

Optimalizacija tehnologije navarivanja dupleks žicom primjenom AC MIG postupka

Topić, Ivan

Master's thesis / Diplomski 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:235:641983>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-01**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Topić

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Ivan Topić

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se svom mentoru prof.dr.sc. Ivi Garašiću, asistentici dr.sc. Maji Jurici i asistentu mag.ing. Mislavu Štefoku za svu pruženu pomoć prilikom pisanja i izrade ovog rada.

Zahvaljujem se svojoj obitelji i prijateljima na pruženoj pomoći, podršci tijekom studiranja.

Ivan Topić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum:	Prilog:
Klasa:	602-14/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **IVAN TOPIĆ** Mat. br.: 0035201887

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimalizacija tehnologije navarivanja dupleks žicom primjenom AC MIG postupka**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of cladding technology with duplex wire by application of AC MIG process**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno je detaljno opisati princip rada AC MIG postupka te obrazložiti primjenjivost za tehnologiju navarivanja. Detaljno proučiti problematiku navarivanja prevlake od dupleks čelika na konstrukcijski čelik. Istražiti moguće promjene mikrostrukture i kemijskog sastava uz analizu utjecaja značajki izmjenične struje tj. frekvencije i balansa polariteta na svojstva i geometriju navara.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je ispitati prikladnost AC MIG WAVE PULSE navarivanja dupleks čelika na konstrukcijski čelik uz korištenje različitih plinskih mješavina na bazi argona. Potrebno je odrediti područje parametara navarivanja i međuprolazne temperature koji rezultiraju optimalnom geometrijom navara. U konačnici, ocijeniti prikladnost primjene AC MIG WAVE PULSE načina rada za izradu prevlaka od dupleks čelika i odrediti smjernice za daljnja istraživanja.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
29. rujna 2022.

Rok predaje rada:
1. prosinca 2022.

Predviđeni datum obrane:
12. prosinca do 16. prosinca 2022.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA	VI
POPIS KRATICA	VIII
SAŽETAK.....	IX
SUMMARY	X
1. UVOD.....	1
2. Tehnologija navarivanja	2
2.1. Postupci zavarivanja koji se koriste za navarivanje.....	2
2.2. Parametri geometrije zavara.....	3
2.3. Stupanj miješanja	4
2.3.1. Metoda računanja stupnja miješanja pomoću površina	5
2.3.2. Metoda računanja stupnja miješanja pomoću kemijskog sastava.....	6
3. Nehrđajući čelici.....	7
3.1. Povijest i razvoj nehrđajućih čelika	7
3.2. Upotreba nehrđajućih čelika	7
3.3. Podjela nehrđajućih čelika	9
4. Dupleks čelici	11
4.1. Primjena dupleks čelika	12
4.2. Podjela dupleks čelika.....	14
4.3. Legiranje dupleks čelika	14
4.3.1. Utjecaj pojedinih legirnih elemenata	15
4.4. Precipitacijske faze kod dupleks čelika	18
4.5. Zavarljivost dupleks čelika	19
4.5.1. Smjernice za zavarivanje dupleks čelika	20
4.5.2. Preporučeni postupci za zavarivanje dupleks čelika.....	20
5. MIG postupak zavarivanja.....	22
5.1. Klasični MIG postupak	22
5.2. AC MIG postupak.....	24
5.2.1. Princip rada AC MIG postupka	24
5.2.2. EN omjer.....	25
5.2.3. Frekvencija pulsa žice.....	27
6. EKSPERIMENTALNI DIO RADA.....	28
6.1. Uvod.....	28
6.2. Plan izvedbe eksperimentalnog rada.....	28
6.3. Korištena oprema u eksperimentalnom dijelu	28
6.3.1. Oprema za navarivanje.....	28
6.3.2. Sustav za automatizirano zavarivanje	30

6.3.3. Oprema za pripremu ispitivanja makrostrukture i mikrostrukture.....	30
6.4. Osnovni i dodatni materijal.....	34
6.4.1. Osnovni materijal – čelik S355JR.....	34
6.4.2. Dodatni materijal – ML 22.9.3	35
6.5. Zaštitni plinovi	37
6.6. Zavarivanje s jednim prolazom i priprema uzoraka za analizu	37
6.6.1. Priprema uzoraka za navarivanje	37
6.6.2. Određivanje parametara navarivanja	39
6.6.3. Zapažanja tijekom navarivanja i rezultati navarivanja	41
6.6.4. Priprema uzoraka za analizu makrostrukture.....	45
6.7. Analiza makrostrukture.....	50
6.8. Zavarivanje s pet prolaza i priprema uzoraka za analizu	55
6.8.1. Odabir parametara navarivanja	55
6.8.2. Rezultati navarivanja i zapažanja tijekom navarivanja u više prolaza.....	56
6.8.3. Priprema uzoraka za analizu makrostrukture i mikrostrukture.....	58
6.8.4. Analiza makrostrukture.....	62
6.9. Analiza mikrostrukture	65
7. ZAKLJUČAK.....	68
LITERATURA.....	70
PRILOZI.....	72

POPIS SLIKA

Slika 1. Navarena površina Inconel-a 625 postupkom AC MIG [3].....	3
Slika 2. Parametri geometrije zavora [5]	4
Slika 3. Stupanj miješanja za različite postupke zavarivanja [9]	5
Slika 4. Površine za izračun omjera miješanja [8]	5
Slika 5. Kategorije primjene nehrđajućih čelika za potrošačko i industrijsko tržište [12].....	8
Slika 6. Korišteni oblici poluproizvoda od nehrđajućeg čelika [12].....	9
Slika 7. Dvofazna mikrostruktura dupleks čelika [15].....	11
Slika 8. Apatost most u Švedskoj izgrađen od 2205 dupleks čelika [16]	12
Slika 9. Spremnici za naftu izrađeni od dupleks čelika LDX 2101 [16].....	13
Slika 10. Reaktor vodikovog peroksida izrađen 2006. god. od dupleks čelika LDX 2101 [16]	13
Slika 11. Zingg-Greiger-ov strukturni dijagram lijevanih nehrđajućih čelika [16]	15
Slika 12. Utjecaj dušika na udio ferita u ZUT-u prilikom zavarivanja [17]	16
Slika 13. TTT dijagram mogućih precipitacijskih faza kod dupleks čelika [17]	18
Slika 14. Prikaz procesa MIG zavarivanja [1]	22
Slika 15. Oprema za MIG postupak zavarivanja [1].....	23
Slika 16. Različiti valni oblici za AC MIG zavarivanje [21]	25
Slika 17. Shematski prikaz površina za izračun EN omjera [23].....	26
Slika 18. Složeniji valni oblik impulsa s prikazanim parametrima [21]	26
Slika 19. Izgled površine za različite EN omjere i frekvencije [24]	27
Slika 20. Izvor struje Welbee 400 proizvođača OTC – DAIHEN	29
Slika 21. Pločica specifikacija uređaja Welbee 400.....	29
Slika 22. Modularni sustav za automatizirano zavarivanje MDS-1002 proizvođača Bug-O ..	30
Slika 23. Uređaj za brušenje i poliranje Mecatech 250.....	31
Slika 24. Uređaj za brušenje i poliranje Minitech 233	31
Slika 25. Stanica za elektrokemijsko nagrizanje	32
Slika 26. Fotoapararat Cannon 1000D montiran na postolje KAISER RS2.....	33
Slika 27. Invertni mikroskop Olympus GX51	33
Slika 28. Rezanje pločica na tračnoj pili	38
Slika 29. Pločice dimenzija 120x70mm nakon pripreme.....	39
Slika 30. Prikaz sučelja izvora struje s odabranim postavkama.....	40
Slika 31. Odnos vrijednosti struje zavarivanja s frekvencijom	42
Slika 32. Odnos vrijednosti napona zavarivanja i frekvencije	43
Slika 33. Izgled površine uzoraka nakon zavarivanja	44
Slika 34. Uzorci nakon navarivanja	45
Slika 35. Uzorci nakon poliranja.....	46
Slika 36. Prikaz geometrijskih parametara penetracije, širine visine zavora	50
Slika 37. Prikaz površine nadvišenja i površine penetracije za uzorak br. 1	51
Slika 38. Grafički prikaz ovisnosti penetracije navara i frekvencije.....	52
Slika 39. Grafički prikaz ovisnosti širine navara i frekvencije	53
Slika 40. Grafički prikaz ovisnosti visine navara i frekvencije.....	54
Slika 41. Ovisnost stupnja miješanja o frekvenciji	55
Slika 42. Uzorak 1-1 nakon zavarivanja i četkanja	57
Slika 43. Uzorak 2-2 nakon zavarivanja i četkanja	57
Slika 44. Makrostruktura uzorka 1-1.....	58
Slika 45. Makrostruktura uzorka 2-2.....	58
Slika 46. Grafički prikaz odnosa penetracije navara i međuprolazne temperature	64
Slika 47. Grafički prikaz odnosa visine navara i međuprolazne temperature	64

Slika 48. Odabir područja za određivanje udjela ferita u programu ImageJ	65
Slika 49. Postupak označavanja feritnih faza	66
Slika 50. Korišteni parametri opcije „Threshold“	66
Slika 51. Invertirana slika mikrostrukture	67

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav čelika S355JR za debljine ploča $t < 16\text{mm}$ prema normi EN 10025-2:2019 [25].....	34
Tablica 2. Mehanička svojstva čelika S355JR za debljine ploča $3\text{mm} < t < 16\text{mm}$ prema normi EN 10025-2:2019 [25].....	35
Tablica 3. Klasifikacija dodatnog materijala po normama [26].....	35
Tablica 4. Kemijski sastav žice dupleks čelika ML 22.9.3 [26]	36
Tablica 5. Mehanička svojstva dupleks čelika ML 22.9.3 [26]	36
Tablica 6. Sastav i preporuka za korištenje zaštitnih plinova prema katalogu proizvođača [27]	37
Tablica 7. Odabrane vrijednost frekvencije u kombinaciji sa zaštitnim plinom prema uzorcima	39
Tablica 8. Postavljeni parametri zavarivanja	41
Tablica 9. Očitane vrijednosti struje i napona zavarivanja za postavljene frekvencije.....	42
Tablica 10. Fotografije makrostrukture uzoraka	47
Tablica 11. Rezultati mjerenja parametara pomoću programa ImageJ	51
Tablica 12. Parametri navarivanja u pet prolaza	56
Tablica 13. Mikrostruktura uzoraka	59
Tablica 14. Vrijednosti geometrijskih parametara navara	63
Tablica 15. Udio ferita u mikrostrukтури na odabranim položajima.....	67

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
<i>A</i>	%	Istezljivost materijala
<i>A_{EN}</i>	mm ²	Površina dijela impulsa u pozitivnom području
<i>A_{EP}</i>	mm ²	Površina dijela impulsa u pozitivnom području
<i>Al</i>	-	Aluminiji
<i>A_P</i>	mm ²	Površina penetracije navara
<i>A_R</i>	mm ²	Površina nadvišenja navara
<i>Ar</i>	-	Argon
<i>C</i>	-	Ugljik
<i>C_{fw}</i>	%	Udio elemenata u kemijskom sastavu žice
<i>Co</i>	-	Kobalt
<i>CO₂</i>	-	Ugljikov dioksid
<i>Cr</i>	-	Krom
<i>Cr_{eq}</i>	-	Ekvivalent kroma
<i>Cs</i>	%	Udio elemenata u osnovnom materijalu
<i>Cu</i>	-	Bakar
<i>C_w</i>	%	Udio elemenata u ispitanom kemijskom sastavu navara
<i>D</i>	%	Stupanj miješanja
<i>EN</i>	%	omjer elektronegativnog dijela impulsa
<i>He</i>	-	Helij
<i>I</i>	A	Struja zavarivanja
<i>I_b</i>	A	Bazna struja impulsa
<i>I_{en}</i>	A	Vršna struja negativnog impulsa
<i>I_p</i>	A	Vršna struja impulsa
<i>I_s</i>	A	prijelazna struja
<i>N</i>	-	Dušik
<i>Nb</i>	-	Niobi
<i>Ni</i>	-	Nikal
<i>Ni_{eq}</i>	-	Ekvivalent nikla
<i>Mn</i>	-	Mangan
<i>Mo</i>	-	Molibden
<i>P</i>	-	Fosfor
<i>P</i>	mm	dupina penetracije navara
<i>R</i>	mm	visina nadvišenja navara

$R_{p0,2}$	MPa	Granica razvlačenja
R_m	%	Vlačna čvrstoća
S	-	Sumpor
Si	-	Silicij
Ta	-	Tantal
T_d	ms	Vrijeme pada struje impulsa u pozitivnom području
T_{en}	ms	Vrijeme trajanja negativnog djela impulsa
Ti	-	Titanij
T_p	ms	Vrijeme trajanja vršne struje
T_s	ms	Vrijeme prijelaza
T_u	ms	Vrijeme porasta struje impulsa u pozitivnom području
U	V	Napon zavarivanja
V	-	Vanadij
v	cm/min	Brzina zavarivanja
$v_{\dot{z}}$	m/min	Brzina dodavanja žice
W	-	Volfram
W	mm	Širina navara
α'	-	Alfa primar faza
σ	-	Sigma faza
χ	-	Chi faza

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
AC MIG	Alternating current metal inert gas – MIG postupak s izmjeničnom strujom
EN	Europska norma
EN omjer	Omjer elektronegativnog dijela impulsa
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod praškom
FCAW	<i>Flux core arc welding</i> – PPŽ postupak zavarivanja
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju
MIG	<i>Metal inert gas</i> – elektrolučni postupak pod zaštitom inertnog plina
MAG	<i>Metal active gas</i> – elektrolučni postupak pod zaštitom aktivnog plina
PPŽ	Postupak zavarivanja praškom punjene žice
PREN	<i>Pitting resistance equivalent number</i> – ekvivalentni broj otpornosti na rupičastu koroziju
REL	ručni postupak elektrolučnog zavarivanja
TIG	<i>Tungsten inert gas</i> – elektrolučni postupak s netaljivom volframovom elektrodom
ZUT	Zona utjecaja topline
ZT	Zona taljenja

SAŽETAK

Ovaj diplomski rad je napravljen u dva dijela: teorijski i eksperimentalni. U teorijskom dijelu opisana je tehnologija navarivanja i bitni parametri za kvalitetu navarenog spoja. Detaljno su opisani dupleks čelici, njihova podjela, utjecaj faza i zavarljivost. Objašnjen je AC MIG postupak zavarivanja kao i parametri EN omjera i frekvencije. U eksperimentalnom dijelu ispitana je mogućnost primjene navedenog postupka za navarivanje prevlake dupleks čelika na konstrukcijski čelik. Određen je omjer miješanja kao i udio ferita. Na temelju ispitivanja nisu uspješno određeni optimalni parametri za navarivanje, ali postignuta su saznanja za smjer daljnjeg istraživanja u svrhu primjene AC MIG Wave Pulse postupka za navarivanje dupleks prevlake.

Ključne riječi: navarivanje, dupleks čelici, omjer miješanja AC MIG, EN omjer

SUMMARY

This master thesis is divided in two parts: theoretical and experimental. Theoretical part describes weld cladding technology and important parameters for the quality of the weld clad joint. This part also describes duplex steels, their gradations, influence of microstructural phases and weldability. Explanation of AC MIG welding procedure is given, as well as the EN ratio and frequency parameters. In the experimental part research was made to use mentioned procedure to apply a layer of duplex steel on a common structural steel. Dilution ratio and ferrite content was determined. Based on the tests, the optimal parameters for welding were not successfully determined, but knowledge was obtained for the direction of further research for the purpose of applying the AC MIG Wave Pulse procedure for duplex weld cladding.

Key words: weld cladding, duplex steel, dilution ratio, AC MIG, EN ratio

1. UVOD

Dupleks čelici se sve više koriste zbog odlične kombinacije mehaničkih svojstava i otpornosti na koroziju. Posjeduju skoro duplo bolja mehanička svojstva od austenitnih čelika i bolju otpornost na koroziju što ih čini zanimljivima za primjenu u različitim industrijama. Osim što pokazuju bolja svojstva zbog smanjenog udjela nikla imaju stabilniju i manju cijenu, a to igra veliku ulogu u današnje vrijeme. Kako bi se što bolje iskoristila njihova svojstva istražuju se razne mogućnosti njihove daljnje primjene.

U ovom radu ispitano je navarivanje dupleks čelika na konstrukcijski čelik kako bi se poboljšala njegova otpornost na koroziju. Kombinacijom ova dva materijala dodatno se smanjuje cijena završnog proizvoda.

Navarivanje je izvedeno primjenom AC MIG Wave pulse postupka kako bi se pokušao smanjiti mogući negativan utjecaj temperature i unosa topline na strukturu i geometriju navara.

2. Tehnologija navarivanja

Termin navarivanje odnosi se na primjenu postupka zavarivanja u svrhu nanošenja jednog ili više slojeva nekog materijala kako bi se poboljšala svojstva ili postigle nove dimenzije osnovnog materijala. [1]

Navarivanjem dolazi do rastaljivanja osnovnog materijala koji se zbog toga miješa s dodatnim materijalom i na taj način ostvaruje se čvrsta veza između starog i novog sloja. [2]

Prema namijeni navarivanje se može podijeliti u tri skupine, a to su:

- Tvrdo navarivanje (eng. Hardfacing) – navarivanjem dodatnog materijala želi se postići bolja otpornost na mehaničko trošenje. U ovom slučaju odabire se dodatni materijal s velikom tvrdoćom, to se uglavnom postiže s udjelom karbida koji će nastati u strukturi novog sloja. Udio karbida u novom sloju može iznositi od 10% do 50%, a u posebnim slučajevima i 80%. Velik udio karbida rezultira većom krhkosti materijala, što može uzrokovati nastajanje pukotina na samoj površini.
- Platiranje (eng. Cladding) – navarivanjem dodatnog materijala želi se postići bolja otpornost na koroziju. Kako bi se zadovoljili potrebni kriteriji uglavnom se koriste Cr-Ni čelici. Ovaj postupak se uglavnom izvodi na pozicijama velikih površina gdje bi izrada od prikladnog nehrđajućeg metala bila preskupa ili neizvediva zbog konstrukcijskih zahtjeva. Poroznost i slične nepravilnosti nisu dozvoljene u ovim slojevima kako ne bi smanjile svojstvo otpornosti na koroziju.
- Premoštenje – koristi se za navarivanje međuslojeva kada je potrebno napraviti prevlaku na različitim materijalima s velikom razlikom u njihovim svojstvima. [2]

2.1. Postupci zavarivanja koji se koriste za navarivanje

Za navarivanje se koriste razni postupci zavarivanja. Postupak se odabire na osnovi korištenog dodatnog materijala i zahtjeva koji se žele postići novom površinom. Podjela postupaka se može napraviti prema vrsti dovedene energije i onda razlikujemo sljedeće:

- Plameni: plinsko zavarivanje
- Strujni: zavarivanje pod praškom, šavno zavarivanje
- Elektrolučni: REL, MIG/MAG, TIG

- Elektrolučni-plazmatski: postupak navarivanja plazma-prah, plazma-MIG i plazma-žica
- Posebni postupci: zavarivanje snopom elektrona, zavarivanje laserom, platiniranje eksplozijom i platiniranje valjkom. [2]

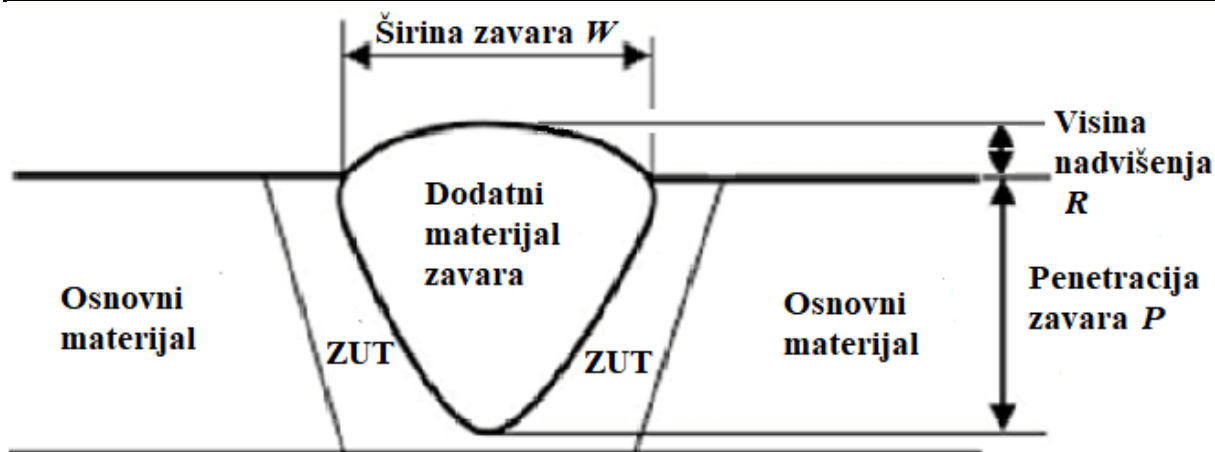
Na slici 1. prikazan je izgled navarene površine napravljen AC MIG postupkom.



Slika 1. Navarena površina Inconel-a 625 postupkom AC MIG [3]

2.2. Parametri geometrije zavara

U idealnom slučaju navarivanja u svrhu poboljšanja otpornosti na koroziju želi se postići što manja penetracija navara kako bi se izbjegao pad otpornosti na koroziju dodatnog materijala (nehrđajućeg čelika) i promjena mehaničkih svojstava osnovnog materijala. Širina navara u jednom prolazu nije strogo definirana, ali je potrebno odrediti stupanj preklapanja prolaza kako bi se postigla što glađa navarena površina i smanjila potreba za dodatnom strojnom obradom. Visina nadvišenja navara ovisi o zahtjevu za debljinom zaštitnog sloja, a uglavnom se kreće u rasponu od tri do deset milimetara [4]. Parametri geometrije zavara prikazani su slikom 2.



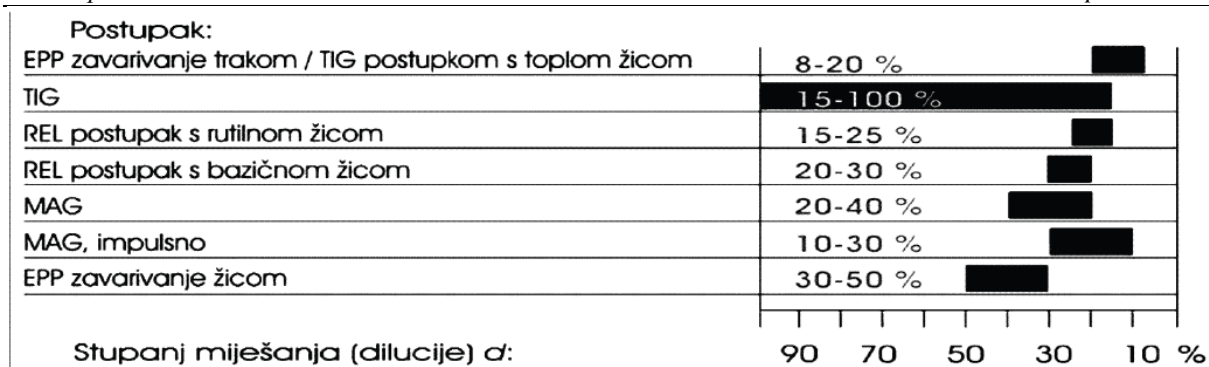
Slika 2. Parametri geometrije zavara [5]

2.3. Stupanj miješanja

Osim male penetracije za uspješno navarivanje bitan je parametar stupnja miješanja. Stupanj miješanja se definira kao razina promjene sastava osnovnog materijala u odnosu na dodatni materijal u ZUT-u. Zbog miješanja taline tijekom zavarivanja koriste se legirani dodatni materijali koji su obogaćeni određenim elementima kako bi se nadoknadio njihov udio u zavarenom dijelu zbog miješanja s osnovnim materijalom.[1]

Na stupanj miješanja značajno utječu ostali geometrijski parametri. Povećanjem visine nadvišenja, širine zavara i smanjenjem penetracije stupanj miješanja opada [7]. Istraživanjem utjecaja parametara zavarivanja na geometriju zavara utvrđeno je za MIG/MAG postupke da će se stupanj miješanja povećati s povećanjem brzine dodavanja žice (v_z) i napona zavarivanja (U), a smanjivati s povećanjem brzine zavarivanja (v) i visine slobodnog kraja žice. [8]

Različitim postupcima zavarivanja postižu se različite geometrije zavara, zbog toga će raspon vrijednosti stupnja miješanja ovisiti o samom postupku zavarivanja. Tipične vrijednosti za neke od postupaka prikazane su na slici 3. [9]

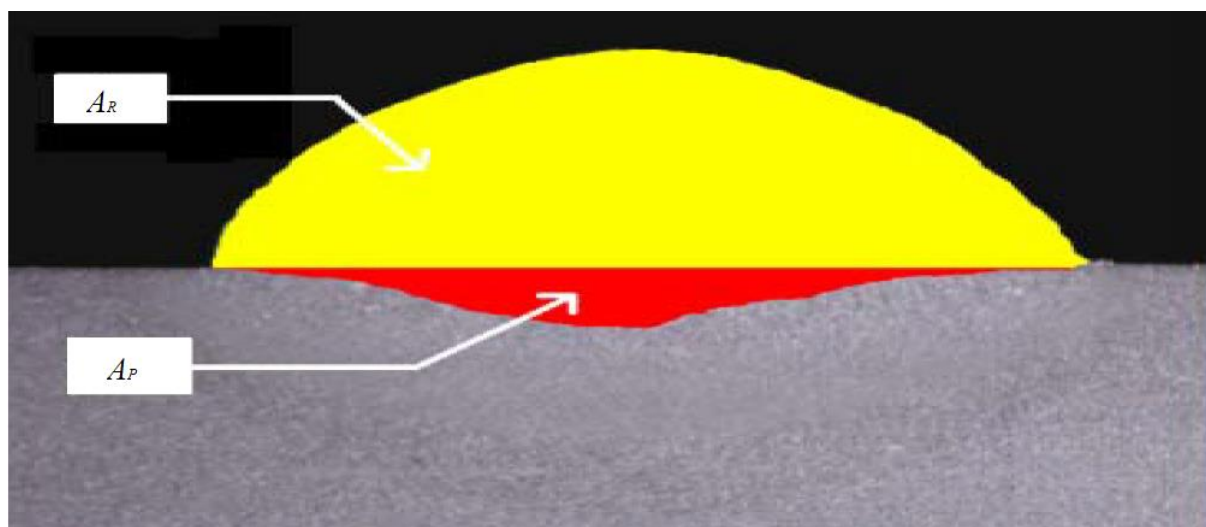


Slika 3. Stupanj miješanja za različite postupke zavarivanja [9]

Postoji više metoda računanja omjera miješanja, najraširenije su metoda površina i metoda kemijskog udjela. [6]

2.3.1. Metoda računanja stupnja miješanja pomoću površina

Metoda računanja stupnja miješanja preko površina je jednostavnija i brža od metode kemijskog udjela. Ovom metodom računanje se izvodi kao omjer površine penetracije i ukupne površine zavara tj, zbroja površine nadvišenja i penetracije. Navedene površine su prikazane slikom 4.



Slika 4. Površine za izračun omjera miješanja [8]

Površina označena žutom bojom predstavlja površinu nadvišenja navara – A_R , a površina crvene boje predstavlja površinu penetracije navara. Mjerenje površina se izvodi na makroizbrusku uzorka uz primjenu računalnog programa. [6][8]

Pomoću navedenih površina i definicije omjera miješanja postavljena je jednadžba (1) za njegov izračun i ona glasi:

$$D = \frac{A_P}{A_P + A_R}, \% \quad (1) [8]$$

gdje je:

- D , % – Stupanj miješanja
- A_P , mm² – površina penetracije navara
- A_R , mm² – površina nadvišenja navara

Zbog načina računanja ne može se točno reći na što se dobiveni stupanj miješanja odnosi jer ne uzima u obzir pojedine elemente u sastavu osnovnog materijala, dodatnog materijala i samog zavara. Uzimajući to u obzir ova metoda se ipak najviše koristi jer se pokazalo da daje slične rezultate metodi kemijskog sastava i dovoljno je dobra za većinu slučajeva kao indikacija o kvaliteti postavljenih parametara zavarivanja. [6]

2.3.2. Metoda računanja stupnja miješanja pomoću kemijskog sastava

Metoda računanja stupnja miješanja pomoću kemijskoga sastava računa se iz poznatog kemijskog sastava osnovnog i dodatnog materijala i ispitanog kemijskog sastava u samome zavaru. Ovom metodom se računa miješanje jednog od elemenata u kemijskom sastavu žice s njegovim sastavom u osnovnom materijalu, što znači da je primjenjiva za računanje miješanja samo jednog elementa tj. za različite elemente je moguće dobiti potpuno druge rezultate. Za ovu metodu koristi se jednadžba (2), koja glasi:

$$D = \frac{C_w - C_{fw}}{C_S - C_{fw}}, \% \quad (2)$$

gdje je:

- D , % - stupanj miješanja
- C_w , %- udio elementa u ispitanom kemijskom sastavu navara
- C_{fw} , %- udio elementa u kemijskom sastavu žice
- C_S , %- udio elementa u osnovnom materijalu. [6]

Potrebno je napomenuti da se ovom metodom ne uzima u obzir promjena sastava osnovnog materijala u samom ZUT-u do koje sigurno dolazi zbog taljenja osnovnog materijala postupkom zavarivanja. Zbog ovog razloga ni ova metoda nije u potpunosti točna ali daje nešto bolje rezultate u odnosu na prvu metodu.[6]

3. Nehrđajući čelici

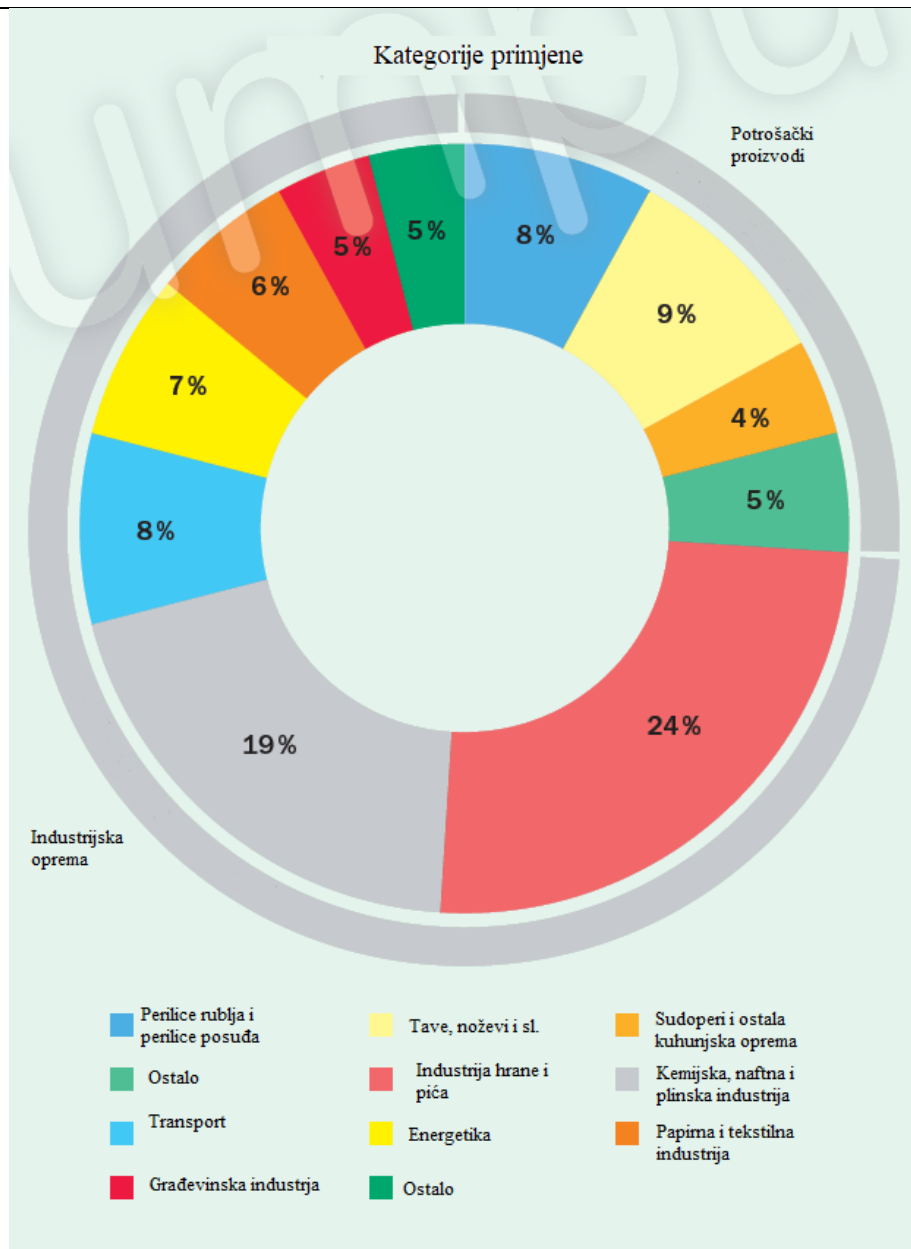
Za razliku od običnih konstrukcijskih čelika, nehrđajući čelici su otporni na koroziju pri izloženosti vodi i imaju bolju otpornost na oksidaciju pri visokim temperaturama. Kako bi se postigla ova otpornost na koroziju svi nehrđajući čelici moraju sadržavati najmanje 11,5% kroma, a većina ih uz krom sadrži i nikal. U slučaju kada su izloženi ne oksidirajućim medijima potrebno je i više od minimalnog udjela (11,5%) kroma kako bi se osigurala njihova pasivnost. Ukoliko udio kroma nije dovoljan da se osigura pasivnost u određenome mediju, nehrđajući čelici neće se previše razlikovati od običnih čelika. [10]

3.1. Povijest i razvoj nehrđajućih čelika

Razvoj nehrđajućih čelika omogućen je 1797. god. kada je francuski znanstvenik Luis Nicholas Vauquelin u rudi „crvenog olova“ otkrio kromov oksid i uspio izolirati novi metal pod nazivom krom. Naziv krom dolazi od grčke riječi *chromos* što znači boja. Naziv je odabran zbog različitih boja uočenih u spojevima kroma. Sredinom 19.-tog stoljeća dolazi do otkrića Ferokroma koji se koristio kako bi se željezu poboljšala otpornost na koroziju. U to vrijeme nije bilo poznato, ali ove su legure imale velik udio ugljika što je bio temelje za daljnji razvitak nehrđajućeg čelika. Prvi nehrđajući čelici razvijeni su u slično vrijeme u Francuskoj, Engleskoj i Njemačkoj početkom 20-tog stoljeća. Razvoj nehrđajućih čelika bio je usporen zbog nesretne pretpostavke da je testiranje korozijske otpornosti u mješavini sumporne kiseline reprezentativno za sve korozijske uvjete, kada je Sir Robert A. Hadfield na osnovu toga donio zaključak da krom čak smanjuje korozijsku otpornost čelika. [11]

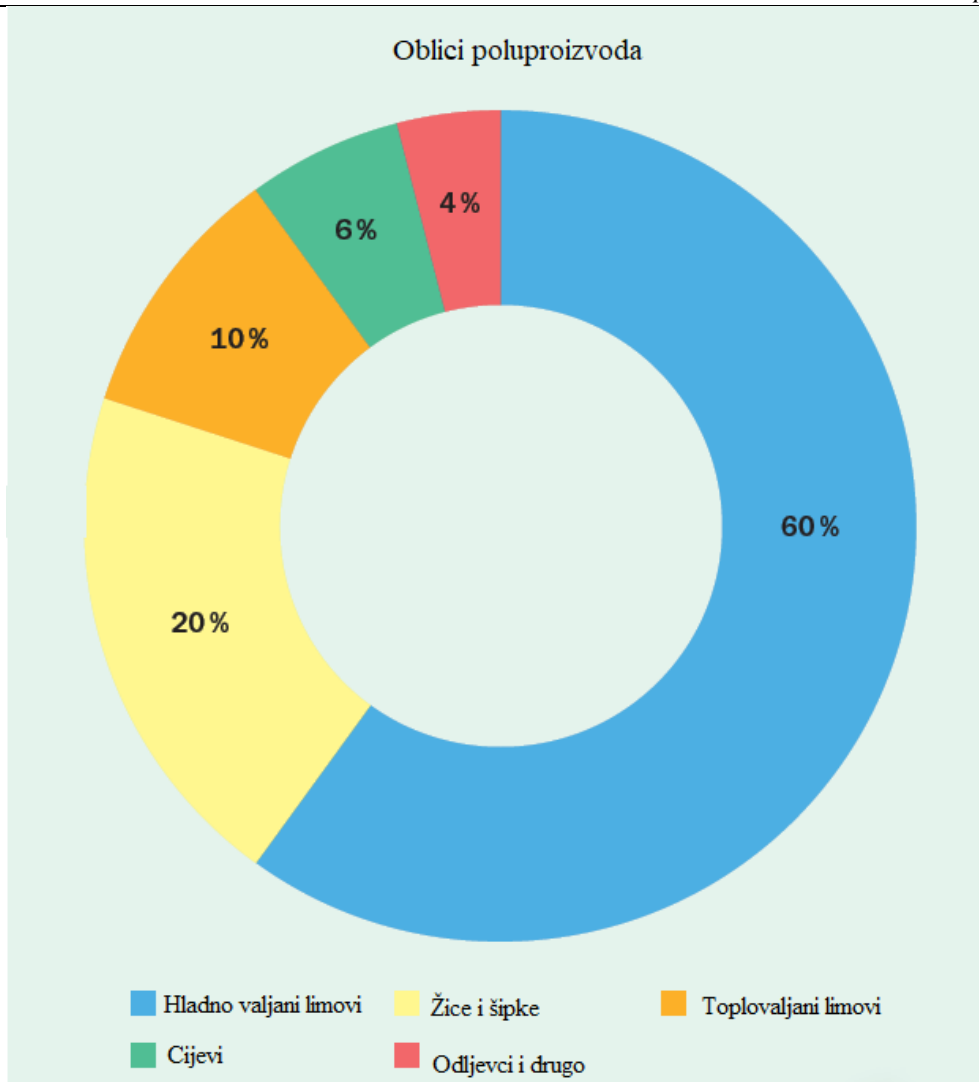
3.2. Upotreba nehrđajućih čelika

U današnje vrijeme gotovo je nemoguće zamisliti život bez upotrebe nehrđajućih čelika. Od njih se izrađuju razni uređaji i oprema za potrošačko tržište kao i specijalna oprema za različite industrije kao što su naftna, kemijska, prehrambena i sl.. Slika 5. prikazuje raspodjelu kategorija za potrošačko i industrijsko tržište. Od svih nehrđajućih čelika najviše se koriste austenitni nehrđajući čelici i čine oko 50% ukupne proizvodnje nehrđajućih čelika, ako tome pridodamo drugu najpopularniju grupu tj. feritne nehrđajuće čelike taj postotak prelazi 80% ukupne proizvodnje nehrđajućih čelika. [12]



Slika 5. Kategorije primjene nehrđajućih čelika za potrošačko i industrijsko tržište [12]

Kada gledamo proizvodnju prema obliku poluproizvoda za daljnju obradu onda hladno valjani limovi zauzimaju 60% ukupne proizvodnje nehrđajućih čelika. Udio ostali oblika poluproizvoda prikazan je slikom 6.



Slika 6. Korišteni oblici poluproizvoda od nehrđajućeg čelika [12]

3.3. Podjela nehrđajućih čelika

Nehrđajući čelici su podijeljeni u pet većih skupina. Svaka od skupina ima različita mehanička svojstva i otpornost na koroziju, a imenovane su prema fazama koje čine mikrostrukturu tih nehrđajućih čelika.[10]

- Feritni nehrđajući čelici – ovu skupinu čine čelici koji su legirani s 11,5% do 30% Cr, uz što niži udio ugljika. Imaju mehanička svojstva vrlo slična konstrukcijskim čelicima, i zbog feritne faze su podložni interkristalnoj koroziji u slučaju izlučivanja karbida pri toplinskoj obradi. Kada su legirani s visokim udjelom Cr podložni su stvaranju σ – faze pri toplinskoj obradi ili radu na visokim temperaturama. Ova pojava se smatra štetnom zbog krhkosti te faze. Kako su legirani s malo ili ništa Ni cjenovno su stabilno u odnosu na druge nehrđajuće čelike koji imaju povećan udio Ni. [10][12]

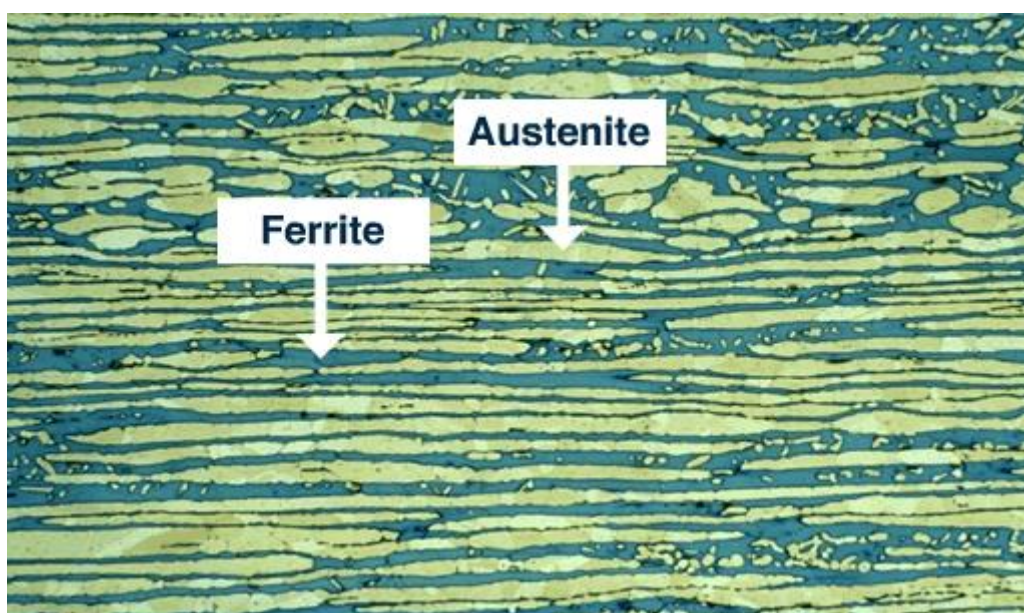
- Austenitni nehrđajući čelici – ovo je najšire korištena skupina nehrđajućih čelika. Sadrže 17% do 25% Cr i 8% do 20% Ni uz nizak udio ugljika, ali dovoljan za ostvarivanje austenitne transformacije. Otporni su na više tipova korozije od feritnih čelika. Zbog austenitne strukture pogodni su za rad pri niskim temperaturama i nisu magnetični osim ako ne dođe do formiranja martenzita tijekom hladnog oblikovanja. [10]
- Martenzitni nehrđajući čelici – sadrže 12% do 17% Cr, 0,1% do 1% C i jako malo ili ništa Ni. Od svih skupina čelika ova se najmanje koristi. Ponekad im se dodaje S kako bi se poboljšala njihova obradivost. S minimalnim udjelom Cr od 12% imaju jako dobru zakaljivost i nije potrebno brzo hlađenje. Imaju dobro svojstvo tvrdoće i čvrstoće, a zbog velikog udjela ugljika loše su zavarljivi. Najviše se koriste za izradu žileta i noževa. [10][12]
- Dupleks nehrđajući čelici – sastoje se od austenita i ferita. Sadrže veći udio Cr od 19% do 28% i manji udio nikla od 1% do 7%. Posjeduju kombinaciju mehaničkih svojstava austenitnih i feritnih nehrđajućih čelika i imaju dobru korozijsku otpornost.[10][12] O ovoj grupi će biti više riječi u idućem poglavlju jer spadaju pod temu ovog rada.
- Precipitacijski očvršnuti nehrđajući čelici – struktura ima se bazira na austenitu ili martenzitu s dodatkom Cu, Ti, Al, Mo i Nb. U njima se izlučuju sljedeći precipitati Ni_3Al , Ni_3Ti , $NiAl$, Ni_3Nb i Ni_3Cu . Spadaju u magnetične materijale. [10]

4. Dupleks čelici

Dupleks čelici razvijeni su početkom 20.-tog stoljeća. Prvi zabilježeni slučaj komercijalnog dupleks čelika je zabilježen 1929.-te godine kada je Avesta Jernevek u Švedskoj pustio na tržište čelik 453E sastava 25%Cr -5%Ni - 1%Mo. Idući zabilježeni slučaj se dogodio kada je u Francuskoj greškom u proizvodnji dobiven čelik kemijskog sastava 20%Cr-8%Ni-2,5%Mo. Naknadne analize ovog čelika pokazale velik broj pukotina feritne faze u austenitu i otkrivena je otpornost na interkristalnu koroziju u različitim medijima. Ova saznanja rezultirala su razvojem drugih dupleks čelika u nadolazećim godinama. [13]

Dupleks čelici su legirani kromom, niklom i molibdenom. Ova vrsta čelika ima dvojni fazu koja se sastoj od balansirano udjela ferita i austenita u iznosu od 50-50%. Tipična struktura dupleks čelika prikazana je slikom 7. U ovom slučaju svjetlija faza je austenit, a tamnija ferit što može varirati ovisno o sredstvu korištenom za nagrizanje. Kombinacijom ovih faza postignuta su kombinirana svojstva austenitnih i feritnih čelika što ih je učinilo boljima u određenim primjenama u odnosu na austenitne čelike, neka od tih svojstava su [14]:

- velika otpornost na pucanje zbog napetostne korozije uslijed izlaganja kloridu
- gotovo duplo bolja čvrstoća u odnosu na obične austenitne čelike
- manji udio nikla, što ih čini jeftinijima i manje podložnima promjeni cijene nikla



Slika 7. Dvofazna mikrostruktura dupleks čelika [15]

4.1. Primjena dupleks čelika

Zbog odličnog svojstva otpornosti zahtjevnim atmosferama na koroziju i boljih mehaničkih svojstava od običnih austenitnih čelika dupleks čelici su pronašli mjesto za primjenu u raznim industrijama. Koriste se u naftnoj i plinskoj industriji za izradu spremnika i cjevovoda, u papirnoj industriji za izradu spremnika, bubnjeva, opreme za izbjeljivanje i strojeva. Također se koriste u građevinskoj, prehrambenoj, kemijskoj industriji. U zadnje vrijeme su pronašli mjesto i u izgradnji mostova kao što je Apace most prikazan na slici 8. Slika 9 prikazuje spremnike nafte izrađene od dupleks čelika LDX 2101, a slika 10. reaktor vodikovog peroksida napravljenog u istoj kvaliteti.



Slika 8. Apace most u Švedskoj izgrađen od 2205 dupleks čelika [16]



Slika 9. Spremnici za naftu izradeni od dupleks čelika LDX 2101 [16]



Slika 10. Reaktor vodikovog peroksida izrađen 2006. god. od dupleks čelika LDX 2101 [16]

4.2. Podjela dupleks čelika

Kroz godine razvoja nastale su različite grupe dupleks čelika. Razlika između grupa dupleks čelika je u udjelu različitih legirnih elemenata i njihovom utjecaju na svojstvo otpornosti na rupičastu koroziju. Danas raspoznajemo tri glavne skupine u koje su raspoređeni dupleks čelici prema ekvivalentu otpornosti na rupičastu koroziju–PREN. PREN se računa prema jednadžbi (3) koja glasi[16]:

$$\text{PREN} = \%Cr + 3,3 * \%Mo + 16\%N \quad (3)$$

U slučaju legiranja volframom jednadžba je modificirana i glasi:

$$\text{PRENW} = \%Cr + 3,3(\%Mo + 0,5\%W) + 16\%N \quad (4)$$

Podjela dupleks čelika prema PREN-u [14]:

- „lean“ dupleks čelici, $22 < \text{PREN} < 30$
- Standardni dupleks čelici $30 < \text{PREN} < 40$
- Superdupleks čelici $40 < \text{PREN}$

U zadnjim godinama razvijena nova skupina dupleks čelika pod nazivom „hyperduplex“. Oni su legirani visokim udjelom kroma i dušika i značajnim udjelom molibdena, volframa ili bakra. Njihov ekvivalent otpornosti na rupičasto koroziju iznosi $\text{PREN} > 50$. [14][16]

4.3. Legiranje dupleks čelika

Legirni elementi imaju velik utjecaj na svojstva dupleks čelika. Zbog dvojne faze dupleks čelika važno je postići balans utjecaja različitih elemenata na stvaranje austenita i ferita. Prema tome utjecaju raspoznajemo dvije glavne skupine legirnih elemenata, a to su [16]:

- Austenitotvorci: Ni, C, N, Mn, Co, Cu – ovi elementi pospješuju stvaranje faze austenita
- Feritotvorci: Cr, Mo, Si, Nb, Ti, Al, W, V, Ta – ovi elementi pospješuju stvaranje faze ferita

Pomoću udjela ovih elemenata moguće je napraviti pretpostavku udjela ferita u sastavu dupleks čelika koristeći se ekvivalentom kroma Cr_{eq} i ekvivalentom nikla Ni_{eq} koji su prikazani jednadžbama (5) i (6). Ove jednadžbe su preporuka autora [16] i na temelju njih su stvorili matematički model za računanje udjela ferita $\delta, \%$ prikazanog jednadžbom (7). Postoje i druge

metode izračuna Cr_{eq} i Ni_{eq} koje se koriste na različitim dijagramima za pretpostavku strukture dupleks čelika. Jedan takav dijagram je Zingg-ov i Geiger-ov prikazan slikom 11.

Ekvivalent kroma - Cr_{eq} :

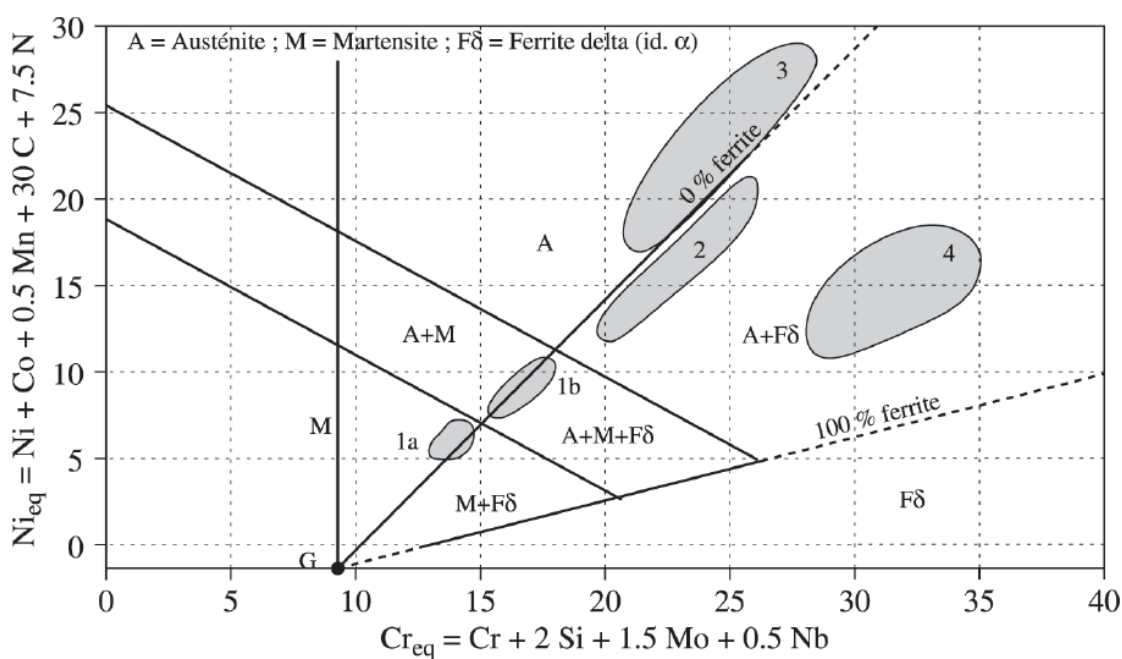
$$Cr_{eq} = Cr + 1,21Mo + 0,48Si + 0,14Nb - 4,99 \quad (5)$$

Ekvivalent nikla - Ni_{eq} :

$$Ni_{eq} = Ni + 24,5C + 0,11Mn - 0,0086Mn^2 + 2,77 \quad (6)$$

Udio ferita - $\delta, \%$:

$$\delta, \% = 95,49 \left(\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}} \right)^3 - 225,96 \left(\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}} \right)^2 - 191,35 \left(\frac{Cr_{eq}}{Ni_{eq}} \right)^1 - 58,27 \quad (7)$$



Slika 11. Zingg-Greiger-ov strukturalni dijagram lijevanih nehrđajućih čelika [16]

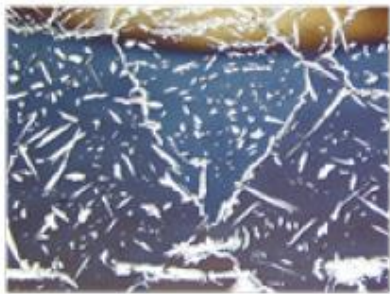


4.3.1. Utjecaj pojedinih legiranih elemenata

U ovom poglavlju opisan je utjecaj sljedećih elemenata na čelike.

- Krom – glavna prednost dodavanja kroma čelicima je poboljšana otpornost na koroziju. To se postiže zbog pasivnih oksidno-hidroksidnih slojeva bogatim kromom. Udio kroma u čelicima ipak je ograničen jer se pri velikim udjelima povećava precipitacija intermetalnih faza, kao što je sigma faza. koje loše utječu na mehanička i korozijska

svojstva čelika. Krom također poboljšava stvaranje ferita što je vrlo bitno kod dupleks čelika zbog balansa faza. [13]

- Molibden – povećava otpornost na rupičastu i koroziju u procijepima u kloridnim otopinama. To se postiže povećanjem pasivnog potencijala i smanjenjem gustoće struje korozije u aktivnom području. Posjeduje sličan utjecaj na stvaranje ferita kao krom, ali je uglavnom ograničen na maksimum od 4% udjela zbog stvaranja sigma faze pri temperaturama iznad 1000°C [13]
- Nikal – ima pozitivan utjecaj na korozijsku otpornost. U dupleks čelicima njegov udio najviše ovisi o udjelu kroma jer se koristi kao stabilizator austenita u odnosu na ferit. Pri velikim udjelima omogućuje stvaranje austenita od preko 50% udjela uz obogaćivanje ferita kromom i molibdenom. Zbog toga može doći do povećanog stvaranja intermetalnih faza pri temperaturama od 650°C do 950°C. Također ubrzava stvaranje faze alfa primar u feritu.[13]
- Dušik – dodatkom dušika u legure čelika postižu se različiti utjecaji koji uključuje otpornost na rupičastu koroziju, veći udio austenita i čvrstoća. Ako se legira s molibdenom postiže se još bolji utjecaj na korozijsku otpornost. Dušik se uglavnom javlja u austenitu zbog velike topivosti u toj fazi i u pasivizacijskom sloju na površni. Prilikom vremenski duže pasivizacije u kiselinama izlučuje se dodatni udio dušika u pasivizacijski sloj. U dupleks čelicima legiranje dušikom je bitno jer stabilizira precipitaciju intemetalnih faza sigma i chi jer smanjuje precipitaciju kroma. Također je vrlo bitan jer smanjuje udio ferita stvaranjem austenita u ZUT-u prilikom zavarivanja kao što je prikazano slikom 12.. Njegov udio ipak treba kontrolirati jer pri višim udjelima postoji opasnost od izlučivanja nitridnih faza. [13][17]

N = 0.12%	N = 0.14%	N = 0.21%
		
Max. ferrite = 80 % Width = 0.35 mm	Max. ferrite = 74 % Width = 0.25 mm	Max. ferrite = 65 % Width = 0.15 mm

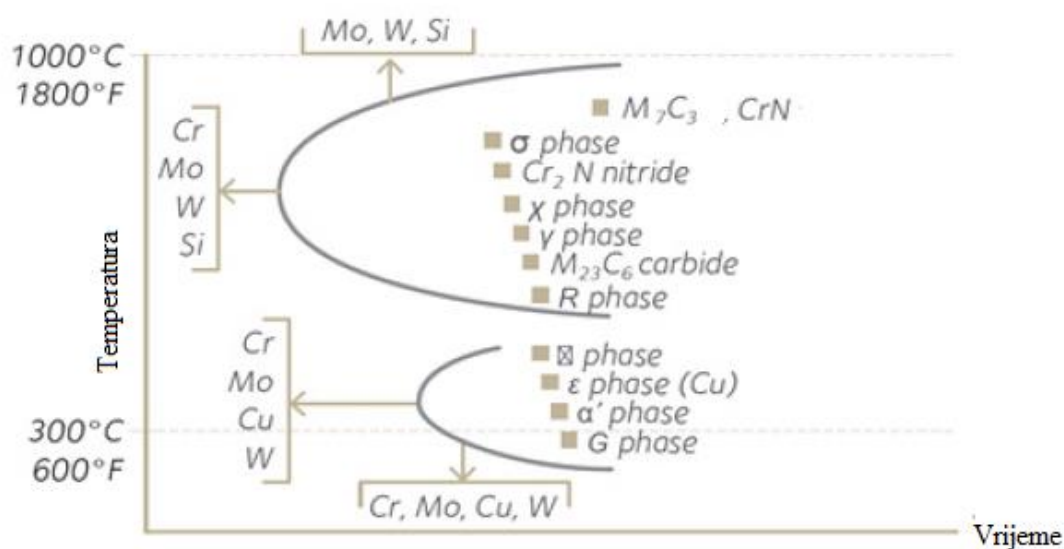
Slika 12. Utjecaj dušika na udio ferita u ZUT-u prilikom zavarivanja [17]

- Mangan – spada u grupu austenitotvoraca, ali primjenom kod dupleks čelika dobili su se različiti rezultati. Trenutno shvaćanje je da mangan ima malen utjecaj na udio austenita kod dupleks čelika s obzirom na trenutno korištene udjele. Povećava topivost dušika prilikom legiranja tj. smanjuje opasnost od ishlapljivanja i tako omogućuje njegov veći udio prilikom legiranja. Također povećava otpornost na mehanizme trošenja i čvrstoću bez smanjena udarnog rada loma. [13]
- Bakar – koristi se kako bi se povećala korozijska otpornost dupleks čelika u sumpornoj i kloridnoj kiselini. Uzrokuje precipitaciju malih bakrom bogatih precipitata koji povećavaju otpornost na abrazijsku koroziju. Njegov udio je ograničen na 2% jer negativno utječe na udarni rad loma pri povišenim temperaturama i može uzrokovati precipitacijsko očvršnjavanje.[13]
- Volfram – povećava otpornost na rupičastu koroziju i otpornost na koroziju u procijepu prilikom izloženosti zagrijanim kloridovim otopinama. Također u kloridnoj kiselini stvara netopljivi pasivni film WO_3 koji u djelovanju s drugim oksidnim slojevima poboljšava njihovu stabilnost. Pri temperaturama od $700^{\circ}C$ do $1000^{\circ}C$ uzrokuje stvaranje intermetalnih spojeva i sekundarnog austenita u zavarima. Također se otkrilo da omogućuje ubrzano stvaranje chi faze prilikom zavarivanja u odnosu na dodatne materijala bez njegovog dodatka. Zbog ovoga je udio volframa uglavnom ograničen na 1%-2% udjela u dupleks čelicima. [13]
- Silicij – Zbog afiniteta stvaranja sigma faze u dupleks čelicima legiranim silicijem njegov udio je ograničen na 1%. Ima pozitivan utjecaj na korozijsku otpornost prilikom izlaganja koncentriranoj dušičnoj kiselini i značajno poboljšava otpornost na napetosnu koroziju [13]
- Ugljik, sumpor i fosfor – udio ugljika je uglavnom ograničen na 0,02% do 0,03% kod dupleks čelika kako bi se spriječila precipitacija kromovih karbida koji povećavaju afinitet na rupičastu i interkristalnu koroziju. Udio sumpora i fosfora je kontroliran jer sumpor bitan za penetraciju prilikom zavarivanja. [13]

4.4. Precipitacijske faze kod dupleks čelika

Razvojem dupleks čelika stvorena je složena struktura s više legiranih elemenata koji poboljšavaju razna svojstva, ali neizbježno sa sobom donose i neke nedostatke kao što je moguća nestabilnost mikrostrukture. Zbog ovoga dupleks čelici prolaze kroz razne faze transformacije od rastaljenog do krutog stanja na različitim temperaturama. Neke od faza se smatraju nepoželjnima zbog njihovog utjecaja na mehanička i korozivna svojstva ovih čelika i žele se izbjeći ili barem minimalizirati. [16]

TTT dijagramom na slici 13. prikazano je stvaranje faza kod dupleks čelika s utjecajem legiranih elemenata na njihovo nastajanje.



Slika 13. TTT dijagram mogućih precipitacijskih faza kod dupleks čelika [17]

- Kromov karbid - $M_{23}C_6$ – precipitacija ove faze događa se na temperaturama od $900^{\circ}C$ do $700^{\circ}C$ za malo vrijeme držanja ($<30min$) i pri temperaturama od $700^{\circ}C$ do $550^{\circ}C$ za duže vrijeme držanja. Do taloženja ovog karbida dolazi eutektoidnom reakcijom δ u $M_{23}C_6 + \gamma_2$. S porastom karbida dolazi do pomicanja granica između ferita i austenita gdje se stvara kromom osiromašena zona u području ferita i zaostali austenit s niskim udjelom kroma na strani austenita. Ovo uzrokuje manju otpornost na senzibilizaciju čelika.[16]
- Kromovi nitridi - Cr_2N i CrN – precipitacija u manjim količinama Cr_2N događa se na sličnim temperaturama kao taloženje $M_{23}C_6$. Precipitacija nitrida je vrlo bitna tijekom zavarivanja jer pri brzom hlađenju dolazi do prezasićenosti ferita dušikom što rezultira

nadmetanjem u precipitaciji kromovih karbida Cr_2N i CrN i austenita. Ova struktura ima smanjenja mehanička svojstva i korozijsku otpornost zavarenog spoja. [16]

- Chi faza $-\chi$ – precipitacija ove faze može se pojaviti kod austenitnih, feritnih i dupleks čelika. Uvjet za nastajanje ove faze je minimalan udjel od 2% molibdena. Faza sadrži više molibdena i manje kroma ako se usporedi sa σ -fazom. Stvara se na zona ferita i austenita kao i između zrna ferita. Ova faza je stabilna pri nižim temperaturama, ali je primijećena njena transformacija u σ -fazu nakon velikog vremena držanja. Izlučivanjem ove faze može doći do drastičnog pada čvrstoće.[16]
- Sigma faza – σ – ovo je najviše proučavana intermetalna faza, ima tetragonalnu strukturnu rešetku s 30 atoma po rešetci. Javlja se u austenitnim, feritnim i dupleks čelicima. U dupleks čelicima ova faza sporije precipitira nego u austenitnim, ali u par sati može zamijeniti cijelu feritnu strukturu. Odvija se na temperaturama od 975°C do 650°C . Zamjenjuje feritnu fazu jer je bogata feritotvorcima kao što su krom, molibden i siliciji. Nastajanje ove faze rezultira bitnim gubitkom čvrstoće i korozijske otpornosti. [16]
- Alfa primar faza – α' – Sastoji se od kroma i željeza ima BCC strukturu i koherentna je s feritom. Veličina ove faze je dosta mala što otežava njezinu detekciju. Nastaje pri temperaturama od 350°C do 500°C . Ova faza je glavni uzrok pojave poznate kao krhkost 475 tj. uzrok je velikom padu udarnog rada loma pri temperaturi 475°C . Pojavom ove faze također dolazi do povećanja tvrdoće, vlačne čvrstoće i granice loma uz smanjenje istezljivosti. Korozijska otpornost na rupičastu koroziju značajno je smanjena s prisutnošću ove faze kao i otpornost na koroziju pri izlaganju dušičnoj kiselini na temperaturi vrelišta. Povećani udio ove faze nastaje kod većeg postotka legiranja s kromom. [16]

4.5. Zavarljivost dupleks čelika

U odnosu dupleks čelika s početka njihovog razvoja noviji dupleks čelici imaju dobru zavarljivost uz prikladno legiranje i odabir dodatnog materijala [18]. Najveći utjecaj na zavarljivost dupleks čelika ima temperatura koja utječe na mikrostrukturu u ZUT-u i samom zavaru. Loša kontrola temperature može za posljedicu imati [17]:

- Formiranje štetnih faza: sigma, alfa, chi faze i nitridi
- Neuravnoteženu strukturu ferita i austenita.

4.5.1. Smjernice za zavarivanje dupleks čelika

Kako bi se navedene posljedice izbjegle potrebno je pratiti sljedeće smjernice za zavarivanje [17]:

- Pregrijavanje - U slučaju pregrijavanja stvara se dodatni ferit zbog čega je potrebno izbjeći brzo hlađenje kako bi bilo dovoljno vremena da se dogodi njegova transformacija nazad u austenit. Na pregrijavanje najviše utječu unos topline i debljina osnovnog materijal.
- Dodatni materijal - Potrebno je odabrati dodatni materijal s kojim će se izbjeći velik udio ferita. Odabirom žice s većim udjelom nikla ili s udjelom dušika potaknut će se stvaranje austenita i na taj način će se izbjeći stvaranje većinske feritne strukture.
- Priprema zavara – zonu zavarivanja potrebno je mehanički očistiti od oksida i nečistoća i zatim odmastiti sredstvom bez prisustva klora u sastavu. U slučaju zavarivanja većih debljina potrebno je napraviti užljebljenja koja će omogućiti dobar pristup zavarivačkog pištolja i dobru zaštitu plinom.
- Predgrijavanje – predgrijavanje dupleks čelika nije preporučeno i može imati negativan utjecaj na svojstva zavara. U slučaju potrebe za odvlaživanje preporuča se zagrijavanje do 100°C
- Međuprolazna temperatura – za dobru kvalitetu zavara preporuča se hlađenje na međuprolaznu temperaturu ispod 150°C za „lean“ i standardne dupleks čelike, a za superdupleks čelike ispod 100°C
- Toplinska obrada – naknadna toplinska obrada nije preporučena i mora se izbjeći ako temperature prelaze 290°C

4.5.2. Preporučeni postupci za zavarivanje dupleks čelika

Postupci korišteni za zavarivanje austenitnih čelika mogu se primijeniti na zavarivanje dupleks čelika. Postupke dijelimo na [17]:

- Postupci s dodatnim materijalom: REL, FCAW, MIG, AC MIG, TIG i plazma
- Postupci bez dodatnog materijala: zavarivanje pod praškom, lasersko zavarivanje, zavarivanje snopom elektrona, TIG bez žice, elektrootporno zavarivanje i zavarivanje trenjem.

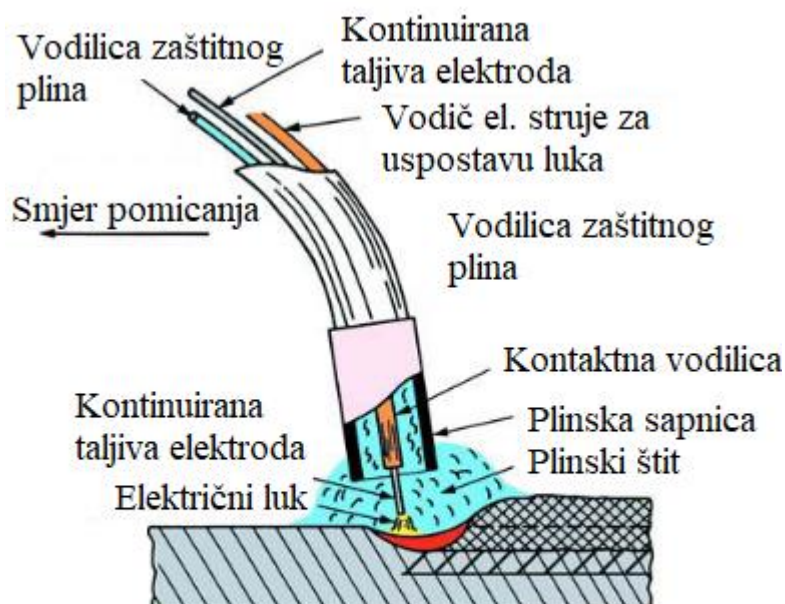
Kod zavarivanja postupcima bez dodatnog materijala potrebno je nadomjestiti udio dušika u rastaljenom metalu koji nije uvijek dovoljno nadomješten dušikom iz zaštitnog plina. Zavarivanjem postupcima MIG i AC MIG veliku ulogu igraju zaštitni plinovi koji moraju spriječiti oksidaciju metala zavara. Kako bi se ispunila oba uvjeta preporuča se korištenje plinskih mješavina $\text{Ar}+\text{CO}_2+\text{N}_2$ ili $\text{Ar}+\text{CO}_2+\text{He}+\text{N}_2$ koje su specifično namijenjene za ovu upotrebu.[17]

5. MIG postupak zavarivanja

U ovom poglavlju opisan je klasični MIG postupak i AC MIG postupaka. Navedena je potrebna oprema, načini prijenosa metala kao i njegove prednosti i nedostaci. Za AC MIG postupak opisani su parametri EN omjera i pulsne frekvencije.

5.1. Klasični MIG postupak

Ovaj postupak zavarivanja spada u skupinu elektrolučnih postupaka. Električni luk se uspostavlja između kontinuirane taljive elektrode i radnog komada pod zaštitom inertnog plina. Toplina generirana električnim lukom mora osigurati taljenje elektrode i osnovnog materijala, a inertni plin (uglavnom Ar ili He) mora osigurati zaštitu područja taljenja. Shematski prikaz postupka prikazan je slikom 14. Ovaj postupak je pogodan za automatizaciju ili robotsko zavarivanje jer je dodavanje žice već automatizirano pa se samo mora riješiti problem pomicanja pištolja za zavarivanje. [19] Potrebna oprema za MIG postupak prikazana je slikom 15.

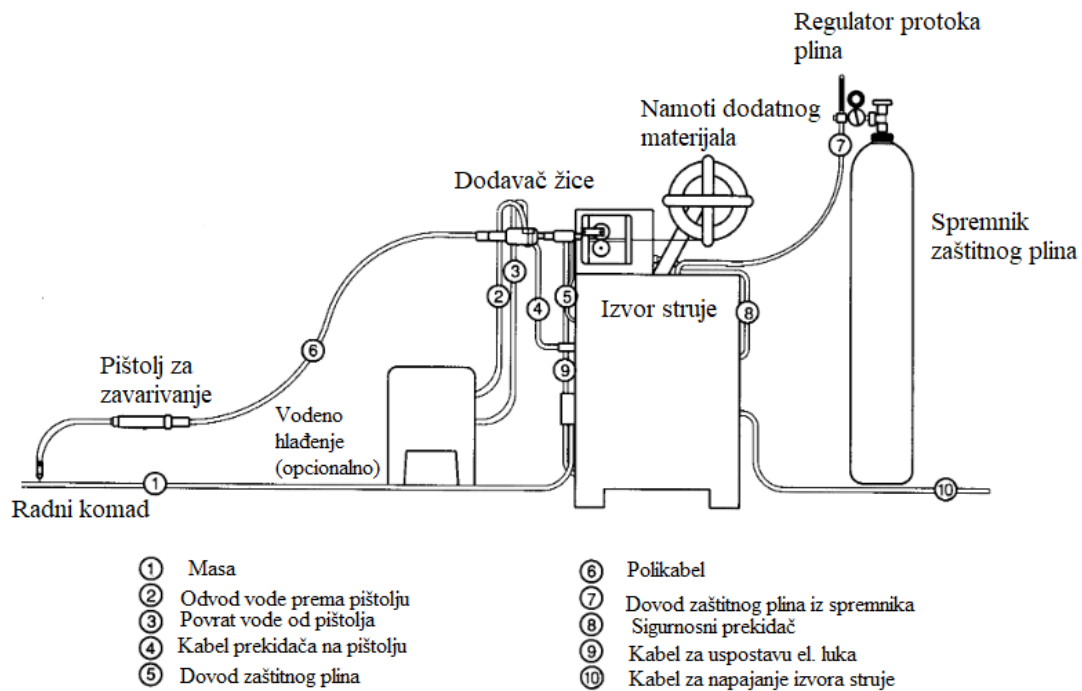


Slika 14. Prikaz procesa MIG zavarivanja [1]

Prijenos metala kod klasičnog MIG postupka ostvaruje se na četiri načina, a to su [1]:

- Prijenos metala kratkim spojem

- Prijenos metala prijelaznim lukom
- Prijenos metala štrcajućim lukom
- Prijenos metala impulsnim lukom



Slika 15. Oprema za MIG postupak zavarivanja [1]

Pri zavarivanju MIG postupkom, osim odabira dodatnog materijala i zaštitnog plina potrebno je kontrolirati osnovne parametre zavarivanja, a to su [1]:

- struja zavarivanja I , A
- napon zavarivanja U , V
- brzina dodavanja žice v_z , m/min
- brzina zavarivanja v , cm/min
- visina slobodnog kraja žice, mm

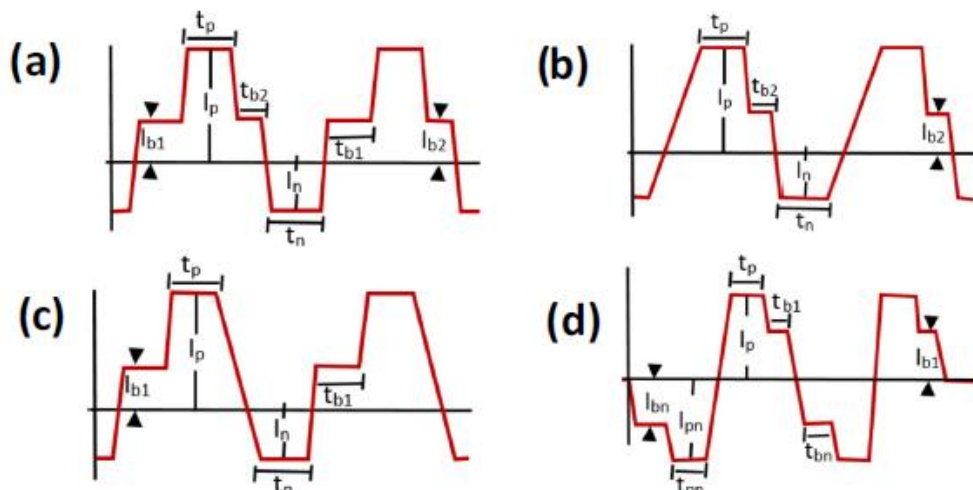
5.2. AC MIG postupak

AC MIG je relativno novi proces zavarivanja koji se pojavio s korištenjem invertera i elektroničkih komponenti koje su omogućile promjene strujnog valnog oblika te bolje i brže regulacije izvora struje. Ovaj postupak se ubraja u nove generacije MIG postupka koji koriste modificirane prijenose metala uz manji unos topline. Tim postupcima softverski su omogućene i druge opcije kao što su kontrola rasprskavanja, dimnih plinova, sinergijskog upravljanja napona i struje. [20][21]

5.2.1. Princip rada AC MIG postupka

Princip rada ovog postupka kombinira prednosti konvencionalnog postupka pri radu u području pozitivnog polariteta na žici kako bi smanji nestabilnosti pri radu u području negativnog polariteta na žici. Primjenom negativnog polariteta postiže se veća brzina taljenja i depozita materijala, ali i veća nestabilnost luka. Primjenom pozitivnog polariteta postiže se bolja stabilnost električnog luka, a njihovim balansom bolja kontrola procesa i manji unos topline u zavar. [20]

Za vrijeme pozitivnog polariteta postiže se smjer kretanja elektrona od radnog komada prema žici što smanjuje brzinu taljenja žice i koncentrira unos topline na radni komad. Tijekom negativnog polariteta smjer kretanja elektrona je suprotan prethodnome što rezultira većom koncentracijom unosa topline na samu žicu i time povećava brzinu taljenja. Ovaj način rada uspješno je primijenjen na druge elektrolučne postupke, ali je dugo vremena predstavljala problem pri korištenju kod MIG/MAG postupka zbog velike nestabilnosti luka pri negativnom polaritetu. Kod drugih postupaka taj problem je riješen dodavanjem stabilizirajućih elemenata u prah (kod EPP ili PPŽ). Kod MIG/MAG postupka ovo nije moguće jer se koristi puna žica. Primjenom zaštitnog plina Ar+CO₂ ovaj problem je donekle riješen, ali je tek razvojem modernih izvora struje i regulacije oblika strujnih valova postignuto dobro rješenje. Izgled različitih valnih oblika prikazan je slikom 16. [21][22]



Slika 16. Različiti valni oblici za AC MIG zavarivanje [21]

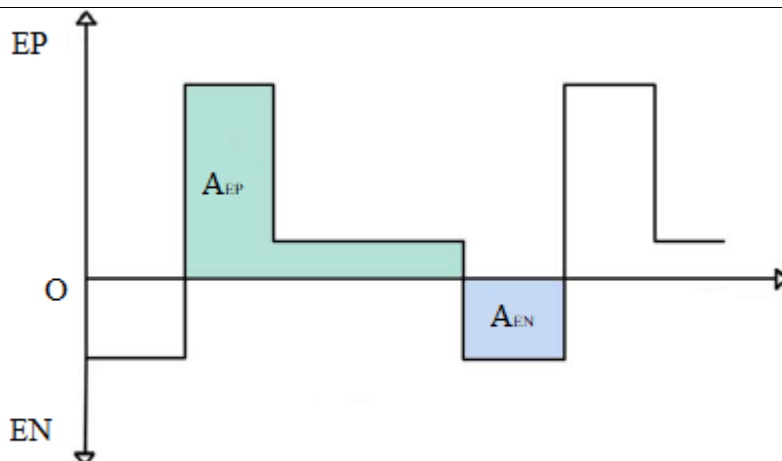
5.2.2. EN omjer

Prije definiranja EN omjera potrebno je razumjeti mehanizme koji se odvijaju u području negativnog i pozitivnog polariteta kako bi mogli razumjeti važnost njihovog balansiranja. Za vrijeme negativnog polariteta dolazi do penjanja korijena električnog luka gdje on prekriva kapljicu na vrhu žice i penje se po još ne rastaljenoj žici. Ovo rezultira ubrzanim taljenjem žice, a time i povećanjem volumena kapljice. Daljnjim zadržavanjem u negativnom području polariteta električni luk se spušta na vrh kapljice što uzrokuje odbojnim silama koje otežavaju odvajanje rastaljene kapljice, time pridonosi nestabilnosti električnog luka i samim rasprskavanjem kapljice. Zbog ovoga je bitan prijelaz u pozitivno područje polariteta u kojem se električni luk ponaša kao kod klasičnog DC MIG postupka i dolazi do produljenja kapljice i njezinog odvajanja s vrha žice. Prema opisanim mehanizmima postavljena je definicija EN omjera. [23]

EN omjer predstavlja udio polariteta proveden u negativnom području za vrijeme trajanja jednog impulsa. Iz ove definicije i pojednostavljenog shematskog prikaza impulsa na slici 17. možemo EN omjer iskazati preko površine grafa za pozitivno i negativno područje, pa iz toga proizlazi jednadžba (8) gdje je [23]:

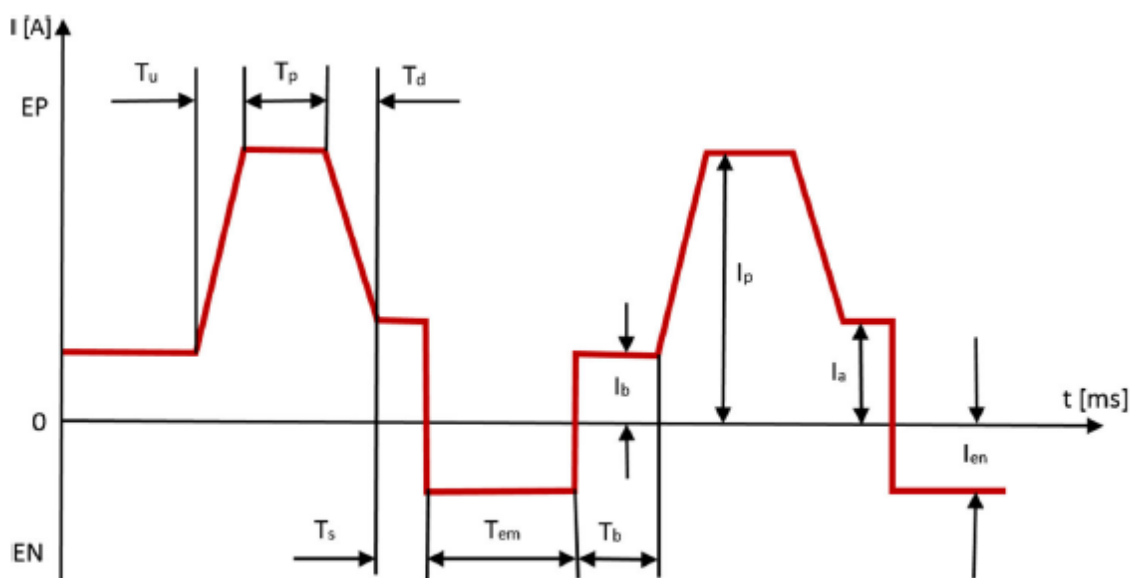
- A_{EP} – površina djela impulsa u pozitivnom području
- A_{EN} – površina djela impulsa u negativnom području

$$EN, \% = \frac{A_{EN}}{A_{EP} + A_{EN}} \quad (8)$$



Slika 17. Shematski prikaz površina za izračun EN omjera [23]

Ako primijenimo pojednostavljenu logiku računanja EN omjera preko jednadžbe (8) na složeniji primjer prikazan slikom 18. može se razumjeti kako primijeniti izmjerene parametre impulsne struje i pojedinih vremena za izračun EN omjera.



Slika 18. Složeniji valni oblik impulsa s prikazanim parametrima [21]

Primjenom parametara na slici 18. u jednadžbu (8) ona poprima novi zapis koji glasi:

$$EN, \% = \frac{2|I_{en}|T_{en}}{I_p(T_u+T_d+2T_p)+I_b(T_u+2T_b)+I_s(T_d+2T_s)+2|I_{en}|T_{en}} \quad (9)$$



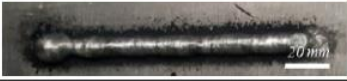






- I_p , A – vršna struja impulsa
- I_b , A – bazna struja impulsa
- I_{en} , A – vršna struja negativnog područja

- I_s A – prijelazna struja
- T_{en} , ms – vrijeme trajanja negativnog djela impulsa
- T_u , ms – vrijeme porasta struje impulsa u pozitivnom području
- T_p , ms – vrijeme trajanja vršne struje
- T_d , ms – vrijeme pada struje impulsa u pozitivnom području
- T_s , ms – vrijeme prijelaza

U članku [21] se navodi kako s povećanjem EN omjera dolazi do smanjenja penetracije prilikom zavara i povećanja širine zavara. Ako se u obzir uzmu prethodno navedeni mehanizmi ova pojava je po njima pravdana.

5.2.3. Frekvencija pulsa žice

Promjenom frekvencije pulsa žice utječe se na učestalost odvajanja kapljice od žice osnovnog materijala. Povećanjem frekvencije izmjene pulsa postiže se češće odvajanje kapljice od žice, a time je gušći raspored kapljica u metalu zavara.[24] Slikom 19. prikazan je izgled površina za različite EN omjere i frekvencije.

	Frekvencija	EN omjer	Izgled zavara
(a)	×1	0	
(b)		0.25	
(c)		0.5	
(d)		0.75	
(e)		1	
(f)	×3	0.25	
(g)		0.5	
(h)	×5	0.25	
(i)		0.5	

Slika 19. Izgled površine za različite EN omjere i frekvencije [24]

6. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

6.1. Uvod

U eksperimentalnom dijelu ovog rada cilj je bio odrediti optimalne parametre za navarivanje dupleks čelika na konstrukcijski čelik AC MIG Wave Pulse postupkom uz korištenje različitih mješavina zaštitnog plina na bazi argona.

Sva potrebna ispitivanja u ovom radu odrađena su u Laboratoriju za zavarivanje na Katedri za zavarene konstrukcije, Laboratoriju za materijalografiju Katedre za materijale i tribologiju i Laboratoriju za zaštitu materijala na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

6.2. Plan izvedbe eksperimentalnog rada

Plan izvedbe eksperimentalnog rada podijeljen je u dva dijela. U prvom dijelu eksperimentalnog rada napravljeni su uzorci navarivanja u jednom prolazu koristeći različite frekvencije impulsa uz konstantan EN omjer pod zaštitom dva različita plina na bazi argona. Na temelju analize makrostrukture ovih uzoraka odabrani su parametri zavarivanja koji su dali najbolju geometriju navara.

U drugom dijelu napravljeni su uzorci koristeći odabrane parametre iz prvog dijela. Uzorci su napravljeni navarivanjem u pet prolaza s preklapanjem u iznosu od jedne trećine. Razlika između uzoraka je u međuprolaznoj temperaturi tj. na prvom uzorku se navarivalo bez hlađenja između prolaza, a drugi uzorak je hlađen propuhivanjem komprimiranog zraka po površini do temperature 200° C. Koristeći ove uzorke napravljena je mikrostruktura iz koje je utvrđen udio ferita u nadvišenju navara i u zoni miješanja osnovnog i dodatnog materijala.

6.3. Korištena oprema u eksperimentalnom dijelu

Za izradu uzoraka te za ispitivanje makrostrukture i mikrostrukture u ovom radu koristila se sljedeća oprema: izvor struje s dodavačem žice, sustav za automatizirano zavarivanje, uređaji za brušenje i poliranje, stanica za elektrokemijsko nagrizanje, postolje s fotoaparatom i invertni mikroskop.


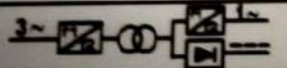



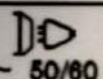




6.3.1. Oprema za navarivanje

Za navarivanje postupkom AC MIG Wave Pulse korišten je izvor struje Welbee 400 proizvođača OTC – DAIHEN i prikazan je na slici 20.



Slika 20. Izvor struje Welbee 400 proizvođača OTC – DAIHEN

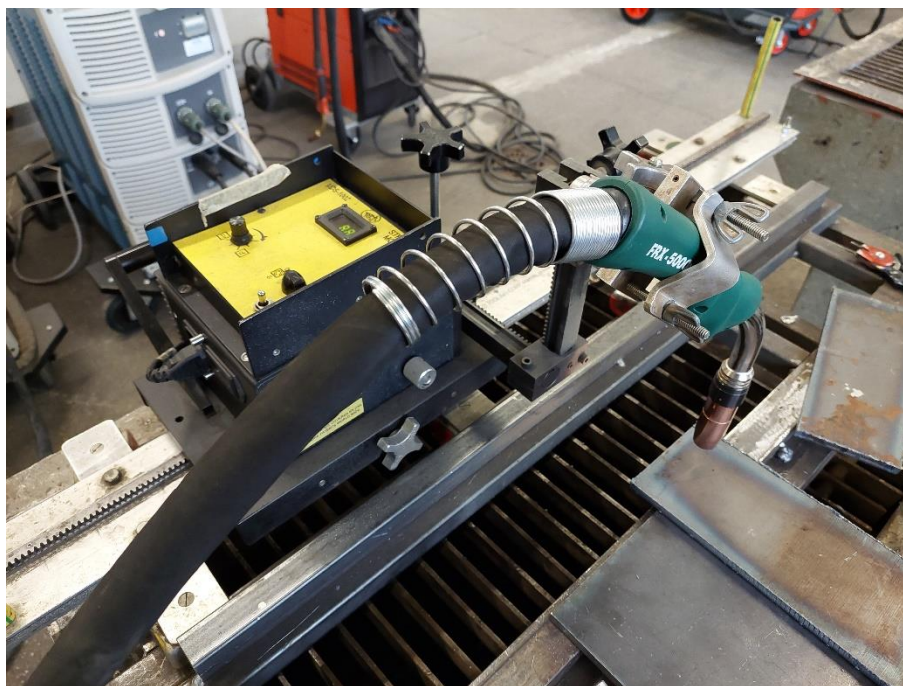
Pločica specifikacija izvora struje Welbee 400 prikazana je na slici 21.

DAIHEN VARSTROJ d.d. Industrijska ulica 4, 9220 Lendava, Slovenija		 DAIHEN VARSTROJ			
AC/DC WELDING POWER SOURCE WB-W400 AC-MIG		P30205Y-1095012	DATE 2021		
		EN 60974-1			
	 20-400Hz	30 A / 15.5 V - 400 A / 34.0 V			
	U_0 106 V	X	40%	60%	100%
		I_2	400 A	360 A	350 A
		U_2	34.0 V	32.0 V	31.5 V
 3 ~ 50/60 Hz	$U_1 = 400 V$	$I_{1max} = 30.9 A$	$I_{1eff} = 19.8 A$		
IP23					Mass: 86 kg
NA 608344.00					

Slika 21. Pločica specifikacija uređaja Welbee 400

6.3.2. Sustav za automatizirano zavarivanje

Kako bi postigli konstantnu brzinu navarivanja, udaljenost pištolja za zavarivanje od radnog komada i nagib pištolja za zavarivanje korišten je modularni sustav za automatsko zavarivanje MDS-1002 proizvođača Bug-O prikazan na slici 22. Ovaj model ima opciju podešavanja brzine zavarivanja i smjera zavarivanja, a udaljenost pištolja od kućišta namješta se pomoću prihvata za pištolj.



Slika 22. Modularni sustav za automatizirano zavarivanje MDS-1002 proizvođača Bug-O

6.3.3. Oprema za pripremu ispitivanja makrostrukture i mikrostrukture

Kako bi bilo moguće provesti ispitivanje makrostrukture i mikrostrukture uzoraka bilo ih je potrebno pripremiti. Priprema se sastojala od brušenja i poliranja, nagrivanja i snimanja struktura.

Uređaji Mecatech 250 i Minitech 233 proizvođača PRESI prikazanim na slici 23. i slici 24. korišteni su za brušenje i poliranje uzoraka.



Slika 23. Uređaj za brušenje i poliranje Mecatech 250



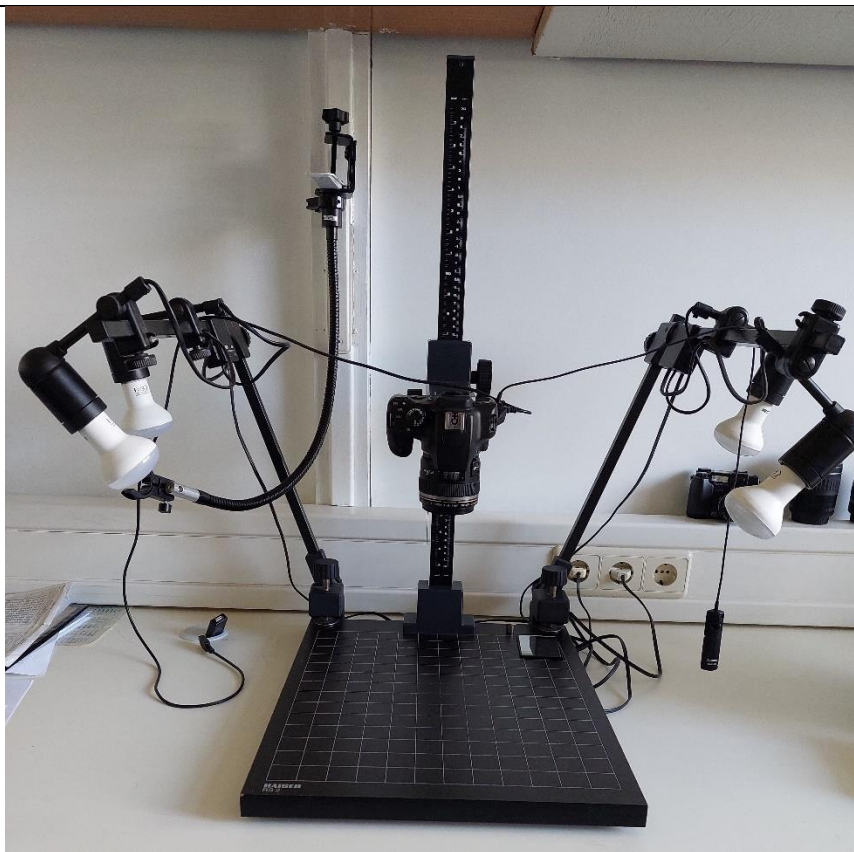
Slika 24. Uređaj za brušenje i poliranje Minitech 233

U Laboratoriju za zaštitu materijala korištena je stanica za elektrokemijsko nagrizanje. Ona se sastoji od kadice s elektrodama i izvora struje i prikazana je na slici 25.



Slika 25. Stanica za elektrokemijsko nagrizanje

Fotografije makrostrukture uzoraka napravljene su koristeći fotoaparat Cannon 1000D koji je bio montiran na postolje s dodatnim osvjetljenjem KAISER RS2. Fotoaparat i postolje su prikazani na slici 26.



Slika 26. Fotoaparar Cannon 1000D montiran na postolje KAISER RS2

Za ispitivanje mikrostrukture korišten je invertni mikroskop Olympus GX51 i prikazan je na slici 27.



Slika 27. Invertni mikroskop Olympus GX51

6.4. Osnovni i dodatni materijal

U ovom poglavlju navedene su korištene vrste materijala kao i norme prema kojima se klasificiraju. Također su navedeni kemijski sastavi i njihova mehanička svojstva.

6.4.1. Osnovni materijal – čelik S355JR

Za osnovni materijal na kojem će se izvoditi navarivanje odabran je toplovaljani lim debljine 10mm izrađen u kvaliteti S355JR prema normi EN 10025-2. Ovaj lim spada u konstrukcijske čelike što vidimo iz oznake kvalitete tj. oznaka „S“ predstavlja grupu konstrukcijskih čelika, broj uz ovu oznaku označava minimalnu garantiranu granicu razvlačenja koja u ovom slučaju iznosi 355 MPa, a zadnja oznaka „JR“ predstavlja udarni rad loma pri temperaturi od 20°C i on iznosi 27 J. Tablica 1. prikazuje kemijski sastav, a tablica 2. prikazuje mehanička svojstva čelika S355JR.

Tablica 1. Kemijski sastav čelika S355JR za debljine ploča $t < 16$ mm prema normi EN 10025-2:2019 [25]

Kemijski elementi	Maksimalni udio u kemijskom sastavu, %
C	0,24
Si	0,55
Mn	1,6
P	0,035
S	0,035
N	0,012
Cu	0,55
Ostali	-

Tablica 2. Mehanička svojstva čelika S355JR za debljine ploča $3\text{mm} < t < 16\text{mm}$ prema normi EN 10025-2:2019 [25]

Oznaka materijala	Granica razvlačenja- <i>Rp0,2</i> MPa	Vlačna čvrstoća- <i>Rm</i> MPa	Udarni rad loma – pri 20°C, J	Istezljivost-A, %
S355JR	355	510-680	27	22

6.4.2. Dodatni materijal – ML 22.9.3

Kao dodatni materijal za navarivanje korištena je žica promjera $\Phi 1,2$ mm dupleks čelika ML 22.9.3 proizvođača MIG WELD GmbH. Ovaj materijal je pogodan za zavarivanje Cr-Ni-Mo i Cr-Ni čelika npr. čelici 316, 316L, 316Ti, 304, 304L, 321 i 347 za radne temperature do 400 °C. Također se može koristiti za zavarivanje nehrđajućih čelika s maksimalni udjelom Cr od 19%. Ima dobru otpornost na opću koroziju, interkristalnu i rupičastu koroziju. Otpornost na interkristalnu koroziju dolazi zbog malog udjela C, a otpornost na rupičastu zbog udjela Mo. [26]

Klasifikacije ovog dodatnog materijala po različitim normama prikazane su u tablici 3.

Tablica 3. Klasifikacija dodatnog materijala po normama [26]

Norma	EN ISO 14343-A/G	DIN 8556	AWS
Naziv materijala	22 9 3 N L	1.4462	2209

Kemijski sastav dodatnog materijala ML 22.9.3 prikazan je u tablici 4., a njegova mehanička svojstva u tablici 5.

Tablica 4. Kemijski sastav žice dupleks čelika ML 22.9.3 [26]

Kemijski element	Udio u kemijskom sastavu, %
C	≤ 0,020
Si	0,50
Mn	1,60
P	≤ 0,20
S	≤ 0,15
Cr	23,00
Ni	9,00
Mo	3,20
N	0,16

Tablica 5. Mehanička svojstva dupleks čelika ML 22.9.3 [26]

Mehanička svojstva pri temperaturi od 20°C	
Granica razvlačenja, $R_{p0,2}$, MPa	600; 420 (300°C)
Vlačna čvrstoća, R_m , MPa	750; 600 (300°C)
Istezljivost A, %	25; 20 (300°C)
Udarni rad loma, J	130; 50 (300°C)
Tvrdoća, HV	240
Toplinska vodljivost, W/m °C	16
Toplinska rastezljivost po °C od 20°C do -400°C	$14,5 \times 10^{-6}$

6.5. Zaštitni plinovi

U eksperimentu su korištena dva zaštitna plina na bazi argona Inoxline C2 i Inoxline N2 proizvođača MESSER. Sastav i preporuka za zavarivačke postupke dani su u tablici 6. prema katalogu proizvođača [27].

Tablica 6. Sastav i preporuka za korištenje zaštitnih plinova prema katalogu proizvođača [27]

Naziv	Grupa prema ISO 14175	Kemijski sastav, %			Postupak zavarivanja prema DIN EN 14610
		Ar	CO ₂	N ₂	
Inoxline C2	M12	97,5	2,5	-	TIG
Inoxline N2	N2	97,5	-	2,5	MIG/MAG

Prema katalogu proizvođača [27] plinovi pod nazivom Inoxline u grupi M12 koriste se za zavarivanje visokolegiranih i nelegiranih čelika, a plinovi u grupi N2 za zavarivanje dupleks, superdupleks i austenitnih CrNi čelika.

6.6. Zavarivanje s jednim prolazom i priprema uzoraka za analizu

U ovom poglavlju opisan je postupak pripreme za navarivanje, odabira parametara navarivanja, i obrade uzoraka za ispitivanje makrostrukture i mikrostrukture. Također su navedena zapažanja tijekom postupka navarivanja.

6.6.1. Priprema uzoraka za navarivanje

Pločice za navarivanje dimenzija 120x70mm izrezane su iz ploče toplovaljanog lima izrađenog u kvaliteti S355JR. Prije nego su izrezane na točnu dimenziju pomoću tračne pile, korišten je postupak plinskog rezanja kako bi dobili dimenziju ploče koja može stati na režno postolje pile. Ukupno je izrezano šest pločica dimenzija 120x70mm i dvije veće ploče dimenzija 300x120mm. Veće ploče su izrezane kako bi se na njima izvelo navarivanje nakon odabira optimalnih parametara na osnovu analize makrostrukture uzoraka s navarivanjem u jednom prolazu. Postupak rezanja tračnom pilom prikazan je na slici 28.



Slika 28. Rezanje pločica na tračnoj pili

Uzorci su nakon rezanja ručno obrađeni koristeći turpiju kako bi se uklonio srh nastao rezanjem na pili i svi oštri bridovi zbog sigurnijeg rukovanja uzorcima tijekom izvođenja eksperimenta. Površina pločica je također očišćena koristeći metalnu četku i odmašćena alkoholom od sredstva za ispiranje i hlađenja koje je korišteno za vrijeme rezanja na pili. Zbog lakšeg raspoznavanja uzorci su označeni brojevima od jedan do šest. Pripremljene pločice su prikazane na slici 29.

Nakon završetka pripreme pločica pripremljena je oprema za zavarivanje i odabrani su parametri navarivanja. Ovaj postupak je opisan u sljedećem poglavlju.



Slika 29. Pločice dimenzija 120x70mm nakon pripreme

6.6.2. Određivanje parametara navarivanja

Kako bi ispitali utjecaj frekvencije impulsa na geometriju navara korištene su tri različite frekvencije uz dva zaštitna plina. Prema mogućnostima uređaja Welbee W400 koji ima frekvencijski raspon od 0.5 Hz do 32 Hz za način rada AC MIG Wave Pulse odabrane su frekvencije prikazane u tablici 7.

Tablica 7. Odabrane vrijednost frekvencije u kombinaciji sa zaštitnim plinom prema uzorcima

Oznaka uzorka	1	2	3	4	5	6
Plinska mješavina	Inoxline C2 (Ar + 2,5%CO ₂)			Inoxline N2 (Ar + 2,5%N ₂)		
Frekvencija, Hz	0,5	15,5	32	0,5	15,5	32

Prema korisničkim uputama proizvođača izvora struje [4] upravljanjem frekvencijom se utječe na izgled zavarene površine, tj. na gustoći između zrna zavara. Osim što utječe na izgled zavara, frekvencija također utječe na brzinu dodavanja žice koja zbog ovog načina rada u stvarnosti nije konstantna nego se mijenja sukladno s oblikom struje tj. impulsa.

Zbog smanjenja utjecaja drugih parametara na ispitivanje utjecaja frekvencije na geometriju i strukture zavara odlučeno je da će oni biti isti za sve uzorke uz korištenje sinergijskog načina rada koji omogućuje usklađivanje struje i napona za vrijeme rada prema dinamičkoj karakteristici po odabranim postavkama. Zbog ograničenja postavki na izvoru struju Welbee W400 u oba slučaja korišten je program za zavarivanje CrNi čelika jer najbliže odgovara dupleks čeliku ML 22.9.3. koji je korišten kao dodatni materijal, također u oba slučaja korišten je program za zaštitni plin MIG CO₂. Navedene postavke su prikazane na sučelju izvora struje na slici 30.



Slika 30. Prikaz sučelja izvora struje s odabranim postavkama

Parametre koji ne ovise o izvoru struje postignuti su namještanjem sustava za automatsko zavarivanje MDS-1002, a to su brzina zavarivanja, slobodni kraj žice te nagib i položaj pištolja za zavarivanje. Protok plina postavljen je regulatorom protoka spojenim na spremnike plina. Vrijednost ovih, kao i drugih konstantnih parametara korištenih u ovom eksperimentu prikazane su u tablici 8.

Tablica 8. Postavljeni parametri zavarivanja

Struja zavarivanja I , A	115
Napon zavarivanja U , V	20.7
Brzina žice v_z , m/min	5,8
Slobodni kraj žice, mm	13
EN omjer	0
Nagib pištolja, °	90
Brzina zavarivanja v , cm/min	25
Protok plina Q , L/min	18

Vrijednost parametra EN omjer u tablici je označena s brojem nula. Prema korisničkim uputama [28] postavljanjem vrijednosti EN omjer na nula predstavlja standardni EN omjer za određeni postupak.

6.6.3. Zapažanja tijekom navarivanja i rezultati navarivanja

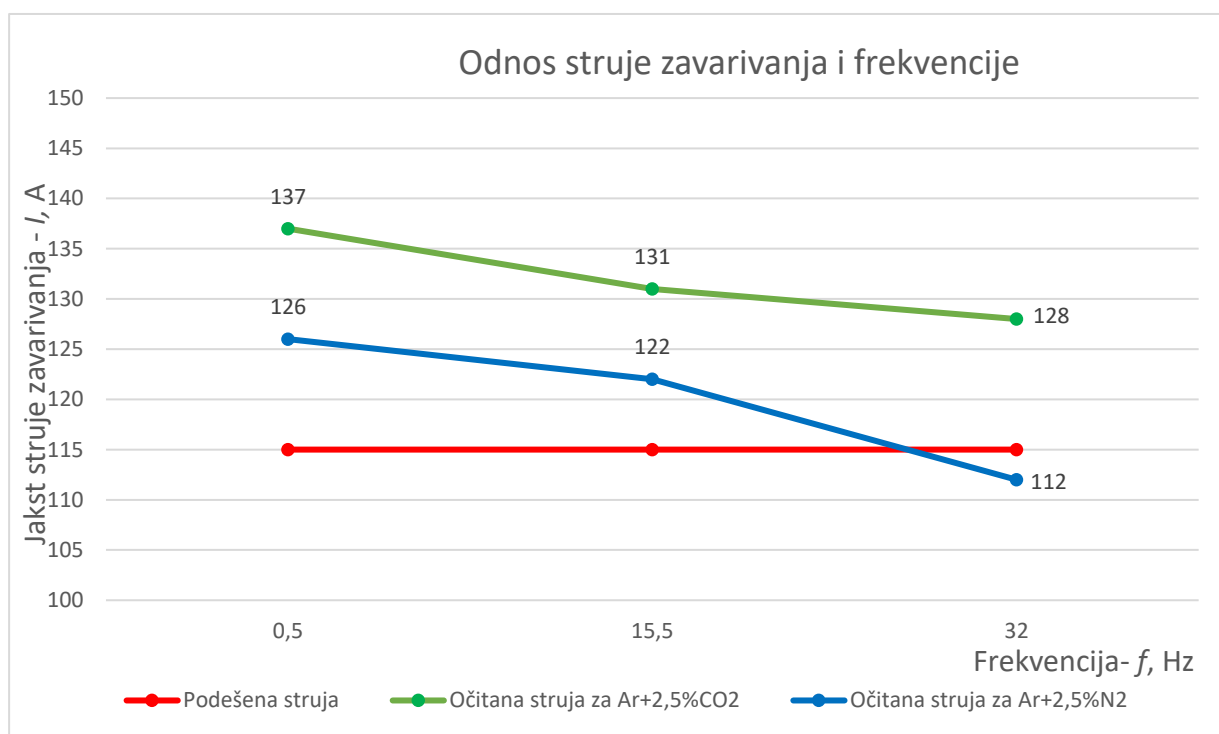
Za vrijeme navarivanja vrijednosti struje i napona su se mijenjali u odnosu na postavljene vrijednosti. Opaženo je razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti struje bila veća pri nižim frekvencijama gdje je iznosila i do deset ampera. Ova razlika ima smisla kada se uzme u obzir način i brzina dodavanja žice.

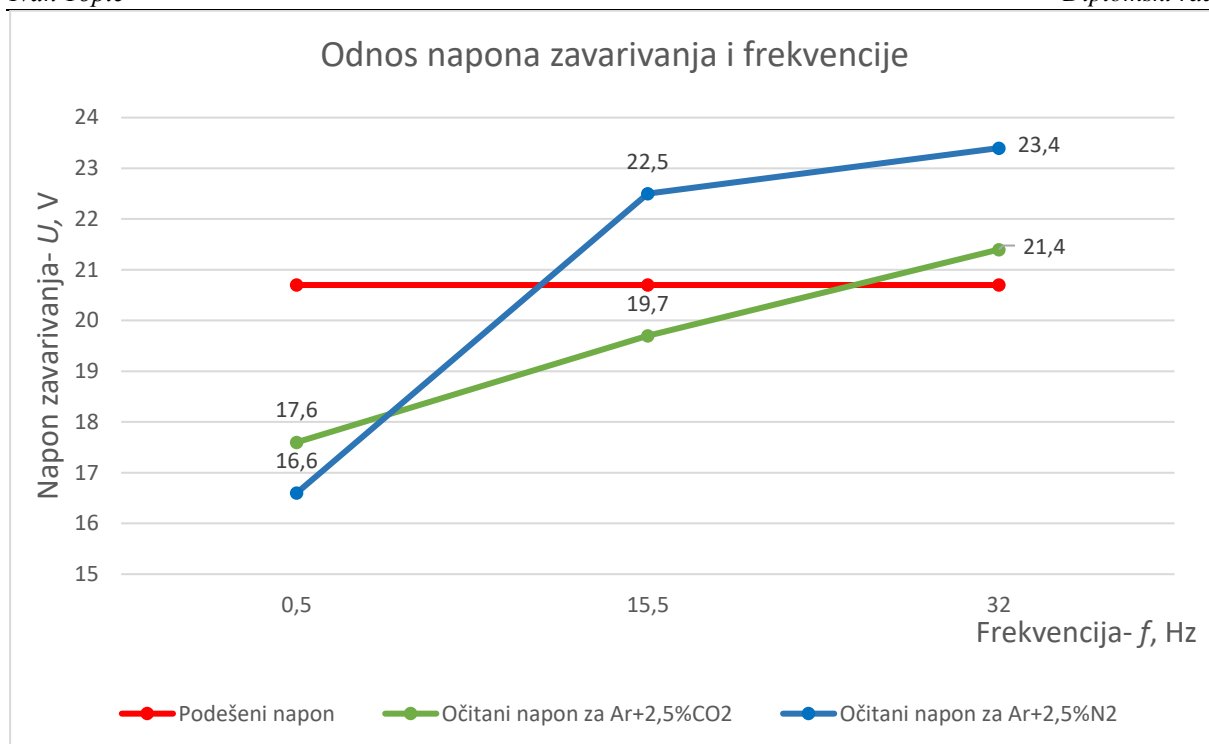
U AC Wave Pulse načinu rada koristi se „push“ dodavanje žice i pri niskim frekvencijama $< 3\text{Hz}$ velika je amplituda brzine dodavanja žice koja nestaje na frekvencijama $> 5\text{Hz}$ tj. kada se približi graničnoj vrijednosti odziva motora dodavača žice. [28]

Promjene u brzini dodavanja žice nisu očitane jer je potrebno odabrati između očitavanja struje zavarivanja i brzine dodavanja žice. Uz dodatno istraživanje bilo bi moguće napraviti model korelacije između ovih vrijednosti za odabrani postupak, ali to prelazi temu ovog rada. Prosječne očitane vrijednosti struje i napona dane su u tablici 9, a odnosi između vrijednosti struje i napona zavarivanja s frekvencijom prikazani su na slikama 31. i 32.

Tablica 9. Očitane vrijednosti struje i napona zavarivanja za postavljene frekvencije

Uzorak	Struja zavarivanja I , A	Napon zavarivanja U , V
1	137	17,6
2	131	19,7
3	128	21,4
4	126	16,6
5	122	22,5
6	112	23,4

**Slika 31. Odnos vrijednosti struje zavarivanja s frekvencijom**



Slika 32. Odnos vrijednosti napona zavarivanja i frekvencije

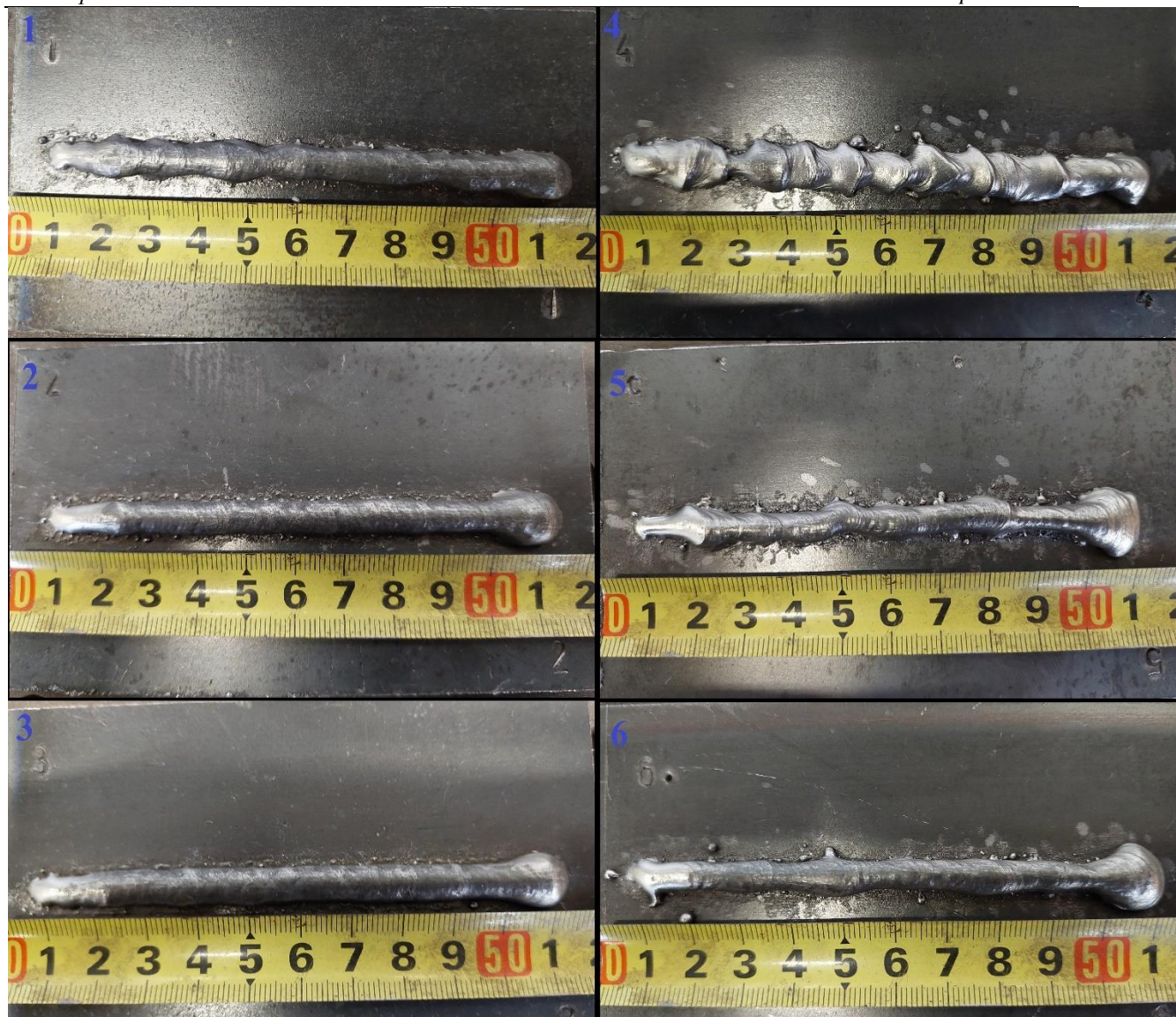
Pregledom grafova prikazanih na slikama 31. i 32. ustanovljeno je da porastom frekvencije opada očitana vrijednost struje i približava se postavljenoj vrijednosti, dok se vrijednost napona povećava. Ovakva promjena struje i napona karakteristična je za moderne MIG/MAG postupke opisane u teorijskom dijelu ovog rada.

Korištenjem zaštitnog plina Ar+2,5%CO₂ postignuta je dobra stabilnost električnog luka uz minimalno rasprskavanje, dok je korištenjem zaštitnog plina Ar+2,5%N₂ stabilnost električnog luka bila loša uz vidljivo rasprskavanje rastaljenog metala. Također se primijetio utjecaj oksidacije primjenom plina Ar+2,5%CO₂ na površini osnovnog materijala, dok je površina uzoraka pod zaštitom plina Ar+2,5%N₂ bila prekrivena crnim čađavim slojem. Površine uzoraka nakon navarivanja prikazane su slikom 33. Pojava crnog sloja na osnovnom materijalu prema korisničkom priručniku [28] nastaje zbog učestale pojave kratkog spoja tijekom zavarivanja. Što bi značilo da je pri upotrebi zaštitnog plina Ar+2,5%N₂ kasno dolazilo do taljenja žice dodatnog materijala koji bi u dodiru s talinom uzrokovao rasprskavanje. Iz ovog objašnjenja se ne može sa sigurnošću izvesti zaključak da zaštitni plin Ar+2,5%N₂ uzrokuje nestabilan električni luk tijekom zavarivanja dupleks čelika AC MIG Wave Pulse metodom jer uređaj nema odgovarajući program za njegovo korištenje.



Slika 33. Izgled površine uzoraka nakon zavarivanja

Nakon čišćenja površine metalnom četkom i tkaninom natopljenom alkoholom bolje su uočeni rezultati rasprskavanja zbog nestabilnog električnog luka prilikom zaštite plinom Ar+2,5%N. Također su bile uočene indikacije o naljepljivanju zavara na uzorcima broj četiri i pet. Očišćeni uzorci prikazani su na slici 34., za čišćenje uzoraka korištena je metalna četka i tkanina natopljena alkoholom.



Slika 34. Uzorci nakon navarivanja

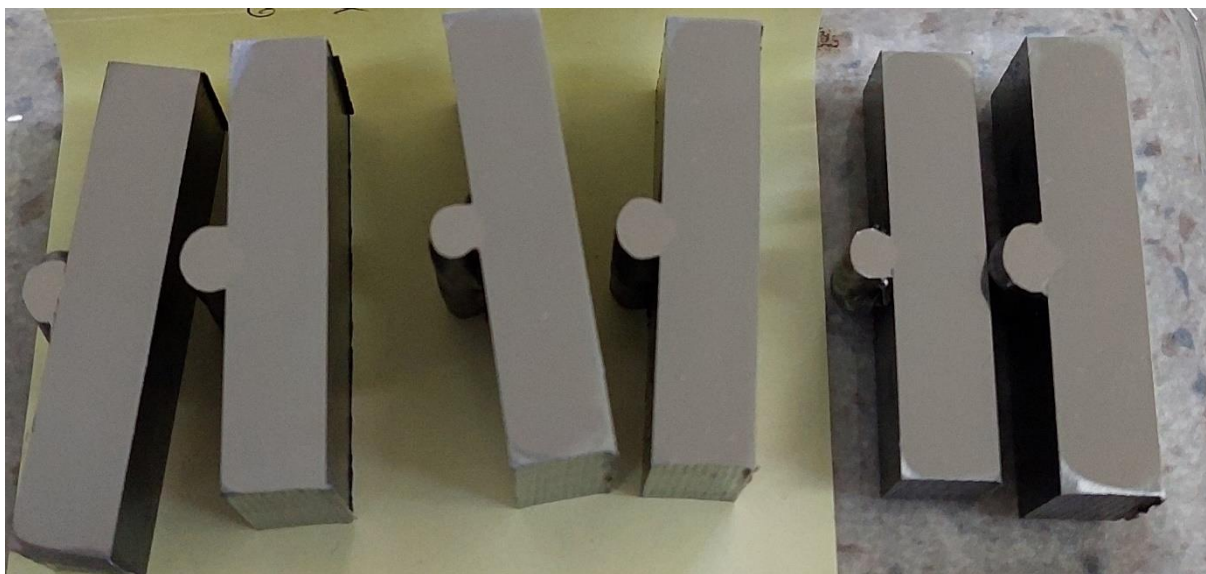
6.6.4. Priprema uzoraka za analizu makrostrukture

Kako bi se provela analiza makrostrukture trebalo je napraviti izbruske iz navarenih uzoraka. Izbrusci se izrađuju prema uputama norme HRN EN ISO 17639 – Razorno ispitivanje zavara metalnih materijala – Makroskopsko i mikroskopsko ispitivanje.[29] Priprema uzoraka tj. izbrusaka odrađena je u Laboratoriju za materijalografiju i Laboratoriju za zaštitu materijala. Prvi korak je bio odabir presjeka na kojem se želi napraviti makrostruktura i po tome su uzorci odrezani na tračnoj pili. Pri odabiru presjeka trebalo je obratiti pozornost da na njemu bude što manje grešaka i nepravilnosti. Nakon što su svi uzorci odrezani bilo ih je potrebno ručno brusiti koristeći brusni papir s granulacijom P80, P150, P250 i P320 kako bi se uklonili okom vidljivi

tragovi rezanja. Sljedeći korak je bilo brušenje i poliranje na strojevima Minitex 233 i Mecatech 250. Parametri korišteni u ovom postupku su:

- brzina okretanja ploče 300 okr/min
- granulacija brusnih papira P320, P600, P1000, P2400 i P4000

Za vrijeme brušenja korištena je voda koja je ispirala, hladila i podmazivala uzorke. Polirani uzorci spremni za postupke nagrizanja prikazani su na slici 35.



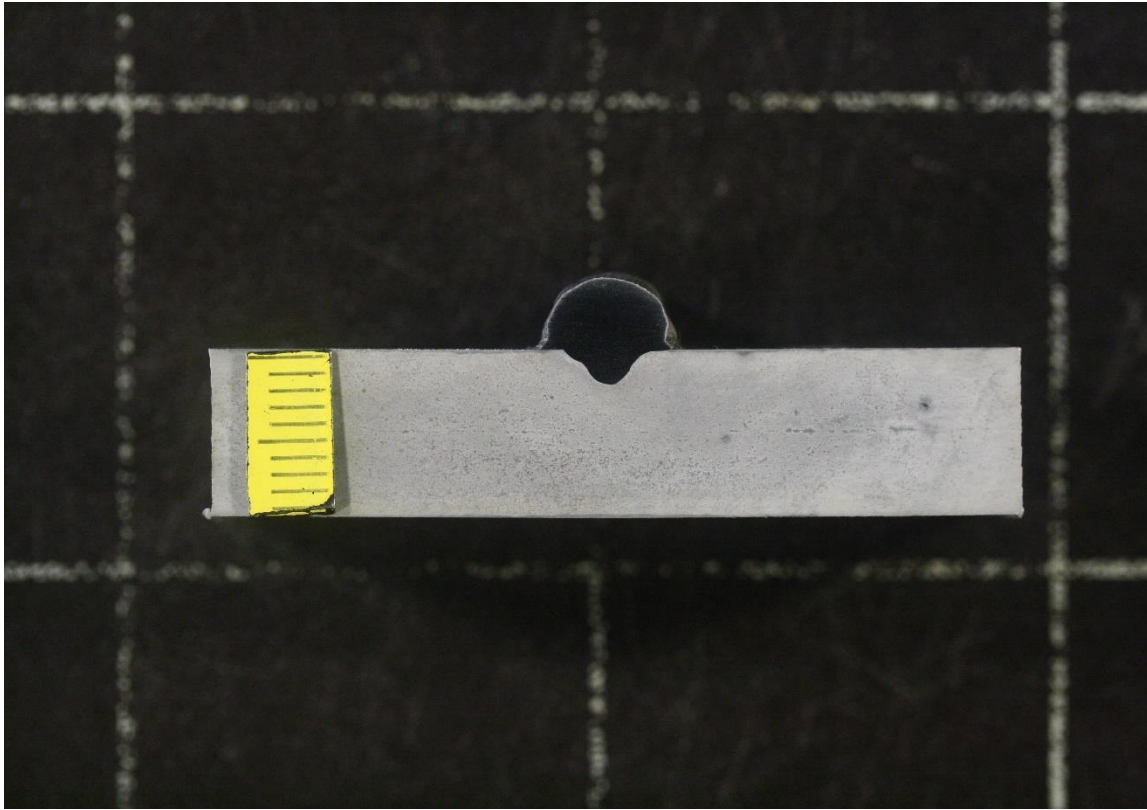
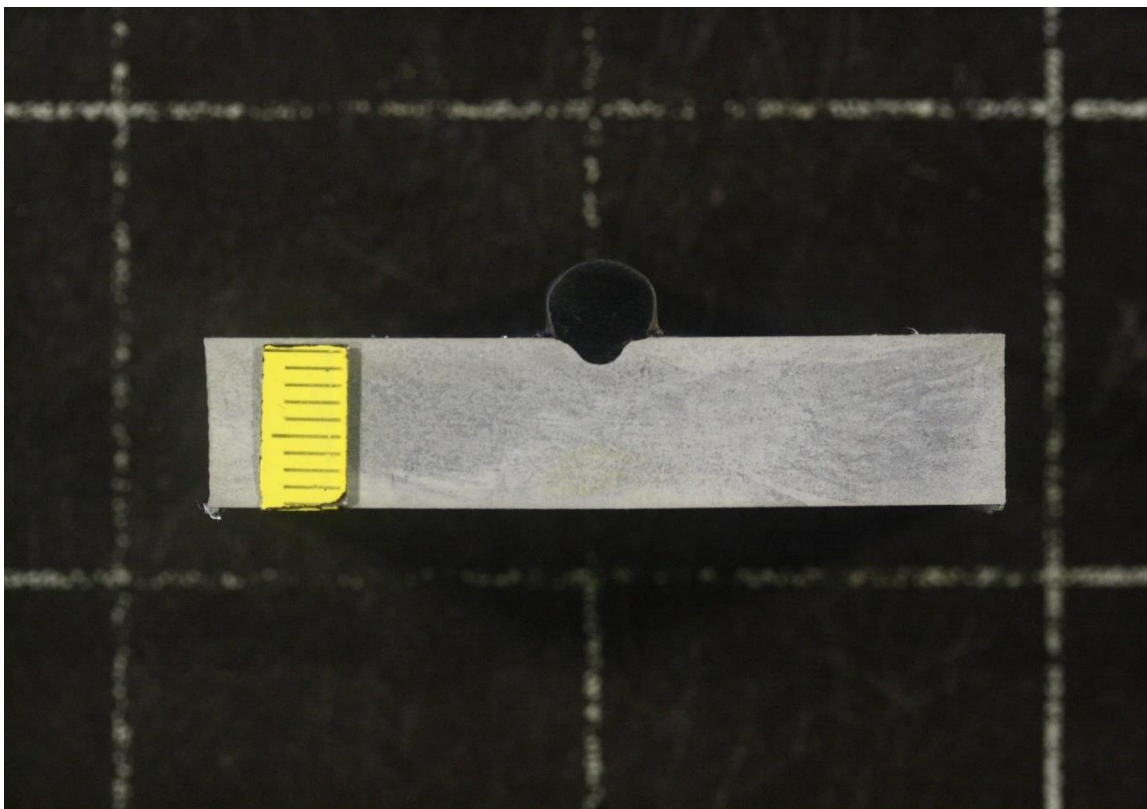
Slika 35. Uzorci nakon poliranja

Nagrizanje površine uzoraka potrebno je napraviti kako bi se postigao kontrast osnovnog materijala i zavara. Nagrizanje izbrusaka izvedeno je u Laboratoriju za zaštitu materijala, a korišteni postupci su:

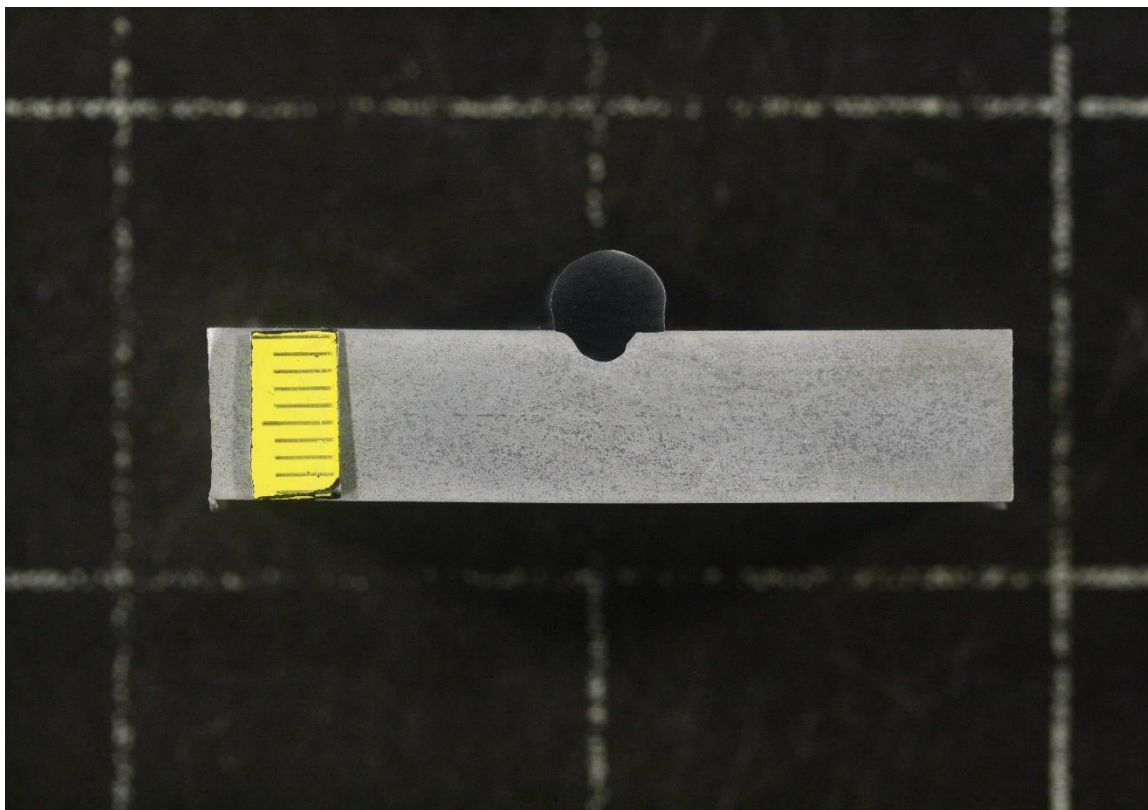
- kemijsko nagrizanje
- elektrokemijsko nagrizanje.

Kemijskim nagrizanjem uspješno je nagrižen osnovni materijal S355JR, ali nije imalo efekta na dupleks čelik ML 22.9.3 NL zbog čega je korišten postupak elektrokemijskog nagrizanja. Kemijsko nagrizanje napravljeno je korištenjem tri postotne otopine nitala. Uzorci su u otopini držani približno 20 sekundi nakon čega su isprani pod mlazom vode i očišćeni alkoholom. Elektrokemijsko nagrizanje izvedeno je uranjanjem uzorka u deset postotnu oksalnu kiselinu pri čemu je uzorak bio spojen na pozitivnu elektrodu dok je negativna elektroda napravljena od nehrđajućeg čelika uronjena u kiselinu. Vrijednost napona iznosila je 4V, a vrijednost struje 2A s vremenom držanja od deset sekundi što je bilo dovoljno da se napravi vidljiva razlika između materijala. Fotografije makrostrukture napravljene su fotoaparatom Cannon 1000D i prikazane su u tablici 10.

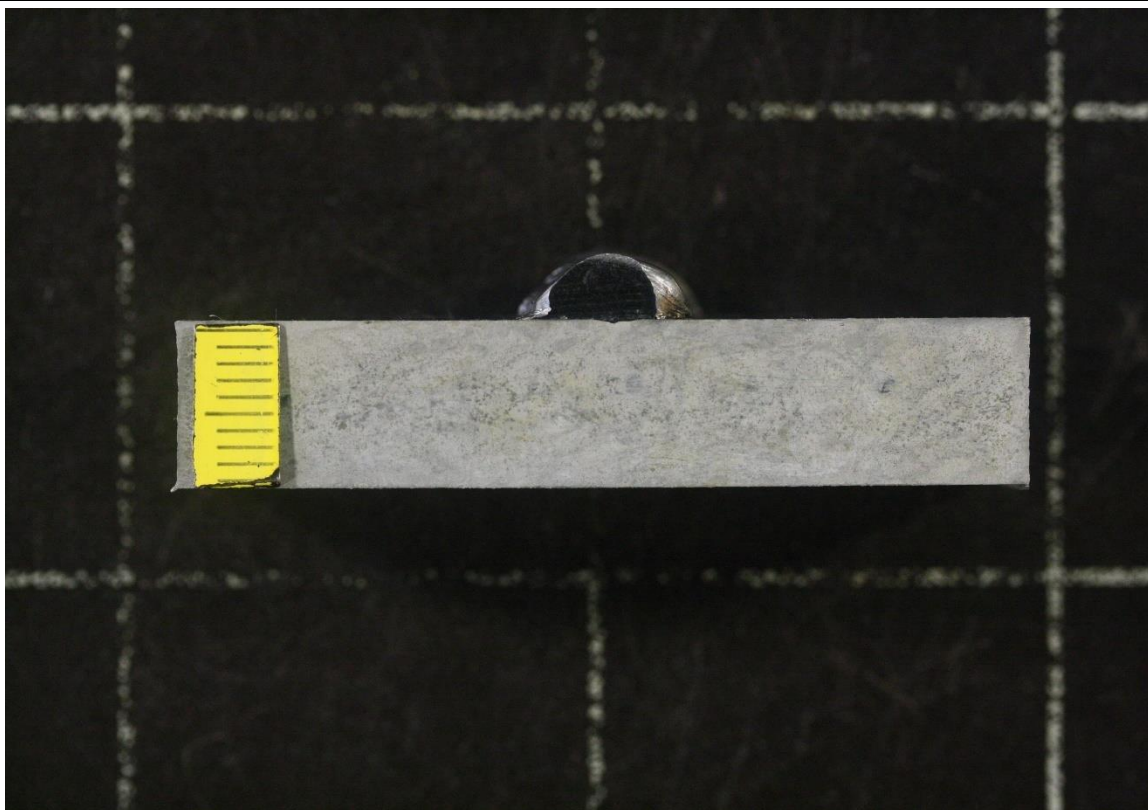
Tablica 10. Fotografije makrostrukture uzoraka

Br. uzorka	Makrostruktura uzorka
1	 A macro photograph of a rectangular metal specimen. The specimen is light gray with a fine, granular texture. It has a semi-circular notch cut into its top edge. On the left side, there is a yellow adhesive label with several horizontal lines. The specimen is placed on a black background with a white grid pattern.
2	 A macro photograph of a rectangular metal specimen, similar to sample 1. It has a light gray, granular texture and a semi-circular notch on its top edge. A yellow adhesive label with horizontal lines is attached to the left side. The specimen is set against a black background with a white grid pattern.

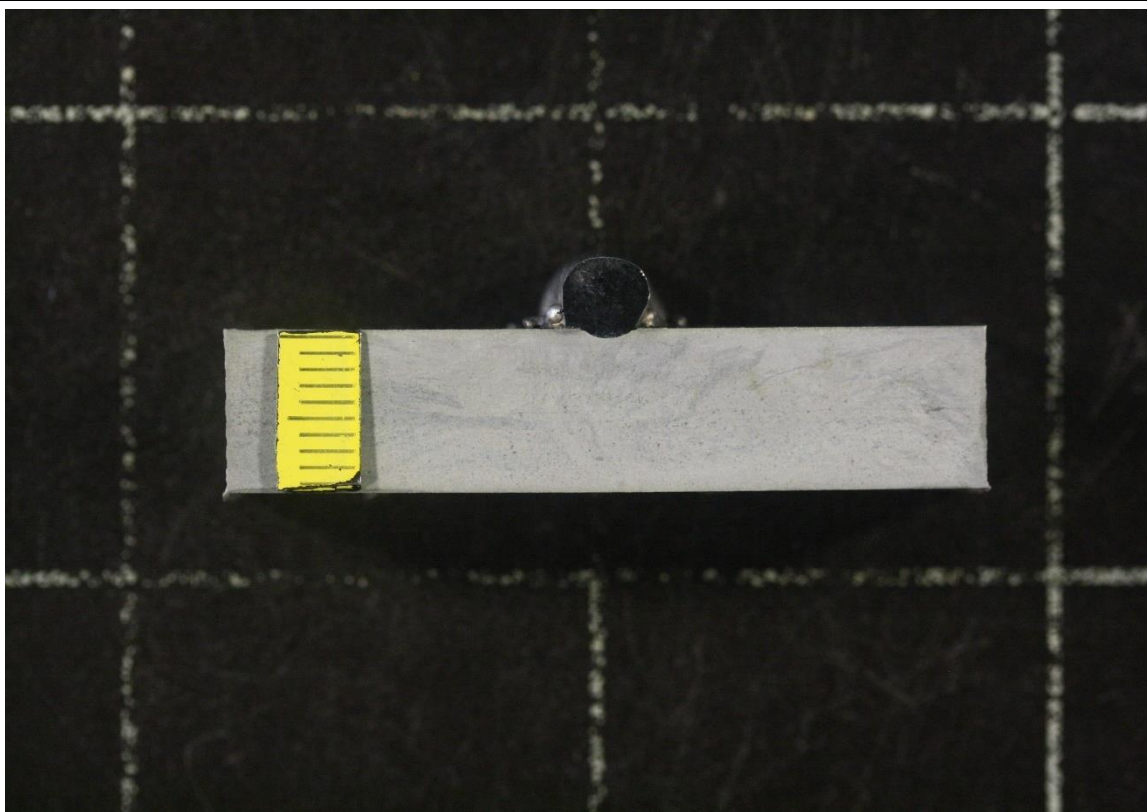
3



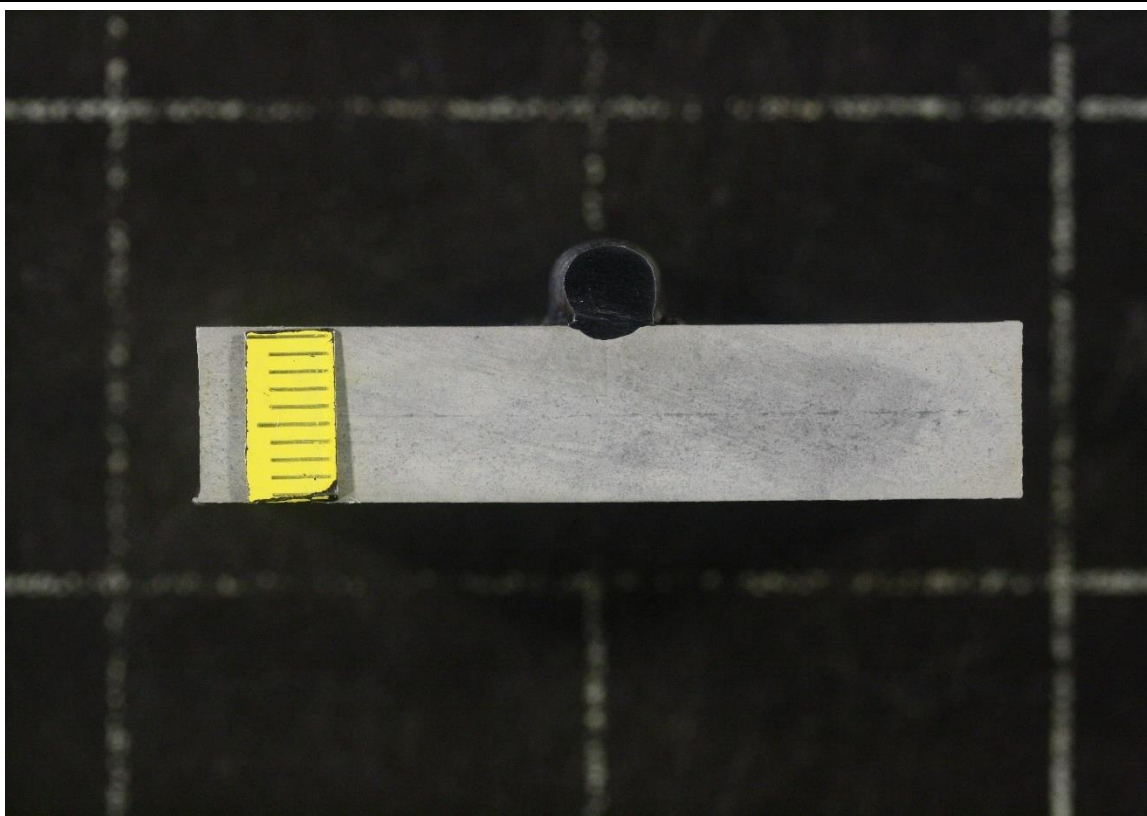
4



5



6

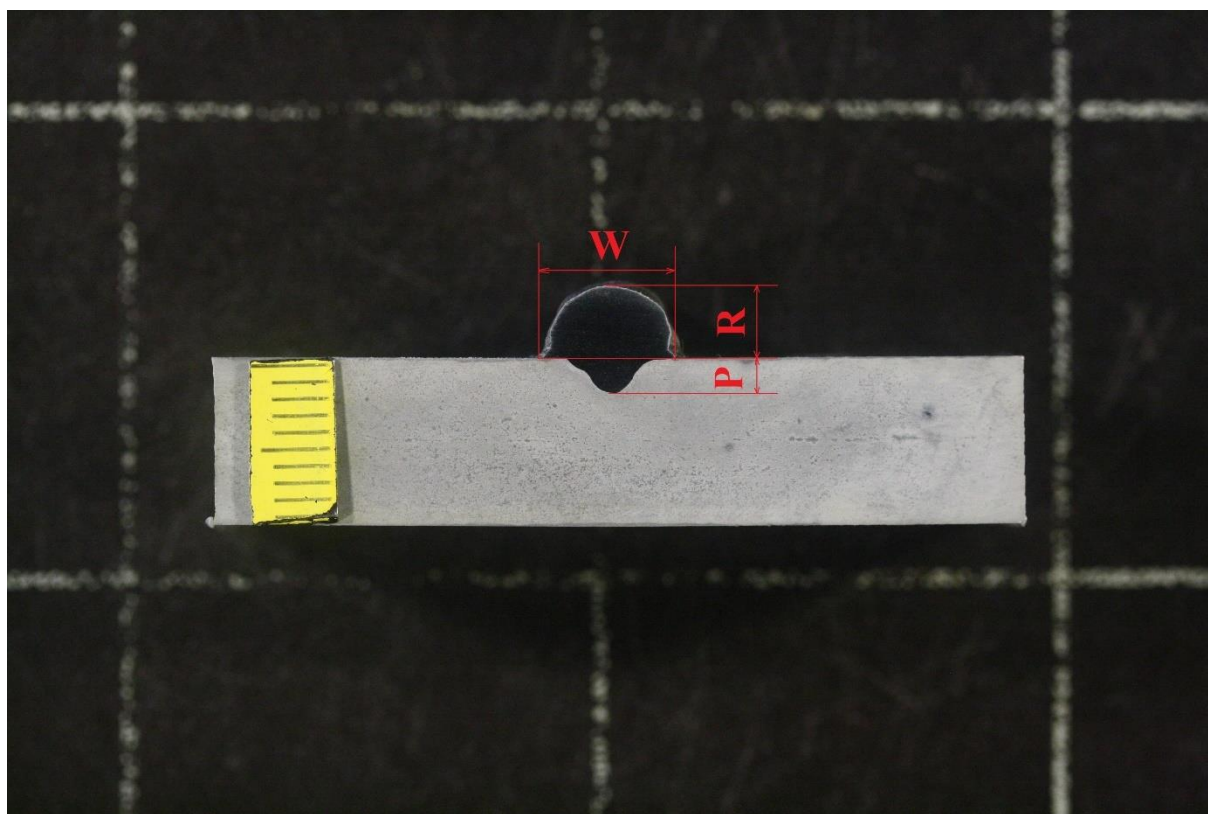


6.7. Analiza makrostrukture

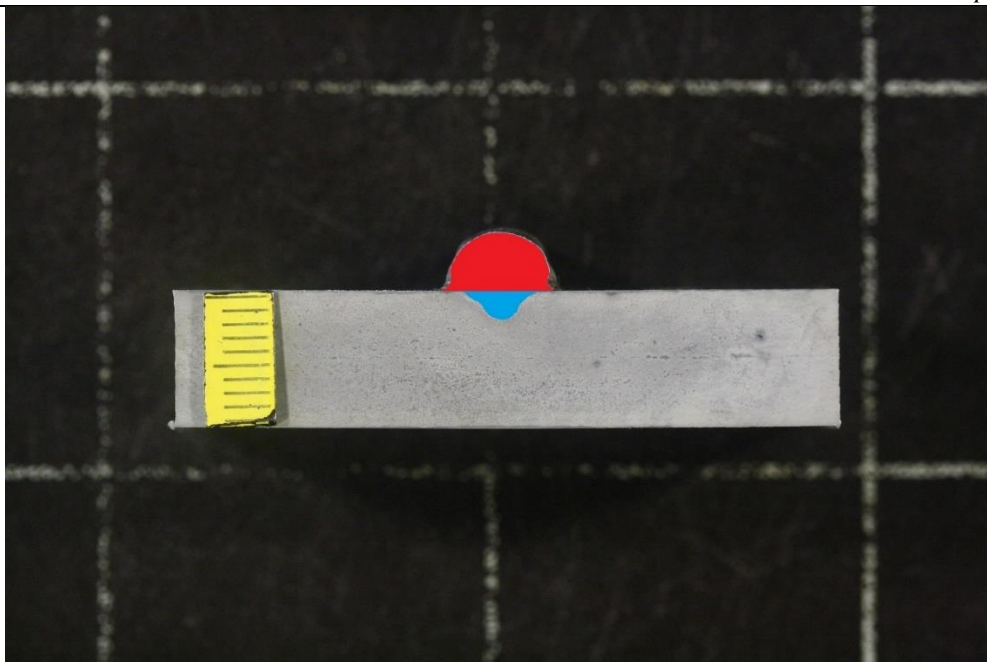
Analiza makrostrukture napravljena je koristeći program ImageJ pomoću kojega su izmjereni sljedeći geometrijski parametri:

- penetracija zavara – P , mm
- širina zavara – W , mm
- visina zavara – R , mm
- površina nadvišenja – A_R , mm²
- površina penetracije – A_P , mm²

Slika 36. prikazuje parametre penetracije, širine i visine zavara, a slika 37. prikazuje površinu nadvišenja (crvena boja) i površinu penetracije (plava boja) za uzorak br. 1.



Slika 36. Prikaz geometrijskih parametara penetracije, širine visine zavara



Slika 37. Prikaz površine nadvišenja i površine penetracije za uzorak br. 1

Mjerenje se izvodi na slijedeći način. Potrebno je otvoriti sliku makrostrukture i programu ImageJ i postaviti mjernu skalu kako bi se znao odnos između stvarne dužine i piksela, zbog toga je na svaki uzorak postavljena mjerka. Zbog točnijih rezultata postavljanje mjerne skale napravljeno je za svaki uzorak. Dužine su izmjerene koristeći funkciju „Straight line“ i „Measure“. Za određivanje površine koristila se funkcija „Freehand selections“, ova funkcija omogućuje slobodan odabir oblika što je idealno u ovoj situaciji jer je oblik navara nepravilan, funkcija također automatski zatvara nacrtani oblik spajajući prvu i zadnju točku. Površina nacrtanog oblika programski je izračunata funkcijom „Measure“. Rezultati mjerenja dani su u tablici 11.

Tablica 11. Rezultati mjerenja parametara pomoću programa ImageJ

Uzorak	Penetracija P , mm	Širina W , mm	Visina R , mm	Površina nadvišenja A_R , mm ²	Površina penetracije A_P , mm ²
1	2,1	7,8	4,3	25,86	6,3
2	1,6	6,3	4,6	24,1	4,8
3	1,8	6,7	4,7	26,2	5,5
4	0,2	7,6	3,9	20,8	0,4
5	0,7	5,3	4,7	20,1	1,7
6	0,8	5,2	4,5	20	2,1

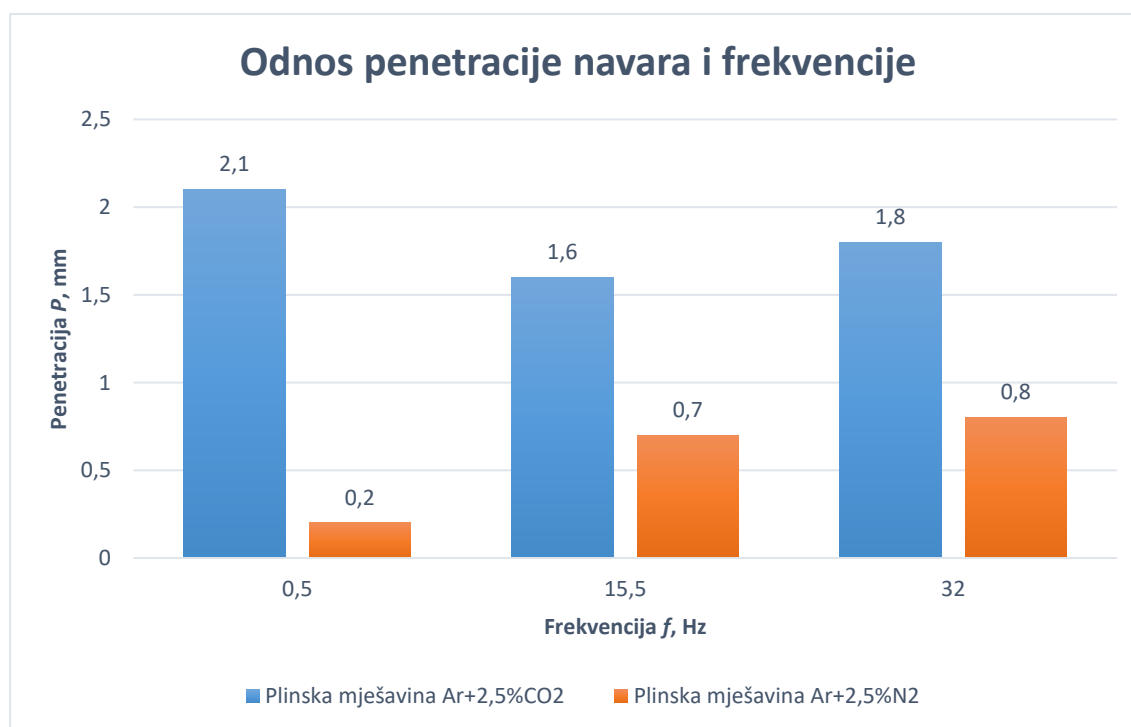
Koristeći izračunate površine nadvišenja i penetracije izračunat je stupanj miješanja pomoću formule (1) koristeći geometrijsku metodu objašnjenu u teorijskom dijelu ovog rada.

$$D = \frac{A_P}{(A_P + A_R)} \quad (1)$$

Rezultati izračuna stupnja miješanja navedeni su u tablici 12.

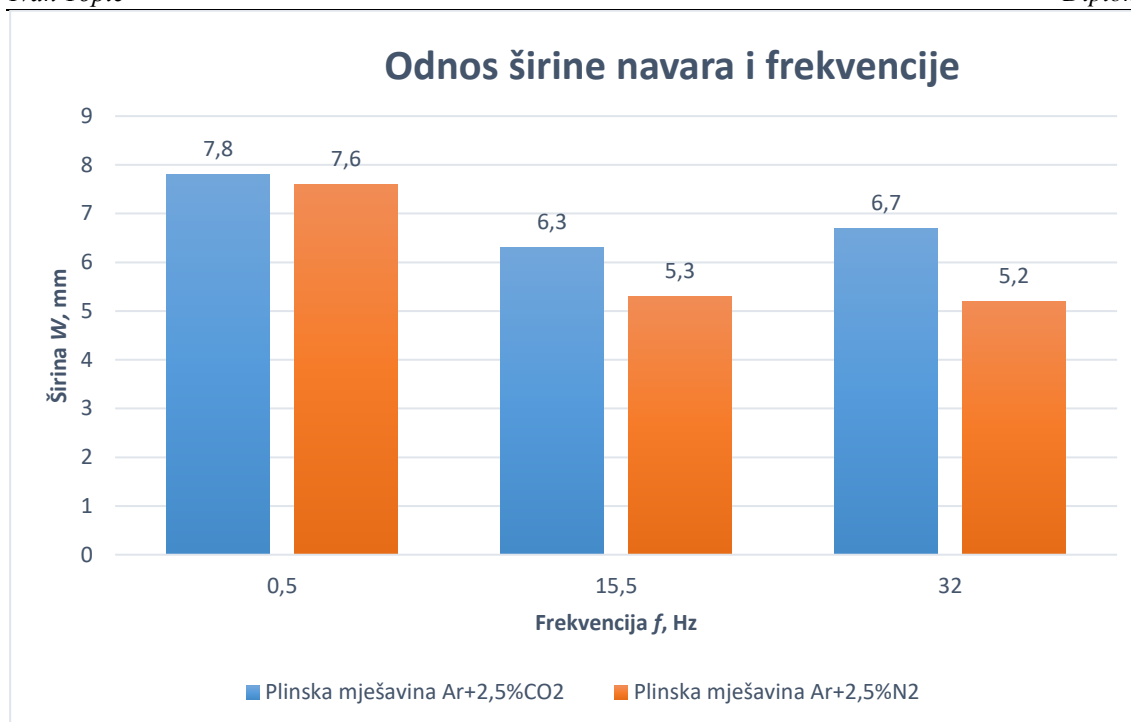
Br.uzorka	1	2	3	4	5	6
Stupanj miješanja D , %	19,6	16,6	17,4	1,9	7,8	9,5

Zbog lakše analize napravljen je grafički prikaz odnosa parametara s kombinacijom zaštitnog plina i korištene frekvencije.



Slika 38. Grafički prikaz ovisnosti penetracije navara i frekvencije

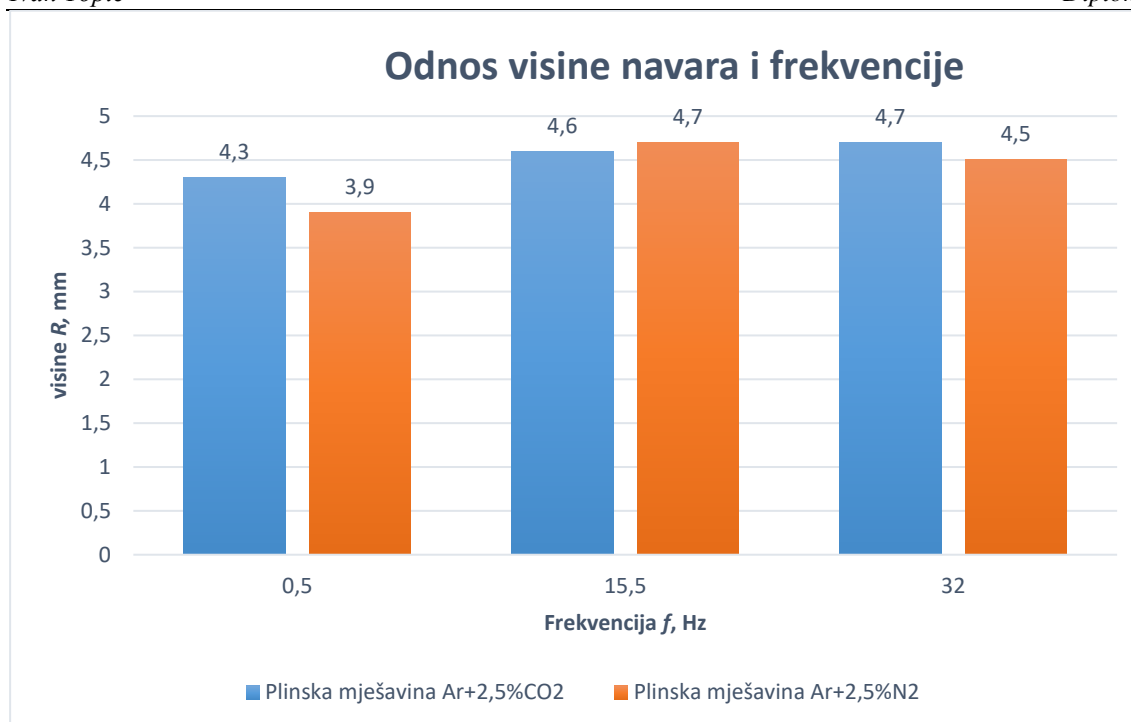
Na grafu sa slike 38. vidi se velika razlika u penetraciji pri korištenju različitih plinova za iste frekvencije. Pod zaštitnom atmosferom Ar+2,5%N₂ na nižim frekvencijama penetracija je bila jako loša i izgledom nepravilna. Vizualnim pregledom je utvrđeno naljepljivanje navara na uzorku br. 3. S povećanjem frekvencije poboljšala se penetracija i poprimila je pravilniji oblik. Kod uzoraka pod zaštitom plina Ar+2,5%CO₂ najveća penetracija postignuta je pri nižoj frekvenciji, a dubina penetracije opada povećanjem frekvencije na srednju veličinu nakon čega se ponovno povećava.



Slika 39. Grafički prikaz ovisnosti širine navara i frekvencije

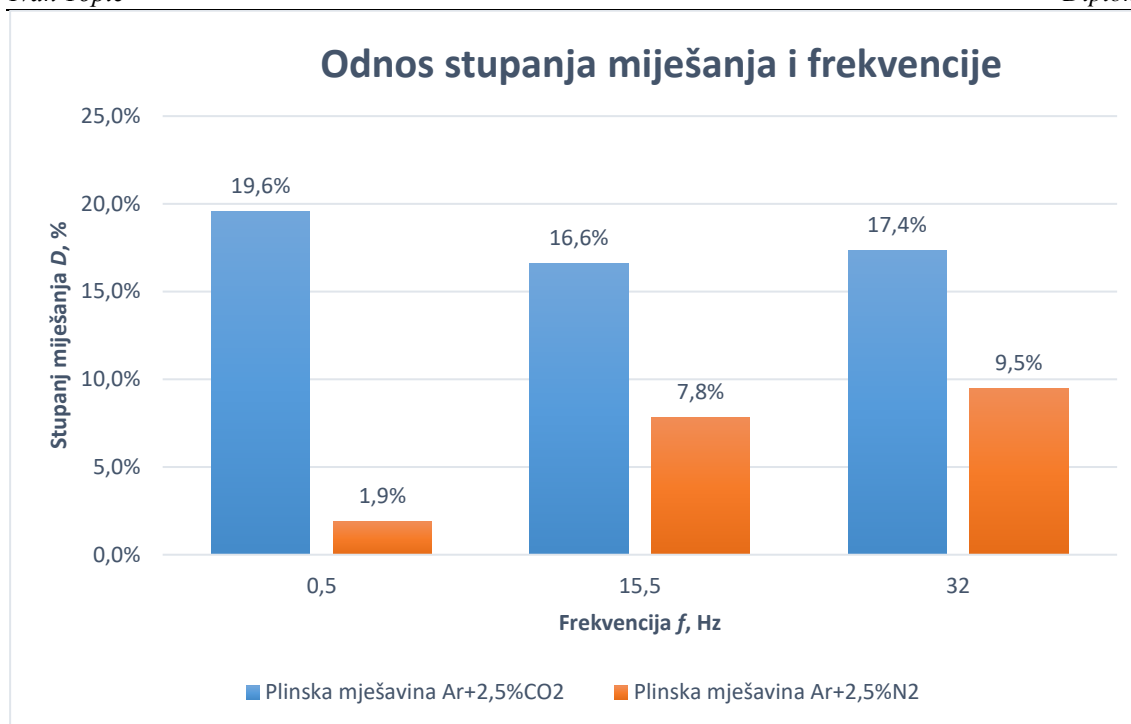
Promjene širine navara skoro su podjednake za oba zaštitna plina. Pregledom rezultata na slici 39. uočeno je da su najveće vrijednosti širine navara postignute pri nižoj frekvenciji i nakon povećanja opadaju i znatno se smanjuje razlika u odstupanju širine zavora s povećanjem frekvencije u oba slučaja. Ovaj trend je bio vidljiv prije izrade uzoraka za analizu makrostrukture kao što se vidi na slici 34.

Visina nadvišenja navara bila je skoro jednaka pri istim frekvencijama za oba zaštitna plina, a najveća razlika je uočena na nižoj frekvenciji što se vidi s grafa na slici 40. Blagi trend porasta visine navara uočen je pri korištenju zaštitnog plina Ar+2,5%CO₂, dok se pri korištenju plina Ar+2,5%N₂ vidi skok vrijednost promjenom frekvencije s niže na srednju nakon čega se razlika između visina s povećanjem frekvencije smanjuje.



Slika 40. Grafički prikaz ovisnosti visine navara i frekvencije

Stupanj miješanja vrlo je važan u tehnologiji navarivanja. Zbog očuvanja mehaničkih svojstava i otpornosti na koroziju želi se postići što manji stupanj miješanja [6]. Povoljniji stupanj miješanja postignut je kod zaštitnog plina Ar+2,5%N₂ kako je vidljivo na slici 41. Povećanjem frekvencije došlo je do povećanja stupnja miješanja, s tim prvi slučaj treba uzeti u obzir s oprezom je uočeno naljepljivanje zavara. Kod zaštitnog plina Ar+2,5%CO₂ najveći, a time i najnepovoljniji stupanj miješanja postignut je pri zavarivanju s nižom frekvencijom, dok su na srednjoj i većoj frekvenciji vrijednosti stupnja miješanja opale.



Slika 41. Ovisnost stupnja miješanja o frekvenciji

6.8. Zavarivanje s pet prolaza i priprema uzoraka za analizu

U ovom poglavlju opisan je postupak zavarivanja i priprema uzoraka za drugi dio eksperimentalnog rada u kojem je ispitan utjecaj međuprolazne temperature na mikrostrukturu navarenog materijala. Korištene su ploče osnovnog materijala S355JR dimenzija 300x120mm pripremljene u prvom dijelu ovog eksperimenta. Ploče su dodatno očišćene metalnom četkom i odmašćene alkoholom prije zavarivanja. Programske postavke izvora struje bile su postavljene kao u prvom dijelu.

6.8.1. Odabir parametara navarivanja

Parametri navarivanja odabrani su prema analizi uzoraka zavarenih u jednom prolazu. Zaštita plinskom mješavinom Ar+2,5%CO₂ pokazala se boljom u pogledu stabilnosti električnog luka tijekom zavarivanja što je rezultiralo i manjim rasprskavanjem, a isto tako primijećeno je da su ti uzorci imali manje grešaka i nepravilnosti na površini. Zbog veće penetracije i stupnja miješanja kod uzorka broj jedan izbor je bio između uzoraka broj dva i tri. Uzorak tri je imao povoljniju širinu zavara, ali veću penetraciju i stupanj miješanja zbog čega su odabrani parametri korišteni pri navarivanju uzorka broja dva. Kako bi ispitali utjecaj međuprolazne temperature uzorak 1-1. je hlađen između prolaza na temperaturu 200°C, dok je uzorak 2-2.

zavarivan bez hlađenja. Uzorak je hlađen propuhivanjem komprimiranog zraka po površini.

Odabrani parametri prikazani su u tablici 12.

Tablica 12. Parametri navarivanja u pet prolaza

Struja zavarivanja I , A	115
Napon zavarivanja U , V	20,7
Frekvencija f , Hz	15,5
Promjer žice d , mm	1,2
Brzina dodavanja žice v_z , m/min	5,8
Slobodni kraj žice, mm	13
EN omjer	0
Nagib pištolja, °	90
Brzina zavarivanja v , cm/min	25
Protok plina Q , L/min	18
Plinska mješavina	Ar+2,5%CO ₂
Preklapanje između prolaza, %	20

6.8.2. Rezultati navarivanja i zapažanja tijekom navarivanja u više prolaza

Prosječna vrijednost struje i napona nije se značajnije mijenjala tijekom navarivanja različitih prolaza. Maksimalno odstupanje struje iznosilo je 1A, a napona 0,3V. Stabilnost luka također

nije bila promijenjena. Uzorci su nakon zavarivanja očišćeni metalnom četkom i prikazani su na slikama 42. i 43.



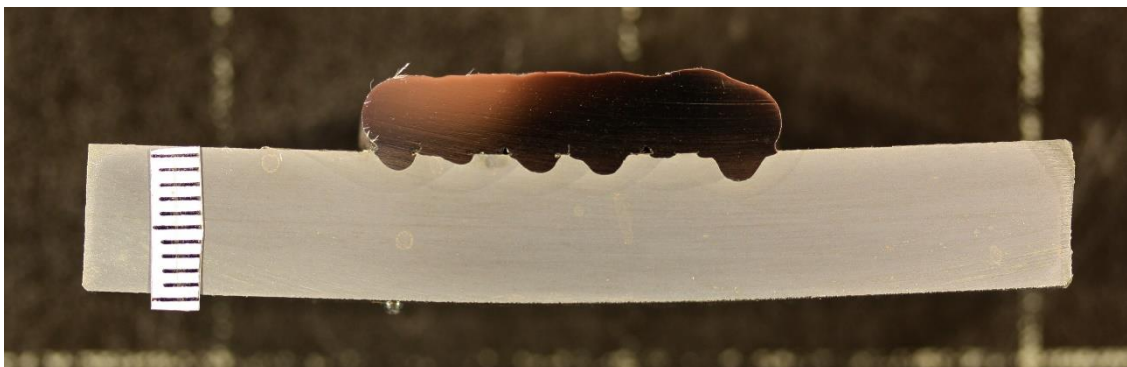
Slika 42. Uzorak 1-1 nakon zavarivanja i četkanja



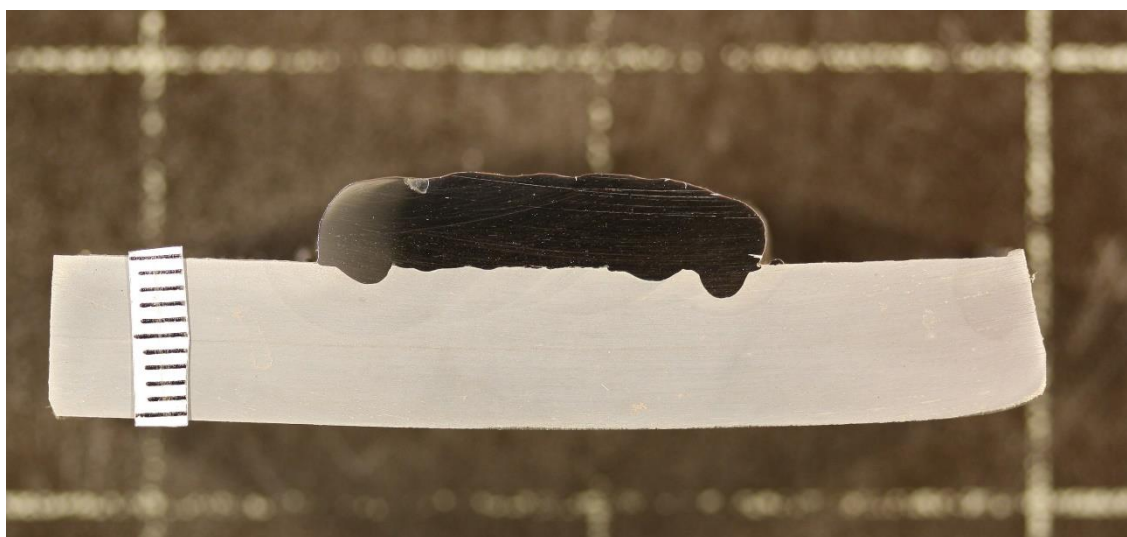
Slika 43. Uzorak 2-2 nakon zavarivanja i četkanja

6.8.3. Priprema uzoraka za analizu makrostrukture i mikrostrukture

Priprema uzoraka za makroanalizu odrađena je koracima opisanim u poglavlju 6.6.4 i stoga nije ponovno opisana. Fotografije makrostrukture uzoraka prikazane su na slikama 44. i 45.



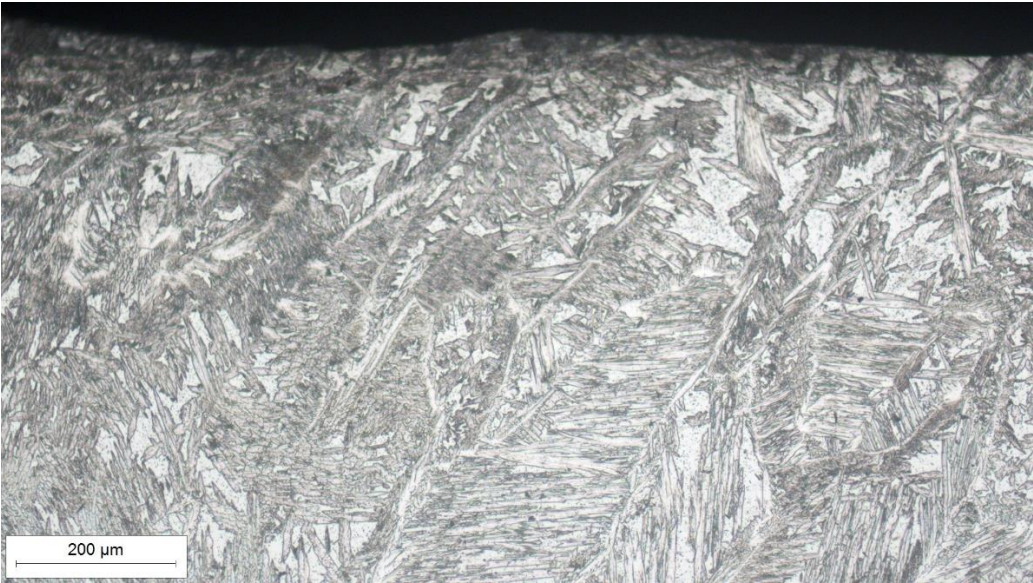

Slika 44. Makrostruktura uzorka 1-1






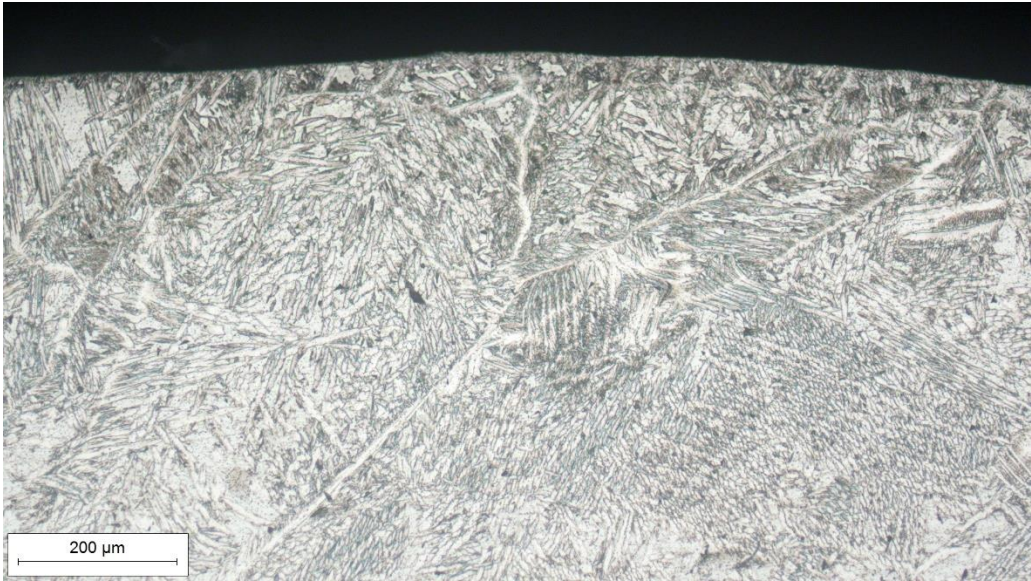
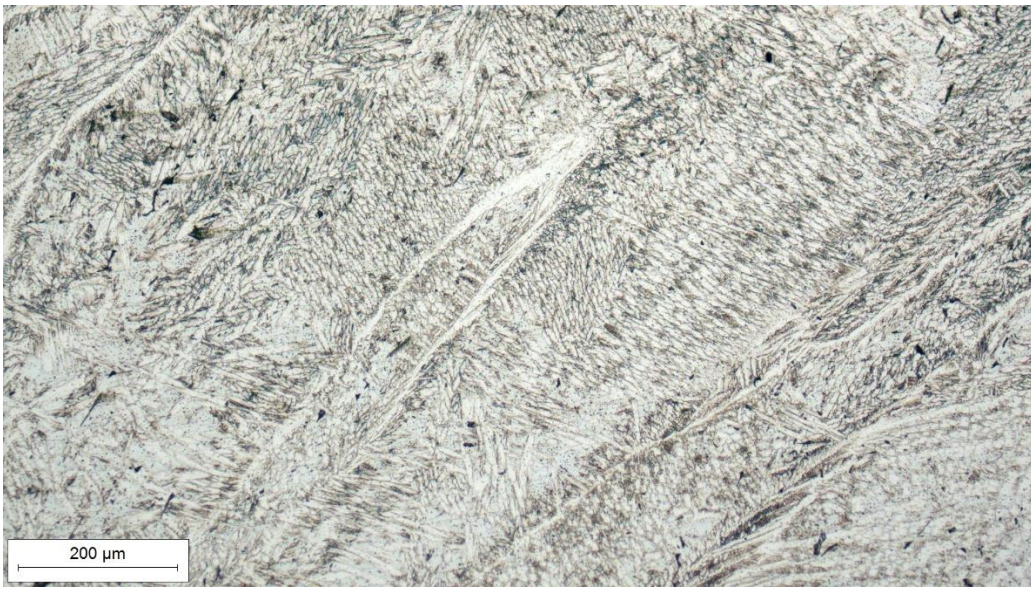

Slika 45. Makrostruktura uzorka 2-2

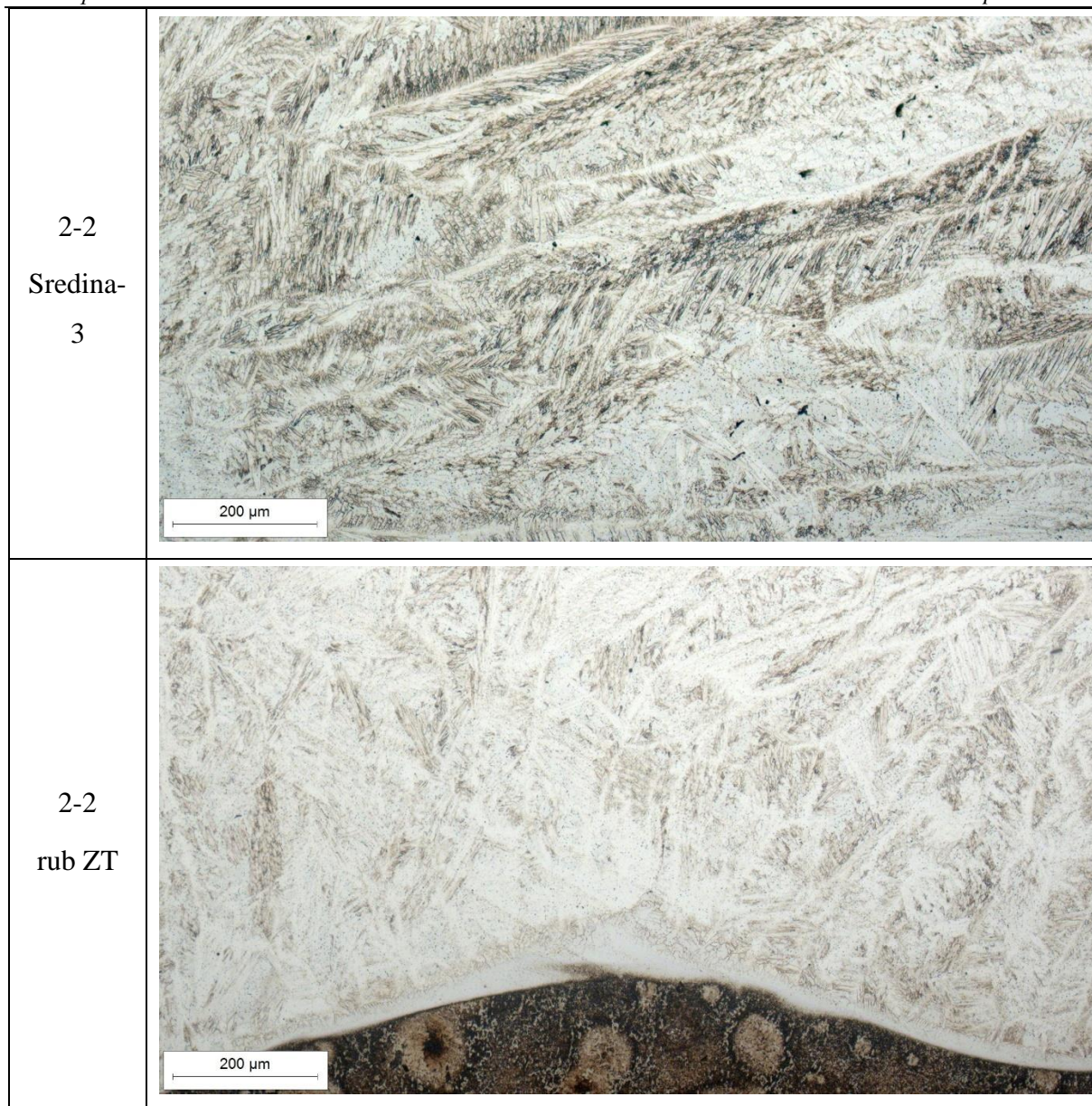
Priprema uzoraka za mikroanalizu strukture odrađena je nakon fotografiranja uzoraka za makrostrukturu. Ona se sastojala od finog poliranja na uređaju Minitex 233 i dodatnog elektrokemijskog nagrizanja u deset postotnoj oksalnoj kiselini. Parametri struje i napona iznosili su 6A i 8V, a vrijeme držanja je bilo 20 sekundi. Fotografije mikrostrukture snimljene su pomoću invertnog mikroskopa Olympus GX51 s povećanjem od 100 puta. Napravljene su četiri snimke mikrostrukture po uzorku i poredane su od vrha navara prema zoni utjecaja topline – ZUT u tablici 13.

Tablica 13. Mikrostruktura uzoraka

Uzorak	Mikrostruktura uzorka
1-1 Vrh	 <p data-bbox="357 846 539 891">200 μm</p>
1-1 Sredina- 1	 <p data-bbox="357 1451 539 1496">200 μm</p>

<p>1-1 Sredina- 2</p>	 <p>200 μm</p> <p>This micrograph shows a complex, interlocking microstructure of metal, likely a steel. The structure consists of numerous small, elongated, and somewhat parallel lamellar or fibrous regions, possibly representing a bainitic or martensitic structure. The overall appearance is dense and textured. A scale bar at the bottom left indicates 200 μm.</p>
<p>1-1 Sredina- 3</p>	 <p>200 μm</p> <p>This micrograph shows a similar microstructure to the one above, with a dense arrangement of elongated, fibrous or lamellar features. The texture is highly irregular and interlocking. A scale bar at the bottom left indicates 200 μm.</p>
<p>1-1 ZUT</p>	 <p>200 μm</p> <p>This micrograph shows a microstructure similar to the previous two, but with a distinct boundary or surface visible at the bottom of the image. The upper portion shows the same dense, fibrous structure, while the lower portion appears darker and more granular, possibly representing a different material or a surface layer. A scale bar at the bottom left indicates 200 μm.</p>

<p>2-2 Vrh</p>	
<p>2-2 Sredina- 1</p>	
<p>2-2 Sredina- 2</p>	



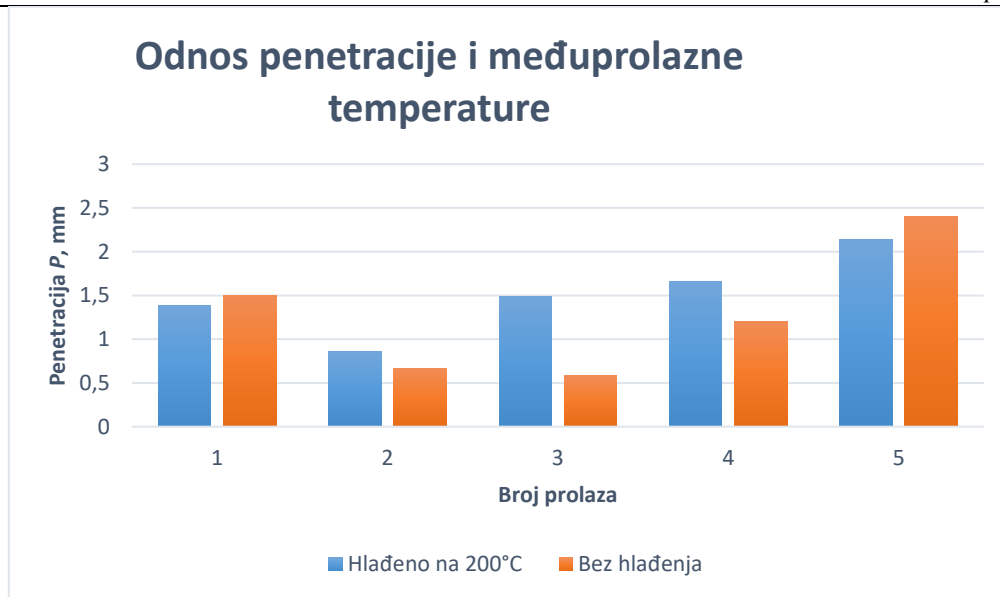
6.8.4. Analiza makrostrukture

U ovom poglavlju dane su vrijednosti penetracije, visine nadvišenja, ukupne širine navarene površine i omjera miješanja na uzorcima s različitom međuprolaznom temperaturom. Vrijednosti su prikazane u tablici 14.

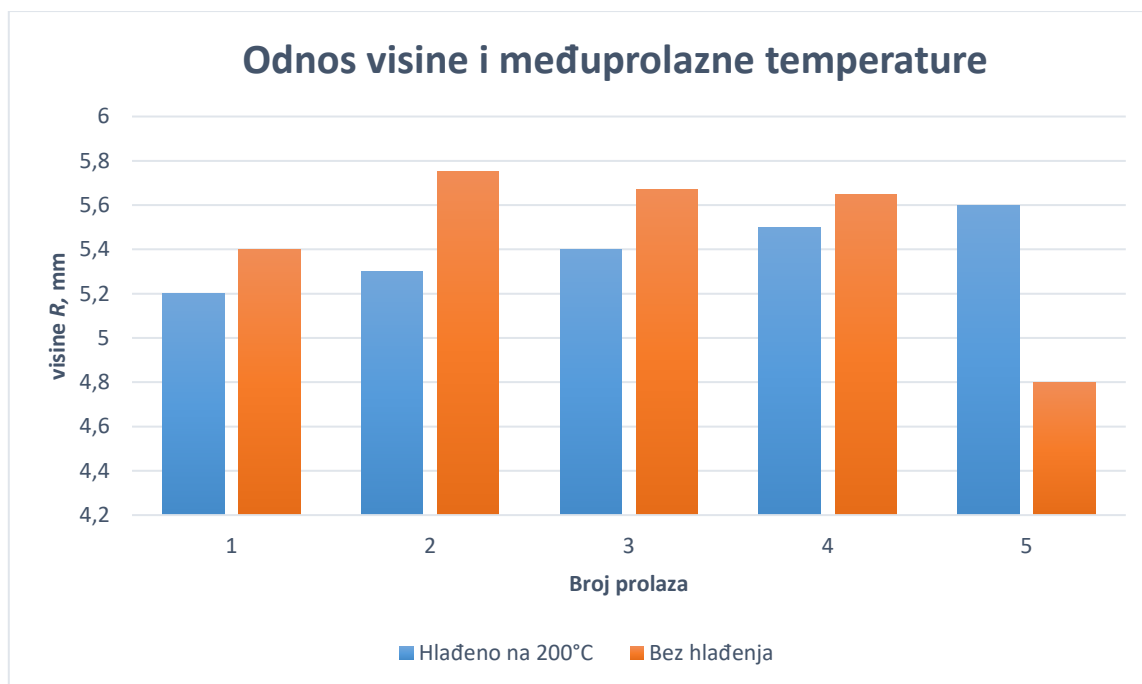
Tablica 14. Vrijednosti geometrijskih parametara navara

Uzorak	1-1					2-2				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Prolaz										
Penetracija P , mm	1,39	0,86	1,49	1,66	2,14	1,5	0,67	0,58	1,2	2,4
Visina nadvišenja R , mm	5,2	5,3	5,4	5,5	5,6	5,4	5,75	5,67	5,65	4,8
Širina W , mm	27					28,2				
Površina nadvišenja A_R , mm ²	150,5					145,7				
Površina penetracije A_P , mm ²	19,5					22,5				
Omjer miješanja D , %	11,5					13,4				

Zbog lakše usporedbe podataka po prolazima napravljen je i grafički prikaz rezultata na slikama 46. i 47.



Slika 46. Grafički prikaz odnosa penetracije navara i međuprolazne temperature



Slika 47. Grafički prikaz odnosa visine navara i međuprolazne temperature

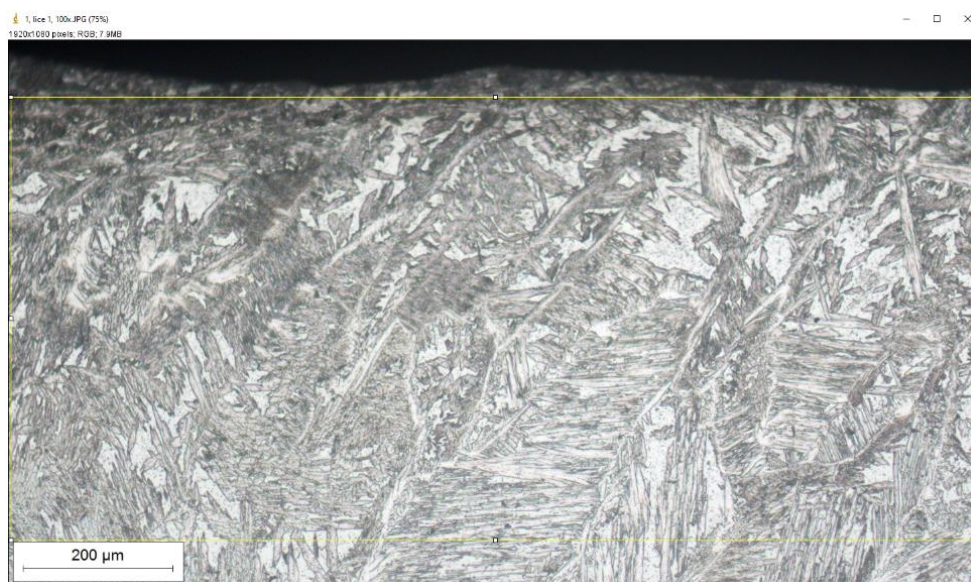
Dubina penetracije je dosta varirala između prolaza i u oba slučaja je maksimalna vrijednost penetracije postignuta zadnjim prolazom. Uzorak koji je bio zavarivan s višim međuprolaznim temperaturama u prosjeku je imao manju dubinu penetracije. Ako pogledamo parametar visine zavara vidljivo je da su sličnije vrijednosti između prolaza postignute s hlađenjem na međuprolaznu temperaturu od 200°C. Izračunati omjer miješanja pokazao se povoljniji u slučaju zavarivanja s međuprolaznom temperaturom od 200°C.

Osim mjerenja parametar geometrije navara provedena je vizualna kontrola makrostrukture kojom je utvrđeno postojanje poroznosti na oba uzorka na granici miješanja materijala.

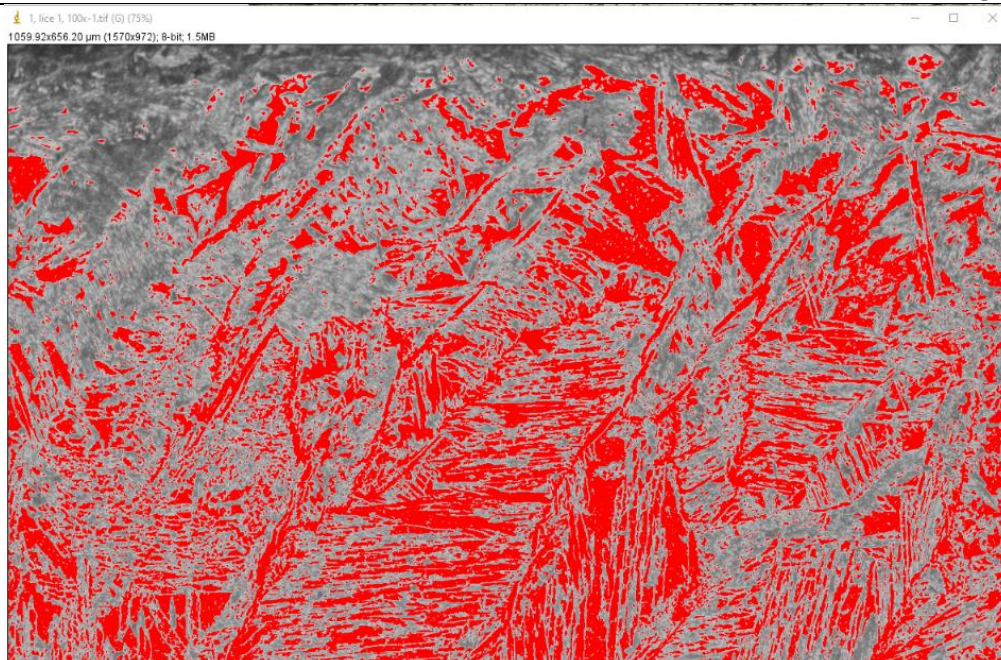
6.9. Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture napravljena je u programu ImageJ. Svrha analize mikrostrukture bila je određivanje udjela ferita u različitim zonama navara. Kako bi se pravilno napravila analiza korišteni su sljedeći koraci:

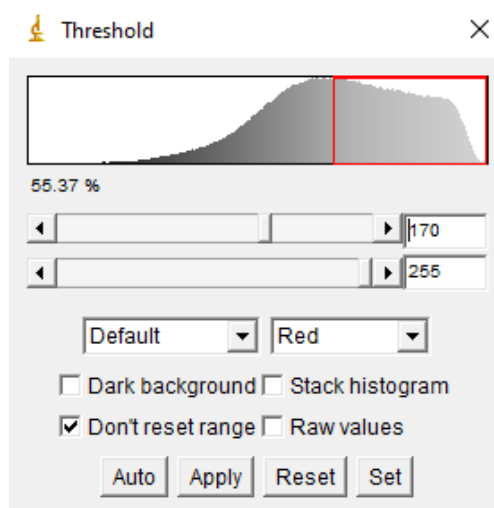
- Odabir željenog područja. Odabrano je područje na fotografijama koje ne obuhvaća mjerilo i površine koje nisu dio navara, a zatim je duplicirano na novu sliku. Ukoliko bi se ovaj korak preskočio program bi obuhvatio sve površine prikazane na slici. Pravilan odabir površine za analizu prikazan je slikom 48.
- Razdvajanje površina na dvije boje pomoću opcije „Threshold“. Ovim korakom slika mikrostrukture je podijeljena na samo dvije faze, tj. austenit i ferit, kako bi ovo postigli namješteni su parametri opcije „Threshold“ tako da sve bijele površine koje predstavljaju ferit budu prekrivene crvenom bojom. Ovaj postupak je prikazan na slici 49, a odabrane postavke na slici 50. Nakon primjene postavki slika je invertirana i sada crna boja predstavlja ferit, a bijela austenit kao što je vidljivo na slici 51.
- Izračun feritnog broja. Iznos površine ferita izračunat je pomoću funkcije „Analyse particles“ pomoću nje je izračunat udio ferita.. Rezultati su prikazani u tablici 14.



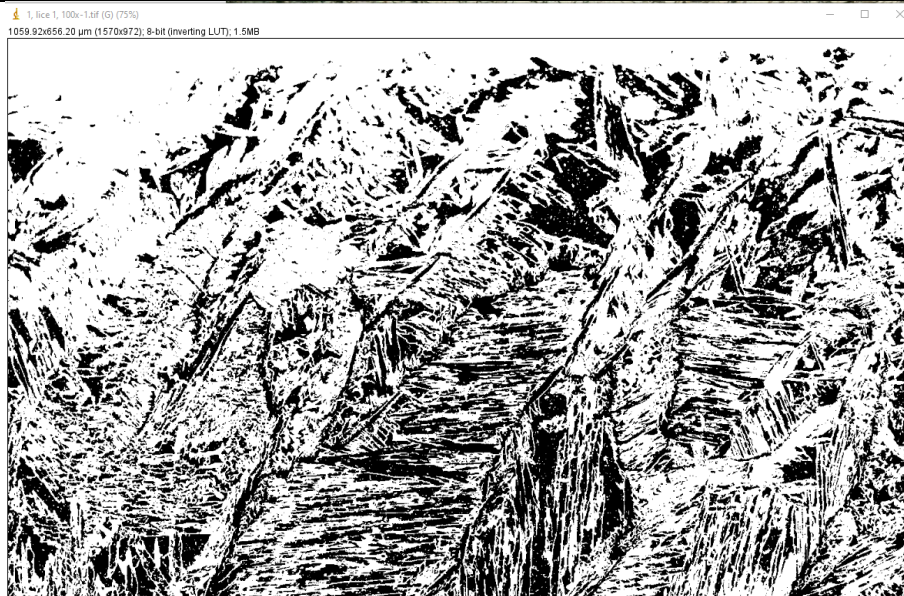
Slika 48. Odabir područja za određivanje udjela ferita u programu ImageJ



Slika 49. Postupak označavanja feritnih faza



Slika 50. Korišteni parametri opcije „Threshold“



Slika 51. Invertirana slika mikrostrukture

Tablica 15. Udio ferita u mikrostrukтури na odabranim položajima

Uzorak	Vrh	Sredina 1	Sredina 2	Sredina 3	Rub ZT
1-1	55%	47%	58%	56%	76%
2-2	73%	72%	82%	76%	84%

Iz prikazanih rezultata može se vidjeti da je povoljniji udio ferita postignut na uzorku 1-1 kojem je međuprolazna temperatura iznosila 200°C. Na oba uzorka udio ferita je najveći na rubu zone taljenja. Rezultate ovih mjerenja treba uzeti s oprezom pri donošenju zaključka jer u obzir nisu uzete druge faze u mikrostrukтури, već su pribrojene udjelu austenita ili ferita ovisno o njihovoj svjetlini.

7. ZAKLJUČAK

Dupleks čelici imaju dobra mehanička svojstva i otpornost na koroziju. Ova kombinacija ih čini boljima za korištenje odnosu na druge nehrđajuće čelike. Zbog otpornosti na koroziju mogu se koristiti u brodogradnji, naftnoj i kemijskoj industriji pogotovo upotrebom postupaka oblaganja.

Postupak zavarivanja AC MIG Wave Pulse pokazao se obećavajućim u navarivanju dupleks čelika. Velika prednost u primjeni ovog postupka je mogućnost automatizacije koji se postiže bolja efektivnost.

Na temelju rezultata dobivenih navarivanjem dupleks čelika ML 22.9.3 na konstrukcijski čelik S355JR pomoću AC MIG Wave Pulse postupka doneseni su sljedeći zaključci:

- Navarivanje dupleks čelika 2209 pod zaštitnom atmosferom Ar+2,5%N₂ pomoću korištenog izvora struje rezultiralo je nestabilnim električnim lukom i velikim rasprskavanjem, a time nepravilnom i lošom geometrijom navara. Korištenjem većih frekvencija postignut je bolji izgled površine zavara, ali su utvrđene nepravilnosti u vidu naljepljivanja
- Navarivanje dupleks čelika 2209 pod zaštitnom atmosferom Ar+2,5%CO₂ pomoću korištenog izvora struje pokazalo je veću stabilnost električnog luka uz minimalno rasprskavanje. Povoljnija geometrija zavara postignuta je korištenjem srednje i maksimalne frekvencije za korišteni izvor struje
- Pomoću AC MIG Wave pulse postupka zavarivanja i postavljenih parametara postignut je zadovoljavajući omjer miješanja. Rezultati su bili dosta bolji primjenom Ar+2,5%N₂, ali zbog prethodno navedenih razloga nisu uzeti u obzir za iduću fazu ispitivanja. Najbolji omjer miješanja postignut je za srednju frekvenciju pri korištenju Ar+2,5%CO₂.
- Ispitivanjem utjecaja temperature između prolaza navarivanja uočen je značajan pad penetracije na uzorku 2-2 koji nije bio hlađen kao i manje nepravilnosti između prolaza. Zbog ovoga je očekivan manji omjer miješanja kod ovog uzorka, ali to se pokazalo krivo. Zbog metode računanja omjera miješanja pomoću površine penetracije i površine nadvišenja dobiven je nešto veći omjer miješanja za ovaj uzorak. Bitno je napomenuti da je navarivanjem u više prolaza postignut bolji omjer miješanja kod oba uzorka u drugom dijelu u odnosu na uzorak s jednim prolazom iz prvog dijela.

- Udio ferita pokazao se boljim na svim područjima snimljene mikrostrukture za uzorak 1-1 koji je hlađen na međuprolaznu temperaturu od 200°C. Udio ferita na rubu ZT-a bio je viši od poželjne razine kod oba uzorka.
- Na osnovu provedenog ispitivanja nije moguće odrediti optimalne parametre za navarivanje dupleks čelika 2209 na konstrukcijski čelik S355JR, ali se može odrediti raspon frekvencija koji treba dodatno ispitati u tu svrhu

Na osnovu donesenih zaključaka određene su smjernice za daljnje ispitivanje:

- Potrebno je snimiti dinamičku karakteristiku struje kako bi se ustanovio stvarni EN omjer zbog boljeg razumijevanja njegovog utjecaja na dobivene rezultate, kao i utjecaj sinergijskog programa na regulaciju struje i napona tijekom samog postupka zavarivanja
- Potrebno je pronaći bolju regulaciju i softversko rješenje izvora struje za primjenu zaštitnog plina Ar+2,5%N₂
- Isprobati zaštitne plinove za zavarivanje dupleks čelika Ar+CO₂+N₂ ili Ar+CO₂+He+N₂ navedene u [17] kao dobro rješenje za povećanje udjela austenita prilikom zavarivanja dupleks čelika
- Kako bi se odredili optimalni parametri za navarivanje dupleks čelika pod zaštitnim plinom Ar+2,5%CO₂ potrebno je izvesti ispitivanje s manjim korakom između odabranih frekvencija i to u rasponu od 7 Hz do 22Hz jer se srednja frekvencija (15,5Hz) pokazala boljom od maksimalne (32Hz) za odabrani izvor struje.

LITERATURA

- [1] AWS, Welding Handbook, Ninth Edition, Volume 2 Welding Processes, Part 1
- [2] T. Filetin, K. Grilec Postupci modificiranja i prevlačenja površina – priručnik za primjenu, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb 2004.
- [3] Dutra, J. C., Silva, R. H. G. e, Marques, C., & Viviani, A. B. (2016). A new approach for MIG/MAG cladding with Inconel 625. *Welding in the World*, 60(6), 1201–1209.
- [4] ASM HANDBOOK, Welding Brazing and Soldering, Volume 6.
- [5] T.E. Abioye, O.O, Gbadeyan, D.I. Adbeiyi Analysis of the mechanical properties and penetration depth of gas metal arc welding on AISI 304 stainless steel
- [6] Zhang, Z.; Huang, X.; Yao, P.; Xue, J. A New Method for Weld Dilution Calculation through Chemical Composition Analysis. *Metals* 2021, 11, 131.
- [7] S.K. Gupta, S. Mehrotra, A.R. Raja, M. Vashista and M.Z Khan Yusufzai: Effect of welding speed on weld bead geometry and percentage dilution in gas metal arc welding of SS409L
- [8] M. Aghakhani, E. Mehrdad, E. Hayati: Parametric Optimization of Gas Metal Arc Welding Process by Taguchi Method on Weld Dilution, *Internacional Journal of Modeling and Optimization*, Vol. 1, No.3. August 2011
- [9] B. Mateša, I. Samardžić, M. Dunder: Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaeffler-ovog dijagrama, 6. Međunarodno znanstveno-stručno savjetovanje, Slavonski Brod, listopad. 2011
- [10] W.F. Hosford Iron and Steel, Cambridge University Press 2012.
- [11] H.M. Cobb The History of Stainless Steels, ASM Internaciona, 2010
- [12] Handbook of Stainless Steel, Outokumpu 2013
- [13] R.N. Gunn Duplex Stainless Steel, Microstructure, properties and applications, Abington Publishing
- [14] Practical guide to using duplex stainless steels, A guide to the use of nickle-containing Alloy N°10044 Second Edition 2020, Nickle Institute
- [15] <https://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php> pristupljeno 19.11.2022
- [16] I. Alvarez-Armas, S. Degalliax-Moreuil: Duplex Stainless Steel, ISTE and Wiley 2009.
- [17] Industeel: Duplex Stainless Steel Welding guidelines <https://industeel.arcelormittal.com/wp-content/uploads/2021/03/Duplex-Stainless-Steels-Welding-Guidelines-EN-Juin-2019-Web.pdf> pristupljeno 23.07.2022

-
- [18] E. Folkhard: *Welding Metallurgy of Stainless Steels*
- [19] S. Kralj, Z. Kožuh, Š. Andrić: *Priručnik zavarivački i srodni postupci*, Zagreb 2015.
- [20] I. Garašić, S. Kralj, Z. Kožuh: *Suvremeni postupci MIG/MAG zavarivanja*, Zagreb 2011.
- [21] L.O. Vilarinho, A.S, Nascimento, D.B. Fernandes and C.A.M. Mota: *Methodology for Parametar Calculation of VP-GMAW*
- [22] B. Mvola, P. Kah, P. Layus: *Review of current waveform control effects on weld geometry in gas metal arc welding process*, March 2018.
- [23] Arif, N., *Alternating current-gas metal arc welding for application to thin sheets*, *Journal of Materials Processing Technology*, 2014.
- [24] M. Kang, J.Cheon and T.H. Lee: *The Effect of EN Pulsing Ratio and Repetition Frequancey on the Bead Appearance and Microstructure Evolution in Aluminum Welding using Variable Polarity GMAW* 2021.
- [25] EN 10025-2:2019,
https://www.modiranahan.com/uploads/pdf/BS_EN_10025_2_2019.pdf,
pristupljeno 23.07.2022
- [26] <https://migal.co/en/products/stainless-steel-welding-wire/4462-2209-ml-2293-nl>,
pristupljeno 23.07.2022
- [27] https://elmemesser.lv/wp-content/uploads/2020/04/243a8776cb36e312ad77ae78cf6179df_compressed.pdf
pristupljeno 23.07.2022
- [28] <https://www.daihen-usa.com/wp-content/uploads/documents/WB-W400P30206-1.pdf>
pristupljeno 31.07.2022
- [29] HRN EN ISO 17639

PRILOZI

- I. CD-R disc
- II. Tehnička dokumentacija

