

# Karakterizacija duplex nehrđajućeg čelika nakon zavarivanja i žarenja

---

**Kovačević, Domagoj**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Metallurgy / Sveučilište u Zagrebu, Metalurški fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:115:532184>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET  
UNIVERSITY OF ZAGREB  
FACULTY OF METALLURGY

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb - Repository of Faculty of Metallurgy University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Domagoj Kovačević

ZAVRŠNI RAD

Sisak, rujan 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
METALURŠKI FAKULTET

Domagoj Kovačević

KARAKTERIZACIJA DUPLEKS NEHRĐAJUĆEG ČELIKA NAKON  
ZAVARIVANJA I ŽARENJA

ZAVRŠNI RAD

Voditelj: prof.dr.sc Stjepan Kožuh

Članovi ispitnog povjerenstva:

prof.dr.sc. Mirko Gojić – predsjednik

prof.dr.sc Stjepan Kožuh – član

doc.dr.sc Ivan Jandrić – član

doc.dr.sc Ivana Ivanić – zamjenski član

Sisak, rujan 2020.

IME: Domagoj  
PREZIME: Kovačević  
MATIČNI  
BROJ: BM-3595/16

Na temelju članka 19. stavak 2. Etičkog kodeksa Sveučilišta u Zagrebu dajem sljedeću

## IZJAVU O IZVORNOSTI

Izjavljujem da je moj završni rad pod naslovom:

KARAKTERIZACIJA DUPLEKS NEHRĐAJUĆEG ČELIKA NAKON ZAVARIVANJA  
I ŽARENJA

izvorni rezultat mojeg rada te da se u izradi istoga nisam koristio drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Sisak, \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(vlastoručni potpis)

\_\_\_\_\_  
*Izrazi koji se koriste u ovoj Izjavi, a imaju rodno značenje, koriste se neutralno i odnose se jednako i na ženski i na muški rod.*

*Zahvaljujem se svom mentoru prof.dr.sc Stjepanu Kožuhu na trudu, strpljenju i uloženom vremenu tijekom izrade završnog rada.*

*Hvala doc.dr.sc. Ivani Ivanić na pomoći pri izradi ekperimentalnog dijela završnog rada.*

*Roditeljima, sestri, šogoru i nećaku hvala za vječitu podršku i potporu tijekom mog cjelokupnog školovanja.*

*Hvala i svim kolegama te profesorima s kojima sam prolazio kroz ovaj period života.*

## SAŽETAK

### KARAKTERIZACIJA DUPLEKS NEHRĐAJUĆEG ČELIKA NAKON ZAVARIVANJA I ŽARENJA

Dupleks nehrđajući čelici se nazivaju još i austenitno-feritni nehrđajući čelici te svoje ime duguju miješanoj strukturi austenita i ferita pri sobnoj temperaturi. Osnova dupleks nehrđajućih čelika je Fe-Cr-Ni-N sustav, a glavne faze su austenit ( $\gamma$ ) i ferit ( $\alpha$ ). Glavna prednost dupleks nehrđajućih čelika je dobra korozijska otpornost. Oni uglavnom sadrže viši sadržaj kroma te niži sadržaj nikla, a često sadrže i molibden radi povećanja otpornosti na koroziju. U ovom radu provedena je mikrostrukturna analiza i ispitivanje mikrotvrdoće zavarenog dupleks nehrđajućeg čelika X2CrNiMoN22-5-3. Uzorci su zavareni tako da je korijen zavara zavaren TIG postupkom, a za popunu zavara korišten je REL postupak zavarivanja. Analiza mikrostrukture i mikrotvrdoće je provedena prije i nakon žarenja (850 °C/60 min/zrak). Uzorci su nakon žarenja metalografski pripremljeni. Optička mikroskopija i pretražna elektronska mikroskopija s energetske disperzijskom spektrometrijom su korištene za mikrostrukturnu karakterizaciju. Prije žarenja mikrostruktura se sastojala od ferita i austenita, a nakon žarenja je utvrđena prisutnost sigma faze u zoni taljenja. Mikrotvrdoća uzoraka prije i nakon žarenja mjerena je metodom po Vickersu. Nakon žarenja zamijećen je najveći porast mikrotvrdoće u zoni taljenja (s 294,9 HV1 na 357,0 HV1).

**Ključne riječi:** dupleks nehrđajući čelici, zavarivanje, mikrostruktura, žarenjem sigma faza

## ABSTRACT

### CHARACTERIZATION OF DUPLEX STAINLESS STEEL AFTER WELDING AND ANNEALING

Duplex stainless steels also called austenitic-ferritic stainless steels, owe their name to the mixed austenite and ferrite structure at room temperature. Basis of duplex stainless steels is Fe-Cr-Ni-N system, whereas austenite ( $\gamma$ ) and ferrite ( $\alpha$ ) are main phases. Main advantage of duplex stainless steel is very good corrosion resistance. They usually contain higher content of chromium, lower content of nickel and often contain molybdenum to increase corrosion resistance. In this paper microstructure analysis and microhardness testing was carried out on welded duplex stainless steel X2CrNiMoN22-5-3. Samples were welded so that the root of weld was welded with TIG process, and for filling REL process was used. Analysis of microstructure and microhardness was conducted before and after annealing (850 °C/ 60 min/ air). After annealing, the samples were metallographically prepared. Optical microscopy and scanning electron microscopy with energy dispersion spectrometer were used for microstructural characterization. Before annealing microstructure was consisted of ferrite and austenite, and after annealing presence of sigma phase was determined in melting zone. Microhardness of samples before and after heat treatment was measured by Vickers method. After annealing it is noticed the highest increase in microhardness in melting zone (from 294,9 HV1 to 357,0 HV1).

**Key words:** duplex stainless steels, welding, microstructure, annealing, sigma phase

## Sadržaj

<b>1. Uvod</b> .....	1
<b>2. Teorijski dio</b> .....	2
<b>2.1. Zavarivanje</b> .....	2
<b>2.1.1. TIG zavarivanje</b> .....	3
<b>2.1.2. REL zavarivanje</b> .....	5
<b>2.2. Nehrđajući čelici</b> .....	6
<b>2.2.1. Austenitni nehrđajući čelici</b> .....	9
<b>2.2.2. Feritni nehrđajući čelici</b> .....	11
<b>2.2.3. Dupleks nehrđajući čelici</b> .....	13
<b>2.3. Zavarivanje nehrđajućih čelika</b> .....	15
<b>3. Eksperimentalni dio</b> .....	17
<b>3.1. Zavarivanje</b> .....	17
<b>3.2. Žarenje zavarenog spoja</b> .....	18
<b>3.3. Optička i elektronska mikroskopija</b> .....	19
<b>3.4. Mjerenje mikrotvrdoće</b> .....	21
<b>4. Rezultati i rasprava</b> .....	23
<b>4.1. Mikrostrukturalna karakterizacija</b> .....	23
<b>4.2. Mikrotvrdoća prije i nakon žarenja</b> .....	30
<b>5. Zaključak</b> .....	32
<b>6. Literatura</b> .....	33
<b>7. Životopis</b> .....	35

## 1. Uvod

Većina tehnika spajanja materijala je razvijena u zadnjih stotinjak godina no neke tehnike spajanja poput kovačkog zavarivanja željeza i lemljenja postoje mnogo duže. Tijekom brončanog doba pojavljuju se lemljenje i kovačko zavarivanje zlata ali nisu našli širu uporabu već su se koristili za izradu detalja uglavnom na nakitu. Zavarivanje postaje tehnika od velike ekonomske važnosti onog trena kada uporaba željeza postaje znatno raširenija. Tijekom srednjeg vijeka spajanjem metala proizvode se razna oružja poput mačeva, strijela, oklopa i topova [1].

Tijekom 1. i 2. svjetskog rata razvijaju se nove metode spajanja metala zbog potrebe za pouzdanim i jeftinim metodama spajanja. Po završetku 2. svjetskog rata razvijeno je nekoliko modernih tehnika zavarivanja a razvojem tehnologije razvijaju se i lasersko zavarivanje te zavarivanje sa snopom elektrona. Danas je sve rasprostranjenije automatsko zavarivanje a znanstvenici kontinuirano rade na razvoju novih tehnologija [2].

Krajem 1800.-ih legure kroma i željeza su se koristile ali nije se znalo za njihovu otpornost na koroziju. Harry Brearley, metalurg iz Engleskog grada Sheffield-a je zaslužan za otkriće martenzitnih nehrđajućih čelika 1913. godine. On je otkrio da je čelik koji sadrži oko 0,3% ugljika i 13% kroma teže ogrebat i da se ne pojavljuje hrđa [3]. Benno Strauss i Eduard Maurer 1912. godine patentiraju Cr-Ni nehrđajući čelik, međutim istovremeno u Francuskoj i SAD-u se također razvija isti tip legure. Tijekom 1930-e dolazi do naglog razvoja i otkrića tipova čelika koji se koriste sve do danas. Tijekom 1970-ih dolazi do razvoja novih tehnologija proizvodnje čelika što pojeftinjuje nehrđajuće čelike a koji su se do tada smatrali poludragim materijalom zbog svoje cijene. Danas kako tehnologija napreduje razvijaju se razne vrste materijala ali potražnja za nehrđajućim čelicima i dalje raste zbog njihovog jedinstvenog svojstva otpornosti na koroziju [3].

Prvi ingot od nehrđajućeg čelika je izliven u Pittsburgh-u, SAD, u tvrtki Firth Sterling Ltd. 3. ožujka 1915. godine [4]. Iako se Brearley uzima kao izumitelj nehrđajućih čelika njegovo otkriće nebi bilo moguće bez istraživanja koja su se dogodila u Francuskoj i Njemačkoj 10-ak godina prije. Za otkriće austenitnih legura zaslužni su Brearley-ovi suvremenici znanstvenici iz SAD-a Dansitzen i Becket a za otkriće austenitnih legura zaslužni su znanstvenici iz Njemačke Maurer i Strauss. Dupleks nehrđajući čelici su obično magnetni zbog visokog udjela ferita u njihovom sastavu, a fizikalna svojstva poput toplinske provodljivosti i toplinskog širenja kao i mehanička svojstva jako se razlikuju od vrste čelika te utječu na karakter zavara [4].

U okviru ovog završnog rada provedena je mikrostrukturalna karakterizacija dupleks nehrđajućeg čelika prije i nakon žarenja kao i analiza mikrotvrdoće.



## 2. Teorijski dio

### 2.1. Zavarivanje

Zavarivanje je proces spajanja materijala, obično metala ili termoplastike. Zavarivanje se postiže tako da se komadi metala zagriju na temperaturu taljenja te se dodaje dodatni materijal koji tvori bazen otopljenog metala, koji kada se hladi postaje čvrsti zavar [1]. Druga definicija kaže da je zavarivanje spajanje dvaju ili više dijelova sa ili bez dodatnog materijala, te se tako dobije kontinuirani nerastavljivi spoj jednoličnih svojstava [5].

Iz metalurškog gledišta procesi zavarivanja se mogu podijeliti na dvije glavne skupine: zavarivanje uz djelovanje pritiska i zavarivanje taljenjem. Kod postupka zavarivanja taljenjem rubovi ili površine koji se trebaju spojiti se zagrijavaju do točke taljenja te se ako je potrebno dodaje materijal za punjenje, kako bi popunio praznine u spoju. Takvi zavari sadrže tri metalurške zone a to su: zona taljenja, zona utjecaja topline i zona osnovnog materijala. Kod postupaka zavarivanja uz djelovanje sile spajanje se provodi tako da se dvije čiste, krute metalne površine dovedu u dovoljno blizak kontakt kako bi se formirala metalna veza između njih. Dok postupci zavarivanja taljenjem zahtijevaju da se dio metala zagrije na temperaturu višu od temperature taljenja, kod postupaka zavarivanja uz djelovanje sile to nije potrebno i ovi postupci se mogu provoditi pri niskim temperaturama kao npr. na sobnoj temperaturi [1].

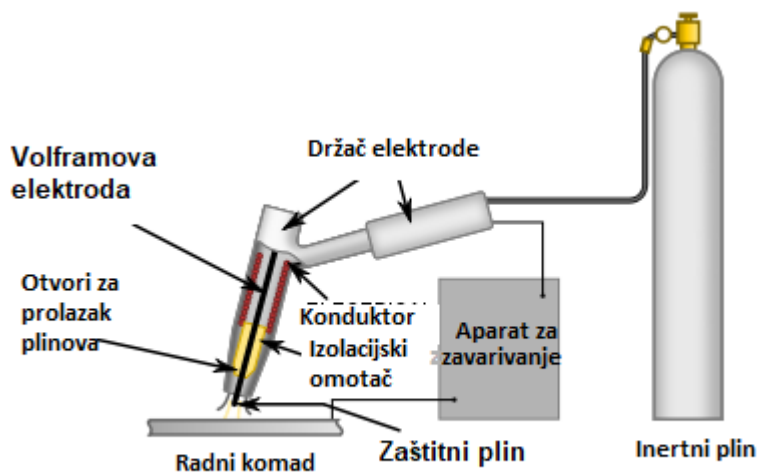
Mnogi oblici energije se mogu koristiti za zavarivanje uključujući plinski plamen, električni luk, laser, snop elektrona, trenje i ultrazvuk. Iako je postupak zavarivanja industrijski proces, zavarivanje se može provoditi u različitim okolinama kao što su: otvoreni prostori, ispod vode pa čak i u svemiru. Neovisno o lokaciji zavarivanje je opasan postupak i moraju se provesti mjere predostrožnosti i zaštite na radu kako bi se izbjegle ozljede kao što su: opekotine, električni udari, ozljede oka, udisanje otrovnih para i prekomjerna izloženost ultraljubičastom zračenju [2].

Način na koji je zavareni spoj izveden ima utjecaj na svojstva spoja. Tri najvažnije karakteristike kod zavarivanja taljenjem su: intenzitet izvora topline, brzina unosa topline po dužini zavara te tip i efektivnost metode koja se koristi za zaštitu zavara od utjecaja atmosferilija. Postupci zavarivanja taljenjem se mogu podijeliti na: plinsko zavarivanje, zavarivanje pod troskom, zavarivanje električnim lukom (ručno elektrolučno zavarivanje, MIG zavarivanje, MAG zavarivanje, TIG zavarivanje), elektroindukcijsko zavarivanje, zavarivanje plazmom, zavarivanje elektronskim snopom, zavarivanje laserskim snopom, ultrazvučno zavarivanje i zavarivanje snopom električnog zračenja. Kod zavarivanja uz djelovanje pritiska postoje brojne tehnike spajanja a osnova operacija u svim slučajevima je ta da se dva metalna komada stisnu zajedno, bilo da su hladni ili vrući, deformirajući se dovoljno da se osigura djelomični ili cjeloviti kontakt. Važni faktori koji ulaze u mehaniku i metalurgiju ovog procesa su: deformacija površine, disperzija površinskog filma, difuzija i rekristalizacija. U postupke zavarivanja pritiskom ubrajaju se: elektrotoporno zavarivanje, točkasto elektrotoporno zavarivanje, bradavičasto elektrotoporno zavarivanje, šavno elektrotoporno zavarivanje, sučeljno elektrotoporno zavarivanje, elektrotoporno zavarivanje iskrenjem, elektroindukcijsko zavarivanje, zavarivanje eksplozijom, difuzijsko zavarivanje, zavarivanje trenjem, hladno zavarivanje, zavarivanje pritiskom i kovačko zavarivanje [1].

### 2.1.1. TIG zavarivanje

TIG postupak predstavlja elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina, TIG je skraćeno od Tungsten Inert Gas a ovaj postupak se još naziva i GTAW (Gas Tungsten Arc Welding). TIG postupak je ručni postupak zavarivanja koji koristi netaljivu volframovu elektrodu, inertnu ili poluinertnu mješavinu plinova i posebni dodatni materijal. Najčešće se koristi za zavarivanje tankih materijala. Ova metoda je karakterizirana stabilnim električnim lukom i visokom kvalitetom zavara, ali zahtjeva izrazitu vještinu zavarivača te se može postići samo pri relativno niskim brzinama zavarivanja. Može se koristiti za zavarivanje većine metala ali se najčešće koristi za zavarivanje nehrđajućih čelika i laganih metala. Često se koristi kada je kvaliteta zavara od velike važnosti, pogotovo u proizvodnji bicikala, letjelica i brodovlja [2].

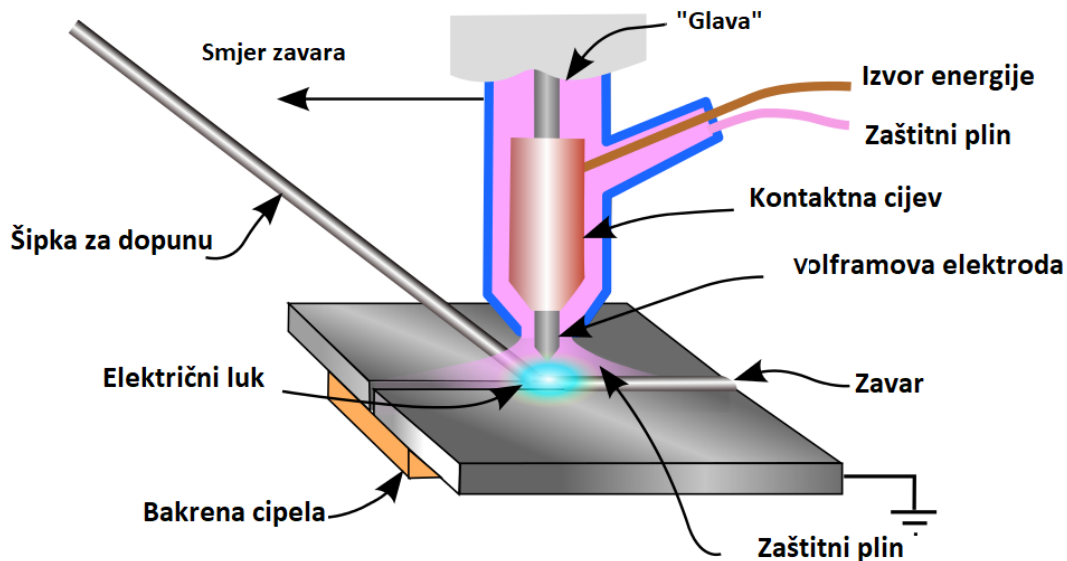
Kod ovog postupka koalescencija metala se dešava tako da se metali zagriju s električnim lukom koji nastaje između volframove elektrode i radnog komada. Pritom se obično koristi jedna elektroda ali se može koristiti i više elektrodi. Osnovne komponente potrebne za elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom su: aparat za zavarivanje, držač za elektrodu, volframova elektroda i plin za zaštitu. Na slici 1 su prikazane osnovne komponente potrebne za TIG zavarivanje.



Slika 1. Osnovne komponente potrebne za zavarivanje TIG postupkom [6].

Užarena volframova elektroda i zavareni metal brzo će oksidirati tijekom zavarivanja ako se izlože kisiku, stoga zaštitni plin mora biti inertan a najčešće se koriste helij, argon ili mješavina plinova. Toplina potrebna za TIG zavarivanje dolazi od električnog luka. volframova elektroda koja se koristi načinjena je od čistog volframa ili od legure volframa. Zavar nastaje tako da se električni luk približi radnom komadu i dodatnom materijalu sve dok se ne otope i ne pomiješaju. Električni luk se stvara prolaskom električne struje kroz ionizirani inertni plin pri čemu ionizirani atomi gube elektrone i postaju pozitivno nabijeni. Pozitivno nabijeni ioni plina kreću se iz pozitivnog u negativno polje električnog luka a elektroni iz negativnog u pozitivno polje. Snaga električnog luka je produkt struje koja prolazi kroz električni luk i pada napona kroz električni luk. Prije nego što se počne sa zavarivanjem potrebno je očistiti površinu metala

koji se zavaruje od ulja, masnoća, nečistoća a to se može postići mehaničkom obradom površine ili korištenjem tekućina za čišćenje. Pri ručnom zavarivanju jednom kada se stvori električni luk, držač elektrode se drži pod kutem 15°. Kod mehaniziranog zavarivanja, držač elektrode je obično pozicioniran vertikalno u odnosu na površinu. Pri početku ručnog zavarivanja električni luk se pomiče malim kružnim pokretima sve dok se ne rastali dovoljna količina metala. Zavarivanje se zaustavlja preko prekidača koji se kontrolira rukom ili nogom, a može se zaustaviti i tako da se brzo makne elektroda od radnog komada ali ta metoda oštećuje zaštitnu prevlaku te se volfram izlaže oksidaciji. Na slici 2 je prikazan postupak TIG zavarivanja.

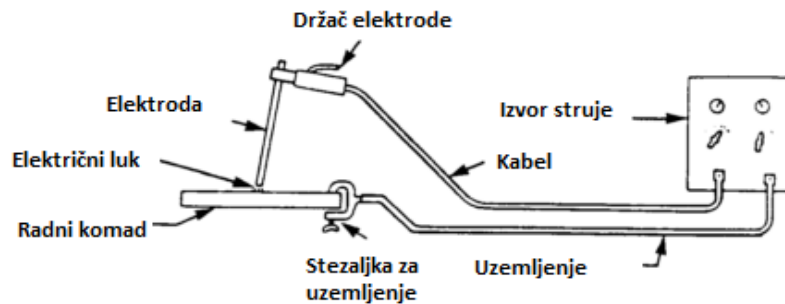


Slika 2. Prikaz TIG postupka zavarivanja [7].

Debljina metala i dizajn zavara određuju da li je potrebno koristiti dodatni materijal. S ovim procesom se mogu zavariti svi standardni tipovi spojeva. TIG postupak se pokazao jako dobrim za zavarivanje tankih metala zbog vrlo dobre kontrole unosa topline. Zbog toga što se elektroda ne troši, proces je moguće izvesti bez dodavanja dodatnog materijala. Koristi se za zavarivanje gotovo svih vrsta metala osim za metale koji imaju relativno nisku temperaturu tališta kao što su olovo, kositar i cink te njihove legure. Korisno je za spajanje aluminija i magnezija koji tvore vatrostalne okside, te također za reaktivne metale kao što su titanij i cirkonij koji otapaju kisik i dušik i postaju lomljivi ako se izlože zraku tijekom taljenja. TIG postupak ima i neke nedostatke, a to su: relativno niska brzina zavarivanja, kapanje tekućeg volframa u zavar što može dovesti do loma, visoka cijena inertnih plinova što jako poskupljuje ovaj postupak i troškovi opreme su veći nego kod drugih postupaka. Iz gore navedenih razloga TIG postupak se ne može nadmetati s drugim komercijalnim postupcima [1].

## 2.1.2. REL zavarivanje

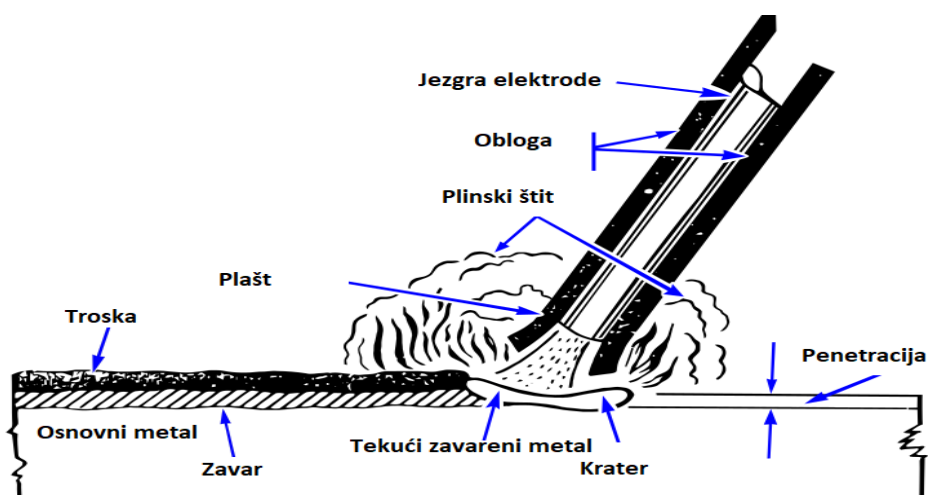
REL ili ručno elektrolučno zavarivanje poznato još i pod skraćenicom SMAW (Shielded Metal Arc Welding) i MMA (Manual Metal Arc Welding) predstavlja jedan od najkorištenijih elektrolučnih postupaka zavarivanja. Električna struja se koristi kako bi se stvorio električni luk između radnog komada i potrošne elektrode. Na slici 3 je prikazana osnovna oprema za REL zavarivanje.



Slika 3. Osnovna oprema za REL zavarivanje [8].

Elektroda se izrađuje od materijala koji je kompatibilan s osnovnim materijalom a jezgra elektrode služi kao dodatni materijal. Ovaj proces je jako prilagodljiv te zahtijeva vrlo malo vještine operatora i jeftinu opremu. Brzina zavara je relativno spora zbog toga što se potrošne elektrode moraju često mijenjati a troska sa zavara se mora ukloniti po završetku zavarivanja. Proces je ograničen na zavarivanje željeznih materijala, a do danas su razvijene i specijalne elektrode koje omogućuju zavarivanje lijevanog željeza, nikla, aluminija, bakra i drugih metala. Prilagodljivost ove metode je čini popularnom u brojnim primjenama kao što su popravci i konstrukcije [2].

Koalescencija metala postiže se toplinom od električnog luka koji se održava između vrha elektrode i površine osnovnog metala. Obloga elektrode ima ulogu da prekriva tekući metal i štiti ga od atmosfere, on također ima i druge funkcije ovisno o tipu elektrode ali je ovo primarna funkcija obloge. Ručno elektrolučno zavarivanje je do danas najšire korištena metoda elektrolučnog zavarivanja te ono koristi toplinu iz električnog luka za taljenje osnovnog metala i vrha elektrode. Zavarivanje započinje onog trena kada se pojavi električni luk između elektrode i radnog komada, toplina električnog luka topi vrh elektrode i površinu radnog komada. Sićušne kuglice otopljenog metala formiraju se pri vrhu elektrode te se zatim preko luka prenose na rastaljeni zavar. Električni luk se pomiče preko zavara taleći i miješajući osnovni metal i dodatni materijal kao što je prikazano na slici 4.



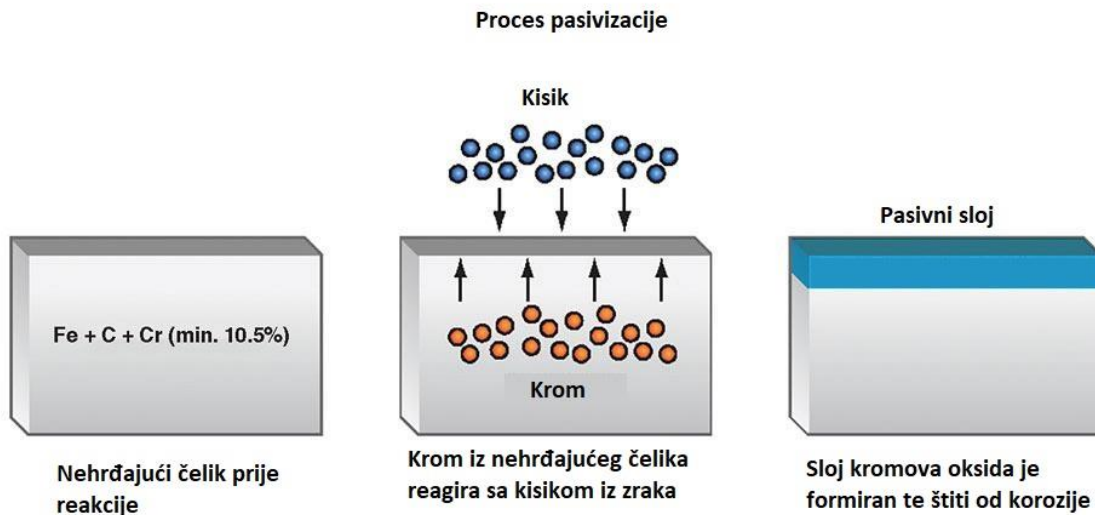
Slika 4. Prikaz zavara tijekom REL zavarivanja [9].

Električni luk je jedan od najtoplijih izvora topline a njegove temperature se kreću oko 5000 °C. Zbog visokih temperatura pri kontaktu metala i električnog luka taljenje se odvija gotovo trenutno. Ovaj proces zahtijeva određenu jačinu električne struje kako bi se otopile dovoljne količine elektrode i osnovnog metala, a mogu se koristiti i istosmjerna te izmjenična struja. Ovisno o tipu elektrode zaštitni sloj ima jednu od ovih funkcija: osigurava plin za zaštitu električnog luka te sprječava prekomjernu kontaminaciju otopljenog metala, uspostavlja električne karakteristike elektrode, osigurava trosku koja prekriva vrući otopljeni metal od zraka te osigurava dodatak legirajućih elemenata kako bi se promijenila mehanička svojstva zavara. Oprema je relativno jeftina, jednostavna i prijenosna. Mjesto zavarivanja nije ograničeno procesom već tipom i veličinom korištene elektrode. Elektrode se mogu koristiti za slijedeće materijale: ugljični čelici, niskolegirani čelici, nehrđajući čelici, ljevani čelici, aluminij i njegove legure, bakar i njegove legure te nikal i njegove legure. Brzina pomicanja elektrode je određena s nekoliko faktora poput: tipa struje, amperaže i polariteta, pozicijom zavarivanja, brzine topljenja elektrode, debljinom materijala, površinskim karakteristikama osnovnog materijala, vrste zavara i manipulacije elektrodom. Proces se može koristiti za materijale svih debljina. Tijekom zavarivanja pomoću REL postupka mogu se javiti greške poput poroznosti, miješanja troske, nedovoljne izmiješanosti i pukotina [10].

## 2.2. Nehrđajući čelici

Nehrđajući čelici su legure na bazi željeza sa značajnim sadržajem kroma a često se uz krom dodaju i drugi kemijski elementi poput nikla i molibdena. Glavna karakteristika ove skupine čelika je otpornost na koroziju te otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama i kemijskoj koroziji. Prema europskom standardu EN 10088 čelik je klasificiran kao nehrđajući ako sadrži minimalno 10,5 % kroma u svom sastavu. Međutim, gotovo svi komercijalno dostupni nehrđajući čelici sadrže i veći sadržaj kroma te se u većini slučajeva sadržaj kroma kreće od 13% do 18% i to zato što je u praksi potrebno minimalno 12% kroma u sastavu kako bi se

postigla zadovoljavajuća otpornost na koroziju u vodenim otopinama. Dodatkom kroma osigurava se mogućnost stvaranja vrlo tankog sloja oksida poznatog i kao pasivni sloj na površini čelika. Pasivni sloj je netopljiv, kompaktan te se jako dobro pričvršćuje za podlogu štiteći materijal na kojem se nalazi a sastoji se većinom od oksida  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  kao što je prikazano na slici 5.



Slika 5. Prikaz procesa pasivizacije [11].

Oksidacija nehrđajućih čelika se još naziva i pasivizacija a događa se spontano i prirodno u neutralnoj oksidirajućoj atmosferi kao što je kontakt sa zrakom. Oksidni sloj ima još jedno bitno svojstvo a to je da ako se sloj ogrebe, skine ili mehanički ošteti opet se spontano formira na površini materijala čime ga štiti od korozije. Prema mikrostrukтури koju imaju na sobnoj temperaturi nehrđajući čelici se mogu podijeliti na četiri glavne skupine: martenzitni nehrđajući čelici, feritni nehrđajući čelici, austenitni nehrđajući čelici te dupleks (austenitno-feritni) nehrđajući čelici [4].

Legirajući elementi u nehrđajućim čelicima se mogu podijeliti na dvije skupine: oni koji potiču stvaranje austenitne strukture te oni koji potiču stvaranje delta feritne strukture. U tablici 1 su prikazani legirajući elementi koji potiču stvaranje austenita i ferita.

Tablica 1. Utjecaj kemijskog sastava na formiranje austenita i ferita [4].

Kemijski element	Promjena delta ferita po 1% masenog udijela.	
N	-200	Formiranje austenita
C	-180	
Ni	-10	
Co	-6	
Cu	-3	
Mn	-1	
W	+8	
Si	+8	

Mo	+11	Formiranje ferita
Cr	+15	
V	+19	
Al	+38	

Krom je glavni legirajući element u nehrđajućim čelicima i on potiče nastanak delta ferita pri visokim temperaturama, međutim željezo može akumulirati i do 13% kroma do temperature od 1050 °C a da mu pritom struktura i dalje bude austenitna pri toj temperaturi. Povišenje sadržaja kroma od 12% do 17% dovodi do mijenjanja strukture iz austenitne u feritnu pri visokim temperaturama a ferit ostaje nepromijenjen tijekom hlađenja. Nikal je element koji potiče stvaranje austenita te se u nehrđajuće čelike dodaje kako bi se osigurala austenitna struktura u prisustvu visokih sadržaja kroma. Elementi poput silicija, molibdena i titana potiču nastanak delta ferita pri visokim temperaturama, dok elementi poput ugljika, dušika, mangana i bakra potiču stvaranje austenita te se stoga moraju uzeti u obzir i ovi elementi. Prema tome sastav nehrđajućih čelika ovisi o: ravnoteži elemenata koji potiču formiranje austenita i elemenata koji potiču formiranje ferita i o cjelokupnom kemijskom sastavu legure koji određuje strukturu i svojstva. Visoki sadržaj kroma dovodi do visokog stupnja čvrstoće te su takvi čelici sposobni razviti martenzitnu strukturu po velikoj većini presjeka. Austenitni nehrđajući čelici uglavnom se koriste u kućanstvima te u arhitekturi gdje su otpornost na koroziju i estetika glavni zahtjevi [1].

Iako nehrđajući čelici predstavljaju samo dio sveukupne proizvodnje čelika (2%) oni svejedno imaju veliku važnost, pogotovo zbog toga što je u nekim specifičnim slučajevima nemoguće izbjeći upotrebu nehrđajućih čelika. Tijekom 2019. godine u svijetu je proizvedeno oko 52 000 tona nehrđajućih čelika a proizvodnja raste iz godine u godinu što je prikazano u tablici 2.

Tablica 2. Prikaz proizvodnje nehrđajućih čelika po godini i regiji [12].

Godina	Europska unija	Sjeverna i Južna Amerika	Kina	Azija bez Kine	Ostali	Svijet ukupno
2019	6805 t	2593 t	29400 t	7894 t	5525 t	52218 t
2018	7386 t	2808 t	26706 t	8195 t	5635 t	50279 t
2017	7377 t	2754 t	25774 t	8030 t	4146 t	48081 t
2016	7280 t	2931 t	24938 t	9956 t	672 t	45778 t
2015	7169 t	2747 t	21562 t	9642 t	609 t	41548 t
2014	7252 t	2813 t	21692 t	9333 t	595 t	41686 t
2013	7147 t	2454 t	18984 t	9276 t	644 t	38506 t

Razlog zbog kojeg se koriste nehrđajući čelici je taj što oni imaju odličnu otpornost na koroziju. Korozija je oblik degradacije koja je uzrokovana kemijskim i elektrokemijskim reakcijama koje se odvijaju na granici površine materijala i okoline što rezultira postepenim raspadom funkcionalnih značajki čelika. Korozija ove vrste čelika može uzrokovati velike probleme, pogotovo kod cjevovoda i spremnika gdje može uzrokovati rupe kroz koje će tekućine iscuriti. Korozija nehrđajućih čelika može se podijeliti na dvije skupine: elektrokemijsku koroziju i kemijsku koroziju. Elektrokemijska korozija koja se još naziva i „mokra“ korozija, je korozija

pri kojoj metalna legura prolazi reakciju oksidacije u prisutnosti elektrolita a uz reakciju oksidacije događa se i reakcija redukcije elemenata prisutnih u okolišu. Kemijska korozija se još naziva i visokotemperaturna oksidacija ili „suha“ korozija pri čemu metalna legura prolazi reakciju oksidacije pri kontaktu sa plinovitom atmosferom te se ovaj fenomen odvija samo na temperaturama višim od 300 °C pri čemu su produkti korozije oksidi i soli s niskom temperaturom tališta. Većina oblika degradacije nehrđajućih čelika se događa zbog elektrokemijske korozije i to u oko 95 % slučajeva, dok je kemijska korozija odgovorna za oko 5% korozije [13].

### 2.2.1. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici su skupina jedinstvenih inženjerskih materijala koji nalaze svoju upotrebu u raznim industrijama kao što su industrija papira, kemijska, naftna i nuklearna industrija. Širok spektar njihove uporabe je omogućen njihovim dobrim mehaničkim svojstvima pri visokim temperaturama te odličnom otpornošću na koroziju. Osnova otpornosti na koroziju austenitnih nehrđajućih čelika je formiranje tankog, pasivnog sloja na površini materijala. Međutim, ako se taj pasivni sloj ošteti mogu se pojaviti opasni lokalizirani procesi korozije [14].

Ako se sadržaj kroma poveća do 17-18% i istovremeno se doda nikal do sadržaja od 8-9%, čelik će imati austenitnu strukturu. To se događa zbog efekta austenitizacije koji uzrokuje nikal. Sadržaj ugljika je relativno nizak i kreće se od 0,02 % do 0,06 % kako bi se što više ograničilo stvaranje kromovih karbida. Otpornost na koroziju se može povećati tako da se povisi sadržaj nikla na oko 12% ili da se doda 2-3% molibdena. Ova vrsta čelika je prvotno razvijena za potrebe svemirske industrije, a komercijalna upotreba je bila ograničena zbog vrlo uskog raspona sastava što predstavlja problem pri komercijalnoj proizvodnji. Postoje mnogi tipovi austenitnih čelika te se oni razlikuju po sastavu kao što je prikazano u tablici 3 [4].

Tablica 3 Prikaz nekih vrsta austenitnih tipova čelika i njihovog sastava [15].

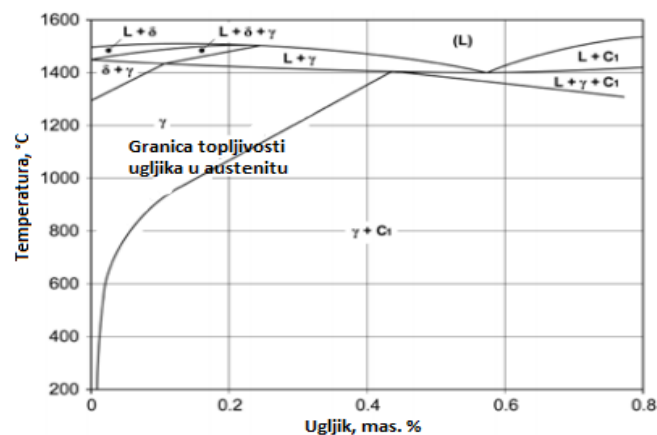
EN		AISI razred	C	Cr	Mo	Ni
1.4310	X10CrNi18-8	301	0,1 %	17,5 %	-	8 %
1.4301	X5CrNi18-10	304	<0,07 %	18,5 %	-	9 %
1.4307	X2CrNi18-9	304L	<0,03 %	18,5 %	-	9 %
1.4305	X8CrNiS18-9	303	<0,1 %	18 %	-	9 %
1.4541	X6CrNiTi18-10	321	<0,08 %	18 %	-	10,5 %
1.4401	X5CrNiMo17-12-2	316	<0,07 %	17,5 %	2,2 %	11,5 %
1.4404	X2CrNiMo17-12-2	316L	<0,03 %	17,5 %	2,25 %	11,5 %
1.4571	X6CrNiMoTi17-12-2	316Ti	<0,08 %	17,5 %	2,25 %	12 %

Mehanička svojstva austenitnih čelika su takva da imaju dobru kombinaciju čvrstoće, duktilnosti i žilavosti. Većina legirajućih elemenata koji se dodaju kako bi se poboljšala otpornost na koroziju ili kako bi se kontrolirali fazni prijelazi su također i sredstva za



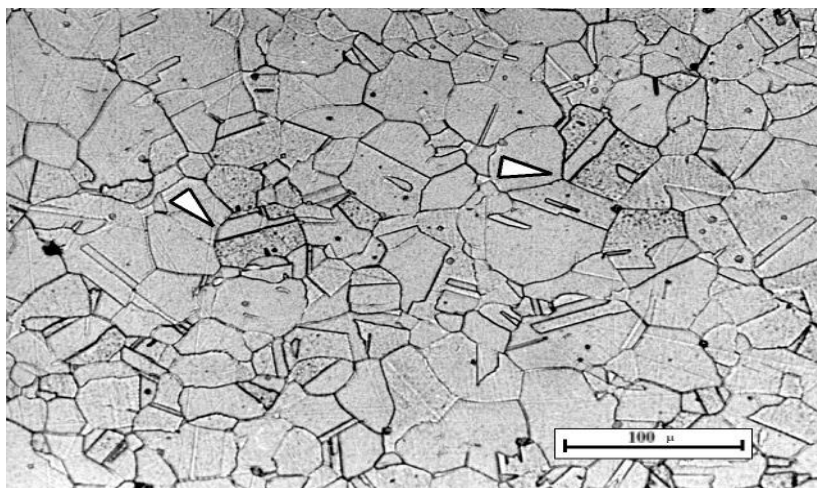
očvršćivanje. Najpotentniji očvršćivač je dušik koji također pospješuje i otpornost na koroziju a i usporava formiranje nekih intermetalnih faza. Specifična minimalna čvrstoća također raste s porastom sadržaja dušika [16].

Austenit je tvrd pa je zbog tog razloga obradivost komponenti spora i dovodi do brzog trošenja alata i slabe kvalitete obrađene površine. Obradivost je moguće poboljšati na način da se dodaju sumpor ili selen do razine od 0,3%, što je oko 10 puta veća koncentracija sumpora ili selena nego što bi inače bila bez dodavanja. Sulfidni film koji se formira u leguri smanjuje lokalnu duktilnost te značajno pospješuje obradivost površine. Selen je pritom efikasniji od sumpora ali njega se nastoji koristiti samo u skupim čelicima zbog njegove visoke cijene [17]. Zbog boljeg razumijevanja austenitnih čelika potrebno je pogledati fazni dijagram koji je prikazan na slici 6.



Slika 6. Fe-C binarna sekcija Fe-Cr-Ni-C dijagrama sa 18 % kroma i 8% nikla [4].

Najvažniji aspekt austenitnih nehrđajućih čelika je svakako izostanak kritičnih točki tj. nema transformacije iz  $\gamma \rightarrow \alpha$ . Nakon početnog očvršćavanja pri visokoj temperaturi u fazi  $\gamma + \delta$  čelik postaje potpuno austenitičan i ostaje u toj fazi sve do izjednačavanja s temperaturom okoline. Nazočnost raznih elemenata koji potiču austenitizaciju kao što su dušik, ugljik, nikel i mangan podižu temperaturu transformacije austenita u martenzit ispod temperature okoline. Važna stavka ovog dijagrama je i ograničenost topljivosti ugljika u  $\gamma$  fazi čak i ako se sadržaj ugljika održava na relativno niskim udjelima. Prisutnost kromovih karbida tipa  $(Cr,Fe)_23C_6$  pri niskim temperaturama je gotovo sigurna. Pri temperaturama od 450 do 900 °C pojavljuje se fenomen taloženja karbida, što dovodi do smanjenja sadržaja kroma u neposrednoj blizini područja formiranja karbida. Kako bi se riješio problem s kromovim karbidima rade se intervencije u kemijski sastav čelika. Inicijalna metoda rješavanja tog problema provodi se tako da se dodaju titan ili niobij tijekom proizvodnje. Titan i niobij formiraju vrlo stabilne karbide i time sprječavaju formiranje kromovih karbida. Druga metoda smanjivanja kromovih karbida koja je jednostavnija od prve metode je ta da se sadržaj ugljika smanji na sadržaj od 0,02 do 0,03%. Jako zanimljiva karakteristika ovih materijala je visoka otpornost na krhke lomove a to se dešava zbog posebne kristalne matrice [4]. Na slici 7 je prikazana austenitna mikrostruktura nehrđajućeg čelika [18].



Slika 7. Prikaz austenitne mikrostrukture nehrđajućeg čelika [18]

## 2.2.2. Feritni nehrđajući čelici

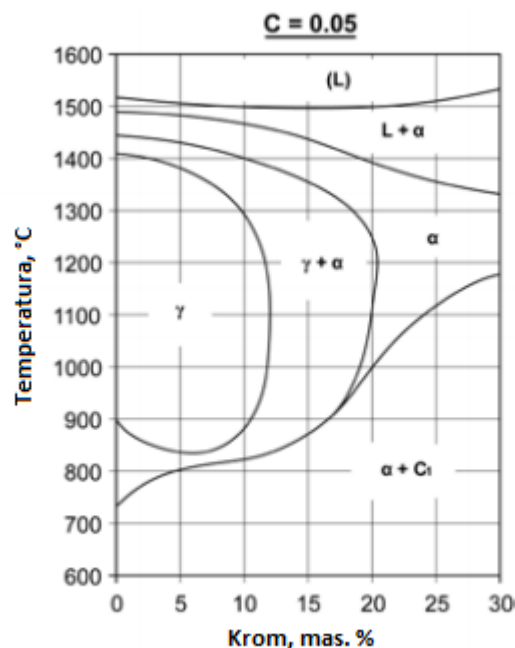
Feritni nehrđajući čelici su legura kroma i željeza koja sadrži dovoljne količine kroma i male količine ugljika kako bi se što manje austenita formiralo pri povišenim temperaturama [19].

Kada je sadržaj kroma u leguri jednak ili veći od 17% te se istovremeno sadržaj ugljika reducira do 0,1%, feritizirajući efekt kroma nije kompenziran s austenitizirajućim efektom ugljika te će struktura nehrđajućeg čelika biti feritna pri sobnoj temperaturi. Komercijalno dostupni nehrđajući čelici nisu ograničeni samo jednim kemijskim sastavom te postoje razni tipovi feritnih nehrđajućih čelika koji su podijeljeni na tri glavne skupine ovisno o sadržaju kroma u leguri. Prva skupina je skupina nehrđajućih čelika kod kojih je sadržaj kroma negdje od 15,5% do 18% te je ova skupina najbrojnija na tržištu feritnih nehrđajućih čelika. Druga skupina su feritni čelici sa sadržajem kroma od 11,5 do 14,5% dok je treća skupina ona sa sadržajem kroma iznad 18% te su oni još poznatiji i pod imenom superferitni nehrđajući čelici. U sve tri gore navedene skupine prisutni su i drugi elementi kao što su aluminij, silicij, molibden, titanij i niobij. U tablici 4 prikazani su neki tipovi feritnih nehrđajućih čelika te postotak kroma u njima.

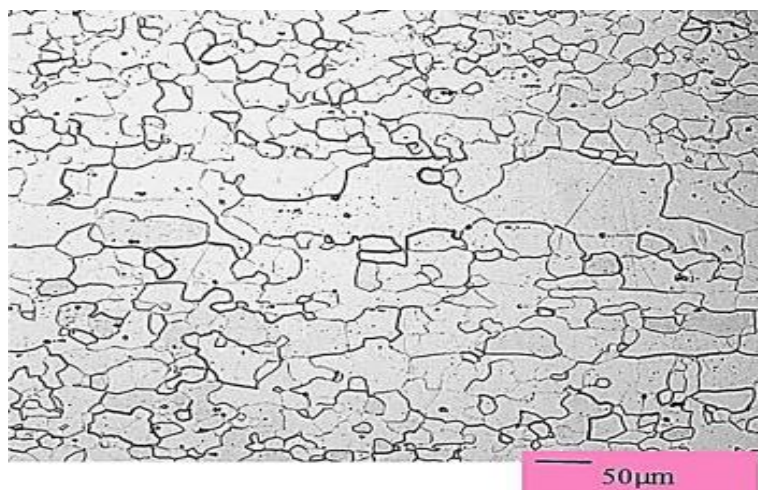
Tablica 4. Prikaz vrsta feritnih nehrđajućih čelika [15].

AISI	EN	Cr
405	1.4000	12-14 %
409L	1.4512	10,5-12,5 %
410L	1.4003	10,5-12,5 %
430	1.4016	16-18 %
439	1.4510	16-18 %
430Ti	1.4511	16-18 %
441	1.4509	17,5-18,5 %
434	1.4113	16-18 %
436	1.4513	16-18 %
444	1.4521	17-20 %
436	1.4592	28-30 %

Na slici 8 prikazan je fazni dijagram Fe-Cr za čelik oznake X6Cr17 koji prikazuje početno stvrdnjavanje u fazi  $\alpha$  zatim slijedi dvofazna transformacija tipa  $\gamma+\alpha$  a istovremeno se pri temperaturama od 900-950 °C čelik vraća u  $\alpha$  fazu s feritnom strukturom zrna. Pri temperaturama od 20-900 °C nema kritičnih točki koje bi omogućile transformaciju austenita u martenzit. Pri temperaturama od 900-950 °C nalazi se dvofazno područje ferita i austenita. Prisutnost malog dijela austenita u strukturi može imati pozitivni i negativni efekt. Pozitivni efekt je taj što se izbjegne nepotrebno povećanje kristalnog zrna tijekom toplinske obrade, a negativan efekt je taj što tijekom brzog hlađenja austenit može prijeći u martenzit što uzrokuje probleme s krhkim lomovima. Kada feritni nehrđajući čelik sadrži stabilizirajuće elemente poput titana, niobija ili molibdena njegova mikrostruktura će biti potpuno feritna. Feritni nehrđajući čelici kao i većina nehrđajućih čelika ima problem s taloženjem kromovih karbida što se događa zbog visokog afiniteta kroma prema ugljiku te može dovesti do intergranularne korozije u materijalu. Kako bi se smanjio ili otklonio problem s kromovim karbidima potrebno je tijekom procesa proizvodnje čelika dodati stabilizirajuće elemente poput titana i niobija. Čelici s visokim sadržajem kroma i molibdena imaju problem sa stvaranjem sigma faze zbog toga što u tim čelicima prisutnost molibdena dovodi do stvaranja štetnih sekundarnih fazi. Kako bi se uklonile sve prisutne sekundarne faze čelik se treba zagrijati na temperaturu od oko 1050 °C, zatim slijedi brzo hlađenje u vodi. Pri temperaturi od 475 °C dolazi do krhkosti što predstavlja veliki problem, a može se riješiti kaljenjem pri temperaturi od 550-600 °C. Poluproizvodi od feritnih nehrđajućih čelika na tržištu su dostupni u obliku limova i cijevi. Najčešće korišteni tipovi feritnih nehrđajućih čelika su X6Cr17 i X2CrTi12. Na slici 9 prikazana je feritna mikrostruktura nehrđajućeg čelika [4].



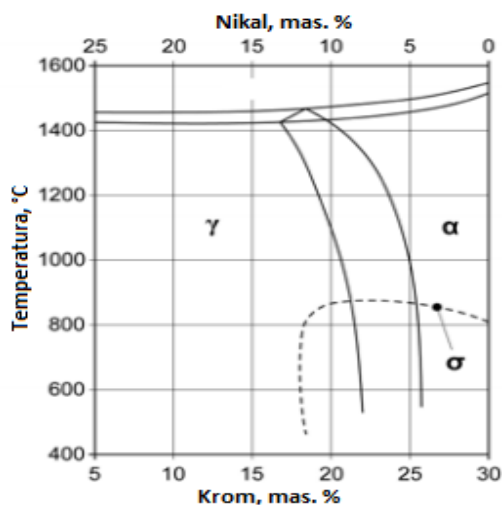
Slika 8. Fe-Cr binarna sekcija Fe-Cr-C tercijarnog dijagrama za čelik sa 0,05 % ugljika [4].



Slika 9. Prikaz feritne mikrostrukture nehrđajućeg čelika [19].

### 2.2.3. Dupleks nehrđajući čelici

Austenitno-feritni nehrđajući čelici se nazivaju još i dupleks čelici, a svoje ime duguju miješanoj strukturi austenita i ferita pri sobnim temperaturama. Takva struktura je rezultat balansirano dodavanja kroma i nikla, pritom dupleks čelici obično imaju sadržaj kroma 22-25%, nikla 4-7%, molibdena 3-4% te dušika 0,1-0,25%. Osnova dupleks čelika je Fe-Cr-Ni-N sustav. Glavne faze u ovim čelicima su ferit ( $\alpha$ ) i austenit ( $\gamma$ ). Fazni dijagram austenitno-feritnih čelika prikazan na slici 10 pokazuje inicijalno očvršćavanje tijekom feritne faze, pri temperaturama od 1050-1150 °C se dobiva austenitna i feritna struktura, a odnos između dviju faza je otprilike 40% : 60%. Kod ove skupine nehrđajućih čelika javljaju se problemi kao i kod feritnih i austenitnih nehrđajućih čelika, a to su: taloženje karbida, prisutnost štetnih faza koje nastaju na 800 °C te problem lomljivosti pri 475 °C. Stvaranje karbida, nitrida i intermetalnih faza može dovesti do pada čvrstoće materijala te znatnog smanjenja korozijske otpornosti.

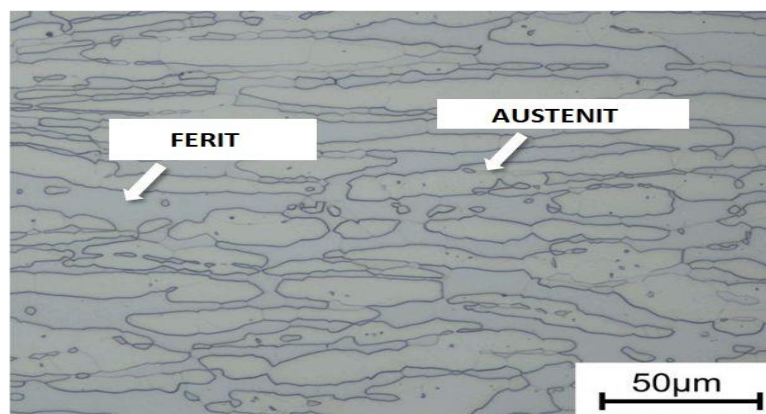


Slika 10. Cr-Ni binarna sekcija Fe-Cr-Ni terciarnog dijagrama sa sadržajem željeza 70% [4].

Toplinska obrada ovih čelika obično se provodi na temperaturama od 1050 do 1150 °C te se zatim brzo hladi s vodom kako bi se optimizirao omjer austenita i ferita. Fizikalna svojstva su vrlo slična austenitnim nehrđajućim čelicima a jedina razlika je u toplinskom istezanju između austenita i ferita. Pod djelovanjem magnetskog polja dupleks čelik postaje feromagnetičan slično feritnim nehrđajućim čelicima. Nehrđajući čelik oznake X2CrNiN23-4 je bio prvi dvofazni nehrđajući čelik koji je razvijen za potrebe industrije gdje je bila potrebna otpornost na koroziju u kloridnim uvjetima. Čelik oznake X2CrNiMoN22-5-3 je jedan od najkorištenijih dupleks nehrđajućih čelika te ima dobra mehanička svojstva i odlično antikorozijsko djelovanje. Čelik X2CrNiMoN22-5-3 se upotrebljava u naftnoj i kemijskoj industriji te u uvjetima gdje ima klorida, ugljikovog dioksida ili vodikovog sulfida, a široku upotrebu je pronašao i u industriji desalinizacije. Čelik oznake X2CrNiMoN25-7-4 je razvijen kao nadogradnja čelika X2CrNiMoN22-5-3 te je dizajniran kako bi se poboljšala vlačna svojstva i otpornost prema koroziji. U tablici 5 su prikazani neki tipovi dupleks nehrđajućih čelika te njihov kemijski sastav. Na slici 11 prikazana je austenitno-feritna struktura dupleks nehrđajućeg čelika [4].

Tablica 5. Prikaz nekih dupleks nehrđajućih čelika i njihovog kemijskog sastava [15].

Čelik	Broj	C / %	Si / %	Mn / %	P / %	S / %	N / %	Cr	Cu	Mo	Ni
X2CrNiN22-2	1.4062	0,03	1	2	0,04	0,01	0,16-0,28	21,5-24	-	0,45	1-2,9
X2CrCuNiN23-2-2	1.4669	0,045	1-3	1-3	0,04	0,03	0,12-0,2	21,5-24	1,6-3	0,5	1-3
X2CrNiMoSi18-5-3	1.4424	0,03	1,4-2	1,2-2	0,035	0,015	0,05-0,1	18-19	-	2,5-3	4,5-5,2
X2CrNiN23-4	1.4362	0,03	1	2	0,035	0,015	0,05-0,2	22-24,5	0,1-0,6	0,1-0,6	3,5-5,5
X2CrMnNiN21-5-1	1.4162	0,04	1	4-6	0,04	0,03	0,2-0,25	21-22	0,1-0,8	0,1-0,8	1,35-1,9
X2CrMnNiN21-5-3	1.4482	0,03	1	4-6	0,035	0,015	0,05-0,2	19,5-21,5	1	0,1-0,6	1,5-3,5
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	0,03	1	2	0,035	0,005	0,1-0,22	21-23	-	2,5-3,5	4,5-6,5
X2CrNiMnMoCuN24-4-3-2	1.4662	0,03	0,7	2,5-4	0,035	0,015	0,2-0,3	23-25	0,1-0,8	1-2	3-4,5



Slika 11. Prikaz austenitno-feritne mikrostrukture dupleks nehrđajućeg čelika [20].

### 2.3. Zavarivanje nehrđajućih čelika

Većina nehrđajućih čelika može se zavarivati u procesima proizvodnje tlačnih posuda i spremnika, u kemijskim postrojenjima i u domaćinstvima. Zbog agresivnih uvjeta u kojima se nalaze, zavari moraju biti visoke kvalitete te moraju pružiti istu razinu korozivne zaštite i mehaničkih svojstava kao i osnovni materijal.

Austenitni nehrđajući čelici zbog svoje velike čvrstoće nisu skloni problemima hladnog pucanja koji se sreću kod martenzitnih čelika te ne zahtijevaju zagrijavanje niti toplinsku obradu poslije završetka zavarivanja. Zbog navedenih svojstava austenitni nehrđajući čelici se često koriste kod spajanja različitih vrsta čelika ili za zavarivanje krhkog martenzitnog čelika. Kako bi se izbjegli problemi poput pucanja tijekom skrućivanja moraju se poduzeti određene mjere predostrožnosti. Pucanje tijekom skrućivanja događa se u zavarenom metalu dok se skrućuje a problem nastaje zbog gomilanja kontrakcijskog stresa u austenitnim čelicima zbog velikog termalnog širenja materijala. Zavarivanje s materijalima koji imaju austenitnu strukturu dovodi do problema pucanja tijekom očvršćivanja što se može riješiti tako da struktura ne bude u potpunosti austenitna nego da se doda mala količina delta ferita. Količina delta ferita koja je potrebna kako bi se uklonilo pucanje ovisi o sastavu nehrđajućeg čelika, a uobičajeno se uzima oko 5 % ferita. Tijekom spajanja debelih dijelova austenitnih nehrđajućih čelika koriste se dodatni materijali koji razvijaju točno traženu mikrostrukturu a odabir dodatnog materijala se odvija tako da se iščitavaju vrijednosti iz Schaeffler-ovog ili De Long-ovog dijagrama. De Long-ov dijagram se zasniva na principu da se u obzir uzima sadržaj dušika u čeliku zbog toga što je dušik snažni austenitno-formirajući element te stoga ima veliki utjecaj na mikrostrukturu. Elementi poput nikla, silicija, sumpora i fosfora povećavaju osjetljivost na pucanje dok krom, dušik i mangan smanjuju tendenciju pucanja. Austenitni nehrđajući čelici mogu se zavarivati sljedećim postupcima: lasersko zavarivanje, MIG zavarivanje, TIG zavarivanje i REL zavarivanje [4].

Feritni nehrđajući čelici su zbog odsutnosti fazne transformacije dobri za zavarivanje jer ne postoji opasnost od hladnog pucanja i od pucanja tijekom očvršćavanja. Skloni su rastu zrna što dovodi do niske razine čvrstoće tijekom zavarivanja a pogotovo kod zavarivanja debljih materijala. Feritni nehrđajući čelici su posebno osjetljivi na vodikovo pucanje te bi se zbog toga kao zaštitna plinska atmosfera trebao koristiti čisti argon a ne mješavina argona i vodika. Dodatni materijal koji se koristi za zavarivanje feritnih čelika bi trebao imati isti ili veći postotak sadržaja kroma. Kako bi se minimiziralo rast zrna trebalo bi unijeti što manje topline u zavar. Predzagrijavanje bi zbog toga trebalo biti ograničeno na od 148 do 232 °C. Feritni nehrđajući čelici su lošiji za zavarivanje od austenitnih nehrđajućih čelika. Neki od najčešćih problema koje možemo susresti kod zavarivanja feritnih nehrđajućih čelika su: nastanak martenzita, prekomjeren rast zrna, nastanak sigma faze, krhkost pri 475 °C itd. Kako čelik ima tendenciju prekomjernog rasta zrna kada se zagrije na temperaturu preko 950 °C, takva gruba zrna zajedno s malim količinama martenzita u strukturi mogu rezultirati lomljivošću u zoni utjecaja topline [4].

Dupleks nehrđajući čelici imaju mikrostrukturu koja se sastoji od ferita i austenita te im takva dvofazna mikrostruktura pruža određena mehanička i korozivna svojstva. Temperatura je glavni parametar o kojem mikrostruktura ovisi i u zoni utjecaja topline i u osnovnom metalu te nepravilna temperatura može dovesti do stvaranja štetnih faza i do nastanka neusklađene

mikrostrukture. Štetne faze koje se mogu pojaviti pri visokim temperaturama su npr.: sigma faza i nitridi. Sastav dupleks čelika je također bitan te što se više legirajućih elemenata dodaje u čelik to je veća šansa da će doći do stvaranja štetnih fazi tijekom zavarivanja [21].

Dodatni materijal koji se koristi kod zavarivanja dupleks čelika mora imati strukturu sličnu dupleks čeliku a najčešće su to legure nikla. Dupleks čelici mogu podnijeti relativno visoke unose topline. Za razliku od austenitnih nehrđajućih čelika dupleks čelici su puno otporniji na hladno pucanje. Postupci zavarivanja kojima se mogu zavarivati ovi čelici su: REL zavarivanje, TIG zavarivanje, lasersko zavarivanje, visokofrekventno zavarivanje, zavarivanje plazmom [22].

Dupleks čelici su razvijeni relativno nedavno, a imaju bolja svojstva od austenitnih visokolegiranih čelika. Njihova glavna prednost je ta što imaju bolju korozivnu otpornost od 13% Cr i AISI 410 čelika. Dupleks čelici uglavnom sadrže viši sadržaj kroma i to između 22 i 27% te niži sadržaj nikla do oko 7%, a često sadrže i molibden radi povećanja korozivne otpornosti. Prilikom zavarivanja dupleks čelika mogu se inducirati potencijalni korozivni problemi do kojih ne dolazi u nezavarenom osnovnom metalu. Visokotemperaturna područja zone utjecaja topline prilikom zavarivanja u potpunosti se pretvaraju u feritnu mikrostrukturu, ali za razliku od feritnih čelika kod dupleks čelika pri hlađenju dolazi do fazne promjene uz nastajanje austenita. Visoki sadržaj ferita u zoni utjecaja topline su štetni, a problemi s visokim sadržajem ferita rješavaju se kontrolom sastava zavara. Kako bi se dobila zadovoljavajuća struktura zone taljenja koristi se zavarivanje s kontrolirano povišenim unosima topline zbog toga kako bi se tijekom hlađenja dobio dovoljan udio austenitne strukture. Parametri zavarivanja dupleks čelika biraju se tako da osiguraju dovoljno sporo hlađenje, a brzina hlađenja se kontrolira unosom topline. Kod proizvodnje zavarenih konstrukcija od dupleks čelika mogu se koristiti svi postupci kao i kod zavarivanja visokolegiranih čelika. Kako bi se zavarivanje dupleks čelika provelo što bolje treba koristiti dodatne materijale sličnog kemijskog sastava kao i osnovni materijal. Obložene elektrode i prašci za zavarivanje treba ponovno sušiti i to pri minimalnoj temperaturi od 300 °C. Prilikom zavarivanja bez dodatnog materijala može doći do porasta ferita i do 80% [5].

### 3. Eksperimentalni dio

#### 3.1. Zavarivanje

Zavarivanje je provedeno na limu debljine 16 mm proizvedenog iz dupleks nehrđajućeg čelika (AISI/ASTM 2205, W.Nr. 1.4462, EN X2CrNiMoN22-5-3). Kemijski sastav čelika naveden je u tablici 6.

Tablica 6. Kemijski sastav istraživanog dupleks nehrđajućeg čelika, mas. %.

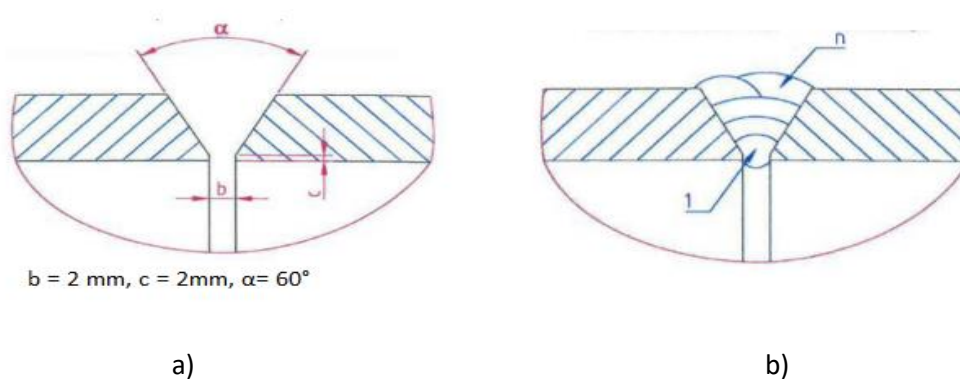
C	Mn	Si	Cu	V	Mo	Al	Cr	Ni	N
0,03	1,52	0,36	0,26	0,02	3,15	0,005	22,21	5,27	0,171

Kao dodatni materijal za TIG postupak zavarivanja korištene su elektrode BOHLER CN 22/9 N-IG te elektrode BOHLER FOX CN22/9 N-B za REL postupak zavarivanja. Sastav elektroda korištenih pri zavarivanju naveden je u tablici 7.

Tablica 7. Kemijski sastav elektroda korištenih za zavarivanje, mas %.

Elektroda	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	N
BOHLER CN 22/9 N-IG	<0,015	0,4	1,7	22,5	8,8	3,2	0,15
BOHLER FOX CN 22/9 N-B	<0,03	0,5	1,1	22,6	8,8	3,1	0,16

Zavareni spoj je izveden kao što je prikazano na slici 12 a) , a redoslijed zavarivanja prikazan je na slici 12 b). Pritom treba istaknuti da je za zavarivanje korijena zavara korišten TIG postupak zavarivanja, a za popunu zavara je korišten REL postupak zavarivanja.



Slika 12. a) Shematski prikaz izvedbe zavarenog spoja

b) Shematski prikaz redoslijeda zavarivanja (1-početak, n-kraj).

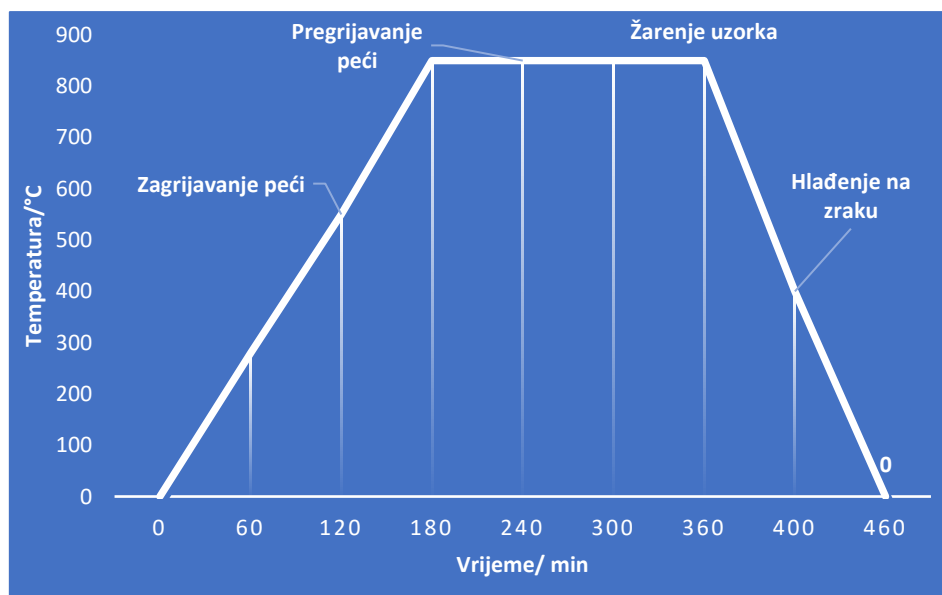


### 3.2. Žarenje zavarenog spoja

Nakon zavarivanja duplex nehrđajućeg čelika X2CrNiMoN22-5-3 provedeno je žarenje zavarenog spoja u elektrootpornoj komornoj peći prikazanoj na slici 13. Zavareni spoj je žaren na 850 °C u trajanju od 60 minuta te nakon toga hlađen na zraku kao što je prikazano na slici 14.



Slika 13. Fotografija elektrootporne komorne peći za žarenje.



Slika 14. Shematski prikaz postupka žarenja

### 3.3. Optička i elektronska mikroskopija

Prije mikroskopske analize izrezani su uzorci zavarenog spoja u polaznom stanju (nakon zavarivanja) i nakon provedenog žarenja. Uzorci su izrezani uz hlađenje vodom na uređaju Isomet Buehler koji je prikazan na slici 15.



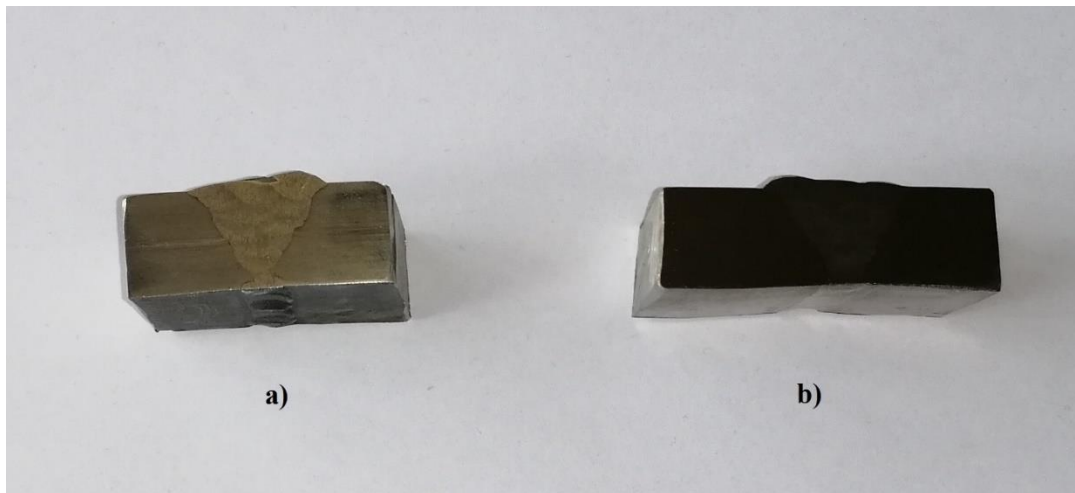
Slika 15. Fotografija uređaja za rezanje uzoraka Isomet Buehler.

Nakon izrezivanja uzoraka provedena je metalografska priprema tj. brušenje i poliranje. Brušenje je provedeno strojno na uređaju Phoenix Beta Buehler koji je prikazan na slici 16 uz stalno hlađenje vodom. Za brušenje su korišteni papiri gradacije 240, 400, 600 i 800. Poliranje je provedeno filcom s dodatkom vodene otopine 0,3  $\mu\text{m}$  aluminijevog oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Vrijeme poliranja je iznosilo 10 minuta.



Slika 16. Fotografija uređaja za brušenje i poliranje Phoenix Beta Buehler.

Nakon brušenja i poliranja uzorci su elektrolitički nagrizeni otopinom za nagrizenje koja se sastojala od 60 mL  $\text{HNO}_3$ , 40 mL  $\text{H}_2\text{O}$  (1V u trajanju 20 sekundi) za otkrivanje austenita. Za otkrivanje sigma faze korištena je otopina za nagrizenje koja se sastojala od 56 g KOH, 100 mL  $\text{H}_2\text{O}$  (2V u trajanju 10 sekundi). Na slici 17 prikazani su uzorci nakon poliranja i nakon nagrizenja.



Slika 17. Fotografija uzoraka nakon poliranja (a) i nagrizenja (b).

Nakon nagrizenja uzoraka provedena je optička mikroskopija na uređaju Olympus GX51 koji je prikazan na slici 18. Korištena su povećanja 500x, 1000x, 2000x i 8000x. U metalurgiji se koristi optička mikroskopija kako bi se odredile polikristalne i višefazne nesavršenosti. Sustav leća i vidljiva svjetlost daju uvećanu sliku predmeta. Zbog neprozirnosti uzoraka, u metalurgiji se koristi reflektirano svijeto. Pomoću optičkog mikroskopa mogu se pronaći ili otkriti granice faza, faze nastale tijekom skrućivanja, greške mikrostrukture, fizikalne nečistoće itd. [20].



Slika 18. Fotografija optičkog mikroskopa Olympus GX 51.

Nakon optičke mikroskopije provedena je pretražna elektronska mikroskopija (SEM) na uređaju Tescan Vega 5136MM koji je opremljen detektorom za energetske disperzijske rendgenske spektroskopije (EDS), slika 19. Korištena su povećanja 1000x, 2000X i 8000x. Pretražni elektronski mikroskop (SEM) je vrsta elektronskog mikroskopa koji omogućuje promatranje materijala na mikrometarskoj razini. Princip rada je takav da se površina koju želimo ispitivati ozrači dobro fokusiranim elektronskim snopom. Pretražni elektronski mikroskop može se koristiti za ispitivanje različitih svojstava uzoraka kao što su topografija površine, kristalografija i kemijski sastav [23].



Slika 19. Fotografija pretražnog elektronskog mikroskopa Tescan Vega 5136MM opremljenog detektorom za energetske disperzijske rendgenske spektroskopije (EDS).

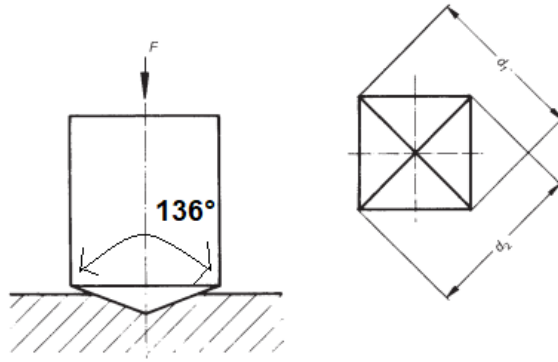
### 3.4. Mjerenje mikrotvrdoće

Metoda mjerenja mikrotvrdoće po Vickersu se može primjeniti za ispitivanje svih metala. Penetrator je dijamantna piramida s kvadratnom bazom, a kut između stranica je 136° kao što je prikazano na slici 20. Mjere se dijagonale baze te se zatim dobije srednja vrijednost dijagonale  $d$ , a iz dijagonale  $d$  se preko srednje vrijednosti dijagonale i poznate sile utiskivanja odredi iznos tvrdoće prema jednadžbi (1):

$$HV = \frac{F \cdot 0,188}{d^2} \quad (1)$$

pri čemu je:  $F$ -sila, N;  $d$ -srednja vrijednost dvije izmjerene dijagonale, mm [16].

Mikrotvrdoća uzoraka zavarenog nehrđajućeg čelika mjerena je metodom po Vickersu, a sila utiskivanja iznosila je 9,804 N u vremenu od 10 sekundi. Korišteni mikrotvrdomer Leica VHMT je prikazan na slici 21.



Slika 20. Shematski prikaz mjerenja tvrdoće po Vickersu [16].

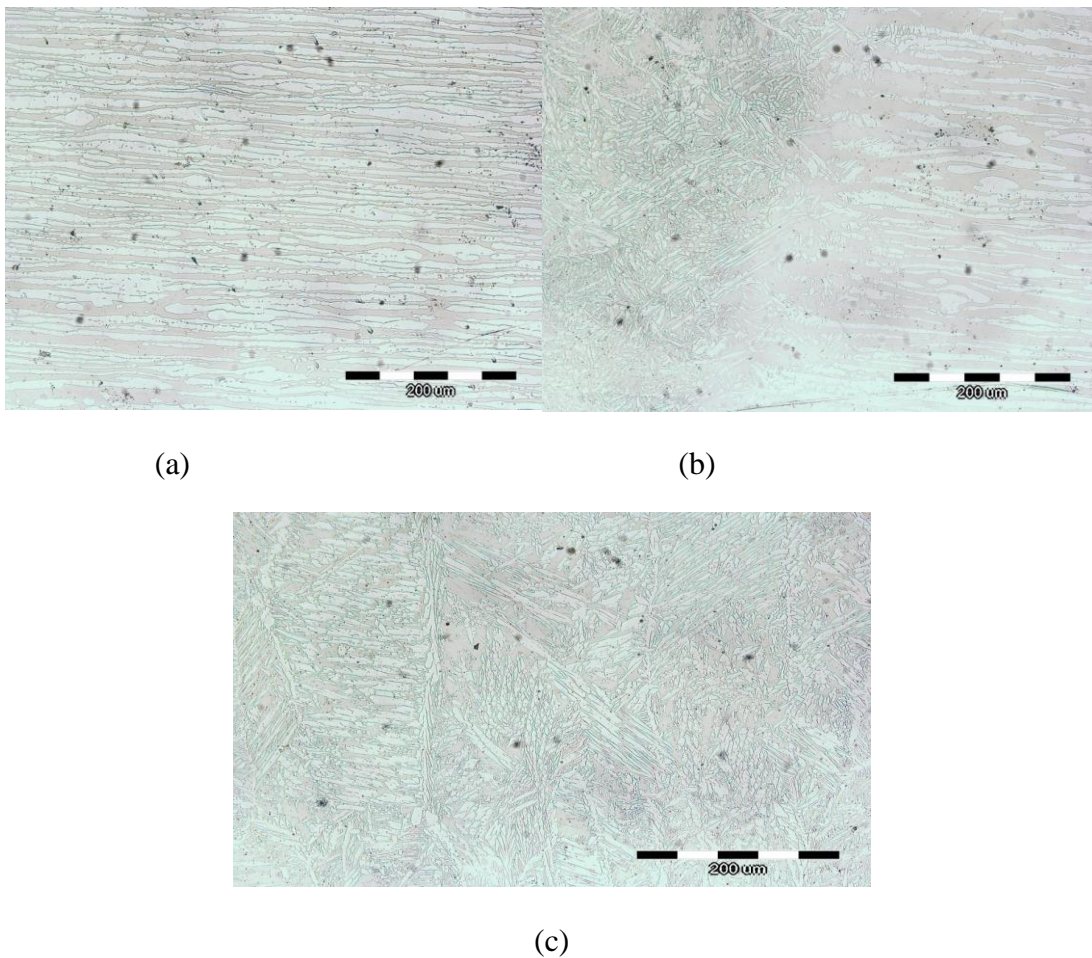


Slika 21. Fotografija uređaja za mjerenje mikrotvrdoće Leica VHMT.

## 4. Rezultati i rasprava

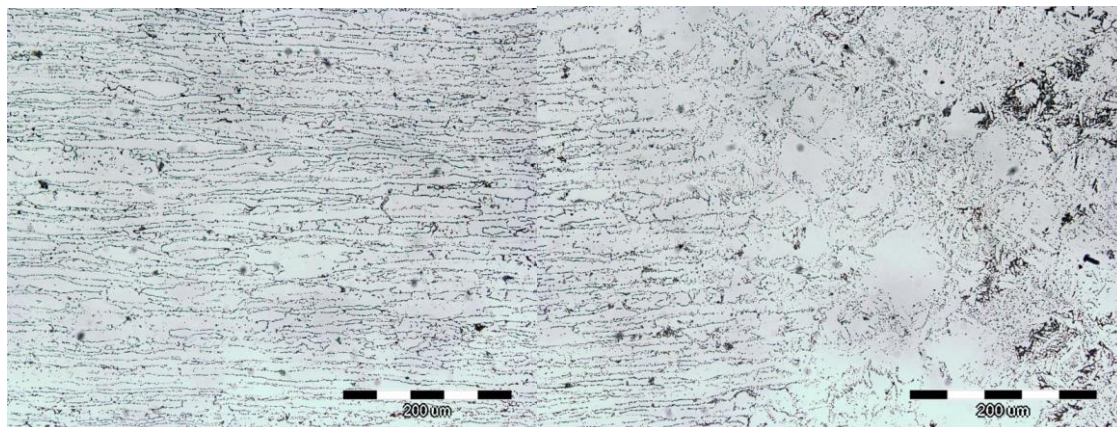
### 4.1. Mikrostrukturna karakterizacija

Nakon provedene metalografske pripreme, provedena je mikrostrukturna analiza zavarenog spoja optičkom i pretražnom elektronskom mikroskopijom. Optička mikroskopija provedena je pomoću optičkog mikroskopa Olympus GX 51, a snimani su osnovni materijal (OM), zona taljenja (ZT) i zona utjecaja topline (ZUT) kao što je prikazano na slikama 22 i 23. Analizom dobivenih optičkih mikrografija može se uočiti postojanje dvofazne dupleks mikrostrukture tj. prisutnost ferita i austenita. Može se primjetiti da je ferit izdužen u smjeru valjanja tijekom proizvodnje ploča koje su zavarene. Nakon provedenog žarenja na 850 °C mikrostruktura je i dalje uglavnom dvofazna (ferit+austenit) ali se mjestimično u zoni taljenja primjećuju precipitacijski produkti koji nisu ferit i austenit. Sastav tih precipitata je stoga bilo potrebno utvrditi SEM i EDS analizom.



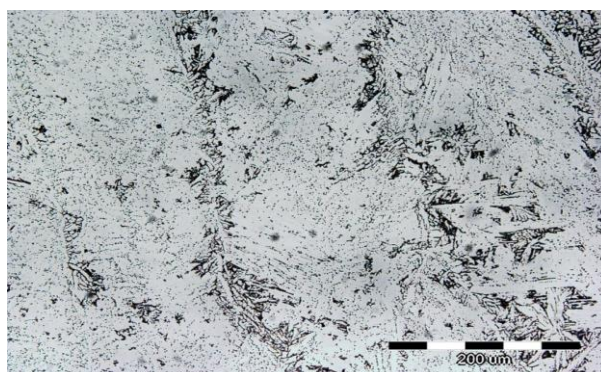
Slika 22. Optičke mikrografije zavarenog dupleks nehrđajućeg čelika X2CrNiMoN22-5-3  
a) osnovni materijal; b) zona utjecaja topline; c) zona taljenja

povećanje 200X



(a)

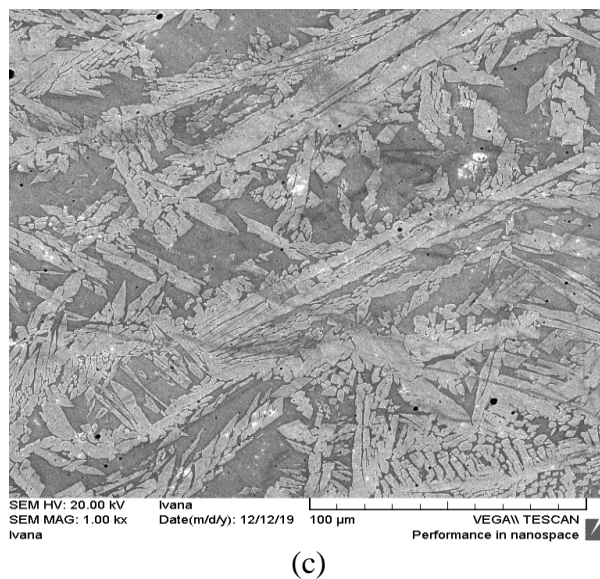
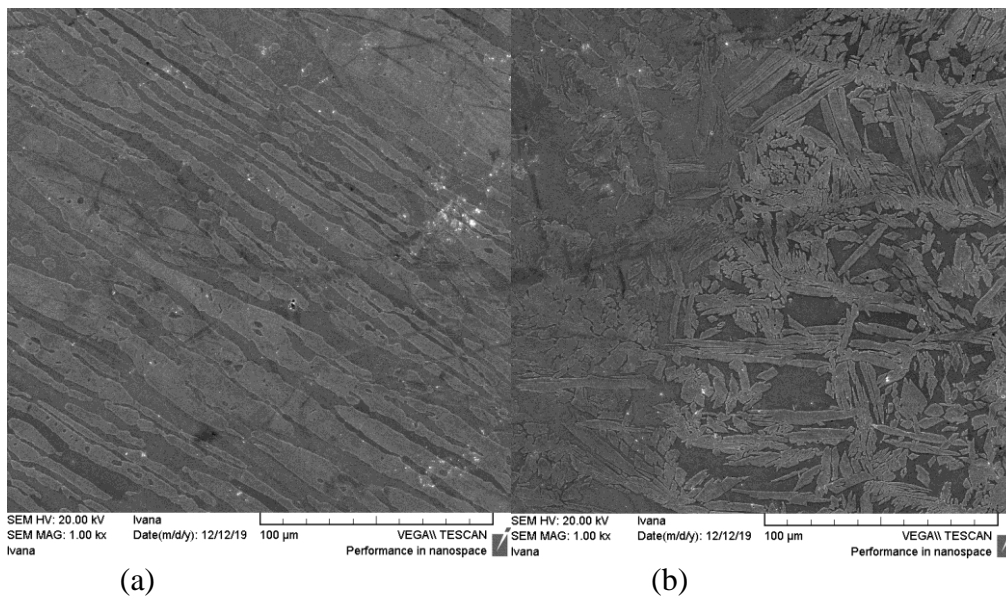
(b)



(c)

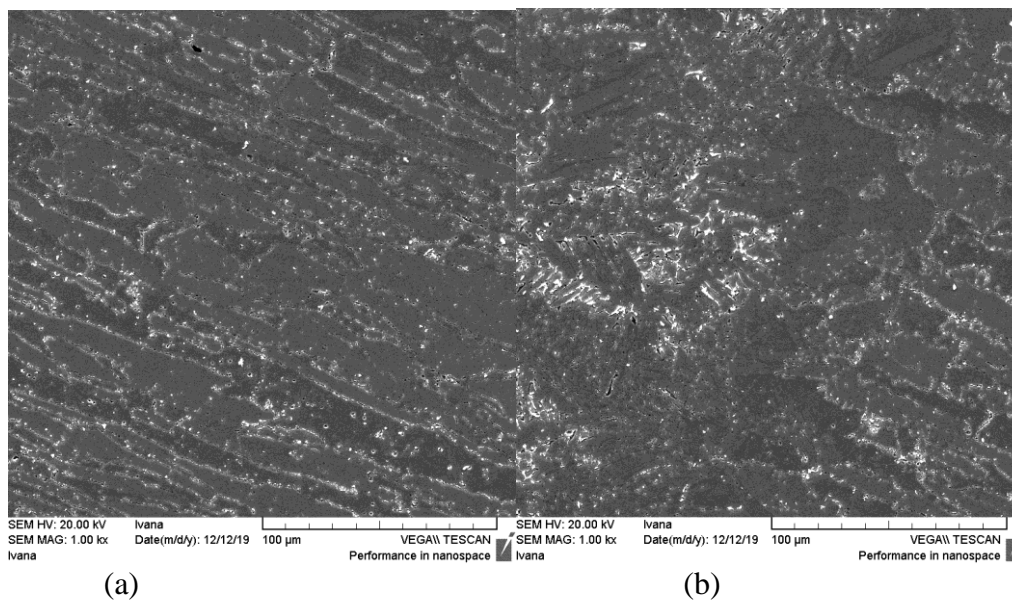
Slika 23. Optičke mikrografije zavarenog dupleks nehrđajućeg čelika X2CrNiMoN22-5-3 nakon žarenja 850°C/60' /zrak  
a) osnovni materijal; b) zona utjecaja topline; c) zona taljenja  
povećanje 200X

Zbog detaljnije analize mikrostrukture i kemijskog sastava zavarenog spoja korišten je pretražni elektronski mikroskop s energetske disperzijskim spektrometrom. Korišten je Tescan Vega TS 5136 MM pretražni mikroskop, a na uzorcima su snimani osnovni materijal (OM), zona taljenja (ZT) i zona utjecaja topline (ZUT). Na slikama 24 i 25 prikazano je nekoliko odabranih snimljenih mikrostrukture ispitivanih uzoraka, prije i nakon žarenja. SEM mikrografije potvrđuju dvofaznu mikrostrukturu (ferit+austenit) te nakon žarenja postojanje određenih precipitata u zoni taljenja.



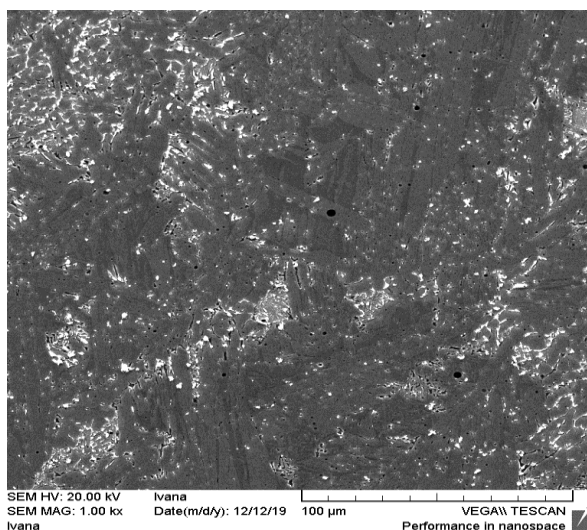
Slika 24. SEM mikrografije zavarenog dupleks nehrđajućeg čelika X2CrNiMoN22-5-3  
a) osnovni materijal; b) zona utjecaja topline; c) zona taljenja





(a)

(b)

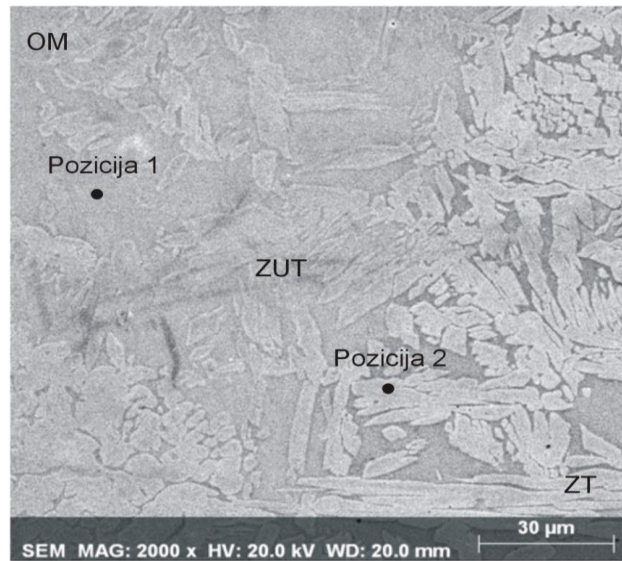


(c)

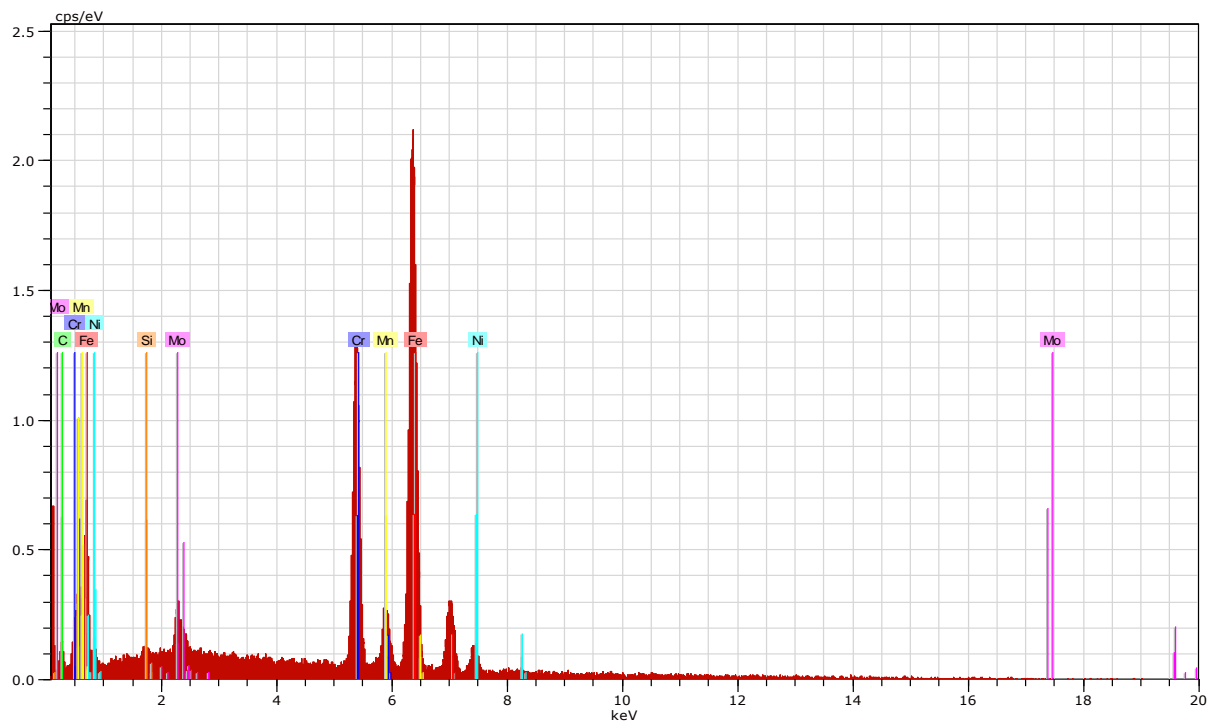
Slika 25. SEM mikrografije zavarenog dupleks nehrđajućeg čelika X2CrNiMoN22-5-3 nakon žarenja 850°C/60' /zrak  
a) osnovni materijal; b) zona utjecaja topline; c) zona taljenja

Slika 26 a) prikazuje SEM mikrografiju uzorka koji obuhvaća osnovni materijal, zonu utjecaja topline i zonu taljenja te pozicije na kojima je provedeno ispitivanje kemijskog sastava EDS analizom. Slika 26 b) prikazuje EDS spektar za ispitivanu poziciju 1. Kemijski sastav ispitivanih pozicija je naveden u tablici 8. Iz tablice 8 je vidljivo da je kemijski sastav pozicije 1: 65,31% Fe, 22,01 % Cr, 1,69 % C, 4,78 % Ni, 2,81 % Mn, 3,42 % Mo i 0,2 % Si. Kemijski sastav pozicije 2 iznosio je: 63,31% Fe, 21,77% Cr, 1,72% C, 7,43% Ni, 2,56% Mn, 3,15% Mo,

0,24% Si. Na SEM mikrografiji prikazanoj slikom 26 a) prije žarenja nije uočena prisutnost drugih precipitata, osim austenita i ferita.



(a)



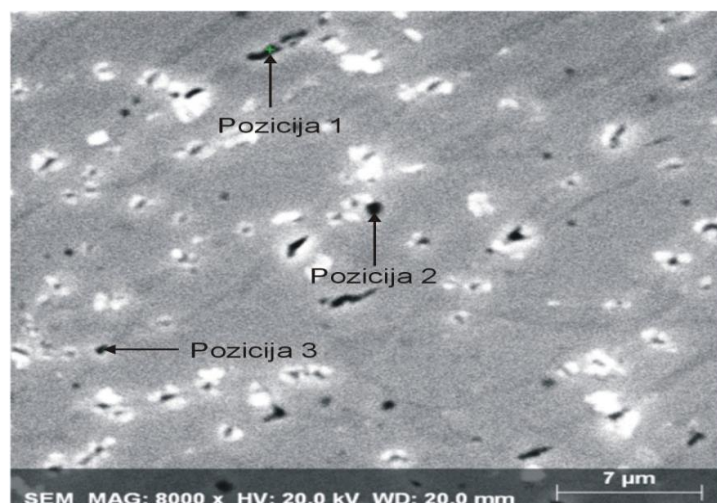
(b)

Slika 26. SEM mikrografija (a) i EDS spektar pozicije 1 (b) zavarenog dupleks nehrđajućeg čelika X2CrNiMoN22-5-3

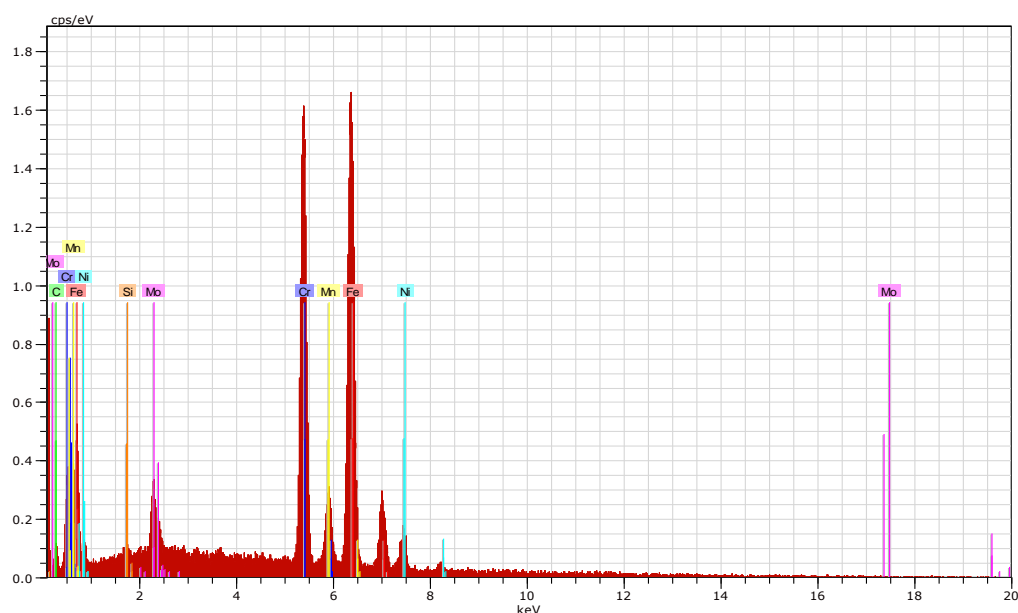
Tablica 8. Rezultati EDS analize zavarenog dupleks nehrđajućeg čelika X2CrNiMoN22-5-3, mas. % (pozicije označene na slici 26a)

Pozicija	Kemijski sastav, mas. %						
	Fe	Cr	C	Ni	Mn	Mo	Si
1	65,31	22,01	1,69	4,78	2,81	3,42	0,20
2	63,31	21,77	1,72	7,43	2,56	3,15	0,24

Slika 27 a) prikazuje SEM mikrografiju zone taljenja nakon žarenja s naznačenim pozicijama za EDS analizu. Sve pozicije odabrane za EDS analizu predstavljaju precipitate koji su zamijećeni optičkom i pretražnom elektronskom mikroskopijom te ih je bilo potrebno dodatno analizirati. Slika 27 b) prikazuje EDS spektar za istraživanu poziciju 1. Kemijski sastav istraživanih pozicija je naveden u tablici 9. U tablici 9 je vidljivo da je kemijski sastav pozicije 1: 55,39% Fe, 29,79 % Cr, 1,35 % C, 6,27 % Ni, 3,10 % Mn, 4,05 % Mo i 0,05 % Si. Kemijski sastav pozicije 2 je: 50,65% Fe, 25,97% Cr, 1,28% C, 7,12% Ni, 12,47% Mn, 2,51% Mo, 0,01% Si. Kemijski sastav pozicije 3 je: 63,80% Fe, 25,24% Cr, 0,7% C, 5,60% Ni, 2,73% Mn, 1,91% Mo, 0,01% Si. Detaljnom analizom kemijskog sastava sve tri istraživanje pozicije može se uočiti povećani udio kroma (25, 24-29,79% Cr). Stoga se može pretpostaviti da precipitati koji nastaju u zoni taljenja nakon žarenja predstavljaju intermetalnu sigma fazu. U nehrđajućim čelicima tijekom zavarivanja ili dugotrajne izloženosti povišenim temperaturama mogu izlučivati intermetalne faze. Od intermetalnih faza u zoni taljenja najčešće nastaje sigma faza. Sigma faza je kromom bogata, tvrda i krhka nemagnetična intermetalna faza koja ima tetragonalnu prostorno centriranu kristalnu strukturu te joj se sastav u visokolegiranim čelicima mijenja. Postoji 50-ak različitih sigma faza, ali je najpoznatija željezo-krom (Fe-Cr) sigma faza. Kada je sadržaj kroma u čeliku manji od 14-15% ne dolazi do nastanka sigma faze ukoliko nije prisutan molibden, titan ili vanadij [24]. Sastav sigma faze može se prikazati i kao  $(\text{FeNi})_x(\text{CrMo})_y\text{FeCr}$  ili  $(\text{FeNi})_x(\text{CrMo})_y$ . Njen nastanak zahtijeva difuziju brojnih elemenata te je favoriziran prisutnošću elemenata koji tvore ferit. Sklonost nastanku sigma faze raste s povećanjem sadržaja kroma i molibdena, pri čemu molibden ima 4 do 5 puta veći utjecaj od kroma. Nasuprot tome, nikal, kobalt, aluminij, ugljik i dušik otežavaju precipitaciju sigma faze. Sigma faza nastaje eutektoidnom pretvorbom  $\delta$ -ferita ( $\delta \rightarrow \sigma + \gamma$ ). Primarno sigma faza nastaje na faznim granicama  $\delta$ -ferit/austenit te se dalje širi u  $\delta$ -ferit [24-27]. Da bi došlo do nastanka sigma faze potrebno je lokalno povećanje sadržaja kroma. Budući da je krom lakše topiv u feritu nego u austenitu najprije dolazi do izlučivanja i rasta sigma faze u  $\delta$ -feritu.



(a)



(b)

Slika 27. SEM mikrografija (a) i EDS spektar pozicije 1 (b) zone taljenja dupleks nehrđajućeg čelika X2CrNiMoN22-5-3 nakon žarenja 850°C/60'/zrak

Tablica 9. Rezultati EDS analize zone taljenja dupleks nehrđajućeg čelika X2CrNiMoN22-5-3 nakon žarenja 850°C/60'/zrak, mas. % (pozicije označene na slici 27a)

Pozicija	Kemijski sastav, mas. %						
	Fe	Cr	C	Ni	Mn	Mo	Si
1	55,39	29,79	1,35	6,27	3,10	4,05	0,05
2	50,65	25,97	1,28	7,12	12,47	2,51	0,01
3	63,80	25,24	0,70	5,60	2,73	1,91	0,01

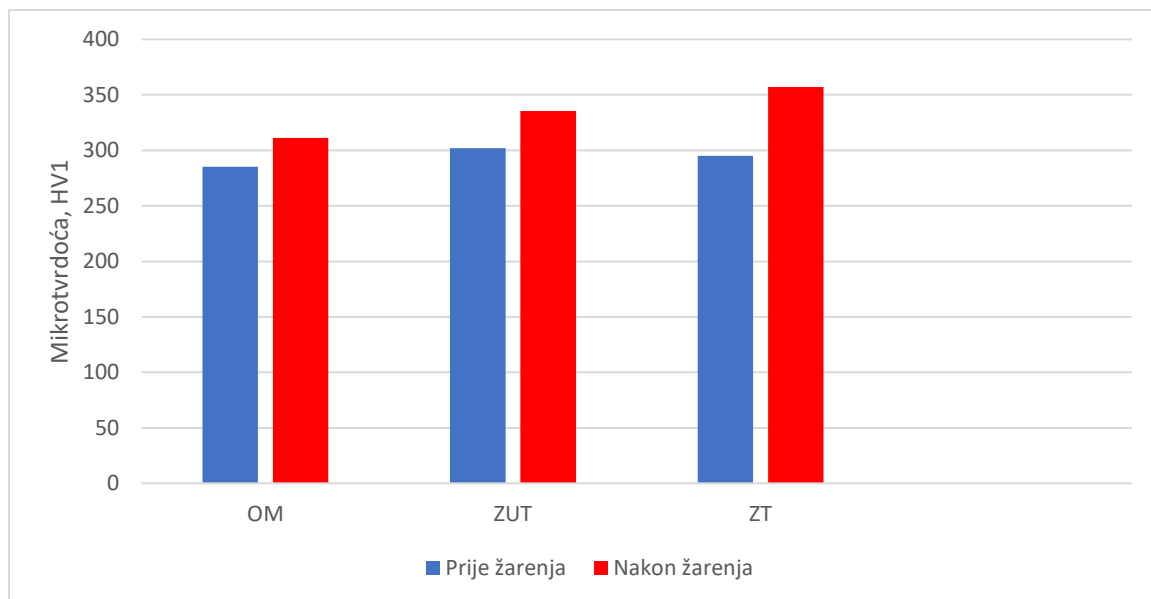
Precipitacija sigma faze u dupleks čeliku, koji sadrži relativno visok udio kroma i nizak udio nikla, mnogo je brža nego kod austenitnih i feritnih čelika. Hrivnak [28] navodi da u dupleks čelicima sigma faza uglavnom sadrži 29-34% Cr, 3-5% Mo i 3-16% W što je slično i sastavu sigma faze koji je dobiven EDS analizom zone taljenja nakon žarenja (tablica 9). Jimenez i sur. [29] navode da se kod dupleks čelika nastanak sigma faze iz  $\delta$ -ferita odvija u dva stupnja tj. prvo nastaje sigma faza s visokim sadržajem kroma i molibdena, a zatim austenit koji nastaje iz preostalog  $\delta$ -ferita obogaćenog željezom i niklom.

## 4.2. Mikrotvrdoća prije i nakon žarenja

Ispitivanje mikrotvrdoće provedeno je na mikrotvrdomjeru Leica VHMT. Mjerenje je izvedeno tako da je tri puta mjerena mikrotvrdoća, a zatim je proračunata srednja vrijednost. Tablicom 10 i slikom 28 prikazani su rezultati ispitivanja mikrotvrdoće prije i nakon žarenja zavarenog spoja.

Tablica 10. Rezultati ispitivanja mikrotvrdoće zavarenog dupleks nehrđajućeg čelika X2CrNiMoN22-5-3 prije i nakon žarenja 850°C/60'/zrak, HV1

Uzorak	Mikrotvrdoća, HV1				
	Mjerenje	1	2	3	Srednja vrijednost
Prije žarenja	OM	286,5	287	282	285,2
	ZUT	302,6	293,6	309,6	302,0
	ZT	283,3	295,5	306	294,9
Nakon žarenja 850°C/60'/zrak	OM	318,6	309,6	305,4	311,2
	ZUT	342,6	336,1	327,4	335,4
	ZT	353,1	354,4	363,5	357,0



Slika 28. Srednja vrijednost mikrotvrdoće uzoraka zavarenog dupleks nehrđajućeg čelika X2CrNiMoN22-5-3 prije i nakon žarenja.

Detaljnijom analizom dobivenih vrijednosti mikrotvrdoće može se uočiti da nakon žarenja dolazi do porasta mikrotvrdoće. Najveći porast mikrotvrdoće pokazuje zona taljenja. Prije žarenja mikrotvrdoća zone taljenja je iznosila 294,9 HV1 a nakon žarenja 357,0 HV1. Navedeni porast mikrotvrdoće može se povezati s nastankom sigma faze.

## 5. Zaključak

Na temelju provedene karakterizacije mikrostrukture i analize mikrotvrdoće zavarenog dupleks nehrđajućeg čelika X2CrNiMoN22-5-3 prije i nakon žarenja (850°C/60'/zrak) može se zaključiti sljedeće:

- Mikrostruktura osnovnog materijala, zone utjecaja topline i zone taljenja prije žarenja se sastojala od ferita i austenita.
- Nakon žarenja osim ferita i austenita u mikrostrukтури zone taljenja su optičkom mikroskopijom mjestimično zamjeđeni precipitati.
- SEM analiza je potvrdila prisutnost precipitata u zoni taljenja nakon provedenog žarenja.
- EDS analizom je utvrđeno da precipitati nastali u zoni taljenja predstavljaju intermetalnu sigma fazu. Sastav sigma faze je iznosio: 50,65-63,80% Fe, 25,24-29,79% Cr, 5,60-7,12% Ni, 2,73-12,47% Mn i 1,91-4,05% Mo.
- Prije žarenja mikrotvrdoća osnovnog materijala, zone utjecaja topline i zone taljenja su bile približno jednake (285,2-302 HV1). Nakon žarenja dolazi do porasta vrijednosti mikrotvrdoće. Najveći porast je zamjeđen u zoni taljenja (s 294,9 na 317,0 HV1). Navedeni porast mikrotvrdoće može se povezati s nastankom sigma faze u zoni taljenja.

## 6. Literatura

1. J.F.Lancaster, Metallurgy of welding, George Allen & Unwin, London, 1980.
2. O. Gil, Welding engineering, Research World, New York, 2016.
3. J.C.Lippold & D.J.Kotecki, Welding metallurgy and weldability of stainless steels, John Wiley & Sons inc., New Jersey, 2005.
4. D.T.Llewellyn & R.C.Hudd, Steels: Metallurgy and applications, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1998.
5. M. Gojić, Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sisak, 2008.
6. <https://www.theweldingmaster.com/what-is-tig-welding-process-or-gas-tungsten-arc-welding-gtaw/> (20.05.2020)
7. <https://justinketterer.com/2010/04/03/welding/> (20.05.2020)
8. <https://www.weldingis.com/smaw-stick-welding/> (20.05.2020)
9. <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/testingmeasuring/passivation-basics-will-this-stainless-steel-rust-> (22.05.2020)
10. W.H.Kearns, Welding handbook seventh edition volume 2, American welding society, Miami, 1978.
11. <https://www.thefabricator.com/thefabricator/article/testingmeasuring/passivation-basics-will-this-stainless-steel-rust-> (22.05.2020)
12. <https://www.worldstainless.org/statistics/stainless-steel-in-figures/> (23.05.2020)
13. B. Raj, H.S. Khatak, Corrosion of austenitic stainless steels, Alpha science, London, 2002.
14. IMOA, Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels, Technical Marketing Resources, Inc of Pittsburg, Pennsylvania, 2009.
15. <https://www.daido.co.jp/en/about/rd/index.html> (23.05.2020)
16. Kovach, C.W., High performance stainless steels, Nickel Development Institute, Pittsburgh, 2002.
17. J.C.M. Farrar, The alloy tree, CRC press, Cambridge, 2004.
18. <https://docplayer.pl/69026971-Mikroskopia-metalograficzna.html> (16.7.2020)
19. <https://www.slideshare.net/GyanendraAwasthi3/microstructure-and-chemical-compositions-of-ferritic-stainless-steel> (16.7.2020)
20. [https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2005/Stainless\\_steels/stainless.html](https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2005/Stainless_steels/stainless.html) (16.7.2020)
21. D.H.Phillips, Welding engineering: and introduction, John Wiley & Sons, West Sussex, 2016.
22. <https://estudiarx.blogspot.com/2019/02/welding-types-of-welding-joining-process.html> (26.05.2020)
23. <https://www.californiaboyler.com/product-brochures/Outokumpu-Duplex-Stainless-Steel-Data-Sheet.pdf>
24. R.A.Lula, Stainless steel, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, 1986.
25. I Hrivnak, Metallography of Austenitic and Dual phase Stainless Steels, Acta Metallurgica Slovaca **10** (2004), 91-102.
26. V. Rede, S.Šolić, Utjecaj sigma faze u dupleks čeliku na otpornost na abrazijsko trošenje, Zbornik 10. Savjetovanja o materijalima, tehnologijama, trenju i trošenju, MATRIB'05, HDZMT, Vela Luka, 23.-25. lipanj 2005., 321-328.



27. D.-Y..Lin, G.-L.Liu, T.-C. Chang, H.-C. Hsieh, Microstructure Development in 24Cr-14Ni-2Mn Stainless Steel After Aging Under Various Nitrogen/Air Ratios, Journal of Alloys and Compounds **377** (2004) 1/2, 150-154.
28. J.Barcik The Kinetics of  $\sigma$  Phase Precipitation in AISI 310 and AISI 316 Steels, Metallurgical Transactions A **14A** (1983) 4, 635-641.
29. J.A.Jimenez, M.Carsi, O.A.Ruano, Characterization of a  $\delta/\gamma$  Duplex Stainless Steel, Journal of Materials Science **35** (2000), 907-915.

## 7. Životopis

### **OSOBNI PODACI:**

Ime i prezime: Domagoj Kovačević

Datum i mjesto rođenja: 7. ožujka 1997. Sisak

Adresa: Stjepana Kefelje 18, Kutinska Slatina, 44320 Kutina

Telefon: 099/333-0403

E-mail: domagojkovacevic17@gmail.com

### **OBRAZOVANJE:**

2003. – 2011. Osnovna škola Mate Lovraka, Kutina

2011. – 2015. Tehnička škola Kutina, smjer kemijski tehničar, Kutina

2016. – 2020. Metalurški fakultet Sisak, preddiplomski sveučilišni studij Metalurgija, smjer Metalurško inženjerstvo, Sisak

### **VJEŠTINE:**

Strani jezik: Engleski jezik

Računalne vještine: MS Office, Internet

Ostale vještine: Vozački ispit B kategorija