

Karakterizacija zavarenog spoja dupleks nehrđajućeg čelika

Petrinšak, Ivan

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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:235:201867>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-01**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Ivan Petrinšak

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

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

Student:

Ivan Petrinšak

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na pruženoj pomoći, savjetima i uloženom vremenu tijekom pisanja ovog završnog rada.

Zahvaljujem se tehničkom suradniku Ivanu Vovku i ostalim djelatnicima fakulteta na pruženoj pomoći prilikom ispitivanja uzorka.

Zahvaljujem se roditeljima i sestri na neizmjerne podršci i strpljenju. Također se zahvaljujem djevojci koja mi je vrijeme tijekom studija učinila lakšim.

Ivan Petrinšak



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 / 22 – 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Ivan Petrinšak** JMBAG: **0035221792**

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

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

Opis zadatka:

Tijekom zavarivanja konstrukcijskih čelika zbog velikog unosa topline u području zavarenog spoja dolazi do promjene mikrostrukture osnovnog materijala. Promjena mikrostrukture neizbježno ima za posljedicu promjenu svojstava, tako da zavareni spoj na određen način predstavlja „slabo mjesto“ u konstrukciji. Kod nehrđajućih konstrukcijskih čelika mikrostrukturne promjene u zoni utjecaja topline i metalu zavara utječu kako na mehanička svojstva tako i na korozivsku postojanost pa se posebna pozornost posvećuje analizi mikrostrukture u tom području.

U završnom radu potrebno je opisati osnovne skupine nehrđajućih čelika s posebnim naglaskom na mikrostrukturne promjene koje nastaju pri zavarivanju. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je napraviti karakterizaciju zavarenog spoja dupleks nehrđajućeg čelika: analizirati makrostrukturu i mikrostrukturu te izmjeriti mikrotvrdoću u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavara.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadala:

Prof. dr. sc. Vera Rede

Rede

Datum predaje rada:

1. rok: 24. 2. 2022.
2. rok (izvanredni): 6. 7. 2022.
3. rok: 22. 9. 2022.

Predvideni datumi obrane:

1. rok: 28. 2. – 4. 3. 2022.
2. rok (izvanredni): 8. 7. 2022.
3. rok: 26. 9. – 30. 9. 2022.

Predsjednik Povjerenstva:

Branko Bauer
Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY	VIII
1. UVOD.....	1
2. KONSTRUKCIJSKI ČELICI.....	2
2.1. Sistematizacija konstrukcijskih čelika [3].....	2
2.2. Zahtjevi na konstrukcijske čelike.....	3
2.2.1. Čvrstoća konstrukcijskih čelika	3
2.2.2. Žilavost [5].....	4
2.2.3. Otpornost na puzanje	4
2.2.4. Otpornost na umor [6].....	5
2.2.5. Otpornost na trošenje [8]	5
3. NEHRĐAJUĆI ČELICI	6
3.1. Pojavni oblici korozije kod čelika.....	7
3.1.1. Opća korozija	7
3.1.2. Točkasta korozija	8
3.1.3. Kontaktna korozija.....	8
3.1.4. Napetosna korozija.....	9
3.1.5. Interkristalna korozija	10
3.2. Fe-Cr sustav nehrđajućih čelika [11]	10
3.3. Fe-Cr-C sustav nehrđajućih čelika [11]	11
3.4. Fe-Cr-Ni sustav nehrđajućih čelika [11].....	12
3.5. Osnovna sistematizacija nehrđajućih čelika prema mikrostrukturi	13
3.5.1. Martenzitni nehrđajući čelici	14
3.5.1.1. Osnovna svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika [2].....	14
3.5.1.2. Supermartenzitni nehrđajući čelici [2].....	14
3.5.2. Feritni nehrđajući čelici	14
3.5.2.1. Osnovna svojstva feritnih nehrđajućih čelika	15
3.5.2.2. Superferitni čelici [10]	16
3.5.3. Austenitni nehrđajući čelici	16
3.5.3.1. Osnovna svojstva austenitnih nehrđajućih čelika	16
4. DUPLEKS NEHRĐAJUĆI ČELICI	17
4.1. Razvoj i podjela dupleks nehrđajućih čelika.....	18
4.2. Osnovna svojstva dupleks nehrđajućih čelika	19
4.3. Utjecaj legirnih elemenata na dupleks nehrđajuće čelike [20]	20

4.4.	Toplinska obrada dupleks nehrđajućih čelika [11]	20
4.5.	Štetni precipitati u mikrostrukturi dupleks nehrđajućih čelika	22
4.5.1.	Alfa-prim-faza [11]	22
4.5.2.	Sekundarni austenit [20]	22
4.5.3.	Chi-faza [11]	22
4.5.4.	Sigma-faza [11].....	23
4.5.5.	Karbidi i nitridi [11].....	24
5.	ZAVARIVANJE DUPLEKS NEHRĐAJUĆIH ČELIKA	25
5.1.	Postupci zavarivanja dupleks nehrđajućih čelika [20]	25
5.2.	Zona utjecaja topline [20]	26
5.3.	Metal zavara [20]	28
5.4.	Nastanak pukotina u strukturi zavarenog spoja [20].....	30
5.5.	Tvrdoća nakon zavarivanja [20]	31
6.	EKSPERIMENTALNI DIO	32
6.1.	Cilj rada i provođenje ispitivanja	32
6.2.	Materijal za ispitivanje.....	32
6.3.	Priprema uzorka	34
6.3.1.	Izrezivanje uzorka	34
6.3.2.	Brušenje uzorka	36
6.3.3.	Poliranje uzorka	37
6.3.4.	Nagrivanje uzorka	38
6.4.	Analiza makrostrukture zavarenog spoja	38
6.5.	Analiza mikrostrukture zavarenog spoja.....	39
6.5.1.	Analiza mikrostrukture osnovnog materijala	40
6.5.2.	Analiza mikrostrukture zone utjecaja topline	41
6.5.3.	Analiza mikrostrukture metala zavara	46
6.6.	Mikrotvrdoća HV0,2	49
7.	OSVRT NA DOBIVENE REZULTATE	52
7.1.	Osvrt na rezultate analize makrostrukture zavarenog spoja.....	52
7.2.	Osvrt na rezultate analize mikrostrukture	52
7.3.	Osvrt na rezultate mjerenja mikrotvrdoće HV0,2	53
8.	ZAKLJUČAK.....	55
	LITERATURA.....	56

POPIS SLIKA

Slika 1.	Standardni oblici konstrukcijskih čelika [4].....	2
Slika 2.	Hookeov dijagram "naprezanje-istezanje" [6].....	4
Slika 3.	Stadiji pužanja materijala [7]	5
Slika 4.	Oksidni sloj kod običnog (lijevo) i nehrđajućeg čelika (desno) [11].....	7
Slika 5.	Ravnomjerna (lijevo) i neravnomjerna (desno) opća korozija [12]	7
Slika 6.	Točkasta korozija čelika [13]	8
Slika 7.	Galvanska korozija mjedi i čelika [14].....	8
Slika 8.	Korozija u procjepu čelika [15].....	9
Slika 9.	Napetosna korozija čelika [16].....	9
Slika 10.	Interkristalna korozija čelika pri različitim temperaturama [17].....	10
Slika 11.	Fazni dijagram sustava Fe-Cr [11]	10
Slika 12.	Pseudobinarni dijagram Fe-Cr-C sustava za 13 %Cr čelik (a) i 17 %Cr čelik (b) [11]	11
Slika 13.	Pseudobinarni Fe-Cr-Ni dijagrami za čelik sa 70 % željeza (a) i 60 % željeza (b) [11]	12
Slika 14.	Schaefflerov dijagram [11].....	13
Slika 15.	Spremnik za etanol od dupleks nehrđajućeg čelika [18].....	17
Slika 16.	Otpornost nehrđajućih čelika na napetosnu koroziju [11].....	19
Slika 17.	Dijagram stanja Cr-Ni-Fe sustava [11]	21
Slika 18.	Mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika [21].....	21
Slika 19.	Mikrostruktura dupleks čelika sa fazom sekundarnog austenita [20]	22
Slika 20.	Mikrostruktura dupleks čelika sa chi-fazom [20].....	23
Slika 21.	Mikrostruktura dupleks čelika sa sigma-fazom [11].....	23
Slika 22.	Mikrostruktura dupleks čelika s izlučenim Cr ₂ N nitridima [10].....	24
Slika 23.	Mikrostruktura zone utjecaja topline dvaju različitih dupleks čelika [20].....	27
Slika 24.	Mikrostruktura niskotemperaturnog ZUT-a s prisutnom sigma-fazom [20].....	28
Slika 25.	Višeprolazni metal zavara dupleks čelika [20].....	29
Slika 26.	Topla pukotina u metalu zavara zavarenog spoja dupleks čelika [20].....	30
Slika 27.	Pukotina izazvana vodikom [20].....	31
Slika 28.	Zavarena cijev čelika X2CrNiMoN 25-7-4.....	32
Slika 29.	Shematski prikaz izvedbe spoja (a) i redosljed zavarivanja (b).....	33
Slika 30.	Postupak rezanja cijevi tračnom pilom	35
Slika 31.	Izrezani uzorak zavarenog spoja cijevi	35
Slika 32.	Uređaj Mintech 233.....	36
Slika 33.	Uređaj Struers Pedemin DAP-7	37
Slika 34.	Uzorak zavarenog spoja nakon poliranja.	38
Slika 35.	Makrostruktura zavarenog spoja	38
Slika 36.	Mikroskop Olympus GX51	39
Slika 37.	Mikrostruktura osnovnog materijala snimljena pri povećanju 200×.....	40
Slika 38.	Mikrostruktura osnovnog materijala snimljena pri povećanju 500×.....	40
Slika 39.	Mikrostruktura ZUT-a, lijevo, u tjemenu zavara, snimljena pri povećanju 100×.....	42
Slika 40.	Mikrostruktura ZUT-a, desno, u tjemenu zavara, snimljena pri povećanju 100×.....	42
Slika 41.	Mikrostruktura ZUT-a, lijevo, u sredini zavara, snimljena pri povećanju 100×.....	43
Slika 42.	Mikrostruktura ZUT-a, desno, u sredini zavara, snimljena pri povećanju 100×.....	43
Slika 43.	Mikrostruktura ZUT-a, lijevo, u korijenu zavara, snimljena pri povećanju 100×	44

Slika 44.	Mikrostruktura ZUT-a, desno, u korijenu zavara, snimljena pri povećanju 100×	44
Slika 45.	Mikrostruktura zone utjecaja topline snimljena pri povećanju 200×	45
Slika 46.	Mikrostruktura metala zavara u tjemenu zavara, snimljena pri povećanju 100×	46
Slika 47.	Mikrostruktura metala zavara u sredini zavara, snimljena pri povećanju 100×	47
Slika 48.	Mikrostruktura metala zavara u korijenu zavara, snimljena pri povećanju 100×	47
Slika 49.	Mikrostruktura metala zavara snimljena pri povećanju od 500×	48
Slika 50.	Mikrotvrdomjer, model PMT-3	49
Slika 51.	Polirana površina uzorka s naznačenim mjestima ispitivanja mikrotvrdoće	50
Slika 52.	Mikrotvrdoća HV0,2 u osnovnom materijalu	53
Slika 53.	Mikrotvrdoća HV0,2 u zoni utjecaja topline	54
Slika 54.	Mikrotvrdoća HV0,2 u metalu zavara	54

POPIS TABLICA

Tablica 1. Osnovna sistematizacija nehrđajućih čelika prema mikrostrukturi i sastavu [3]	13
Tablica 2. Kemijski sastav ispitivanog čelika	33
Tablica 3. Kemijski sastav dodatnog materijala.....	34
Tablica 4. Vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 u osnovnom materijalu.....	50
Tablica 5. Vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 u zoni utjecaja topline	51
Tablica 6. Vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 u metalu zavara	51

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
HV0,2	HV0,2	mikrotvrdoća po Vickersu s utegom od 200 grama
σ	N/mm ²	naprezanje
ε	mm/mm	deformacija
R_m	N/mm ²	vlačna čvrstoća
R_k	N/mm ²	konačno naprezanje
R_e	N/mm ²	granica razvlačenja
KU	J	udarni rad loma
$R_{pe/t/9}$	N/mm ²	granica puzanja
ϑ	°C	temperatura
t	s	vrijeme
$R_{mt/9}$	N/mm ²	statička izdržljivost
R_d	N/mm ²	dinamička izdržljivost
$R_{p0,2}$	N/mm ²	konvencionalna granica razvlačenja
Cr_{ekv}	/	vrijednost ekvivalentnog kroma
Ni_{ekv}	/	vrijednost ekvivalentnog nikla
HRC	HRC	tvrdoća po Rockwellu
DS	/	djelotvorna suma
HV	HV	tvrdoća po Vickersu
FN	/	feritni broj
A	%	istezljivost

SAŽETAK

U ovom radu provedena je karakterizacija zavarenog spoja cijevi od dupleks nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMoN 25-7-4. Analizirana je makrostruktura i mikrostruktura te mikrotvrdoća HV_{0,2} u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavara.

U teorijskom dijelu rada opisana je sistematizacija i osnovna svojstva konstrukcijskih nehrđajućih čelika. Detaljno su opisani dupleks nehrđajući čelici, osobito njihova zavarljivost.

Analizom makrostrukture utvrđeno je da je zavar pravilnog simetričnog oblika, bez vidljivih pukotina i drugih pogrešaka, s jasno izraženom linijom staljivanja.

Mikrostruktura osnovnog materijala sastoji se od ferita i austenita u podjednakim udjelima. U zoni utjecaja topline narušena je pravilna dupleks struktura. Udio ferita viši je od 50 %, vide se krupna feritna zrna, a mjestimice u njima ima izlučenih kromovih nitrida. Također se vide zrna sekundarnog austenita. Metal zavara ima tipičnu ljevačku dendritnu mikrostrukturu s podjednakim udjelom ferita i austenita.

Vrijednosti mikrotvrdoće HV_{0,2} zavarenog spoja dosta se razlikuju u osnovnom materijalu, ZUT-u i metalu zavara. Najmanje vrijednosti mikrotvrdoće izmjerene su u metalu zavara. Podjednake su u tjemenu, sredini i korijenu zavara i iznose od 245 do 272 HV_{0,2}. Mikrotvrdoća u osnovnom materijalu podjednaka je u vanjskom rubu, sredini i unutarnjem rubu stijenke cijevi i iznosi između 311 i 321 HV_{0,2}. Mikrotvrdoća osnovnog materijala viša je od mikrotvrdoće u tjemenu i sredini ZUT-a. Najviša mikrotvrdoća izmjerena je u zoni utjecaja topline, u korijenu zavara i iznosi 360 HV_{0,2}.

Ključne riječi: nehrđajući dupleks čelik, zavareni spoj, karakterizacija

SUMMARY

In this study, the characterization of welded joint of grade X2CrNiMoN 25-7-4 duplex stainless steel pipe was performed. The macrostructure and microstructure as well as the microhardness HV0.2 in the base material, heat-affected zone, and weld metal were analyzed.

In the theoretical part of the study, the systematization and basic properties of structural stainless steels were described. Duplex stainless steels were described in detail, especially their weldability.

Analysis of the macrostructure determined that the weld is of the correct symmetrical shape, without visible cracks and other defects, with a clearly defined fusion line.

Microstructure of the base material consists of ferrite and austenite in equal parts. In the heat-affected zone, the proper duplex structure is disrupted. The ferrite content is higher than 50 %, large ferrite grains can be seen, and chromium nitrides are excreted in some places. Grains of secondary austenite can also be seen. The weld metal has a typical as-cast dendritic microstructure with an almost equal ratio of ferrite and austenite.

The HV0.2 microhardness values of the welded joint differ considerably in the base material, HAZ, and weld metal. The lowest values of microhardness were measured in the weld metal. They are almost the same in the face, middle, and root of the weld and range from 245 to 272 HV0.2. The microhardness in the base material is almost the same in the outer edge, middle and inner edge of the pipe wall and ranges between 311 and 321 HV0.2. The microhardness of the base material is higher than the microhardness at the face and middle of the HAZ. The highest microhardness was measured in the heat-affected zone, at the root of the weld and equals 360 HV0.2.

Key words: stainless duplex steel, welded joint, characterization

1. UVOD

Dupleks nehrđajući čelici predstavljaju grupu zadnjih proizvedenih nehrđajućih čelika, ispitanih ranih 1930-ih godina i masovno proizvođenih od 1970-ih godina. Zahvaljujući njihovim izvanrednim mehaničkim svojstvima i otpornosti na koroziju postali su prvi izbor za primjenu u korozivnim uvjetima i pri visokim opterećenjima. Ovi čelici omogućuju jeftino održavanje i nisku cijenu ciklusa vijeka trajanja. Visoka čvrstoća, visoka otpornost na koroziju i dobra obradivost cijene se u velikom rasponu moderne primjene čelika. Njihova mikrostruktura sastoji se od 50 % feritne faze koja ima BCC kristalnu rešetku i 50 % austenitne faze koja ima FCC kristalnu rešetku. Kako bi se postigla takva struktura, legiraju se elementima koji stabiliziraju feritnu fazu (Cr, Mo, Si, W...) i elementima koji stabiliziraju austenitnu fazu (Ni, N, Mn...). Omjer ferita i austenita, osim o legirnim elementima, ovisi i o postupku toplinske obrade. [1]

Nehrđajući čelici uglavnom su zavarljivi, a zavarivanje je jedna od najvažnijih tehnika obrađivanja istih. Kako bi se zavarivanje odvijalo bez problema i kako ne bi negativno utjecalo na svojstva čelika, postoje različita pravila zavarivanja koja se moraju poštivati. Ako se ne poštuju pravila zavarivanja, nerijetko dolazi do problema tijekom korištenja nehrđajućih čelika, a ti problemi su često povezani sa nepravilnom kontrolom mikrostrukture. Neke od posljedica zavarivanja koje se mogu pojaviti kod zavarenih spojeva dupleks čelika su pukotine pri skrućivanju zavara, pukotine izazvane vodikom te pojava alfa-prim-faze. [2]

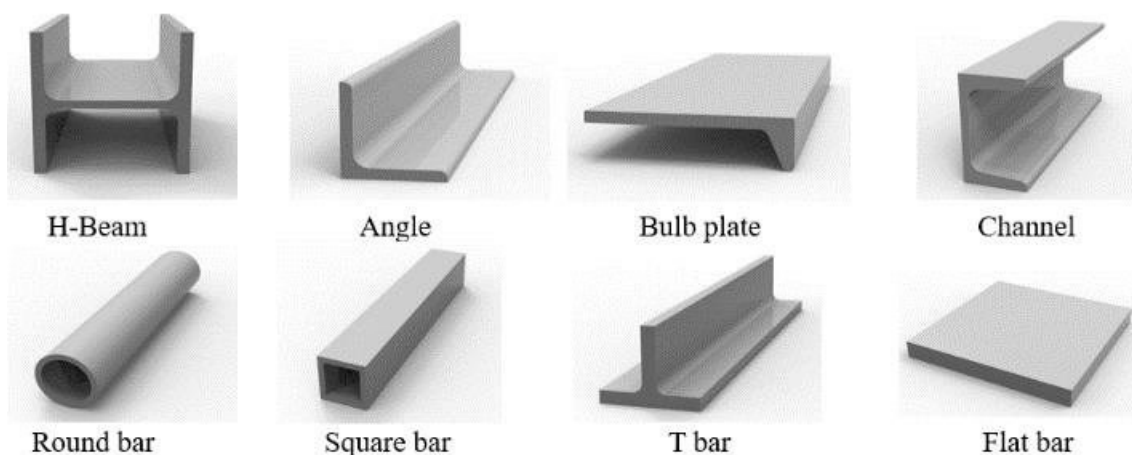
Kako bi se otkrile nepravilnosti u zavarenoj mikrostrukturi i spriječili problemi prilikom eksploatacije zavarenih dupleks čeličnih spojeva, potrebno je pravilno analizirati mikrostrukturu te neka od svojstava čelika, kao što je tvrdoća.

2. KONSTRUKCIJSKI ČELICI

Čelik se već duže vrijeme smatra jednim od najboljih konstrukcijskih materijala. Konstrukcijski čelici imaju široku primjenu i koriste se za izradu najrazličitijih dijelova, od dijelova strojeva pa sve do čeličnih mostova. Ovi dijelovi prenose sile i momente, služe za spajanje drugih dijelova konstrukcija, za spremanje i prijenos tekućine i slično. [3]

Čelik se isporučuje i nabavlja u obliku različitih poluproizvoda od kojih se onda izrađuju potrebni dijelovi.

Na slici 1. prikazani su standardni oblici konstrukcijskih čelika.



Slika 1. Standardni oblici konstrukcijskih čelika [4]

2.1. Sistematizacija konstrukcijskih čelika [3]

Konstrukcijski čelici mogu se podijeliti u više skupina. Vrste konstrukcijskih čelika prema osnovnoj podjeli su:

- opći konstrukcijski čelici
- brodograđevni konstrukcijski čelici prema Hrvatskom registru brodova i Lloyd's registru
- ugljični čelici za tanke limove
- niskougljični čelici za trake
- čelici za vijke, matice i zakovice

- čelici za žice
- čelici za opruge
- čelici za cementiranje
- čelici za poboljšavanje
- čelici povišene čvrstoće
- čelici poboljšane rezljivosti
- korozijski postojani čelici
- visokočvrsti čelici
- čelici za rad pri povišenim i visokim temperaturama
- čelici za rad pri niskim temperaturama.

2.2. Zahtjevi na konstrukcijske čelike

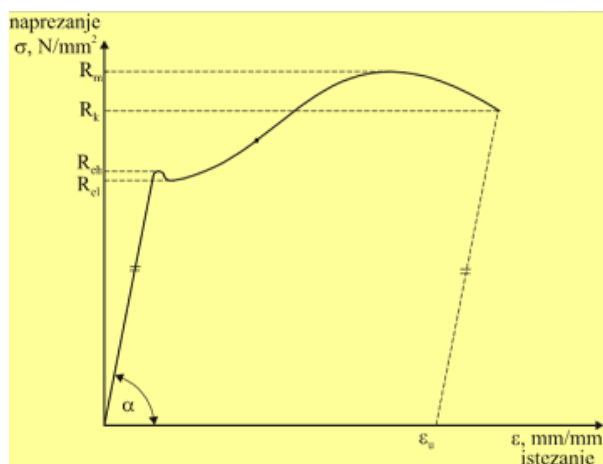
Konstrukcijski čelici svakodnevno su podložni velikim opterećenjima, različitim radnim temperaturama i trošenju, a osim toga treba ih moći obrađivati te spajati. Kako bi izdržali sve od navedenog, kako ne bi došlo do problema pri njihovoj eksploataciji i kako bi imali što dulji vijek trajanja, potrebno je da ispune određene zahtjeve. Glavna zahtijevana svojstva konstrukcijskih čelika su:

- mehanička svojstva poput visoke granice razvlačenja, žilavosti i čvrstoće
- otpornost na mehaničko istrošenje
- otpornost na koroziju
- dobra tehnološka svojstva poput rezljivosti, zavarljivosti i hladne oblikovljivosti. [3]

2.2.1. Čvrstoća konstrukcijskih čelika

Kako konstrukcijski čelici služe za prijenos gibanja, sila i momenata, moraju imati visoku čvrstoću. Čvrstoća je mehaničko svojstvo materijala koje opisuje otpornost prema deformaciji pod utjecajem nametnute sile te pucanju ako je sila dovoljno velika. Jedno od najvažnijih svojstava konstrukcijskih čelika je vlačna čvrstoća koja se određuje statičko vlačnim ispitivanjem. [5]

Rezultati statičko vlačnog ispitivanja prikazuju se Hookeovim dijagramom koji se nalazi na slici 2.



Slika 2. Hookeov dijagram "naprezanje-istezanje" [6]

Na slici 2., na ordinati se nalazi naprezanje (σ) izraženo u N/mm^2 dok se na apscisi nalazi deformacija (ϵ) izražena u mm/mm . Oznakom R_m označeno je maksimalno vlačno naprezanje, to jest vlačna čvrstoća, oznaka R_k odnosi se na konačno naprezanje kod kojeg dolazi do pucanja, a oznaka R_e odnosi se na granicu razvlačenja, to jest maksimalno naprezanje kod kojeg, nakon rasterećenja, još uvijek nema trajne deformacije.

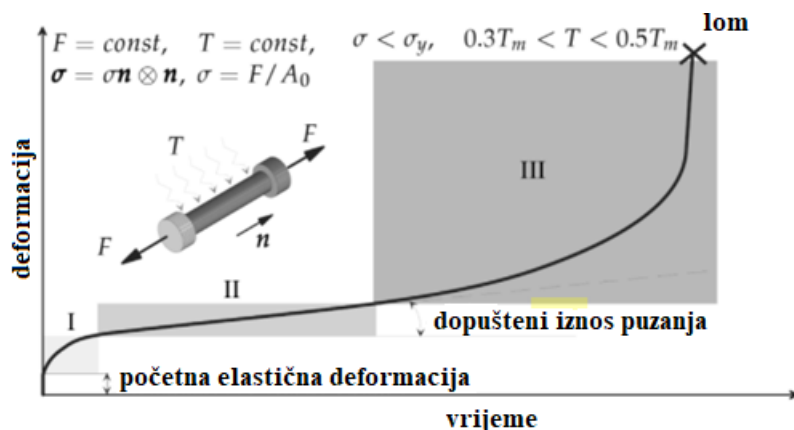
2.2.2. Žilavost [5]

Žilavost je također bitno svojstvo konstrukcijskih materijala. Predstavlja otpornost materijala prema udarnom opterećenju, to jest sposobnost materijala da apsorbira energiju u obliku udarca bez pojave pucanja. Žilavi materijali imaju visoku otpornost na udarno opterećenje i za njih se kaže da imaju visok udarni rad loma (KU ili KV), a materijali koji imaju nizak udarni rad loma i skloniji su pucanju, nazivaju se krhkim materijalima. Udarni rad loma, odnosno žilavost materijala ispituje se na Charpyjevom batu.

2.2.3. Otpornost na puzanje

Pri radu na povišenim i visokim temperaturama, od konstrukcijskih čelika traži se da zadrže vrijednosti čvrstoće i žilavosti, odnosno takvi čelici trebaju biti otporni na puzanje. Puzanje je pojava progresivne plastične deformacije pri konstantnoj temperaturi i opterećenju. Za većinu konstrukcijskih materijala puzanje se promatra pri nekoj određenoj kritičnoj temperaturi. [7]

Na slici 3. može se vidjeti napredovanje puzanja kroz 3 stadija.



Slika 3. Stadiji puzanja materijala [7]

Granica puzanja i statička izdržljivost bitna su svojstva otpornosti puzanju.

Granica puzanja $R_{pe/t/\vartheta}$ oznaka je za vlačno naprezanje kod kojeg dolazi do određene trajne deformacije ε pri određenoj temperaturi ϑ nakon određenog trajanja opterećenja t .

Statička izdržljivost $R_{m/\vartheta}$ oznaka je za vlačno naprezanje kod kojeg dolazi do loma pri određenoj temperaturi ϑ nakon određenog trajanja opterećenja t . [6]

2.2.4. Otpornost na umor [6]

Osim otpornosti na dugotrajna statička opterećenja, kod konstrukcijskih čelika ne može se zanemariti ni otpornost na dugotrajna dinamička opterećenja, to jest otpornost na umor. Umor je pojava oštećenja u materijalu poput formiranja i širenja pukotina tijekom izloženosti dugotrajnim periodičkim promjenjivim opterećenjima. Dinamička izdržljivost je bitno svojstvo otpornosti na umor. Dinamička izdržljivost R_d oznaka je za promjenjivo naprezanje koje materijal može izdržati bez nastanka loma ili makropukotina u teoretski beskonačno dugom vremenu.

2.2.5. Otpornost na trošenje [8]

Otpornost na trošenje još je jedno bitno svojstvo konstrukcijskih čelika. Trošenje se može definirati kao oštećenje krute površine materijala do kojeg dolazi djelovanjem jednog ili više osnovnih mehanizama trošenja. Osnovni mehanizmi trošenja su: abrazija, adhezija, umor površine i tribokorozija. Svaki od slučajeva trošenja može se sistematizirati u mnoštvo podskupina. Jedan od najčešćih uzroka trošenja je nedostatak maziva na površini materijala.

3. NEHRĐAJUĆI ČELICI

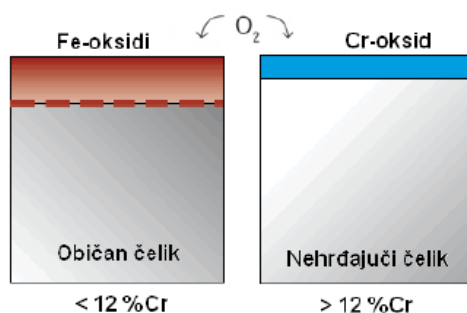
Čelik, najčešća željezna legura i konstrukcijski materijal koji se danas može najčešće naći u eksploataciji, ima vrlo lošu otpornost na koroziju. Čelik hrđa na zraku, ljušti se pri visokim temperaturama i korodira u mnogim medijima. Zbog velike uporabe čelika te velikog utjecaja korozije na njegovu kvalitetu, već u 19. stoljeću započinju istraživanja korozije i mogućnosti kako bi se njezino djelovanje minimiziralo. Znanstvenici su zaključili da dodavanje kroma i nikla pozitivno utječe na otpornost čelika na koroziju. Tako je već početkom 20. stoljeća patentiran prvi nehrđajući čelik. [9]

Nehrđajući čelici definirani su kao visokolegirani čelici otporni na kemijsku i/ili elektrokemijsku koroziju. Pronalaze primjenu u mnogim industrijama, a neke od njih su: kemijska, procesna, petrokemijska, farmaceutska i prehrambena. Osim ugljika, koji je osnovni element u čeliku, dva najvažnija legirna elementa nehrđajućih čelika su krom i nikel. Zbog toga se temeljna struktura nehrđajućih čelika opisuje Fe-C, Fe-Cr-C i Fe-Cr-Ni sustavima. [10]

Osnovni materijal za izradu nehrđajućih čelika su reciklirani otpadci nehrđajućih čelika. Čest postupak izrade uporabom recikliranih materijala sastoji se od 4 koraka. Prvi korak je otapanje sirovog recikliranog čelika, zatim slijedi drugi korak otklanjanja nepotrebnog udjela ugljika te nečistoća poput sumpora. Treći korak je konfiguracija kemijskog sastava strukture i temperature te završno lijevanje u ploče i ingote. Nakon toga, u četvrtom koraku, čelik se deformira toplim ili hladnim valjanjem i završno obrađuje. [9]

Kako bi se čelik mogao klasificirati nehrđajućim, moraju se zadovoljiti dva bitna uvjeta. [10] Prvi uvjet koji je potrebno zadovoljiti je minimalan udio kroma od 12 %, koji mora biti otopljen u čvrstoj metalnoj otopini, odnosno kristalu mješancu. Ako je prvi uvjet zadovoljen, na površini čelika stvara se izrazito tanki oksidni sloj debljine od 1 do 5 nm. To je sloj kromovog oksida koji nastaje zato što u čeliku ima kroma. Kad ne bi bilo kroma, na površini čelika nastao bi sloj željeznih oksida koji su puno deblji, porozniji i ne štite čelik od daljnje korozije. Sloj kromovih oksida vrlo dobro prianja uz površinu čelika, nepropustan je i jako dobro štiti površinu čelika od daljnje korozije. [11]

Na slici 4. može se vidjeti stvaranje navedenog sloja kod običnih (bez dovoljno kroma) i nehrđajućih čelika.



Slika 4. Oksidni sloj kod običnog (lijevo) i nehrđajućeg čelika (desno) [11]

Drugi uvjet koji je potrebno zadovoljiti je homogena monofazna mikrostruktura čelika. Zadovoljenim drugim uvjetom sprječava se pojavljivanje galvanskih članaka. Međutim, ovaj uvjet nije u potpunosti nužan te postoje i višefazni nehrđajući čelici. [11]

3.1. Pojavni oblici korozije kod čelika

Korozija se pojavljuje u više različitih oblika. Najčešći pojavni oblici korozije kod čelika su opća korozija te posebni oblici korozije kao što su točkasta, kontaktna, napetosna i interkristalna korozija. [3]

3.1.1. Opća korozija

Opća korozija još se naziva i jednoličnom korozijom. To je najčešći oblik korozije. Širi se jednolično po čitavoj površini, a može biti ravnomjerna i neravnomjerna. Ravnomjerna se smatra manje opasnom jer je predvidljiva za razliku od neravnomjerne. Intenzivnost ove vrste korozije može se izmjeriti gubitkom mase izraženim preko $\text{g/m}^2\text{h}$ ili gubitkom dimenzija izraženim preko mm/godini . [3] [12]

Razlika između ravnomjerne (lijevo) i neravnomjerne (desno) opće korozije prikazana je na slici 5.



Slika 5. Ravnomjerna (lijevo) i neravnomjerna (desno) opća korozija [12]

3.1.2. Točkasta korozija

Točkasta korozija naziva se još i jamičastom, rupičastom ili "pitting" korozijom. Za razliku od opće korozije ne nastupa na čitavoj površini, već zahvaća vrlo malu površinu na nepredvidivim mjestima i ostavlja oštećenja u obliku jamica koje mogu prerasti u veće rupe. Točkastu koroziju uzrokuju nehomogenosti u kemijskom sastavu ili strukturi.[12]
Na slici 6. prikazana je površina čelika oštećena točkastom korozijom.



Slika 6. Točkasta korozija čelika [13]

3.1.3. Kontaktna korozija

Kontaktna korozija može se pojaviti kao galvanska korozija ili korozija u procjepu. [12]
Do galvanske korozije dolazi tijekom dodira različitih metala unutar elektrolita pri čemu se stvara galvanski članak. Do korozije dolazi kada postoji razlika elektropotencijala između metala. Od dva metala, brže i više će korodirati onaj koji ima negativniji potencijal i koji se očituje kao anoda. [3]

Na slici 7. prikazana je galvanska korozija između vijka od mjedi i čelične matice.



Slika 7. Galvanska korozija mjedi i čelika [14]

Do korozije u procjepu dolazi tijekom dodira istovrsnih metala ili metala i nemetala unutar elektrolita. Korozija u procjepu, po mehanizmu nastanka i posljedicama, slična je jamičastoj koroziji. [12]

Na slici 8. prikazana je korozija u procjepu čelika.



Slika 8. Korozija u procjepu čelika [15]

3.1.4. Napetosna korozija

Napetosna korozija pojavljuje se pod utjecajem vlačnog naprezanja i agresivnog medija, pri čemu naprezanja mogu biti unutarnja ili vanjska. Najviše su napetosnoj koroziji izloženi zavareni materijali i materijali oblikovani hladnom deformacijom, jer je kod njih velika količina zaostalih naprezanja. Nastaju pukotine koje se šire okomito na smjer naprezanja te dovode do raspucavanja i loma. [3]

Na slici 9. prikazane su posljedice napetosne korozije čelika.

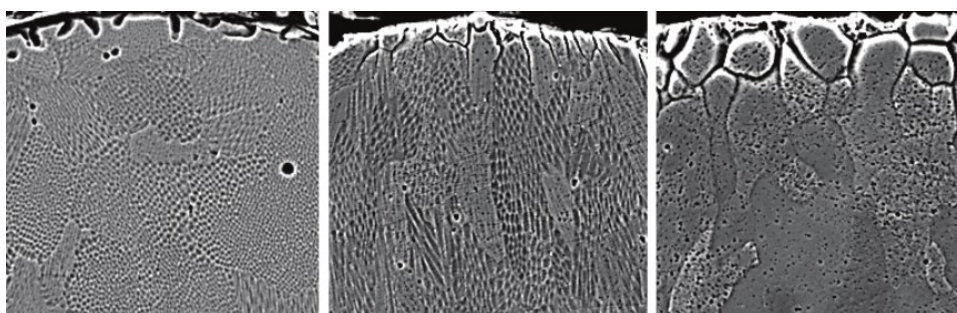


Slika 9. Napetosna korozija čelika [16]

3.1.5. Interkristalna korozija

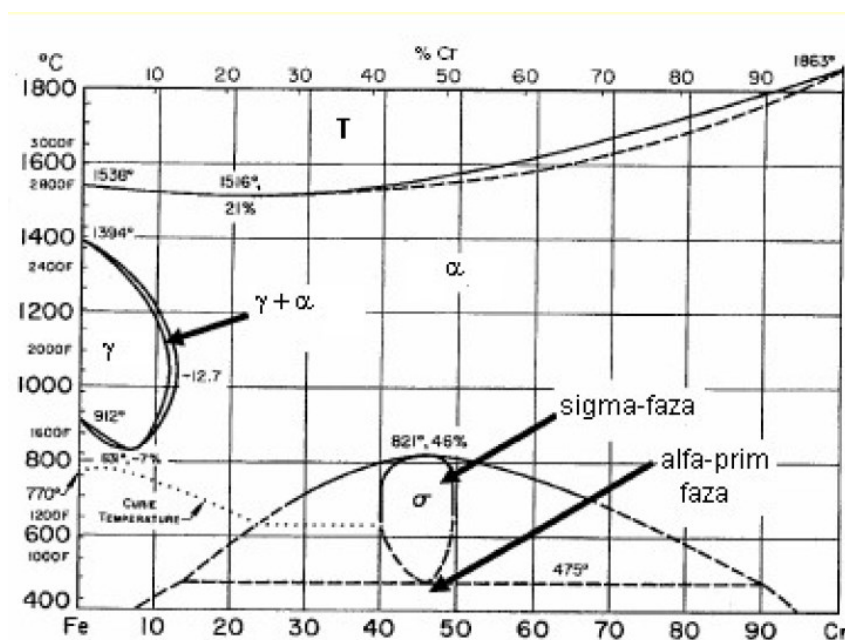
Interkristalna korozija pojavljuje se uslijed izlučivanja nečistoća ili spojeva poput karbida po granicama zrna. Zbog toga granica zrna i područje oko granice imaju različit potencijal u odnosu na ostatak kristalnog zrna. Napredovanjem interkristalne korozije pucaju veze između kristalnih zrna. Upravo zbog toga što ovaj oblik korozije napreduje nevidljivo uzduž zrna, vrlo teško ga je predvidjeti. [3]

Na slici 10. prikazana je dubina širenja interkristalne korozije čelika koji je bio izložen temperaturama od 750 °C (lijevo), 850 °C (u sredini) i 1050 °C (desno).



Slika 10. Interkristalna korozija čelika pri različitim temperaturama [17]

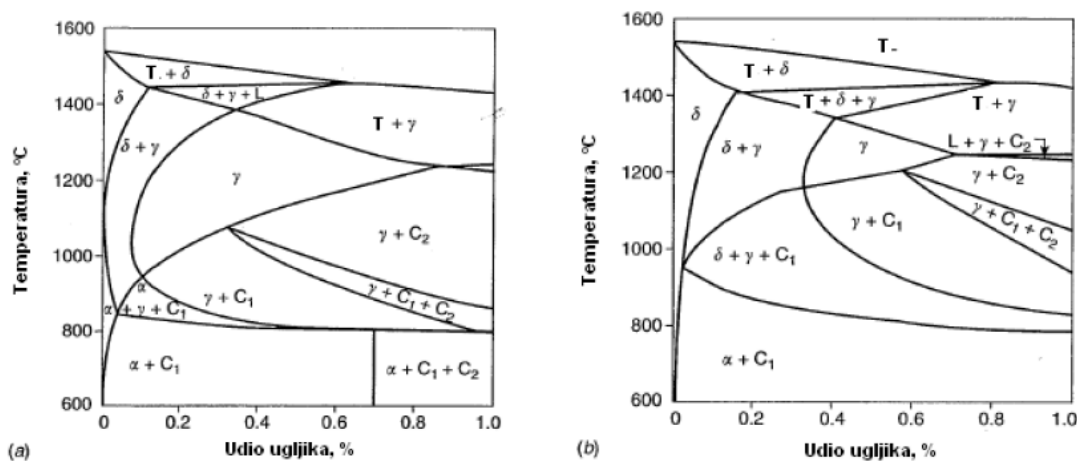
3.2. Fe-Cr sustav nehrđajućih čelika [11]



Slika 11. Fazni dijagram sustava Fe-Cr [11]

Slika 11. prikazuje ravnotežni fazni dijagram Fe-Cr sustava. Zbog toga što je krom najbitniji legirni element u nehrđajućim čelicima, ovaj fazni dijagram osnovni je dijagram za prikaz strukturnih faza nehrđajućih čelika. Iz njega se može iščitati niz bitnih informacija vezanih uz fazne pretvorbe koje su ključne za dobivanje željene strukture. Krom je potpuno otopljen u željezu (i željezo u kromu) iznad likvidus linije i ispod solidus linije pri povišenim temperaturama. Ako postotak kroma u čeliku iznosi manje od 12,7 %, snižavanjem temperature ispod 1394 °C pa do temperature od 912 °C, ferit (α -faza) transformira se u austenit (γ -faza). Ako postotak kroma u čeliku iznosi više od 12,7 %, struktura je feritna. Iznimke se javljaju pri nižim temperaturama. Tako se na primjer može vidjeti, ako postotak kroma u čeliku iznosi više od približno 20 %, snižavanjem temperature ispod 822 °C, dolazi do pojave sigma-faze (σ). Pošto je sigma-faza krhka i tvrda, ova pojava je nepoželjna. Još jedna nepoželjna pojava je nastanak alfa-prim-faze (α'), još nazvana i krhkost 475 °C. Alfa-prim-faza nastaje ako udio kroma u čeliku iznosi više od 14 %, a temperatura se snižava ispod 540 °C pa do 400 °C. Ovaj sustav je najvažniji za promatranje strukture feritnih nehrđajućih čelika jer Fe-Cr legure prvobitno kristaliziraju u ferit.

3.3. Fe-Cr-C sustav nehrđajućih čelika [11]

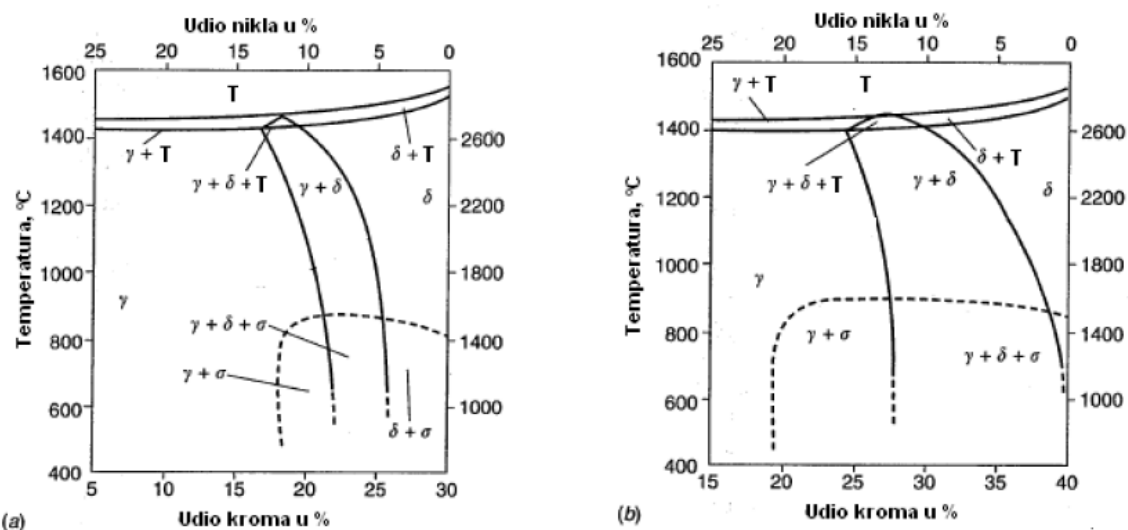


Slika 12. Pseudobinarni dijagram Fe-Cr-C sustava za 13 %Cr čelik (a) i 17 %Cr čelik (b) [11]

Slika 12. prikazuje pseudobinarne dijagrame Fe-Cr-C sustava. Lijevi dijagram prikazuje čelik s 13 % kroma, dok desni dijagram prikazuje čelik sa 17 % kroma. Kao što se može vidjeti iz slike, dodavanje ugljika čak i u malom udjelu znatno utječe na promjenu strukture čelika u smislu povećanja udjela austenitne faze. To se događa zbog toga što je ugljik jaki gamageni

element. Također, dolazi do stvaranja novih faza, karbida C_1 i C_2 . C_1 oznaka je za karbid $(Cr,Fe)_{23}C_6$, a C_2 je oznaka za karbid $(Cr,Fe)_7C$. Na desnom dijagramu može se primijetiti da, ako udio ugljika u čeliku iznosi preko 0,1 %, njegovim otvrdnućem stvara se feritno-austenitna struktura. Snižavanjem temperature ispod 1200 °C stvara se austenitna struktura koja se brzim hlađenjem može transformirati u martenzit te tako nastaju martenzitni nehrđajući čelici. Feritni nehrđajući čelici nastaju ako udio ugljika u čeliku iznosi manje od 0,1 %. Konačno, feritno-martenzitni čelici nastaju pri vrlo brzom ohlađivanju strukture koja u sebi osim ferita ima i određeni udio austenita. Na desnom dijagramu može se vidjeti da se povećanjem udjela kroma na 17 %, u čeliku širi područje ferita, a smanjuje područje austenita.

3.4. Fe-Cr-Ni sustav nehrđajućih čelika [11]



Slika 13. Pseudobinarni Fe-Cr-Ni dijagrami za čelik sa 70 % željeza (a) i 60 % željeza (b) [11]

Slika 13. prikazuje pseudobinarne dijagrame Fe-Cr-Ni sustava. Lijevi dijagram prikazuje čelik sa 70 % željeza, dok desni dijagram prikazuje čelik sa 60 % željeza. Kao što se može vidjeti iz slike, dodavanjem nikla promiče se austenitno područje. Dijagram ovog sustava najbitniji je za opisivanje strukture austenitnih nehrđajućih čelika te dupleks nehrđajućih čelika.

3.5. Osnovna sistematizacija nehrđajućih čelika prema mikrostrukturi

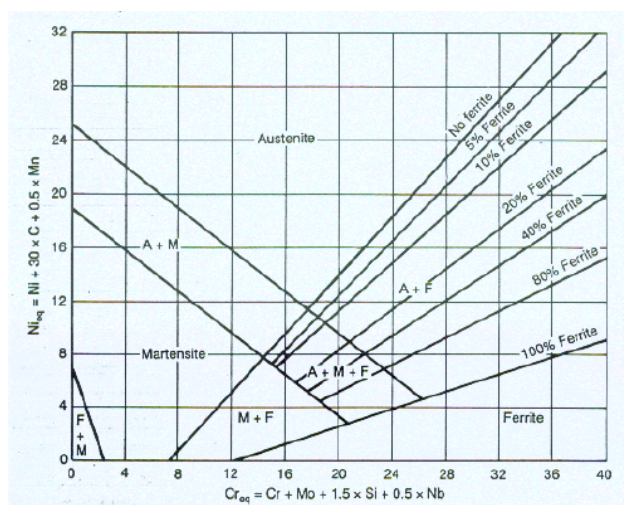
Tablica 1. Osnovna sistematizacija nehrđajućih čelika prema mikrostrukturi i sastavu [3]

Čelici Fe-Cr sustava	Čelici Cr-Ni, Cr-Ni-Mo i Cr-Mn sustava	Novije podskupine čelika
<ul style="list-style-type: none"> feritni čelici (<10 %C, od 15 do 18 %Cr) <ul style="list-style-type: none"> martenzitni i martenzitno-karbidni čelici (od 0,15 do 1,0 %C, od 13 do 18 %Cr) feritno-martenzitni čelici (od 0,1 do 0,15 %C, od 13 do 18 %Cr) 	<ul style="list-style-type: none"> austenitni čelici feritni čelici martenzitni čelici austenitno-feritni čelici ($\leq 10\%$ δ-ferita) martenzitno-feritni čelici austenitno-martenzitno-feritni čelici 	<ul style="list-style-type: none"> superferitni ELA (engl. Extra Low Additions) čelici austenitni ELC (engl. Extra Low Carbon) čelici austenitni dušikom legirani čelici Dupleks čelici (s >40 % ferita) Martenzitni niskouglični čelici

Na osnovi poznavanja kemijskog sastava čelika, određena mikrostruktura može se procijeniti pomoću Schaefflerovog dijagrama. Schaefflerov dijagram prikazan je na slici 14. Na apscisi dijagrama nalazi se vrijednost ekvivalentnog kroma Cr_{ekv} , dok se na ordinati nalazi vrijednost ekvivalentnog nikla Ni_{ekv} . Te dvije vrijednosti računaju se prema jednadžbama (1) i (2). [11]

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

$$Ni_{ekv} = \%Ni + \%Co + 30(\%C) + 25(\%N) + 0,5(\%Mn) + 0,3(\%Cu) \quad (2)$$



Slika 14. Schaefflerov dijagram [11]

3.5.1. Martenzitni nehrđajući čelici

Martenzitni nehrđajući čelici temelje se na Fe-Cr-C sustavu. Sadrže između 12 i 18 %Cr te između 0,15 i 1,2 %C. [11]

Kako bi nastala martenzitna struktura potrebna je alotropska transformacija austenita, do koje dolazi pri brzini hlađenja većoj od gornje kritične. Ovi čelici mogu se hladiti i na zraku jer je brzina hlađenja dovoljno velika kako bi se formirao martenzit. [2]

3.5.1.1. Osnovna svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika [2]

Iznos granice razvlačenja martenzitnih čelika može varirati od 275 N/mm² u žarenom stanju pa sve do 1900 N/mm², ovisno o načinu toplinske obrade. Također, ovisno o načinu toplinske obrade, može se postići visoka tvrdoća koja može iznositi do 60 HRC. Međutim, njihova otpornost na koroziju nije dobra kao kod ostalih nehrđajućih čelika zbog relativno niskog udjela kroma i nešto višeg udjela ugljika, u odnosu na druge nehrđajuće čelike. Najčešće se primjenjuju u atmosferskim uvjetima kada je potrebna visoka čvrstoća i korozijska postojanost. Neki od primjera primjene martenzitnih nehrđajućih čelika su parne i mlazne turbine, cjevovodi pare i velike hidroturbine. Još je važno napomenuti da su feromagnetični i da se ne koriste za rad pri temperaturama preko 650 °C, zbog slabljenja mehaničkih svojstava i korozijske postojanosti.

3.5.1.2. Supermartenzitni nehrđajući čelici [2]

Supermartenzitni nehrđajući čelici razvijeni su krajem 20. stoljeća kako bi zamijenili skupe austenitne i dupleks čelike, primarno za izgradnju podmorskih cjevovoda. Njihova svojstva slična su martenzitnim čelicima, ali imaju bolju zavarljivost. Imaju nizak udio ugljika, do 0,02 % te im se mogu dodavati nikal, dušik i molibden koji štiti površinu od sumporovodične kiseline. Također mogu sadržavati titanij radi stabiliziranja čelika stvaranjem titanijevih karbida i izbjegavanjem kromovih karbida.

Granica razvlačenja supermartenzitnih čelika kreće se u rasponu od 625 do 760 N/mm², vlačna čvrstoća od 830 do 900 N/mm², istezljivost od 18 do 25 % i tvrdoća do 30 HRC.

3.5.2. Feritni nehrđajući čelici

Feritni nehrđajući čelici temelje se na Fe-Cr-C sustavu. Feromagnetični su, imaju BCC kristalnu rešetku, sadrže do 0,1 %C, a mogu sadržavati od 10,5 do 30 %Cr.

S obzirom na udio kroma u strukturi, dijele se na:

- vrste s nižim udjelom kroma (od 10,5 do 14 %Cr)
- vrste sa srednjim udjelom kroma (od 14 do 18 %Cr)
- vrste s visokim udjelom kroma (od 18 do 30 %Cr).

Što je veći udio kroma imaju bolju korozijsku postojanost, ali postaju osjetljiviji na krhkost. Čelici s niskim udjelom kroma najčešće se primjenjuju u ispušnim sustavima automobila, dok čelici s većim udjelom kroma pronalaze primjenu u agresivnijim medijima. [10]

Tijekom godina napredovao je razvoj feritnih čelika ovisno o njihovoj strukturnoj kompoziciji. Prva generacija sadrži srednji maseni udio kroma i visok maseni udio ugljika te nema 100 %-tnu feritnu strukturu. Druga generacija razvijena je kako bi se smanjilo formiranje martenzita u feritnoj strukturi i povećala zavarljivost. Ova generacija sadrži manji udio ugljika te stabilizirajuće elemente poput niobija i tantala. Treća generacija sadrži visok maseni udio kroma, ugljika i niske udjele nečistoća. Ova generacija feritnih čelika ima odličnu otpornost na koroziju i osrednju žilavost. Zavarivanje ovih čelika treba se odvijati uz velike mjere opreza kako bi se spriječio rast zrna. [2]

3.5.2.1. Osnovna svojstva feritnih nehrđajućih čelika

Najčešći oblici korozije kod feritnih čelika su rupičasta, interkristalna i korozija u procjepu. Pravilnim odabirom čelika koji ima određenu zahtijevanu strukturu i kemijski sastav, sprječava se rupičasta i korozija u procjepu, dok je na interkristalnu koroziju puno teže utjecati. [10]

Zbog velikog udjela kroma ovi čelici osjetljivi su na pojavu krhkosti 475 °C, odnosno nastanak alfa-prim-faze koja snižava žilavost. Do nastanka alfa-prim-faze dolazi kod feritnih čelika sa srednjim i visokim udjelom ugljika. Upravo zbog toga ovi čelici su ograničeni na primjenu pri temperaturama do 400 °C. Osim krhkosti 475 °C, na žilavost ovih čelika negativno utječu formiranje sigma-faze i visokotemperaturna krhkost.

Sigma-faza formira se u Fe-Cr legurama koje sadrže od 20 do 70 %Cr kada su izložene temperaturama od 500 do 800 °C. Ova pojava vrlo negativno utječe na korozijsku postojanost te mehanička svojstva, ali ju je moguće otkloniti žarenjem pri temperaturi iznad 800 °C.

Visokotemperaturna krhkost rezultat je strukturnih promjena koje u čelicima nastaju pri zavarivanju. I ove strukturne promjene negativno utječe na korozijska svojstva, ali i na žilavost. Moguće ih je otkloniti žarenjem pri temperaturi od 730 do 790 °C. Ako čelik ima nizak udio kroma i ako je stabiliziran, neće doći do ove pojave.

U strukturi feritnih nehrđajućih čelika može pri određenim uvjetima hlađenja, doći do

stvaranja martenzitne faze. Martenzit može imati dobar i loš utjecaj na feritne čelike. Negativni utjecaji su pucanje uzrokovano vodikom tijekom zavarivanja te smanjenje žilavosti. Ovisno o udjelu ugljika, tvrdoća martenzita formirana u feritnom čeliku iznosi svega oko 30 HRC. Osim toga, martenzit loše djeluje na korozijsku postojanost feritnih čelika. [2]

3.5.2.2. Superferitni čelici [10]

Superferitni nehrđajući čelici imaju poboljšanu otpornost na pojavne oblike korozije koji se pojavljuju kod feritnih nehrđajućih čelika. Također imaju povećanu žilavost i granicu razvlačenja. Što se tiče njihovog kemijskog sastava, imaju manji udio ugljika i dušika te viši udio kroma i molibdena od feritnih čelika.

3.5.3. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici temelje se na Fe-Cr-Ni sustavu. Imaju FCC kristalnu rešetku i nisu magnetični. Sadrže od 16 do 26 %Cr, od 8 do 20 %Ni i do 2 %Mn. [10]

Ovi čelici predstavljaju najveću skupinu nehrđajućih čelika i u odnosu na ostale, proizvode se u najvećoj količini i najvećem broju vrsta. Uzrok tome su njihova dobra mehanička svojstva, jako dobra korozijska postojanost u većini medija, obradivost i široko temperaturno područje primjene. [2]

3.5.3.1. Osnovna svojstva austenitnih nehrđajućih čelika

Ovi čelici mogu se očvrstnuti samo hladnom deformacijom. Njihova vlačna čvrstoća iznosi od 205 do 275 N/mm², a granica razvlačenja iznosi minimalno 210 N/mm² pri sobnoj temperaturi. Na tvrdoću se ne može utjecati faznom transformacijom. Radne temperature mogu iznositi do 760 °C pa čak i više, ali čvrstoća i otpornost na oksidaciju postaju ograničeni pri tim temperaturama. Općenito se smatraju dobro zavarljivima, ali samo ako se slijede određene mjere opreza. Također imaju dobru duktilnost i žilavost te pokazuju dobru istežljivost od 40 do 60 %. Austenitni čelici najčešće pronalaze primjenu u arhitekturi, kuhinjskoj opremi i medicinskim proizvodima. [2]

Što se tiče korozijske postojanosti, potpuno su otporni na opću koroziju pri atmosferskim uvjetima, ali su osjetljivi na neke posebne oblike korozije.

Osjetljivi su na morsku vodu i druge klorom zasićene medije. U njima postaju osjetljivi na pucanje izazvano napetosnom korozijom. [10]

4. DUPLEKS NEHRĐAJUĆI ČELICI

Dupleks nehrđajući čelici temelje se na Fe-Cr-Ni sustavu. Dupleks čelici su skupina kod koje nije zadovoljen uvjet da nehrđajući čelici moraju imati monofaznu strukturu. Njihova struktura se sastoji od ferita (BCC kristalna rešetka) i austenita (FCC kristalna rešetka). Omjer austenitne i feritne faze najčešće je 50:50, ali može varirati ovisno o toplinskoj obradi. Sadrže od 21 do 33 % kroma, od 4 do 9 % nikla i do 4 % molibdena. [11]

Pronalaze primjenu kao zamjena za austenitne čelike kada postoji mogućnost pojave napetosne i rupičaste korozije. Smatraju se naprednijima od većine konstrukcijskih čelika. Zbog toga su široko rasprostranjeni u naftnoj i plinskoj industriji te se koriste za izgradnju cjevovoda za naftu i plin, ali i u mnogim drugim industrijama. [2]

Na slici 15. prikazan je primjer upotrebe dupleks čelika za izradu spremnika.



Slika 15. Spremnik za etanol od dupleks nehrđajućeg čelika [18]

4.1. Razvoj i podjela dupleks nehrđajućih čelika

Dupleks nehrđajući čelici prvi put su proizvedeni početkom 20. stoljeća. Tek 1970-ih godina, dodavanjem dušika, ovi čelici postaju čvršći, lakše zavarljivi i još više otporni na koroziju. [19]

Moderni dupleks čelici mogu se podijeliti u 4 glavne skupine, ovisno o otpornosti na rupičastu koroziju, za što se koristi izračun djelotvorne sume.

Formula za izračun djelotvorne sume (DS) prikazana je jednadžbom (3). [10]

$$DS = \%Cr + 3.3(\%Mo) + 16(\%N) \quad (3)$$

Prvu skupinu predstavljaju dupleks čelici bez molibdena, još se nazivaju i *lean* dupleks čelici. Ova skupina čelika ima i relativno nizak maseni udio nikla, a dodaju im se mangan i dušik kako bi se ostvario željeni omjer austenita i ferita. Ovi čelici najčešće se koriste za konstrukcijske potrebe te u okolinama koje zahtijevaju otpornost na klor. [18] Primjer je čelik Fe-23Cr-4Ni-0,1N. [11]

Drugu skupinu predstavljaju dupleks čelici s masenim udjelom kroma od 22 do 25 % i molibdena od 2 do 3 %, još se nazivaju i standardni dupleks čelici. Ovi čelici široko su rasprostranjeni u svim industrijskim sektorima. [18] Primjer je čelik Fe-22Cr-5,5Ni-3Mo-0,15N koji sadrži 22 % kroma, a još postoji i skupina čelika s 25 % kroma, kao na primjer čelik Fe-25Cr-5Ni-2,5Mo-0,17N-Cu. [11]

Treću skupinu predstavljaju super dupleks čelici čija djelotvorna suma iznosi između 40 i 45. [11] Ovi čelici imaju visoke masene udjele kroma, molibdena i nikla. Slični su super austenitnim čelicima sa 6 % molibdena zbog svoje otpornosti na štetno lokalno djelovanje klora. [18] Primjer je čelik Fe-25Cr-7Ni-3,5Mo-0,25N-W-Cu. [11]

Četvrtu skupinu predstavljaju hiper dupleks čelici čija djelotvorna suma iznosi iznad 45. Ovi čelici još su više legirani nego super dupleks čelici i proizvedeni su za izrazito agresivne kisele okoline te za okoline koje sadrže klor. Hiper dupleks čelici trenutno se koriste za izradu bešavnih cijevi zbog poteškoća pri toplinskoj obradi. [11]

4.2. Osnovna svojstva dupleks nehrđajućih čelika

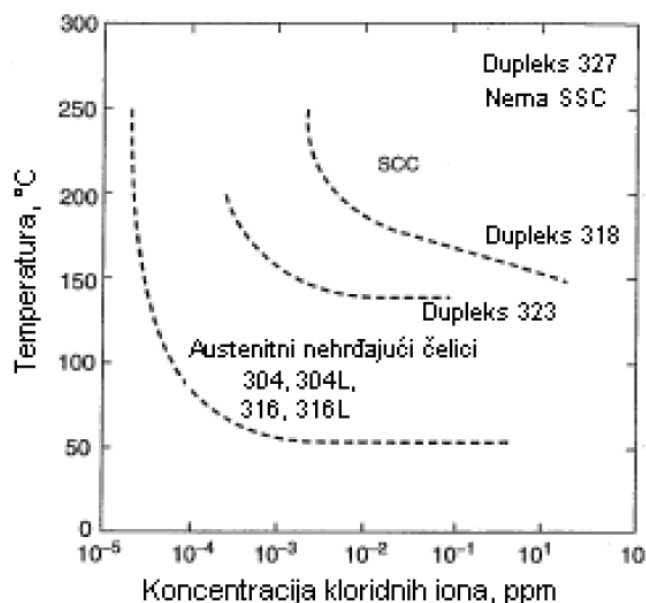
Proizvodnja dupleks čelika danas sve više raste te trenutno bilježi najveći porast u proizvodnji od svih nehrđajućih čelika. To se može pripisati njihovoj visokoj čvrstoći te iznadprosječnoj žilavosti. [10]

Što se mehaničkih svojstava dupleks čelika tiče, njihova tvrdoća iznosi od 250 do 350 HV. Mikrotvrdoća austenitne faze iznosi otprilike 300 HV_{0,2}, a feritne faze između 300 i 500 HV_{0,2}. Vlačna čvrstoća viša je od vlačne čvrstoće austenitnih čelika i iznosi od 700 do 1100 N/mm². Konvencionalna granica razvlačenja također je viša nego kod austenitnih čelika, od 500 do 800 N/mm². Imaju žilavost koja je između vrijednosti žilavosti feritnih i austenitnih čelika. Žilavost opada pri uporabi ispod -40 °C i to je minimalna temperatura njihove primjene, dok im je maksimalna radna temperatura 315 °C.

Također, kako sadrže velik udio ferita, dupleks čelici izrazito su magnetični.

Osim dobrih mehaničkih svojstava imaju i odličnu otpornost na koroziju, od čega se najviše ističe otpornost na napetosnu koroziju u kloridnoj okolini te otpornost na rupičastu koroziju. [11]

Na slici 16. prikazana je otpornost različitih nehrđajućih čelika na napetosnu koroziju. Na apscisi se nalazi koncentracija kloridnih iona izražena u ppm, a na ordinati se nalazi temperatura izražena u °C.



Slika 16. Otpornost nehrđajućih čelika na napetosnu koroziju [11]

4.3. Utjecaj legirnih elemenata na dupleks nehrđajuće čelike [20]

Glavni legirni elementi dupleks čelika su krom, nikal, molibden i dušik, a dodaju se još i volfram, bakar, silicij i mangan.

Glavna prednost dodavanja kroma, kao i kod svih nehrđajućih čelika, je stvaranje oksidnog filma koji pruža zaštitu od korozije.

Nikal se primarno dodaje kako bi održao ravnotežu između austenita i ferita. Pri prevelikom masenom udjelu nikla, dupleks čelik može sadržavati preko 50 % austenitne faze, pri čemu dolazi do pojačanog stvaranja intermetalnih faza. Također, velika koncentracija nikla ubrzava stvaranje štetne alfa-prim-faze.

Glavna uloga molibdena je smanjenje rupičaste korozije u otopinama koje sadrže klor. Također, pri dodavanju minimalno 3 % molibdena sprječava se korozija u procjepu u morskoj vodi, pri visokim temperaturama. Maksimalni maseni udio molibdena je 4 %, jer pri višem udjelu dolazi do pojačanog stvaranja sigma-faze.

Dušik ima nekoliko važnih učinaka na strukturu dupleks čelika. Dušik povećava otpornost na rupičastu koroziju, udio austenitne faze i čvrstoću. Ima sličan utjecaj na rupičastu koroziju kao molibden i krom. Najvažniji utjecaj je, kao i kod nikla, sprječavanje nastanka intermetalnih faza poput sigma-faze i chi-faze. Također povećava otpornost na koroziju u procjepu.

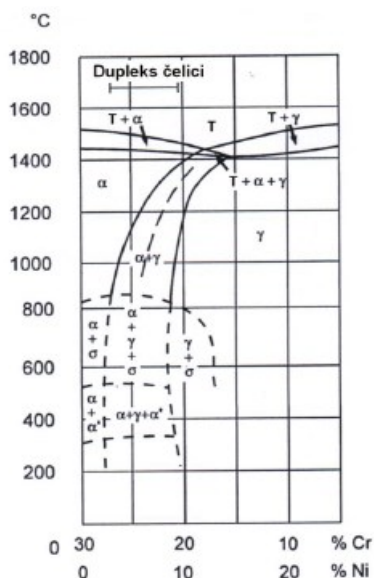
Volfram se dupleks čelicima dodaje zbog otpornosti na rupičastu i koroziju u procjepu. Maseni udio volframa u čeliku iznosi od 1 do 3 %. Poznato je da potiče stvaranje intermetalnih faza pri temperaturi od 700 do 1000 °C, ali ako se dodaje u navedenim količinama sprječava formiranje sigma-faze na granicama zrna.

Bakar također povišuje otpornost na koroziju u okolinama koje sadrže klor, a silicij otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama.

Mangan općenito stabilizira austenitnu fazu, ali kod dupleks čelika to ne mora biti slučaj. Nema puno utjecaja na faznu ravnotežu strukture dupleks čelika. Unatoč tome, koristi se za povećanje otpornosti na abraziju i vlačnih svojstava bez smanjenja duktilnosti.

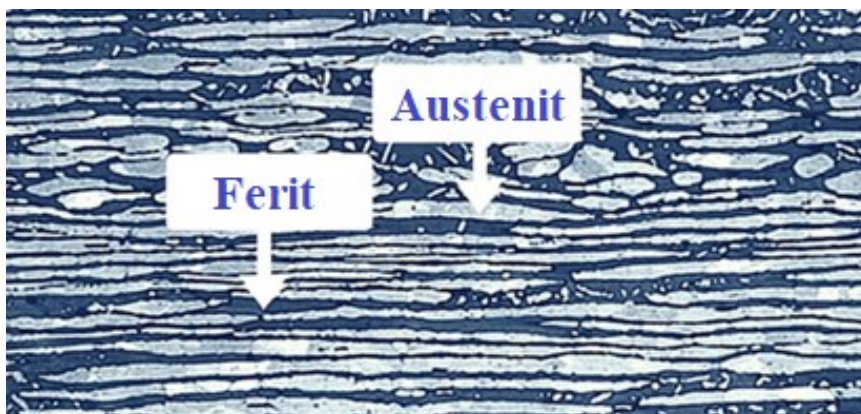
4.4. Toplinska obrada dupleks nehrđajućih čelika [11]

Toplinska obrada i postupak hlađenja imaju velik utjecaj na mikrostrukturu dupleks čelika. Slika 17. prikazuje dijagram stanja Cr-Ni-Fe za dupleks čelike s masenim udjelom željeza od 70 %.



Slika 17. Dijagram stanja Cr-Ni-Fe sustava [11]

Na slici 17. može se vidjeti da dupleks čelici primarno kristaliziraju u 100 %-tnu feritnu strukturu. Do stvaranja austenitne faze dolazi daljnjim hlađenjem čelika. Austenit prvo nastaje na granicama feritnih zrna, a zatim i unutar feritnih zrna. Tijekom ovog procesa gamageni legirni elementi poput nikla, dušika, ugljika i bakra otapaju se u austenitu, dok se alfgeni elementi poput molibdena, volframa i kroma otapaju u feritu. Brzina hlađenja ferita te legirni elementi utječu na udio austenita u čeliku. Pri temperaturi od 1050 do 1150 °C stvara se austenitno-feritna mikrostruktura s podjednakim udjelima ferita i austenita. Nakon toga slijedi gašenje u vodi kako bi se održalo ovo izbalansirano stanje mikrostrukture i spriječio nastanak štetnih faza. Na slici 18. prikazana je mikrostruktura dupleks čelika s omjerom feritne i austenitne faze od 50:50.



Slika 18. Mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika [21]

4.5. Štetni precipitati u mikrostrukturi dupleks nehrđajućih čelika

Štetne strukturne tvorevine koje se najčešće pojavljuju kod dupleks čelika su alfa-prim-faza, sekundarni austenit, chi-faza i sigma-faza. Rjeđe se pojavljuju karbidi i nitridi te neke druge faze: ϵ -faza, G-faza te π -faza. [20]

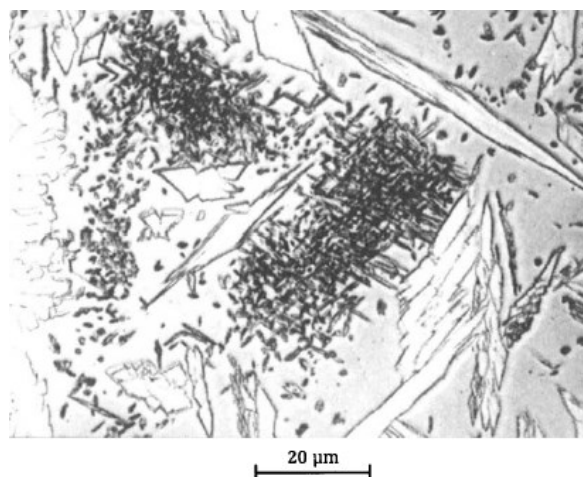
4.5.1. Alfa-prim-faza [11]

Alfa-prim-faza, već prethodno spomenuta, kod dupleks čelika javlja se pri temperaturi od 300 do 525 °C, kada je maseni udio kroma iznad 13 %. Ona je uzrok krhkosti 475 °C. Ima BCC kristalnu rešetku. Ova faza sadrži puno kroma, jako je sitna i nije magnetična. Povećava tvrdoću i negativno utječe na ostala mehanička svojstva.

4.5.2. Sekundarni austenit [20]

Sekundarni austenit može nastati brzo pod utjecajima različitih mehanizama, ovisno o temperaturi. Ispod temperature od 650 °C, faza sekundarnog austenita ima slična svojstva kao i okolni ferit.

Na slici 19. prikazana je mikrostruktura dupleks čelika sa sekundarnim austenitom u krupnim feritnim zrnima.



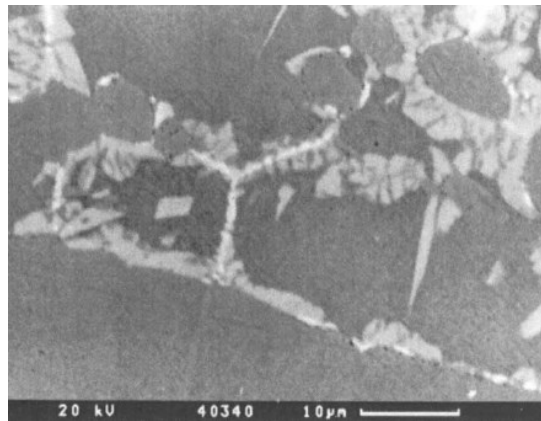
Slika 19. Mikrostruktura dupleks čelika sa fazom sekundarnog austenita [20]

4.5.3. Chi-faza [11]

Chi-faza se formira pri temperaturi od 730 do 1010 °C. Struktura kristalne rešetke ove faze je kompleksna kubična. Uvjet za stvaranje chi-faze je postojanje molibdena u kemijskom

sastavu dupleks čelika. Ova faza ima loš utjecaj na žilavost čelika.

Na slici 20. prikazana je mikrostruktura dupleks čelika sa chi-fazom. Sigma-faza je tamnija, dok je chi-faza svjetlija.

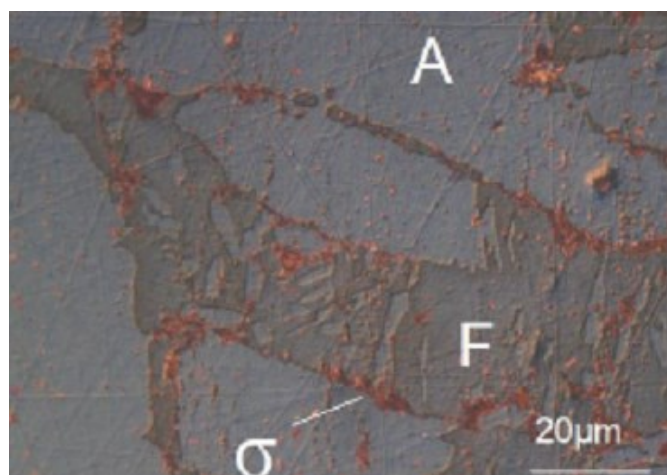


Slika 20. Mikrostruktura dupleks čelika sa chi-fazom [20]

4.5.4. Sigma-faza [11]

Sigma-faza sadrži veliku količinu kroma i molibdena. Ova faza javlja se kada je čelik duže vrijeme izložen temperaturi od 560 do 980 °C, pri čemu dolazi do eutektoidne pretvorbe ferita u austenit i sigma-fazu. Krhka je, tvrda i nemagnetična.

Na slici 21. prikazana je mikrostruktura dupleks čelika sa sigma-fazom koja se nalazi na granici zrna.



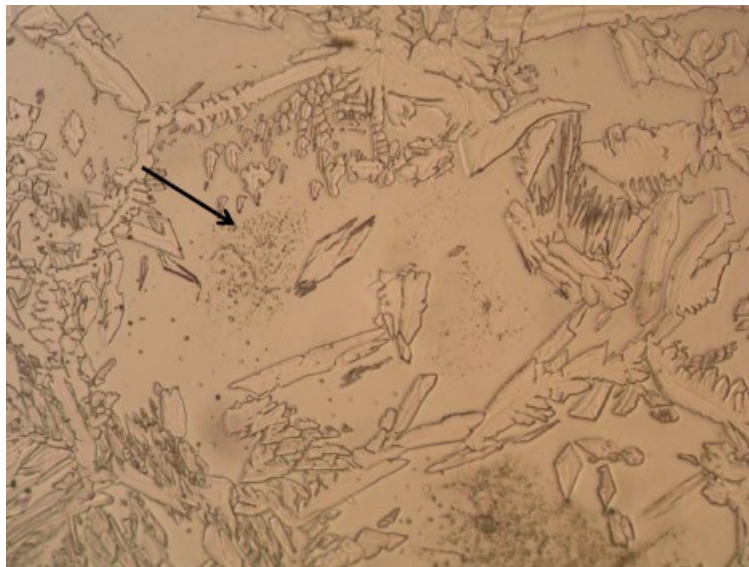
Slika 21. Mikrostruktura dupleks čelika sa sigma-fazom [11]

4.5.5. Karbidi i nitridi [11]

Zbog malog udjela ugljika u dupleks čelicima, mala je vjerojatnost da će u njima doći do nastanka karbida. Ako ipak nastanu, najčešće je to karbid tipa Cr_2C_6 . Može nastati ako je čelik duže vrijeme izložen temperaturi od 480 do 820 °C što se može dogoditi pri zavarivanju. Kada se stvori na granici između dva austenitna zrna, može doći do pojave interkristalne korozije.

Najčešća vrsta nitrida koja se pojavljuje kod dupleks čelika je nitrid tipa Cr_2N . Može nastati precipitacijom u krupnim feritnim zrnima, u zoni utjecaja topline, ako se čelik naglo hladi s temperature od približno 1200 °C. Nitridi negativno utječu na otpornost rupičastoj koroziji.

Na slici 22. prikazani su nitridi Cr_2N izlučeni u mikrostrukтури dupleks čelika.



Slika 22. Mikrostruktura dupleks čelika s izlučenim Cr_2N nitridima [10]

5. ZAVARIVANJE DUPLEKS NEHRĐAJUĆIH ČELIKA

Zavarivanje ima veliku ulogu u razvoju dupleks nehrđajućih čelika. Prve vrste dupleks čelika sadržavale su visoki maseni udio ugljika, što je pogodovalo stvaranju feritom bogate zone utjecaja topline. Ovi čelici bili su podložni koroziji. Poboljšanjem dupleks čelika smanjuje se udio ugljika, ali veliki omjer kroma i nikla utjecao je na preveliki postotak ferita. Razvojem 22 %-tnih Cr dupleks čelika, zahvaljujući njihovom uravnoteženom kemijskom sastavu uz dodatak dušika, smatralo se da je problem nastanka interkristalne korozije pri zavarivanju riješen. Međutim i kod ove vrste čelika moguće je stvaranje zavara s feritiziranom zonom utjecaja topline.

Današnje vrste dupleks čelika s većim masenim udjelom dušika imaju puno bolju zavarljivost. [20]

5.1. Postupci zavarivanja dupleks nehrđajućih čelika [20]

Svi uobičajeni postupci zavarivanja primjenjivi su i na dupleks čelicima. Najbolji rezultati zavarivanja postižu se:

- elektrolučnim zavarivanjem obloženom elektrodom (engl. shielded metal arc welding – SMAW)
- plinskim volframovim elektrolučnim zavarivanjem (engl. tungsten inert gas – TIG)
- elektrolučnim zavarivanjem taljivom žicom u zaštiti neutralnog plina (engl. metal inert gas – MIG)
- podvodnim zavarivanjem (engl. submerged-arc welding – SAW)
- zavarivanjem praškom punjenom žicom (engl. flux-cored arc welding – FCAW) i zavarivanjem plazmom (engl. plasma arc welding – PAW).

Osim ovih postupaka, za dupleks čelike za posebnu primjenu, koriste se još i procesi zavarivanja koje karakterizira jako visok ili nizak unos topline. Navedeni procesi su:

- otporno zavarivanje (engl. resistance welding – RW)
- lasersko zavarivanje (engl. laser welding – LW)
- zavarivanje elektronskim snopom (engl. electron beam welding – EBW)
- zavarivanje trenjem (engl. friction welding – FRW)
- elektrolučno zavarivanje troskom (engl. electroslag welding – ESW).

Dodatni materijal pri zavarivanju ima veći maseni udio nikla od osnovnog materijala.

Moderni postupci zavarivanja dupleks čelika mogu ispuniti visoke zahtjeve, ali pogreške pri zavarivanju mogu dovesti do neželjenih posljedica. Odabir postupka zavarivanja ovisi o debljini materijala, vrsti spoja te ostalim proizvodnim faktorima.

Trajanje hlađenja pri temperaturi od 1200 do 800 °C bitan je parametar za opisivanje efekta zavarivanja poput stvaranja intermetalnih faza. Vrijeme hlađenja primarno ovisi o energiji električnog luka izraženoj u kJ/mm. Za čelike s 22 % kroma, debljine od 10 do 15 mm, energija bi trebala iznositi od 0,5 do 2,5 kJ/mm. Super dupleks čelici trebali bi se zavarivati s lukom manje energije, do otprilike 1,7 kJ/mm.

Predgrijavanje čelika najčešće nije potrebno, ali može biti poželjno kako bi se izbjegla kondenzacija.

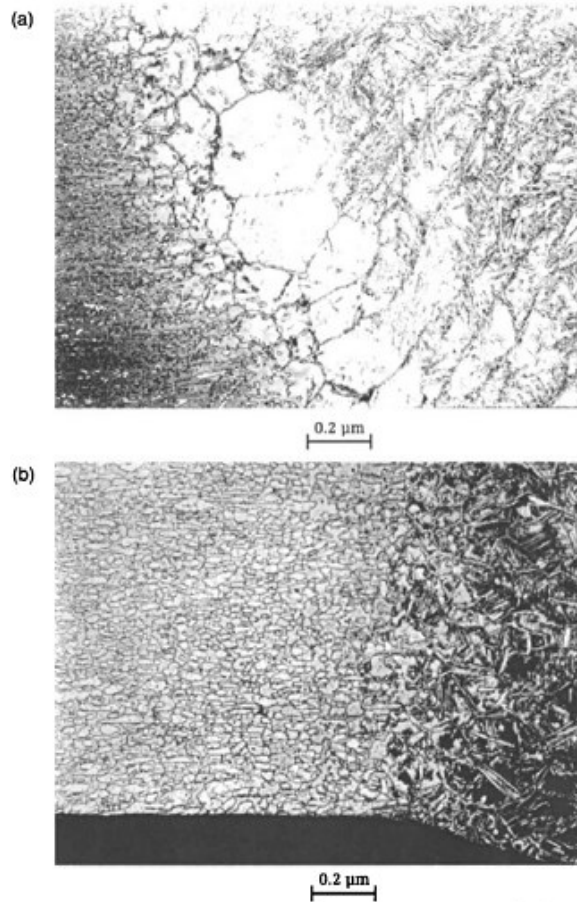
Nakon zavarivanja, dupleks čelici trebaju se ispravno očistiti. Postoji mehanička i kemijska metoda čišćenja. Također, nakon zavarivanja najčešće nije potrebno žarenje, ukoliko su se pravilno slijedile sve mjere i koraci.

Što se tiče popravaka zavara dupleks čelika, potrebna je izrazita mjera opreza, pošto proces popravaka uvodi novi ciklus grijanja i hlađenja. Zbog toga je preporučeno da se za popravak zavara provede proces s relativno malim unosom topline. Isto tako, skidanje viška zavara treba izbjegavati.

5.2. Zona utjecaja topline [20]

Visokotemperaturna zona utjecaja topline je zona uz liniju staljivanja u kojoj se temperatura približava točki tališta i koja zbog toga može postati skoro potpuno feritna. Niskotemperaturna zona utjecaja topline je zona koja graniči s nepromijenjenim osnovnim materijalom i u kojoj je fazna ravnoteža pri zavarivanju minimalno narušena.

Na slici 23. prikazane su dvije zone utjecaja topline zavarenih dupleks čelika. Slika 23. pod (a) prikazuje zavareni spoj s vrlo širokom zonom utjecaja topline. U ovom čeliku je maseni udio dušika dosta nizak i to je razlog široke zone utjecaja topline s povećanim udjelom ferita. Na istoj slici pod (b) prikazan je zavareni spoj čelika s relativno visokim udjelom dušika i vrlo uskom zonom utjecaja topline.

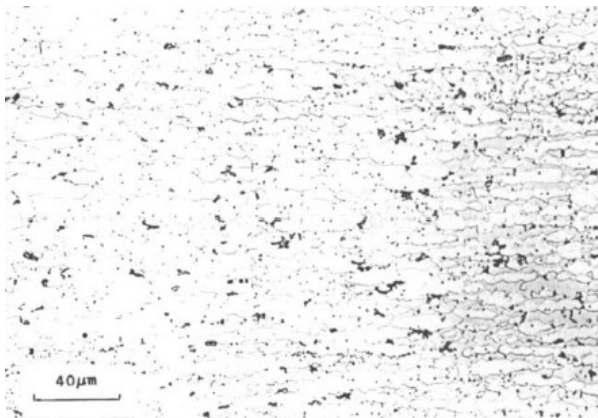


Slika 23. Mikrostruktura zone utjecaja topline dvaju različitih dupleks čelika [20]

Visokotemperaturna zona utjecaja topline regulira se sastavom čelika i postupkom zavarivanja. Mikrostruktura visokotemperaturne zone utjecaja topline s određenim sastavom najviše ovisi o količini unesene topline, predgrijavanju i debljini materijala.

Niskotemperaturna zona utjecaja topline udaljena je od granice staljivanja. U ovoj zoni može doći do stvaranja intermetalnih faza, što je najčešće kod super dupleks čelika.

Slika 24. prikazuje mikrostrukturu niskotemperaturne zone utjecaja topline super dupleks čelika s formiranom sigma-fazom.



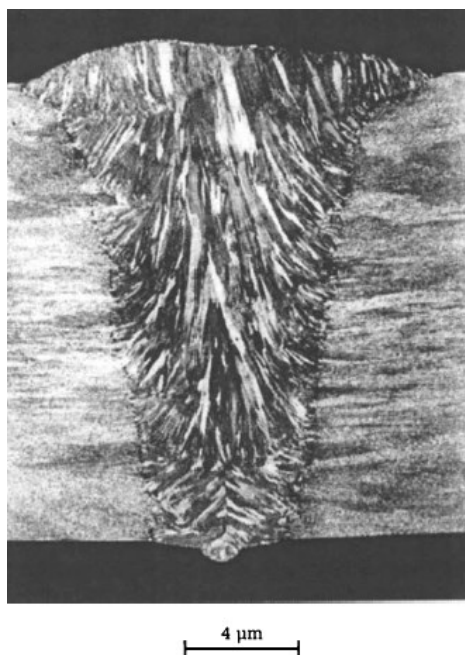
Slika 24. Mikrostruktura niskotemperaturnog ZUT-a s prisutnom sigma-fazom [20]

Parametri zavarivanja trebaju biti kontrolirani kako bi se osiguralo jednoliko i dovoljno sporo hlađenje visokotemperaturne zone utjecaja topline i formirala željena austenitna faza. Isto tako, hlađenje niskotemperaturne zone utjecaja topline mora biti dovoljno brzo kako bi se izbjeglo formiranje štetnih precipitata. Poželjna vremena hlađenja su od 8 do 30 sekundi za hlađenje sa 800 na 500 °C i od 4 do 15 sekundi za hlađenje sa 1200 na 800 °C. Poželjno vrijeme hlađenja opisuje se i brzinom hlađenja od 20 do 50 °C/s .

5.3. Metal zavara [20]

Metal zavara mikrostrukturno se razlikuje od osnovnog materijala i zone utjecaja topline čelika. Glavni uzrok tome je varijacija u kemijskom sastavu te ukupna toplinska povijest zavara. Dodatni materijali osiguravaju veći udio austenitne faze u metalu zavara nego što je sadrži osnovni materijal. Zbog toga sadrže 2 do 4 % više udjela nikla nego što ga ima osnovni materijal. Pri skrućivanju ferita dolazi do rasta zrna u području visokotemperaturne zone utjecaja topline. Veličina i orijentacija feritnog zrna utječu na svojstva metala kao što je na primjer žilavost.

Slika 25. prikazuje vrlo specifičnu mikrostrukturu višeprolaznog metala zavara dupleks čelika.



Slika 25. Višeprolazni metal zavora dupleks čelika [20]

Precipitacija austenita je proces difuzijski regulirane nukleacije i rasta. Također ovisi o sastavu metala zavora te o brzini hlađenja. Sporijim hlađenjem dobiva se struktura s više austenita, a bržim hlađenjem s manje austenita.

Postoje dvije metode određivanja udjela ferita u metalu zavora i osnovnom materijalu. Prva metoda zahtjeva metalografsku analizu zavora koja uključuje mehaničku pripremu (brušenje i poliranje) te nagrizanje. Nakon nagrizanja može se razlučiti feritna od austenitne faze te se može odrediti njihov volumni udio točkastom ili linijskom metodom. Prednost ove metode je to što se može primijeniti na cijelu mikrostrukturu, uključujući i zonu utjecaja topline. Nedostatak je to što je skupa i spora. Druga metoda temelji se na razlici magnetskih svojstava faza. Feritna faza je feromagnetna, a austenitna nije. Određuje se takozvani feritni broj (engl. ferrite number – FN) ovisno o jačini magnetskog djelovanja. Prednost ove metode je to što se koriste prijenosni instrumenti, a metoda je nerazorna. Nedostatak je to što postoji mogućnost dobivanja nepreciznih rezultata.

Termičkom obradom ili naknadnom termičkom obradom nakon zavarivanja, može doći do promjena u mikrostrukturi materijala. Najčešće dolazi do nastanka sekundarnog austenita. Isto tako u metalu zavora može doći do nastanka prethodno opisanih faza kao što su sigma-faza, chi-faza, R-faza i π -faza. Osim nastanka štetnih faza može doći i do nastanka poroznosti ako je maseni udio dušika u zavaru prevelik.

5.4. Nastanak pukotina u strukturi zavarenog spoja [20]

Dupleks nehrđajući čelici otporniji su od austenitnih čelika na nastanak toplih pukotina koje nastaju pri skrućivanju rastaljenog metala zavara. Isto tako imaju dobru otpornost na pucanje i oštećenja izazvana vodikom. Ako se ne poduzmu određene mjere opreza može doći do pojave oba tipa pukotina (toplih pukotina i pukotina izazvanih vodikom).

Slika 26. prikazuje primjer tople pukotine u metalu zavara (solidifikacijske pukotine) zavarenog spoja dupleks čelika. Iako su dupleks čelici najčešće otporni na ovaj tip pukotina, ipak može doći do nastanka istih.

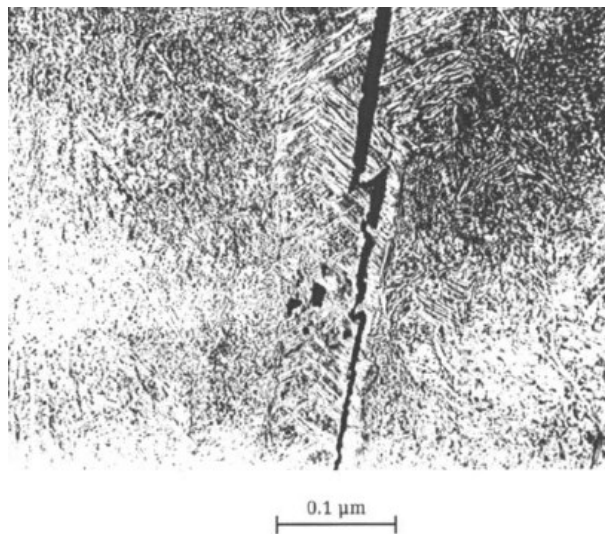


Slika 26. Topla pukotina u metalu zavara zavarenog spoja dupleks čelika [20]

I u zoni utjecaja topline kod dupleks čelika može doći do nastanka toplih pukotina (likvacijske pukotine). Dupleks čelici podložni su ovom tipu pukotina slično kao i austenitni čelici s malim udjelom ferita. Iz toga se može zaključiti da dupleks čelici imaju dobru otpornost na likvacijsko pucanje.

Pucanje inducirano vodikom još je jedna vrsta pukotina, koje su izazvane apsorbiranim vodikom. Do apsorpcije vodika dolazi onečišćenjem zavarenog spoja uz prisutnost materijala iz prevlake elektrode ili dodavanjem vodika u zaštitni plin za zavarivanje. Visoki udio vodika može se efektivno smanjiti zagrijavanjem elektroda za zavarivanje na dovoljno visokim temperaturama. Difuzija vodika u feritu je puno brža nego u austenitu, a topljivost vodika u austenitu je 30 puta veća nego u feritu.

Na slici 27. prikazana je pukotina inducirana vodikom.



Slika 27. Pukotina izazvana vodikom [20]

5.5. Tvrdoća nakon zavarivanja [20]

Tvrdoća u području zavara dupleks čelika najčešće je veća od tvrdoće materijala prije zavarivanja zbog deformacija uzrokovanih ciklusom grijanja i hlađenja. Do povećanja tvrdoće dolazi u metalu zavara i zoni utjecaja topline, a najviše je naglašeno u korijenu zavara.

Za ispitivanje tvrdoće najčešće se odabire Vickersova metoda tijekom koje se koristi četverostrana dijamantna piramida uz opterećenja manja od 1,962 N. Na taj način se može puno preciznije odrediti tvrdoća u karakterističnim područjima zavarenog spoja (osnovni materijal, ZUT i metal zavara).

6. EKSPERIMENTALNI DIO

6.1. Cilj rada i provođenje ispitivanja

Cilj ovog rada je karakterizacija zavarenog spoja na cijevi od dupleks nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMoN 25-7-4 (1.4410). U tu svrhu, provedena su sljedeća ispitivanja:

- priprema ispitnog uzorka (izrezivanje, brušenje, poliranje i nagrizanje)
- analiza makrostrukture i mikrostrukture
- mjerenje mikrotvrdoće HV0,2.

Analiza mikrostrukture i mjerenje mikrotvrdoće provedeno je u osnovnom materijalu, metalu zavara i zoni utjecaja topline. Na temelju dobivenih rezultata, doneseni su odgovarajući zaključci o kvaliteti zavarenog spoja.

6.2. Materijal za ispitivanje

Ispitivanje je provedeno na uzorku zavarenog spoja cijevi promjera 26,5 mm te debljine stijenke od 2,7 mm.

Uzorak je izrezan iz cijevi od dupleks nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMoN 25-7-4, koja je prikazana na slici 28.



Slika 28. Zavarena cijev čelika X2CrNiMoN 25-7-4

Mehanička svojstva cijevi zajamčena od strane proizvođača:

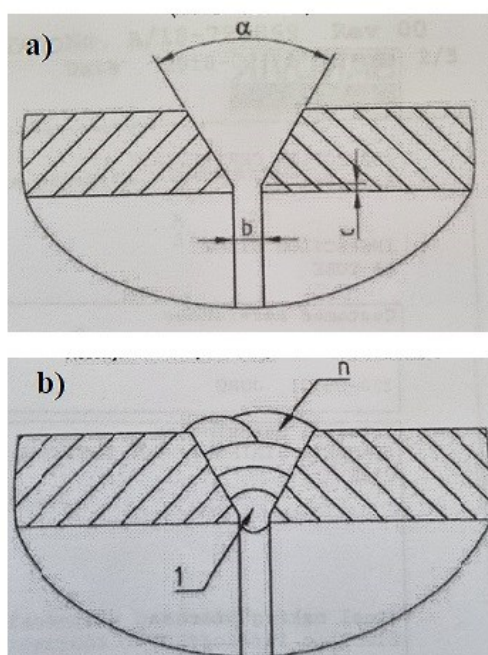
- vlačna čvrstoća, $R_m = 871 \text{ N/mm}^2$
- konvencionalna granica razvlačenja, $R_{p0,2} = 661 \text{ N/mm}^2$
- istezljivost, $A = 37 \%$
- tvrdoća izmjerena Rockwell metodom = 26-28 HRC

Postupak zavarivanja cijevi bio je ručni TIG postupak, odnosno zavarivanje u neutralnom zaštitnom plinu ili neutralnoj smjesi plinova, pomoću netaljive volframove elektrode, prema normi HRN EN ISO 4063, 141. [22]

Zavarivanje se odvijalo u horizontalno-vertikalnom (zidnom) položaju (PH/PC), a izvedba spoja je sučeljeni Y spoj, oznake BW prema normi HRN EN ISO 9692-1. [23]

Kao dodatni materijal korištena je volframova žica oznake W 25 9 4 NL.

Na slici 29. shematski je prikazana izvedba oblika zavarenog spoja (a) i redosljed zavarivanja (b). Veličine označene na slici iznose: $\alpha = 60-75^\circ$, $b=2-4$ mm, $c=0-1$ mm.



Slika 29. Shematski prikaz izvedbe spoja (a) i redosljed zavarivanja (b)

U tablici 2. prikazan je kemijski sastav čelika oznake X2CrNiMoN 25-7-4 zajamčen od strane proizvođača, a u tablici 3. prikazan je kemijski sastav dodatnog materijala korištenog pri zavarivanju.

Tablica 2. Kemijski sastav ispitivanog čelika

Maseni udio elemenata, %										
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	N	Fe
0,016	0,27	0,39	0,021	<0,0005	25,36	6,44	0,14	3,88	0,301	ostatak

Tablica 3. Kemijski sastav dodatnog materijala

Maseni udio elemenata, %										
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	W
0,01	0,4	0,4	0,01	<0,01	25,1	9,4	3,9	0,1	0,25	<0,1

6.3. Priprema uzorka

6.3.1. Izrezivanje uzorka

Izrezivanje uzorka prvi je provedeni dio postupka pripreme uzorka. Cijev je izrezana na tračnoj pili u Laboratoriju za zavarivanje na Zavodu za zavarene konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Kako ne bi došlo do promjena u mikrostrukтури koje su izazvane povišenjem temperature tijekom rezanja, korišteno je tekuće sredstvo za hlađenje i podmazivanje. Cijev je prvo skraćena s obje strane kako bi se dobio manji komad. Nakon toga je iz skraćene cijevi izrezan uzorak, prethodno markerom označenog oblika. Izrezan je tako da zavar bude netaknut, a lijevo i desno od zavara ostane podjednaka širina osnovnog materijala. Izrezani uzorak je potom očišćen vodom.

Na slici 30. prikazan je postupak rezanja cijevi tračnom pilom, a na slici 31. prikazan je izrezani uzorak zavarenog spoja. Ovako izrezani uzorak spreman je za daljnju mehaničku pripremu, kako bi se dobila ravna, glatka i sjajna površina, potrebna za kvalitetnu analizu mikrostrukture.



Slika 30. Postupak rezanja cijevi tračnom pilom



Slika 31. Izrezani uzorak zavarenog spoja cijevi

6.3.2. Brušenje uzorka

Brušenje je obavljeno u Laboratoriju za materijalografiju Zavoda za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Zbog oblika i veličine izrezanog uzorka zavarenog spoja, nije bilo moguće zaliti uzorak u polimernu masu pa je daljnja priprema, brušenje i poliranje, bila malo kompliciranija.



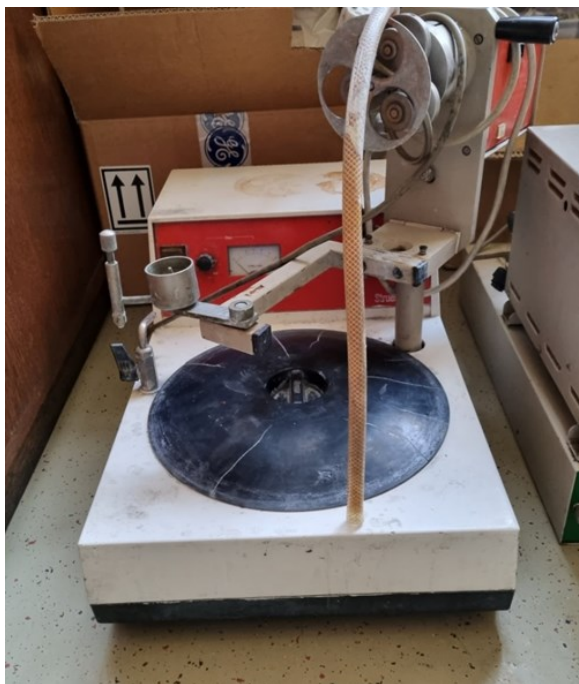
Slika 32. Uređaj Mintech 233.

Uloga brušenja je čišćenje uzorka od mogućih nečistoća ili deformacija nastalih pri rezanju. Brušenje je obavljeno na uređaju Mintech 233, prikazanom na slici 32. Brusilo se ručno, držanjem uzorka na brusnom papiru, u pet koraka. Brusni papir nalazio se na ploči uređaja, te se rotirao brzinom od 300 okretaja/minuti. Tijekom brušenja, kontaktna površina između brusnog papira i uzorka hlađena je vodom kako bi se spriječilo zagrijavanje uzorka. Istodobno voda za hlađenje odnosi abradirane čestice koje bi inače mogle oštetiti brušenu površinu. Za svaki korak brušenja koristio se drukčiji brusni papir, na početku najgrublji, a u svakom idućem koraku sve finiji. Redom su korišteni brusni papiri s oznakama P320, P600, P1200, P2400, P4000.

6.3.3. Poliranje uzorka

Poliranje se provodi kako bi se eliminirali tragovi nastali brušenjem i kako bi se dobila što kvalitetnija površina za kvalitativnu i kvantitativnu analizu mikrostrukture.

Za poliranje je korišten uređaj Struers Pedemin DAP-7, prikazan na slici 33.

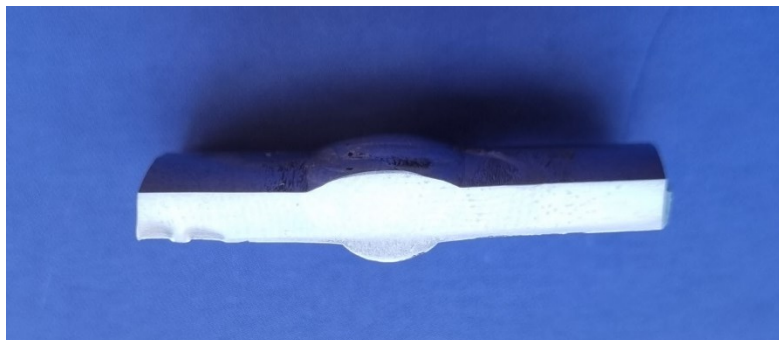


Slika 33. Uređaj Struers Pedemin DAP-7

Poliranje se odvijalo u dva koraka, pri brzini okretanja rotirajuće ploče od 150 okretaja u minuti. Za razliku od brušenja, za podmazivanje i hlađenje se ne koristi voda, već lubrikant, a umjesto brusnog papira, koristi se fina tkanina za poliranje na koju se nanosi jako fini abraziv. U prvom koraku kao abraziv korištena je dijamantna pasta sa zrnima veličine 3 μm , a u drugom koraku finija dijamantna pasta s abrazivnim zrnima veličine 0,03 μm .

Nakon poliranja, površina uzorka promatra se pod svjetlosnim mikroskopom kako bi se vidjele pogreške i nepravilnosti u zavarenom spoju, osobito one koje se lakše mogu uočiti u poliranom, nego u nagriženom stanju.

Na slici 34. prikazan je uzorak zavarenog spoja nakon poliranja.



Slika 34. Uzorak zavarenog spoja nakon poliranja.

6.3.4. Nagrizanje uzorka

Nakon poliranja i promatranja površine uzorka u poliranom stanju, površina uzorka je nagrizona kako bi se mogla kvalitetno vidjeti mikrostruktura.

Postupak nagrizanja odvijao se elektrokemijski, u 10 %-tnoj otopini oksalne kiseline. Kroz punjač napona 12 V, teče struja 10 A. Iz punjača izlaze dvije žice od kojih jedna ide u metalni držač u kojem se nalazi uzorak. Metalni držač uranja se s uzorkom u oksalnu otopinu te se zatim pusti struja i počinje nagrizanje. Otopina oksalne kiseline nagriza granice zrna i one postaju jasno vidljive. Minimalno nagriza i feritna zrna pa ona postaju za nijansu tamnija od austenitnih. Uzorak se u otopini drži jednu minutu, zatim se vadi i ispiru vodom.

Nakon što je nagrizanje obavljeno, uzorak je spreman za analizu na svjetlosnom mikroskopu.

6.4. Analiza makrostrukture zavarenog spoja

Na slici 35. može se vidjeti makrostruktura zavarenog spoja. Geometrija zavara je pravilna, nema nikakvih šupljina, toplih pukotina niti drugih nepravilnosti. Prolazi nisu vidljivi zbog načina nagrizanja, ali je linija staljivanja jasno izražena.



Slika 35. Makrostruktura zavarenog spoja

6.5. Analiza mikrostrukture zavarenog spoja

Mikrostruktura ispitnog uzorka promatrana je pomoću svjetlosnog mikroskopa Olympus GX51 pri povećanjima od 50 do 100×. Na mikroskopu se nalazi kamera spojena s računalom, pomoću koje se snimala mikrostruktura pri različitim povećanjima.

Na slici 36. prikazan je mikroskop Olympus GX51.



Slika 36. Mikroskop Olympus GX51

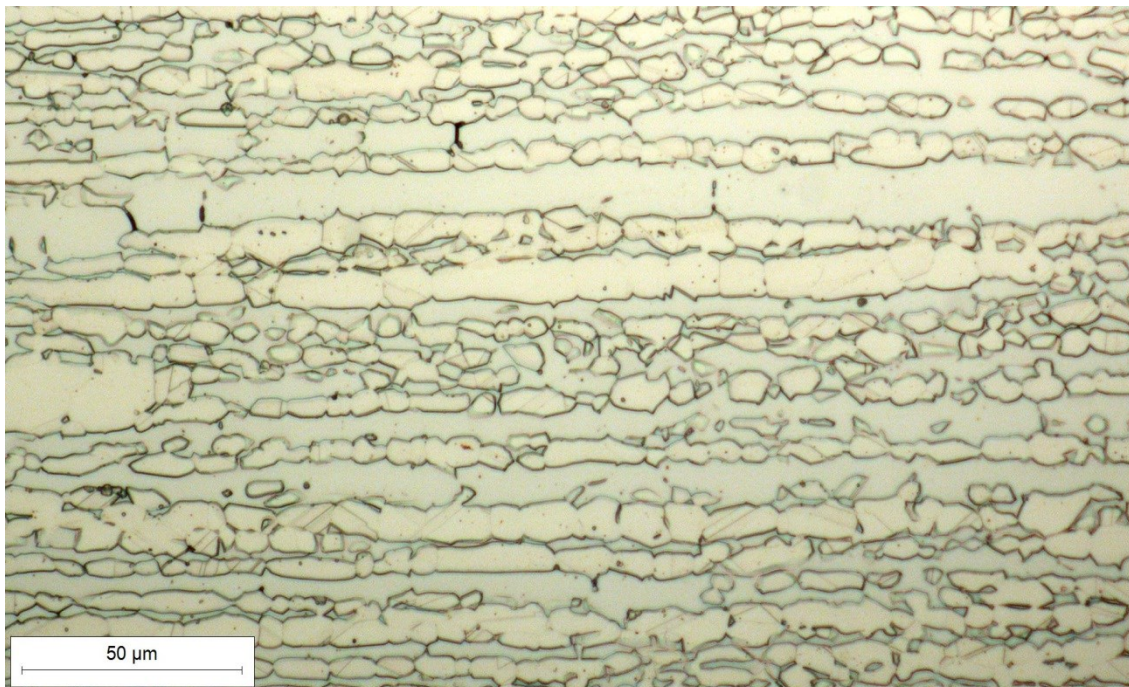
Površina uzorka zavarenog spoja promatrana je u poliranom i nagriženom stanju. U poliranom stanju nisu uočene nikakve nepravilnosti u mikrostrukturi pa fotografije polirane površine nisu uvrštene u rad. U nagriženom stanju promatrana je mikrostruktura osnovnog materijala odnosno stijenske cijevi, zona utjecaja topline i metal zavara.

Na fotografijama koje slijede prikazana je mikrostruktura navedenih područja snimljena pri povećanjima od 100, 200 i 500×.

6.5.1. Analiza mikrostrukture osnovnog materijala



Slika 37. Mikrostruktura osnovnog materijala snimljena pri povećanju 200×



Slika 38. Mikrostruktura osnovnog materijala snimljena pri povećanju 500×

Na slikama 37. i 38. prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala snimljena pri povećanju 200×, odnosno 500×. Mikrostruktura se sastoji od austenita (svjetlija faza) i ferita (tamnija faza) u podjednakim udjelima. Mikrostruktura osnovnog materijala je izrazito ugnječena.

6.5.2. Analiza mikrostrukture zone utjecaja topline

Mikrostruktura dupleks čelika u zoni utjecaja topline razlikuje se od osnovnog materijala zbog velikog unosa topline pri zavarivanju cijevi. Narušena je izbalansirana mikrostruktura sastavljena od ferita i austenita u podjednakim omjerima. Znatno se povisio udio ferita, a kristalna zrna ferita puno su krupnija od onih u osnovnom materijalu. Kristalna zrna austenita locirana su po granicama krupnih feritnih zrna. Mjestimice su, u krupnim feritnim zrnima, izlučene sitne nakupine koje mogu biti sekundarni austenit ili kromovi nitridi. Zona utjecaja topline relativno je široka, a linija staljivanja nije jasno izražena.

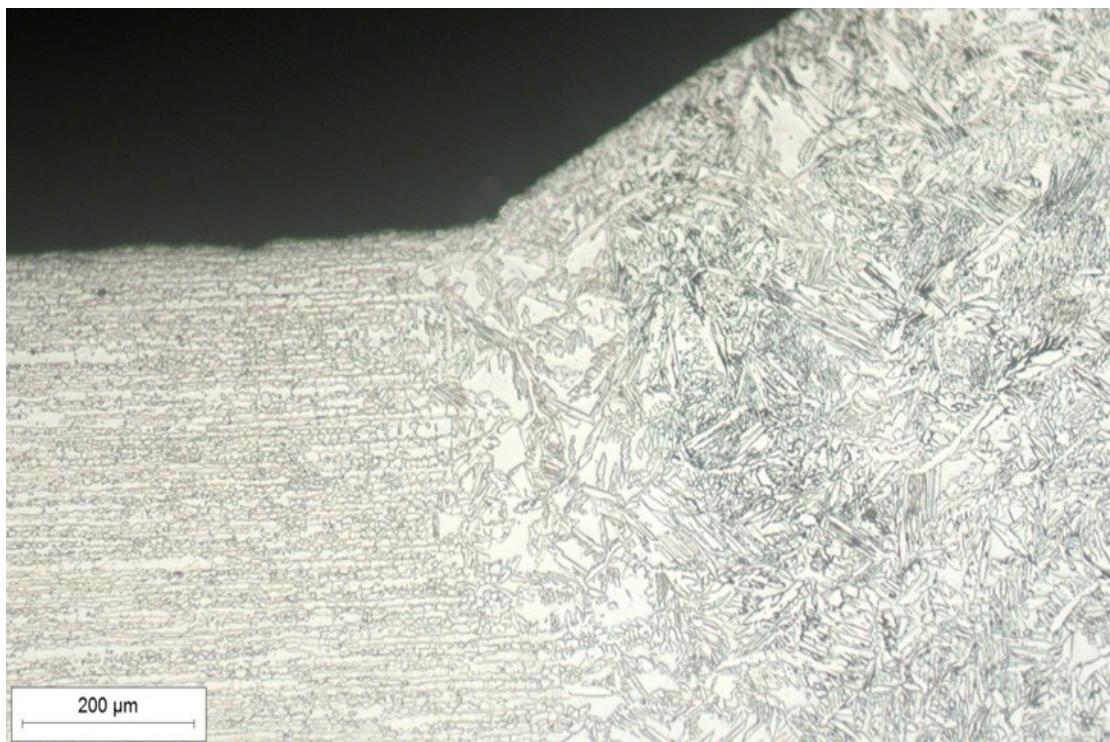
Na fotografijama koje slijede prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline u tjemenu, sredini i korijenu zavora, snimljena pri povećanju od 100×.

Na slikama 39. i 40. prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline u tjemenu zavora, s lijeve i desne strane zavora.

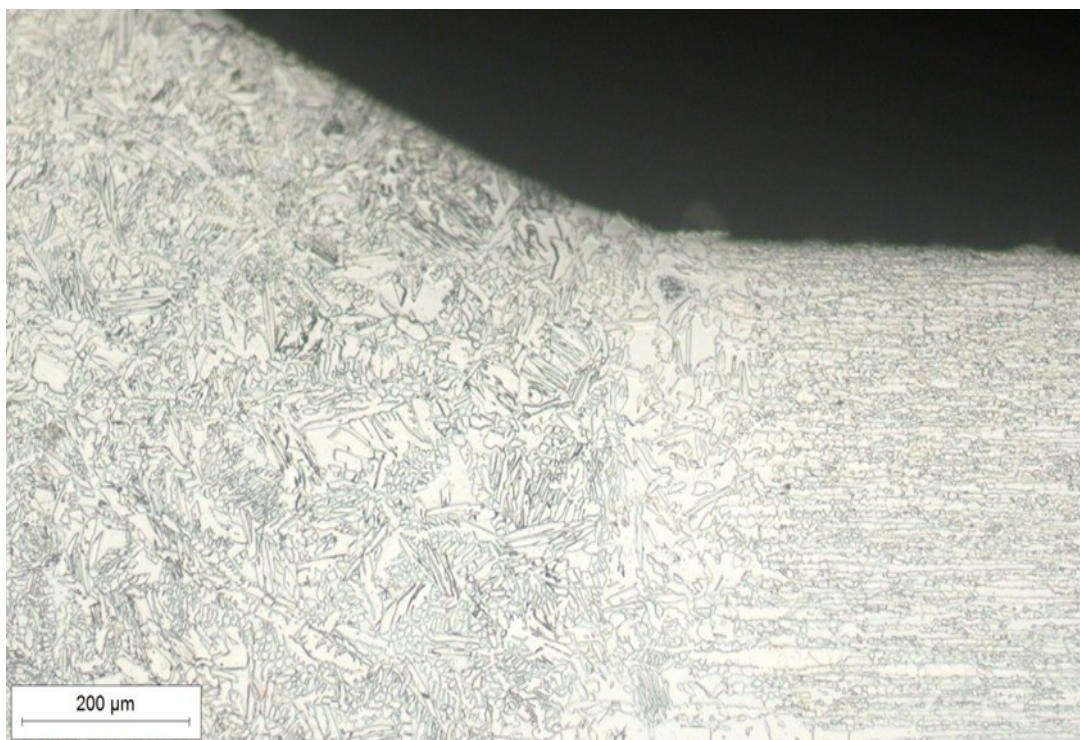
Na slikama 41. i 42. prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline u sredini zavora, s lijeve i desne strane zavora.

Na slikama 43. i 44. prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline u korijenu zavora, s lijeve i desne strane zavora.

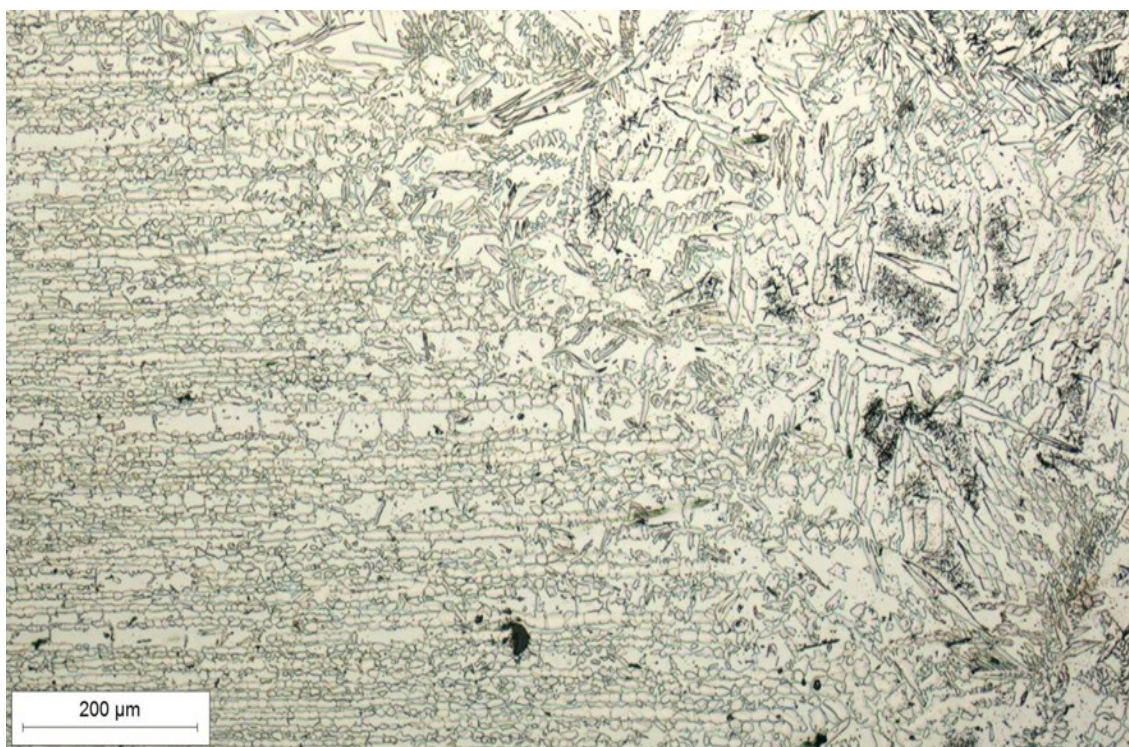
Na slici 45. prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline u sredini zavora snimljena pri povećanju 200×. Na ovoj slici se jasno vide velika feritna zrna, a u nekima od njih vide se sekundarni austenit i nitridi.



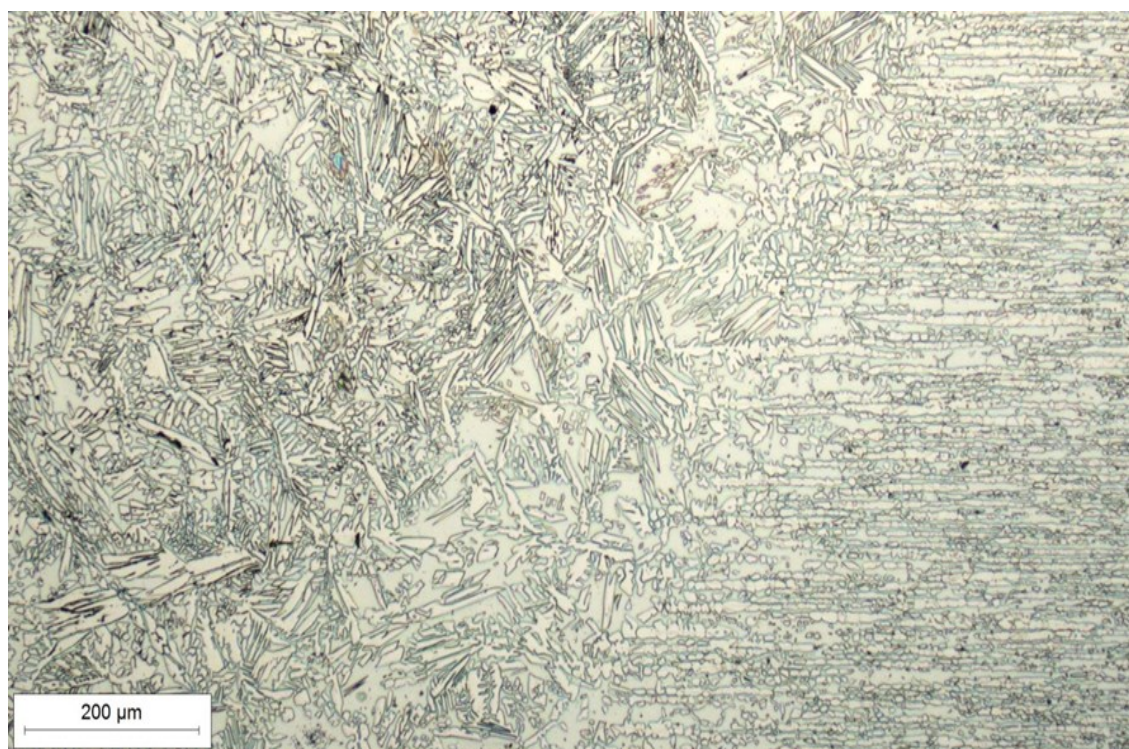
Slika 39. Mikrostruktura ZUT-a, lijevo, u tjemenu zavara, snimljena pri povećanju 100×



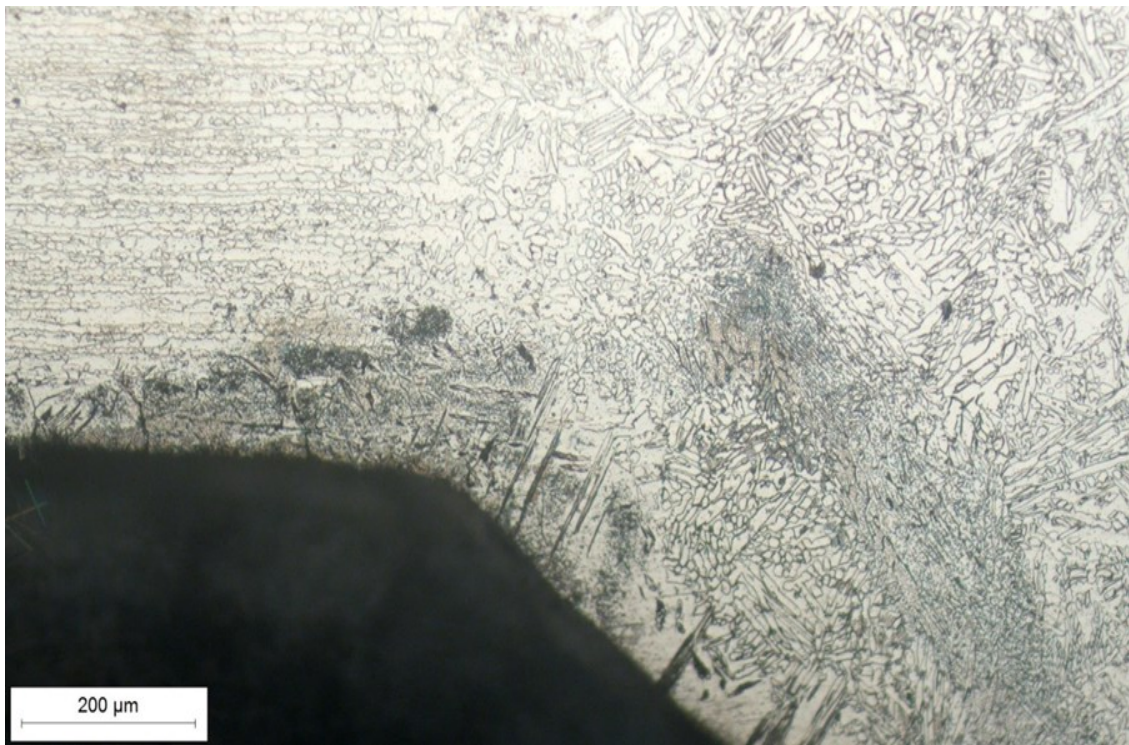
Slika 40. Mikrostruktura ZUT-a, desno, u tjemenu zavara, snimljena pri povećanju 100×



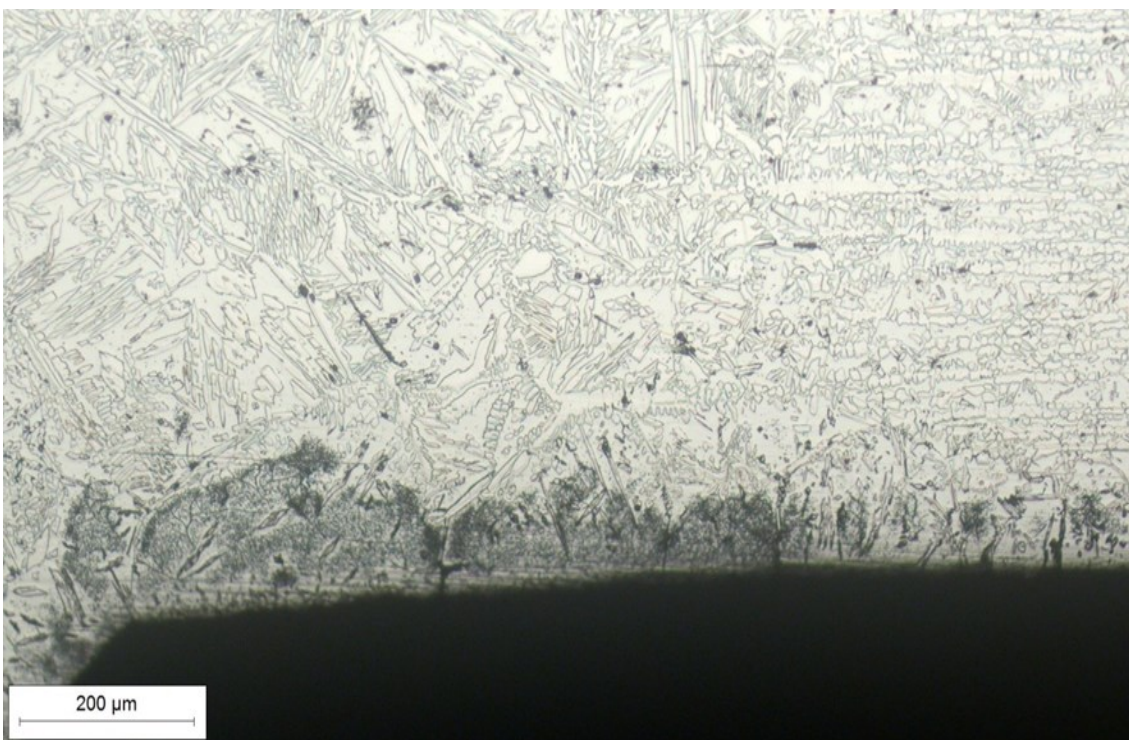
Slika 41. Mikrostruktura ZUT-a, lijevo, u sredini zavara, snimljena pri povećanju 100×



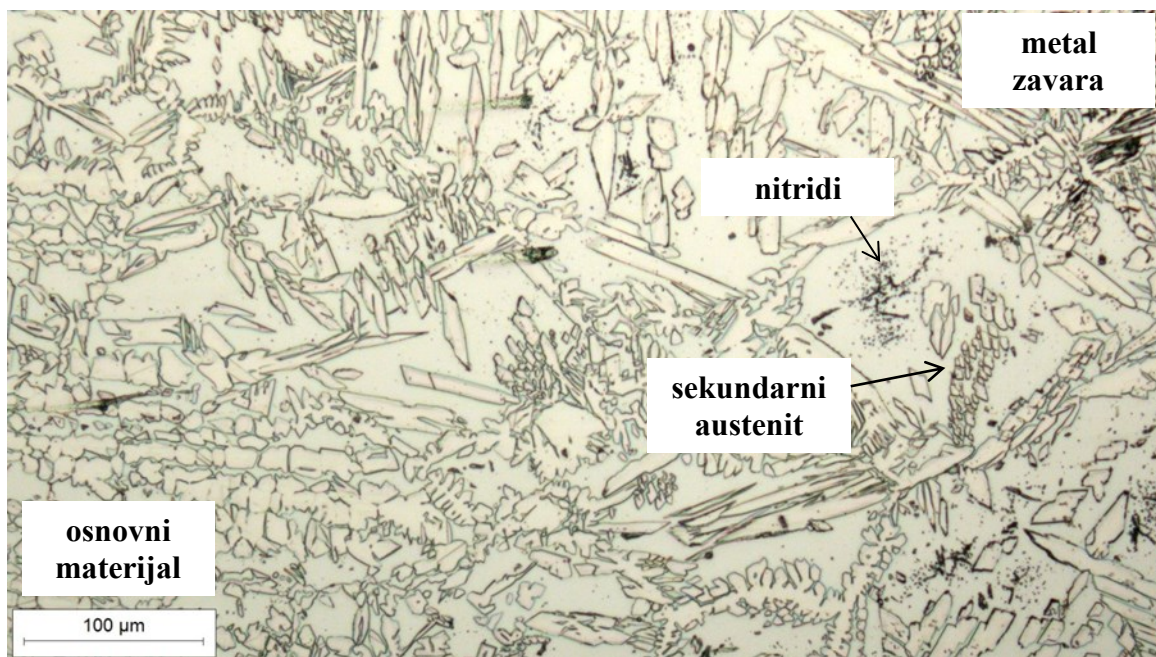
Slika 42. Mikrostruktura ZUT-a, desno, u sredini zavara, snimljena pri povećanju 100×



Slika 43. Mikrostruktura ZUT-a, lijevo, u korijenu zavara, snimljena pri povećanju 100×



Slika 44. Mikrostruktura ZUT-a, desno, u korijenu zavara, snimljena pri povećanju 100×



Slika 45. Mikrostruktura zone utjecaja topline snimljena pri povećanju 200×

6.5.3. Analiza mikrostrukture metala zavara

Mikrostruktura metala zavara potpuno se razlikuje od mikrostrukture osnovnog materijala. Za razliku od osnovnog materijala, metal zavara nema gnječenu, već ljevačku dendritnu mikrostrukturu. Kemijski sastav dodatnog materijala tako je podešen da i u metalu zavara bude izbalansirani omjer ferita i austenita (50:50), zato što se brzina hlađenja tijekom zavarivanja ne može kontrolirati. Podjednaki udio austenita i ferita postiže se povećanim udjelom nikla u dodatnom materijalu (oko 9,4 %). Nikal je jaki gamageni element i promiče austenitnu mikrostrukturu, čime se sprječava povećanje udjela ferita u zoni zavarivanja i omjeri ovih dviju faza zadržavaju se u dopuštenim granicama 60:40.

Na fotografijama koje slijede prikazana je mikrostruktura u tjemenu, sredini i korijenu metala zavara, snimljena pri povećanju od 100×. Pažljivom analizom u metalu zavara nisu uočene nikakve nepravilnosti. Mikrostruktura je ujednačena po cijelom metalu zavara i karakteristična za mikrostrukturu zavara dupleks čelika.

Na slici 46. prikazana je mikrostruktura metala zavara u tjemenu zavara.

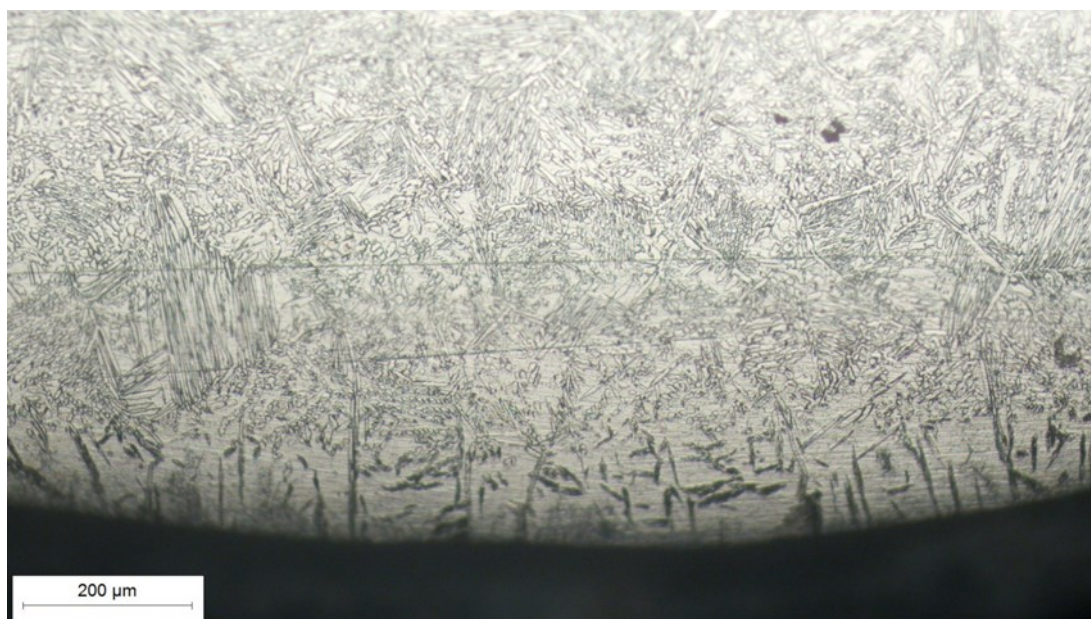
Mikrostruktura sredine metala zavara prikazana je na slici 47., a na slici 48., vidi se mikrostruktura u korijenu metala zavara. Kako uzorak nije bio zaliven u masu, rubovi uzorka su zaobljeni i nisu kvalitetno pripremljeni kao ostatak uzorka zbog čega se mikrostruktura na samom rubu tjemena i korijena ne vidi dobro.



Slika 46. Mikrostruktura metala zavara u tjemenu zavara, snimljena pri povećanju 100×

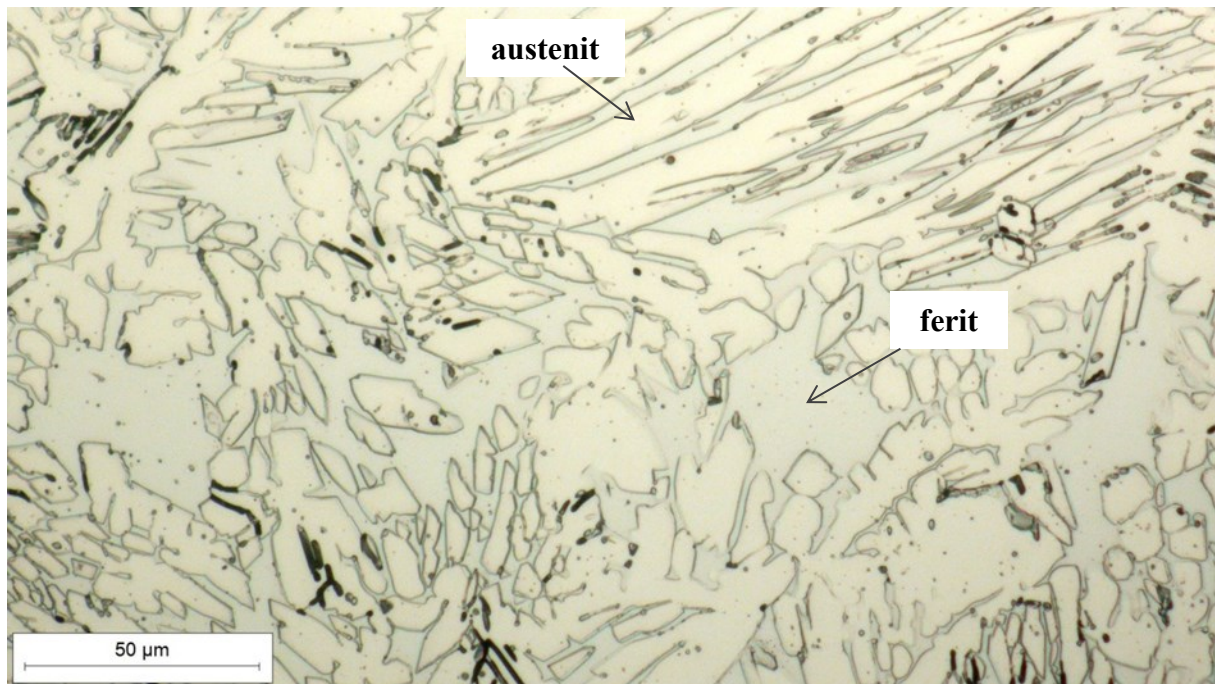


Slika 47. Mikrostruktura metala zavora u sredini zavora, snimljena pri povećanju 100×



Slika 48. Mikrostruktura metala zavora u korijenu zavora, snimljena pri povećanju 100×

Na slici 49. prikazana je tipična ljevačka mikrostruktura metala zavora, snimljena pri većem povećanju u sredini zavora. Na slici se jasno mogu razlikovati feritna i austenitna zrna. Također se može vidjeti da je volumni udio ferita i austenita podjednak. Mjerenjem volumnih udjela ferita i austenita utvrđeno je da ferita ima 48 % (srednja vrijednost od tri mjerenja).



Slika 49. Mikrostruktura metala zavara snimljena pri povečanju od 500×

6.6. Mikrotvrdoća HV0,2

Mikrotvrdoća uzorka izmjerena je u Laboratoriju za materijalografiju na Zavodu za materijale Fakulteta strojarstva i brodogradnje, na mikrotvrdomeru PMT-3 prikazanom na slici 50. Korištena metoda mjerenja je metoda po Vickersu s indentorom u obliku četverostrane dijamantne piramide. Prvo se na podlogu stavi uzorak, koji se oprugama pričvrsti kako se ne bi micao. Ispod uzorka se stavi plastelin kako bi se površina na kojoj se mjeri tvrdoća učinila planparalelnom s podlogom. Uzorak se stavi ispod okulara i izabire se mjesto na kojem se mjeri tvrdoća. Zatim se na tvrdomer stavi uteg od 200 g. Radni stol s uzorkom se zakrene u poziciju gdje se odabrano mjesto nalazi točno ispod dijamantne piramide. Pomoću ručice spusti se indentor koji zbog mase utega prodire u površinu uzorka, ostavljajući na njoj trag u obliku šuplje piramide. Ručica se nakon petnaestak sekundi podigne, indentor odmakne od površine i radni stol zakrene se u početni položaj. Nakon toga se preko okulara mjere dijagonale otiska i na temelju toga iz tablica se očitaju vrijednosti tvrdoće.

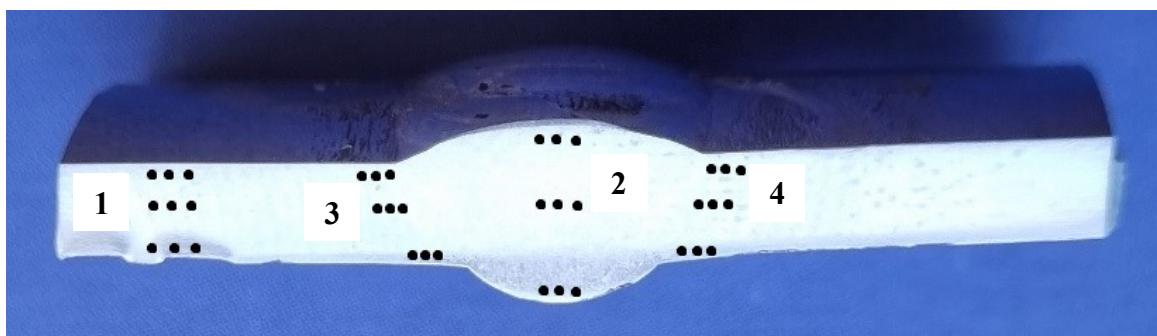


Slika 50. Mikrotvrdomer, model PMT-3.

Mikrotvrdoća je izmjerena na osnovnom materijalu, u zoni utjecaja topline i u metalu zavara. Na osnovnom materijalu napravljena su po tri mjerenja, na vanjskom i unutarnjem rubu stijenke cijevi te u sredini stijenke cijevi.

U metalu zavara također su napravljena po tri mjerenja u tjemenu, sredini i korijenu.

U zoni utjecaja topline, s lijeve i desne strane zavara, izmjerena je tvrdoća u tjemenu, sredini i korijenu zavara. Na svakoj poziciji mjerenje je tri puta ponovljeno.



Slika 51. Polirana površina uzorka s naznačenim mjestima ispitivanja mikrotvrdoće

Na slici 51. shematski su prikazane pozicije na kojima je izmjerena mikrotvrdoća.

Područje označeno brojem 1 je osnovni materijal, brojem 2 metal zavara, brojem 3 zona utjecaja topline na lijevoj strani, a brojem 4 zona utjecaja topline na desnoj strani.

U tablicama 4., 5. i 6. prikazani su pojedinačni rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2, kao i njihove srednje vrijednosti za sva karakteristična područja.

Tablica 4. Vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 u osnovnom materijalu

	vanjski rub cijevi	sredina stijenke cijevi	unutarnji rub cijevi
1.	298	313	330
2.	313	313	308
3.	325	308	325
srednja vrijednost	312	311	321

Tablica 5. Vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 u zoni utjecaja topline

	tjeme		sredina		korijen	
	lijevo	desno	lijevo	desno	lijevo	desno
1.	257	245	313	231	330	355
2.	265	319	293	325	343	391
3.	231	283	303	308	407	336
srednja vrijednost	251	282	303	288	360	360

Tablica 6. Vrijednosti mikrotvrdoće HV0,2 u metalu zavara

	tjeme	sredina	korijen
1.	257	269	241
2.	283	257	245
3.	278	283	249
srednja vrijednost	272	269	245

7. OSVRT NA DOBIVENE REZULTATE

7.1. Osvrt na rezultate analize makrostrukture zavarenog spoja

Analiza makrostrukture zavarenog spoja dupleks čelika oznake X2CrNiMoN 25-7-4, izvedenog TIG postupkom zavarivanja u horizontalno-vertikalnom položaju, uz dodatni materijal u obliku volframove žice oznake W 25 9 4 NL, pokazala je sljedeće:

- geometrija zavara Y sučeljenog oblika je pravilna i simetrična
- linija staljivanja je jasno izražena
- prolazi zavarivanja ne mogu se jasno razlučiti
- u zavarenom spoju nisu uočene nikakve nepravilnosti.

7.2. Osvrt na rezultate analize mikrostrukture

Analiza mikrostrukture provedena je na osnovnom materijalu, metalu zavara i zoni utjecaja topline zavarenog spoja.

Analiza mikrostrukture osnovnog materijala stijenke cijevi od dupleks čelika, debljine 2,7 mm, pokazala je da se mikrostruktura sastoji od ferita i austenita. Nisu uočene nikakve druge faze. Volumni udjeli ferita i austenita su podjednaki i iznose oko 50 %.

Mikrostruktura osnovnog materijala je izrazito ugnječena.

Zbog velikog unosa topline pri zavarivanju cijevi, mikrostruktura dupleks čelika u zoni utjecaja topline razlikuje se od mikrostrukture osnovnog materijala. Zona utjecaja topline je široka, a linija staljivanja između visokotemperaturne zone utjecaja topline i metala zavara nije jasno izražena. Početna izbalansirana mikrostruktura sastavljena od ferita i austenita u podjednakim omjerima je narušena, udio ferita se znatno povisio, a kristalna zrna ferita su puno krupnija. Po njihovim granicama izlučen je primarni austenit, a u nekima od njih izlučene su sitne nakupine kromovih nitrida i sekundarni austenit.

Mikrostruktura zone utjecaja topline podjednaka je u tjemenu, sredini i korijenu zavarenog spoja.

Mikrostruktura metala zavara nije ugnječena, nego dendritna ljevačka mikrostruktura. Sastoji se od austenita i ferita, relativno je pravilna i podjednaka u tjemenu, sredini i korijenu. Kako bi se u metalu zavara postigao izbalansirani omjer ferita i austenita, u kemijskom sastavu dodatnog materijala mora biti povećan udio nikla u odnosu na njegov udio u osnovnom

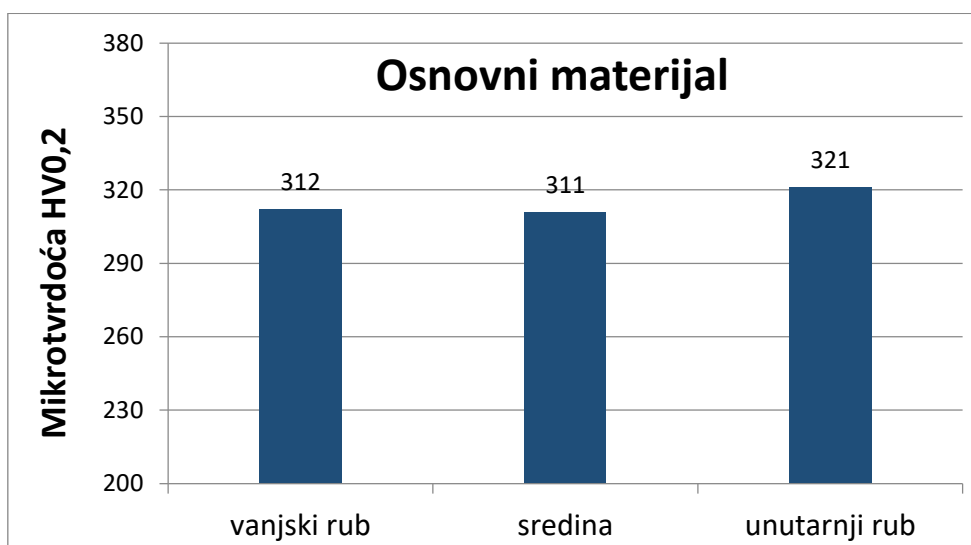
materijalu. Nikal je jaki gamageni element i forsira austenitnu mikrostrukturu. Kad ne bi bilo povećanog udjela nikla, zbog nekontrolirane brzine ohlađivanja pri zavarivanju, ne bi se mogao postići traženi omjer između volumnog udjela faza koji treba biti 60:40. Dobiveni omjer volumnih udjela ferita i austenita u metalu zavara iznosio je 48:52, što je u granicama dopuštenog.

7.3. Osvrt na rezultate mjerenja mikrotvrdoće HV0,2

Mikrotvrdoća HV0,2 izmjerena je u sva tri karakteristična područja zavarenog spoja – osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavara. U svakom području napravljena su po tri mjerenja u tjemenu, sredini i korijenu zavarenog spoja.

Izmjerene vrijednosti mikrotvrdoće u osnovnom materijalu su u rasponu od 311 do 321 HV0,2. Najviša vrijednost mikrotvrdoće izmjerena je na unutarnjem rubu poprečnog presjeka stijenke cijevi, a najniža u sredini presjeka. Rasipanja rezultata su vrlo niska.

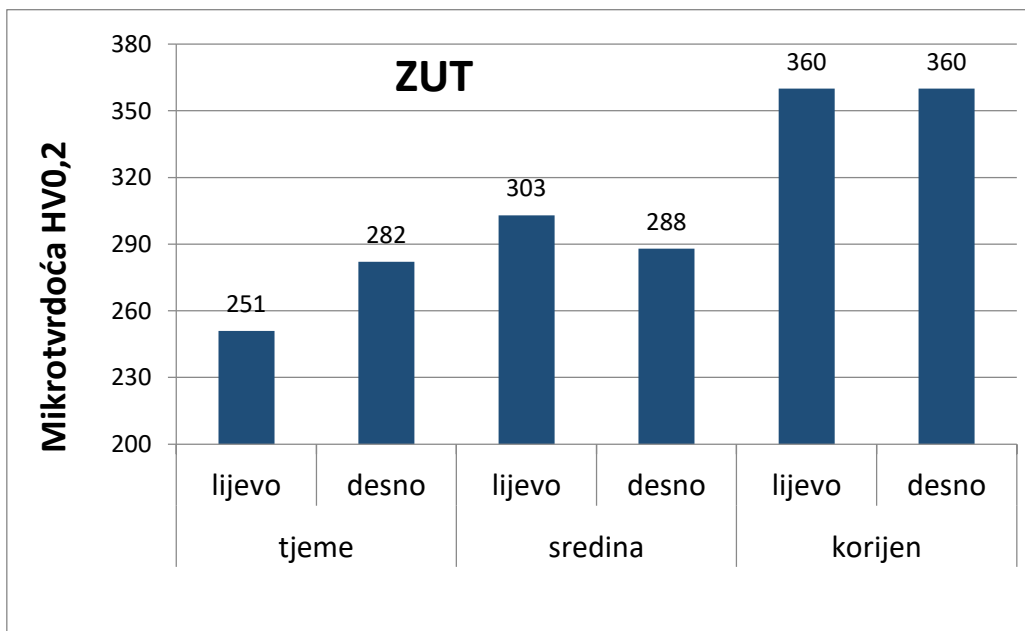
Na slici 52. prikazani su rezultati mjerenja mikrotvrdoće u osnovnom materijalu.



Slika 52. Mikrotvrdoća HV0,2 u osnovnom materijalu

Vrijednosti mikrotvrdoće u zoni utjecaja topline kreću se u rasponu od 251 do 360 HV0,2. Najviše vrijednosti izmjerene su u korijenu zavarenog spoja, a najniže u tjemenu. Rasipanja rezultata u ovom području puno su veća nego u osnovnom materijalu i metalu zavara.

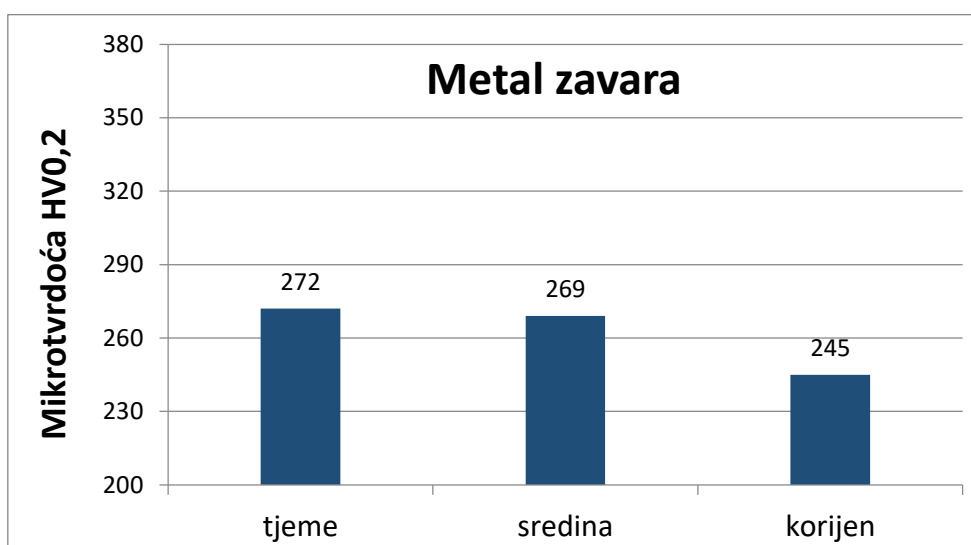
Na slici 53. prikazani su rezultati mjerenja mikrotvrdoće u zoni utjecaja topline s lijeve i desne strane zavara.



Slika 53. Mikrotvrdoća HV0,2 u zoni utjecaja topline

Vrijednosti mikrotvrdoće u metalu zavara su u rasponu od 245 do 272 HV0,2. Najviše vrijednosti izmjerene su u tjemenu zavara, a najniže u korijenu. Rasipanja rezultata nisu velika.

Na slici 54. prikazani su rezultati mjerenja mikrotvrdoće u karakterističnim područjima metala zavara.



Slika 54. Mikrotvrdoća HV0,2 u metalu zavara

8. ZAKLJUČAK

U završnom radu provedena je karakterizacija sučeljenog zavarenog spoja cijevi od dupleks čelika oznake X2CrNiMoN 25-7-4. Na osnovi dobivenih rezultata, zaključeno je sljedeće:

- Geometrija zavarenog spoja je pravilna i simetrična bez uočenih nepravilnosti. Linija staljivanja je jasno izražena, a pojedinačni prolazi nisu razlučivi.
- Zbog velikog unosa topline tijekom zavarivanja mikrostruktura zavarenog spoja razlikuje se u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i metalu zavara.
- Mikrostruktura osnovnog materijala sastoji se od ferita i austenita u podjednakim udjelima i poprilično je ugnječena.
- U zoni utjecaja topline narušena je pravilna dupleks mikrostruktura. Udio ferita je puno veći od udjela austenita, formirala su se velika feritna zrna, a u nekima od njih izlučili su se kromovi nitridi i sekundarni austenit.
- Mikrostruktura metala zavara je tipična ljevačka mikrostruktura sastavljena od ferita i austenita, podjednaka u tjemenu, sredini i korijenu zavara, bez uočenih nepravilnosti.
- Mikrotvrdoća osnovnog materijala u prosjeku je viša od tvrdoće metala zavara i zone utjecaja topline. Viša tvrdoća od tvrdoće osnovnog materijala izmjerena je jedino u zoni utjecaja topline u korijenu zavarenog spoja. Najveća rasipanja rezultata prisutna su kod mjerenja tvrdoće u zoni utjecaja topline, a u osnovnom materijalu i metalu zavara su puno manja.

LITERATURA

- [1] International Stainless Steel Forum: Duplex Stainless Steels, 2020.
- [2] John C. Lippold, Damian J. Kotecki: Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2005.
- [3] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [4] https://www.researchgate.net/figure/Common-standard-shapes-of-structural-steel_fig1_333612244 (pristup stranici 27.01.2022.)
- [5] I. Gabrić, S. Šitić: Materijali 1, Sveučilište u Splitu, Split, 2012.
- [6] Ž. Alar, D. Čorić: Mehanička svojstva materijala, autorizirana predavanja, Fakultet Strojarsstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, dostupno 2021.
- [7] H. Altenbach, K. Naumenko: Modeling of Creep for Structural Analysis, Springer, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2007.
- [8] J.R. Davis, Davis & Associates: Surface Engineering for Corrosion and Wear Resistance, ASM International, 2001.
- [9] Handbook of Stainless Steel, Outokompu Oyj, 2013.
- [10] V. Rede: Posebni metalni materijali, autorizirana predavanja, Fakultet Strojarsstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2021.
- [11] V. Rede: Nehrđajući čelici, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2017.
- [12] V. Alar, V. Šimunović, I. Juraga: Teorijske osnove korozivskih procesa i metode zaštite, autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2011.
- [13] F. J. Carcel-Carrasco, M. Pascual-Guillamon, L. Solano Garcia, F. Salas Vicente, M.A. Perez-Puig: Pitting Corrosion in AISI 304 Rolled Stainless Steel Welding at Different Deformation Levels, MDPI, 2019.
- [14] <https://slidetodoc.com/corrosion-principle-of-corrosion-different-types-of-corrosion/> (pristup stranici 31.01.2022.)
- [15] <https://www.ssina.com/education/corrosion/pitting-and-crevice-corrosion/> (pristup stranici 31.01.2022.)

- [16] https://www.researchgate.net/figure/3-Example-of-stress-corrosion-cracking-of-a-Type-316-stainless-steel-under-thermal_fig9_294693732 (pristup stranici 31.01.2022.)
- [17] https://www.researchgate.net/figure/Depth-of-intergranular-corrosion-after-15-minutes-annealing-at-a-750C-b-850C-and_fig3_317299452 (pristup stranici 31.01.2022.)
- [18] Practical guide to using duplex stainless steels, Nickel Institute, 2020.
- [19] R. Francis, G. Byrne: Duplex Stainless Steels – Alloys for the 21st Century, MDPI, 2021.
- [20] R. N. Gunn: Duplex stainless steels, Abington publishing, Cambridge, England, 1997.
- [21] <https://www.unifiedalloys.com/blog/what-is-duplex-stainless> (pristup stranici 05.02.2022.)
- [22] <https://repositorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+ISO+4063%3A2012> (pristup stranici 07.02.2022.)
- [23] <https://repositorij.hzn.hr/norm/HRN+EN+ISO+9692-1%3A2013> (pristup stranici 07.02.2022.)