaju višu granicu razvlačenja u odnosu na austenitne čelične ljevove. Tvrdoća im je također viša, a samim time i otpornost na abrazijsko trošenje. Većina novijih vrsta ima dobru žilavost i duktilnost. Radi visokog udjela ferita u mikrostrukturi ovi ljevovi su feromagnetni. Donja temperatura primjene im je  $-40\text{ °C}$  jer pri sniženju temperature, zbog velikog udjela feritne faze, naglo prelaze iz žilavog u krhko područje. Gornja temperatura primjene je oko  $315\text{ °C}$  zbog brojnih mikrostrukturnih precipitata koji se mogu izlučiti na temperaturama višim od navedene, a loše utječu na korozijsku postojanost i mehanička svojstva. Dupleks nehrđajući čelični ljevovi pokazuju bolju otpornost na napetosnu i rupičastu koroziju u medijima koji sadrže kloride od austenitnih nehrđajućih čeličnih ljevova [2].

## 2.4. Legirni elementi u dupleks nehrđajućim čeličnim ljevovima

Legirni elementi dodaju se u svrhu postizanja što povoljnije kombinacije mehaničkih, kemijskih i ostalih svojstava. Također imaju velik utjecaj na nastanak izbalansirane mikrostrukture dupleks ljevova koja neposredno utječe na svojstva.

Krom i nikal osnovni su legirni elementi, a bitnu funkciju imaju još i dušik, molibden, bakar, mangan, silicij i volfram.

Sadržaj kroma u dupleks čelicima iznosi između 21 i 33 %. Povećanjem kroma, kao alfa-faznog legirnog elementa, stabilizira se feritna faza u mikrostrukтури. Otpornost na koroziju također raste povećanjem sadržaja kroma, no tada se povećava i sklonost nastajanju štetnih intermetalnih faza. Što je sadržaj kroma viši, potrebno je i više nikla kako bi se mogla formirati priželjkivana dupleks struktura.

Sadržaj nikla u dupleks čelicima iznosi između 4 i 9 %. Nikal promiče austenitnu mikrostrukтуру koja je zaslužna za žilavost dupleks ljevova.

Dušik, kao jaki gama-geni element, jednako kao i nikal, promiče austenitnu strukturu. Ujedno, dušik sprječava nastanak nepoželjne sigma-faze kod dupleks ljevova s velikim udjelom kroma i molibdena.

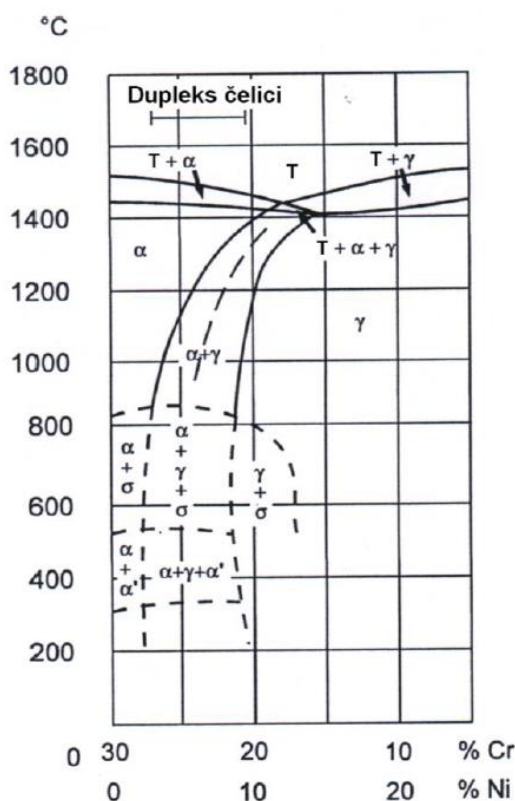
Molibden kao alfa-geni legirni element poboljšava kemijsku otpornost dupleks ljevova u medijima koji sadrže kloride.

Bakar, volfram i silicij dodaju se dupleks čeličnim ljevovima radi poboljšanja otpornosti na rupičastu koroziju te koroziju u procjepu [2].

## 2.5. Formiranje mikrostrukture

Na formiranje dupleks mikrostrukture s podjednakim sadržajem austenita i ferita, osim kemijskog sastava, utječe i režim hlađenja nakon primarne kristalizacije. Na slici 6 vidljivo je da dupleks čelici primarno kristaliziraju kao ferit. Zatim se daljnjim hlađenjem počinje izlučivati austenitna faza, prvo na granicama zrna, a potom i unutar feritnog zrna. U procesu pretvorbe ferita u austenit, legirni elementi koji stabiliziraju austenit (ugljik, nikal, dušik, bakar) difundiraju u austenit, a legirni elementi koji podupiru ferit (krom, molibden, volfram) otapaju se u feritu. Udio austenita u mikrostrukтури ovisi o brzini ohlađivanja ferita, vrsti i udjelu legirnih elemenata te o brzini difuzije svakog pojedinog legirnog elementa. Odgovarajuća fazna ravnoteža javlja se kod podjednagog volumnog udjela ferita i austenita. Brzina ohlađivanja se za određeni kemijski sastav

određuje tako da se u temperaturnom intervalu između 1050 i 1150 °C u mikrostrukturi nalazi 50 % ferita i 50 % austenita [2].

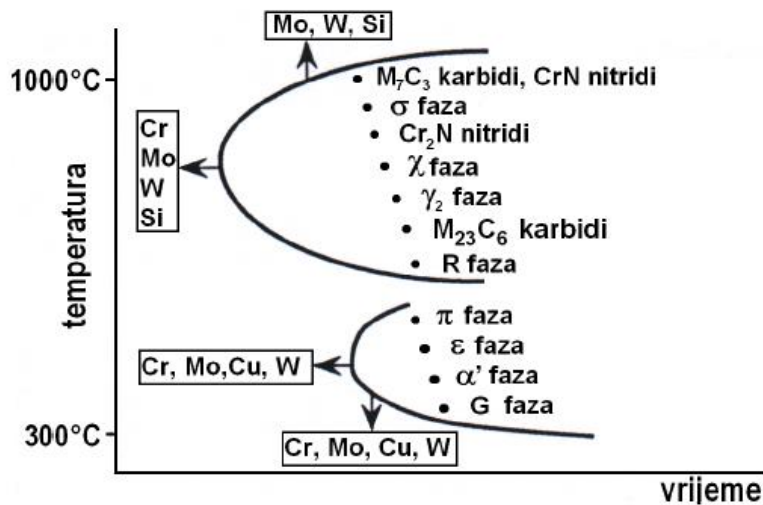


Slika 6. Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70 % Fe [2]

Zadržavanje izbalansiranog omjera faza do sobne temperature postiže se gašenjem u vodi. Time se ujedno priječi nastanak nepoželjnih mikrostrukturnih faza koje se formiraju pri sporom hlađenju na temperaturama ispod 1000°C. Nastanak precipitata tih faza ovisi o brzini hlađenja tijekom toplinske obrade. Izlučene precipitirane faze uzrokuju degradaciju mehaničkih svojstava i korozijske postojanosti.

Nepoželjne strukturne izlučevine kod dupleks čelika i čeličnih ljevova mogu se, ovisno o temperaturi na kojoj nastaju, svrstati u dva područja kako je prikazano na slici 7. Između temperatura 600 °C i 1300 °C nastaju karbidi ( $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$ ), nitridi (CrN,  $Cr_2N$ ), sigma-faza ( $\sigma$ ), Chi-faza ( $\chi$ ), Lavesova faza ( $\eta$ ), R-faza ( $Fe_2Mo$ ) i sekundarni austenit ( $\gamma_2$ ). U tom području najopasnije je izlučivanje sigma-faze, chi-faze i kromovih nitrida. Radi niskog udjela ugljika u sastavu modernih dupleks ljevova vrlo rijetko se pojavljuju karbidi  $M_7C_3$  i karbidi  $M_{23}C_6$ . Na temperaturama između 300°C i 550°C dolazi do izlučivanja  $\pi$ -faze, bakrom bogate  $\epsilon$ -faze, G-faze te  $\alpha'$ -faze. Najveću opasnost u tom području predstavlja  $\alpha'$ -faza radi uzrokovanja pojave „krhkost

475 °C“. Radi spomenute pojave koja nastaje u feritnoj fazi, dupleks čelici ne primjenjuju se iznad 315 °C [2].



Slika 7. Shematski prikaz tipičnih precipitacija u dupleks strukturi [2]

### Karbidi

Poradi sniženog sadržaja ugljika kod novijih dupleks čelika, izlučivanje karbida svedeno je na minimum. Ako do izlučivanja ipak dođe, izlučuju se karbidi tipa  $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$ ,  $M_6C$ , i  $M_3C$ , kao i monokarbidi tipa  $MC$  te karbonitridi tipa  $M(C,N)$ . Karbidi mogu nastati sporim ohlađivanjem ili zadržavanjem na temperaturnom intervalu između 820 i 480 °C. Kao i kod austenitnih ljevova, najveći tehnički značaj ima karbid tipa  $M_{23}C_6$  koji u ovom slučaju nastaje na granici između feritnog i austenitnog zrna. Izlučivanjem karbida koji sadrže velik udio kroma, smanjuje se koncentracija kroma u području oko granice zrna. Smanjenje koncentracije kroma intenzivnije je u feritu nego u austenitu [2].

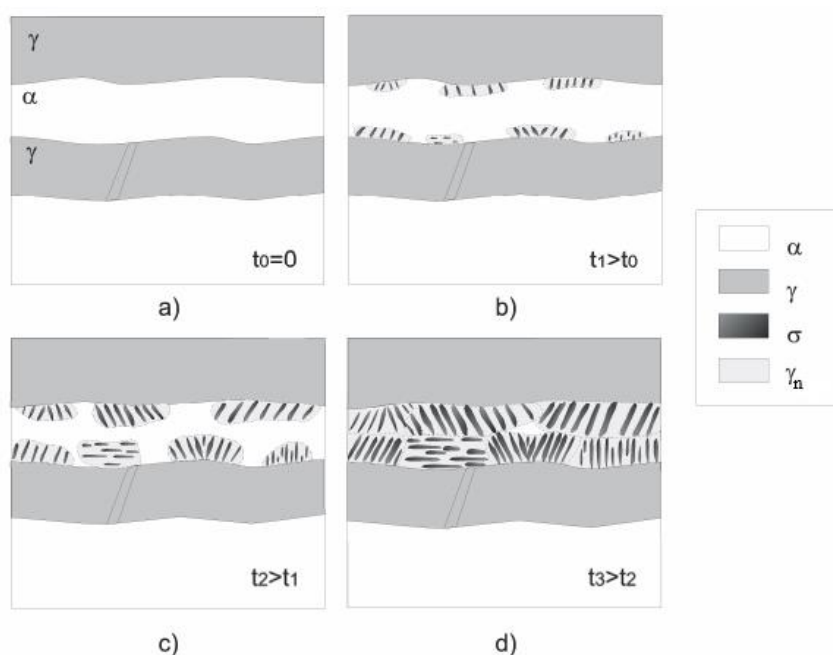
### Nitridi

Prilikom gašenja s temperature od oko 1200 °C u krupnim feritnim zrnima izlučuje se kromov nitrid  $Cr_2N$ . Spomenuti nitrid nastaje radi prezasićenja feritne faze dušikom te izaziva smanjenje žilavosti i otpornosti na rupičastu koroziju [2].

### Sigma-faza

Sigma-faza je tvrda i krhka faza s visokim sadržajem kroma. Ta nemagnetična intermetalna faza nastaje zadržavanjem dupleks čelika na temperaturi između 560 i 980 °C. Povećanjem sadržaja

kroma i molibdena raste afinitet prema formiranju sigma-faze, s time da molibden ima 4 do 5 puta veći utjecaj od kroma. Ostali alifageni elementi također potiču nastanak sigma-faze. Sigma-faza nastaje eutektoidnom pretvorbom ferita koji prekrystalizira u sigma-fazu i austenit. Sigma-faza prvotno se formira na faznim granicama ferit/austenit, a zatim dalje propagira u ferit. Mehanizam formacije sigma-faze eutektoidnom pretvorbom ferita prikazan je na slici 8.

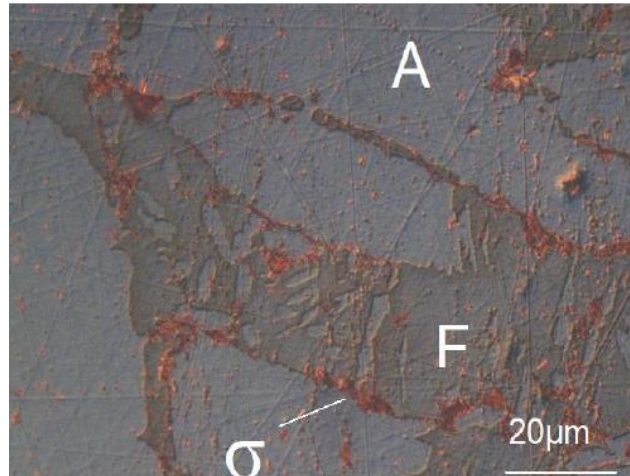


**Slika 8. Shematski prikaz formiranja sigma-faze eutektoidnom pretvorbom ferita u dupleks strukturi [4].**

Kemijski sastav sigma-faze ovisi o sastavu legure u kojoj nastaje, a uglavnom je FeCr. Sigma-faza, izlučena već u maloj količini značajno utječe na smanjenje žilavosti i istezljivosti, a također smanjuje i korozijsku postojanost. Tvrdća sigma-faze je oko 940 HV (68 HRC) te njena pojava može povisiti makrotvrdoću dupleks čelika do 450 HV<sub>50</sub> [2].

Na slici 9 vidi se fotografija mikrostrukture dupleks čelika oznake X2CrNiMoN 22-5-3 žarenog na 800 °C u trajanju od 60 min. U mikrostrukтури se primjećuje izlučena sigma-faza, smanjeni udio ferita te povećani udio austenita u odnosu na početno stanje sa 50 % austenita i 50 % ferita [2].

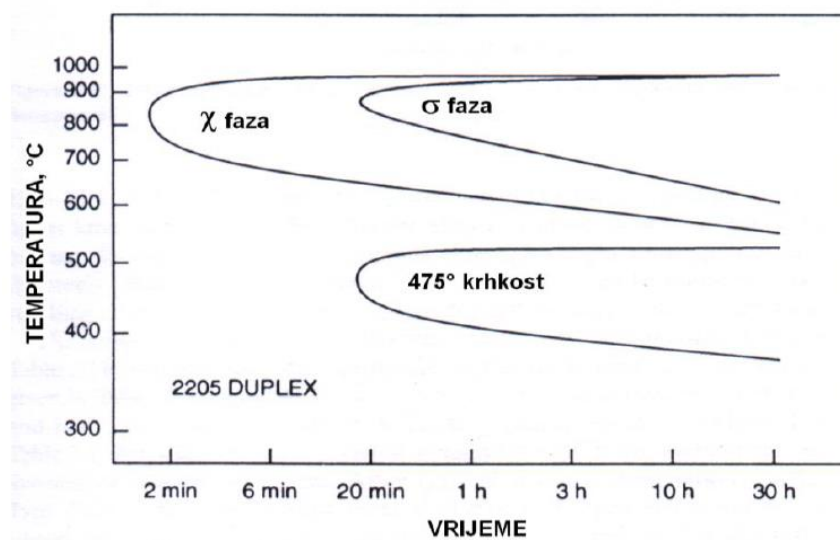




Slika 9. Sigma-faza po granicama ferit/austenit [2].

### Chi-faza

Chi-faza nastaje pri temperaturama između 730 i 1010 °C ukoliko je u čeliku prisutan molibden. Sastav te Fe-Ni-Cr-Mo intermetalne faze u čelicima bez volframa najčešće je 20-28 %Cr, 3- 5,5 %Ni, 9-22 %Mo. U duplex čelicima s volframom Chi-faza sadrži uz Cr i Ni još i 4-17 %Mo i 3-16 %W. Chi-faza, kompleksna faza s kubičnom mikrostrukturom, nepovoljno djeluje na žilavost. Duljim zadržavanjem na povišenim temperaturama chi-faza se pretvara u sigma-fazu. Vrijeme inkubacije za chi-fazu kraće je nego za sigma-fazu. Odnos vremena inkubacije i temperatura nastanka sigma- i chi-faze za duplex čelik oznake X2CrNiMoN 22-5-3 prikazano je na slici 10 [2].



Slika 10. TTT-dijagram nastanka štetnih faza za duplex čelik X2CrNiMoN 22-5-3 [2].

### 3. TROŠENJE

Trošenje se definira kao postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama [5].

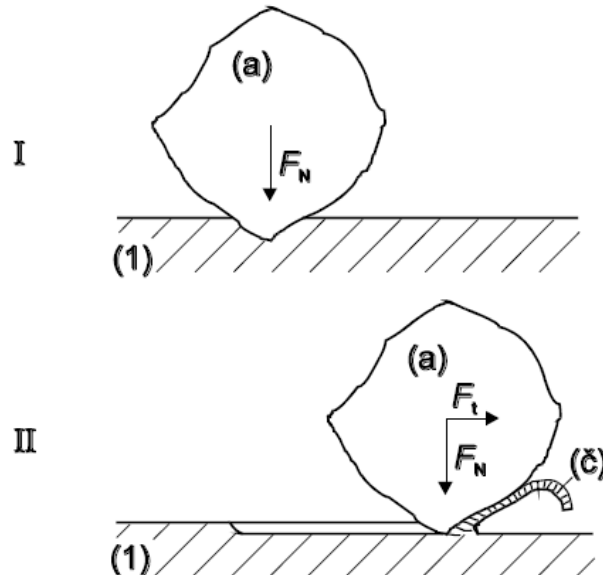
Vrste trošenja dijele se na četiri osnovna mehanizma trošenja:

- abrazija
- adhezija
- umor površine
- tribokorozija

Pri opisivanju pojedinih mehanizama trošenja koristi se pojam jediničnog događaja. Jedinični događaj je tijek zbivanja koji opisuje odvajanje jedne čestice trošenja s trošene površine.

#### 3.1. Abrazija

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja kako je prikazano na slici 11 [5].



Slika 11. Jedinični događaj abrazije [5]

Jedinični događaj abrazije promatramo kroz dvije faze:

- u prvoj fazi dolazi do prodiranja abraziva (a) u površinu materijala pod utjecajem normalne komponente opterećenja  $F_N$
- u drugoj fazi dolazi do istiskivanja materijala u obliku čestice trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente sile  $F_t$

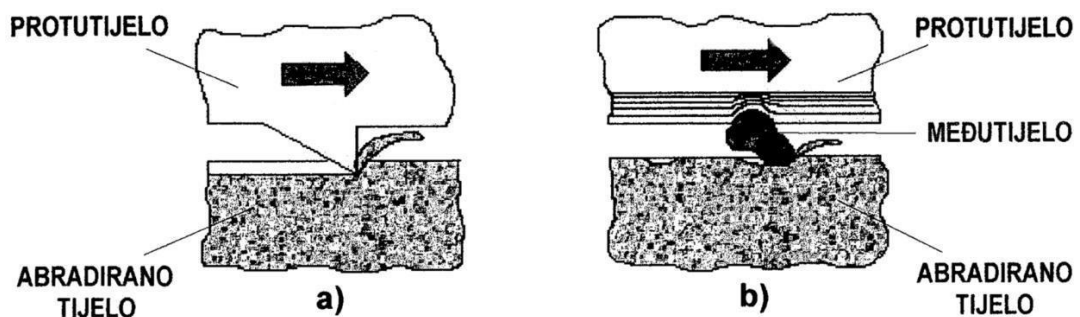
Metoda „suhi pijesak/gumeni kotač“, ispitivanje abrazije na Taber abraderu i ispitivanje trošenja kuglicom samo su neke od metoda ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje. Kod metode ispitivanja na Taber abraderu, mjeri se broj okretaja te se intenzitet trošenja gleda kao funkcija gubitka mase i broja okretaja [5].

Mehanizam abrazije najčešće razmatramo s tri različita gledišta:

1) *Ovisno o strukturi tribosustava u kome se zbiva abrazija* pojavljuju se dva oblika abrazije, koji su prikazani na slici 12:

a) abrazija u dodiru dvaju tijela – tribosustav čine dva funkcionalna dijela (abrazijsko tijelo i abrazijsko protutijelo)

b) abrazija u dodiru triju tijela – tribosustav čine dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i protutijelo) te međutijela, to jest čestice koje se slobodno gibaju između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski.



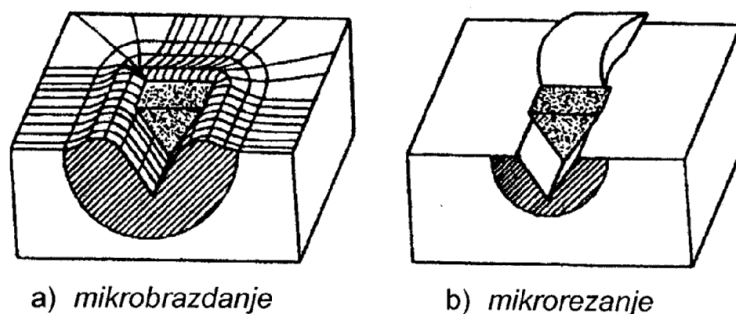
Slika 12. Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b) [5]

2) Ovisno o međusobnom djelovanju između abrazivskih čestica i trošene površine postoje:

a) Mikrobrazdanje – pri prolazu jedne abrazivne čestice nastaje plastična deformacija određenog volumena brazde koji je proporcionalan odnošenom materijala. To se odvija uz uvjet da se rubovi brazde odvoje od površine u obliku produkata trošenja.

b) Mikrorezanje – zarez nastao prolaskom abrazivne čestice jednak je volumenu odnešenog materijala.

Na slici 13 prikazane su trošene površine kod mikrobrazdanja i mikrorezanja.

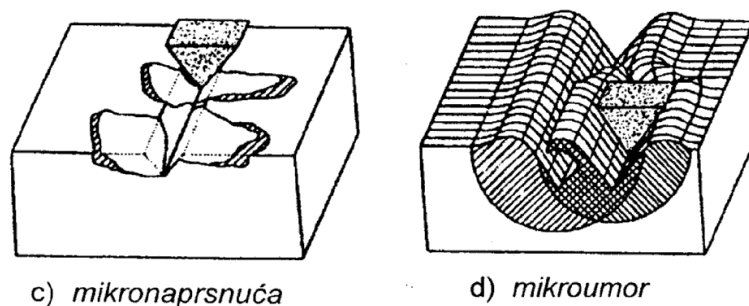


Slika 13. Trošenje mehanizmom mikrobrazdanja (a) i mikrorezanja (b) [5]

c) Mikronaprsnuća – odnošenje većih dijelova materijala s krhke površine mehanizmom nastanka i širenja mikropukotina

d) Mikroumor – odnošenje materijala pod utjecajem dugotrajnog izmjeničnog opterećenja. Nastaju mikropukotine koje se šire i uzrokuju odvajanje dijelova materijala trošene površine radi izloženosti materijala trenutnim deformacijama.

Mikroumor i mikronaprsnuća prikazana su na slici 14.

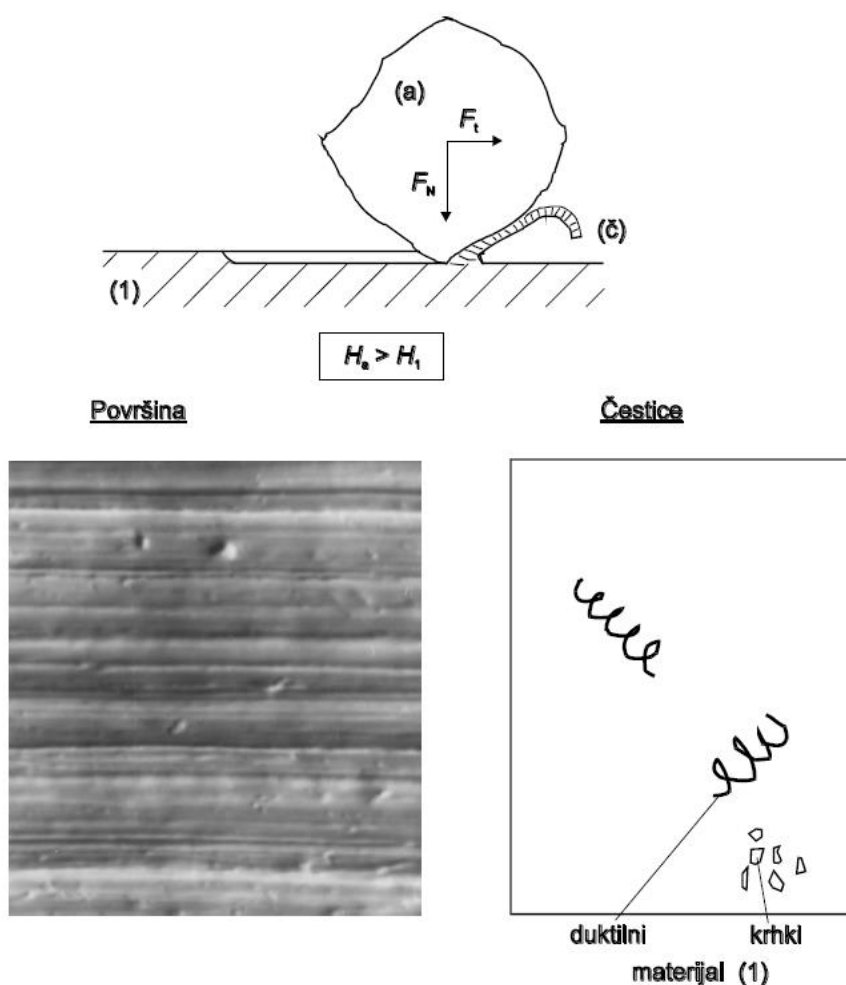


Slika 14. Trošenje mehanizmom mikronaprsnuća (c) i mikroumora (d) [5]

3) Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i materijala razlikujemo tri slučaja:

a) „Čista“ abrazija – nastaje kada je je tvrdoća abraziva (a) veća od tvrdoće trošene podloge (1). Trošena površina izgleda izbrazdano. Čestice trošenja u slučaju kad je abradirani materijal duktilan su spiralne strugotine, a kod krhkih materijala su lomljene strugotine.

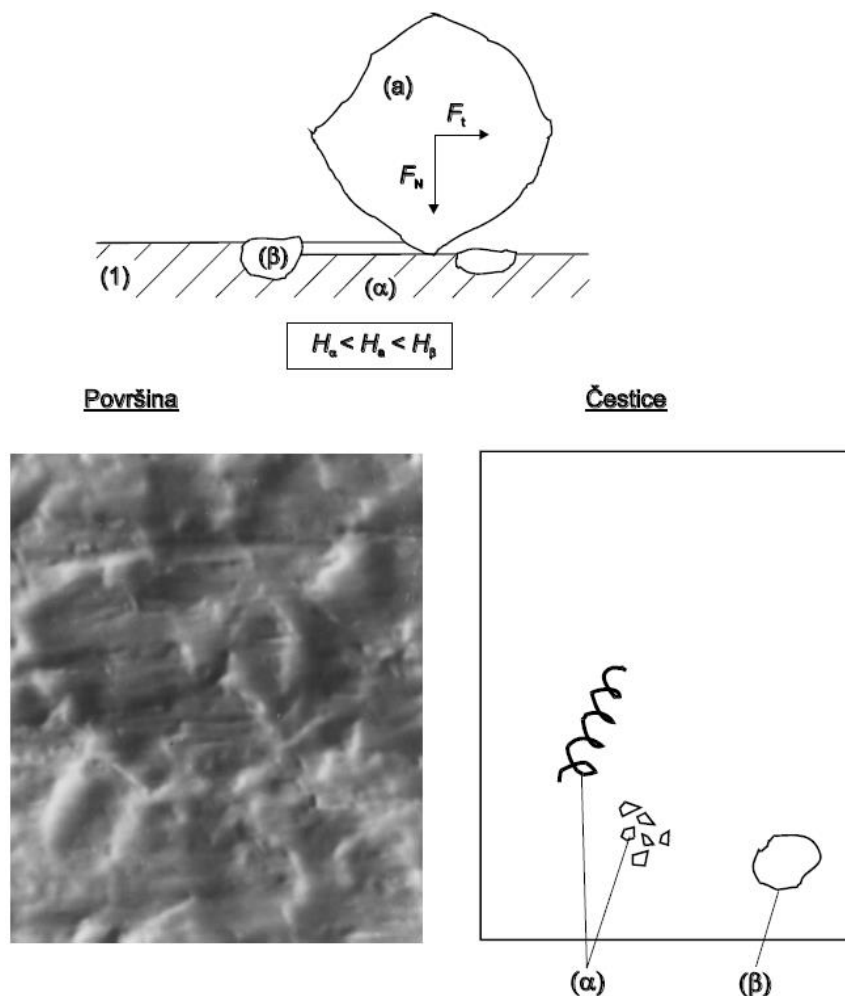
Ovaj slučaj abrazije prikazan je na slici 15.



Slika 15. „Čista“ abrazija [5]

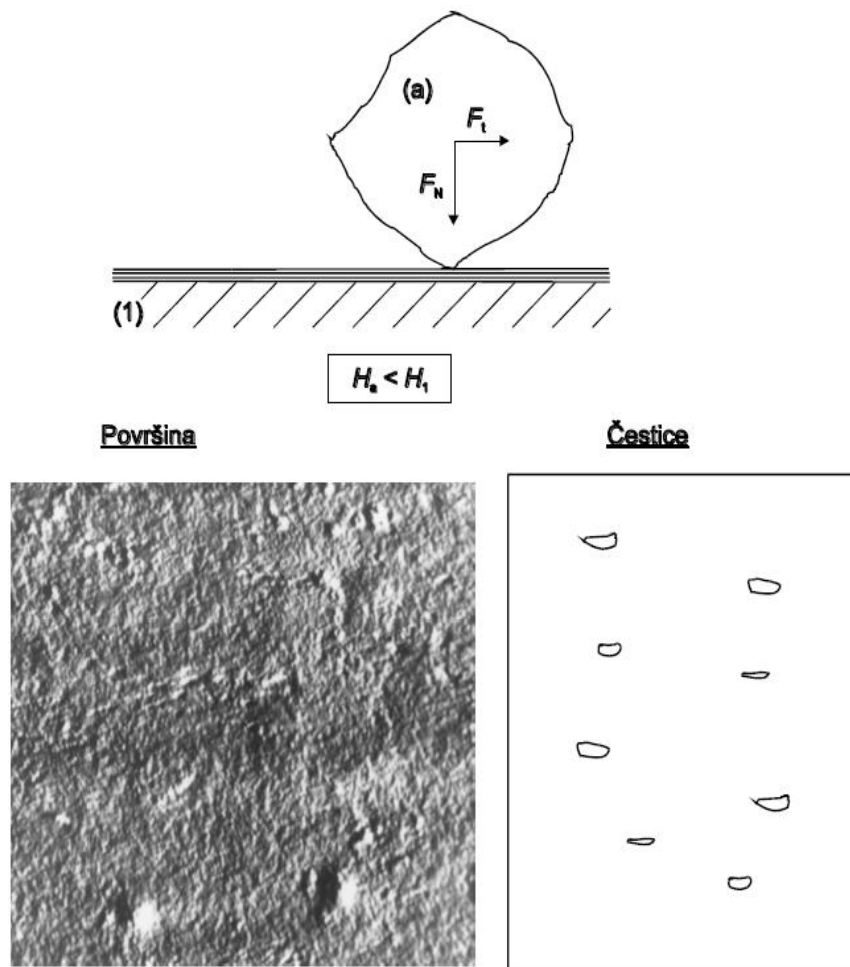
b) Selektivna abrazija – nastaje kada u abradiranom materijalu postoji faza tvrđa od abraziva. Abraziv tada troši samo mekšu fazu u materijalu. Površina je također izbrazdana, s prekidima na mjestima tvrde faze.

Selektivna abrazija prikazana je shematski na slici 16.



Slika 16. Selektivna abrazija [5]

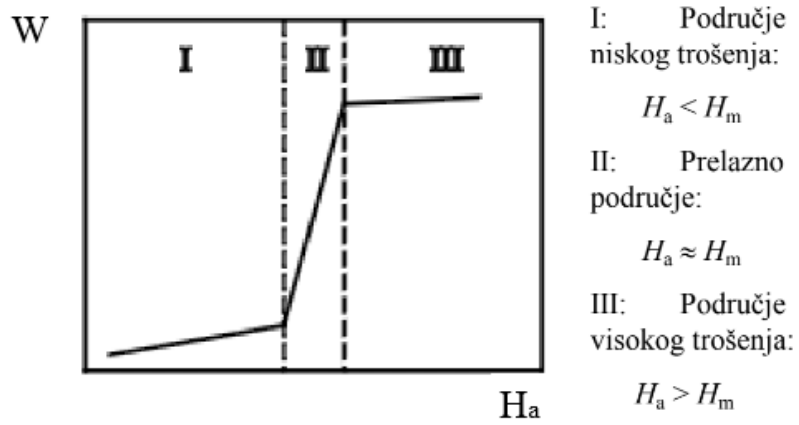
c) „Nulta“ abrazija – nastaje kada je cijela abradirana površina tvrđa od abraziva. Površina je poliranog izgleda, a čestice trošenja su sitne ljuskice iz vanjskog graničnog sloja. Nulta abrazija, prikazana na slici 17, javlja se na površini materijala koji su prevučeni nekim od postupaka inženjerstva površina.



Slika 17. „Nulta“ abrazija [5]

### 3.2. Otpornost na abraziju

Najznačajniji faktor otpornosti na prodiranje abraziva u površinu materijala je međusobni omjer mikrotvrdoće abraziva i materijala trošene površine. Ovisnost abrazijskog trošenja o tvrdoćama abraziva i materijala prikazana je na slici 18. Intenzitet trošenja ( $W$ ) poprima visoke vrijednosti u slučaju kada je tvrdoća abraziva ( $H_a$ ) jednaka ili veća od tvrdoće materijala ( $H_m$ ). Značajan faktor otpornosti na abraziju je tvrdoća trošenog materijala. Otpornost na abrazijsko trošenje raste s porastom tvrdoće materijala. Na intenzitet abrazijskog trošenja, osim tvrdoće abrazivnih čestica, utječe i oblik te veličina abrazivskih čestica.



Slika 18. Ovisnost abrazijskog trošenja o tvrdoćama abraziva i materijala [5]



## 4. EKSPERIMENTALNI DIO

### 4.1. Cilj rada

Cilj rada je utvrditi utjecaj mikrostrukturnih promjena kod dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva oznake GX2CrNiMoN 25-6-3 na otpornost prema abrazijskom trošenju. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je na uređaju *Taber abrader*, na dvije različite kvalitete brusnog papira, P220 i P500.

### 4.2. Materijal za ispitivanje

Kemijski sastav dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva oznake GX2CrNiMoN 25-6-3 na kome su provedena sva ispitivanja prikazan je u tablici 1.

**Tablica 1. Kemijski sastav dupleks nehrđajućeg lijeva oznake oznake GX2CrNiMoN 25-6-3 [6]**

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

Uzorci su izrezani iz odljevka prikazanog na slici 19. Izrezana su dva uzorka koja su korištena za ispitivanje abrazijske otpornosti prije i nakon toplinske obrade. Na istim uzorcima provedeno je i mjerenje mikrotvrdoće te analiza mikrostrukture u poliranom i nagriženom stanju. Navedeni uzorci prikazani su na slici 20.



**Slika 19.** Odljevak dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva iz kojeg su izrezani uzorci za ispitivanje



**Slika 20.** Izrezani uzorci za ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje

### 4.3. Provođenje ispitivanja

Na izrezanim uzorcima provedena su sljedeća ispitivanja:

- ispitivanje abrazijske otpornosti
- mjerenje mikrotvrdoće
- analiza mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu u poliranom i nagriženom stanju

Navedena ispitivanja provedena su u polaznom, odljevenom stanju i nakon toplinske obrade koja se sastojala od žarenja na 750 °C u trajanju od 60 minuta. Žarenje je provedeno s ciljem izlučivanja sigma-faze u mikrostrukтури dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva.

#### 4.3.1. Ispitivanje abrazijske otpornosti

Ispitivanje abrazijske otpornosti provedeno je na uređaju *Taber abrader*, u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanju su podvrgnuta dva uzorka prikazana na slici 20. Ispitivanje je provedeno na dvije različite kvalitete brusnih papira, s abrazivnim česticama silicijeva karbida (SiC) srednjeg promjera 68 μm (P220) i 30,2 μm (P500). Na svakom uzorku provedena su po tri ciklusa trošenja na svakom brusnom papiru. Svaki ciklus je uključivao 100 okretaja brusnog diska što bi odgovaralo duljini trošenja od oko 25 m. Prije i poslije svakog ciklusa izmjerena je masa uzorka i na temelju toga određen je gubitak mase izazvan abrazijskim trošenjem. Intenzitet abrazijskog trošenja obično se iskazuje preko gubitka volumena svedenog na abradiranu površinu, ali kako se ovdje radi o uzorcima iste gustoće i iste abradirane površine, intenzitet abrazijskog trošenja može se iskazati preko gubitka mase. Uzorak se postavlja u nosač uređaja, steže se te se oslanja na površinu brusnog papira pritisnut konstantnom silom od 4,91 N. Promjer diska na kojem se nalazi brusni papir je 125 mm, njegova obodna brzina je 0,251 m/s, a uređaj rotira brzinom od 1 o/s.

Opisano ispitivanje provedeno je na izvornim, toplinski neobrađenim uzorcima u odljevenom stanju i na istim uzorcima u toplinski obrađenom stanju.

Uređaj *Taber abrader* prikazan je na slici 21, a uređaj za mjerenje mase na slici 22.



Slika 21. Taber abrader



Slika 22. Uredaj za mjerenje mase Mettler Zürich

#### 4.3.2. Mjerenje mikrotvrdoće HV0,2

Radi pretpostavke da otpornost na abrazijsko trošenje raste s porastom tvrdoće materijala, provedeno je mjerenje mikrotvrdoće HV0,2 u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanje je provedeno metodom prema Vickersu na uređaju PMT-3, prikazanom na slici 23. Indentor je četverostrana dijamantna piramida koja pritišće površinu uzorka opterećenjem utega mase 200 g. Provedeno je po pet mjerenja mikrotvrdoće na poliranoj površini uzoraka prije i nakon toplinske obrade.



Slika 23. Uređaj za mjerenje tvrdoće

#### 4.3.3. Mikrostrukturalna karakterizacija

Analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na optičkom mikroskopu OLYMPUS GX51, slika 24. Korištena su povećanja od 50×, 100×, 200× 500× i 1000×.



**Slika 24. Optički mikroskop OLYMPUS GX51**

Ispitni uzorak je zaliven u polimernu masu na pneumatskoj preši *Pneumet Press*, slika 25. Nakon zaljevanja površina uzorka je metalografski pripremljena brušenjem i poliranjem. Nakon postupka poliranja površina uzorka je promatrana pod mikroskopom, a nakon toga površina uzorka je nagrižena kako bi se otkrila mikrostruktura uzorka.

Toplinski neobrađeni uzorak nagrižen je elektrokemijski, a toplinski obrađeni uzorak nagrižen je u Murakami otopini. Murakami otopina sastoji se od 100 mL vode, 10 g kalijeveg fericijanida i 10 g kalijeveg hidroksida. Otopina je zagrijana na 50 °C prije nego se u nju uroni uzorak na četrdesetak sekundi. Uzorci su zatim isprani u vodi pa u alkoholu te su sušeni u struji toplog zraka. Murakami otopina različito nagriža različite faze, sigma-faza je tamnija od feritne, dok austenitna faza ne reagira s otopinom.

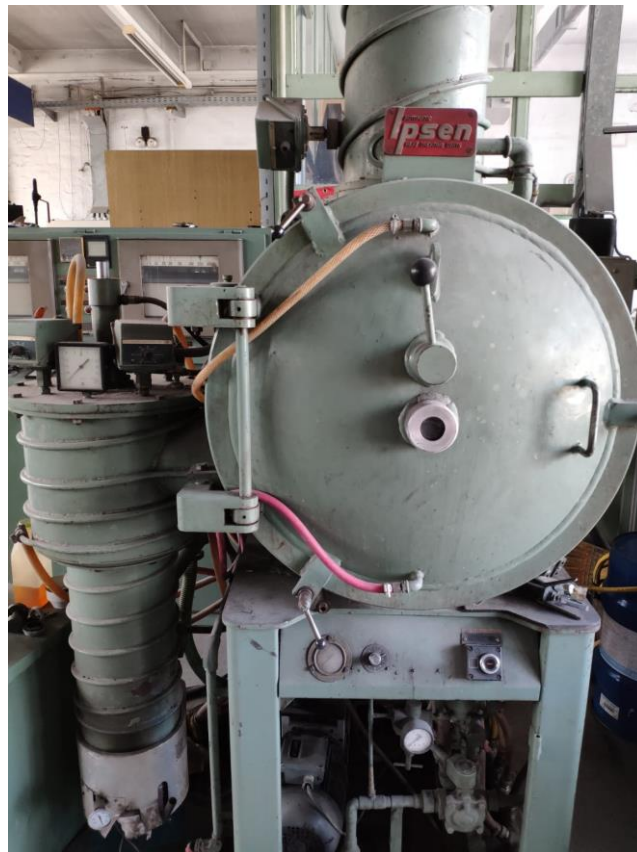
Uz kvalitativnu, provedena je i kvantitativna analiza mikrostrukture dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva, prije i nakon toplinske obrade.



Slika 25. Preša za zalijevanje uzoraka

#### 4.3.4. Toplinska obrada

Toplinska obrada uzoraka provedena u Laboratoriju za toplinsku obradu na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, a napravljena je sa svrhom promjene izbalansirane mikrostrukture dupleks čeličnog lijeva. Proces je proveden u vakuumskoj peći *Ipsen* prikazanoj na slici 26.

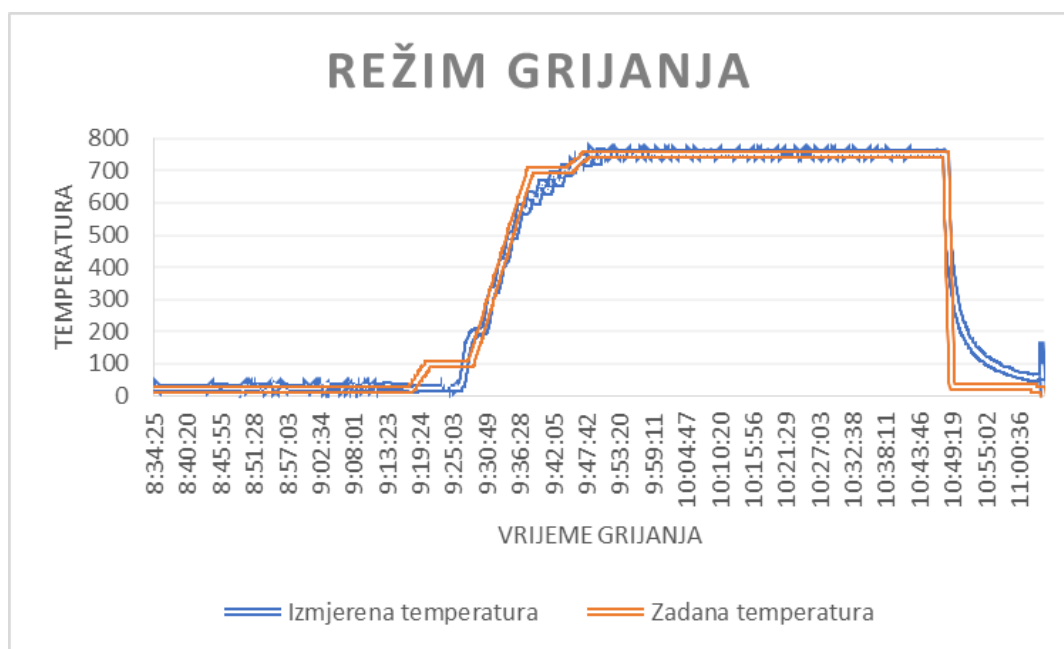


**Slika 26. Vakuumska peć Ipsen**

Nakon što je u peći postignuta razrijeđena zračna atmosfera, uzorci su predgrijavani dvadesetak minuta. Uzorci su zatim držani sat vremena na temperaturi od 750 °C kako bi se narušio izbalansirani odnos ferita i austenita u mikrostrukturi i kako bi se izazvalo formiranje krhke i tvrde sigma-faze. Hlađenje uzoraka provedeno je u zaštitnoj atmosferi dušika. Navedena temperatura i vrijeme žarenja izabrani su iz literaturnih podataka [7].

Režim grijanja uzorka prikazan je dijagramom na slici 27.





Slika 27. Režim grijanja uzoraka

#### 4.4. Rezultati ispitivanja

##### 4.4.1. Rezultati ispitivanja prije provedene toplinske obrade

###### Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje

Ispitivanje na Taber abraderu je provedeno od finijeg brusnog papira prema grubljem. U tablici je naveden gubitak mase nakon svakog ciklusa trošenja od 100 okretaja. Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za uzorak 1 i 2 prije provedene toplinske obrade za ispitivanje na brusnom papiru P500 prikazani su u tablici 2, a za ispitivanje na brusnom papiru P220 u tablici 3.

**Tablica 2. Gubitak mase uzoraka pri ispitivanju abrazijskog trošenja na brusnom papiru P500**

| Uzorak 1       |                      |   |
|----------------|----------------------|---|
| Masa uzorka, g | Gubitak mase, mg     | Srednja vrijednost gubitka mase, mg               |
| $m_0=4,3981$   | $\Delta m_{0-1}=3,0$ | <b><math>\Delta m_{\text{srednje}}=2,2</math></b> |
| $m_1=4,3951$   |                      |   |
| $m_2=4,3939$   | $\Delta m_{1-2}=1,3$ |   |
| $m_3=4,3914$   | $\Delta m_{2-3}=2,4$ |   |
| Uzorak 2       |                      |   |
| Masa uzorka, g | Gubitak mase, mg     | Srednja vrijednost gubitka mase, mg               |
| $m_0=3,5182$   | $\Delta m_{0-1}=2,1$ | <b><math>\Delta m_{\text{srednje}}=2,3</math></b> |
| $m_1=3,5161$   |                      |   |
| $m_2=3,5144$   | $\Delta m_{1-2}=1,7$ |   |
| $m_3=3,5113$   | $\Delta m_{2-3}=3,1$ |   |

**Tablica 3. Gubitak mase uzoraka pri ispitivanju abrazijskog trošenja na brusnom papiru P220**

| Uzorak 1       |                      |   |
|----------------|----------------------|---|
| Masa uzorka, g | Gubitak mase, mg     | Srednja vrijednost gubitka mase, mg               |
| $m_0=4,3914$   | $\Delta m_{0-1}=8,1$ | <b><math>\Delta m_{\text{srednje}}=5,7</math></b> |
| $m_1=4,3833$   |                      |   |
| $m_2=4,3791$   | $\Delta m_{1-2}=4,2$ |   |
| $m_3=4,3742$   | $\Delta m_{2-3}=4,9$ |   |
| Uzorak 2       |                      |   |
| Masa uzorka, g | Gubitak mase, mg     | Srednja vrijednost gubitka mase, mg               |
| $m_0=3,5113$   | $\Delta m_{0-1}=6,0$ | <b><math>\Delta m_{\text{srednje}}=6,5</math></b> |
| $m_1=3,5053$   |                      |   |
| $m_2=3,4963$   | $\Delta m_{1-2}=9,0$ |   |
| $m_3=3,4917$   | $\Delta m_{2-3}=4,6$ |   |

Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće

Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 prikazani su u tablici 4. Provedeno je pet ispitivanja na jednom uzorku te je izračunata srednja vrijednost mikrotvrdoće.

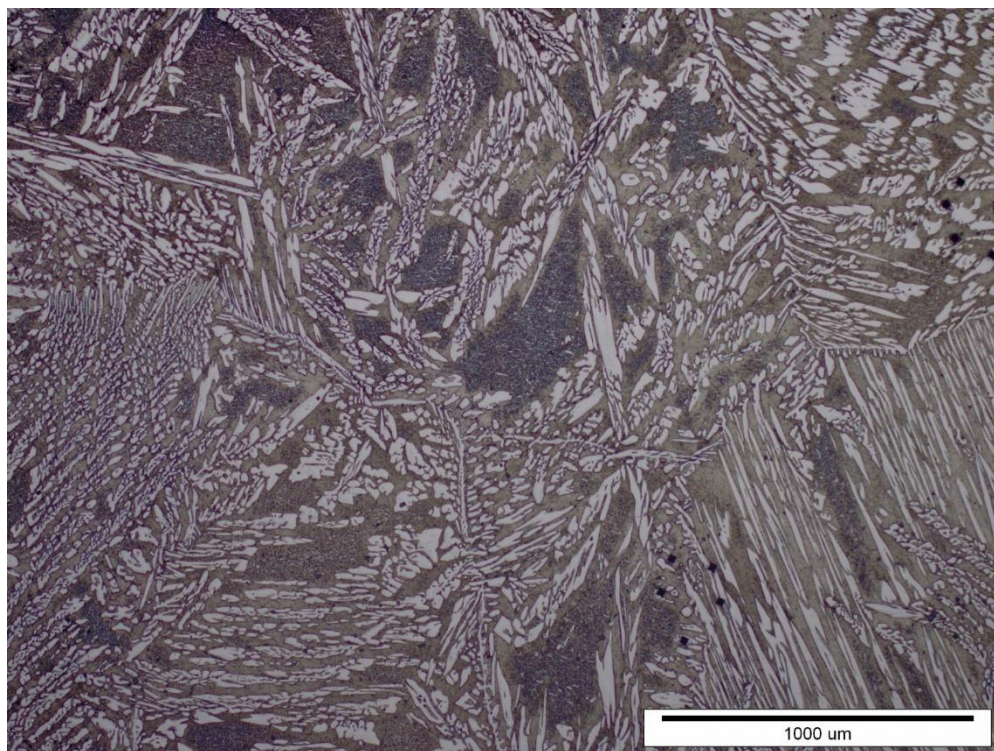
**Tablica 4. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće prije provedene toplinske obrade HV0,2**

| Mjerenje                   | Mikrotvrdoća HV0,2 |
|----------------------------|--------------------|
| 1                          | 186                |
| 2                          | 194                |
| 3                          | 189                |
| 4                          | 197                |
| 5                          | 213                |
| Srednja vrijednost tvrdoće | <b>195,8</b>       |

#### Rezultati mikrostrukturne karakterizacije

Mikrostruktura uzorka prije provedene toplinske obrada analizirana je u poliranom i nagriženom stanju pri različitim povećanjima. U poliranom stanju nisu uočene nikakve nepravilnosti u mikrostrukтури. Nakon elektronagrizanja otkriveno je da se mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva sastoji od ferita i austenita u podjednakoј količini (volumni udjeli 50:50).

Na slici 28 prikazana je mikrostruktura uzorka dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva snimljena pri povećanju 50×. Tamna faza na slici 28 predstavlja ferit, a svjetla faza je austenit.



**Slika 28.** Mikrostruktura snimljena pri povećanju 50×

#### **4.4.2. Rezultati ispitivanja nakon provedene toplinske obrade**

##### Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje

Rezultati ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje za uzorak 1 i 2 nakon provedene toplinske obrade za ispitivanje na brusnom papiru P500 prikazani su u tablici 5, a za ispitivanje na brusnom papiru P220 u tablici 6.

Tablica 5. Gubitak mase uzoraka pri ispitivanju abrazijskog trošenja na brusnom papiru P500

| Uzorak 1       |                      |   |
|----------------|----------------------|---|
| Masa uzorka, g | Gubitak mase, mg     | Srednja vrijednost gubitka mase, mg               |
| $m_0=4,3648$   | $\Delta m_{0-1}=3,3$ | <b><math>\Delta m_{\text{srednje}}=2,4</math></b> |
| $m_1=4,3615$   |                      |   |
| $m_2=4,3591$   | $\Delta m_{1-2}=2,4$ |   |
| $m_3=4,3575$   | $\Delta m_{2-3}=1,6$ |   |
| Uzorak 2       |                      |   |
| Masa uzorka, g | Gubitak mase, mg     | Srednja vrijednost gubitka mase, mg               |
| $m_0=3,4856$   | $\Delta m_{0-1}=1,4$ | <b><math>\Delta m_{\text{srednje}}=1,9</math></b> |
| $m_1=3,4842$   |                      |   |
| $m_2=3,4819$   | $\Delta m_{1-2}=2,3$ |   |
| $m_3=3,4799$   | $\Delta m_{2-3}=2,0$ |   |

**Tablica 6. Gubitak mase uzoraka pri ispitivanju abrazijskog trošenja na brusnom papiru P220**

| Uzorak 1       |                      |   |
|----------------|----------------------|---|
| Masa uzorka, g | Gubitak mase, mg     | Srednja vrijednost gubitka mase, mg               |
| $m_0=4,3575$   | $\Delta m_{0-1}=4,6$ | <b><math>\Delta m_{\text{srednje}}=4,8</math></b> |
| $m_1=4,3529$   |                      |   |
| $m_2=4,3475$   | $\Delta m_{1-2}=5,4$ |   |
| $m_3=4,3431$   | $\Delta m_{2-3}=4,4$ |   |
| Uzorak 2       |                      |   |
| Masa uzorka, g | Gubitak mase, mg     | Srednja vrijednost gubitka mase, mg               |
| $m_0=3,4799$   | $\Delta m_{0-1}=5,8$ | <b><math>\Delta m_{\text{srednje}}=5,3</math></b> |
| $m_1=3,4741$   |                      |   |
| $m_2=3,4691$   | $\Delta m_{1-2}=5,0$ |   |
| $m_3=3,4639$   | $\Delta m_{2-3}=5,2$ |   |

#### Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće

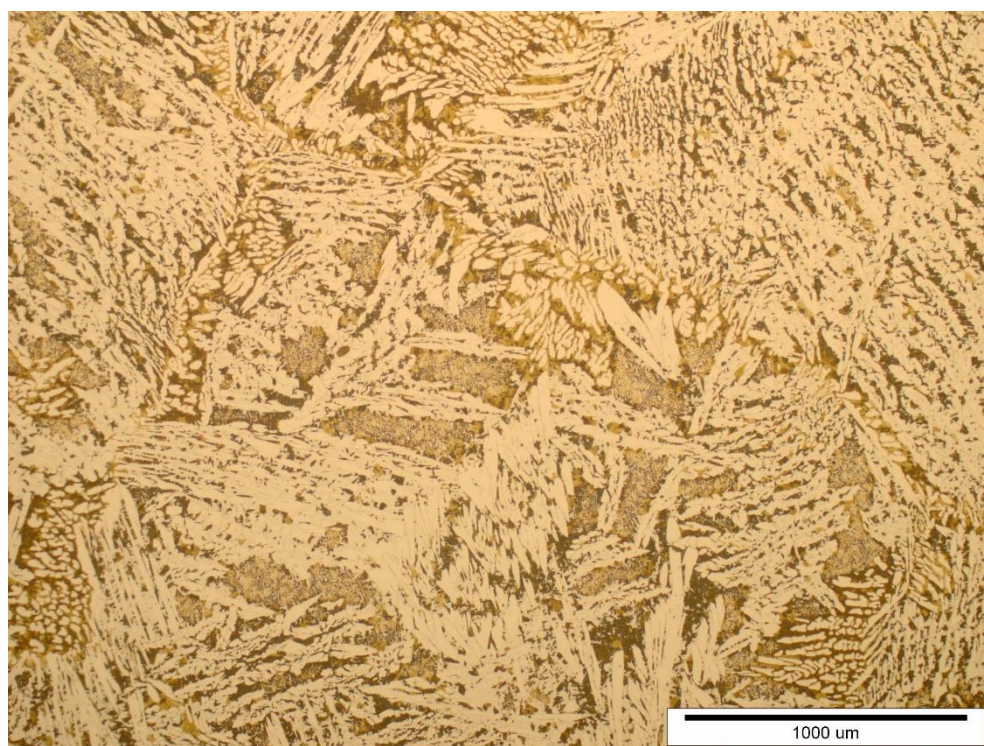
Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 na uzorku dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva nakon provedene toplinske obrade prikazani su u tablici 7.

**Tablica 7. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 nakon provedene toplinske obrade**

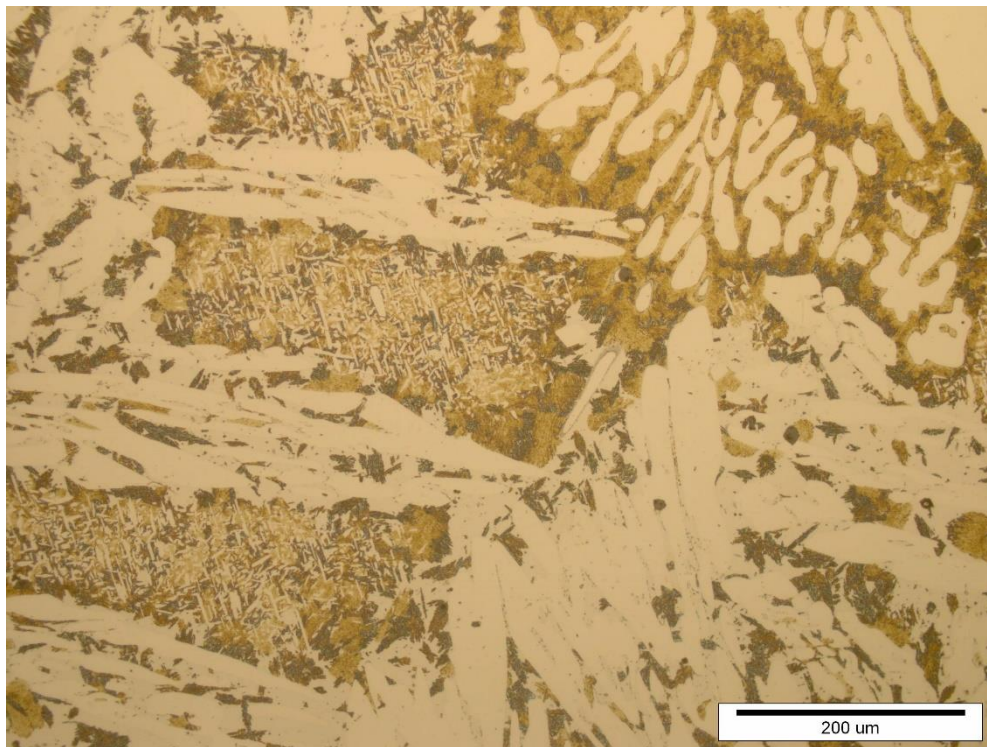
| Mjerenje                   | Mikrotvrdoća HV0,2 |
|----------------------------|--------------------|
| 1                          | 313                |
| 2                          | 319                |
| 3                          | 227                |
| 4                          | 355                |
| 5                          | 407                |
| Srednja vrijednost tvrdoće | <b>324,2</b>       |

#### Rezultati mikrostrukturne karakterizacije

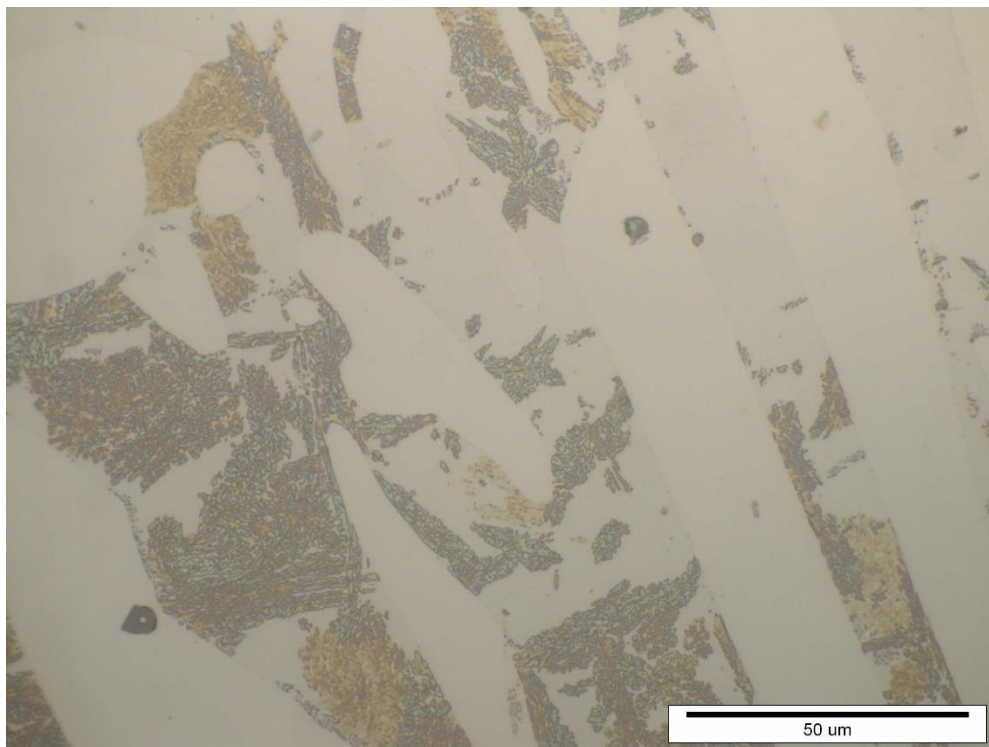
Mikrostruktura uzorka dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva nakon provedene toplinske obrade, u nagriženom stanju, prikazana je na slikama od 29 do 32. Nenagrižena, svijetla faza je austenit, a najtamnija faza na fotografijama je sigma-faza. Feritna faza je srednjeg intenziteta sivila.

**Slika 29. Mikrostruktura snimljena pri povećanju 50×**

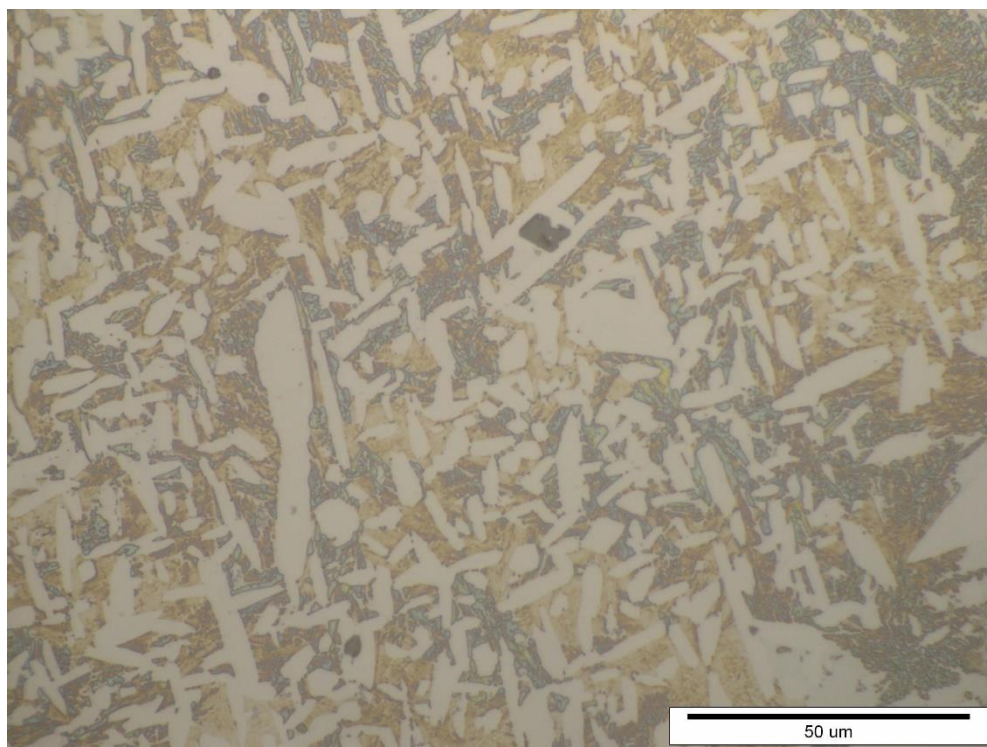




**Slika 30.** Mikrostruktura snimljena pri povećanju 200×



**Slika 31.** Mikrostruktura snimljena pri povećanju 1000×

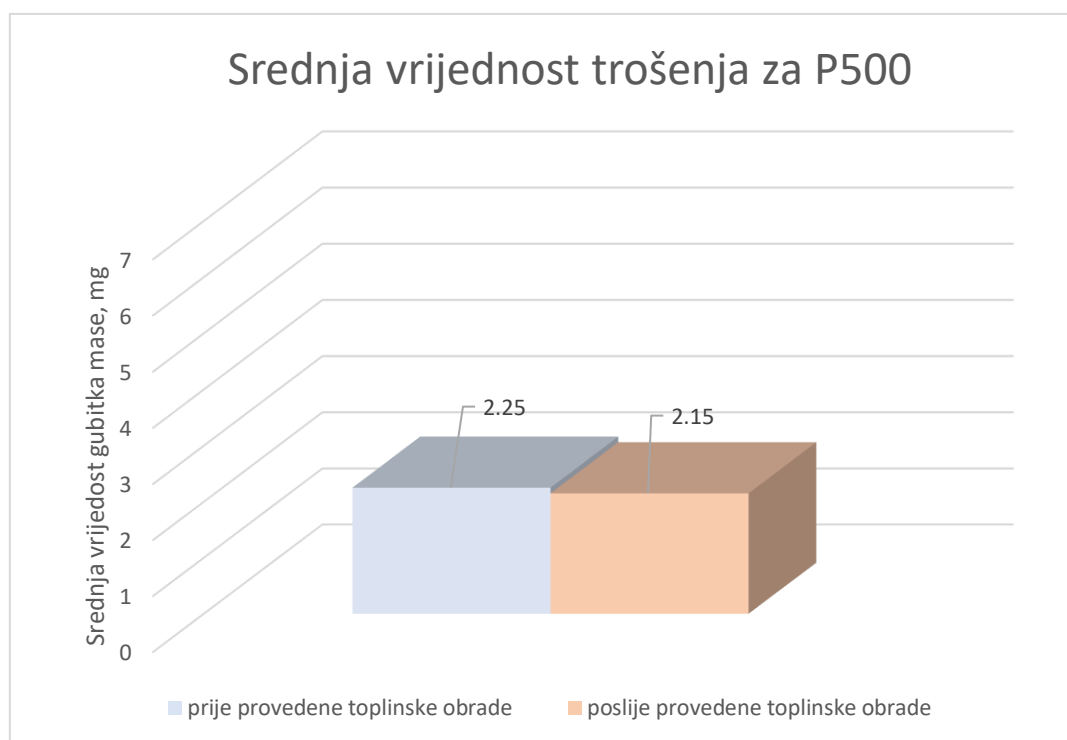


Slika 32. Mikrostruktura snimljena pri povećanju 1000×

#### 4.5. Analiza rezultata

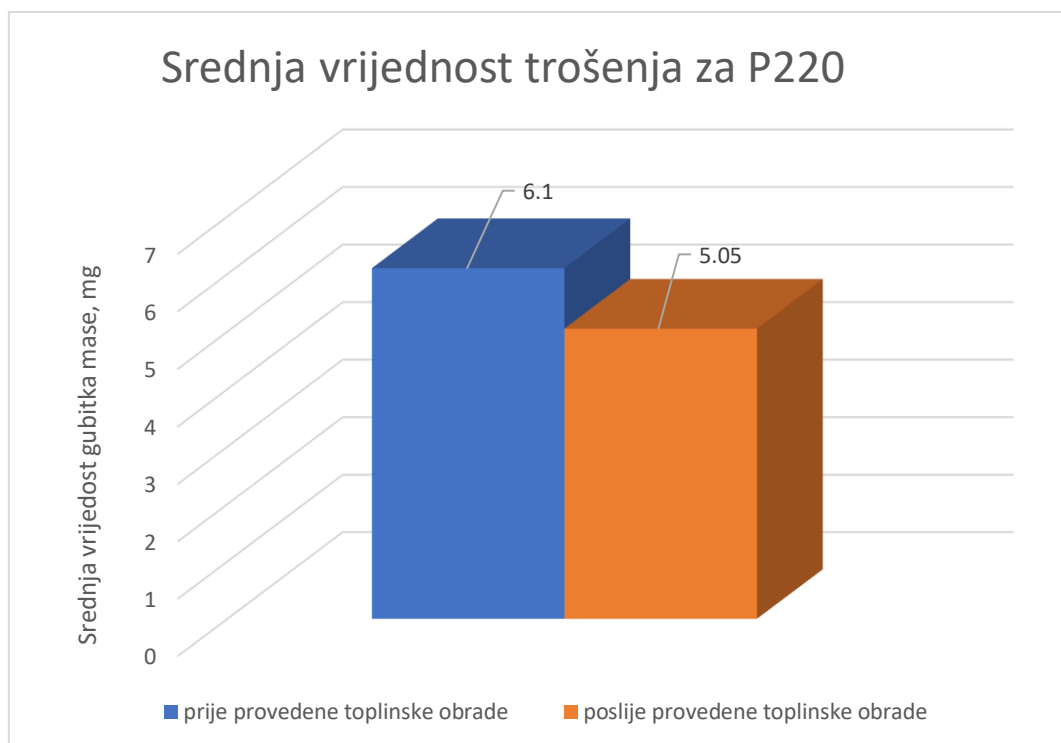
##### 4.5.1. Analiza rezultata ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje

Utjecaj provedene toplinske obrade i promjene mikrostrukture koju je ta toplinska obrada uzrokovala prikazan je na slikama 33 i 34. Mikrostruktura prije toplinske obrade sastojala se od ferita i austenita u podjednakim udjelima (50:50) a žarenje na 750 °C u trajanju od jednog sata narušilo je ovu izbalansiranu mikrostrukturu. Udio austenita se povećao na oko 71 %, udio ferita smanjio se na oko 16 %, a u mikrostrukturi se izlučila tvrda i krhka sigma-faza u količini od oko 13 %. Sve ove mikrostrukturne promjene uzrokovale su smanjenje intenziteta trošenja na oba brusna papira. Rezultati srednje vrijednosti intenziteta abrazijskog trošenja prije i poslije provedene toplinske obrade za ispitivanje na brusnom papiru P500 prikazani su na slici 33. Razlika u intenzitetu trošenja nije velika, ali se ipak može uočiti smanjenje abrazijskog trošenja nakon provedene toplinske obrade.



**Slika 33. Srednja vrijednost gubitka mase uzoraka prije i poslije provedene toplinske obrade na brusnom papiru P500**

Grafički prikaz rezultata srednje vrijednosti intenziteta abrazijskog trošenja prije i poslije provedene toplinske obrade za brusni papir P220 prikazan je na slici 34. Može se uočiti da je na finijem brusnom papiru manja razlika u intenzitetu abrazijskog trošenja.



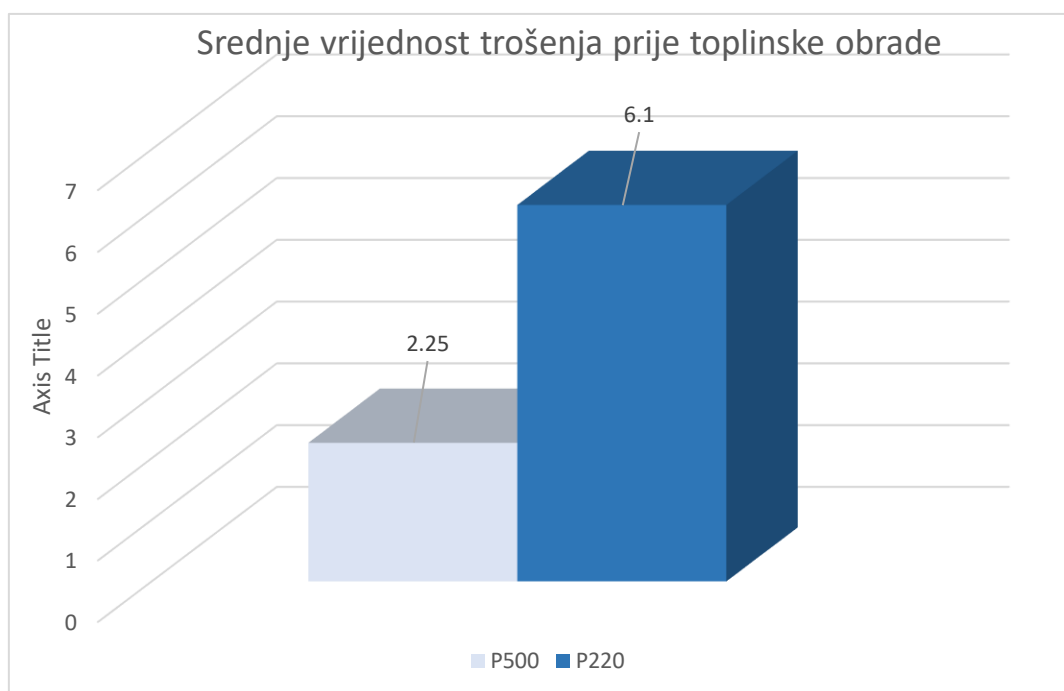
**Slika 34. Srednja vrijednost gubitka mase uzoraka prije i poslije provedene toplinske obrade na brusnom papiru P220**

Provedba toplinske obrade, odnosno promjena izbalansirane mikrostrukture i formiranja nove mikrostrukturne faze, rezultirala je smanjenjem srednje vrijednosti intenziteta abrazijskog trošenja. Pri ispitivanju abrazijskog trošenja, izraženog preko gubitka mase, na brusnom papiru P220, tvrda sigma-faza znatno utječe na abrazijsku otpornost.

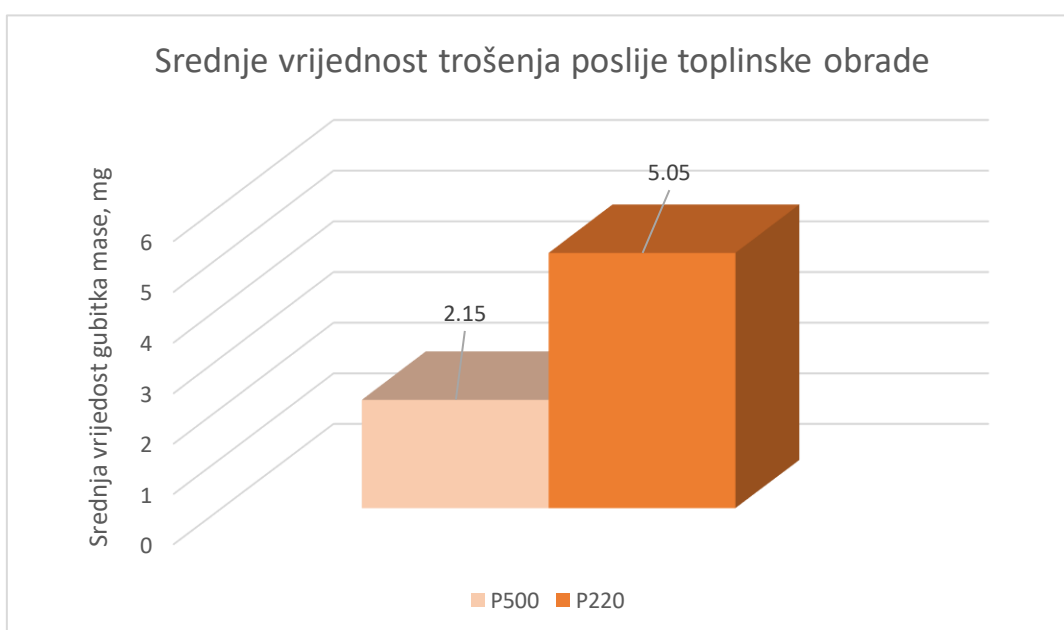
Na brusnom papiru manje veličine abrazivnog zrna (P500) prije toplinske obrade primjećuje se mali pad vrijednosti intenziteta trošenja u odnosu na vrijednosti nakon provedene toplinske obrade. Kod brusnog papira s većim abrazivnim zrnom (P220) veća je razlika srednje vrijednosti intenziteta trošenja prije i nakon provedene toplinske.

Utjecaj kvalitete brusnog papira, odnosno veličine abrazivnog zrna na postignute rezultate prikazan je na slikama 35 i 36.

Na slici 35 prikazan je utjecaj veličine abrazivnog zrna na intenzitet abrazijskog trošenja dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva prije toplinske obrade, za izbalansiranu mikrostrukturu s 50 % ferita i 50 % austenita. Može se vidjeti da kvaliteta brusnog papira jako utječe na intenzitet abrazijskog trošenja. Što je promjer abrazivne čestice veći to je i intenzitet trošenja veći.



**Slika 35.** Srednja vrijednost trošenja na oba brusna papira prije provedene toplinske obrade



**Slika 36.** Srednja vrijednost trošenja na oba brusna papira poslije provedene toplinske obrade

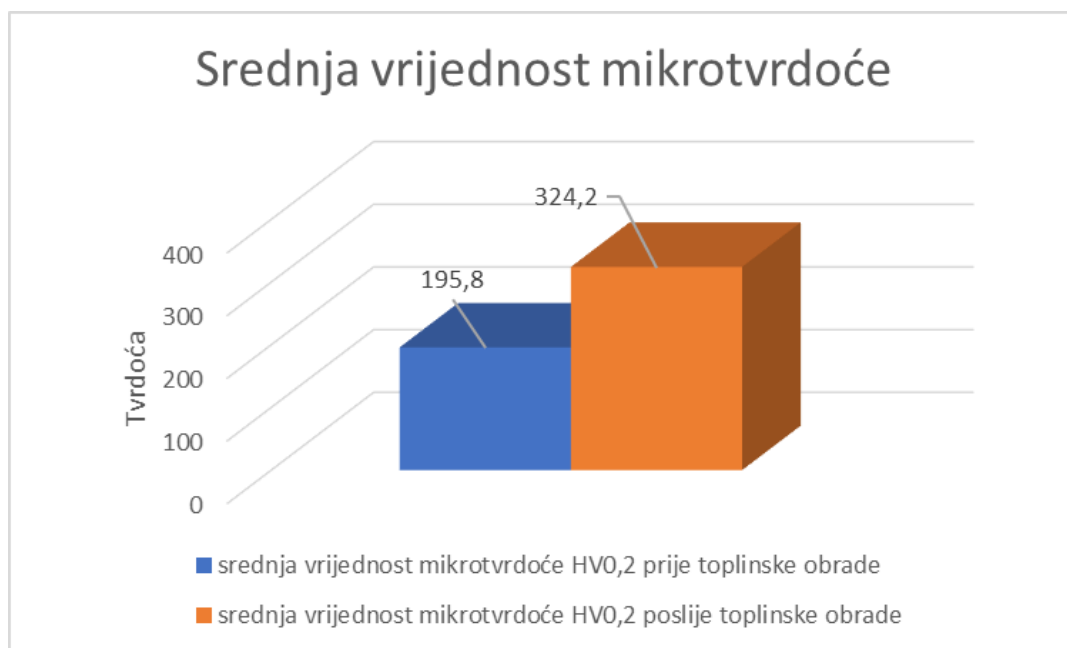
Na slici 36 prikazan je utjecaj veličine abrazivnog zrna na intenzitet abrazivskog trošenja dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva nakon toplinske obrade, za narušen omjer izbalansirane mikrostrukture koje je uzrokovalo žarenje uzoraka sat vremena na 750 °C. Kvaliteta brusnog

papira i nakon žarenja znatno utječe na intenzitet abrazijskog trošenja - s porastom abrazivnog zrna, raste i abrazijsko trošenje.

Za toplinski neobrađene uzorke veličina abrazivnog zrna ima veći utjecaj na intenzitet abrazijskog trošenja nego na toplinski obrađene uzorke s narušenom dupleks strukturom.

#### 4.5.2. Analiza rezultata mjerenja mikrotvrdoće

Utjecaj toplinske obrade na rezultate mjerenja mikrotvrdoće prikazan je na slici 37. Osim što djeluje na intenzitet trošenja, tvrda i krhka sigma-faza koja se formirala kod toplinski obrađenih uzoraka, djeluje i na porast mikrotvrdoće. Porastom udjela sigma-faze, čija tvrdoća iznosi oko 940 HV i viša je od tvrdoće austenita i ferita, dolazi do povećanja mikrotvrdoće analiziranih uzoraka. Porast mikrotvrdoće toplinski obrađenih uzoraka dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva, s narušenom dupleks mikrostrukturom, viši je za oko 128 HV u odnosu na toplinski neobrađene uzorke s izbalansiranom mikrostrukturom.



Slika 37. Srednja vrijednost mikrotvrdoće prije i poslije toplinske obrade

#### **4.5.3. Analiza rezultata mikrostrukturne karakterizacije**

Poznato je da se mikrostruktura dupleks čelika sastoji od podjednakog omjera od otprilike 50% austenita i 50% ferita, ali dovoljno je i 40% ferita da bi svojstva ostala dobra. Usporedbom slika 28 i 29 uočava se da je podjednaki omjer ferita i austenita narušen te ima više austenita u mikrostrukтури. Kvantitativnom analizom mikrostrukture dobiven je volumni udio austenita koji iznosi oko 71%, volumni udio sigma-faze iznosi oko 13%, a volumni udio ferita iznosi oko 16%. Nastanak nove faze nakon procesa toplinske obrade vidljiv je na slikama 30, 31 i 32. Nova faza nastala u mikrostrukтури tijekom grijanja uzorka sat vremena na 750 °C karakterizirana je kao sigma-faza. Na slikama 30 i 31 može se vidjeti kako se područje austenita proširilo te da se u području ferita stvorila  $\sigma$ -faza. Radi nastanka  $\sigma$ -faze, znatno se smanjio udio ferita, a povećao udio austenita u mikrostrukтури.

## 5. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata moguće je zaključiti sljedeće:

- Žarenjem dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva oznake GX2CrNiMoN 25-6-3 na 750 °C u trajanju od jednog sata narušava se izbalansirana feritno-austenita mikrostruktura. Volumni udio ferita se smanjuje (~16%), povećava se udio austenita (~71%) i formira se tvrda i krhka sigma-faza (~13%).
- Formiranjem sigma-faze u mikrostrukturi dupleks nehrđajućeg čeličnog lijeva smanjuje se intenzitet abrazijskog trošenja. Na grubljem brusnom papiru (P220), smanjenje intenziteta abrazijskog trošenja jače je izraženo nego na finijem brusnom papiru (P500).
- Veličina abrazivnih čestica znatno utječe na intenzitet abrazijskog trošenja uzoraka s izbalansiranom feritno-austenitnom mikrostrukturuom i uzoraka s izlučenom sigma-fazom. Utjecaj je izraženiji kod uzoraka s nenarušenom dupleks strukturuom, s podjednakim udjelima ferita i austenita bez sigma-faze.
- Formiranje tvrde i krhke sigma-faze utječe i na povećanje tvrdoće dupleks čeličnog lijeva. Porast mikrotvrdoće uzoraka povezan je sa smanjenjem intenziteta trošenja.



**LITERATURA**

- [1] V. Rede, Z. Šokčević: *Nehrđajući čelični ljevovi*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.
- [2] V. Rede: *Nehrđajući čelici*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, autorizirana predavanja Zagreb, 2017.
- [3] [https://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/?action=view&site\\_id=50&id=6020](https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/?action=view&site_id=50&id=6020) [18.8.2020.]
- [4] Alvarez-Armas, I., Degallaix-Moreuil, S.: *Duplex stainless steels*, ISTE Ltd, John Wiley & Sons, Inc.
- [5] Grilec, K., Jakovljević, S.: *Tribologija*, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [6] <https://search.totalmateria.com/MaterialDetails/MaterialDetail?vkKey=1046186&keyNum=1216&type=2&hs=0> [preuzeto 19.8.2020.]
- [7] Truman, J.E., Pirt, K.R.: *Properties of a Duplex Stainless Steel and Effects of Thermal History*, prezentirano 1982 na AMS Metals Congress

## **PRILOZI**

I. CD-R disc