

Karakterizacija zavarenog spoja između ugljičnog i nehrđajućeg austenitnog čelika

Čutura, Katarina

Undergraduate thesis / Završni rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:868776>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-03**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Katarina Čutura

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentorica:

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

Studentica:

Katarina Čutura

Zagreb, 2024.

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

Na prvom mjestu, zahvaljujem dragom Bogu na zdravlju, snazi i strpljenju koje mi je dao tijekom studiranja i izrade ovog završnog rada.

Želim izraziti svoju duboku zahvalnost mentorici prof. dr. sc. Veri Rede na nesebičnom dijeljenju svoga znanja, vremena i stručnih savjeta. Također zahvaljujem asistentici Heleni Lukšić, mag. ing. mech. te ostalim djelatnicima Fakulteta strojarstva i brodogradnje i ZIT-a na pomoći prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Posebnu zahvalu želim uputiti svojim roditeljima, bratu, baki, kumanu i svojoj ostaloj rodbini i prijateljima na njihovoj podršci, strpljenju, žrtvi, motivaciji i vjeri, što je bilo ključno za svaki moj uspjeh, uključujući i ovaj rad. Hvala vam!

Katarina Čutura



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite



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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Studentica: **Katarina Čutura**

JMBAG: 0035228522

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Karakterizacija zavarenog spoja između ugljičnog i nehrđajućeg austenitnog čelika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Characterization of the welded joint between carbon steel and stainless austenitic steel**

Opis zadatka:

U današnje doba većina konstrukcijskih dijelova od čelika spaja se različitim postupcima zavarivanja, a dobra zavarljivost je jedan od uvjeta koje svi konstrukcijski čelici trebaju zadovoljiti. Svojstva zavarenog spoja ovise o kemijskom sastavu i mikrostrukturi osnovnog materijala, o kemijskom sastavu dodatnog materijala te o primijenjenom postupku zavarivanja. Kod zavarivanja različitih vrsta čelika zavarivanje je malo kompliciranije zbog razlike u kemijskom sastavu, mikrostrukturi, temperaturi taljenja, toplinskoj vodljivosti i koeficijentu toplinskog širenja. Zato se pri zavarivanju različitih vrsta čelika moraju poduzeti posebne mjere opreza kako bi se dobio kvalitetan zavareni spoj.

U završnom radu potrebno je navesti čimbenike koji utječu na zavarljivost ugljičnih i nehrđajućih austenitnih čelika te prikladne postupke zavarivanja. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je provesti karakterizaciju zavarenog spoja između ugljičnog i visokolegiranog nehrđajućeg austenitnog čelika, što uključuje analizu makrostrukture i mikrostrukture te ispitivanje mehaničkih svojstva.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2023.

Datum predaje rada:

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

Predvideni datumi obrane:

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

Zadatak zadala:

Rede
Prof. dr. sc. Vera Rede

Predsjednik Povjerenstva:

Godec
Prof. dr. sc. Damir Godec

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS KRATICA	VII
POPIS OZNAKA	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. SISTEMATIZACIJA ČELIKA	2
2.1. Opći konstrukcijski čelici.....	4
2.2. Austenitni nehrđajući čelici	5
3. TEHNIKE SPAJANJA ČELIKA	8
3.1. Zavarivanje.....	8
3.1.1. Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom.....	9
3.1.2. Zavarivanje raznorodnih materijala	11
3.1.2.1. Zavarivanje austenitnog nehrđajućeg čelika s drugim čelicima	11
3.1.3. Postupci kontrole zavarenog spoja.....	12
4. EKSPERIMENTALNI DIO	14
4.1. Cilj eksperimentalnog dijela rada i provedena ispitivanja	14
4.2. Materijal za ispitivanje.....	14
4.3. Rezultati provedenih ispitivanja.....	18
4.3.1. Statičko vlačno ispitivanje	19
4.3.2. Savojno ispitivanje.....	20
4.3.3. Metalografska analiza	22
4.3.3.1. Priprema uzoraka za analizu makrostrukture i mikrostrukture zavarenog spoja.....	22
4.3.3.2. Analiza makrostrukture uzorka.....	27

4.3.3.3. Analiza mikrostrukture uzorka	28
4.3.4. Mjerenje mikrotvrdoće zavarenog spoja, HV0,2	44
4.3.5. Mjerenje tvrdoće zavarenog spoja, HV10	48
5. ZAKLJUČAK.....	52
LITERATURA.....	54
PRILOZI.....	56

POPIS SLIKA

Slika 1.	Tipična mikrostruktura općeg konstrukcijskog čelika [3].....	4
Slika 2.	Tipična mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika: 100 % austenit [3].....	6
Slika 3.	Tipična mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika s određenim udjelom delta ferita [7].....	6
Slika 4.	Posljedica senzibilizacije – izlučivanje kromovih karbida [6].....	7
Slika 5.	Osnovni elementi zavarenog spoja [2].....	9
Slika 6.	Shematski prikaz ručnog elektrolučnog zavarivanja obloženom elektrodom [2].	10
Slika 7.	Presjeci različitih vrsta obloženih elektroda za REL postupak zavarivanja [2]....	11
Slika 8.	Zavareni spoj čelika S275JR i čelika X2CrNiMo17-12-2	15
Slika 9.	Skica pripreme spoja, V-žlijeb	16
Slika 10.	Redoslijed polaganja slojeva pri zavarivanju	16
Slika 11.	Ploča iz koje su izrezani uzorci za ispitivanja zavarenog spoja	18
Slika 12.	Univerzalna kidalica.....	19
Slika 13.	Uzorci nakon provedenog statičkog vlačnog ispitivanja.....	20
Slika 14.	Uzorci nakon ispitivanja savojne čvrstoće	21
Slika 15.	Kontrolirana površina ispitnih uzoraka nakon ispitivanja savojne čvrstoće	21
Slika 16.	Uređaj za izrezivanje uzorka	23
Slika 17.	Izrezani uzorak	23
Slika 18.	Uređaj za brušenje i poliranje.....	24
Slika 19.	Metalografski uzorak s ispoliranom površinom	25
Slika 20.	Komora za elektrokemijsko nagrizanje	26
Slika 21.	Uređaj za podešavanje parametara elektrokemijskog nagrizanja.....	26
Slika 22.	Uzorak nakon postupka nagrizanja u svrhu analize mikrostrukture	27
Slika 23.	Makrostruktura zavarenog spoja	27
Slika 24.	Svjetlosni mikroskop Olympus GX51	28
Slika 25.	Mikrostruktura osnovnog materijala općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR, snimljena pri povećanju od 100×	29
Slika 26.	Mikrostruktura osnovnog materijala općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR, snimljena pri povećanju od 200×	30
Slika 27.	Mikrostruktura osnovnog materijala austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 100×	30

Slika 28.	Mikrostruktura osnovnog materijala austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 200×	31
Slika 29.	Mikrostruktura ZUT-a u tjemenu zavora, sa strane općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR, snimljena pri povećanju od 50×.....	32
Slika 30.	Mikrostruktura ZUT-a u tjemenu zavora, sa strane općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR, snimljena pri povećanju od 100×.....	32
Slika 31.	Mikrostruktura ZUT-a u tjemenu zavora, sa strane općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR, snimljena pri povećanju od 200×.....	33
Slika 32.	Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavora, sa strane općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR, snimljena pri povećanju od 50×.....	33
Slika 33.	Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavora, sa strane općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR, snimljena pri povećanju od 100×.....	34
Slika 34.	Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavora, sa strane općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR, snimljena pri povećanju od 200×.....	34
Slika 35.	Mikrostruktura ZUT-a u tjemenu zavora sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 50×	35
Slika 36.	Mikrostruktura ZUT-a u tjemenu zavora sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 100×	36
Slika 37.	Mikrostruktura ZUT-a u tjemenu zavora sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 200×	36
Slika 38.	Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavora sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 50×.....	37
Slika 39.	Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavora sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 100×	37
Slika 40.	Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavora sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 200×	38
Slika 41.	Mikrostruktura ZUT-a u korijenu zavora sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 100×	38
Slika 42.	Mikrostruktura ZUT-a u korijenu zavora sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 200×	39
Slika 43.	Mikrostruktura metala zavora u tjemenu, snimljena pri povećanju od 50×	40
Slika 44.	Mikrostruktura metala zavora u tjemenu, snimljena pri povećanju od 100×	40
Slika 45.	Mikrostruktura metala zavora u tjemenu, snimljena pri povećanju od 200×	41

Slika 46.	Mikrostruktura metala zavara u sredini, snimljena pri povećanju od 50×	41
Slika 47.	Mikrostruktura metala zavara u sredini, snimljena pri povećanju od 100×	42
Slika 48.	Mikrostruktura metala zavara u sredini, snimljena pri povećanju od 200×	42
Slika 49.	Mikrostruktura metala zavara u korijenu, snimljena pri povećanju od 50×	43
Slika 50.	Mikrostruktura metala zavara u korijenu, snimljena pri povećanju od 100×	43
Slika 51.	Mikrostruktura metala zavara u korijenu, snimljena pri povećanju od 200×	44
Slika 52.	Zwick/Roell ZHV μ uređaj za mjerenje mikrotvrdoće	45
Slika 53.	Područja na kojima je mjerena mikrotvrdoća HV0,2	45
Slika 54.	Promjena mikrotvrdoće u tjemenu zavarenog spoja	47
Slika 55.	Promjena mikrotvrdoće u sredini zavarenog spoja	47
Slika 56.	Promjena mikrotvrdoće u korijenu zavarenog spoja	48
Slika 57.	Karl Frank GmbH uređaj za mjerenje tvrdoće	49
Slika 58.	Područja na kojima je mjerena tvrdoća HV10	49
Slika 59.	Promjena tvrdoće u tjemenu zavara	51
Slika 60.	Promjena tvrdoće u korijenu zavara	51

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR	16
Tablica 2. Mehanička svojstva općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR.....	17
Tablica 3. Kemijski sastav austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2.....	17
Tablica 4. Mehanička svojstva austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2	17
Tablica 5. Kemijski sastav dodatnog materijala oznake E 23 12 L R 3 2.....	17
Tablica 6. Mehanička svojstva dodatnog materijala oznake E 23 12 L R 3 2	17
Tablica 7. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja.....	20
Tablica 8. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u osnovnom materijalu općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR	46
Tablica 9. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u osnovnom materijalu austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2	46
Tablica 10. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u ZUT-u sa strane općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR.....	46
Tablica 11. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u ZUT-u sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2	46
Tablica 12. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u metalu zavara	47
Tablica 13. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10 u osnovnom materijalu općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR.....	50
Tablica 14. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10 u osnovnom materijalu austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2	50
Tablica 15. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10 u ZUT-u sa strane općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR	50
Tablica 16. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10 u ZUT-u sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2	50
Tablica 17. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10 u metalu zavara	50

POPIS KRATICA

ASTM	American Society for Testing and Materials
HRN	Hrvatska norma
ISO	International Organization for Standardization
JIS	Japanese Industrial Standards
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
ZT	Zona taljenja
ZUT	Zona utjecaja topline

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>A</i>	%	istežljivost
<i>C_e</i>	/	vrijednost ekvivalentnog ugljika
<i>HV</i>	/	tvrdoća po Vickersu
<i>KV</i>	J	žilavost materijala s V oblikom utora
<i>R_m</i>	MPa	vlačna čvrstoća
<i>R_{p0,2}</i>	MPa	konvencionalna granica razvlačenja

SAŽETAK

U ovom radu provedena je karakterizacija zavarenog spoja između općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR i austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2.

U teorijskom dijelu rada navedena je sistematizacija čelika s posebnim naglaskom na opće konstrukcijske čelike i austenitne nehrđajuće čelike. Navedene su tehnike spajanja čelika, opisano je zavarivanje kao najčešće korišteni postupak i navedeni su osnovni postupci zavarivanja. Opisana je zavarljivost općih konstrukcijskih i austenitnih nehrđajućih čelika te ispitivanja koja se provode u svrhu karakterizacije zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je statičko vlačno ispitivanje, savojno ispitivanje, mjerenje tvrdoće (HV0,2 i HV10) te analiza makrostrukture i mikrostrukture zavarenog spoja izvedenog ručnim elektrolučnim zavarivanjem s obloženom elektrodom.

Utvrđeno je da zavareni spoj ima zadovoljavajuću vlačnu čvrstoću. Pri savojnom ispitivanju pod kutom od 180° na kritičnoj površini lica i korijena zavara nisu uočene nikakve nepravilnosti. U zoni utjecaja topline, s obje strane zavarenog spoja, došlo je do povećanja tvrdoće HV10 i mikrotvrdoće HV0,2, a najviše vrijednosti tvrdoće izmjerene su u metalu zavara.

Zavareni spoj ima pravilnu geometriju i jasno izraženu liniju staljivanja. Mikrostruktura osnovnog materijala čelika S275JR sastavljena je od ferita i perlita, a u nehrđajućem čeliku X2CrNiMo17-12-2, osim austenita, nalazi se i delta ferit. U ZUT-u, sa strane općeg konstrukcijskog čelika, došlo je do rasta zrna i povećanja udjela perlita, a sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika povećao se volumni udio delta ferita. U sredini i korijenu metala zavara, koji ima tipičnu ljevačku mikrostrukturu, mjestimice su uočene vrlo sitne pore.

Ključne riječi: karakterizacija, zavareni spoj, opći konstrukcijski čelik, austenitni nehrđajući čelik

SUMMARY

In this study, the characterization of a welded joint between structural steel, S275JR, and austenitic stainless steel, X2CrNiMo17-12-2, was performed.

The theoretical section outlines the classification of steels, with a particular focus on structural steels and austenitic stainless steels. It covers the techniques used for joining steels, describes welding as the most commonly used method, and lists the basic welding processes. The weldability of structural steels and austenitic stainless steels is discussed, as well as the tests conducted to characterize the welded joint.

In the experimental section, tensile testing, bend testing, hardness measurement (HV0.2 and HV10), and macrostructural and microstructural analysis of the welded joint that performed by manual arc welding with a coated electrode, were performed.

It was found that the welded joint has satisfactory tensile strength. During the bend testing at an angle of 180°, no defects were observed on the critical surface of the weld face and root. In the heat-affected zone, on both sides of the welded joint, an increase in HV10 hardness and HV0.2 microhardness was observed, with the highest hardness values measured in the weld metal.

The welded joint exhibits a regular geometry and a clearly defined fusion line. The microstructure of the base material, S275JR steel, consists of ferrite and pearlite, while in the stainless steel X2CrNiMo17-12-2, in addition to austenite, delta ferrite is also present. In the heat-affected zone, on the structural steel side, grain growth and an increase in the amount of pearlite were observed, while on the austenitic stainless steel side, the volume fraction of delta ferrite increased. In the center and root of the weld metal, which has a typical cast microstructure, very small pores were observed in places.

Key words: characterization, welded joint, structural steel, austenitic stainless steel

1. UVOD

Čelik je neizostavan konstrukcijski materijal u modernoj industriji i inženjerstvu, zahvaljujući svojoj čvrstoći, duktilnosti, žilavosti i sposobnosti prilagodbe kroz različite obrade. To je legura željeza i ugljika, uz prisutnost drugih elemenata kao što su mangan i silicij. Čelicima se mogu dodavati i različiti legirni elementi koji ciljano utječu na poboljšavanje određenih svojstava. Zbog tih karakteristika, čelik se široko primjenjuje u građevinskim konstrukcijama, strojarstvu, automobilskim komponentama i mnogim drugim područjima. Dvije istaknute skupine čelika su opći konstrukcijski čelici, koji se koriste zbog svoje pristupačnosti i uravnoteženih mehaničkih svojstava, te austenitni nehrđajući čelici, poznati po svojoj visokoj otpornosti na koroziju i stabilnosti u različitim okruženjima [1].

Spajanje čelika je od ključne važnosti u izradi i montaži konstrukcija. Različite tehnike spajanja omogućuju prilagodbu čelika specifičnim zahtjevima projekata, pri čemu je zavarivanje najvažnija i najčešće korištena metoda. Zavarivanje omogućava čvrste i trajne spojeve koji su sposobni podnijeti visoka opterećenja, a istodobno nudi fleksibilnost u primjeni i mogućnost povezivanja različitih tipova čelika ili povezivanja čelika s drugim neželjeznim materijalima. Zavarljivost čelika, odnosno sposobnost materijala da formira kvalitetan i pouzdan zavaren spoj, ovisi o njegovom kemijskom sastavu, mikrostrukturi i mehaničkim svojstvima [2].

Zavarivanje raznorodnih čelika, poput austenitnih nehrđajućih čelika s općim konstrukcijskim čelicima, predstavlja poseban izazov zbog razlika u kemijskom sastavu, mikrostrukturi te mehaničkim i drugim svojstvima. Pravilno planiranje, izbor odgovarajućih dodatnih materijala i kontrola zavarivačkih parametara ključni su za postizanje kvalitetnih spojeva [2].

Zavareni spojevi predstavljaju kritična mjesta u konstrukcijama jer su podložni promjenama u mikrostrukturi, koncentraciji naprezanja i potencijalnoj pojavi defekata tijekom zavarivanja. S obzirom na to, važno je provesti ispitivanja kvalitete zavarenog spoja kako bi se osigurala pouzdanost i sigurnost konstrukcija u eksploatacijskim uvjetima. Kvalitetan zavareni spoj mora izdržati zahtjeve primjene uključujući otpornost na koroziju, mehanička naprezanja i promjene temperature. Upravo zbog toga, pažljivo praćenje i kontrola zavarivačkog procesa te ispitivanje zavarenih spojeva pod različitim uvjetima, neizostavni su koraci u osiguravanju dugovječnosti i sigurnosti čeličnih konstrukcija.

2. SISTEMATIZACIJA ČELIKA

Čelik je metastabilno kristalizirana legura željeza i ugljika, uz prisutne pratioce, poput mangana i silicija, i nečistoće kao što su fosfor i sumpor te uz eventualne dodatke jednog ili više legiranih elemenata [3]. Pratioci su pozitivni ili neutralni elementi koji su prisutni u čeliku ili se namjerno dodaju kako bi se postigla određena svojstva. Dakle, nalaze se u čeliku, ali nisu legirni elementi. Različiti legirni elementi namjerno se dodaju čeliku da se poboljšaju njegova svojstva za specifične namjene. Najčešći legirni elementi su krom, nikal, molibden, volfram, vanadij, titanij i drugi. Čelik je jedan od najvažnijih inženjerskih materijala u svijetu, zahvaljujući svojoj čvrstoći, žilavosti, duktilnosti, mogućnosti oblikovanja i ekonomičnoj proizvodnji. Ima vrlo široko područje primjene, zbog navedenih svojstava, koja se na različite načine mogu kombinirati, odnosno prilagođavati uvjetima primjene, mogu se dizajnirati izborom odgovarajućeg kemijskog sastava i naknadne obrade [4].

Podjela čelika može se napraviti prema različitim kriterijima, a neki od njih su sljedeći:

- podjela čelika prema kemijskom sastavu:
 - ugljični čelici (nelegirani čelici) – čelici koji sadrže uglavnom željezo i ugljik te male količine ostalih elemenata:
 - niskougljični čelici – sadrže do 0,25 % ugljika
 - srednje-ugljični čelici – sadrže između 0,25 % i 0,60 % ugljika
 - visokougljični čelici – sadrže između 0,60 % i 1,50 % ugljika
 - legirani čelici – osim ugljika sadrže i druge elemente poput kroma, nikla, molibdena i ostale koji poboljšavaju njihova svojstva:
 - niskolegirani čelici – mogu sadržavati do 5 % pojedinog legirnog elemenata
 - visokolegirani čelici – sadrže više od 5 % pojedinog barem jednog legirnog elemenata
- podjela čelika prema namjeni:
 - konstrukcijski čelici – koriste se za izradu konstrukcija, strojeva i uređaja te moraju imati visoku čvrstoću i žilavost
 - alatni čelici – koriste se za izradu alata za rezanje, štancanje, oblikovanje i slično, a od njih se primarno zahtjeva otpornost na habanje [4]

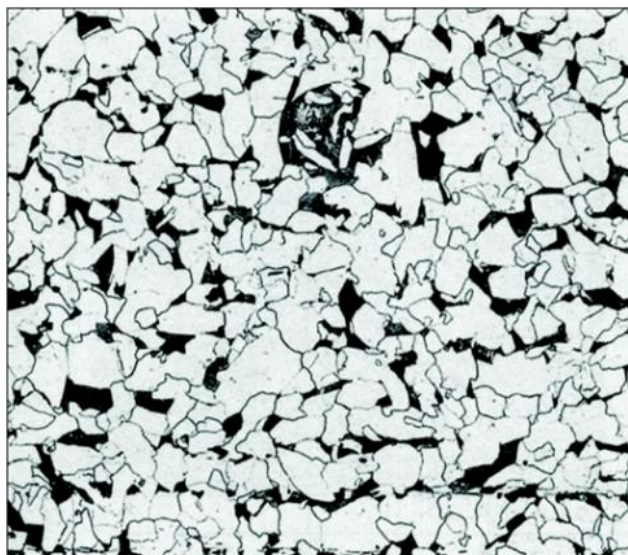
- podjela čelika prema toplinskoj obradi:
 - čelici koji nisu namijenjeni toplinskoj obradi kod korisnika
 - čelici koji se mogu toplinski obrađivati:
 - kaljeni čelici – čelici koji su prošli proces kaljenja gdje se zagrijavaju na visoku temperaturu i hlade radi postizanja veće tvrdoće
 - žareni čelici – čelici koji su prošli proces žarenja gdje se zagrijavaju na visoku temperaturu i polako hlade kako bi se smanjila tvrdoća i povećala duktilnost
 - normalizirani čelici – čelici koji su prošli proces normalizacije gdje se zagrijavaju na visoku temperaturu i zatim hlade na zraku kako bi se postigla ujednačena mikrostruktura
 - ...
- podjela čelika prema mikrostrukturi:
 - feritno-perlitni – većina konstrukcijskih čelika ima ovakvu strukturu
 - feritni čelici – sadrže ferit kao glavnu fazu, obično su mekani i duktilni
 - austenitni čelici – sadrže austenit kao glavnu fazu, obično su nemagnetični i imaju visoku duktilnost i otpornost na koroziju
 - martenzitni čelici – sadrže martenzit kao glavnu fazu, obično su tvrdi i krti
 - bainitni čelici – sadrže bainit kao glavnu fazu, imaju svojstva između feritnih i martenzitnih čelika
- podjela čelika prema stanju isporuke:
 - toplo valjani čelici
 - hladno valjani čelici
 - vučeni
 - prešani
 - kovani i sl [5].

2.1. Opći konstrukcijski čelici

Opći konstrukcijski čelici su vrsta ugljičnih čelika koji se najčešće koriste u različitim granama industrije zbog svoje dostupnosti, pristupačne cijene i zadovoljavajućih mehaničkih svojstava za široki spektar primjena.

Opći konstrukcijski čelici sadrže uglavnom željezo s udjelom ugljika koji se obično kreće do 0,25 %. Osim ugljika, sadrže male količine drugih elemenata, poput mangana, silicija, fosfora, sumpora i dušika. Mangan i silicij su pratioci, najčešće potječu iz rude i imaju određenu ulogu pri dobivanju čelika. Fosfor i sumpor su nečistoće i također potječu iz rude. Teško ih je potpuno maknuti iz čelika, ali je njihov udio limitiran jer negativno utječu na žilavost i zavarljivost čelika [3].

Mikrostruktura općih konstrukcijskih čelika uglavnom se sastoji od ferita i perlita, što ovisi o sadržaju ugljika i stanju isporuke. Ferit je meka, duktilna faza s niskom čvrstoćom, dok perlit ima slojevitu strukturu sastavljenu od eutektoidnog ferita i lamelnog eutektoidnog cementita. Omjer ferita i perlita izravno utječe na mehanička svojstva čelika, veći udio perlita povećava čvrstoću i tvrdoću, ali smanjuje duktilnost. Na slici 1 prikaza je tipična mikrostruktura općeg konstrukcijskog čelika s niskim sadržajem ugljika [3].



Slika 1. Tipična mikrostruktura općeg konstrukcijskog čelika [3]

Mehanička svojstva općih konstrukcijskih čelika uključuju relativno nisku do umjerenu čvrstoću, dobru duktilnost i sposobnost savijanja. Granica razvlačenja nalazi se u granicama između 190 MPa i 370 MPa, a vlačna čvrstoća je u rasponu od 330 MPa do 700 MPa.

Istezljivost je između 10 % i 28 %, a žilavost (*KV*) između 23 J i 27 J. Radne temperature su u širokom rasponu između -40 °C i 50 °C [3]. Dobra žilavost omogućava otpornost na lom i savijanje pri različitim opterećenjima, što ove čelike čini prikladnim za primjenu u građevinskim strukturama i konstrukcijama. Niska razina ugljika osigurava dobru zavarljivost i smanjuje rizik od pojave krhkosti, čime se olakšava proizvodnja i montaža.

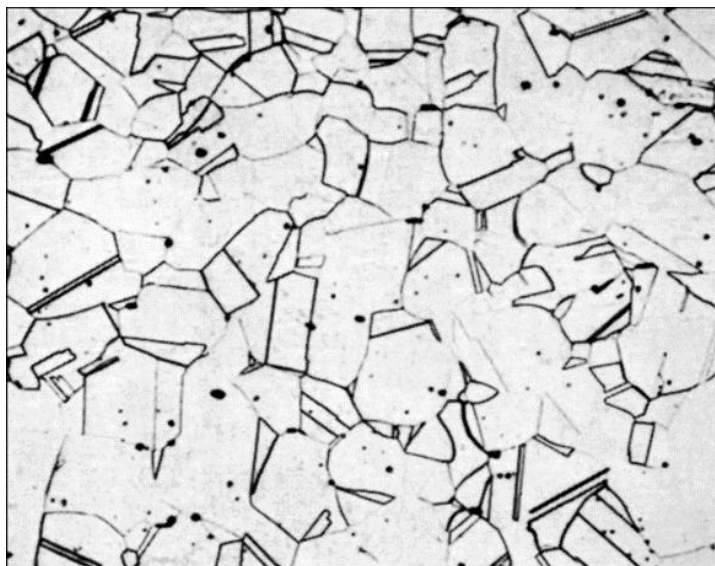
2.2. Austenitni nehrđajući čelici

Austenitni nehrđajući čelici su specijalizirana skupina nehrđajućih čelika koji su poznati po svojoj otpornosti na koroziju, izvrsnoj duktilnosti i dobrom mehaničkom ponašanju pri različitim temperaturama. Najpoznatija su, najveća te najviše korištena skupina visokolegiranih čelika. Za razliku od ostalih nehrđajućih čelika su nemagnetični. Međutim, hladnom obradom i ova skupina nehrđajućih čelika postaje magnetična [6].

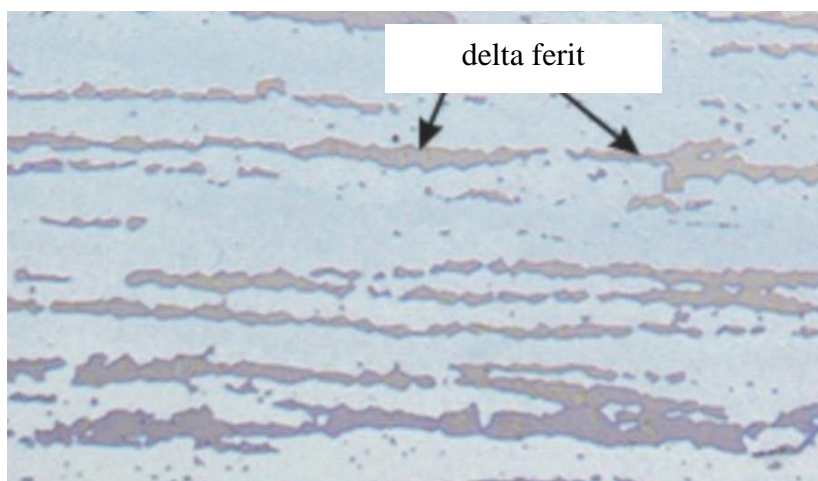
Austenitne nehrđajuće čelike karakterizira visoka koncentracija kroma (više od 18 %) koji osigurava otpornost na koroziju i oksidaciju te odgovarajući udio nikla (više od 8 %) koji stabilizira austenitnu strukturu i poboljšava duktilnost. Ova skupina nehrđajućih čelika može sadržavati i druge legirne elemente kao što su molibden (od 2 % do 3 %) koji povećava otpornost na koroziju u agresivnim okruženjima i pomaže u smanjenju rizika od korozije u vlazi te ponekad dušika, u manjim količinama, kako bi poboljšao čvrstoću i stabilnost strukture [3].

U mikrostrukturi austenitnih nehrđajućih čelika dominira austenitna faza, a osim austenita, u nekim nehrđajućim austenitnim čelicima, dopuštena je i manja količina delta ferita. Na slici 2 vidi se tipična mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika s potpuno austenitnom mikrostrukturuom [3]. Austenitna faza osigurava ovim čelicima visoku duktilnost i otpornost na koroziju. Na slici 3 prikazana je mikrostruktura austenitnog čelika s određenim udjelom delta ferita [7]. Poželjno je da u austenitnim nehrđajućim čelicima sadržaj ugljika bude što niži kako bi se izbjeglo formiranje kromovih karbida po granicama zrna, to jest senzibilizacija mikrostrukture. Do formiranja kromovih karbida može doći ako se čelik dulje vrijeme drži na temperaturi između 400 °C i 800 °C. Senzibilizirana mikrostruktura, slika 4, podložna je interkristalnoj koroziji, što može imati katastrofalno djelovanje na nosivost konstrukcija. Osim niskim sadržajem ugljika, senzibilizacija austenitne mikrostrukture može se spriječiti legiranjem austenitnih čelika sa stabilizirajućim elementima koji imaju viši afinitet prema ugljiku od kroma (Ti, Ta, Nb) [6].

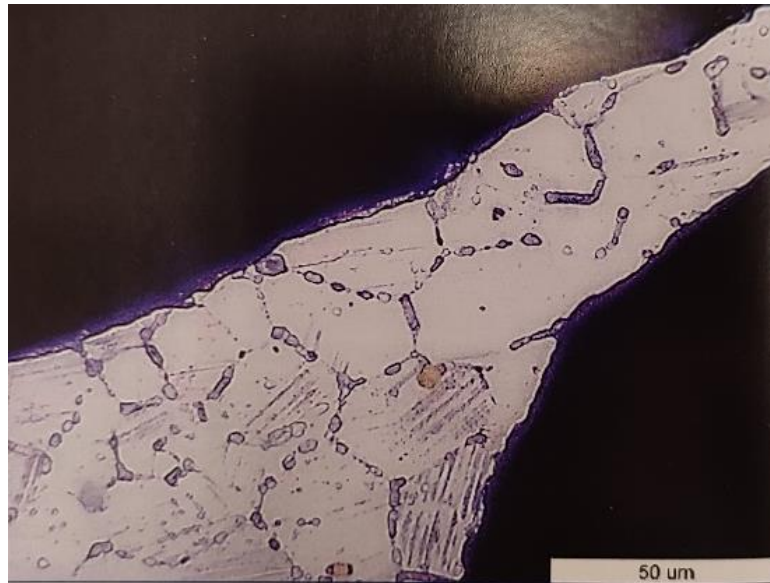
Ovi čelici imaju nisku granicu razvlačenja (100 MPa – 220 MPa), ali visoku duktilnost koja im omogućava da se lako oblikuju i savijaju. Izvrsna otpornost na koroziju čini ih pogodnima za primjene u kemijskoj industriji i izloženost vremenskim uvjetima [6].



Slika 2. Tipična mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika: 100 % austenit [3]



Slika 3. Tipična mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika s određenim udjelom delta ferita [7]



Slika 4. Posljedica senzibilizacije – izlučivanje kromovih karbida [6]

3. TEHNIKE SPAJANJA ČELIKA

Tehnike spajanja čelika imaju značajnu ulogu u oblikovanju i izradbi čeličnih konstrukcija i proizvoda te su važne s tehničkog, ekonomskog, sigurnosnog i ekološkog stajališta. Zbog toga je odabir najprikladnije tehnike spajanja vrlo složen proces koji zahtijeva interdisciplinarno znanje strojarstva, fizike, elektrotehnike i kemije. Glavni cilj tehnika spajanja je osigurati kompaktnost spojenih komada, čvrstoću spojeva i pouzdanu otpornost na naprezanja [2].

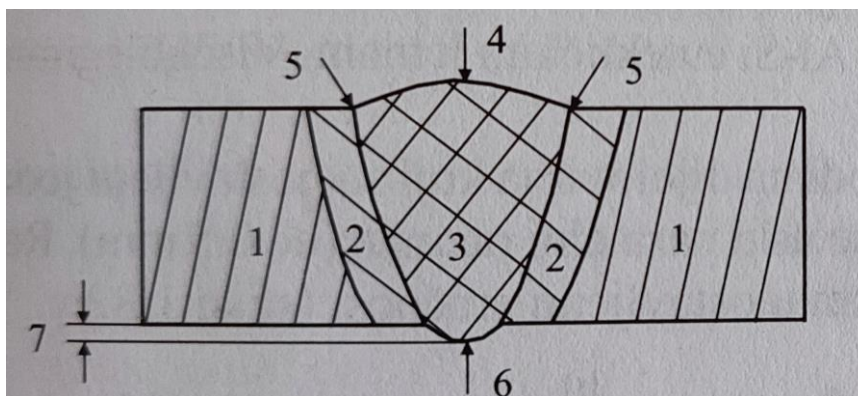
Spajanje čelika provodi se različitim tehnikama. Brojne su podjele tehnika spajanja, a jedna od njih je podjela na rastavljive i nerastavljive spojeve. U rastavljive spojeve ubraja se stezno spajanje, spajanje vijcima, zaticima, svornjacima i klinovima. Zavarivanje, lemljenje, lijepljenje i zakivanje svrstava se u nerastavljive spojeve [2].

Zavarivanje je najčešća metoda spajanja čelika, ali i svih ostalih metalnih materijala [8]. Osim što se može primijeniti na širok spektar materijala, također se može koristiti za spajanje složenih geometrija različitih debljina, oblika i veličina, te se može izvoditi u različitim položajima i uvjetima. Zavarivanjem se postiže vrlo čvrst i trajan spoj koji je često jednako jak ili čak jači od osnovnih materijala koji se spajaju. To omogućava izradu konstrukcija koje mogu podnijeti velika opterećenja i osigurati dugotrajnost. Također je jedna od bržih i efikasnijih metoda spajanja te je često i jeftinija u usporedbi s ostalima [9].

3.1. Zavarivanje

Zavarivanje je tehnika spajanja dvaju ili više dijelova s pomoću topline i/ili pritiska, kako bi se stvorio čvrst i trajan spoj. Zavarivanjem se mogu spajati metalni i nemetalni materijali, s ili bez dodatnog materijala. Na poprečnom presjeku zavara, prikazanom na slici 5, označeni su osnovni elementi zavarenog spoja:

- 1 – osnovni materijal
- 2 – zona utjecaja topline (ZUT)
- 3 – zona taljenja (ZT)
- 4 – tjeme zavara
- 5 – rub zavara
- 6 – korijen zavara
- 7 – nadvišenje u korijenu zavara [2].



Slika 5. Osnovni elementi zavarenog spoja [2]

Zona taljenja je dio koji je tijekom postupka bio rastaljen i u kojem je došlo do pojave kristalizacije i skrućivanja, a može se sastojati od mješavine osnovnog i dodatnog materijala ili samo od osnovnog materijala. Zona utjecaja topline dio je osnovnog materijala koji se nalazi uz rastaljenu zonu i u kojem dolazi do promjene kristalne strukture zbog značajnog unosa topline, a o čemu ovisi i sama širina zone utjecaja topline [2].

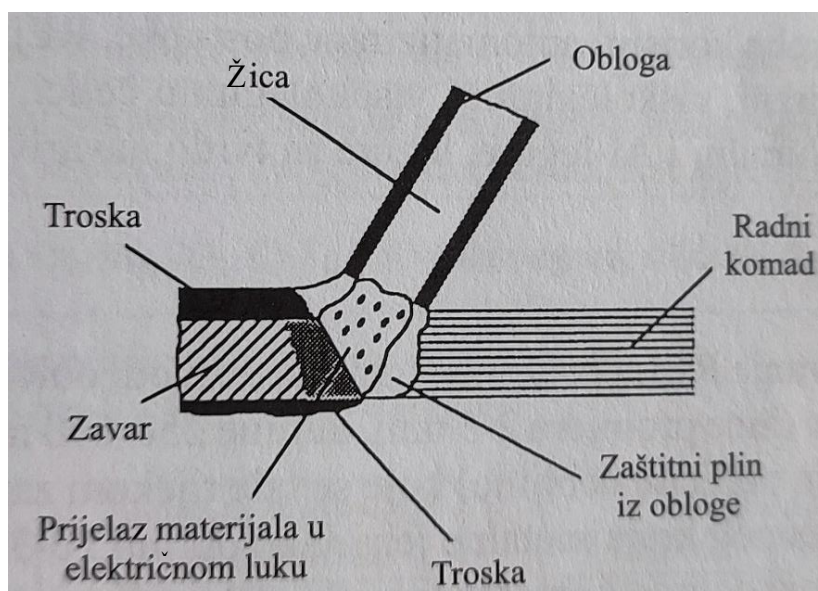
S obzirom na međusobni položaj zavarenih dijelova, zavareni spojevi se dijele na sučeljene, kutne i preklopne spojeve. Da bi se osigurao kvalitetan zavareni spoj, rubovi materijala koji se zavaruju pripremaju se strojnom obradom, toplinskim rezanjem ili posebnim strojevima za neki oblik žlijeba. Prema oblicima, spojevi mogu biti: I-spoj, V-spoj, X-spoj, K-spoj, J-spoj, dvostruki J-spoj, Y-spoj, U-spoj i tako dalje [2].

Zavareni spojevi mogu se podijeliti i prema broju prolaza na one s jednim prolazom i na one s više prolaza. Može ih se podijeliti i prema položaju zavarivanja na vodoravne, okomite, vodoravno-okomite, nadglavne i tako dalje [2].

3.1.1. Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom

Postupci kod kojih se za ostvarivanje zavarenog spoja koristi toplinska energija nazivaju se postupci zavarivanja taljenjem, a oni kod kojih se za ostvarivanje zavarenog spoja koristi toplinsko-mehanička ili mehanička energija nazivaju se postupci zavarivanja pritiskom. U postupke zavarivanja taljenjem ubraja se i ručno elektrolučni (REL) postupak zavarivanja obloženom elektrodom (engl. *Shielded Metal Arc Welding – SMAW*) čiji se shematski prikaz može vidjeti na slici 6 [2]. Izvor struje za ovaj postupak zavarivanja može biti istosmjerni ili

izmjenični. Kod istosmjernog izvora struje elektroda može biti spojena na pozitivni ili negativni polaritet. Za dobivanje struje potrebne jakosti i napona zavarivanja koriste se generator istosmjerne struje, transformator, inventar i najčešće ispravljač [10].

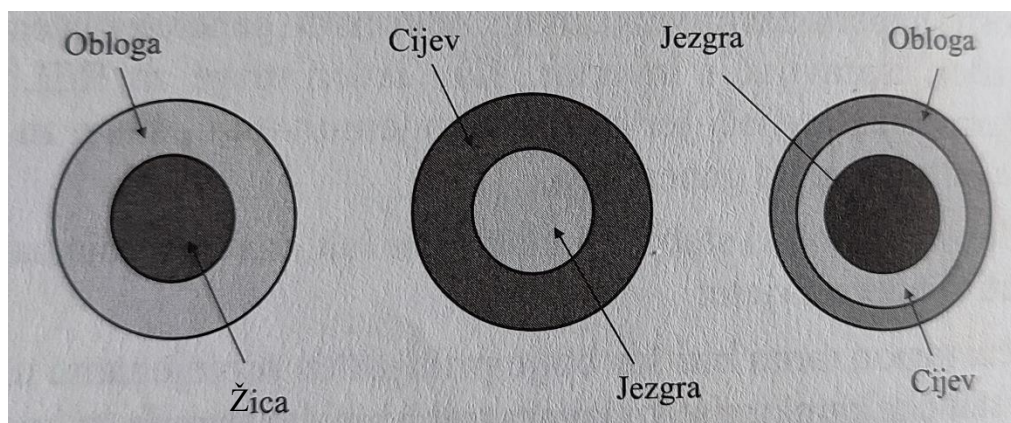


Slika 6. Shematski prikaz ručnog elektrodučnog zavarivanja obloženom elektrodom [2]

Uporaba obloženih elektroda osigurava odličnu zaštitu taline, kvalitetan zavareni spoj, uporabu izmjenične i istosmjerne struje te zavarivanje u svim položajima. Najčešće se koristi elektroda u obliku žice na koju je nanesena nemetalna obloga, a u primjeni je i elektroda u obliku cijevi s jezgrom, to jest s punjenjem unutar cijevi koje ima funkciju obloge. Na slici 7 prikazani su poprečni presjeci tipova obloženih elektroda za REL zavarivanje [2].

Pri izboru odgovarajuće elektrode za određeno zavarivanje promatra se niz stavki, a najvažniji je izbor elektrode prema osnovnom materijalu. Primjerice, za zavarivanje visokolegiranih čelika s niskolegiranim ili nelegiranim čelicima redovito se bira visokolegirana austenitna elektroda [2].

Na kvalitetu zavarenog spoja utječu mnogi čimbenici poput nagiba elektrode, brzine zavarivanja i duljine električnog luka. Kod REL postupka zavarivanja nabrojani parametri ovise isključivo o zavarivaču i njegovim vještinama [2].



Slika 7. Presjeci različitih vrsta obloženih elektroda za REL postupak zavarivanja [2]

3.1.2. Zavarivanje raznorodnih materijala

Zavarivanje raznorodnih materijala odnosi se na zavarivanje različitih vrsta čelika, navarivanje nelegiranog ili niskolegiranog čelika zaštitnim slojem nehrđajućeg čelika i zavarivanje istorodnih osnovnih materijala, ali uz primjenu dodatnog materijala značajno različitog kemijskog sastava. Zavarivanje raznorodnih materijala predstavlja složen inženjerski izazov koji zahtijeva detaljno planiranje, pažljivu kontrolu procesa i izbor odgovarajuće metode zavarivanja. Pravilnim razumijevanjem svojstava materijala i optimizacijom postupka moguće je postići kvalitetne i dugotrajne zavare, čak i kod materijala koji se u osnovi dosta razlikuju [2].

3.1.2.1. Zavarivanje austenitnog nehrđajućeg čelika s drugim čelicima

Poseban naglasak stavlja se na zavarljivost čelika. Zavarljivost je sposobnost materijala da formira kvalitetan i pouzdan zavareni spoj pod određenim uvjetima zavarivanja. Na zavarljivost kao kompleksnu veličinu utječe velik broj faktora poput kemijskog sastava, mikrostrukture, mehaničkih svojstava materijala, metoda i parametara zavarivanja koji se koriste. Postoje razni pristupi određivanju zavarljivosti čelika [11]. Preduvjet dobre zavarljivosti za opće konstrukcijske čelike je što niža vrijednost ugljičnog ekvivalenta C_e . Jedna od najčešće korištenih formula za određivanje ugljičnog ekvivalenta je:

$$C_e \approx \%C + \%Mn/4 + (\%Cr + \%Mo + \%V)/5 + (\%Ni + \%Cu)/10 \quad (1)$$

Zavarljivost će biti bolja što je maseni udio ugljika niži i što je niži stupanj legiranosti. Legiranost povisuje opasnost od spontanog zakaljivanja. Prihvatljiva vrijednost ugljičnog ekvivalenta je niža od 0,4. Čelici s višim ugljičnim ekvivalentom također se mogu kvalitetno zavariti, ali zahtijevaju predgrijavanje [3].

Austenitni nehrđajući čelici odlikuju se izvrsnom zavarljivošću. Kemijski sastav, osobito sadržaj sumpora i fosfora, značajno utječe na njihovu zavarljivost. Zbog velike količine topline koja se unosi tijekom zavarivanja, dolazi do promjena u mikrostrukturi osnovnog materijala unutar zone utjecaja topline. Na granicama austenitnih zrna mogu se formirati karbidi i druge štetne faze, što može dovesti do interkristalne korozije. Također, naprezanja koja mogu ostati u metalu zavara i zoni utjecaja topline mogu uzrokovati napetosnu koroziju.

Pri zavarivanju austenitnog nehrđajućeg čelika s drugim čelicima, primjerice općim konstrukcijskim čelicima, može doći do mnogih problema. Na primjer, ako je spoj općeg konstrukcijskog čelika s austenitnim nehrđajućim čelikom izložen visokoj temperaturi pri naknadnoj toplinskoj obradi ili tijekom eksploatacije, može doći do difuzije ugljika. Difuzija ugljika stvorit će osiromašene zone, čija je čvrstoća manja, i zone obogaćene ugljikom, čija je čvrstoća veća, a istežljivost niža [2].

Također, može doći do pojave pukotina na mjestu spoja zbog razlike u koeficijentima linearnog istežanja materijala. Taj problem se može spriječiti ako se u procesu zavarivanja koriste elektrode na bazi nikla koje će doprinijeti tome da koeficijent linearnog istežanja zavarenog spoja bude što sličniji koeficijentima osnovnog materijala. To će smanjiti vjerojatnost nastanka toplinskih naprezanja i nastanka pukotina u spoju zbog temperaturnih promjena [2].

Zavarivanje austenitnog nehrđajućeg čelika s ostalim čelicima, na primjer općim konstrukcijskim čelicima, može biti uspješno uz pravilno planiranje, izbor odgovarajućih dodatnih materijala, kontrolu toplinskog unosa i izbor optimalnog postupka zavarivanja. Ključno je razumjeti razlike u kemijskim sastavima i mehaničkim svojstvima materijala kako bi se izbjegle poteškoće tijekom zavarivanja, osigurala dobra kvaliteta zavarenog spoja i smanjili rizici od nastanka defekata ili degradacije materijala [2].

3.1.3. Postupci kontrole zavarenog spoja

Zavar predstavlja kritično mjesto u konstrukcijama, stoga su od iznimne važnosti postupci kontrole prije, tijekom i poslije zavarivanja, koje treba provoditi organizirano i dosljedno [12].

Kontrola prije zavarivanja uključuje mnoge postupke poput kontrole projektne i radioničke dokumentacije, kontrole osnovnog i dodatnog materijala, provjere zavarivača i postupka zavarivanja i drugo [12].

Neki od postupaka kontrole tijekom zavarivanja su kontrola pripajanja, kontrola postupka zavarivanja, kontrola redoslijeda zavarivanja te kontrola parametara zavarivanja [12].

U svrhu dokazivanja kvalitete zavarenog spoja često se koriste manje složene analize koje uključuju mehanička ispitivanja, kemijsku analizu i metalografska ispitivanja. Sve navedene analize provode se nakon zavarivanja i ubrajaju se u razorne metode. Osim razornih metoda, za dokazivanje kvalitete zavarenog spoja, postoje i brojne nerazorne metode ispitivanja i kontrole [12].

U eksperimentalnom dijelu rada naglasak je stavljen na postupke kontrole zavarenog spoja nakon zavarivanja. Među provedenim postupcima su mehanička i metalografska ispitivanja.

Mehanička ispitivanja odnose se na vlačna ispitivanja, savojna ispitivanja, mjerenje tvrdoće i ostalo. Vlačnim ispitivanjem epruvete zavarenog spoja određuje se vlačna čvrstoća najslabijeg mjesta zavarenog spoja, a savojnim ispitivanjem ispravnost odabranih parametara zavarivanja i sposobnost ZUT-a da podnese savojna opterećenja. Mjerenje tvrdoće provodi se u karakterističnim točkama na metalografskom uzorku čime se određuje jednolikost svojstava po presjeku zavarenog spoja [12].

Metalografska ispitivanja odnose se na analizu makrostrukture zavarenog spoja koja se izvodi na pripremljenom makroizbrusku i analizu mikrostrukture zavarenog spoja koja se izvodi na pripremljenom mikroizbrusku. Makroizbrusci i mikroizbrusci su uzorci dobiveni izrezivanjem iz punog presjeka zavarenog spoja, nakon čega im se brusi, polira te nagriza površina. Po potrebi, zbog lakše manipulacije, izrezani uzorci mogu se zaliti u polimernu masu. Makroizbrusci se analiziraju vizualnim pregledom, a mikroizbrusci s pomoću mikroskopa, povećanjima od nekoliko do više od stotinu tisuća puta. Iz makroizbruska možemo dobiti brojne podatke. Izgled i širina ZUT-a pruža podatak o potrebi naknadne toplinske obrade zavarenog spoja. Popunjenost presjeka, nadvišenja lica i korijena i slično daju podatak o urednosti izvedenog zavarenog spoja. Uvid u veličinu unosa topline i ravnomjernost polaganja slojeva dobije se promatranjem broja, veličine i rasporeda slojeva. To su samo neki od podataka koji se mogu dobiti analizom makrostrukture zavarenog spoja [12].

Sve navedene kontrole, uz mnoge druge, osiguravaju kvalitetu i pouzdanost zavarenih spojeva, čime se doprinosi sigurnosti i dugovječnosti zavarenih konstrukcija.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

4.1. Cilj eksperimentalnog dijela rada i provedena ispitivanja

Cilj eksperimentalnog rada je karakterizacija zavarenog spoja između ugljičnog općeg konstrukcijskog čelika i nehrđajućeg austenitnog čelika. Pod karakterizacijom zavarenog spoja podrazumijeva se niz različitih metoda i tehnika za kvantitativno mjerenje, kvalitativno ispitivanje, interpretaciju i razumijevanje svojstava zavarenog spoja. Kvalitetno provedena karakterizacija zavarenog spoja pruža cjelovit uvid u svojstva i performanse zavarenog spoja, što omogućava donošenje informiranih odluka o kvaliteti i prikladnosti spoja za specifične primjene.

U tu svrhu, u ovom eksperimentalnom radu, na zavarenom spoju, provedena su sljedeća ispitivanja:

- statičko vlačno ispitivanje
- savojno ispitivanje
- analiza makrostrukture
- analiza mikrostrukture
- mjerenje mikrotvrdoće (HV0,2)
- mjerenje tvrdoće (HV10).

Eksperimentalni dio rada obavljen je dijelom u Mehaničko-metalografskom laboratoriju na Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologije u Zagrebu, a dijelom u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

4.2. Materijal za ispitivanje

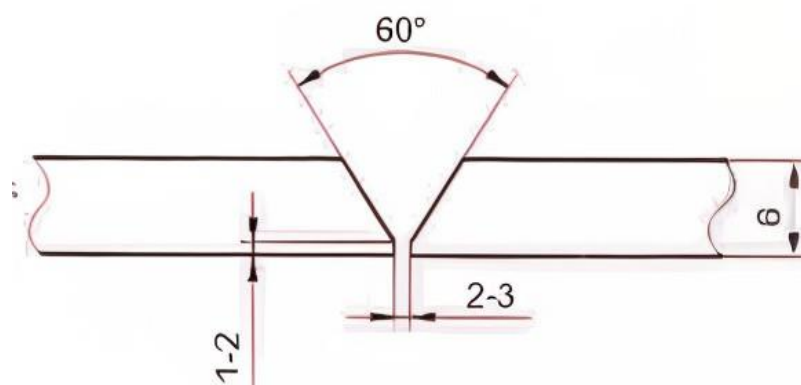
Navedena ispitivanja provedena su na zavarenom spoju između ploča općeg konstrukcijskog čelika i nehrđajućeg austenitnog čelika. Zavareni spoj prikazan je na slici 8. Opći konstrukcijski čelik ima izvornu oznaku JIS G3101:20 SS400 prema Japanskom standardu (engl. *Japanese Industrial Standards – JIS*), a ekvivalentna oznaka prema hrvatskim normama HRN EN 10027-1:2016 i HRN EN 10027-2:2015 bila bi S275JR (1.0044) [13,14]. Izvorna oznaka nehrđajućeg austenitnog čelika prema američkoj normi (engl. *American Society for Testing and Materials – ASTM*) je 316L što bi prema hrvatskim normama bio čelik oznake X2CrNiMo17-12-2 (1.4404). Debljina i jedne i druge ploče iznosila je 6 mm. Prema normi opći konstrukcijski čelik

oznake S275JR ne treba imati zajamčen kemijski sastav, već samo mehanička svojstva. Ipak, proizvođač deklaracijom navodi kemijski sastav čelika prikazan u tablici 1, a mehanička svojstva prikazana su u tablici 2. Kemijski sastav navedenog nehrđajućeg austenitnog čelika zajamčen je od strane proizvođača i nalazi se u tablici 3, a njegova zajamčena mehanička svojstva prikazana su u tablici 4. Kao dodatni materijal za zavarivanje korištena je elektroda za ručno elektrolučno zavarivanje, označena prema normi EN ISO 3581-A: E 23 12 L R 3 2 [15]. Ovakva elektroda koristi se za zavarivanje nehrđajućih čelika, posebno u slučajevima gdje je potrebno spojiti nehrđajući čelik s ugljičnim čelikom ili drugim nehrđajućim čelicima s različitim sastavima. Takvi spojevi su tipični za industrije koje zahtijevaju visoku otpornost na koroziju i visoke temperature. Promjer elektrode iznosio je 2,5 mm, a duljina 300 mm. Navedenu elektrodu moguće je koristiti u svim pozicijama pri zavarivanju. Kemijski sastav elektrode, deklariran od strane proizvođača, prikazan je u tablici 5, a mehanička svojstva, također deklarirana od strane proizvođača, u tablici 6.

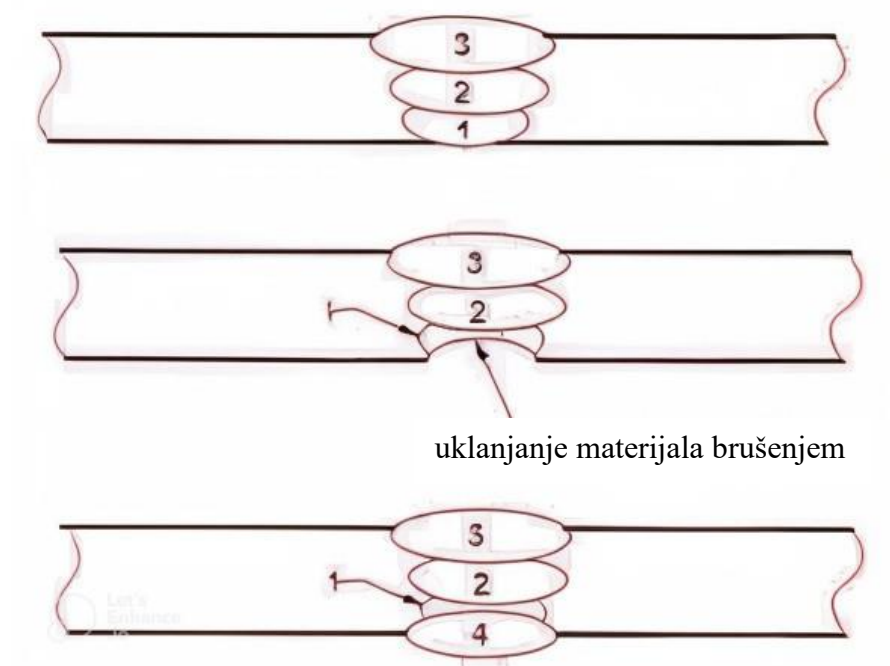
Za zavarivanje je korišten postupak ručnog elektrolučnog zavarivanja obloženom elektrodom (engl. *Shielded Metal Arc Welding* – SMAW). Ploče raznorodnih čelika zavarene su u obliku sučeonog V-spoja. V-žlijeb oblikovan je brušenjem rubova čeličnih ploča prije početka zavarivanja. Skica pripreme spoja prikazana je na slici 9. Smjer zavarivanja bio je vertikalno prema gore, a tehnika zavarivanja povlačenje i njihanje. Zavarivanje je bilo višeslojno, a redoslijed polaganja slojeva prikazan je na slici 10. Za ovaj postupak zavarivanja korištena je istosmjerna struja jakosti od 45 A do 60 A. Prvi sloj odrađen je s negativnim polaritetom, što omogućava veću penetraciju zavara u osnovni materijal. Ostali slojevi odrađeni su s pozitivnim polaritetom, što osigurava stabilniji električni luk, bolju kontrolu nad provođenjem postupka i estetski prihvatljiviji izgled spoja.



Slika 8. Zavareni spoj čelika S275JR i čelika X2CrNiMo17-12-2



Slika 9. Skica pripreme spoja, V-žlijeb



Slika 10. Redosljed polaganja slojeva pri zavarivanju

Tablica 1. Kemijski sastav općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR

Maseni udio elemenata, %								
C	Si	Mn	S	P	Cr	Al	B	Fe
0,17	0,097	0,2	0,002	0,006	0,04	0,014	<0,0003	ostatak

Tablica 2. Mehanička svojstva općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR

$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	A, %
283	445	24

Tablica 3. Kemijski sastav austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2

Maseni udio elemenata, %									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N	Fe
0,02	0,45	0,89	0,033	0,001	17,1	10,1	2,03	0,04	ostatak

Tablica 4. Mehanička svojstva austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2

$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	A, %
316	583	55

Tablica 5. Kemijski sastav dodatnog materijala oznake E 23 12 L R 3 2

Maseni udio elemenata, %									
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
0,03	0,78	0,8	0,02	0,011	23,3	12,5	0,04	0,06	0,09

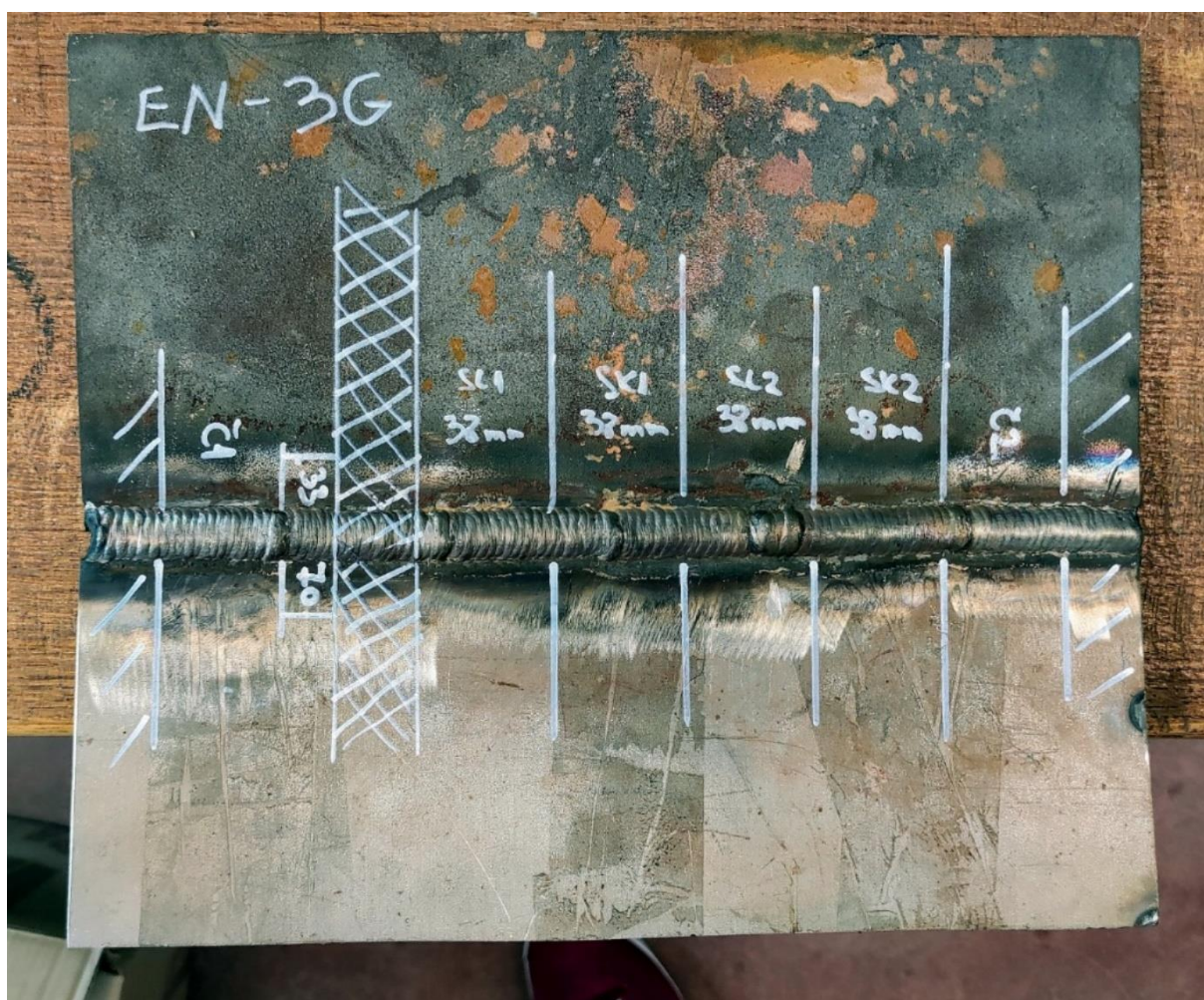
Tablica 6. Mehanička svojstva dodatnog materijala oznake E 23 12 L R 3 2

$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	A, %
470	580	32

4.3. Rezultati provedenih ispitivanja

Za sva provedena ispitivanja, u svrhu karakterizacije zavarenog spoja, izrezani su potrebni uzorci iz zavarene ploče prikazane na slici 11. Svi uzorci izrezani su vodenim mlazom, u propisanim oblicima i dimenzijama.

Uzorci s oznakama Č1 i Č2 korišteni su za statičko vlačno ispitivanje. Na uzorcima SL1 i SL2 izvedeno je savojno ispitivanje sa strane lica zavara, a na uzorcima SK1 i SK2 savojno ispitivanje sa strane korijena zavara. Iz crtkanog područja izrezani su uzorci za analizu makrostrukture i mikrostrukture te za mjerenje mikrotvrdoće i tvrdoće zavarenog spoja.



Slika 11. Ploča iz koje su izrezani uzorci za ispitivanja zavarenog spoja

4.3.1. Statičko vlačno ispitivanje

Statičko vlačno ispitivanje provedeno je u Mehaničko-metalografskom laboratoriju na Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologije u Zagrebu prema normi HRN EN ISO 6892-1:2019 [16]. Navedena norma specificira metodu ispitivanja vlačne čvrstoće metalnih materijala pri sobnoj temperaturi. Statičko vlačno ispitivanje provedeno je na dva uzorka, pri temperaturi od 25 °C. Dimenzije uzoraka prikazane su u tablici 7. Ispitivanje je provedeno na hidrauličkoj kidalici 30 TUZ 757 300 kN proizvođača Otto Wolpert Werke GmbH, prikazanoj na slici 12. Uzorci su opterećeni vlačnom silom do trenutka pucanja. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 8. Do loma je došlo u osnovnom materijalu, u općem konstrukcijskom čeliku, što se može vidjeti na slici 13. Izmjerene vrijednosti vlačne čvrstoće zadovoljavaju propisane vrijednosti, deklarirane od strane proizvođača za ovaj čelik.



Slika 12. Univerzalna kidalica



Slika 13. Uzorci nakon provedenog statičkog vlačnog ispitivanja

Tablica 7. Rezultati statičkog vlačnog ispitivanja

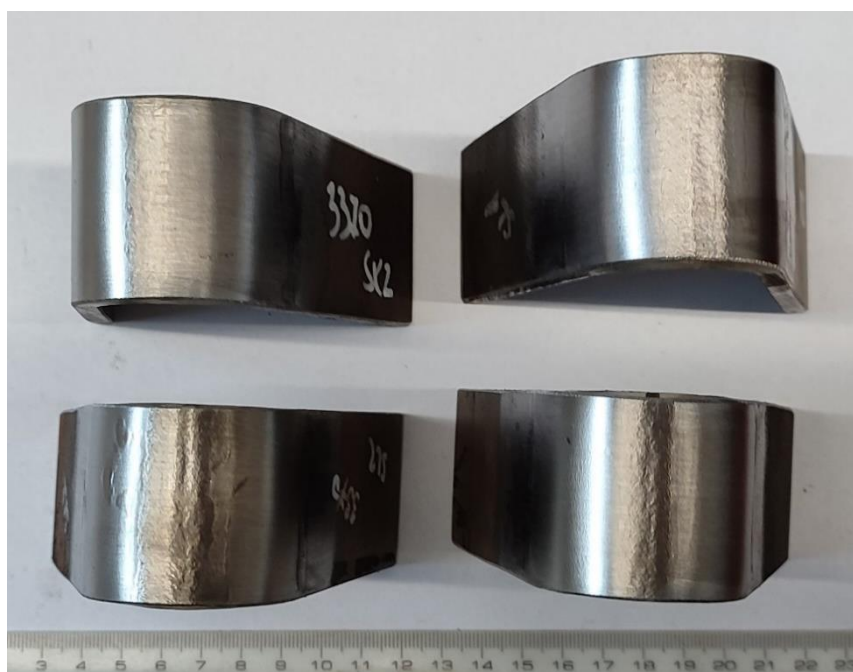
uzorak	dimenzije poprečnog presjeka, mm	R_m , MPa
1	18,98 × 5,33	486
2	18,99 × 5,50	504

4.3.2. Savojno ispitivanje

Savojno ispitivanje je provedeno u Mehaničko-metalografskom laboratoriju na Zavodu za ispitivanje, zavarivanje i tehnologije u Zagrebu. Ispitivanje je provedeno metodom savijanja u tri točke prema normi HRN EN ISO 5173:2023 [17]. Kao i kod statičkog vlačnog ispitivanja, uzorci se sastoje od zavarenog dijela i od dijelova osnovnih materijala. Ispitivanje je provedeno na četiri ispitna uzorka, a oblik i dimenzije uzorka također su propisane navedenom normom. Svi uzorci su imali iste dimenzije poprečnog presjeka, 38 mm × 5 mm. Dva uzorka savijana su na lice zavara, a druga dva na korijen zavara. Ispitivanja su provedena na univerzalnoj kidalici 30 TUZ 757 300 kN, proizvođača Otto Wolpert Werke GmbH, pri temperaturi od 25 °C. Promjer trna preko kojeg su savijane epruvete iznosio je 30 mm, razmak između oslonaca bio je 44 mm, a kut savijanja 180°. Na slici 14 prikazani su savijeni uzorci nakon provedenog ispitivanja. Nakon ispitivanja vizualno se kontrolira površina koja je najjače plastično deformirana. Ni na jednom od četiri ispitana uzorka nisu uočene pukotine, slika 15, što upućuje na dobru kvalitetu izvedenog zavarenog spoja.



Slika 14. Uzorci nakon ispitivanja savojne čvrstoće



Slika 15. Kontrolirana površina ispitnih uzoraka nakon ispitivanja savojne čvrstoće

4.3.3. Metalografska analiza

4.3.3.1. Priprema uzoraka za analizu makrostrukture i mikrostrukture zavarenog spoja

Priprema uzoraka zavarenog spoja sastojala se od sljedećih koraka:

- izrezivanje
- brušenje
- poliranje
- nagrivanje.

Navedenim koracima pripremljena su dva uzorka zavarenog spoja, jedan za analizu makrostrukture zavarenog spoja i jedan za analizu mikrostrukture zavarenog spoja.

Izrezivanje uzoraka, brušenje i poliranje promatrane površine provedeni su na isti način za oba uzorka u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Nagrivanje za analizu mikrostrukture razlikovalo se od nagrivanja za analizu makrostrukture.

Postupak nagrivanja za analizu mikrostrukture proveo se također u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, dok se postupak nagrivanja za analizu makrostrukture odvio u Mehaničko-metalografskom laboratoriju na Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologije u Zagrebu.

Izrezivanje uzoraka

Izrezivanje reprezentativnog uzorka obavljeno je na uređaju Mecatome T260, prikazanom na slici 16. Mecatome T260 je poluautomatski stroj za precizno rezanje koji kombinira automatizaciju za visokokvalitetno rezanje s ručnim postavljanjem i podešavanjem.

Tijekom cijelog postupka odvija se i dotok vode na reznu ploču u svrhu hlađenja, podmazivanja i odnošenja strugotine iz područja rezanja.

Izrezani uzorak prikazan je na slici 17.

Za kvalitetnu metalografsku analizu zavarenog spoja potrebno je analizirati metal zavara, zonu utjecaja topline i osnovni materijal s obje strane zavarenog spoja, što je osobito važno kod zavarivanja različitih materijala.



Slika 16. Uređaj za izrezivanje uzorka

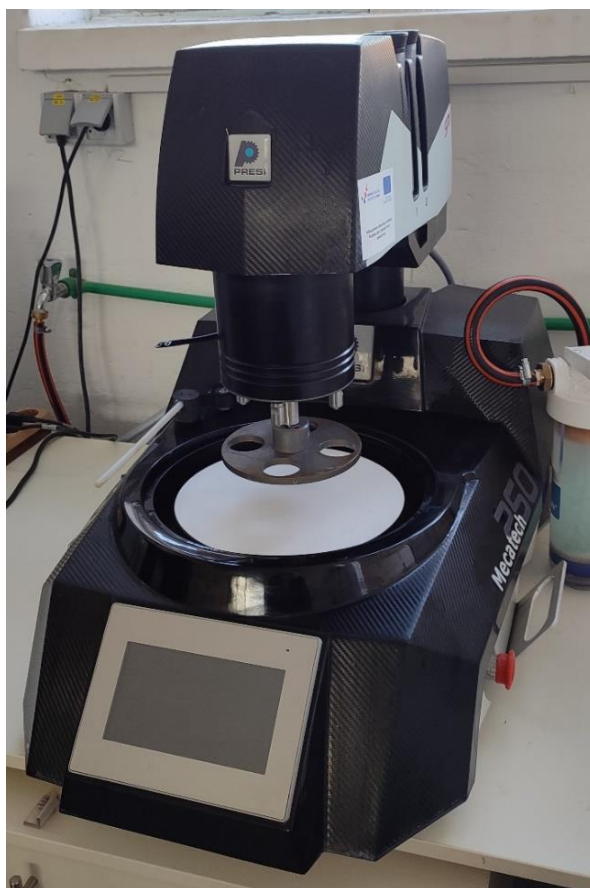


Slika 17. Izrezani uzorak

Brušenje uzoraka

Hrapavu površinu nakon rezanja treba pobrusiti i ispolirati kako bi se dobila ravna, glatka i sjajna površina za analizu mikrostrukture. Brušenje je provedeno na stroju za brušenje i poliranje Mechatech 250, prikazanom na slici 18. Brušenje je obavljeno ručno na brusnim papirima različite kvalitete.

Na ploči uređaja koja se rotirala brzinom od 300 okretaja u minuti, izmijenjeno je šest brusnih papira, od najgrubljeg do najfinijeg, oznaka P80, P320, P600, P1200, P2400, P4000. Tijekom svakog od šest koraka ovog postupka odvijao se i dotok vode u svrhu hlađenja, podmazivanja i odnošenja abradiranih čestica.



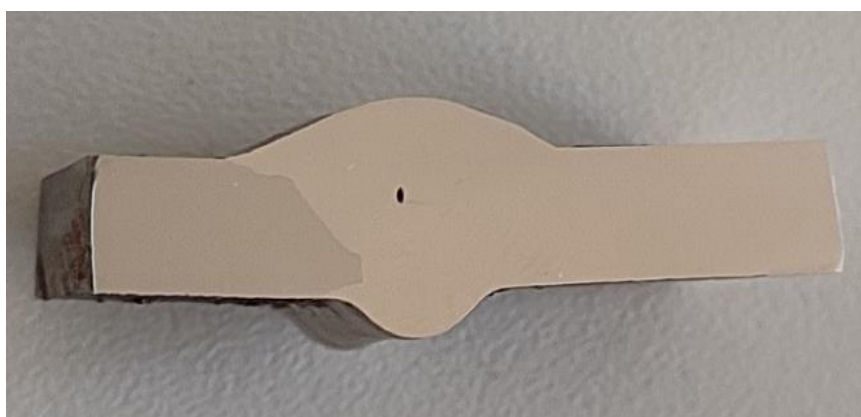
Slika 18. Uređaj za brušenje i poliranje

Poliranje uzoraka

Nakon brušenja površina uzorka se polira. Poliranje je, kao i brušenje, obavljeno na uređaju Mechatech 250. Na ploču uređaja postavljena je fina tkanina za poliranje koja se zajedno s pločom rotirala brzinom od 150 okretaja u minuti. Polirana površina uzorka bila je ručno

pritisnuta na ploču. Kao sredstvo za hlađenje i podmazivanje korišten je lubrikant. Postupak poliranja odvijao se u dva koraka. U prvom koraku za poliranje je korištena dijamantna pasta veličine zrna od 3 μm , a u drugom, tekućina za poliranje veličine zrna od 0,03 μm . Površina uzorka nakon poliranja može se vidjeti na slici 19. Ovako ispolirana površina može se promatrati pod mikroskopom kako bi se uočile eventualne nepravilnosti koje su vidljive u poliranom stanju (pore, pukotine, usahline i slično).

Nakon analize u poliranom stanju, površina uzorka se nagriza kako bi se promatrala mikrostruktura u nagrizenom stanju.



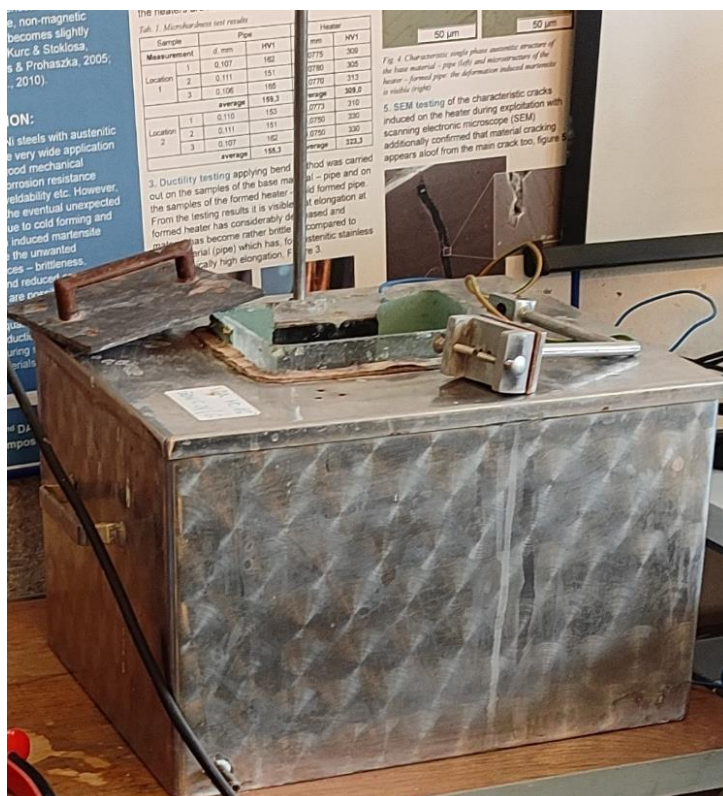
Slika 19. Metallografski uzorak s ispoliranom površinom

Nagrizanje uzoraka

Kako bi se mikrostruktura uzorka učinila vidljivom, pristupa se postupku nagrivanja. S obzirom na to da su kod ovog uzorka zavarivanjem spojene ploče dvaju različitih čelika, provedena su dva tipa nagrivanja: kemijsko i elektrokemijsko nagrivanje. Kemijsko nagrivanje provedeno je uranjanjem dijela uzorka od općeg konstrukcijskog čelika u otopinu Nitala (3 %-tna dušična kiselina u etilnom alkoholu) u trajanju od 20 sekundi. Elektrokemijsko nagrivanje provedeno je na zavaru i na dijelu uzorka od nehrđajućeg austenitnog čelika. Ovo nagrivanje provedeno je u komori u kojoj se nalazila 10 %-tna oksalna kiselina. Uređaj za elektrokemijsko nagrivanje, osim komore koju vidimo na slici 20, sastoji se još i od uređaja za podešavanje parametara. Taj uređaj prikazan je na slici 21. Elektrokemijsko nagrivanje trajalo je 30 sekundi, pod naponom od 10 V, a jakost struje iznosila je 5 A. Nakon postupaka nagrivanja uzorak je potrebno isprati vodom da se zaustavi daljnje nagrivanje. Površina uzorka nakon provedenog postupka

nagrivanja prikazana je na slici 22. Opisani postupak nagrivanja primjenjuje se za analizu mikrostrukture.

Kod karakterizacije zavarenih spojeva provodi se i analiza makrostrukture. U tu svrhu, kod ovog uzorka, nagrivanje je provedeno Vilella otopinom (1 g klorovodične kiseline, 5 ml pikrinske kiseline i 100 ml etanola).



Slika 20. Komora za elektrokemijsko nagrivanje



Slika 21. Uređaj za podešavanje parametara elektrokemijskog nagrivanja



Slika 22. Uzorak nakon postupka nagrizanja u svrhu analize mikrostrukture

4.3.3.2. Analiza makrostrukture uzorka

Makrostruktura zavarenog spoja prikazana je na slici 23.



Slika 23. Makrostruktura zavarenog spoja

Analiza je provedena prema normi HRN EN ISO 17639:2022 [18]. Jasno definirani profil i oblik zavara ukazuju na pravilno izveden V-spoj. Simetrija profila upućuje na precizno kontroliran postupak zavarivanja. Stabilnost u procesu i dobru tehniku zavarivanja potvrđuje i ravnomjerna širina zavara. To može značiti da je brzina zavarivanja bila konstantna i da je količina dodatnog materijala bila optimalna. Na slici je vidljiva potpuna penetracija zavara, što je jedan od najvažnijih pokazatelja kvalitete spoja. Potpuna penetracija osigurava čvrstoću i dugotrajnost zavarenog spoja, smanjujući rizik od pukotina ili drugih strukturnih slabosti. Linija staljivanja je glatka, bez vidljivih diskontinuiteta, što upućuje na dobru vezu između osnovnog i dodatnog materijala. Kvalitetna linija staljivanja znači da je došlo do pravilnog stapanja

materijala, a to je ključno za integritet zavarenog spoja. Kontura zavara je blago konveksna što dodatno upućuje na pravilnu tehniku zavarivanja. Pojedini prolazi nisu jasno izraženi, osim zadnjeg prolaza (prolaz broj 4, sa slike 10).

Unutar metala zavara mogu se uočiti sitne inkluzije i pore. Iako relativno male, prisutnost ovih defekata može utjecati na kvalitetu zavarenog spoja. Stoga bi daljnja analiza, uključujući analizu mikrostrukture, bila korisna za preciznije ocjenjivanje njihovog utjecaja.

4.3.3.3. Analiza mikrostrukture uzorka

Mikrostruktura uzorka analizirana je s pomoću svjetlosnog mikroskopa Olympus GX51 s integriranom kamerom koja snimljenu sliku mikrostrukture, radi daljnje analize, prikazuje na računalo. Mikroskop Olympus GX51, prikazan je na slici 24. Na navedenom mikroskopu moguće je promatrati strukturu uz povećanja od 50, 100, 200, 500 i 1000 \times .



Slika 24. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51

Analiza mikrostrukture osnovnog materijala

Na slikama 25 i 26 prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR, pri povećanjima od 100 i 200 \times .

Prema deklaraciji proizvođača čelik je isporučen u vruće valjanom stanju.

Polirana površina čelika nagrizena je Nitalom. Kako Nital ne nagriza feritnu fazu, a nagriza perlit, svijetla područja na slikama predstavljaju ferit, a tamnija područja predstavljaju perlit. Ferita ima puno više nego perlita, što je s obzirom na mali maseni udio ugljika, od oko 0,17 %, bilo očekivano. Mikrostruktura je relativno sitnozrnata i neusmjerena. Nema vidljivih defekata što upućuje na dobru kvalitetu materijala i dobru pripremu uzorka.

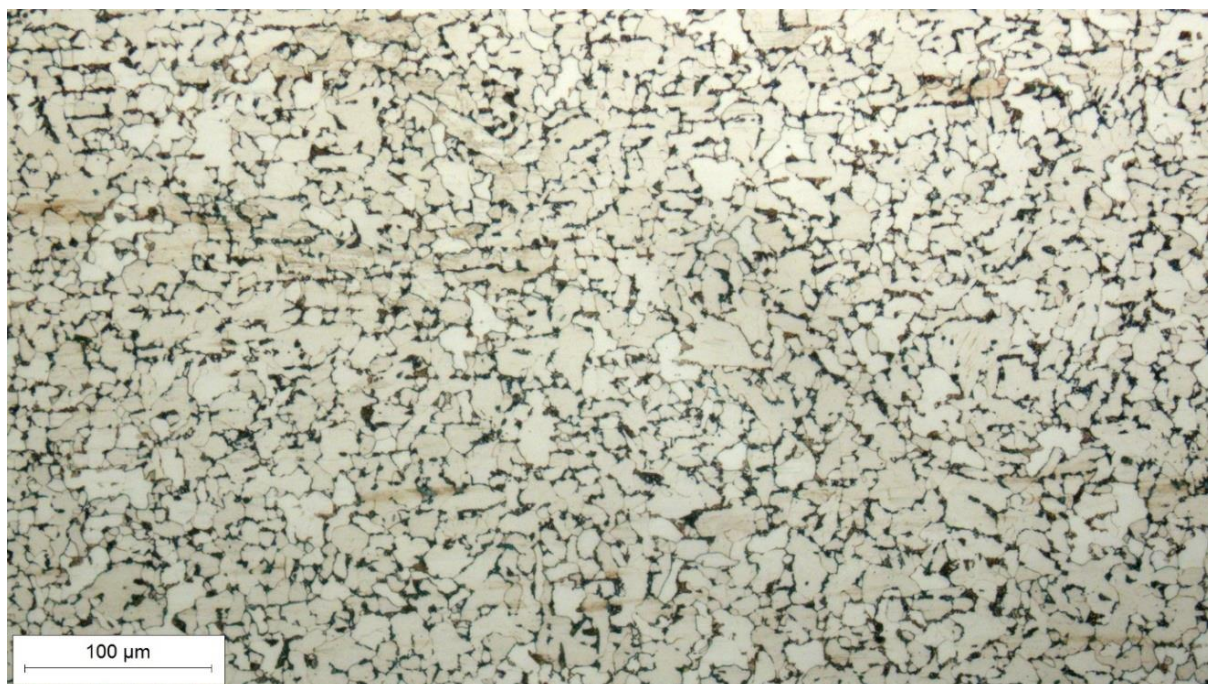
Na slikama 27 i 28 prikazana je mikrostruktura drugog osnovnog materijala, austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2. Mikrostruktura je prikazana pri povećanjima od 100 i 200 \times . Sastoji se od delta ferita i austenita kojeg ima više.

Delta ferit je izlučen u obliku tankih trakica što je posljedica intenzivne plastične obrade čelika. Trakice delta ferita ravnomjerno su raspoređene po cijelom promatranom presjeku.

Austenitna zrna su poligonalna, a mjestimice se vide kristali blizanci koji su karakteristični za mikrostrukturu austenitnih nehrđajućih čelika.



Slika 25. Mikrostruktura osnovnog materijala općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR, snimljena pri povećanju od 100 \times



Slika 26. Mikrostruktura osnovnog materijala općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR, snimljena pri povećanju od 200×



Slika 27. Mikrostruktura osnovnog materijala austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 100×



Slika 28. Mikrostruktura osnovnog materijala austenitnog nehrdajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 200×

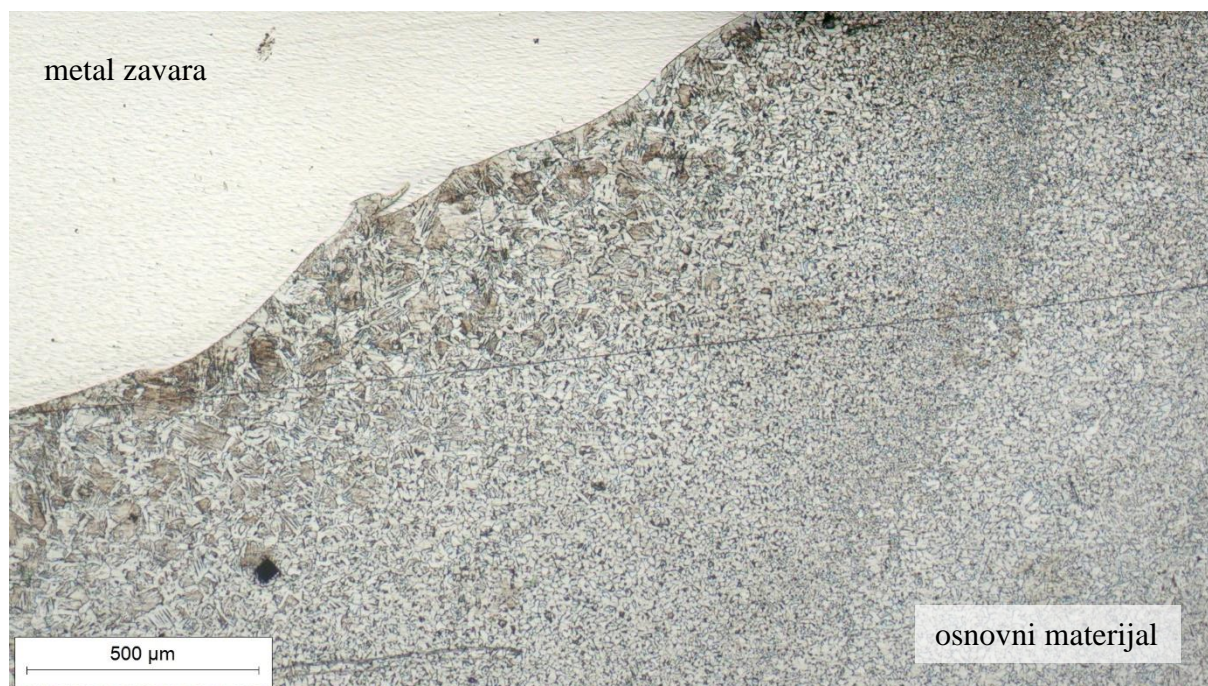
Analiza mikrostrukture zone utjecaja topline

Na slikama 29, 30 i 31 prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline sa strane općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR u tjemenu zavora, snimljena pri povećanjima od 50, 100 i 200×

Zbog velikog unosa topline tijekom zavarivanja u osnovnom materijalu, koji se nalazi blizu linije staljivanja, dolazi do značajnih mikrostrukturnih promjena. U odnosu na osnovni materijal zrna su puno krupnija, a mijenja se i udio ferita i perlita. To područje, čija je mikrostruktura u odnosu na osnovni materijal promijenjena, naziva se zona utjecaja topline. Linija staljivanja jasno je izražena, a zona utjecaja topline je relativno široka. Veća kristalna zrna, koja se nalaze bliže liniji staljivanja, pokazuju da je ta zona bila izložena višoj temperaturi ili duljem vremenu izlaganja toplini.

Na slikama 32, 33 i 34 prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline u sredini zavora. Mikrostruktura je snimljena pri povećanjima od 50, 100 i 200×

Mikrostrukturne promjene su dosta slične promjenama u zoni utjecaja topline u tjemenu zavora.



Slika 29. Mikrostruktura ZUT-a u tjemenu zavara, sa strane općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR, snimljena pri povećanju od 50×



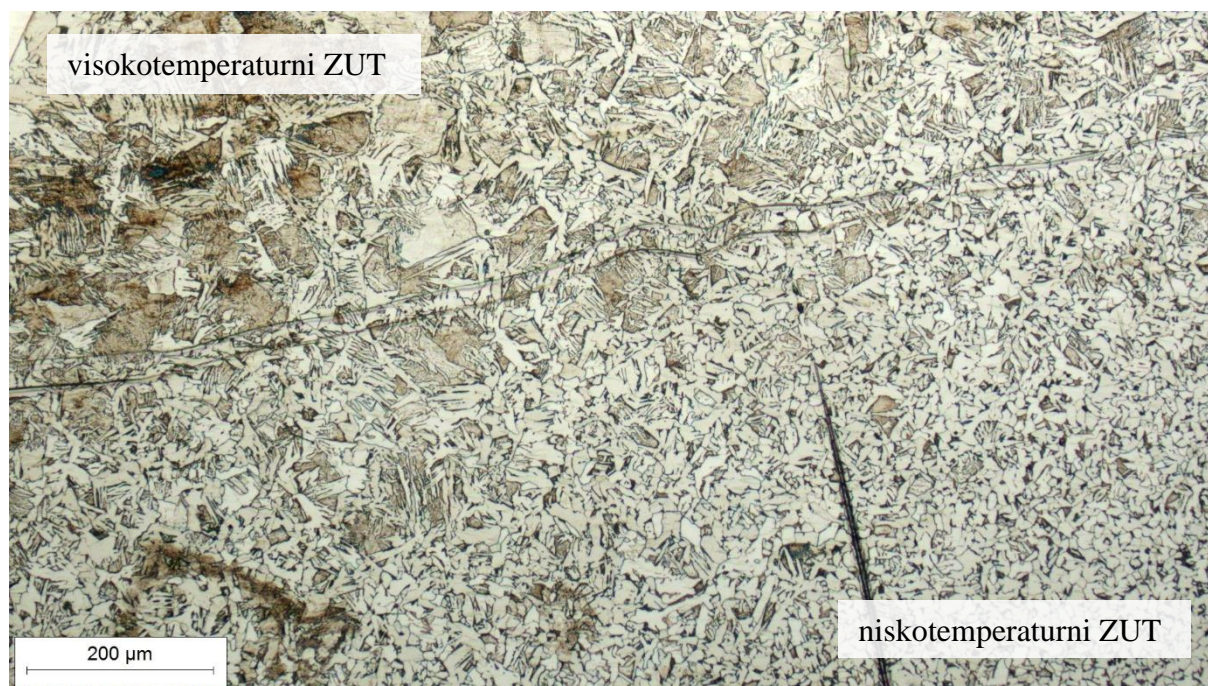
Slika 30. Mikrostruktura ZUT-a u tjemenu zavara, sa strane općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR, snimljena pri povećanju od 100×



Slika 31. Mikrostruktura ZUT-a u tjemenu zavora, sa strane općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR, snimljena pri povećanju od 200×



Slika 32. Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavora, sa strane općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR, snimljena pri povećanju od 50×



Slika 33. Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavara, sa strane općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR, snimljena pri povećanju od 100×



Slika 34. Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavara, sa strane općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR, snimljena pri povećanju od 200×

Na slikama 35, 36 i 37 prikazana je mikrostruktura zone utjecaja topline u tjemenu zavara sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2.

Mikrostruktura zone utjecaja topline u sredini zavara prikazana je na slikama 38, 39 i 40., a mikrostruktura zone utjecaja topline u korijenu zavara vidi se na slikama 41 i 42.

U sva tri navedena područja prikazana je mikrostruktura snimljena pri povećanjima od 50, 100 i 200 \times .

Linija staljivanja je jasno izražena od tjemena do korijena zavara, a zona utjecaja topline je vrlo uska. Uz liniju staljivanja, gdje je utjecaj topline najveći, došlo je do znatnog povećanja volumnog udjela delta ferita.

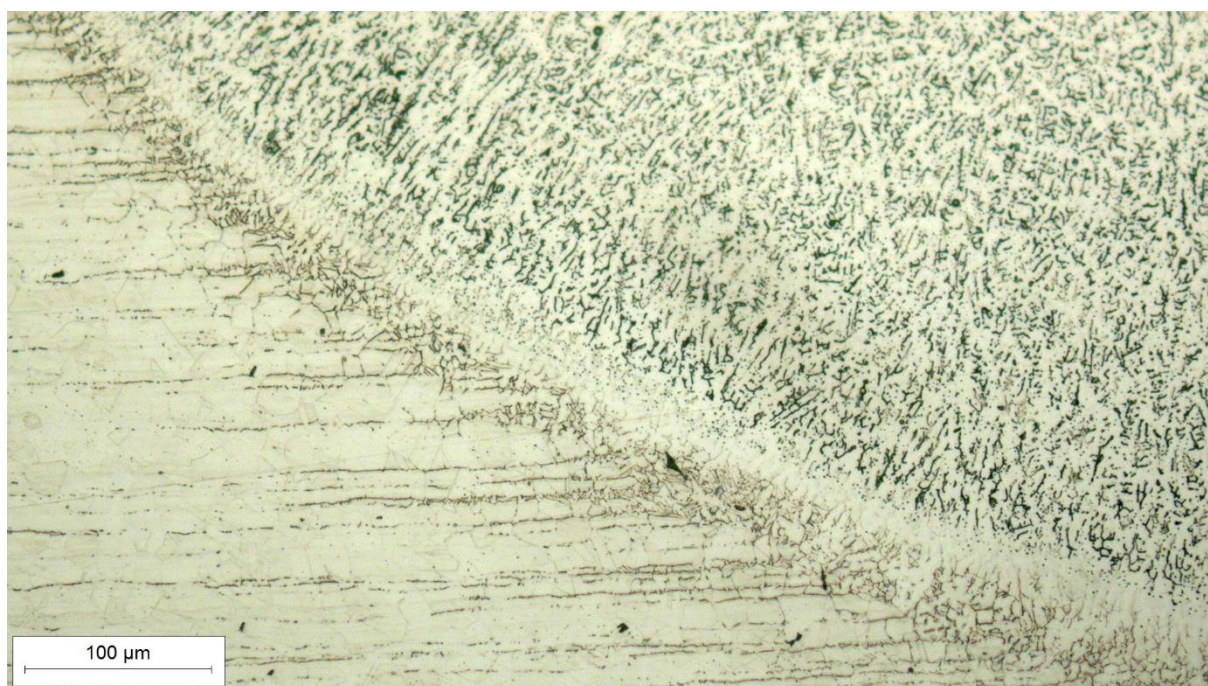
Zbog vrlo malog sadržaja ugljika u čeliku vjerojatno nije došlo do formiranja karbida.



Slika 35. Mikrostruktura ZUT-a u tjemenu zavara sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 50 \times



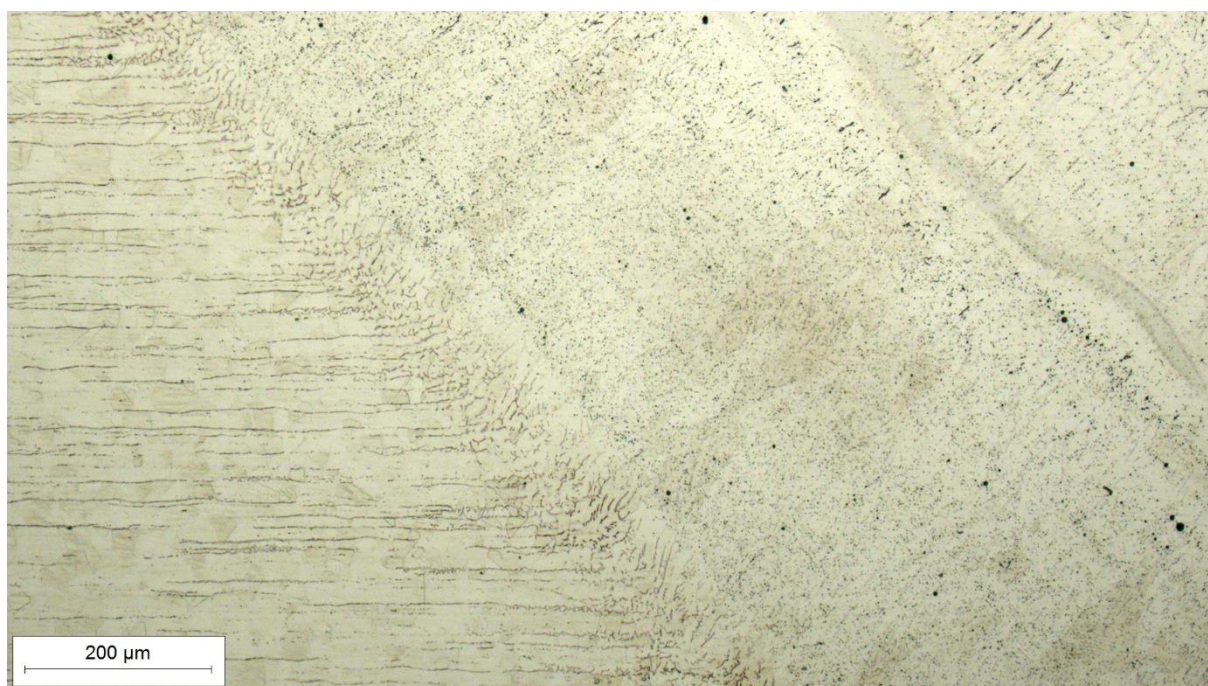
Slika 36. Mikrostruktura ZUT-a u tjemenu zavara sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 100×



Slika 37. Mikrostruktura ZUT-a u tjemenu zavara sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 200×



Slika 38. Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavara sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 50×



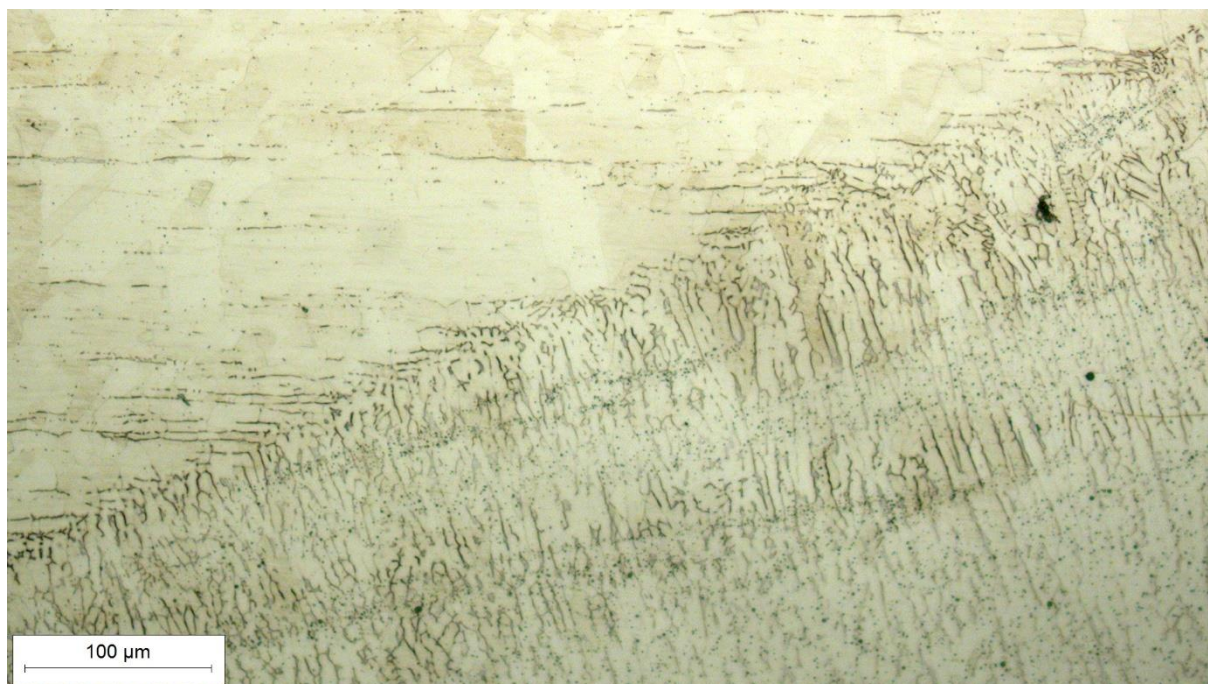
Slika 39. Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavara sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 100×



Slika 40. Mikrostruktura ZUT-a u sredini zavora sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 200×



Slika 41. Mikrostruktura ZUT-a u korijenu zavora sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 100×



Slika 42. Mikrostruktura ZUT-a u korijenu zavora sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2, snimljena pri povećanju od 200×

Analiza mikrostrukture metala zavora

Na sljedećim slikama (od 43 do 51) prikazana je mikrostruktura tjemena, sredine i korijena metala zavora, snimljena pri povećanjima od 50, 100 i 200×

Sva navedena područja imaju tipičnu ljevačku mikrostrukturu.

Mikrostruktura se sastoji od austenita (svijetla faza), kojeg ima više od 50 %. Tamnija područja predstavljaju delta ferit koji je izlučen u dendritičkim oblicima.

Delta ferit je u malim količinama poželjan u strukturi metala zavora zato što poboljšava otpornost na tople pukotine.

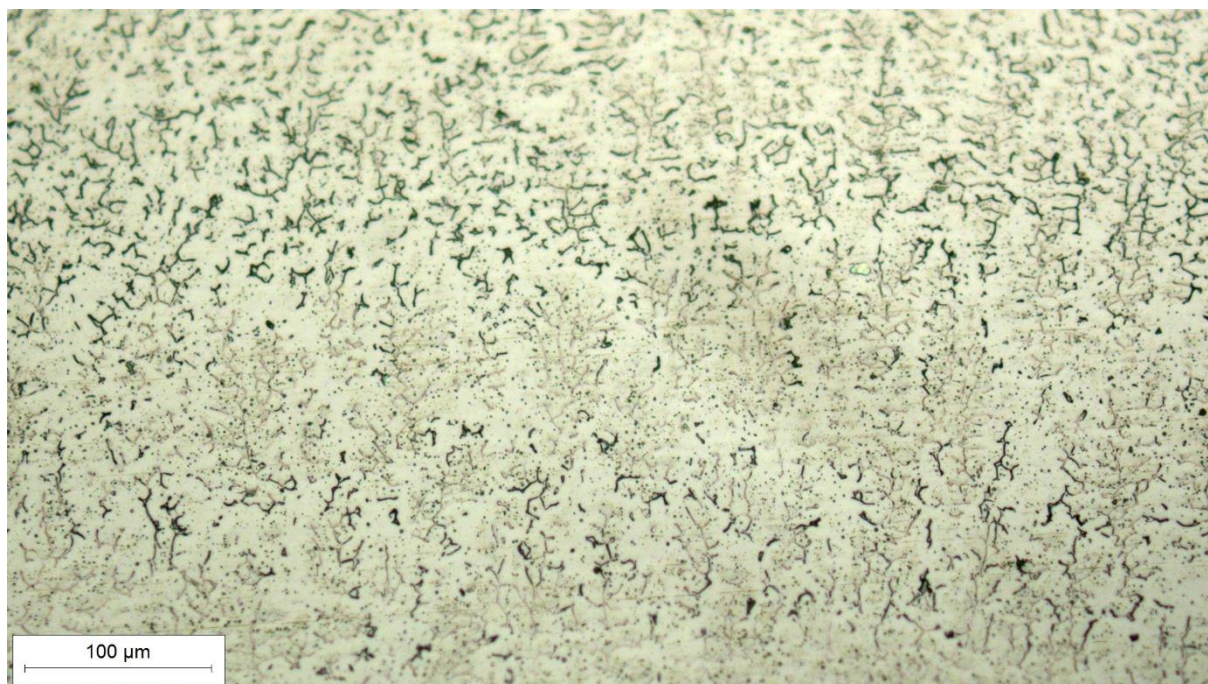
U sredini i korijenu metala zavora mjestimice se mogu uočiti vrlo sitne pore, što povećava opasnost od nastanka pukotina.



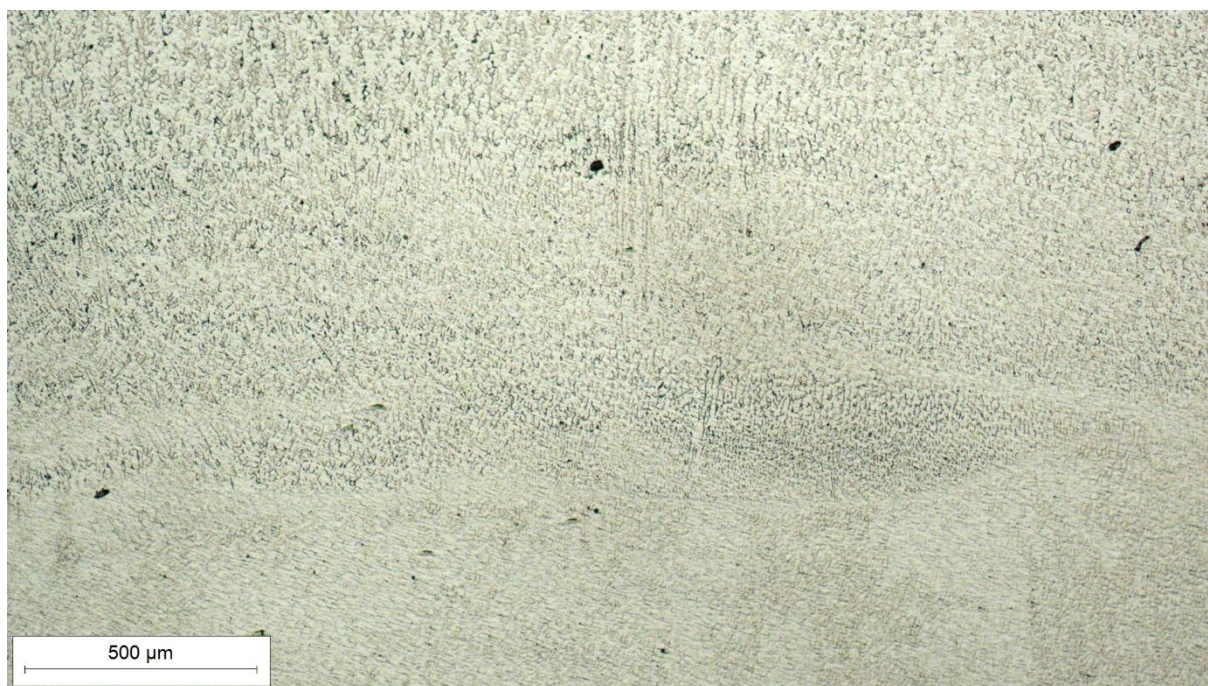
Slika 43. Mikrostruktura metala zavara u tjemenu, snimljena pri povećanju od 50×



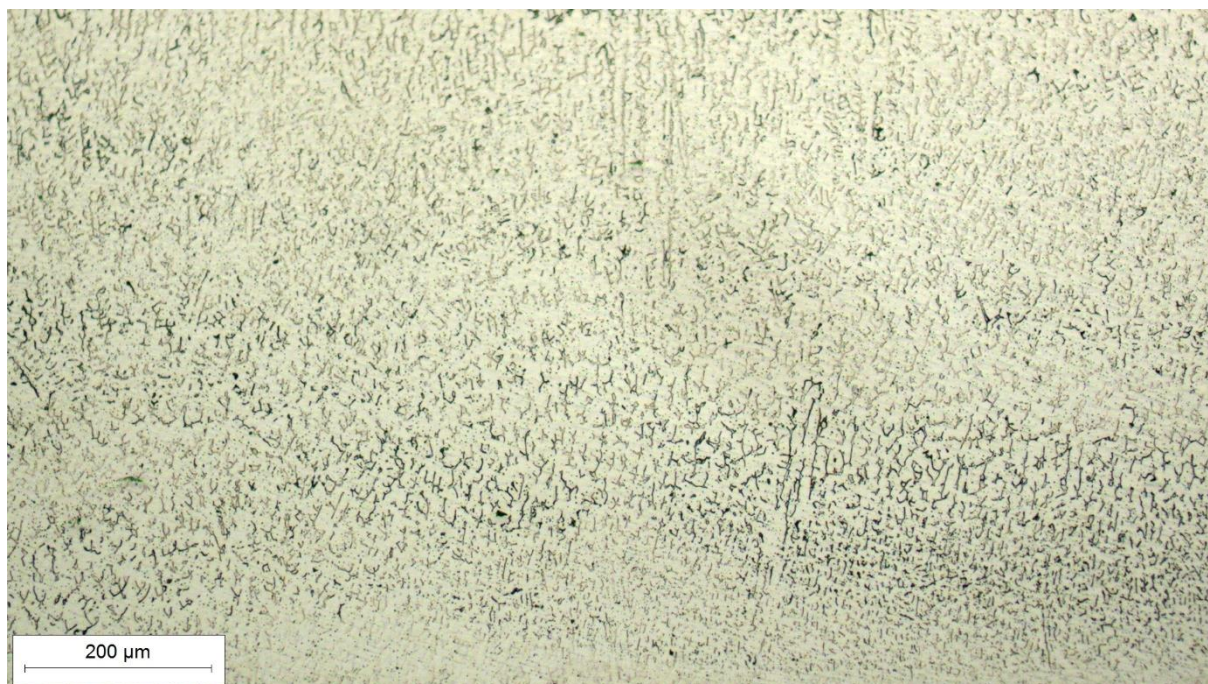
Slika 44. Mikrostruktura metala zavara u tjemenu, snimljena pri povećanju od 100×



Slika 45. Mikrostruktura metala zavara u tjemenu, snimljena pri povećanju od 200×



Slika 46. Mikrostruktura metala zavara u sredini, snimljena pri povećanju od 50×



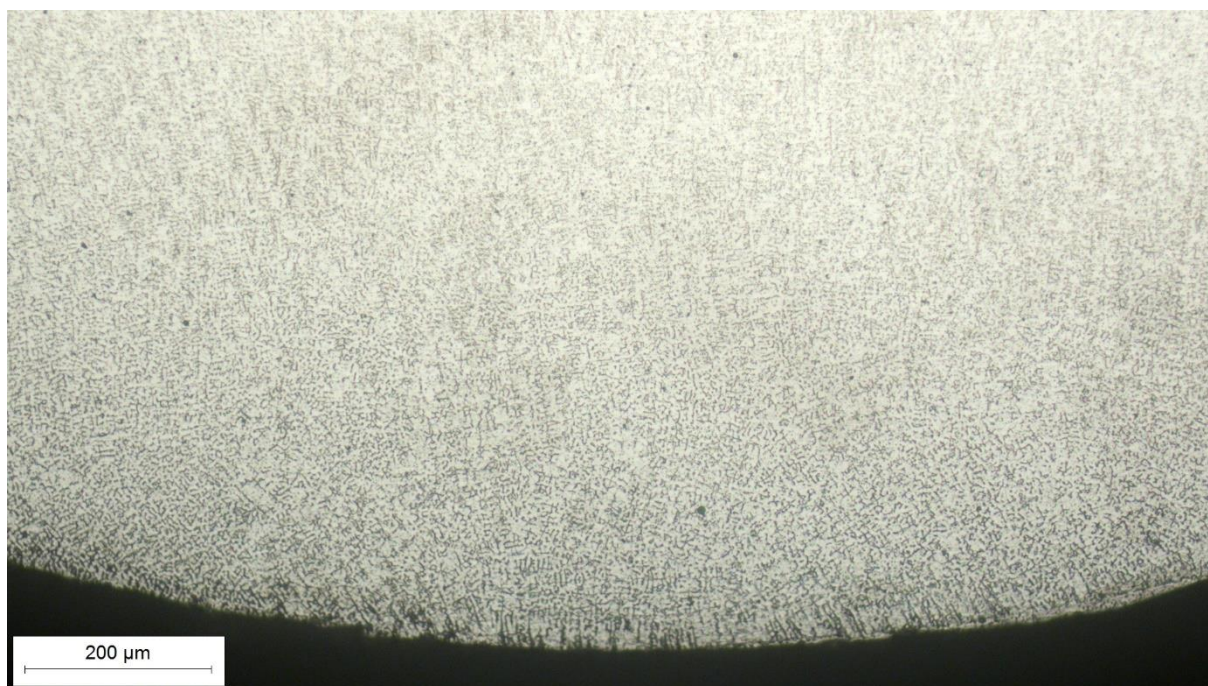
Slika 47. Mikrostruktura metala zavara u sredini, snimljena pri povećanju od 100×



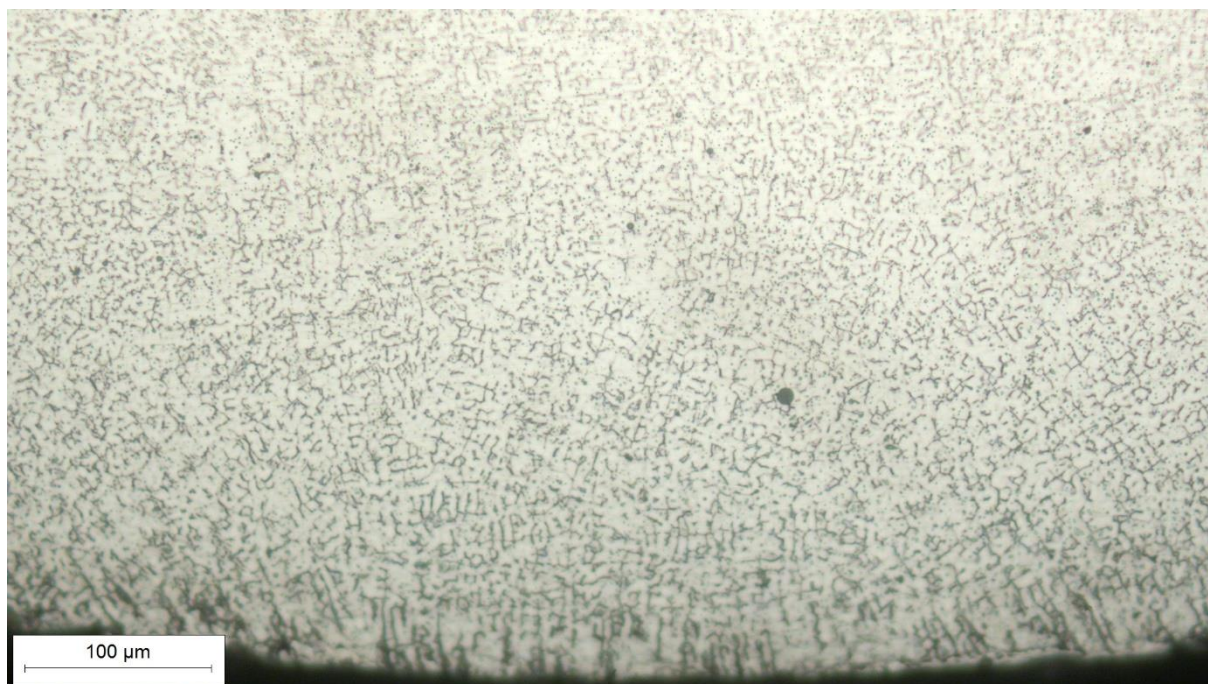
Slika 48. Mikrostruktura metala zavara u sredini, snimljena pri povećanju od 200×



Slika 49. Mikrostruktura metala zavara u korijenu, snimljena pri povećanju od 50×



Slika 50. Mikrostruktura metala zavara u korijenu, snimljena pri povećanju od 100×



Slika 51. Mikrostruktura metala zavara u korijenu, snimljena pri povećanju od 200×

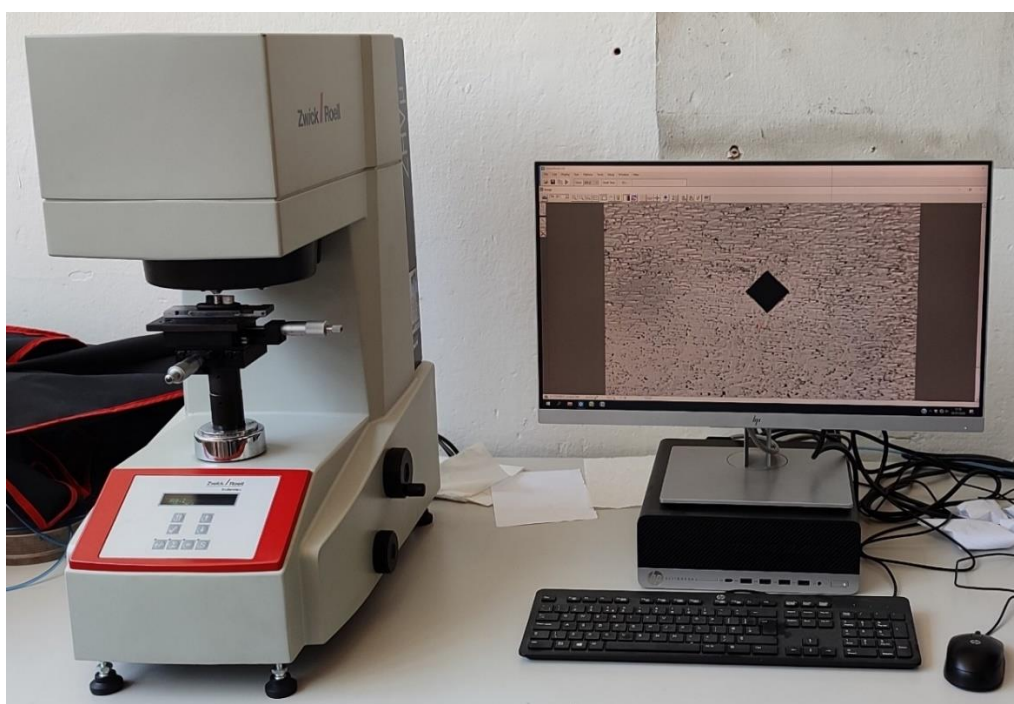
4.3.4. Mjerenje mikrotvrdoće zavarenog spoja, HV0,2

Mikrotvrdoća uzorka mjerena je u Laboratoriju za materijalografiju Zavoda za materijale na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Mjerenje je provedeno na uređaju Zwick/Roell ZHV μ , prikazanom na slici 52. Uređaj je specijaliziran za mjerenje mikrotvrdoće Vickersovom metodom. Vickersova metoda koristi dijamantnu piramidu za stvaranje otisaka pod određenim opterećenjem. Veličina otiska mjeri se s pomoću mikroskopa koji je integriran u uređaj. Prema formuli, za poznate dimenzije otiska i poznato primijenjeno opterećenje, izračuna se tvrdoća. Opterećenje primijenjeno u ovom mjerenju bilo je 1,96 N (HV0,2), a postiže se primjenom utega mase od 200 g. Mikrotvrdoća je mjerena u oba osnovna materijala uz rubove i u sredini ploče te u zoni utjecaja topline s obje strane zavara i u metalu zavara: u tjemenu, sredini i korijenu zavara. Na svakom navedenom lokalitetu provedena su po tri mjerenja, sveukupno 45 mjerenja. Područja mjerenja prikazana su na slici 53, a rezultati mjerenja navedeni su u tablicama od 8 do 12.

Srednja vrijednost izmjerene mikrotvrdoće osnovnog materijala općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR iznosi između 140 HV0,2 i 150 HV0,2. Srednja vrijednost izmjerene mikrotvrdoće osnovnog materijala austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2 iznosi između 171 HV0,2 i 176 HV0,2. U zoni utjecaja topline sa strane općeg konstrukcijskog čelika nije došlo do velikog povećanja tvrdoće uslijed značajnog unosa topline pri zavarivanju.

Srednja vrijednost izmjerene mikrotvrdoće je u rasponu od 142 HV_{0,2} do 159 HV_{0,2}. U zoni utjecaja topline sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika došlo je do većeg povećanja tvrdoće u odnosu na osnovni materijal. Srednje vrijednosti izmjerene mikrotvrdoće su u rasponu od 188 HV_{0,2} do 196 HV_{0,2}. U metalu zavara su najviše srednje vrijednosti izmjerene mikrotvrdoće, od 191 HV_{0,2} do 201 HV_{0,2}.

U dijagramima na slikama od 54 do 56 prikazane su srednje vrijednosti izmjerene mikrotvrdoće u tjemenu, sredini i korijenu zavara, za osnovni materijal, zonu utjecaja topline i metal zavara.



Slika 52. Zwick/Roell ZHV μ uređaj za mjerenje mikrotvrdoće



Slika 53. Područja na kojima je mjerena mikrotvrdoća HV_{0,2}

Tablica 8. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u osnovnom materijalu općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR

	1.	2.	3.	srednja vrijednost
tjeme zavara	151	146	152	150
sredina zavara	137	146	143	142
korijen zavara	136	141	144	140

Tablica 9. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u osnovnom materijalu austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2

	1.	2.	3.	srednja vrijednost
tjeme zavara	171	171	171	171
sredina zavara	174	166	183	174
korijen zavara	170	179	179	176

Tablica 10. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u ZUT-u sa strane općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR

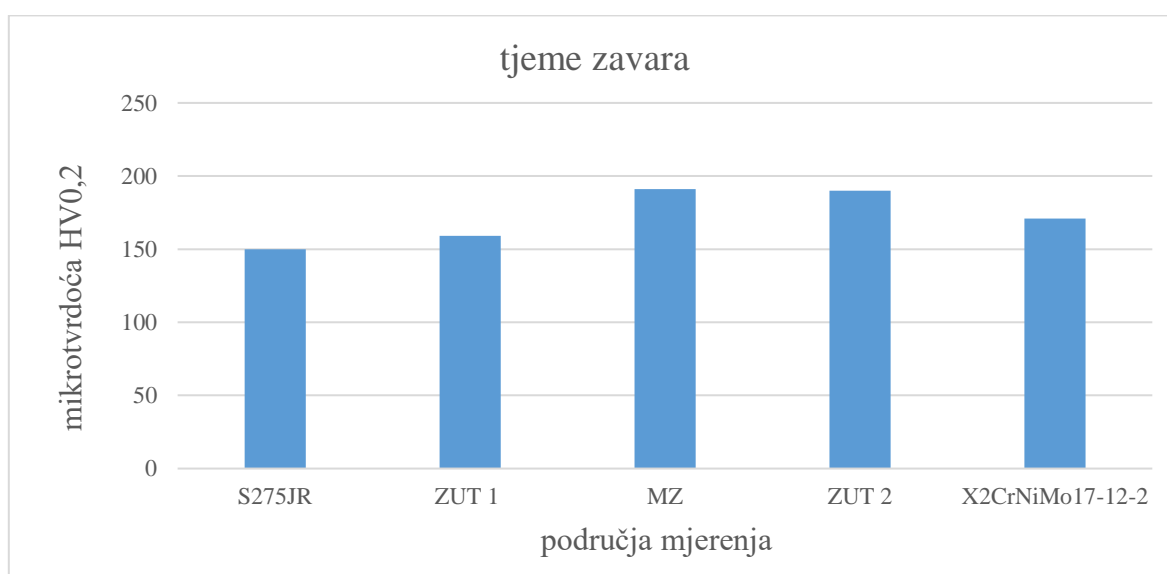
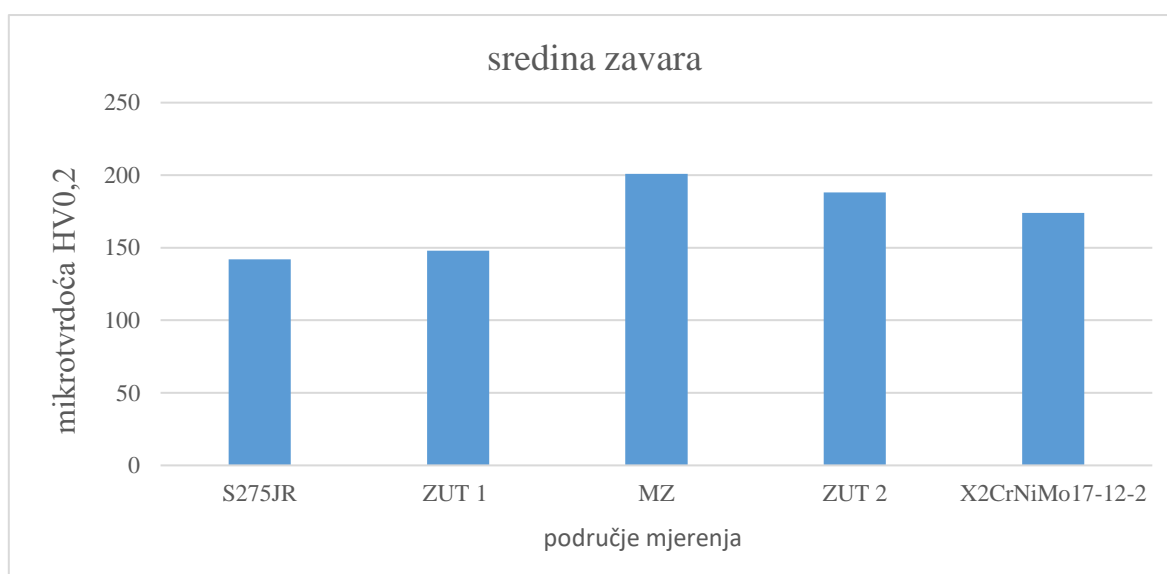
	1.	2.	3.	srednja vrijednost
tjeme zavara	155	152	170	159
sredina zavara	144	148	153	148
korijen zavara	130	148	148	142

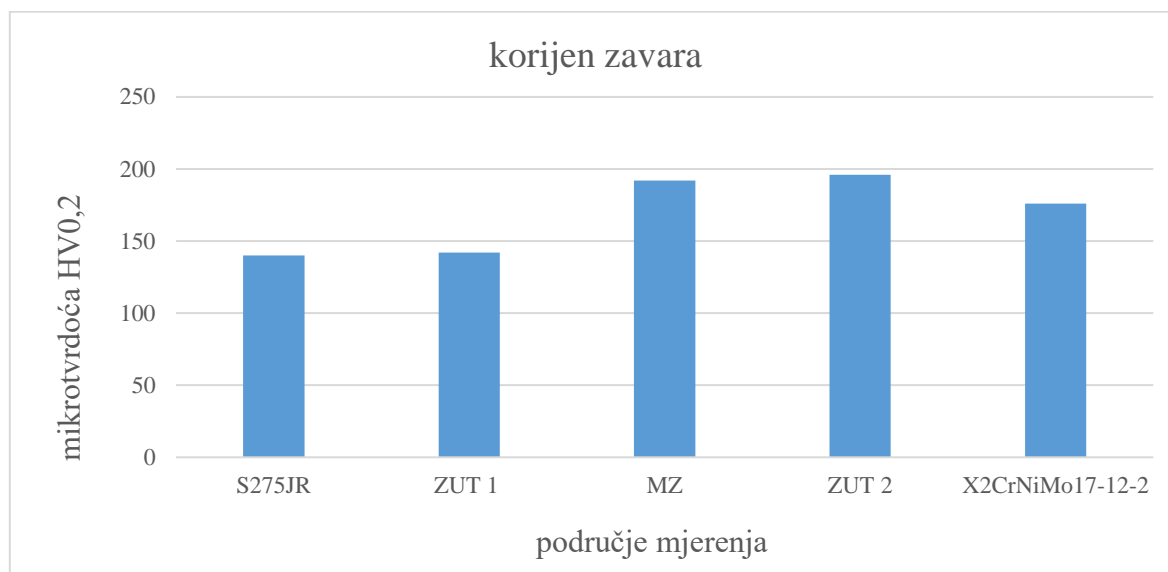
Tablica 11. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u ZUT-u sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2

	1.	2.	3.	srednja vrijednost
tjeme zavara	194	190	187	190
sredina zavara	192	186	186	188
korijen zavara	196	194	199	196

Tablica 12. Rezultati mjerenja mikrotvrdoće HV0,2 u metalu zavara

	1.	2.	3.	srednja vrijednost
tjeme zavara	200	197	177	191
sredina zavara	200	206	196	201
korijen zavara	192	196	187	192

**Slika 54. Promjena mikrotvrdoće u tjemenu zavarenog spoja****Slika 55. Promjena mikrotvrdoće u sredini zavarenog spoja**



Slika 56. Promjena mikrotvrdoće u korijenu zavarenog spoja

4.3.5. Mjerenje tvrdoće zavarenog spoja, HV10

Tvrdoća zavarenog spoja mjerena je u Mehaničko-metalografskom laboratoriju na Zavodu za zavarivanje, ispitivanje i tehnologije u Zagrebu prema normi HRN EN ISO 6507-1:2008 [19]. Mjerenje je provedeno na uređaju Karl Frank GmbH, prikazanom na slici 57. Opterećenje primijenjeno u ovom mjerenju bilo je 98,07 N (HV10), a postiže se primjenom utega mase od 1 kg. Tvrdoća je mjerena u oba osnovna materijala, u zoni utjecaja topline s obje strane zavara i u metalu zavara. U svih pet područja mjerilo se u tjemenu i korijenu zavara. Na svakom navedenom lokalitetu provedena su po tri mjerenja, sveukupno 45 mjerenja. Područja mjerenja prikazana su na slici 58, a rezultati mjerenja navedeni su u tablicama od 14 do 18.

U dijagramima na slikama 59 i 60 prikazane su srednje vrijednosti izmjerene tvrdoće u tjemenu i korijenu zavara, za osnovne materijale, zonu utjecaja topline i metal zavara.

Srednja vrijednost izmjerene tvrdoće osnovnog materijala općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR iznosi oko 156 HV10. Srednja vrijednost izmjerene tvrdoće osnovnog materijala austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2 iznosi između 202 HV10 i 206 HV10. U zoni utjecaja topline sa strane općeg konstrukcijskog čelika došlo je do povećanja tvrdoće uslijed značajnog unosa topline pri zavarivanju. Srednja vrijednost izmjerene tvrdoće je u rasponu od 165 HV10 do 170 HV10. U tjemenu zavara u zoni utjecaja topline sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika došlo je do značajnog povećanja tvrdoće u odnosu na osnovni materijal, dok je tvrdoća u korijenu zavara u zoni utjecaja topline ostala približno ista onoj u osnovnom materijalu. Srednja vrijednost izmjerene tvrdoće u tjemenu zavara zone utjecaja

topline sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika iznosila je 220 HV10. Srednja vrijednost izmjerene tvrdoće metala zavara u tjemenu iznosila je 228 HV10, a u korijenu metala zavara bila je značajno niža i iznosila je 195 HV10.



Slika 57. Karl Frank GmbH uređaj za mjerenje tvrdoće



Slika 58. Područja na kojima je mjerena tvrdoća HV10

Tablica 13. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10 u osnovnom materijalu općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR

	1.	2.	3.	srednja vrijednost
tjeme zavara	156	160	151	156
korijen zavara	156	160	156	157

Tablica 14. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10 u osnovnom materijalu austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2

	1.	2.	3.	srednja vrijednost
tjeme zavara	206	206	206	206
korijen zavara	206	202	199	202

Tablica 15. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10 u ZUT-u sa strane općeg konstrukcijskog čelika oznake S275JR

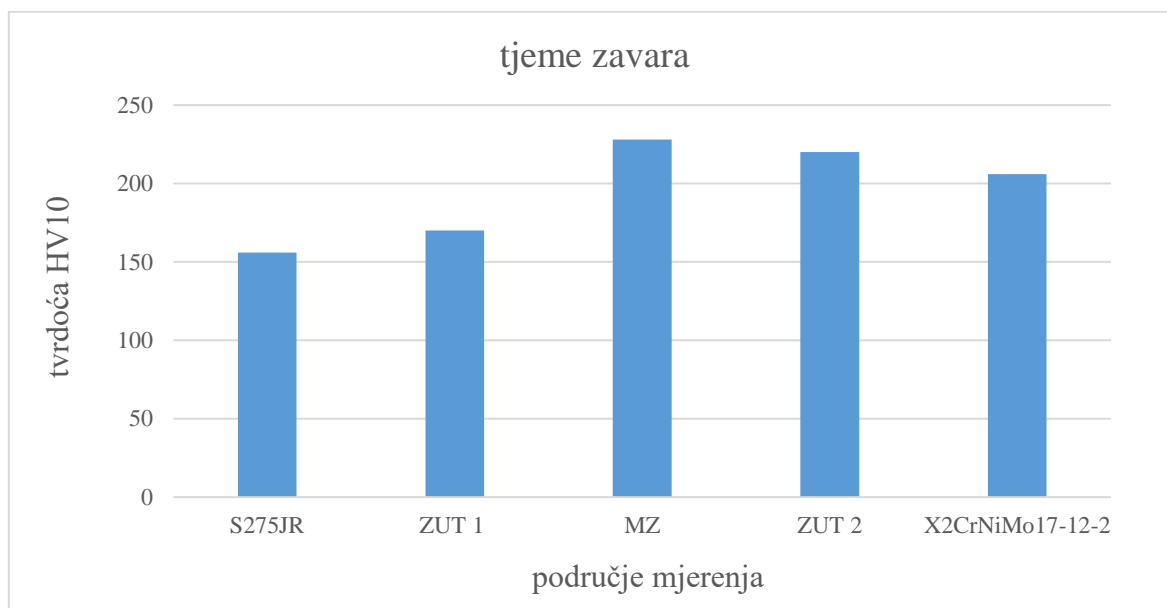
	1.	2.	3.	srednja vrijednost
tjeme zavara	170	165	176	170
korijen zavara	160	160	176	165

Tablica 16. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10 u ZUT-u sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika oznake X2CrNiMo17-12-2

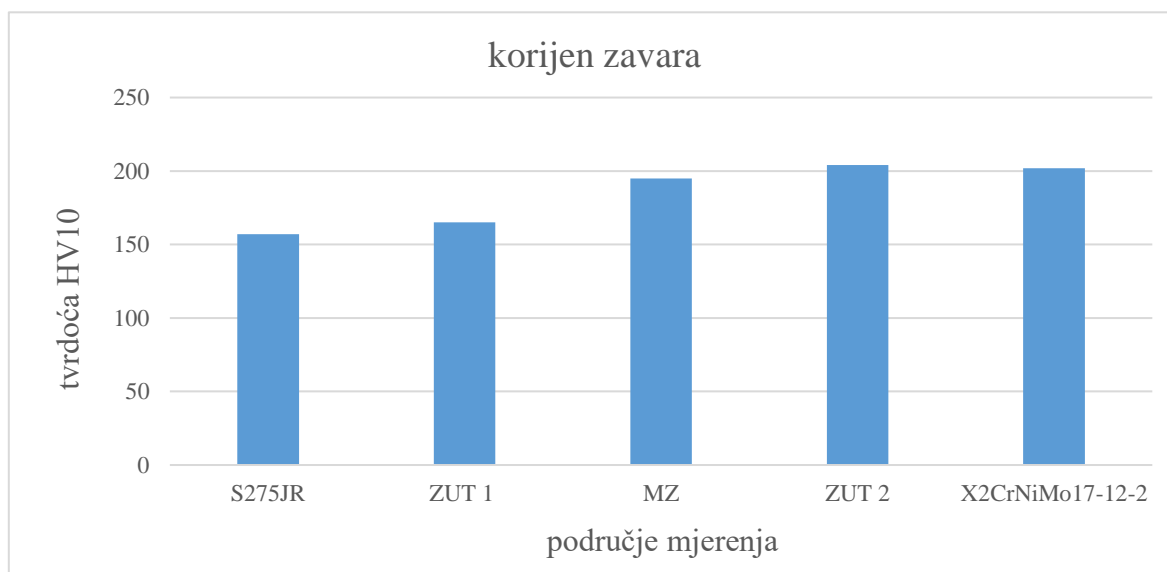
	1.	2.	3.	srednja vrijednost
tjeme zavara	220	220	220	220
korijen zavara	199	206	206	204

Tablica 17. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10 u metalu zavara

	1.	2.	3.	srednja vrijednost
tjeme zavara	228	229	228	228
korijen zavara	193	199	193	195



Slika 59. Promjena tvrdoće u tjemenu zavora



Slika 60. Promjena tvrdoće u korijenu zavora

5. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih mehaničkih ispitivanja na zavarenom spoju između općeg konstrukcijskog čelika, oznake S275JR, i austenitnog nehrđajućeg čelika, oznake X2CrNiMo17-12-2, i pri tom dobivenih rezultata, može se zaključiti sljedeće:

- Vrijednosti vlačne čvrstoće zavarenog spoja izmjerene na dva ispitna uzorka iznose 486 MPa i 504 MPa što je više od deklarirane vrijednosti vlačne čvrstoće osnovnog materijala, čelika S275JR (445MPa), u kojem je došlo do loma.
- Kod ispitivanja savojne čvrstoće, metodom savijanja u tri točke, pri kutu savijanja od 180° nije došlo do pojave pukotina ni kod savijanja na lice zavara niti kod savijanja na korijen zavara.
- U osnovnom materijalu, sa strane općeg konstrukcijskog čelika, srednje vrijednosti mikrotvrdoće iznose između 140 HV0,2 i 150 HV0,2, a sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika između 171 HV0,2 i 176 HV0,2. Sa strane općeg konstrukcijskog čelika u zoni utjecaja topline nije došlo do značajnijeg povećanja mikrotvrdoće koja se kreće u rasponu od 142 HV0,2 do 159 HV0,2. U zoni utjecaja topline sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika mikrotvrdoća se značajno povisila i nalazi se u rasponu između 188 HV0,2 i 196 HV0,2. Najviše srednje vrijednosti izmjerene mikrotvrdoće su u metalu zavara, od 191 HV0,2 do 201 HV0,2.
- U osnovnom materijalu sa strane općeg konstrukcijskog čelika izmjerene vrijednosti tvrdoće su između 151 HV10 i 160 HV10, a u austenitnom nehrđajućem čeliku između 199 HV10 i 206 HV10. U zoni utjecaja topline tvrdoća se povisila u odnosu na osnovni materijal, osobito u tjemenu zavara. U ZUT-u, sa strane općeg konstrukcijskog čelika srednja vrijednost tvrdoće u tjemenu zavara iznosi 170 HV10, a sa strane nehrđajućeg austenitnog čelika 220 HV10. U ZUT-u, u korijenu zavara, srednja vrijednost tvrdoće sa strane općeg konstrukcijskog čelika iznosi 165 HV10, a sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika 204 HV10. Srednja vrijednost tvrdoće metala zavara u tjemenu iznosi 228 HV10 i viša je od tvrdoće u korijenu zavara gdje iznosi 195 HV10.

Na temelju provedene metalografske analize zavarenog spoja, može se zaključiti sljedeće:

- Analizom makrostrukture zavarenog spoja utvrđen je pravilan oblik zavara i jasno definirana glatka linija staljivanja bez vidljivih diskontinuiteta. Pojedini prolazi nisu jasno izraženi, osim zadnjeg. U metalu zavara uočene su sitne inkluzije i pore.

- Mikrostruktura općeg konstrukcijskog čelika se sastoji od ferita i perlita, pri čemu feritna faza prevladava. Mikrostruktura je relativno sitnozrnata i neusmjerena.
- Mikrostruktura austenitnog nehrđajućeg čelika osim austenita sadrži i delta ferit koji je u obliku izduženih trakica ravnomjerno raspoređen unutar austenita.
- U zoni utjecaja topline sa strane općeg konstrukcijskog čelika došlo je do značajnog rasta zrna i porasta udjela perlita.
- Zona utjecaja topline sa strane austenitnog nehrđajućeg čelika je vrlo uska s jasno izraženom linijom staljivanja i povećanim volumnim udjelom delta ferita.
- Mikrostruktura metala zavara ima tipičnu ljevačku strukturu sastavljenu od austenita i delta ferita. U sredini i korijenu zavara mjestimice se mogu uočiti vrlo sitne pore.

Prema svemu navedenom može se zaključiti da je zavareni spoj između dvaju raznorodnih materijala izveden kvalitetno i ima zadovoljavajuća svojstva.

LITERATURA

- [1] Callister WD, Rethwisch DG. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 10th ed. Hoboken, NJ; 2018.
- [2] Gojić M. *Tehnike spajanja i razdvajanja materijala*. Sisak: Metalurški fakultet; 2008.
- [3] Filetin T, Kovačiček F, Indof J. *Svojstva i primjena materijala: čelici i željezni ljevovi, laki i obojeni metali, konstrukcijska keramika, polimerni materijali, kompozitni materijali i drvo*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 2017.
- [4] Gojić M. *Metalurgija čelika*. Sisak: Metalurški fakultet; 2006.
- [5] Čelik. *Tenička enciklopedija. Leksikografski zavod Miroslav Krleža*; 1997.
- [6] Juraga I. Austenitni čelici i njihova zavarljivost: (VI). 2020;63:23–8.
- [7] Gigović-Gekic A, Avdusinovic H, Hodžić A, Mandžuka E. Effect of Temperature and Time on Decomposition of δ -ferrite in Austenitic Stainless Steel. *Materials and Geoenvironment*. 2020 Jul 27;67.
- [8] Decker KH. *Elementi strojeva*. Zagreb: Golden marketing - Tehnička knjiga; 2006.
- [9] Kralj S, Kožuh Z, Andrić Š. *Zavarivački i srodni postupci: priručnik*. Zagreb: Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Katedra za zavarene konstrukcije; 2015.
- [10] Kralj S, Andrić Š. *Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka*. Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje; 1992.
- [11] Semjan V, dr i. *Teorija zavarljivosti čelika*. Sarajevo: Energoinvest, Institut za zavarivanje; 1989.
- [12] Juraga I, Ljubić K, Živčić M. *Pogreške u zavarenim spojevima*. Zagreb: Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja; 2000.
- [13] HRN EN 10027-1:2016. *Sustavi označivanja za čelike -- 1. dio: Nazivi čelika*.
- [14] HRN EN 10027-2:2015. *Sustavi označivanja čelika -- 2. dio: Brojčani sustav*.
- [15] EN ISO 3581-A. *Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje -- Obložene elektrode za ručno elektrolučno zavarivanje nehrđajućih i vatrootpornih čelika*.
- [16] HRN EN ISO 6892-1:2019. *Metalni materijali -- Vlačno ispitivanje -- 1. dio: Metoda ispitivanja pri sobnoj temperaturi*.
- [17] HRN EN ISO 5173:2023. *Ispitivanja razaranjem zavara na metalnim materijalima -- Ispitivanja savijanjem*.

- [18] HRN EN ISO 17639:2022. Razorno ispitivanje zavara metalnih materijala -- Makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje zavara.
- [19] HRN EN ISO 6507-1:2008. Metalni materijali -- Ispitivanje tvrdoće prema Vickersu -- 1. dio: Ispitna metoda.

PRILOZI