

Karakterizacija zavarenog spoja nehrđajućeg martenzitnog čelika

Planinčić, Valentina

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

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:235:927711>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Valentina Planinčić

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentorica:

Dr. sc. Vera Rede, dipl. ing.

Studentica:

Valentina Planinčić

Zagreb, 2024.

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

Zahvaljujem se mentorici dr. sc. Veri Rede te asistentici Heleni Lukšić, mag. ing. mech. na stručnoj pomoći i vođenju kroz izradu završnog rada.

Valentina Planinčić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 – 04 / 24 – 06 / 1	
Ur.broj: 15 – 24 –	

ZAVRŠNI ZADATAK

Studentica: **Valentina Planinčić** JMBAG: **0035228585**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Karakterizacija zavarenog spoja nehrđajućeg martenzitnog čelika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterization of the welded joint of stainless martensitic steel**

Opis zadatka:

Konstruktivski martenzitni nehrđajući čelici posjeduju izvrsna mehanička i korozivna svojstva te dosta široko temperaturno područje primjene. Najčešće se isporučuju u meko žarenom stanju, a nakon što se deformiranjem i/ili strojnom obradom postigne traženi oblik, toplinski se obrađuju kaljenjem i popuštanjem. Tako se postižu optimalna mikrostruktura i najbolja mehanička svojstva. Ako se zavarivanje dijelova konstrukcije izvodi nakon provedene toplinske obrade, zbog velikog unosa topline u području zavarenog spoja narušava se postignuta mikrostruktura čelika, što negativno utječe na mehanička i korozivna svojstva. U završnom radu potrebno je opisati martenzitne nehrđajuće čelike posebnim naglaskom na mikrostrukturne promjene koje nastaju pri toplinskoj obradi i zavarivanju. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je analizirati makrostrukturu i mikrostrukturu te ispitati mehanička svojstva zavarenog spoja martenzitnog nehrđajućeg čelika oznake X3CrNiMo13-4 (1.4313).

Dobivene rezultate potrebno je analizirati i na temelju analize donijeti odgovarajuće zaključke o kvaliteti zavarenog spoja.

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

1. rok: 22. i 23. 2. 2024.
2. rok (izvanredni): 11. 7. 2024.
3. rok: 19. i 20. 9. 2024.

Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 26. 2. – 1. 3. 2024.
2. rok (izvanredni): 15. 7. 2024.
3. rok: 23. 9. – 27. 9. 2024.

Zadatak zadala:

Rede
Prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednik Povjerenstva:

Godec
Prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. PODJELA NEHRĐAJUĆIH ČELIKA	2
2.1. Feritni nehrđajući čelici	3
2.2. Austenitni nehrđajući čelici	4
2.3. Dupleks nehrđajući čelici.....	5
2.4. Precipitacijski očvrsnuti nehrđajući čelici	6
2.4.1. Martenzitni precipitacijski očvrsnuti nehrđajući čelici.....	7
2.4.2. Semiaustenitni precipitacijski očvrsnuti nehrđajući čelici.....	8
2.4.3. Austenitni precipitacijski očvrsnuti nehrđajući čelici.....	8
3. MARTENZITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI	10
3.1. Utjecaj ugljika i legirnih elemenata na svojstva martenzitnih čelika.....	10
3.2. Mikrostruktura martenzitnih nehrđajućih čelika.....	11
3.3. Svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika	12
3.4. Primjena martenzitnih nehrđajućih čelika.....	12
3.5. Mekomartenzitni čelici	14
4. TOPLINSKA OBRADA MARTENZITNIH ČELIKA	15
4.1. Žarenje	15
4.2. Austenitizacija.....	15
4.3. Gašenje.....	16
4.4. Duboko hlađenje	16
4.5. Visokotemperaturno popuštanje	16
5. ZAVARLJIVOST MARTENZITNIH NEHRĐAJUĆIH ČELIKA	17
5.1. Postupci zavarivanja martenzitnih čelika.....	18
5.1.1. REL zavarivanje.....	18
5.1.2. TIG zavarivanje.....	19
5.1.3. MIG zavarivanje	20
5.2. Mikrostruktura zavara	21
6. EKSPERIMENTALNI DIO	23

6.2. Materijal za ispitivanje	23
6.3. Analiza mikrostrukture zavarenog spoja.....	26
6.3.2.1. Priprema uzoraka za analizu mikrostrukture	27
6.3.2.2. Analiza mikrostrukture u poliranom i nagrizenom stanju	31
6.4. Ispitivanje tvrdoće	36
6.5. Ispitivanje žilavosti	40
6.6. Statičko vlačno ispitivanje	41
6.7. Ispitivanje na savijanje	43
7. ZAKLJUČAK.....	44
8. LITERATURA	45

POPIS SLIKA

Slika 1.	Schaefflerov dijagram [4].....	2
Slika 2.	Mikrostruktura feritnog čelika [6].....	4
Slika 3.	Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika [9].....	5
Slika 4.	Mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika [11].....	6
Slika 5.	Mikrostruktura čelika X5CrNiCuNb16-4 [13].....	7
Slika 6.	Mikrostruktura čelika oznake X7CrNiAl17-7 [14].....	8
Slika 7.	Mikrostruktura čelika oznake X6NiCrTiMoVB25-15-2 [15].....	9
Slika 8.	Fe-Cr-C sustav [17].....	10
Slika 9.	Martenzitna mikrostruktura [20].....	11
Slika 10.	Vodilica od martenzitnog nehrđajućeg čelika [23].....	13
Slika 11.	Dijagram postupka toplinske obrade martenzitnog nehrđajućeg čelika [25].....	16
Slika 12.	Presjek zavarenog spoja [26].....	17
Slika 13.	Shema REL zavarivanja [27].....	19
Slika 14.	Shema TIG zavarivanja [28].....	20
Slika 15.	Shema MIG zavarivanja [29].....	21
Slika 16.	Četiri područja zone utjecaja topline [30].....	21
Slika 17.	Izrezani komadi martenzitnog nehrđajućeg čelika.....	24
Slika 18.	Skica pripreme spoja s V-žlijebom.....	24
Slika 19.	Prikaz redoslijeda zavarivanja.....	25
Slika 20.	Makrostruktura zavarenog spoja uzorka.....	26
Slika 21.	Uređaj za rezanje.....	27
Slika 22.	Uzorak 1 i uzorak 2 nakon poliranja.....	28
Slika 23.	Uređaj za brušenje i poliranje.....	29
Slika 24.	Komora za nagrivanje.....	30
Slika 25.	Uređaj za podešavanje parametara struje.....	30
Slika 26.	Izgled uzorka nakon nagrivanja.....	30
Slika 27.	Svjetlosni mikroskop.....	31
Slika 28.	Mikrostruktura uzorka u brušenom stanju uvećanja 50×.....	31
Slika 29.	Polirana površina metala zavara.....	32
Slika 30.	Mikrostruktura osnovnog materijala snimljena pri povećanju 200×.....	33
Slika 31.	Mikrostruktura metala zavara snimljena pri povećanju 200×.....	33

Slika 32.	Mikrostruktura u sredini metala zavara snimljena pri povećanju 500×	34
Slika 33.	Mikrostruktura metala zavara u korijenu uvećana 200×	34
Slika 34.	Mikrostruktura ZUT-a korijena zavara snimljena pri povećanju 200×	35
Slika 35.	Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavara snimljena pri povećanju 200×	35
Slika 36.	Tvrdomjer	36
Slika 37.	Pozicije mjerenja tvrdoće HV10	37
Slika 38.	Mikrotrvdomjer PMT-3U4.2	38
Slika 39.	Charpyev bat	40
Slika 40.	Uzorci na kojima je mjerena žilavost	41
Slika 41.	Univerzalna kidalica	42
Slika 42.	Epruvete za ispitivanje vlačne čvrstoće	42
Slika 43.	Izgled lica i korijena zavara nakon savijanja	43

POPIS TABLICA

Tablica 1. Popis standardnih vrsta martenzitnih čelika prema normi HRN EN 10088-1:2024 [24]	13
Tablica 2. Kemijski sastav čelika X3CrNiMo13-4	25
Tablica 3. Mehanička svojstva čelika.....	25
Tablica 4. Parametri brušenja	28
Tablica 5. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10.....	37
Tablica 6. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2	38
Tablica 7. Rezultati mjerenja žilavosti	41
Tablica 8. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja.....	43
Tablica 9. Rezultati savojnog ispitivanja	43

POPIS KRATICA

A	Austenit
Az	Zaostali austenit
BCC	Prostorno centrirana kubična rešetka
BCT	Prostorno centrirana tetragonska rešetka
DIN	Deutsches Institut für Normung
EN	Europska norma
EPP	Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška
F	Ferit
FCC	Plošno centrirana kubna rešetka
GMAW	Gas Metal Arc Welding
HRN	Hrvatska norma
ISO	International Organization for Standardization
M	Martenzit
Mf	Temperatura završetka martenzitne pretvorbe
MIG	Elektrolučni postupak zavarivanja s taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina
MMA	Manual Metal Arc Welding
Ms	Temperatura početka martenzitne pretvorbe
MZ	Metal zavara
PH	Precipitation hardening
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom
SAW	Submerged Arc Welding
TIG	Elektrolučni postupak zavarivanja s netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina
ZT	Zona taljenja
ZUT	Zona utjecaja topline

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis	Jedinica
A	Istezljivost	%
Cr_{ekv}	Ekvivalent kroma	%
F	Sila	N
HV	Mjerenje tvrdoće prema Vickersu	-
Ni_{ekv}	Ekvivalent nikla	%
R_e	Granica razvlačenja	MPa
R_m	Vlačna čvrstoća	MPa
$R_{p0,2}$	Konvencionalna granica razvlačenja	MPa
T_p	Temperatura predgrijavanja	°C
ϑ_a	Temperatura austenitizacije	°C
ϑ_p	Temperatura popuštanja	°C
σ	Naprezanje	MPa
ω	Brzina vrtnje	o/min

SAŽETAK

U završnom radu provedena je karakterizacija zavarenog spoja martenzitnog nehrđajućeg čelika X3CrNiMo13-4. U teorijskom dijelu rada opisane su osnovne vrste nehrđajućih čelika s posebnim naglaskom na martenzitne nehrđajuće čelike, zavarljivost, toplinska obrada te mikrostrukturne promjene ovih čelika. U eksperimentalnom dijelu analizirana je makrostruktura i mikrostruktura te ispitana različita mehanička svojstva zavarenog spoja na ploči debljine 50 mm, isporučene u normaliziranom stanju.

Provedena analiza strukture pokazala je da zavar ima pravilnu geometriju i jasno istaknute prolaze. Osnovni materijal ima sitnozrnatu usmjerenu mikrostrukturu, sastavljenu od ferita i vrlo sitnih karbida. U zoni utjecaja topline mikrostruktura je martenzitna, a metal zavara ima tipičnu ljevačku strukturu. Mikrostrukturne promjene u zavarenom spoju utjecale su na povećanje tvrdoće u odnosu na osnovni materijal, a najviše vrijednosti tvrdoće izmjerene su u metalu zavara. U zoni utjecaja topline izmjerene su više vrijednosti žilavosti nego u metalu zavara. U području zavarenog spoja izmjerena je viša vlačna čvrstoća od zajamčene vrijednosti vlačne čvrstoće za osnovni materijal. Pri savojnom ispitivanju na kritičnoj površini lica i korijena zavara nisu uočene pukotine. Dobiveni rezultati potvrđuju zadovoljavajuću kvalitetu zavarenog spoja.

Ključne riječi: karakterizacija, martenzitni nehrđajući čelik, zavareni spoj

SUMMARY

The final thesis included the characterization of the welded joint of martensitic stainless steel X3CrNiMo13-4. The theoretical part of the thesis describes the basic types of stainless steels, with a particular focus on martensitic stainless steels, weldability, heat treatment, and microstructural changes in these steels. In the experimental part, the macrostructure and microstructure were analyzed, and various mechanical properties of the welded joint on a 50 mm thick plate delivered in a normalized state were examined.

The structural analysis showed that the weld has a regular geometry and clearly defined passes. The base material has a fine-grained directional microstructure composed of ferrite and very fine carbides. In the heat-affected zone, the microstructure is martensitic, and the weld metal has a typical casting structure. Microstructural changes in the welded joint led to an increase in hardness compared to the base material, with the highest hardness values measured in the weld metal. In the heat-affected zone, higher toughness values were measured than in the weld metal. In the welded joint area, a higher tensile strength was measured compared to the guaranteed tensile strength value for the base material. No cracks were observed during bending tests on the critical surface of the weld face and root. The obtained results confirm the satisfactory quality of the welded joint.

Keywords: characterization, martensitic stainless steel, welded joint

1. UVOD

Nehrđajući ili visokolegirani, korozijski postojani čelici vrsta su čelika koji imaju široku primjenu u industriji zahvaljujući svojoj izvrsnoj otpornosti na oksidaciju i korozijsko djelovanje. Njihovi počeci primjene datiraju još s početka 20-og stoljeća, a rezultat su legiranja željeza kromom [1].

Da bi bili otporni na korozijsko djelovanje, nehrđajući čelici moraju imati monofaznu mikrostrukturu te sadržavati više od 12 % Cr. Otpornost čelika prema koroziji veća je što je u njemu viši udio kroma. Također, poželjno je i da imaju što viši udio legiranih elemenata kao što su nikal, titanij, molibden, niobij i dr. Ove čelike možemo podijeliti u pet osnovnih skupina, a to su feritni, austenitni, martenzitni, dupleks i precipitacijski očvrnuti nehrđajući čelici [2]. Zavarivanje nehrđajućih čelika može biti izazovno, stoga je potrebno pažljivo odabrati način i postupak zavarivanja. Najčešće korišteni postupci zavarivanja su: ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom, elektrolučni postupak zavarivanja s netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina, elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom pod zaštitom praška te elektrolučni postupak zavarivanja s taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina [3].

U ovome radu stavljen je poseban naglasak na martenzitne nehrđajuće čelike koji posjeduju izvrsna mehanička i korozijska svojstva te široko temperaturno područje primjene.

2. PODJELA NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Postoje različite vrste nehrđajućih čelika, svaka sa svojim jedinstvenim karakteristikama. Svim vrstama nehrđajućih čelika zajedničko je da sadrže minimalni udio od 12 % kroma i udio ugljika do 1,2 %. Unatoč njihovoj izuzetnoj otpornosti na koroziju, važno je napomenuti da ovi čelici mogu podlijeći koroziji u određenim uvjetima. Stoga je ključno pažljivo odabrati određenu vrstu nehrđajućeg čelika prilikom primjene, kao i odabrati odgovarajući postupak zavarivanja i završne obrade koji mogu utjecati na njihovu otpornost na koroziju [4].

Ključnu ulogu u kemijskoj postojanosti kod većine nehrđajućih čelika imaju Cr i Ni. Krom je jaki feritotvorac i promiče feritnu mikrostrukturu u čeliku dok je nikal jaki gamageni element i proširuje austenitnu mikrostrukturu u čeliku. Većina ostalih legirnih elemenata u nehrđajućim čelicima potpomaže djelovanje kroma ili nikla.

Ekvivalenti nikla i kroma, koji izražavaju utjecaj dodatnih legirnih elemenata u čeliku, ustanovljeni su kako bi općenito objasnili utjecaj sastava čelika na njegovu mikrostrukturu.

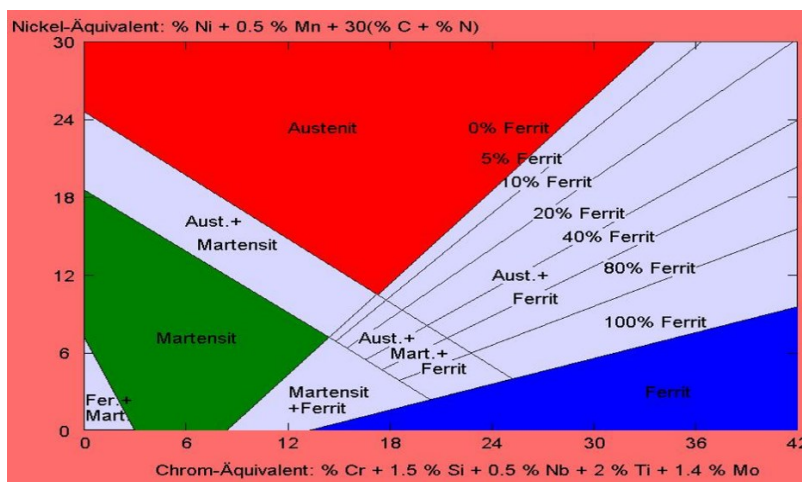
Cr_{ekv} prikazuje utjecaj elemenata koji pospješuju stvaranje ferita i računa se prema izrazu:

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

Ni_{ekv} prikazuje utjecaj elemenata koji pospješuju stvaranje austenita i računa se prema izrazu:

$$Ni_{ekv} = \% Ni + 30 \% C + 0,5 \% Mn + 0,5 \% Co \quad (2)$$

Uz pomoć izračunatih Ni i Cr ekvivalenata i Schaefflerovog dijagrama prikazanog na slici 1. jednostavno se može odrediti kakvu mikrostrukturu čelik posjeduje [4].



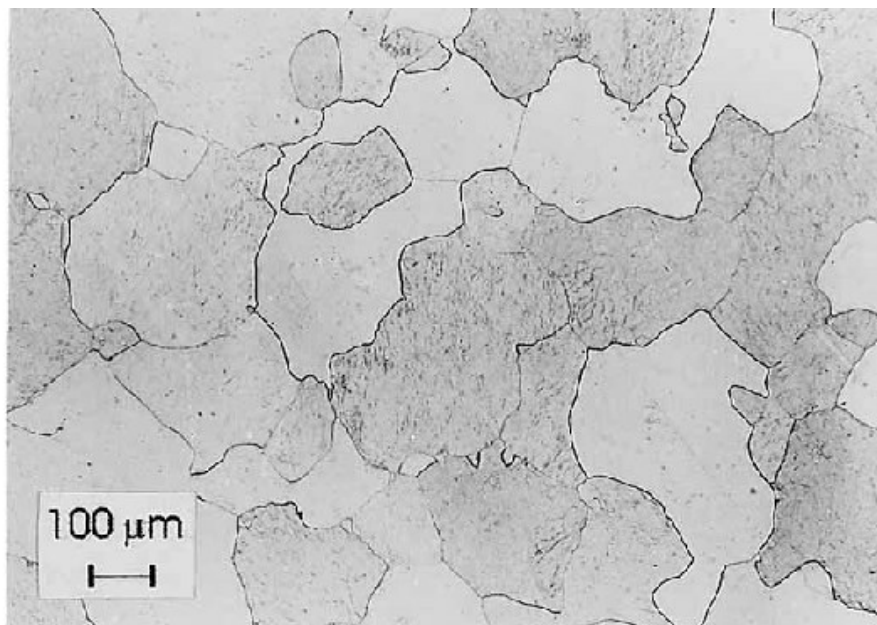
Slika 1. Schaefflerov dijagram [4]

Nehrđajuće čelike možemo podijeliti u pet osnovnih skupina prema mikrostrukturi, a to su: [4]

1. feritni
2. austenitni
3. dupleks
4. precipitacijski očvrsnuti
5. martenzitni.

2.1. Feritni nehrđajući čelici

Feritni nehrđajući čelici sadrže između 12 % i 30 % kroma dok je udio ugljika manji od 0,1 %. Od legiranih elemenata dodaju se alfa elementi kao što su titanij, niobij, molibden i aluminij. Gamma elementi se ovoj vrsti čelika ne dodaju, osim ako je prijeko potrebno. Ovi čelici pokazuju feromagnetična svojstva i teže se zavaruju od ostalih vrsta nehrđajućih čelika. Razlog tome je što postoji značajno povećanje zrna u zoni utjecaja topline (ZUT), pri čemu se karbidi precipitiraju na granicama kristalnih zrna, što rezultira oslabljenjem zavara i smanjenjem otpornosti na koroziju. Feritni čelici namijenjeni su za primjenu na temperaturama do 400 °C jer se na višim temperaturama pojavljuju krhke faze. Osobito su osjetljivi na "krhkost 475", pojavu pri kojoj dolazi do pada istezljivosti i žilavosti zagrijavanjem u temperaturnom području između 400 °C i 550 °C. Najveći pad navedenih svojstava je upravo na 475 °C. Primjenjuju se u slučajevima kada je najbitnija otpornost na koroziju, a ne mehanička svojstva pa se tako npr. često koriste u prehrambenoj i farmaceutskoj industriji. Ova vrsta čelika ima feritnu mikrostrukturu prikazanu na slici 2 te prostorno centriranu kubičnu rešetku (engl. *body centered cubic* – BCC) [5].

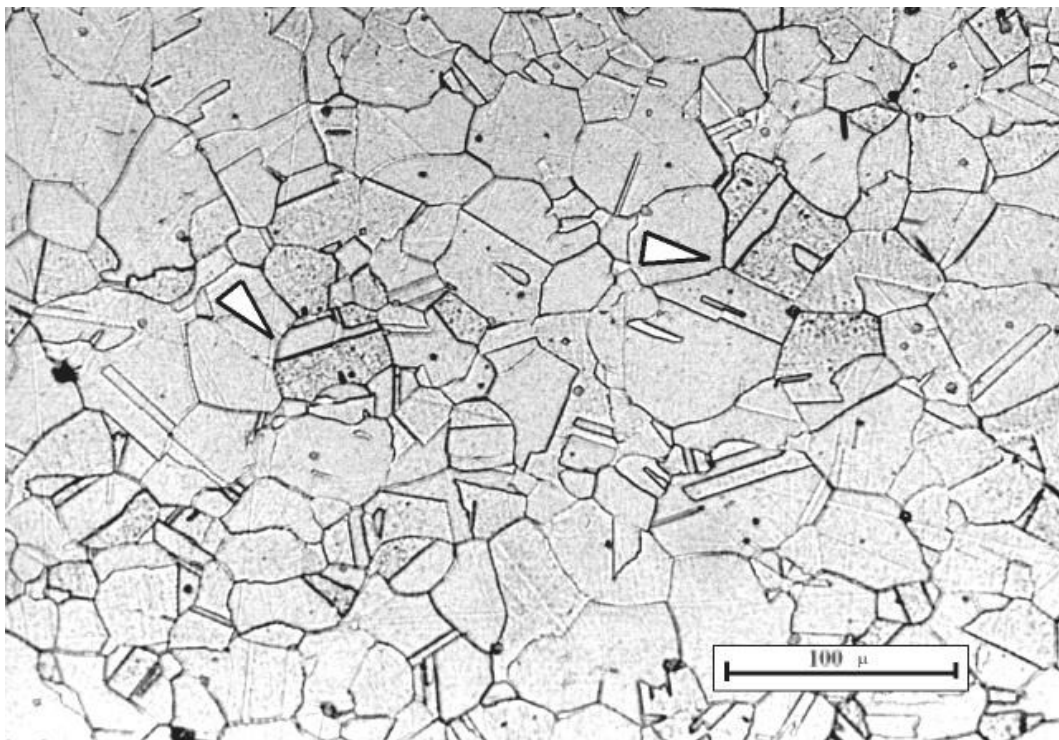


Slika 2. Mikrostruktura feritnog čelika [6]

2.2. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici obično sadrže između 16 % i 26 % kroma, a karakterizira ih visoki udio nikla (do 20 %) te izvrsna otpornost na koroziju. Ove vrste čelika mogu biti dodatno obogaćene molibdenom (Mo), titanijem (Ti), niobijem (Nb) ili tantalom (Ta). Navedeni elementi povećavaju otpornost na interkristalnu koroziju, ali potiču formiranje feritne faze unutar mikrostrukture čelika koja u pravilu nije poželjna [7].

Austenitni čelici otporni su na organske i anorganske kiseline, lužine i soli, nisu magnetični te posjeduju vrlo dobru žilavost na niskim temperaturama sve do -273 °C. Nedostaci ovih čelika su ti što mogu sadržavati delta ferit koji smanjuje žilavost, istežljivost i otpornost na rupičastu koroziju. Također, povećava se opasnost od nastanka sigma faze. Mikrostruktura austenitnih nehrđajućih čelika sastoji se od austenita, a prepoznatljiva je po kristalima blizancima što je vidljivo na slici 3 [8].



Slika 3. Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika [9]

2.3. Dupleks nehrđajući čelici

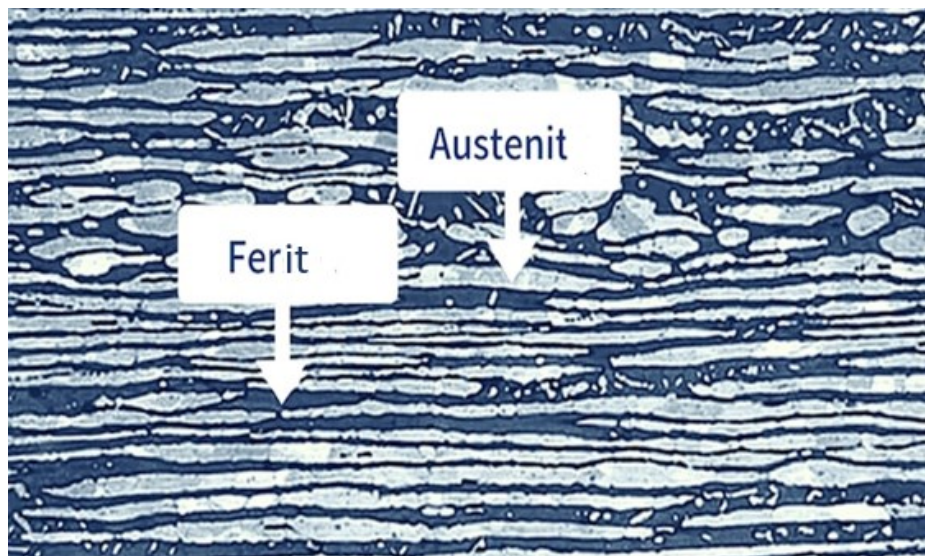
Dupleks nehrđajući čelici jedini su od nehrđajućih čelika koji imaju dvofaznu mikrostrukturu sastavljenu od ferita i austenita u omjeru 50:50. Mikrostruktura ovih čelika prikazana je na slici 4.

Legiranje dupleks čelika ima ključnu ulogu u očuvanju potrebne količine austenita, što postaje izuzetno važno tijekom procesa zavarivanja, posebno u metalu zavara. Prekomjerni sadržaj ferita može negativno utjecati na otpornost materijala na koroziju i izazvati pojavu krhkosti. Iako je moguća primjena dupleks čelika pri povišenim temperaturama, ne primjenjuju se iznad 315 °C zbog mogućnosti nastanka pojave "krhkost 475" koja negativno utječe na mehanička svojstva čelika. Donja temperatura primjene ovih čelika je oko -60 °C. Dupleks nehrđajući čelici imaju vrlo široko područje primjene i najveći trend rasta među svim nehrđajućim čelicima.

Najčešća primjena ovih čelika je: [10]

- u industriji nafte i plina (destilatori, ventili, cjevovodi)
- u brodogradnji (brodski propeleri, spremnici za transport kemikalija)
- u petrokemijskoj industriji (izmjenjivači topline)

- u farmaceutskoj industriji
- u prehrambenoj industriji
- u industriji celuloze i papira, ali i mnoge druge.



Slika 4. Mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika [11]

2.4. Precipitacijski očvrnuti nehrđajući čelici

Precipitacijski očvrnuti čelici (engl. *precipitation hardening* – PH) kao što i samo ime kaže, čelici su očvrnuti mehanizmom precipitacije, odnosno, izlučivanjem sitnih tvrdih čestica u matrici odnosno kristalu mješancu. Osnovni legirni elementi kod ove vrste čelika su Cr i Ni, dok su dodatni legirni elementi Cu, Al, Nb, Ti, Mo, V i Br. Uloga dodatnih legirnih elemenata je stvaranje različitih spojeva u obliku precipitata. Mikrostruktura precipitacijski očvrnutih nehrđajućih čelika sastoji se od matrice koja može biti austenitna ili martenzitna te izlučenih precipitata. Precipitati su najčešće intermetalni spojevi – nitridi, bakrom bogate faze te Lavesova faza bogata željezom, niobijem i molibdenom. Korozijska postojanost precipitacijskih očvrnutih čelika ovisna je o toplinskoj obradi te dobivenoj mikrostrukturi nakon očvrnuća.

Osnovne karakteristike ovih čelika su:

- Visoka vlačna čvrstoća, od 860 do 1520 MPa.
- Visoka granica razvlačenja, od 515 do 1415 MPa.

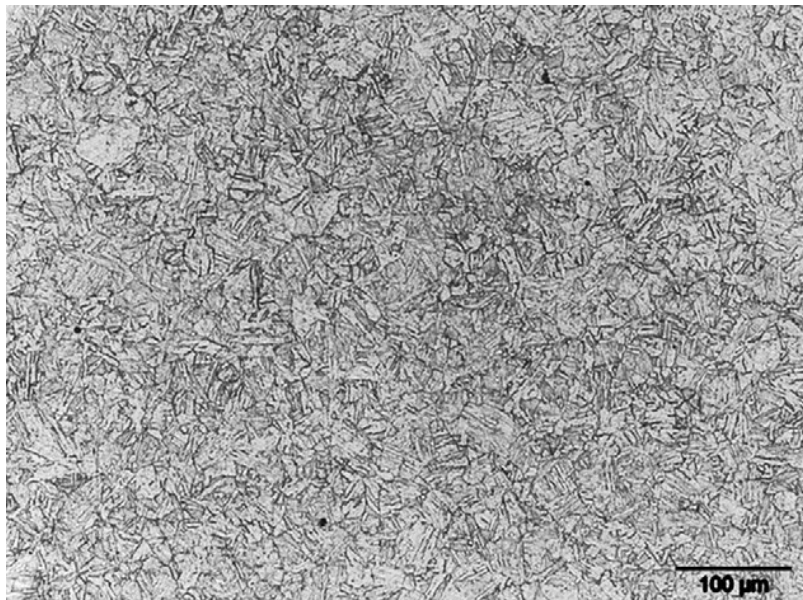
Podjela ovih čelika temelji se na položaju temperatura početka i završetka transformacije austenita u martenzit (M_s i M_f) u odnosu na temperaturu okoliša, a dijele se na: [12]

- martenzitne precipitacijski očvrsnute čelike
- semiaustenitne precipitacijski očvrsnute čelike
- austenitne precipitacijski očvrsnute čelike.

2.4.1. Martenzitni precipitacijski očvrsnuti nehrđajući čelici

Ove čelike karakterizira niski udio ugljika, približno 0,05 %, i značajni udjeli specifičnih legiranih elemenata. Krom se nalazi u rasponu od 14 do 17 %, nikal od 4 do 6 %, te se dodaju određene količine bakra (oko 3 %), molibdena i niobija. Idealna mikrostruktura martenzitnih precipitacijski očvrnutih čelika satoji se od martenzitne matrice, ali se u određenim uvjetima može pojaviti i feritna faza. Prisutnost ferita u mikrostrukturi ovog čelika smanjuje duktilnost i žilavost. Faze koje se u postupku dozrijevanja izlučuju u martenzitnim PH-čelicima su najčešće bakrom bogate faze, karbidi različitog tipa, Lavesova faza i neke druge.

Na slici 5. prikazana je mikrostruktura martenzitnog precipitacijski očvrnutog nehrđajućeg čelika oznake X5CrNiCuNb16-4 (17-4 PH) [13].

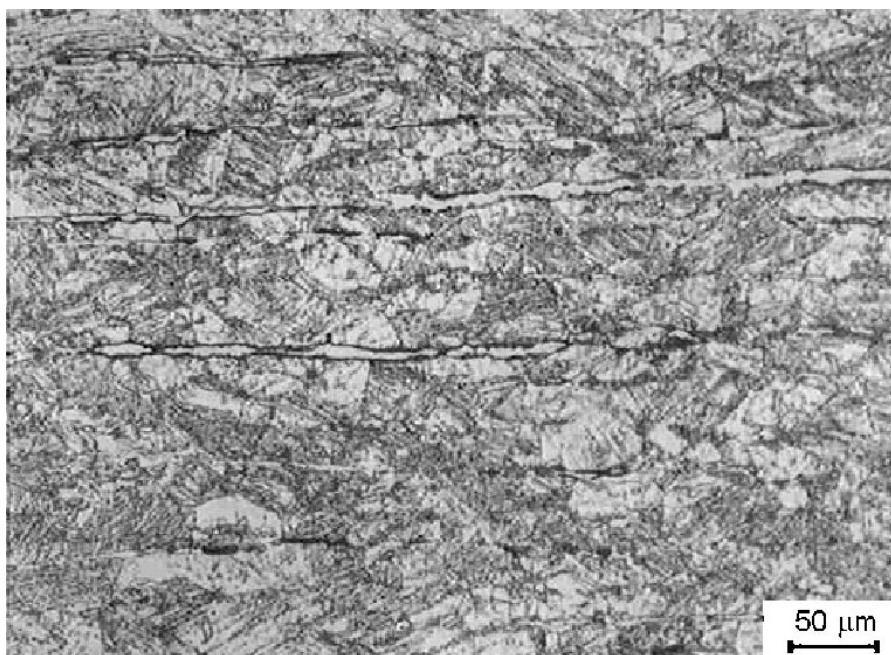


Slika 5. Mikrostruktura čelika X5CrNiCuNb16-4 [13]

2.4.2. *Semiaustenitni precipitacijski očvrsnuti nehrđajući čelici*

Semiaustenitni precipitacijski očvrsnuti čelici imaju vrlo sličan sastav kao i martenzitni precipitacijski očvrsnuti čelici. Maseni udio kroma u ovim čelicima je između 13 % i 17 %, udio ugljika je u rasponu od 0,05 % do 0,1 % te udio nikla u granicama od 7 % do 9 %. Među dodacima, najčešće se koriste molibden, titanij, aluminij, vanadij i dušik. Ovi čelici primarno kristaliziraju u ferit (100 %), hlađenjem počinje transformacija ferita u austenit i do sobne temperature veći dio ferita prekrystalizira u austenit. Ferita zaostane od 5 % do 10 %. U ovakvo stanju ovi čelici se isporučuju iz čeličane. Mekani su i duktilni, dobro se oblikuju u hladnom stanju, dobro se zavaruju i lako strojno izrađuju. Deformacija u hladnom stanju izaziva transformaciju austenita u martenzit, u tom stanju ovi čelici imaju vrlo visoku granicu razvlačenja (preko 1300 MPa). U fazi dozrijevanja izlučuju se precipitati koji dodatno povisuju tvrdoću i čvrstoću, a granica razvlačenja može se povisiti preko 1800 MPa.

Na slici 6. prikazana je mikrostruktura semiaustenitnog precipitacijski očvrsnutog nehrđajućeg čelika oznake X7CrNiAl17-7 (17-7 PH) [14].

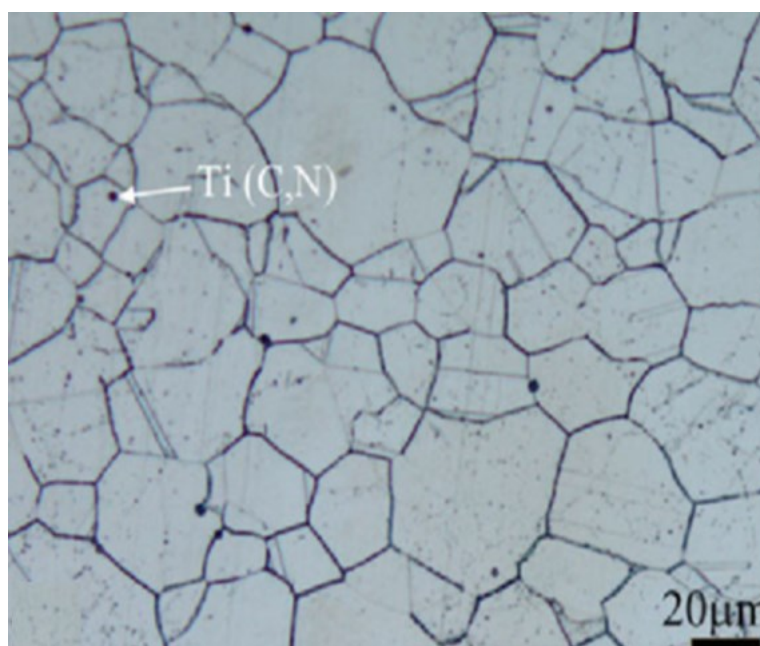


Slika 6. Mikrostruktura čelika oznake X7CrNiAl17-7 [14]

2.4.3. *Austenitni precipitacijski očvrsnuti nehrđajući čelici*

U odnosu na prethodne dvije skupine austenitni precipitacijski očvrsnuti čelici imaju puno širi temperaturni raspon primjene i bolju korozivnu postojanost. Prerada ovih čelika dosta je

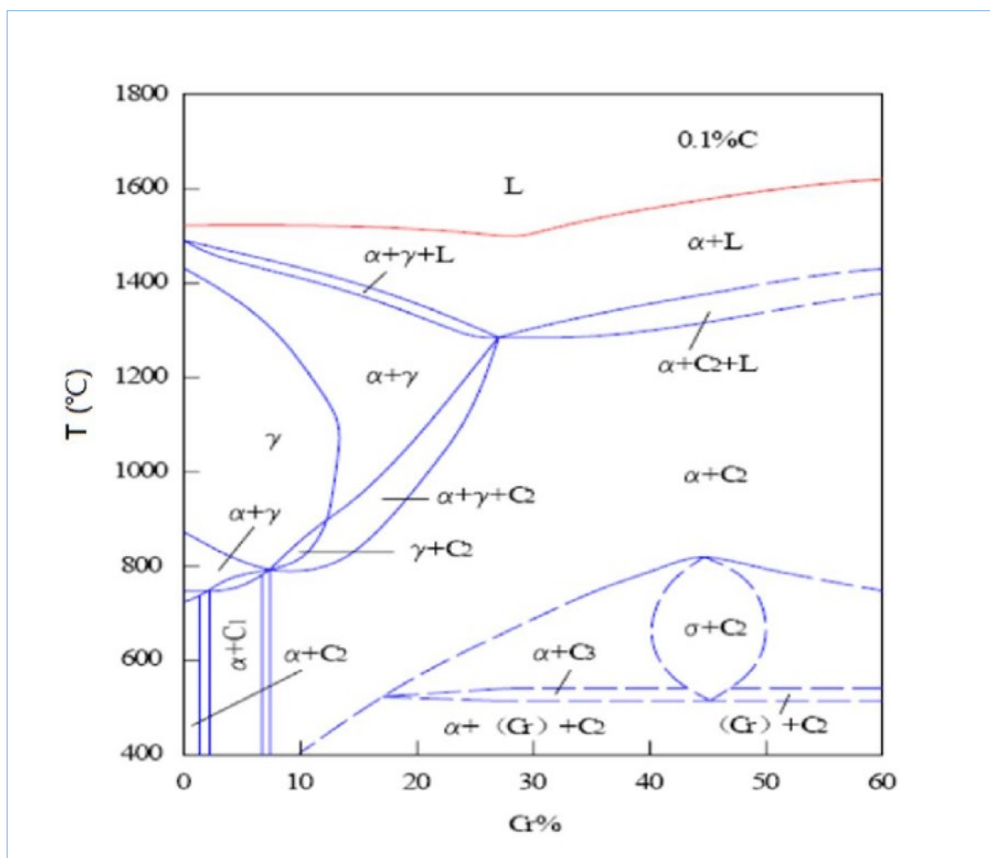
jednostavnija, a njihov osnovni nedostatak je niža vlačna čvrstoća i granica razvlačenja. Nakon rastopnog žarenja ovi čelici su relativno mekani, imaju visoku istežljivost te dobru obradivost odvajanja čestica. U fazi dozrijevanja izlučuju se različiti intermetalni spojevi koji povišuju čvrstoću i tvrdoću. Ovi čelici sadrže vrlo malo ugljika ($< 0,1\%$), između 14% i 18% kroma te udio nikla veći od 25% . Na slici 7 prikazan je austenitni precipitacijski očvršnut nehrđajući čelik oznake X6NiCrTiMoVB25-15-2 [15].



Slika 7. Mikrostruktura čelika oznake X6NiCrTiMoVB25-15-2 [15]

3. MARTENZITNI NEHRĐAJUĆI ČELICI

Martenzitni nehrđajući čelici legure su zasnovane na Fe-Cr-C sustavu koji je prikazan na slici 8. Nehrđajući martenzitni čelici sadrže između 12 % i 18 % kroma i od 0,15 % do 1,2 % ugljika. Često sadrže vanadij i molibden te neke druge jake karbidotvorce. Općenito ih možemo podijeliti na konstrukcijske i alatne čelike [16].



Slika 8. Fe-Cr-C sustav [17]

3.1. Utjecaj ugljika i legirnih elemenata na svojstva martenzitnih čelika

Osnovni element u martenzitnim čelicima je ugljik, čijim se povišenjem sadržaja postiže viša tvrdoća i otpornost na trošenje, ali smanjuje korozijska postojanost, žilavost i zavarljivost.

Legirni elementi koji se dodaju martenzitnim čelicima su: [18]

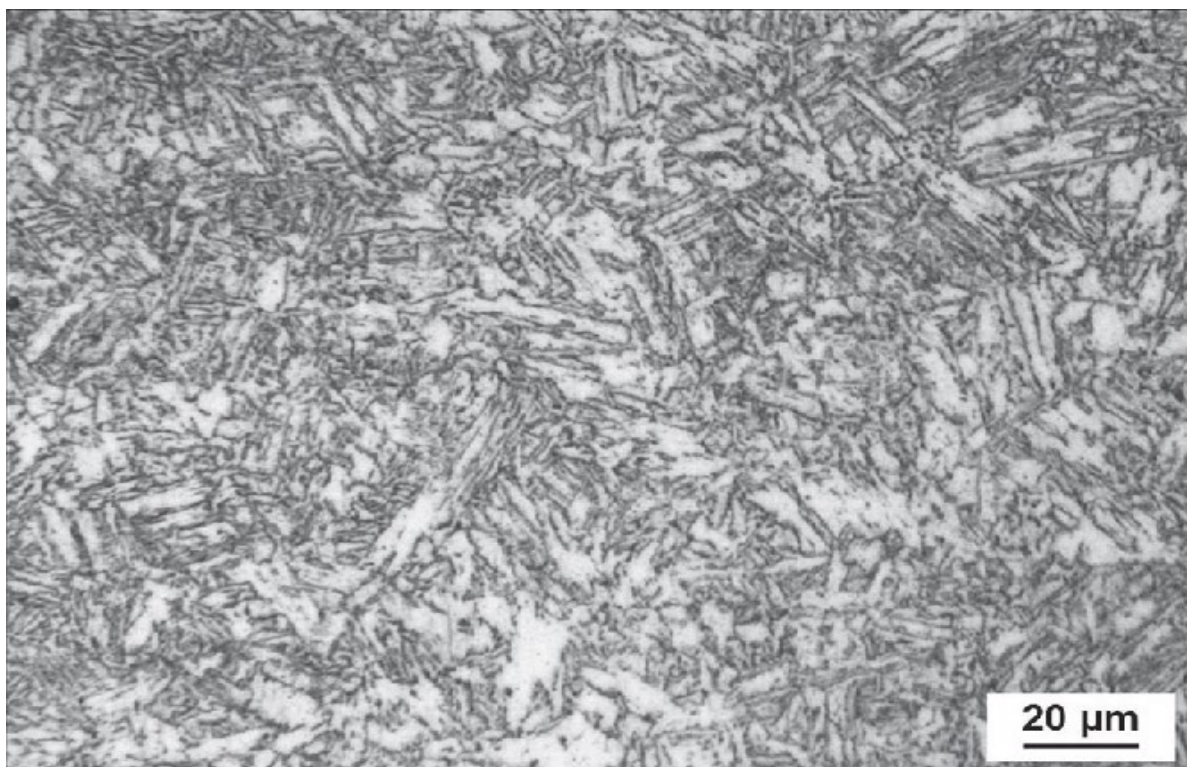
- krom – povišenjem sadržaja kroma bolja je korozijska postojanost te je viša tvrdoća
- nikal – poboljšava duktilnost i korozijsku otpornost; ako martenzitni čelik ima nikla, najčešće je riječ o mekomartenzintom nehrđajućem čeliku

- molibden – poboljšava obradivost odvajanjem čestica te korozivsku postojanost
- vanadij – sprječava rast austenitnog zrna tijekom toplinske obrade.

3.2. Mikrostruktura martenzitnih nehrđajućih čelika

Mikrostruktura ovih čelika može biti u potpunosti martenzitna ili martenzitno-karbidna. Općenito, martenzit je čvrsta otopina ugljika u alfa-fazi željeza čiji kristali imaju igličasti oblik koji je prikazan na slici 9. Martenzitna struktura formira se kada brzina hlađenja stabilnog austenita ostvari vrijednost kritične brzine.

Za martenzit je karakteristična prostorno centrirana tetragonalna kristalna rešetka (engl. *body centered tetragonal* – BCT) [19]. Konstrukcijski martenzitni nehrđajući čelici, zbog nižeg udjela ugljika, u mikrostrukturi sadrže samo martenzit. Kod alatnih martenzitnih čelika, koji trebaju imati višu tvrdoću, osim martenzita u mikrostrukturi prisutna je i određena količina karbida.



Slika 9. Martenzitna mikrostruktura [20]

3.3. Svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika

Martenzitni nehrđajući čelici posjeduju sljedeća svojstva: [21]

- granica razvlačenja od 275 MPa do 1900 MPa, ovisno o procesu toplinske obrade
- visoka tvrdoća koja može iznositi do 60 HRC
- feromagnetični su
- imaju dobru otpornost na toplinski i mehanički umor
- otporni su na abrazijsko trošenje
- izvrsna, ali ograničena korozijska postojanost
- u potpunosti su otporni na interkristalnu koroziju
- lošija zavarljivost u usporedbi s ostalim nehrđajućim čelicima zbog većeg udjela ugljika
- visoka čvrstoća.

3.4. Primjena martenzitnih nehrđajućih čelika

Martenzitni čelici imaju široko područje primjene zbog svojih jedinstvenih svojstava, a primjenjuju se: [22]

- u industriji papira
- za izradu strojnih dijelova kao što su ventili, opruge, vijci, osovine, dijelovi pumpi i turbinske lopatice
- automobilske industriji
- za izradu kalupa za preradu polimera te raznog kirurškog pribora.
- Za izradu vatrenog oružja.

Na slici 10 prikazana je vodilica od martenzitnog nehrđajućeg čelika.



Slika 10. Vodilica od martenzitnog nehrđajućeg čelika [23]

U tablici 1 prikazan je popis najčešće primjenjivanih nehrđajućih martenzitnih čelika te njihov kemijski sastav prema normi HRN EN 10088-1:2007 [24].

Tablica 1. Popis standardnih vrsta martenzitnih čelika prema normi HRN EN 10088-1:2024 [24]

Oznaka čelika		C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Mo	Ni	Ostalo
X12Cr13	1.4006	0,08/0,15	1	1,5	0,04	0,02	-	11,5/13,5	-	0,75	-
X15Cr13	1.4024	0,12/0,17	1	1	0,04	0,02	-	12,0/14,0	-	-	-
X20Cr13	1.4021	0,16/0,25	1	1,5	0,04	0,02	-	12,0/14,0	-	-	-
X30Cr13	1.4028	0,26/0,35	1	1,5	0,04	0,02	-	12,0/14,0	-	-	-
X39Cr13	1.4031	0,36/0,42	1	1	0,04	0,02	-	12,5/14,5	-	-	-
X46Cr13	1.4034	0,43/0,50	1	1	0,04	0,02	-	12,5/14,5	-	-	-
X38CrMo14	1.4419	0,36/0,42	1	1	0,04	0,02	-	13,0/14,5	0,60/1,00	-	-
X55CrMo14	1.4110	0,48/0,60	1	1	0,04	0,02	-	13,0/15,0	0,50/0,80	-	V:0,15
X50CrMoV15	1.4116	0,45/0,55	1	1	0,04	0,02	-	14,0/15,0	0,50/0,80	-	V:0,1/0,2
X39CrMo17-1	1.4122	0,33/0,45	1	1,5	0,04	0,02	-	15,5/17,5	0,80/1,30	1	-
X3CrNiMo13-4	1.4313	0,05	0,7	1,5	0,04	0,02	≥0,02	12,0/14,0	0,30/0,70	3,5/4,5	-
X4CrNiMo16-5-1	1.4418	0,06	0,7	1,5	0,04	0,02	≥0,02	15,0/17,0	0,80/1,50	4,0/6,0	-

3.5. Mekomartenzitni čelici

Skupinu mekomartenzitnih čelika karakterizira niži udio ugljika, što pozitivno utječe na prokaljivost, otpornost na popuštanje i stabilnost pri visokim radnim temperaturama.

Ovi čelici sadrže manje od 0,1 % ugljika, 13 % do 18 % kroma, 1 % do 6 % nikla i do 3 % molibdena. Realni udio ugljika u ovim čelicima obično iznosi između 0,03 % i 0,05 %.

Uglavnom se primjenjuju za izradu dijelova strojeva i aparata izloženih djelovanju nečistog zraka te posebno djelovanju morske vode [25].

4. TOPLINSKA OBRADA MARTENZITNIH ČELIKA

Pravilnim postupkom toplinske obrade čelika moguće je postići raznolika mikrostrukturna stanja, što rezultira različitim mehaničkim karakteristikama čelika unutar širokog spektra vrijednosti. Uobičajena toplinska obrada martenzitnih nehrđajućih čelika obuhvaća sljedeće korake: [25]

1. žarenje
2. austenitizaciju
3. gašenje
4. duboko hlađenje
5. popuštanje.

4.1. Žarenje

Martenzitni čelici podvrgnuti su sferoidizacijskom (mekom) žarenju koje omogućuje prevođenje karbida iz lamelarnog ili mrežastog oblika u kuglasti čime se olakšava obrada odvajanjem čestica i oblikovanje deformiranjem. Žarenjem se smanjuje vrijednost tvrdoće te se poboljšava oblikovljivost u hladnom stanju [25].

4.2. Austenitizacija

Za postizanje željene tvrdoće martenzitnih čelika, ključno je podvrgnuti čelik procesu zagrijavanja na temperaturu austenitizacije ϑ_a . Na toj temperaturi mikrostruktura čelika postaje potpuno austenitna ili ima određeni udio djelomično otopljenih karbida. Uz dovoljno brzo hlađenje s temperature austenitizacije iz austenita će se formirati martenzit.

Što je temperatura austenitizacije viša biti će i više otopljenih karbida te ona za martenzitne čelike može imati vrijednosti između 950 °C i 1100 °C. Osim temperature austenitizacije, vremenski faktor igra ključnu ulogu u oblikovanju željene mikrostrukture i svojstava čelika. Općenito, duže zadržavanje čelika na temperaturi austenitizacije rezultira blagim smanjenjem tvrdoće nakon procesa brzog hlađenja, odnosno gašenja.

Kaljenje je postupak termičke obrade čelika u kojem se materijal zagrijava do temperature austenitizacije, zatim zadržava na toj temperaturi tijekom određenog vremena, da bi se nakon toga brzo ohladio. Ovaj proces ima za cilj poboljšanje mehaničkih svojstava čelika, kao što su tvrdoća i čvrstoća [4,25].

4.3. Gašenje

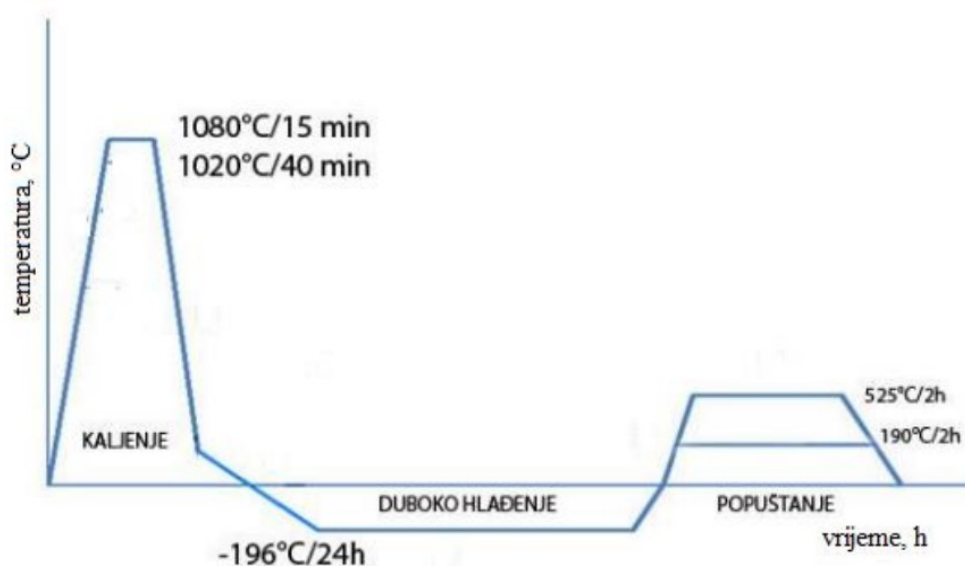
Nakon zadržavanja na temperaturi austenitizacije, čelici se brzo gase kako bi osigurali potpuni prijelaz austenitne mikrostrukture u martenzitnu. Sporije hlađenje uzrokovat će nastanak precipitata i nepotpunu tvrdoću dok će prebrzo gašenje dovesti do nastanka pukotina i deformacija. S obzirom da se radi o visokolegiranim sustavima ovi čelici se gase najčešće u ulju. Za martenzitne čelike uobičajeno je da je temperatura početka transformacije austenita u martenzit između 300 °C i 700 °C, a temperatura završetka transformacije za 150 °C do 200 °C niža od toga [4,25].

4.4. Duboko hlađenje

Duboko hlađenje obavezno je kod martenzitnih čelika kojima je temperatura M_f ispod sobne temperature i kod kojih gašenjem do sobne temperature u mikrostrukтури ostaje određeni udio zaostalog austenita A_z . Sredstva za duboko hlađenje moraju osigurati dovoljno nisku temperaturu, a najčešće se koriste suhi led i tekući dušik [4,25].

4.5. Visokotemperaturno popuštanje

Temperatura popuštanja ovisna je o vrsti čelika, ona je uvijek niža od temperature pretvorbe u austenit, a obično iznosi oko 550 °C. Visokotemperaturno popuštanje provodi se radi povišenja žilavosti martenzitnog čelika te sniženja zaostalih naprezanja. Na slici 11 prikazan je dijagram postupka toplinske obrade martenzitnih nehrđajućih čelika [4,25].



Slika 11. Dijagram postupka toplinske obrade martenzitnog nehrđajućeg čelika [25]

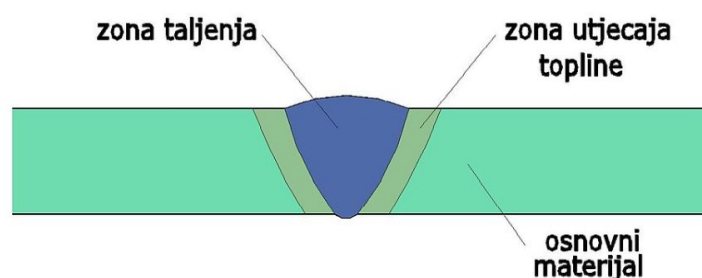
5. ZAVARLJIVOST MARTENZITNIH NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Općenito, zavarljivost se može definirati kao sposobnost materijala da se pod određenim uvjetima zavarivanja formira kontinuirani zavareni spoj.

Zavareni spoj je rezultat spajanja dva ili više materijala primjenom topline, tlaka ili kombinacije oboje na spoju komponenti. Sastoji se od: [26]

- zone utjecaja topline – Između rastaljenog metala i nepromijenjenog osnovnog metala formira se zona utjecaja topline (ZUT). U toj zoni metal nije otopljen, ali toplina izaziva promjene u mikrostrukтури, što može smanjiti čvrstoću čelika.
- zone taljenja – Zona taljenja ili metal zavara predstavlja dio spoja koji je bio u rastaljenom stanju te je njegovim skrućivanjem došlo do formiranja spoja.
- osnovni materijal – U zavarivanju, to je materijal koji se zavaruje, odnosno komponenta koja čini osnovu strukturalnog dijela koji se spaja.

Presjek zavarenog spoja prikazan je na slici 12.



Slika 12. Presjek zavarenog spoja [26]

Zavarivanje martenzitnih nehrđajućih čelika može biti izazovno zbog njihove sklonosti ka stvaranju tvrdih i lomljivih zavara pa je zato potrebno pažljivo odabrati postupak zavarivanja, primijeniti zaštitne plinove i osigurati čišćenje površine kako bi se minimizirao unos vodika. Preporučuje se predgrijavanje i naknadna toplinska obrada jer to smanjuje količinu vodika u metalu zavara i reducira zaostala naprezanja. Budući da se tijekom hlađenja nakon zavarivanja formira nepopušteni martenzit, martenzitni nehrđajući čelici smatraju se najmanje pogodnima za zavarivanje među svim vrstama nehrđajućih čelika [19,27].

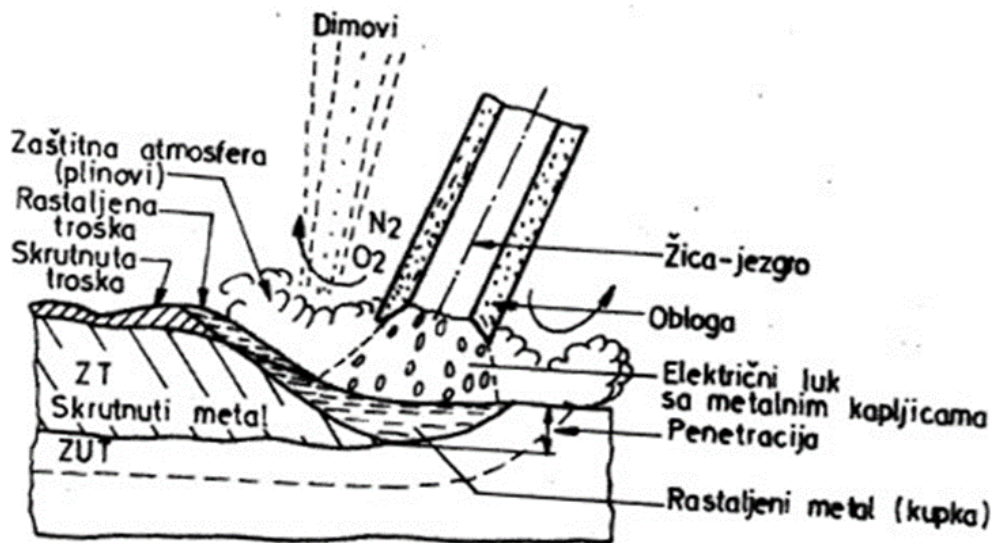
5.1. Postupci zavarivanja martenzitnih čelika

Najčešći postupci zavarivanja martenzitnih čelika su REL postupak zavarivanja, odnosno ručno elektrolučno zavarivanje obloženom taljivom elektrodom (engl. *Manual Metal Arc Welding – MMA*), elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom pod zaštitom inertnog plina (engl. *Tungsten Inert Gas – TIG*), i MIG postupak zavarivanja to jest elektrolučni postupak zavarivanja s taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (engl. *Gas Metal Arc Welding – GMAW*). Za zavarivanje ovih čelika može se koristiti i EPP postupak zavarivanja, točnije elektrolučno zavarivanje pod zaštitom praška (engl. *Submerged Arc Welding – SAW*), zavarivanje elektronskim snopom, laserom te trenjem [27].

5.1.1. REL zavarivanje

Ručno elektrolučno zavarivanje predstavlja često korišten postupak zavarivanja. U ovom procesu, električna struja koristi se za stvaranje električnog luka između osnovnog materijala i obložene elektrode. Obloga elektrode služi kao zaštita zavara od oksidacije i kontaminacije, proizvodeći ugljikov dioksid (CO_2). Elektroda također djeluje kao dodatni materijal za formiranje zavara. Ovaj postupak je izuzetno fleksibilan i može se izvoditi pomoću pristupačne opreme, što ga čini popularnim u radionicama i na gradilištima. Iskustvo zavarivača može se stjecati s minimalnom obukom, dok majstor postaje kroz dugotrajno praktično iskustvo. Brzina zavarivanja može biti ograničena jer se elektrode često moraju mijenjati, a nakon svakog zavara potrebno je čišćenje otpadnog materijala.

Shema REL postupka prikazana je na slici 13 [27].

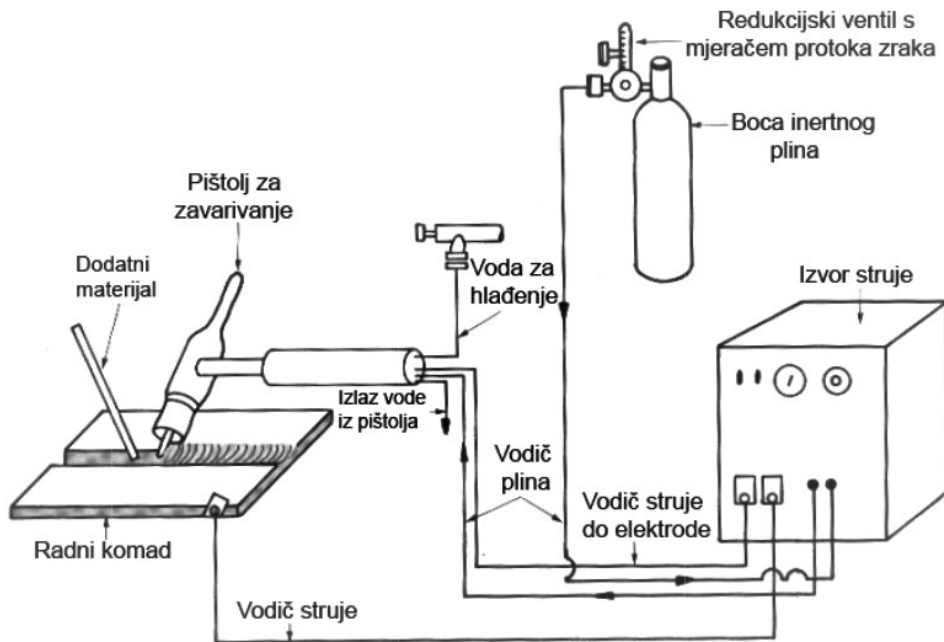


Slika 13. Shema REL zavarivanja [27]

5.1.2. TIG zavarivanje

Elektrolučni postupak zavarivanja s netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (TIG) poznato i kao zavarivanje plinskim volframovim lukom GTAW (engl. *Gas Tungsten Arc Welding* – GTAW), je precizan i visokokvalitetan postupak elektrolučnog zavarivanja koji koristi netaljivu volframovu elektrodu. Ovaj postupak se izvodi u zaštiti inertnog plina, obično argona, kako bi se spriječilo zagađivanje zavarenog spoja atmosferskim plinovima. Dodaci poput torijevog oksida ili drugih elemenata mogu se koristiti kako bi se poboljšale karakteristike elektrode [28].

Na slici 14 prikazana je shema TIG zavarivanja.



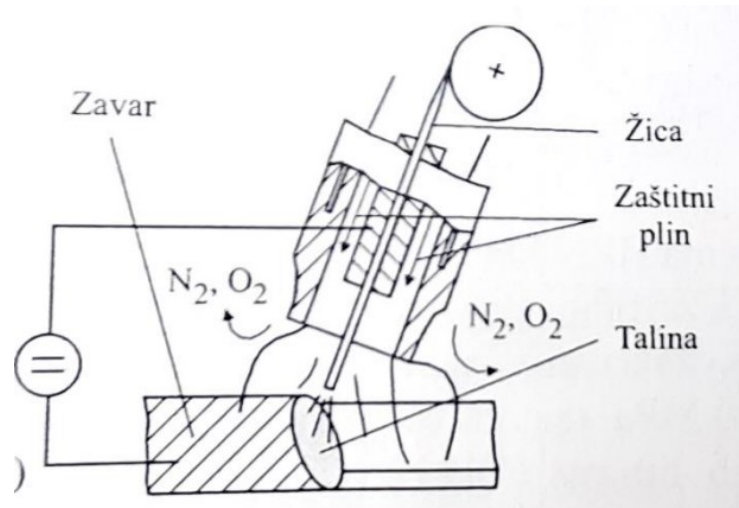
Slika 14. Shema TIG zavarivanja [28]

5.1.3. MIG zavarivanje

Elektrolučni postupak zavarivanja s taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (MIG) zavarivanje je metoda obloženog zavarivanja koja se izvodi u inertnom plinu poput argona ili helija. Plin okružuje žicu i spoj koji se zavaruje, a kemijski ne reagira s materijalom koji se zavaruje. To stvara zaštitno okruženje koje sprječava oksidaciju zavara. Zavaruje se pomoću gole elektrode ili žice s bakrenom prevlakom, omotane na kolut.

Tijekom zavarivanja, gdje se stvara luk između elektrode i materijala koji se zavaruje, korištenjem jednosmjerne struje postiže se visoka temperatura. To omogućuje zavarivanje debljih materijala i osigurava kvalitetne kutne zavare [27,29].

Shema MIG zavarivanja prikazana je na slici 15.



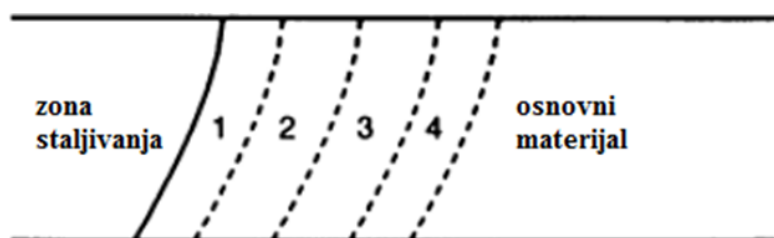
Slika 15. Shema MIG zavarivanja [29]

5.2. Mikrostruktura zavara

Prilikom zavarivanja martenzitnih nehrđajućih čelika, područje taljenja i dio zone utjecaja topline (ZUT), zagrijan na temperaturu višu od temperature austenitizacije za određeni čelik, podložni su stvaranju krhke martenzitne mikrostrukture tijekom hlađenja do sobne temperature. Budući da ova mikrostruktura ima značajno smanjenu duktilnost i lomnu žilavost u usporedbi s okolnom mikrostrukturom, potrebno je provesti toplinsku obradu radi poboljšanja mehaničkih svojstava, ako je ikako moguće.

Kontrola svojstava metala zavara nakon zavarivanja, kao i utjecaj toplinske obrade nakon zavarivanja, postiže se kroz pažljiv odabir dodatnog materijala. Pravilnim odabirom postupka zavarivanja, podešavanjem parametara zavarivanja te primjenom odgovarajuće naknadne toplinske obrade, mogu se postići željena mehanička svojstva u zoni utjecaja topline

Na slici 16 prikazana su 4 različita područja ZUT-a [27,30].



Slika 16. Četiri područja zone utjecaja topline [30]

Područje 1 nalazi se uz zonu staljivanja te se sastoji od dvije faze, martenzita i ferita. Ferit se pojavljuje jer je to područje zagrijano na temperaturu austenitnog i feritnog faznog područja, a zagrijano je zbog procesa zavarivanja.

U području 2 zbog vrlo visokih temperatura došlo je do otapanja karbida i porasta austenitnog zrna. Hlađenjem je od grubozrnatog austenitnog zrna došlo do pretvorbe u grubozrnatu martenzit.

Područje 3 sastoji se od nepopuštenog martenzita te dijelom od neotopljenih karbida. Razlog nepotpunog rastapanja karbida leži u tome što je područje unutar zona utjecaja topline bilo izloženo nešto nižim temperaturama nego područje 2.

Područje 4 sastoji se od karbida te popuštenog martenzita [30].

6. EKSPERIMENTALNI DIO

6.1. Cilj rada i provedena ispitivanja

Cilj eksperimentalnog dijela rada bio je analizirati makrostrukturu i mikrostrukturu te ispitati mehanička svojstva zavarenog spoja martenzitnog nehrđajućeg čelika oznake X3CrNiMo13-4 (1.4313).

Na zavarenom spoju provedena su sljedeća ispitivanja:

- kvalitativna i kvantitativna analiza mikrostrukture
- mjerenje tvrdoće (HV10 i HV0,2)
- ispitivanje žilavosti
- statičko vlačno ispitivanje
- savojno ispitivanje.

Analiza mikrostrukture provedena je u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje, a zavarivanje i preostala ispitivanja provedena su u Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju u Zagrebu. Zbog visoke tvrdoće osnovnog materijala uzorci za sva predviđena ispitivanja izrezani su vodenim mlazom.

6.2. Materijal za ispitivanje

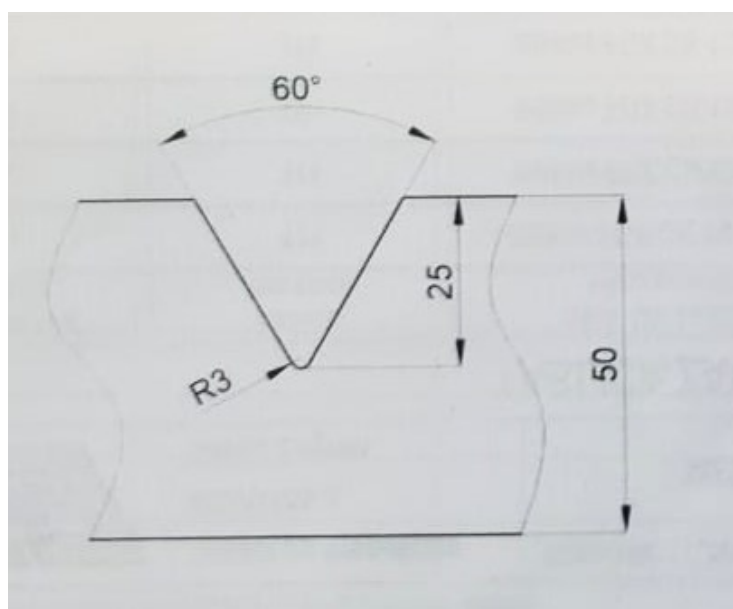
U svrhu istraživanja korišten je martenzitni nehrđajući čelik oznake X3CrNiMo13-4. Isporučeni čelik bio je u obliku ploče debljine 50 mm. Prema dokumentaciji dostavljenoj od proizvođača čelična ploča isporučena je u normaliziranom stanju. Normalizacijsko žarenje provedeno je na 1000 °C (± 20 °C) u trajanju od minimalno 30 minuta. Na ploču je urezan žlijeb za V-spoj koji je popunjen procesom ručnog elektrolučnog (REL) zavarivanja, u horizontalnom položaju (PA). Dodatni materijal pri zavarivanju bio je trgovačkog naziva BOHLER FOX CN 13/4. Zavarivanje je provedeno sukladno normi HRN EN ISO 15614 – 1:2017 A1:2019 [31].

Na slici 17 prikazana je ploča sa zavarenim spojem iz koje su izrezani uzorci za planirana ispitivanja.

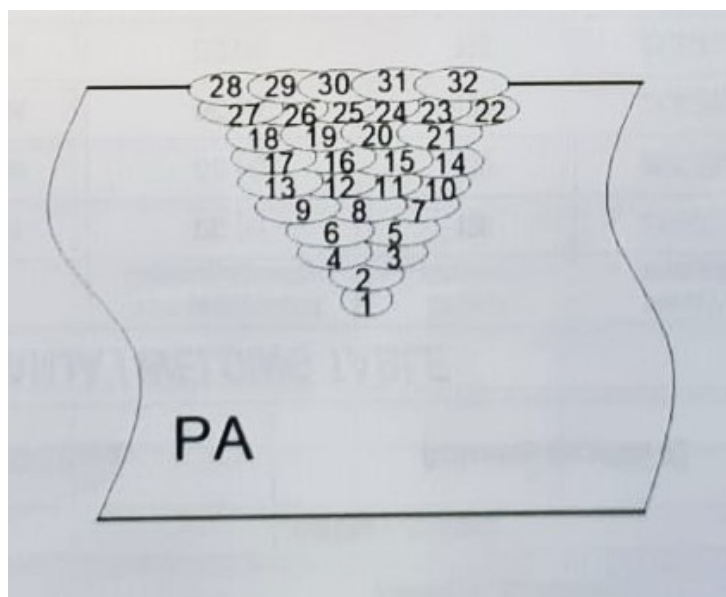
Na slici 18 prikazana je skica pripreme spoja, a na slici 19 prikazan je redoslijed zavarivanja.



Slika 17. Izrezani komadi martenzitnog nehrđajućeg čelika



Slika 18. Skica pripreme spoja s V-žlijebom



Slika 19. Prikaz redoslijeda zavarivanja

Proizvođač jamči kemijski sastav čelika prikazan u tablici 2.

Tablica 2. Kemijski sastav čelika X3CrNiMo13-4

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Fe
%	0,04	0,38	0,59	0,013	0,007	12,15	0,50	4,33	0,02	ostatak

U tablici 3 prikazana su mehanička svojstva propisana normom HRN EN ISO 6892-1:2019 [32].

Tablica 3. Mehanička svojstva čelika

$R_{p0,2}$	R_m	A
MPa	MPa	%
737	817	22

6.3. Analiza mikrostrukture zavarenog spoja

6.3.1. Makrostruktura zavarenog spoja

Analiza makrostrukture provedena je u Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju u Zagrebu, prema normi HRN EN ISO 17639:2022 [33], koja propisuje sve što je vezano uz razorno, makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavara metalnih materijala. Također, pri analizi zavarenog spoja korištena je norma HRI CEN ISO/TR 16060:2018 [34] koja propisuje nagrizajuća sredstva pri makroskopskoj i mikroskopskoj analizi zavarenih spojeva.

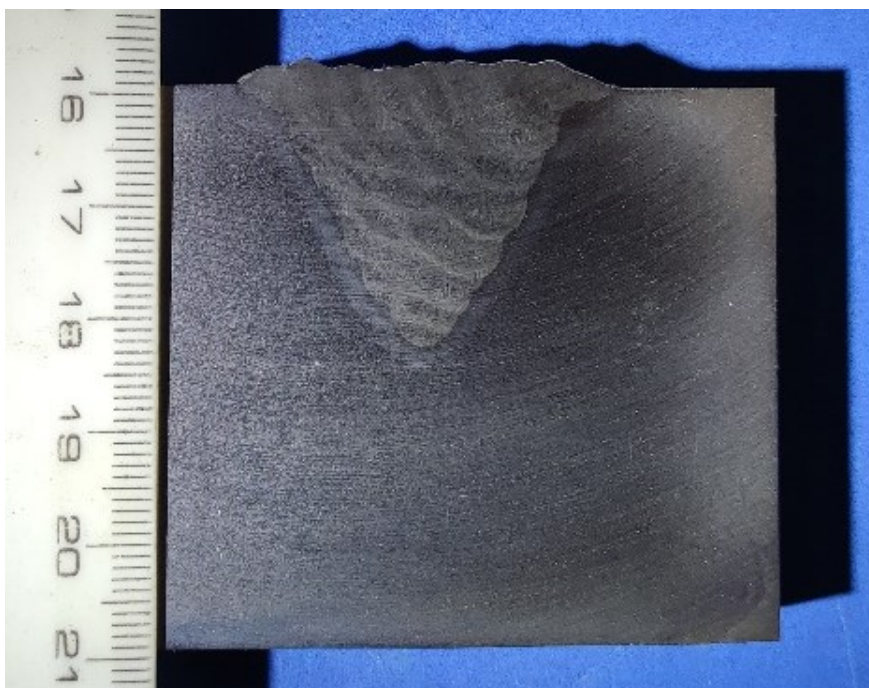
Uzorak za analizu makrostrukture izrezan je iz zavarene ploče vodenim mlazom. Uzorak obuhvaća područje metala zavara, zone utjecaja topline i jedan dio osnovnog materijala. Površina uzorka je brušena i završno polirana dijamantnim česticama promjera 3 μm . Nakon promatranja površine zavarenog spoja u poliranom stanju uzorak je nagrizen u vodenoj otopini dušične i klorovodične kiseline sljedećeg sastava:

39 ml vode (H_2O)

52 ml klorovodične kiseline (HCl)

9 ml dušične kiseline (HNO_3), (koncentracije 65 %).

Na slici 20 prikazana je fotografija makrostrukture zavarenog spoja nakon nagrizanja.



Slika 20. Makrostruktura zavarenog spoja uzorka

Nakon promatranja površine uzorka u poliranom i nagrizenom stanju utvrđeno je da zavar ima pravilnu geometriju i da se pojedini prolazi jasno ističu. Nisu uočene nikakve nepravilnosti (usahline, šupljine ili pukotine).

6.3.2. Analiza mikrostrukture

6.3.2.1. Priprema uzoraka za analizu mikrostrukture

Priprema i analiza metalografskih uzoraka obavljani su u Laboratoriju za materijalografiju na Zavodu za materijale, Fakulteta strojarstva i brodogradnje.

Rezanje

Kako su dimenzije zavarenog spoja bile prevelike i zavareni spoj nije mogao stati u jedan metalografski uzorak, izrezana su dva uzorka na kojima je analizirana mikrostruktura. Rezanje je obavljeno na ručnom stroju za rezanje Mecatome T260 prikazanom na slici 21. Tijekom postupka rezanje cijelo vrijeme teče voda čija je svrha hlađenje reznog područja.

Zbog njihove veličine, uzorci se nisu zalijevali u polimernu masu.



Slika 21. Uređaj za rezanje

Brušenje

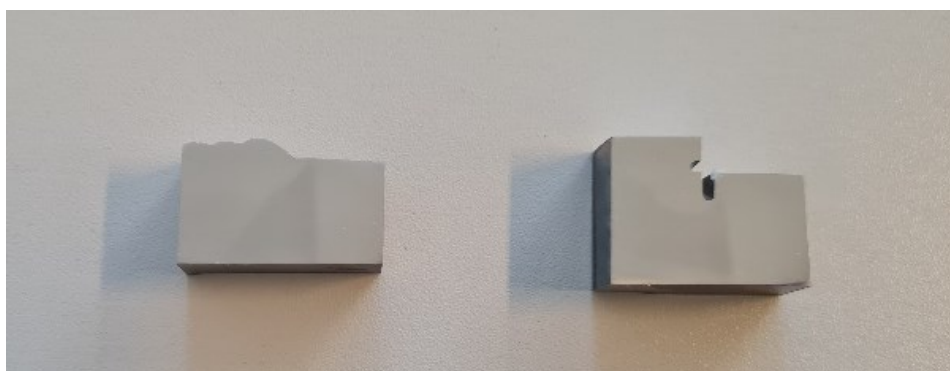
Brušenje je provedeno u pet stupnjeva, a parametri brušenja prikazani su u tablici 9. Tijekom cijelog procesa brušena površina uzorka hladi se vodom koja istodobno odnosi abradirane čestice s područja brušenja.

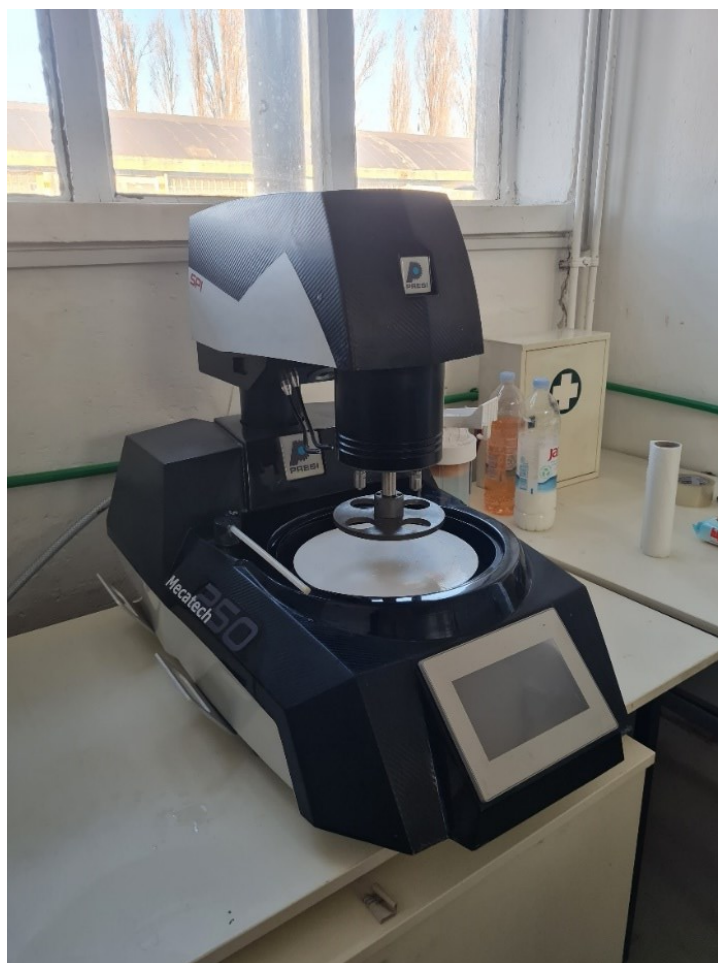
Tablica 4. Parametri brušenja

Stupanj brušenja	1	2	3	4	5
Podloga	brusni papir, SiC				
Oznaka brusnog papira	P80	P320	P600	P1200	P4000
Brzina vrtnje, o/min	300				
Sredstvo za hlađenje	voda				

Poliranje

Kod poliranja uzoraka kao sredstvo za hlađenje i podmazivanje umjesto vode koristio se lubrikant. Brzina poliranja iznosila je 150 o/min, a sam proces sastojao se od dva koraka. U prvome koraku za poliranje koristila se dijamantna pasta s veličinom zrna 3 μm dok u drugom koraku koristimo tekućinu za poliranje s veličinom dijamantnog zrna od 0,03 μm . Nakon poliranja promatra se površina uzorka pod svjetlosnim mikroskopom pri različitim povećanjima između 50 \times i 1000 \times . Na slici 22 prikazani su uzorci nakon poliranja, a na slici 23 vidi se uređaj za brušenje i poliranje.

**Slika 22. Uzorak 1 i uzorak 2 nakon poliranja**



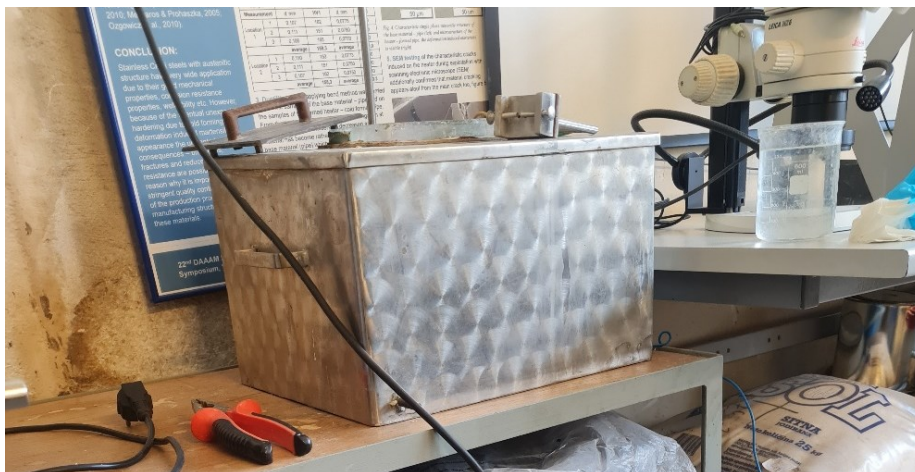
Slika 23. Uređaj za brušenje i poliranje

Nagrivanje

Da bi se bolje uočila mikrostruktura potrebno je elektrokemijski nagristi površinu uzorka. Nagrivanje se provodi stavljanjem uzorka u metalni držač, a uzorak se uranja u 10 %-tnu oksalnu kiselinu. Kroz uzorak se pušta struja napona 10 V i jakosti 5 A. Uzorak se drži u kiselini oko 30 sekundi, a nakon toga se vadi i ispiri vodom da se spriječi daljnje nagrivanje.

Komora za nagrivanje i uređaj na kojem se podešavaju parametri struje i napona prikazani su na slikama 24 i 25.

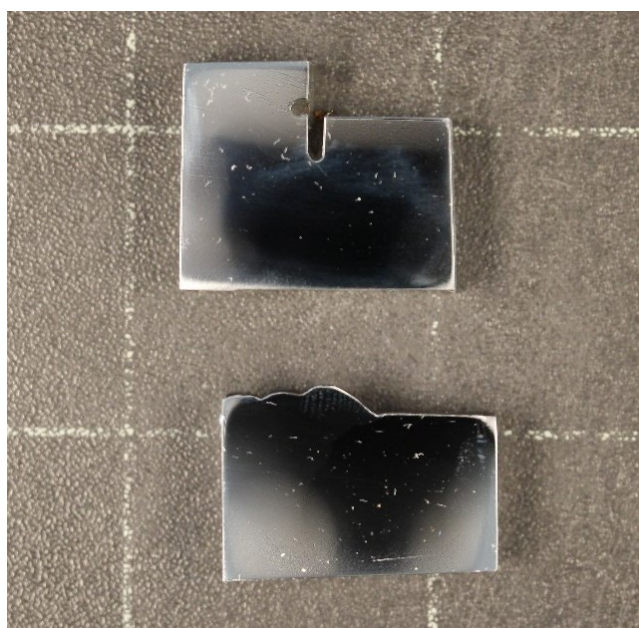
Na slici 26 prikazani su uzorci nakon nagrivanja.



Slika 24. Komora za nagrivanje



Slika 25. Uredaj za podešavanje parametara struje



Slika 26. Izgled uzoraka nakon nagrivanja

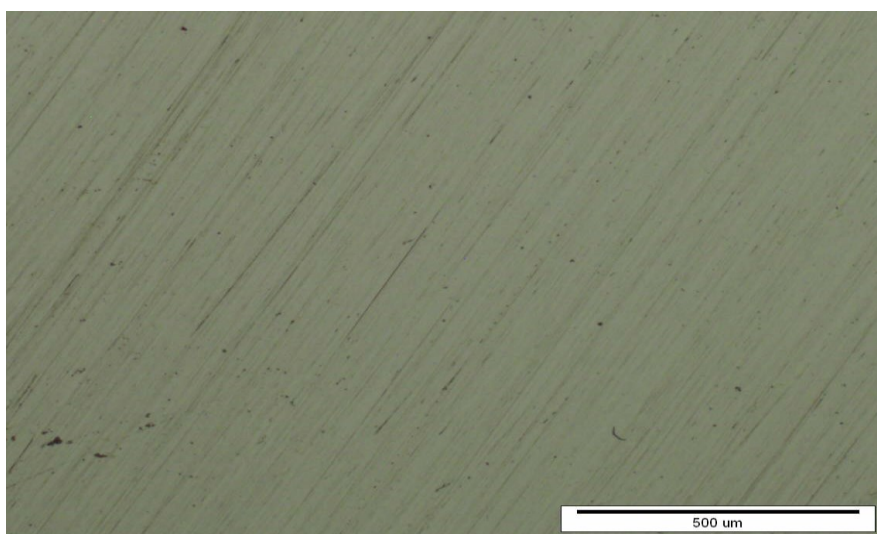
6.3.2.2. Analiza mikrostrukture u poliranom i nagrizenom stanju

Analize mikrostrukture provodile su se pomoću svjetlosnog mikroskopa Olympus GX51 prikazanog na slici 27 koji posjeduje izmjenjive objektivne na revolveru koji omogućuju povećanja od $50\times$ do $1000\times$. Prije promatranja pod svjetlosnim mikroskopom površina uzoraka čisti se alkoholom.



Slika 27. Svjetlosni mikroskop

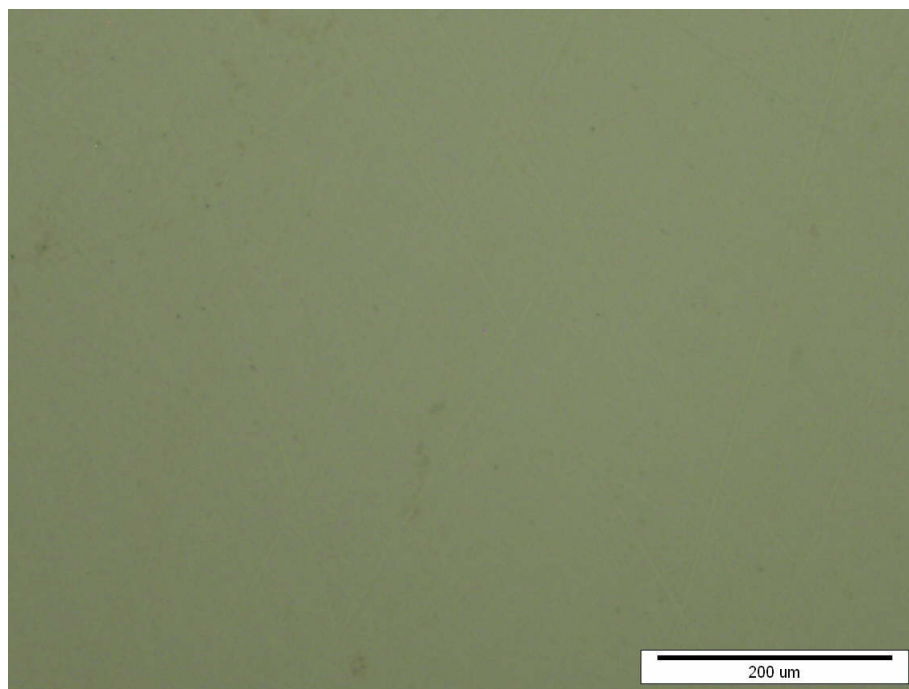
Na slici 28 prikazana je površina uzorka nakon brušenja gdje nije moguće vidjeti mikrostrukturu uzorka zbog velike hrapavosti same površine.



Slika 28. Mikrostruktura uzorka u brušenom stanju uvećanja $50\times$

Općenito, pri analizi mikrostrukture u poliranom stanju mogu se uočiti pore i pukotine u zavarenom spoju ili zoni utjecaja topline i zato se pri analizi mikrostrukture zavarenih spojeva uzorak uvijek promatra u poliranom stanju. Na konkretnim uzorcima nisu uočene nikakve nepravilnosti.

Na slici 29 prikazana je polirana površina metala zavara snimljena pri povećanju od 100×.



Slika 29. Polirana površina metala zavara

Nagrizanjem površine uzorka u poliranom stanju otkriva se postojeća mikrostruktura zavarenog spoja i razlike između pojedinih područja: zone utjecaja topline, osnovnog materijala i metala zavara.

Na slici 30 prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala u nagrizenom stanju snimljena pri povećanju 200×. S obzirom na to da je čelična ploča isporučena u normaliziranom stanju mikrostruktura je sitnozrnata i poprilično usmjerena. Sastoji se od ferita i vrlo sitnih izlučenih karbida.

Na slici 31 prikazana je mikrostruktura metala zavara snimljena u sredini zavara pri povećanju 200× u nagrizenom stanju. Vidljiva je tipična ljevačka mikrostruktura, relativno sitnozrnata. Mikrostruktura na istom području prikazana je i na slici 32, ali uz puno veće povećanje.

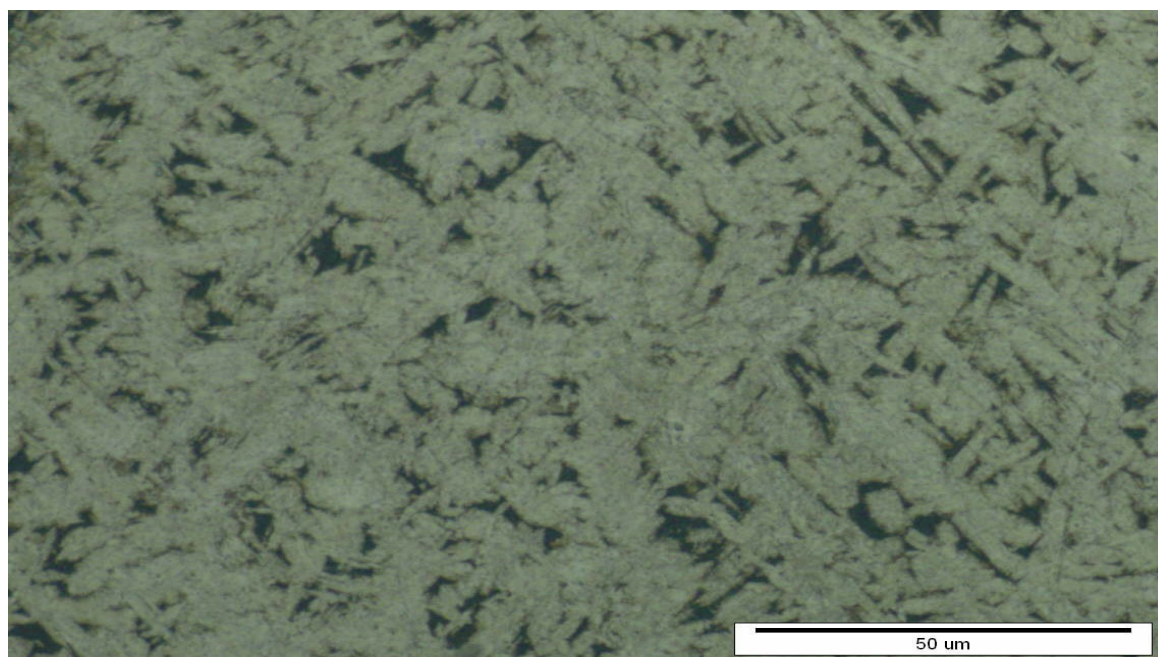
Na slici 33 prikazana je mikrostruktura metala zavara u korijenu snimljena pri povećanju 200×. Vide se pojedini slojevi zavarivanja.



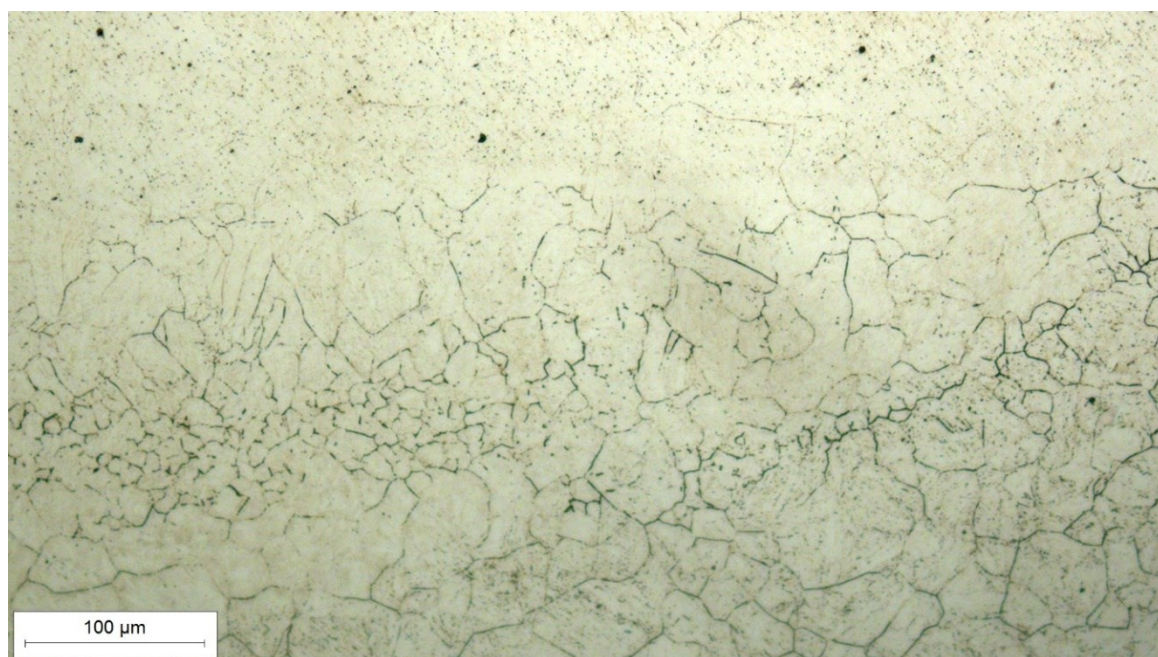
Slika 30. Mikrostruktura osnovnog materijala snimljena pri povećanju 200×



Slika 31. Mikrostruktura metala zavara snimljena pri povećanju 200×



Slika 32. Mikrostruktura u sredini metala zavara snimljena pri povećanju 500×



Slika 33. Mikrostruktura metala zavara u korijenu uvećana 200×

Na slici 34 prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline u korijenu zavara, a na slici 35 vidi se mikrostruktura zone utjecaja topline u sredini zavara. S obzirom na veliki unos topline, ali i veliku debljinu ploče te visoki udio legirnih elemenata, u području zone utjecaja topline moglo je doći do nadkritičnog hlađenja i do vrlo vjerojatnog nastanka martenzita. To potvrđuje

fotografija mikrostrukture u zoni utjecaja topline gdje je vidljiva igličasta martenzitna mikrostruktura.



Slika 34. Mikrostruktura ZUT-a korijena zavora snimljena pri povećanju 200×



Slika 35. Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavora snimljena pri povećanju 200×

6.4. Ispitivanje tvrdoće

Tvrdoća je ispitana metodom prema Vickersu koristeći opterećenja od 1,961 N (HV0,2) i 98,07 N (HV10) te je propisana normom HRN EN ISO 6507-1:2018 [35].

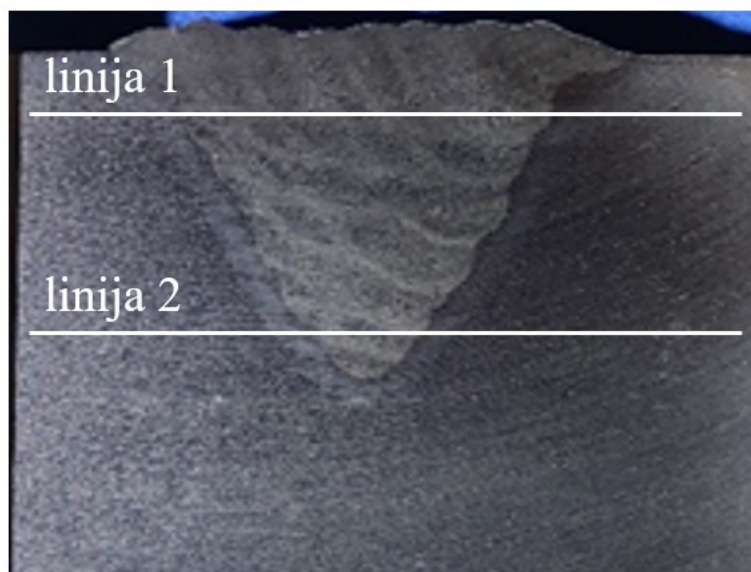
Tvrdoća HV10 mjerena je na tvrdomjeru prikazanom na slici 36. Na slici 37, bijelim linijama 1 i 2, prikazane su pozicije na kojima su izmjerene tvrdoće u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline te metalu zavara.

Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 4.

Najviše pojedinačne vrijednosti tvrdoće izmjerene su u metalu zavara (445 HV10), a najniže u osnovnom materijalu (285 HV10). Vrijednosti tvrdoće u zoni utjecaja topline su dosta visoke i kreću se od 350 HV10 do 429 HV10.



Slika 36. Tvrdomjer



Slika 37. Pozicije mjerenja tvrdoće HV10

Tablica 5. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10

		Linija 1	Linija 2
Osnovni materijal, lijevo	1	285	285
	2	285	297
	3	297	297
Zona utjecaja topline, lijevo	4	383	360
	5	376	350
	6	401	366
Metal zavara	7	445	420
	8	420	416
	9	420	432
Zona utjecaja topline, desno	10	420	420
	11	420	420
	12	420	405
Osnovni materijal, desno	13	285	297
	14	297	297
	15	297	297

Mjerenje mikrotvrdoće HV0,2 provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju na Zavodu za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, na mikrotvrdomeru PMT-3U4.2 prikazanom na slici 38. Mikrotvrdoća je mjerena u osnovnom materijalu, metalu zavara i ZUT-u, na ukupno 15 pozicija. Na svakoj poziciji provedena su po 3 mjerenja. Mjerenja su provedena na poliranoj površini metalografskog uzorka.

Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 5.



Slika 38. Mikrotvrdomer PMT-3U4.2

Tablica 6. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2

Broj mjerenja		HV0,2	
		x_i	\bar{x}
1	metal zavara sredina	343	342
		313	
		369	
2	metal zavara sredina	355	358
		336	
		383	
3	ZUT sredina	313	288
		269	
		283	
4	metal zavara sredina	399	381

		362	
		383	
5	ZUT sredina	303	316
		303	
		343	
6	metal zavara sredina	362	362
		349	
		376	
7	ZUT sredina	234	219
		214	
		208	
8	osnovni materijal	241	274
		269	
		313	
9	metal zavara korijen	418	405
		399	
		399	
10		336	329
		349	
		303	
11		426	374
		319	
		376	
12		418	360
	325		
	336		
13	ZUT korijen	257	268
		269	
		278	
14		269	247
		227	
		245	
15		253	278
		308	
		274	

Prosječne vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 niže su od vrijednosti tvrdoće HV10 u istim područjima zavarenog spoja. Kao i kod mjerenja tvrdoće HV10 najviše vrijednosti mikrotvrdoće izmjerene su u metalu zavara. Vrijednosti mikrotvrdoće u zoni utjecaja topline rasipaju se u širokom rasponu od 208 HV0,2 do 343 HV0,2. Vrijednosti mikrotvrdoće u osnovnome materijalu kreću se u rasponu od 241 HV0,2 do 313 HV0,2.

6.5. Ispitivanje žilavosti

Ispitivanje žilavosti provedeno je na Charpyevom bat u Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju, prema normi HRN EN ISO 148-1:2016 [36]. Ispitni uzorci dimenzija 10 mm × 10 mm × 55 mm imali su V-utor. Žilavost je ispitana pri temperaturi od 0 °C. Tri uzorka su izrezana iz sredine metala zavora, a tri iz zone utjecaja topline. Charpyev bat prikazan je na slici 39., a na slici 40. prikazani su uzorci nakon ispitivanja.

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 6.

Dobivene vrijednosti pokazuju da je žilavost materijala u zoni utjecaja topline viša od žilavosti u metalu zavora što je potpuno u skladu s očekivanjima s obzirom na razlike između lijevane i gnječene mikrostrukture.



Slika 39. Charpyev bat



Slika 40. Uzorci na kojima je mjerena žilavost

Tablica 7. Rezultati mjerenja žilavosti

Pozicija	Temperatura, °C	Žilavost, J
metal zavara	0	27
	0	24
	0	33
zona utjecaja topline	0	86
	0	177
	0	124

6.6. Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje provedeno je u Mehaničkom laboratoriju Zavoda za zavarivanje, ispitivanje i tehnologiju u Zagrebu. Ispitivanje je provedeno prema normi HRN EN ISO 5178:2019 [37] na kidalici koja je prikazana na slici 41. Dva ispitna uzorka izrezana su iz osnovnog materijala, a dimenzije poprečnih presjeka na oba uzorka bile su 25,1 mm × 24,9 mm. Na slici 42. prikazani su uzorci nakon kidanja, a u tablici 7 rezultati statičkog vlačnog ispitivanja. Obje epruvete pukle su daleko od zavarenog spoja koji se nalazio na polovici

ispitnih uzoraka. Izmjerene vrijednosti vlačne čvrstoće više su od čvrstoće koju proizvođač jamči.



Slika 41. Univerzalna kidalica



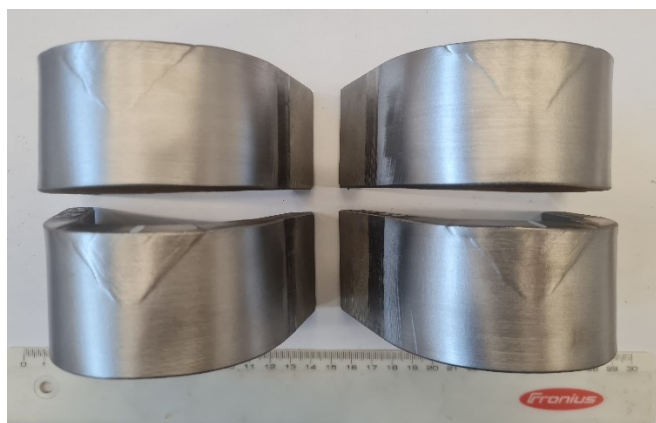
Slika 42. Epruvete za ispitivanje vlačne čvrstoće

Tablica 8. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

Uzorak	Maksimalna sila, kN	Vlačna čvrstoća, MPa	Ispitna temperatura, °C
1	517	827	23
2	518	829	23

6.7. Ispitivanje na savijanje

Ispitivanje savijanjem izvedeno je savijanjem uzoraka na korijen i lice zavora pod kutom od 180°. Ispitivanje je provedeno prema normi HRN EN ISO 7438:2020 [38]. Izgled uzoraka nakon ispitivanja prikazan je na slici 43.

**Slika 43. Izgled lica i korijena zavora nakon savijanja**

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 8. Promjer trna pri savijanju iznosio je 60 mm, a razmak između oslonaca iznosio je 90 mm. Na kritičnoj površini nisu uočene nikakve pukotine niti druge nepravilnosti.

Tablica 9. Rezultati savojnog ispitivanja

Uzorak	Dimenzije uzorka, mm	Temperatura, °C	Napomena
1	50 × 10	23	bez nepravilnosti
2	50 × 10	23	bez nepravilnosti
3	50 × 10	23	bez nepravilnosti
4	50 × 10	23	bez nepravilnosti

7. ZAKLJUČAK

Na temelju ispitivanja koja su provedena u svrhu karakterizacije mikrostrukture i svojstava zavarenog spoja martenzitnog nehrđajućeg čelika oznake X3CrNiMo 13-4 te pritom dobivenih rezultata, može se zaključiti sljedeće:

- Na makro nagriženom uzorku utvrđeno je da zavar ima pravilnu geometriju, pojedini prolazi jasno se ističu, a nisu uočene nikakve nepravilnosti.
- Mikrostruktura osnovnog materijala je sitnozrnata i poprilično usmjerena, sastavljena od ferita i vrlo sitnih karbida. To je očekivano s obzirom da se radi o valjanoj ploči koja je isporučena u normaliziranom stanju.
- Metal zavara ima tipičnu ljevačku mikrostrukturu relativno sitnozrnatu.
- Mikrostruktura u zoni utjecaja topline je martenzitna što je očekivano s obzirom na visoki udio legiranih elemenata u čeliku (osobito nikla) te brzo odvođenje topline iz zavarenog spoja zbog velike debljine ploče.
- Promjena mikrostrukture u zavarenom spoju utjecala je na povećanje tvrdoće u odnosu na tvrdoću osnovnog materijala koja je iznosila oko 293 HV10. Srednja vrijednost tvrdoće u metalu zavara iznosila je 426 HV10, a u zoni utjecaja topline od 396 HV10.
- Vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 niže su od vrijednosti tvrdoće HV10 u istim područjima zavarenog spoja, a rasipanja rezultata u svim područjima su jako velika.
- Srednja vrijednost žilavosti materijala izmjerena u zoni utjecaja topline na 0 °C iznosila je 129 J, a u metalu zavara 28 J.
- Srednja vrijednost vlačne čvrstoće u području zavarenog spoja, izmjerena pri statičkom vlačnom ispitivanju, iznosila je 828 MPa što je više od zajamčene vrijednosti vlačne čvrstoće osnovnog materijala.
- Nakon ispitivanja savijanjem pod kutom od 180° oko trna promjera 60 mm, nisu uočene nikakve pukotine na kritičnoj površini lica i korijena zavara.

Svi navedeni rezultati potvrđuju zadovoljavajuću kvalitetu zavarenog spoja martenzitnog nehrđajućeg čelika oznake X3CrNiMo13-4.

8. LITERATURA

- [1] Brkić S. Nehrđajući čelici u farmaceutskoj, prehrambenoj i kemijskoj industriji. Zagreb: Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju; 2007.
- [2] nehrđajući čelik - Hrvatska enciklopedija .
<https://www.enciklopedija.hr/clanak/nehrdjajuci-celik> (pristupljeno 16.02.2024.).
- [3] Nehrđajući čelik <https://www.binzel-abicor.com/HR/hrv/solutions/material/stainless-steel/> (pristupljeno 16.02.2024.).
- [4] Rede V. Posebni metalni materijali, autorizirana predavanja. Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2023.
- [5] Ferritic Stainless Steel_ Properties, Grades, & Applications - Matmatch
<https://matmatch.com/learn/material/ferritic-stainless-steel> (pristupljeno 17.02.2024.)
- [6] Caballero F-G de AC, Capdevila C, García-Junceda A, García de Andrés C. Modeling of the microstructural evolution during intercritical annealing of steels with a ferrite and pearlite initial microstructure .
- [7] Austenitic Stainless Steel_ Definition, Composition, Types, Grades, Properties, and Applications _ Xometry.
<https://www.xometry.com/resources/materials/austenitic-stainless-steel/> (pristupljeno 17.02.2024.).
- [8] Juraga I. Zavarivanje čelika otpornih na koroziju , Zagreb: Hrvatsko društvo za zaštitu materijala; 2005.
- [9] CORE-Materials _ Flickr <https://www.flickr.com/photos/core-materials/> (pristupljeno 18.02.2024.).
- [10] Juraga I, Stojanović I, Ljubenković B. Experimental research of the duplex stainless steel welds in shipbuilding, Zagreb: 2014.
- [11] Is Stainless Steel Magnetic_ - Home. Is Stainless Steel Magnetic_ - Home (pristupljeno 18.02.2024.).
- [12] Čelici za rad pri povišenim i visokim temperaturama _ slideum.com
<https://slideum.com/doc/1259525/%C4%8Delici-za-rad-pri-povi%C5%A1enim-i-visokim-temperaturam> (pristupljeno 19.02.2024.)

- [13] Barbosa C, Mesquita R, Sokolowski A, Daros D, Bressan J. fluence of hardness on the wear resistance of 17-4 PH stainless steel evaluated by the pin-on-disc testing.
- [14] Rios P, Lesley R, Padilha A. 23 Stainless 17-7 PH-type steel in the RH 950 (i.e., refrigerated and... _ Download Scientific Diagram.
- [15] Çetin S, Kırak T. Microstructure of the precipitation-hardened 15-5 stainless steel Slika... _ Download Scientific Diagram.
- [16] Ki Leuk Lai J, Ho Lo K, Hung Shek C, editors. Stainless Steels: An Introduction and Their Recent Developments. BENTHAM SCIENCE PUBLISHERS; 2012. <https://doi.org/10.2174/97816080530561120101>.
- [17] Chen X, Dessau J, Yu H, Han F. Vertical section diagram of Fe-C-Cr phase diagram with 0.05% C.... _ Download Scientific Diagram.
- [18] Novosel M, Krumes D. Posebni čelici . Slavonski Brod: 1998.
- [19] Martenzitni nehrđajući čelik_ što trebate znati - ETCN. <https://china-maching.com/hr/martenzitni-nehrdajuci-celik-sto-trebate-znati/> (pristupljeno 20.02.2024.)
- [20] Misra RDK, Wu KM, Wan X, Luo Q. Design of novel Fe–Mn–Ni cryogenic steel: microstructure-property relationship during simulated welding. .
- [21] Lippold JC. Welding Metallurgy and Weldability. Wiley; 2015. <https://doi.org/10.1002/9781118960332>.
- [22] Nehrđajući čelik kao temelj današnje industrije - Blog - Laser Ing. <https://www.laser-ing.hr/blog/nehrdajuci-celik-temelj-danasnje-industrije/> (pristupljeno 20.02.2024.)
- [23] Linearna vodilica od od nehrđajućeg čelika WRA _ WRB _ Tuli.hr. <https://www.tuli.hr/stainlesssteel-roundshaft-linearrail-wra-wrb-4952> (pristupljeno 20.02.2024.)
- [24] HRN EN 10088-1:2024; Nehrđajući čelici - 1. dio: Popis nehrđajućih čelika n.d.
- [25] Gojić M. Metalurgija čelika. Sisak: 2006.
- [26] Grgić M. Zavarljivost i zavarivanje Hardox materijala. Diplomski rad. Sveučilište u Slavanskom Brodu; 2023.
- [27] Glavni postupci zavarivanja - Probe d.o.o. <https://probe.hr/glavni-postupci-zavarivanja/> (pristupljeno 21.02.2024).

- [28] (TOIS) TIG - postupak zavarivanja _ Tehnologija strojarskih instalacija.
<https://tsi.webador.com/tois-tig-postupak-zavarivanja> (pristupljeno 21.02.2024.).
- [29] (TOIS) MIG_MAG postupak zavarivanja _ Tehnologija strojarskih instalacija
<https://tsi.webador.com/tois-mig-mag-postupak-zavarivanja> (pristupljeno 22.02.2024.).
- [30] Barić E-E. Zavarljivost martenzitnog čelika X3CrNiMo13-4, Diplomski rad,.
Fakultet. Fakultet strojarstva i brodogradnje. Sveučilište u Zagrebu; 2015.
- [31] HRN EN ISO 15614-1:2017/A1:2019 ; Specifikacija i kvalifikacija postupaka zavarivanja za metalne materijale -Ispitivanje postupka zavarivanja - 1. dio: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika i elektrolučno zavarivanje nikla i legura nikla.
- [32] HRN EN ISO 6892-1:2019;Metalni materijali - Vlačno ispitivanje - 1. dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi.
- [33] HRN EN ISO 17639:2022;Razorna ispitivanja zavara na metalnim materijalima - Makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavara.
- [34] HRI CEN ISO/TR 16060:2018; ispitivanja razaranjem zavara na metalnim materijalima - Nagrizajuća sredstva za makroskopska i mikroskopska ispitivanja.
- [35] HRN EN ISO 6507-1:2023; Metalni materijali - Ispitivanje tvrdoće prema Vickersu - 1. dio: Metoda ispitivanja.
- [36] HRN EN ISO 148-1:2016; Metalni materijali - Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom - 1. dio: Metoda ispitivanja.
- [37] HRN EN ISO 5178:2019; Razorna ispitivanja zavarenih spojeva na metalnim materijalima - Uzdužno vlačno ispitivanje metala zavara zavarenih spojeva nastalih taljenjem.
- [38] HRN EN ISO 7438:2020; Metalni materijali - Ispitivanje savijanjem.