

Analiza utjecaja zaštitnih plinova pri AC MIG navarivanju dupleks čelika

Ćuže, Mislav

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:235:974290>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mislav Čuže

Zagreb, 2022.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Mislav Čuže

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se svome mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na vođenju i pomoći ne samo tijekom izrade ovoga rada već tijekom cijelog studija, dr. sc. Maji Remenar i asistentu Mislavu Štefoku za pomoć i predivnu suradnju tijekom izrade ovoga rada, kao i ostalim djelatnicima Katedre za zavarene konstrukcije na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Najviše zahvaljujem svojim kolegama i prijateljima na potpori, motivaciji i veselju koju su mi pružili tijekom ovoga studija, bez kojih ne bih mogao završiti ovaj studij.

Za kraj iz srca zahvaljujem svojim roditeljima, Meliti i Nenadu, na bezuvjetnoj potpori tijekom cijelog studiranja, kao i bratu Mihaelu, najdražoj djevojci Niki i prijatelju Branimiru.

Mislav Čuže



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:	602-04/22-6/1
Ur. broj:	15-1703-22-

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MISLAV ČUŽE** Mat. br.: 0035208937

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza utjecaja zaštitnih plinova pri AC MIG navarivanju dupleks čelika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of shielding gas influence in AC MIG duplex steel overlay welding**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno je dati pregled osnovnih gradacija dupleks čelika. Detaljno objasniti problematiku zavarljivosti dupleks čelika te analizirati kako proces zavarivanja i zaštitni plinovi utječu na mikrostrukturu i profil zavarenog spoja. Opisati i navesti primjenjive tehnologije navarivanja dupleks čelika s posebnim naglaskom na AC MIG postupak. Detaljno opisati princip AC MIG postupka te odrediti parametre koji primarno utječu na stupanj miješanja.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je ispitati i kvantificirati utjecaj parametara AC MIG navarivanja na makro i mikrostrukturu navara dupleks čelika uz korištenje različitih plinskih mješavina na bazi argona. Na navarenom uzorku je potrebno provesti razorna ispitivanja, analizu makro i mikrostrukture te odrediti stupanj miješanja. Na temelju dobivenih rezultata definirati optimalnu kombinaciju parametara navarivanja i zaštitnog plina za postizanje optimalne mikrostrukture i geometrije navarenog sloja kao i smjernice za daljnje istraživanje.

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

Zadatak zadan:
5. svibnja 2022.

Rok predaje rada:
7. srpnja 2022.

Predviđeni datum obrane:
18. srpnja do 22. srpnja 2022.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS OZNAKA	VII
POPIS KRATICA	IX
SAŽETAK.....	XI
SUMMARY	XII
1. UVOD.....	1
2. PREGLED OSNOVNIH GRADACIJA DUPLEKS ČELIKA	3
3. PROBLEMATIKA ZAVARIVANJA DUPLEKS ČELIKA	6
3.1. Formacija faza uslijed zavarivanja dupleks čelika.....	6
3.2. Feritni broj.....	10
3.2.1. Metode određivanja udjela ferita	10
3.3. Preporuke za zavarivanje dupleks čelika prema normi HRN EN 1101-3:2001 [9]...	11
3.3.1. Postupci prikladni za zavarivanje dupleks čelika	12
3.3.2. Skladištenje, rukovanje i priprema uzoraka	12
3.3.3. Pregrijavanje dupleks čelika	12
3.3.4. Unos topline	12
3.3.5. Dodatan materijal.....	13
3.3.6. Zaštitni plinovi	13
3.3.7. Svojstva nakon zavarivanja.....	13
3.3.7.1. Precipitacija.....	13
3.3.7.2. Tople pukotine	13
3.3.7.3. Hladne pukotine	13
3.3.7.4. Maksimalna tvrdoća.....	14
3.3.7.5. Otpornost koroziji	14
3.4. Naknadna toplinska obrada.....	14
3.5. Čišćenje uzoraka	14
4. ZAŠTITNI PLINOVI	16

4.1.	Osnovna svojstva zaštitnih plinova i njihov utjecaj na izgled profila zavara	16
4.2.	Utjecaj zaštitnih plinskih mješavina na dupleks nehrđajuće čelike	17
4.2.1.	Ar + maks. 2,5% CO ₂	17
4.2.2.	Ar-He-CO ₂ / O ₂ mješavine.....	17
4.2.3.	Dodatak do 3% N.....	18
4.2.4.	Četverokomponentna mješavina Ar/He/CO ₂ /N ₂	18
4.2.5.	Vodik.....	19
5.	NAVARIVANJE DUPLEKS ČELIKA	20
5.1.	Postupci navarivanja dupleks čelika	20
5.2.	Osnovni parametri navarivanja MIG postupkom.....	22
6.	AC MIG POSTUPAK	24
6.1.	Razvoj i princip AC MIG postupka	24
6.2.	Parametri AC MIG postupka	25
6.2.1.	EN omjer i njegov utjecaj na geometriju zavara.....	26
6.2.2.	Dinamička karakteristika AC MIG postupka zavarivanja i utjecaj EN omjera na geometriju zavara.....	27
7.	EKSPERIMENTALNI RAD.....	33
7.1.	Osnovni, dodatni materijal i zaštitni plin	33
7.1.1.	Osnovni materijal.....	33
7.1.2.	Dodatni materijal	34
7.1.3.	Zaštitni plin	35
7.2.	Oprema korištena u eksperimentu.....	36
7.2.1.	Izvor struje	36
7.2.2.	Sustav za automatsko zavarivanje „BUG-O Systems“	37
7.2.3.	Oprema za ispitivanje makrostrukture i mikrostrukture	38
7.3.	Postupak ispitivanja	39
7.4.	Parametri zavarivanja.....	41
7.5.	Unos topline, temperatura predgrijavanja i naknadna toplinska obrada.....	44
7.6.	Rezultati i analiza ispitivanja	45

7.6.1.	Analiza rasprskavanja kapljica i stabilnosti luka tijekom zavarivanja	45
7.6.2.	Analiza makrostrukture	47
7.6.2.1.	Priprema i rezultati makrostrukture uzoraka.....	47
7.6.2.2.	Kvantitativna analize makrostrukture	49
7.6.2.3.	Pojašnjenje rezultata makroanalize	50
7.6.3.	Analiza mikrostrukture	54
7.6.3.1.	Priprema i rezultati uzoraka mikrostrukture	54
7.6.3.2.	Kvantitativna analiza mikrostrukture.....	60
7.6.3.3.	Pojašnjenje rezultata analize mikrostrukture	63
7.7.	Stupanj miješanja	66
7.7.1.1.	Postupak računanja stupnja miješanja i rezultati	67
7.7.1.2.	Obrazloženje rezultata stupnja miješanja.....	69
8.	ZAKLJUČAK.....	70
	PRILOZI.....	77

POPIS SLIKA

Slika 1 Cisterna i spremnik za kemijske i naftne proizvode [12].....	4
Slika 2 Mikrostruktura nehrđajućeg dupleks čelika [12]	4
Slika 3 Usporedba mikrostrukture osnovnog materijala i metala zavara dupleks čelika [13] ...	6
Slika 4 Pseudo binarni dijagram za nehrđajuće čelike s istaknutom vrijednosti omjera Creq/Nieq za dupleks 2205 [14].....	7
Slika 5 Tipičan izgled feritne faze i različitih austenitnih faza, nagriženo Murakami reagensom [14]	8
Slika 6 Prikaz mikrostrukturnih faza metala zavara, elektrokemijski nagriženo u 10% NaOH [13]	9
Slika 7 Prikaz mikrostrukturnih faza metala zavara, elektrokemijski nagriženo u 10% oksalnoj kiselini [13].....	9
Slika 8 Izgled profila zavara u ovisnosti o zaštitnom plinu [22].....	17
Slika 9 Ovisnost udjela dušika u plinskoj mješavini s udjelom u zavarenom spoju nakon zavarivanja [19]	19
Slika 10 Oblaganje konstrukcijskog čelika nehrđajućim čelikom [24].....	21
Slika 11 Primjer zavarivanja dupleks i ugljičnog čelika [15]	21
Slika 12 Shematski prikaz ulaznih podataka za računanje EN omjera [28].....	26
Slika 13 Različiti oblici strujnih valova [6]	27
Slika 14 Poboljšana dinamička karakteristika za AC MIG zavarivanje [7].....	28
Slika 15 Konvencionalna dinamička karakteristika AC MIG postupka [29].....	29
Slika 16 Ovisnost penetracije o struji i EN omjeru [7]	30
Slika 17 Ovisnost nadvišenja zavara o struji i EN omjeru [7]	30
Slika 18 Ovisnost širine zavara o struji i EN omjeru [7]	31
Slika 19 Presjeci zavara u ovisnosti o jakosti struje I i EN omjeru [7].....	31
Slika 20 OTC Welbee W400 dual-inverterski izvor struje	36
Slika 21 Specifikacijska pločica stroja OTC Welbee W400.....	37
Slika 22 BUG-O Systems modularni pogonski sistem za automatizirano zavarivanje	37
Slika 23 Uređaj za fino brušenje i poliranje uzoraka PRESI Minitec 233	38

Slika 24 Profesionalni fotoaparati Cannon 1000D.....	38
Slika 25 Invertni mikroskop Olympus GX51	39
Slika 26 Podešene postavke programa na izvoru struje	41
Slika 27 Ovisnost jakosti stvarne prosječne struje o EN omjeru i vrsti zaštitnog plina.....	42
Slika 28 Ovisnost stvarnog prosječnog napona o EN omjeru i vrsti zaštitnog plina	43
Slika 29 Ovisnost brzine dodavanja žice o EN omjeru	43
Slika 30 Rezultati navarivanja uzoraka	46
Slika 31 Makrostruktura uzoraka	48
Slika 32 Prikaz parametara širine zavara (W), nadvišenja zavara (R) i penetracije (P).....	49
Slika 33 Utjecaj EN omjera i vrste zaštitnog plina na faktor W/R	52
Slika 34 Utjecaj EN omjera i vrste zaštitnog plina na faktor W/P	53
Slika 35 Utjecaj EN omjera i vrste zaštitnog plina na nadvišenje zavara (R).....	53
Slika 36 Utjecaj EN omjera i vrste zaštitnog plina na penetraciju zavara (P)	54
Slika 37 Utjecaj EN omjera i vrste zaštitnog plina na širinu zavara (W)	54
Slika 38 Mikrostruktura uzoraka 2,3 i 1	56
Slika 39 Mikrostruktura uzoraka 4 i 5.....	57
Slika 40 Mikrostruktura uzoraka 6,7 i 8.....	58
Slika 41 Mikrostruktura uzoraka 12 i 11.....	59
Slika 42 Pravilan odabir ROI-a (800 x 800 piksela)	61
Slika 43 Postavke opcije "Threshold"	61
Slika 44 Uvećani detalj mikrostrukture uzorka 1	62
Slika 45 Rezultat nakon primjene funkcije "Threshold"	62
Slika 46 Utjecaj EN omjera i vrste zaštitnog plina na udio ferita	63
Slika 47 Mikrostrukturne faze metala zavara uzorka 2.....	65
Slika 48 Mikrostrukturne faze metala zavara uzorka 12.....	65
Slika 49 Rezultat mjerenja površine penetracije	67
Slika 50 Rezultat mjerenja površine cijelog zavara (pod brojem 2)	68
Slika 51 Utjecaj EN omjera i plinske zaštite na stupanj miješanja osnovnog i dodatnog materijala	69

POPIS TABLICA

Tablica 1 Kemijski sastav čelika S355JR, za debljine < 40 mm [31].....	34
Tablica 2 Mehanička svojstva konstrukcijskog čelika S355 za debljine od 3-16 mm [31].....	34
Tablica 3 Kemijski sastav žice MIG WELD ML 22.9.3 NL [33].....	35
Tablica 4 Mehanička i fizikalna svojstva žice dupleks 2205 nehrđajućeg čelika [33]	35
Tablica 5 Opis i kemijski sastav zaštitnih plinova [35]	36
Tablica 6 Plan eksperimenta	40
Tablica 7 Fiksni parametri zavarivanja	41
Tablica 8 Kvantitativni izlazni parametri makrostrukture	50
Tablica 9 Maksimalna dopuštena vrijednost nadvišenja zavara prema normi HRN EN ISO 5817:2014 [39]	51
Tablica 10 Rezultati kvantitativne analize mikrostrukture	63
Tablica 11 Ovisnost stupnja miješanja o postupku zavarivanja [40]	66
Tablica 12 Podaci izmjerenih površina i dobivenog stupnja miješanja	68

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
A	%	Istezanje
A_{en}	mm ²	Površina elektronegativnog dijela AC ciklusa
A_{ep}	mm ²	Površina elektropozitivnog dijela AC ciklusa
A_p	mm ²	Površina rastaljenog osnovnog materijala
Ar	-	Argon
CO ₂	-	Ugljikov dioksid
Cr	-	Krom
$F\%$	%	Udio ferita
Fe	-	Željezo
FN	-	Feritni broj
h	mm	Visina nadvišenja zavara
H ₂	-	Vodik
HCl	-	Klorovodična kiselina
He	-	Helij
I	A	Struja zavarivanja
I_b	A	Bazna struja pozitivnog polariteta
I_{ef}	A	Efektivna jakost struje
I_m	A	Srednja jakost struje
I_n	A	Struja negativnog polariteta
I_p	A	Vršna struja pozitivnog polariteta
k	-	Koeficijent iskoristivosti električnog luka
L	-	Likvidus
m	-	Površinski udio nadvišenja zavara (nataljenog metala)
Mo	-	Molibden
N	mm	Slobodni kraj žice
n	-	Površinski udio osnovnog materijala u zavaru
N ₂	-	Dušik
NaOH	-	Natrijev hidroksid
Ni	-	Nikal
O ₂	-	Kisik
P	mm	Penetracija
PSF	-	Faktor oblika penetracije
Q	L/min	Protok plina
Q	kJ/mm	Unos topline
R	mm	Nadvišenje zavara

RFF	-	Faktor oblika nadvišenja zavara
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	MPa	Granica razvlačenja
Si	-	Silicij
T	°	Nagib pištolja za zavarivanje
T_b	s	Period trajanja bazne struje pozitivnog polariteta
T_n	s	Period trajanja struje negativnog polariteta
T_p	s	Period trajanja vršne struje pozitivnog polariteta
U	V	Napon
v	cm/min	Brzina zavarivanja
v_z	m/min	Brzina dodavanja žice
W	mm	Širina zavara
α	-	Alfa ferit
α	°	Kut prijelaza površine šava na osnovni metal
γ	%	Stupanj miješanja
γ_2	-	Sekundarni (interkristalni) austenit
δ	-	Delta ferit
π	-	Pi faza
σ	-	Sigma faza
τ	-	Tau faza
φ_a	-	Koeficijent unutarnjeg oblika
φ_e	-	Koeficijent vanjskog oblika
χ	-	Chi faza

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
AC MIG	<i>Alternating current metal inert gas</i> – izmjenični MIG postupak zavarivanja
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> - Američko društvo za ispitivanje i materijale
DC MIG	<i>Direct current metal inert gas</i> – istosmjerni MIG postupak zavarivanja
DCEN	<i>Direct current electrode negative</i> – negativni pol elektrode
DCEP	<i>Direct current electrode positive</i> – pozitivni pol elektrode
EBSD	<i>Electron backscattered diffraction</i> - difrakcija povratnog raspršenja elektrona
EN	Europska norm
EN omjer	<i>Electrode negative</i> – elektronegativni omjer perioda
EN period	<i>Electronegative period</i> – elektronegativni period
EP period	<i>Electropositive period</i> – elektropozitivni period
EPP	Zavarivanje pod praškom
ESW	<i>Electroslag welding</i> - zavarivanje električnom troskom
EXW	<i>Explosion welding</i> – eksplozijsko zavarivanje
FCAW	<i>Flux cored arc welding</i> - zavarivanje praškom punjenom žicom
GBA	<i>Grain boundary austenite</i> – granični austenit
HRN	Hrvatski zavod za norme
IGA	<i>Intergarunal austenite</i> – interkristalni austenit
ISO	<i>International organization for standardization</i> – Međunarodna organizacija za standardizaciju
MMA	<i>Manual metal arc welding</i> – ručno elektrolučno zavarivanje
OAW	<i>Oxy-fuel welding</i> – plinsko zavarivanje
ODPP	<i>One droplet per pulse</i> - odvajanje samo jedne kapljice po impulsu

PRE _N	<i>Pitting resistance equivalent number</i> – ekvivalentni broj otpornosti na rupičastu koroziju
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
ROI	<i>Region of interest</i> – područje interesa
RSM	<i>Response surface methodology</i> – metoda odzivnih površina
SAW	<i>Submerged arc welding</i> – zavarivanje pod praškom
SHIP	Sredstvo za hlađenje, ispiranje i podmazivanje
SMAW	<i>Shielded metal arc welding</i> – ručno elektrolučno zavarivanje
UNS	<i>Unified Numbering System for Metals and Alloys</i> – jedinstveni sustav numeriranja metala i legura
VP MIG	<i>Variable polarity metal inert gas</i> – MIG s varijabilnim polaritetom
WA	<i>Widmanstätten austenite</i> – Widmanstättenov austenit
ZUT	Zona utjecaja topline

SAŽETAK

U teorijskom dijelu ovoga diplomskog rada dan je pregled osnovnih gradacija dupleks čelika, pri čemu je najveći fokus je na njihovom zavarivanju, stoga je detaljno objašnjena problematika zavarivanja dupleks čelika, kao i utjecaj parametara od kojih je posebno naglašen utjecaj zaštitnih plinova. Dodatno, eksperimentalni rad se temelji na primjeni novog i sve popularnijeg modificiranog postupka zavarivanja, AC MIG postupka. Stoga je najprije detaljno objašnjen princip rada AC MIG postupka, a zatim njegovi glavni parametri.

Eksperimentalni rad temelji se na navarivanju najpopularnijeg dupleks 2205 nehrđajućeg čelika na običan konstrukcijski čelik, S355JR. Testira se učinak različitih EN omjera AC MIG postupka i utjecaj dvije vrste zaštitnih plinova ($Ar + CO_2$ i $Ar + N_2$) na rezultate navarivanja. Rezultati navarivanja su kvalitativno i kvantitativno opisani na temelju mikro i makroanalize te su doneseni pravodobni zaključci. Dokazano je kako EN omjer i vrsta zaštitnog plina ima značajan utjecaj na stabilnost električnog luka, geometriju zavara i omjere austenitne i feritne faze u mikrostrukturi zavara. Na samome kraju su dane smjernice za daljnja istraživanja.

Ključne riječi: Dupleks 2205, navarivanje, zavarivanje raznorodnih metala, AC MIG, zaštitni plin, EN omjer

SUMMARY

In the theoretical part of the thesis, an overview of the basic gradations of duplex steel is given, with the main focus on their weldability. Therefore, the common weldability issues of duplex stainless steel welding are explained in detail, as well as the influence of parameters, of which the influence of shielding gases is particularly emphasized. Additionally, the experimental work is based on the application of a new and increasingly popular modified welding process, the AC MIG process. The working principle of the AC MIG process is therefore explained in detail, followed by its main parameters.

The experimental work is based on bead on plate welding of the most popular duplex 2205 stainless steel to a common structural steel, S355JR. The effect of different EN ratios of the AC MIG process and the influence of two types of shielding gases (Ar + CO₂ and Ar + N₂) on weld bead geometry are tested. Furthermore, the results of welding are qualitatively and quantitatively described on the basis of micro and macro analysis and the conclusions are drawn. It has been proven that the EN ratio and the type of shielding gas have a significant influence on the stability of the electric arc, the weld bead geometry and the ratio of the austenite and ferrite phases in the microstructure of the weld. At the very end, guidelines for further research are given.

Key words: Duplex 2205, bead on plate welding, dissimilar metal welding. AC MIG, shielding gas, EN ratio

1. UVOD

Kada se spomene riječ nehrđajući čelik, ili po popularnom trgovačkom nazivu inoks, on se odnosi na najčešće korištene mekane, nemagnetične austenitne nehrđajuće čelike. Oni čine čak dvije trećine svih proizvedenih nehrđajućih čelika na svijetu. Zajedno s drugom najpopularnijom vrstom, feritnim nehrđajućim čelikom, čine čak 95% svih proizvedenih čelika na svijetu [1]. No, danas sve popularniji postaje i dupleks nehrđajući čelik i to s dobrim razlogom; u prošlosti je bilo mnogo problema s dupleks čelicima kao što su loša zavarljivost, komplicirani metalurgijski proces izrade, loša obradivost i loša oblikovljivost, no napretkom tehnologije i poznavanja dupleks čelika, njegova proizvodnja je olakšana i efikasnija, cijena je pala, kemijski sastav poboljšana, a time su poboljšana njegova mehanička svojstva, antikorozivna svojstva te zavarljivost. Dupleks čelici posjeduju izvanredna mehanička i antikorozivna svojstva koja niti austenitni, niti feritni nehrđajući čelici ne mogu postići. Iz tih razloga se koriste i u najzahtjevnijim okolinama kao što su „offshore“ konstrukcije, kemijska industrija i u drugim procesnim industrijama. U zadnjem desetljeću porast uporabe dupleks čelika je preko 100%, međutim, i dalje je jedan od glavnih problema osvijestiti proizvođačima i drugim kompanijama prednosti dupleks čelika nad ostalima. Dodatna pogodnost je cijena dupleks čelika, koja je niža u usporedbi s austenitnim čelikom slične korozivne postojanosti, zbog nižih udjela nikla i molibdena čija cijena vrlo često varira na tržištu. Osim toga, svakim danom proizvođači stvaraju nove legure dupleks čelika, kao na primjer lean dupleks čelici slabijih antikorozivnih svojstava, koji nisu osmišljeni za zahtjevne primjene u procesnoj industriji kao drugi dupleks čelici, već za šire primjene zbog pristupačnije cijene i drugih pogodnih svojstava [2], [3].

Izmjenični ili AC MIG (eng. *alternating current metal inert gas*) postupak zavarivanja se najprije počeo primjenjivati u Japanu za zavarivanje određenih detalja na raznim tipovima vozila (automobilska industrija, brodogradnja), no u Europi nije bio komercijalno dostupan sve do kraja 1990-ih [4]. AC MIG nastoji kombinirati pozitivna svojstva kada se elektroda nalazi na pozitivnom polu (stabilan električni luk i prijenos metala, dobra penetracija) i kada se nalazi na negativnom (smanjena penetracija, smanjen unos topline, veći depozit) [5]. Stoga su glavne prednosti AC MIG postupka zavarivanja nad konvencionalnim istosmjernim DC MIG (eng. *direct current*) postupkom smanjena penetracija pri velikim brzinama zavarivanja, velika sposobnost premošćivanja razmaka među pločama te smanjen unos topline [4], [5]. Tako iznosi struje obično ne prelaze 200 A, a način rada je većinom impulsni. Shodno tome je posebno

primjenjiv pri zavarivanju tankih limova, gdje ne dolazi do pregorijevanja lima, distorzija je smanjena uslijed smanjenog unosa topline te je omogućena veća tolerancija razmaka među pločama [4]. Upravo ova svojstva savršeno odgovaraju zahtjevima zavarivanja aluminija, stoga se aluminij najčešće zavaruje ovim postupkom [6]. No, njegove primjene su ispitane i za veće debljine i druge vrste metala, kao što su konstrukcijski čelici većih debljina gdje je pokazano kako AC MIG može biti primjenjiv i za ostvarivanje visokih penetracija, također uz smanjen unos topline [7]. Danas brojne kompanije razvijaju komercijalno dostupne izvore za AC MIG zavarivanje koji imaju dobro balansirane parametre koji omogućuju stabilno i efikasno zavarivanje ovim postupkom, no postoji još puno prostora za njegov napredak, a tako i proširenje primjena i pronalazak mjesta u zavarivačkoj industriji.

2. PREGLED OSNOVNIH GRADACIJA DUPLEKS ČELIKA

Otpornost na koroziju je glavna karakteristika nehrđajućih čelika. Ona je posljedica stvaranja kromovog oksida na površini metala koji čini pasivni sloj koji izolira i „čuva“ površinu od štetnog djelovanja korozijskih procesa [8]. Glavna podjela nehrđajućih čelika je na feritne, austenitne, dupleks, martenzitne i precipitacijski otvrdnute nehrđajuće čelike. [9]

Austenitni nehrđajući čelik je najkorišteniji od nabrojanih pet tipova nehrđajućih čelika, čineći dvije trećine svih proizvedenih nehrđajućih čelika na svijetu [10]. Glavna mana austenitnog nehrđajućeg čelika je visoka osjetljivost na napetosnu koroziju, posebice u okolini s prisustvom klorida. S druge strane, feritni nehrđajući čelik je gotovo imun na tu vrstu korozije. Međutim, feritni čelik je inferiorniji nad austenitnim nehrđajućim čelikom jer ima puno lošiji udarni rad loma i lošiju zavarljivost. Osim toga, valja naglasiti kako je feritni nehrđajući čelik magnetičan, dok austenitni nije. [8], [11]

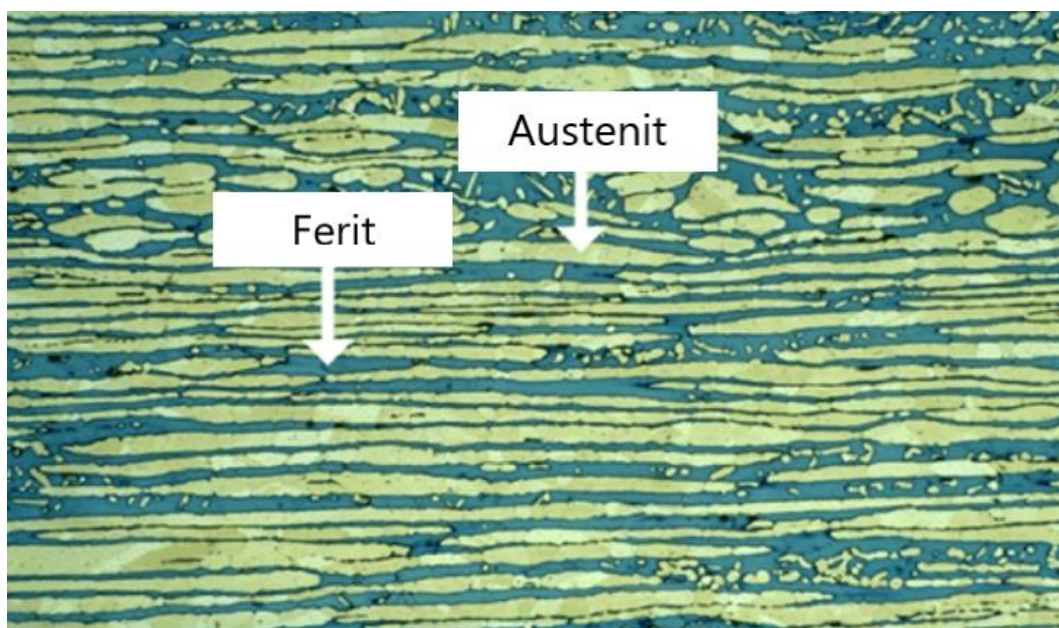
Kombiniranjem ovih dviju vrsta nehrđajućih čelika nastao je dupleks nehrđajući čelik sa iznenađujuće dobrim svojstvima – dobiven je nehrđajući čelik koji je iznimno otporan na koroziju, posebice na lokalne vrste korozije kao što su rupičasta korozija, interkristalna korozija, a i već spomenuta napetosna korozija. Osim odličnih antikorozivnih svojstava, dupleks čelici imaju iznimna mehanička svojstva, gdje je primjerice vlačna čvrstoća dupleks čelika gotovo dvostruko veća nego kod austenitnih i feritnih čelika. To je iz razloga što je struktura sitnozrnata, što je puno teže postići u materijalu sa samo jednom fazom. [11]

Zbog ovih svojstava, dupleks čelici se vrlo često koriste za izradu dijelova koje sadrže vrlo agresivne medije ili su okruženi njima. Neki od primjera su u brodogradnji za izradu spremnika agresivnih medija ili u prehrambenoj industriji te za prijevoz namirnica. Generalno se može koristiti u brojnim korozivnim okruženjima sve dok temperatura ne prelazi raspon od -50° do 300°C . Primjer cisterni od dupleks čelika za prijevoz kemijskih i naftnih proizvoda sa hrvatskog brodogradilišta prikazani su na slici 1. [12]



Slika 1 Cisterna i spremnik za kemijske i naftne proizvode [12]

Omjeri faza isporučenog materijala dupleks čelika su podjednaki (50% - 50%) kako bi se postigle najbolje karakteristike. Mikrostruktura takvog dupleks nehrđajućeg čelika prikazana je na slici 2.



Slika 2 Mikrostruktura nehrđajućeg dupleks čelika [12]

Glavni legirni elementi koji omogućuju stabilnu mikrostrukturu dupleks čelika su krom, molibden, nikal, mangan i dušik. Krom omogućuje stvaranje pasivnog sloja na površini te je njegov minimalni udio 10,5%. Njegovim povišenjem otpornost na koroziju raste, međutim pri visokim udjelima počinje negativno utjecati zbog stvaranja intermetalnih faza. Molibden također povisuje antikorozivna svojstva, posebice u kloridnim okruženjima, međutim njegov udio treba biti manji od 4%. Ova dva elementa su alfa elementi što znači da potiču stvaranje ferita i njihov udio utječe na stabilnost faza (50:50) dupleks mikrostrukture. S druge strane,

nikal se dodaje duplex nehrđajućem čeliku radi stabilizacije austenita i povećanja udarnog rada loma materijala. Mangan povećava otpornost na trošenje i povisuje vlačnu čvrstoću, a dušik poboljšava otpornost na koroziju i također povisuje vlačnu čvrstoću. Dušik je iznimno bitan element pri zavarivanju dupleks čelika, o čemu će kasnije u radu biti više riječi. [12]

Naziv mnogih dupleks čelika reflektira njihov tipičan udio kroma i nikla. Primjerice, dupleks čelik 2205, o kojem je u ovome radu riječ, sadrži 22% Cr i 5% Ni. Legura 2205 (EN 1.4462; UNS S31803) je ujedno i najkorišteniji dupleks čelik. [12]

Dupleks čelici se dijele u nekoliko grupa prema antikorozivnim svojstvima uslijed svog različitog kemijskog sastava. Jedan od pokazatelj antikorozivnih svojstava je PRE_N indeks (PRE_N – eng. Pitting Resistance Equivalent Number) koji pokazuje otpornost prvenstveno na rupičastu koroziju i računa se prema jednadžbi (1); [12]

$$PRE_N = \%Cr + 3,3 \times (\%Mo + 0,5 \times \%W) + 16 \times \%N \quad (1)$$

Tako su dupleks čelici podijeljeni u tri grupe; [12]

- lean dupleks čelici; $PRE_N < 30$
- standardni dupleks čelici; $30 < PRE_N < 40$
- super dupleks čelici; $PRE_N > 40$

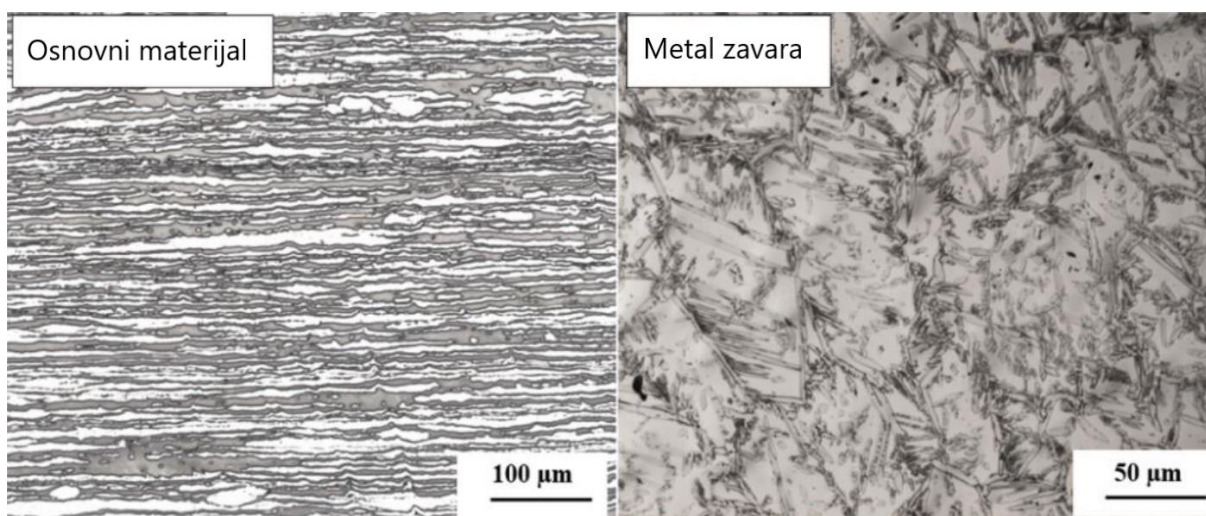
Odnosno prema normi HRN EN 1011-3:2001 [9] na niskolegirane, srednje legirane i visoko legirane dupleks čelike. Dupleks 2205 nehrđajući čelik spada u standardne nehrđajuće čelike s $PRE_N = 35$ odnosno srednje legirane čelike [12].

3. PROBLEMATIKA ZAVARIVANJA DUPLEKS ČELIKA

Dupleks čelici se smatraju dobro zavarljivim nehrđajućim čelicima [5]. Međutim, za razliku od osnovnih konstrukcijskih čelika zahtijevaju detaljnije poznavanje pojava koje se javljaju tokom zavarivanja te mehaničkih i korozivskih svojstava nakon zavarivanja. To uključuje poznavanje mehanizama formacija faza dupleks čelika te kako na njih utječu parametri zavarivanja, zaštitni plinovi, priprema, odabir dodatnog materijala, čišćenje nakon zavarivanja, naknadna toplinska obrada i slično. [9]

3.1. Formacija faza uslijed zavarivanja dupleks čelika

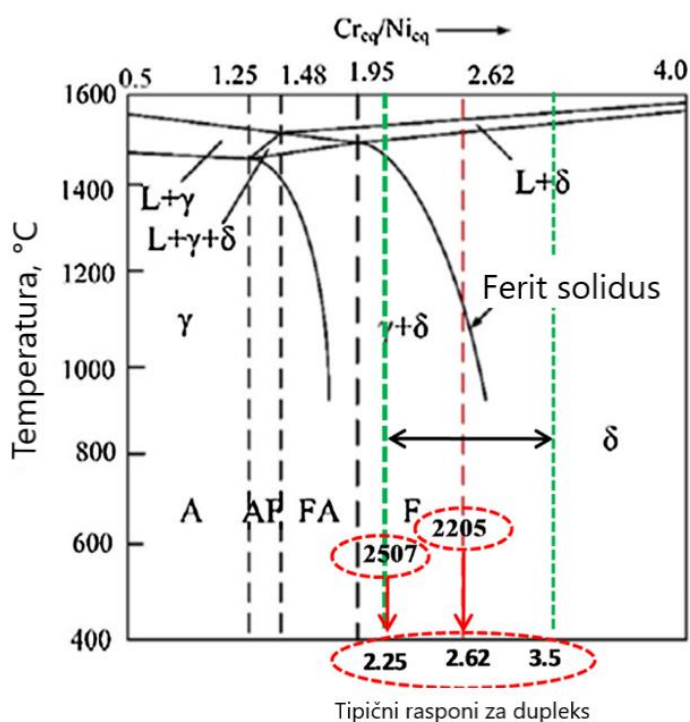
Mikrostruktura dupleks čelika se uglavnom sastoji od feritne i austenitne faze te je ona prikazana na slici 2, no tijekom zavarivanja dolazi do promjene izgleda mikrostrukture i formacija različitih faza. Prikaz usporedbe mikrostrukture osnovnog materijala naspram metala zavara može se vidjeti na slici 3. Osim feritne i austenitne faze javljaju se i štetni intermetalni spojevi i sekundarne faze, a njihov izgled, utjecaj na mehanička i antikorozivna svojstva i načina nastajanja će biti objašnjeno u ovom poglavlju. [13]



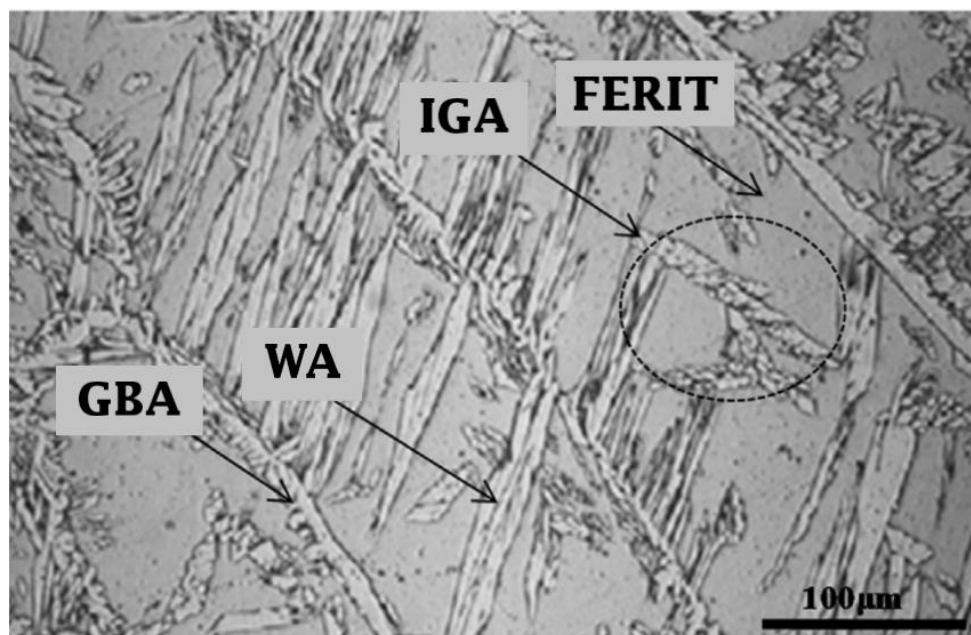
Slika 3 Usporedba mikrostrukture osnovnog materijala i metala zavara dupleks čelika [13]

Način solidifikacije nehrđajućih čelika može se vidjeti na Fe-Cr-Ni pseudo binarnom dijagramu, slika 4. Za dupleks čelike, a tako i 2205, način solidifikacije je potpuno feritni. To se može vidjeti iz navedenog dijagrama (Cr_{eq}/Ni_{eq} za dupleks čelik 2205 iznosi 2,62). To znači da ispod linije likvidusa (L) nastaje isključivo ferit. Ferit se anotira na dva načina - delta ferit (δ) koji označava ferit pri višim temperaturama i alfa ferit (α) pri nižim temperaturama. Kada se temperatura još snizi te pređe solidus liniju ferita, tek tada se počinje izlučivati austenit. Taj prvo nastali austenit, koji nastaje direktno iz feritne matrice, još se naziva i granični austenit

(GBA) te može nastati u temperaturnom rasponu od 1350°-800°C. Iz njega dodatno nastaje pri nešto nižim temperaturama tzv. Widmanstätten austenit (WA) koji ima niže udjele Cr i Mo od GBA i raste u feritnu matricu stoga ima vrlo specifičan, igličast izgled [13], [14]. Na samome kraju nastaje interkristalni austenit (IGA) ili sekundarni austenit (γ_2) koji nastaje kada je hlađenje presporo, a nastaje na niskim temperaturama (350-550°C). Sekundarni austenit je najviše podložan rupičastoj koroziji zbog najmanjih udjela Cr i Mo, a za njega se smatra da je potencijalno mjesto nukleacije nitrida, a time potencijalno smanjuje udarni rad loma [13], [14]. Izgled ovih faza mogu se vidjeti na slici 5.



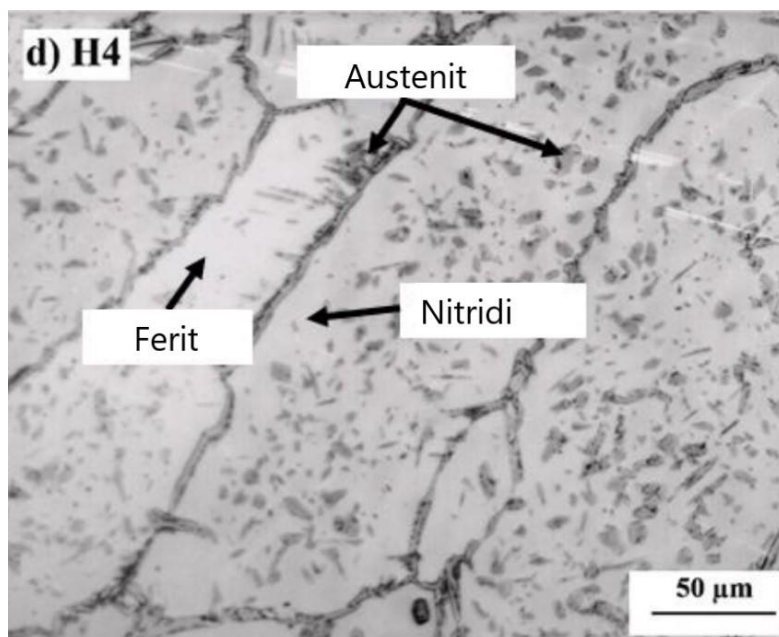
Slika 4 Pseudo binarni dijagram za nehrđajuće čelike s istaknutom vrijednosti omjera Cr_{eq}/Ni_{eq} za duplex 2205 [14]



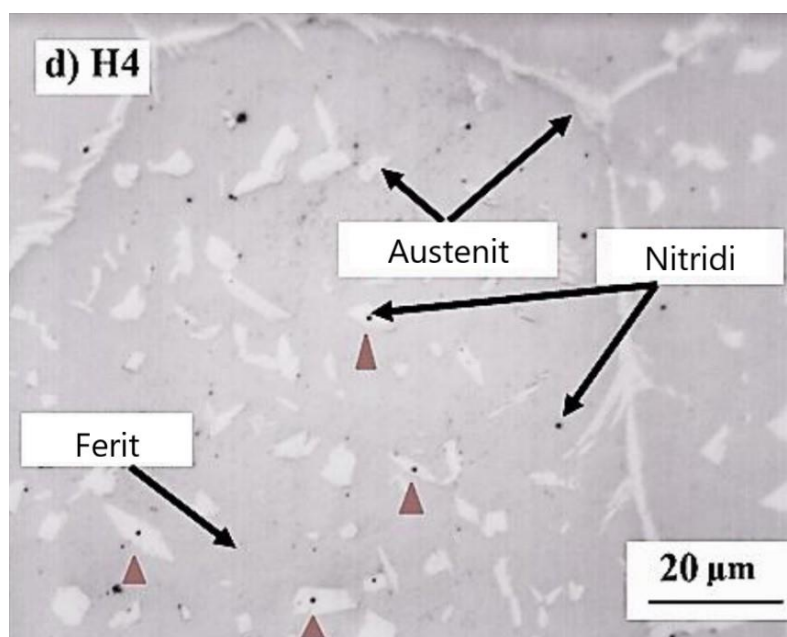
Slika 5 Tipičan izgled feritne faze i različitih austenitnih faza, nagriženo Murakami reagensom [14]

Nepoželjne faze koje nastaju uslijed termalnih ciklusa nametnutih zavarivanjem su CrN, Cr₂N, M₇C₃, M₂₃C₆ (M = Fe ili Cr) koji se nazivaju sekundarnih fazama i sigma (σ), chi (χ), τ i π faze koji predstavljaju intermetalne spojeve. Od svih ovih faza, najopasnija je sigma (σ) faza koja je tvrda i iznimno krhka faza obogaćena Cr, Mo i Si te djeluje i u malim postocima iznimno štetno na mehanička i antikorozivna svojstva zavarenog spoja na način da osiromašuje okolno područje od kroma te povećava posebno rizik od nastanka rupičaste korozije.[14] Nastanak ove faza je iznimno osjetljiv na broj nametnutih toplinskih ciklusa (kao što je to slučaj kod višeprolaznog zavarivanja), a nastaje u temperaturnom rasponu od 700 – 1000°C. [8], [15]

Još nekoliko primjera označenih faza, na kojima su istaknuti feritna faza, austenit te nitridi (sekundarna faza), prikazani su na slici 6 i 7. Mikrostruktura na slici 6 je elektrokemijski nagrižena 10% NaOH kiselinom (4V u trajanju od 4s), a na slici 7 je elektrokemijski nagrižena 10% oksalnom kiselinom (4V u trajanju od 6s) kako bi se dodatno proučili precipitati, kao što su nitridi, karbidi i oksidi. [13]



Slika 6 Prikaz mikrostrukturnih faza metala zavara, elektrokemijski nagriženo u 10% NaOH [13]



Slika 7 Prikaz mikrostrukturnih faza metala zavara, elektrokemijski nagriženo u 10% oksalnoj kiselini [13]

Zaključno, omjeri faza austenita i ferita te izlučivanje štetnih intermetalnih spojeva i sekundarnih faza iznimno ovise o unosu topline na način da niži unos topline rezultira bržem hlađenju pa posljedično time visokom udjelu ferita i precipitacije kromovih nitrida koji narušavaju mehanička i antikorozivna svojstva zavara. Viši unosi topline daju više vremena austenitnoj reformaciji na višim temperaturama (nastaje više poželjnog graničnog austenita

GBA) [8]. Međutim ukoliko unos topline pređe vrijednost od oko 2,5 kJ/mm, ponovno dolazi do precipitacije intermetalnih spojeva, dakle potrebno je držati unos topline u balansu [9], [12].

3.2. Feritni broj

Rezultati udjela ferita u odnosu na ferit se može izraziti na dva različita načina, jedan je u %, a drugi kao feritni broj (FN). Za dupleks čelike prema IIW II 1196-92, relacija između navedenih parametara je sljedeća[15]:[15]

$$F\% = 0,54 FN + 9,7 \quad (2)$$

gdje je:

FN - feritni broj

$F\%$ - udio ferita u austenitu.

U normi EN 1011-3 zahtjevi za udio ferita su između 30 i 100 FN , odnosno 26 i 64% kada se preračuna po formuli (2). Drugi izvori kao što je [15] daju svoje preporuke prema iskustvu, gdje za MIG/MAG postupak udio ferita treba iznositi od 20-50% u metalu zavara, a u zoni utjecaja topline (ZUT) $\leq 75\%$.

3.2.1. Metode određivanja udjela ferita

Metode mjerenja udjela ferita mogu se podijeliti na direktne i indirektne.

U direktne metode spadaju analize bazirane na slikama mikroskopa – linijska analiza (brojanjem točaka) i analiza površina korištenjem kompjuterskog „software“-a. Osim ove dvije tehnike u direktnu metodu spadaju tehnike skenirajućeg elektronskog mikroskopa kao što je to difrakcija povratnog raspršenja elektrona (*eng.* electron backscattered diffraction - EBSD). EBSD je jedna od najtočnijih tehnika analize udjela mikrostrukture, međutim vrlo je dugotrajna, zahtjevna i skupa.[16]

Linijska analiza je opisana normom ASTM E562, a u [17] je opisana kao spora, subjektivna, neponovljiva, ne može se automatizirati te često daje relativno netočne rezultate u odnosu na druge metode. U radu [16] linijskom analizom je dobiven 8% niži udio ferita dok je programskom analizom dobiven gotovo isti udio onome koji je mjeren EBSD metodom (razlika je bila $< 1\%$). Osim veće točnosti, programska analiza je puno brža, a može se i automatizirati što ju čini efikasnijom metodom.

Postupak opisan u poglavlju 7.6.3.2 je identičan onome objašnjenom u [17] uz jednu razliku. Kontrast faza dobiven u tom slučaju je puno veći (nagrizanje je provedeno u Beraha reagensu),

te pri postavkama „threshold“ granica, jasno su uočljivi vrhovi vrijednosti sive skale (*eng.* „gray level“) pa je puno lakše postaviti donju i gornju granicu, odnosno program to odradi automatski. Indirektni načini mjerenja su magnetsko mjerenje korištenjem uređaja FERITOSCOPE®, difrakcija x-zrakama, predviđanjem kemijskog sastava korištenjem WRC-92 dijagrama, TermoCalc softvera i sl. Najzanimljiviji i daleko najprimjenjiviji je metodom magnetskog mjerenja uređajem FERITOSCOPE® iz razloga što daje pouzdane rezultate te je iznimno brz. Jedina mana je što zahtjeva kalibraciju i može rezultirati većim rasipanjima (do 20% u realnom metalu zavara), međutim, to može biti smanjeno na minimum jer je dobro razvijena metodologija u raznim člancima, standardima te IIW dokumentima.[16]

Također, nije primijenjena za računanje lokaliziranih udjela ferita kao što je to primjerice u području ZUT-a, stoga se na tom području može koristiti linijska metoda prema normi ASTM E562 ili programskom analizom slike. [15]

3.3. Preporuke za zavarivanje dupleks čelika prema normi HRN EN 1101-3:2001 [9]

U ovome poglavlju dane su preporuke za zavarivanje dupleks nehrđajućih čelika prema normi HRN EN 1101-3:2001 [9].

Na samome početku je istaknuto kako su prvobitno uočeni problema sa zavarivanjem ove vrste čelika zbog pretjeranog udjela feritne faze u ZUT-u i metalu zavara. Međutim, ubrzo je otkriveno kako je zavarljivost dupleks čelika odnosno optimizacija udjela faze austenita i ferita u mikrostrukturi uvelike poboljšana uvođenjem dušika kao dodatnog legirnog elementa.

Iako je zavarljivost dupleks čelika danas vrlo dobra, za uspješnu provedbu zavarivanja potrebno je razjasniti sljedeće stavke: [9]

- prikladni postupci za zavarivanje dupleks čelika
- skladištenje, rukovanje i priprema
- predgrijavanje
- unos topline
- dodatan materijal
- zaštitni plin
- osjetljivost na tople i hladne pukotine
- korozijska postojanost nakon zavarivanja
- naknadna toplinska obrada
- čišćenje uzoraka.

3.3.1. Postupci prikladni za zavarivanje dupleks čelika

Svi elektrolučni postupci (navedeni u normi HRN EN 1011-1:2009 [18]) su prikladni za zavarivanje dupleks čelika. Međutim, postupke kao što su zavarivanje laserom, plazmom, električnim snopom ili točkasto zavarivanje treba izbjegavati zbog pretjerane brzine hlađenja.

Preporučeno je zavarivanja s dodatnim materijalom, a ukoliko se zavaruje bez dodatnog materijala potrebno je rastvorno žariti i gasiti u vodi kako bi se postigla odgovarajuća mikrostruktura. Također, posebice u tom slučaju, preporuča se korištenje dodatnog plina koji sadržava dušik jer on potiče austenitnu formaciju i može dati zadovoljavajuće rezultate i bez toplinske obrade i dodatnog materijala. [9]

3.3.2. Skladištenje, rukovanje i priprema uzoraka

Nehrđajući čelik treba biti zaštićen od kontaminacije i površinskih oštećenja tijekom svih koraka, tijekom proizvodnje, transporta i skladištenja. To znači da bi kontakt između nehrđajućeg čelika i drugih materijala kao što su npr. ugljični čelici, bakar, boje, trake, trebao biti izbjegavan. Police za skladištenje trebaju biti načinjene od materijala koji nisu kontaminirajući, primjerice od drva ili također nehrđajućih čelika. Vilice od viličara trebaju također biti zaštićeni odnosno prevučeni adekvatnim materijalom iz istog razloga. Osim toga, treba pripaziti i na atmosferske uvjete odnosno okolinu u kojoj se skladišti nehrđajući čelik.

Za pripremu uzoraka potrebno je koristiti alate isključivo namijenjene za obradu nehrđajućeg čelika. Prije zavarivanja uzorke je potrebno dobro očistiti i odmastiti od bilo kakvih površinskih nečistoća nastalih tijekom prerade i skladištenja. [9]

3.3.3. Pregrijavanje dupleks čelika

Predgrijavanje duplex čelika je nepotrebno, ali se može predgrijavati do maksimalno 100°C u svrhu uklanjanja vlage sa površine. [9]

3.3.4. Unos topline

Unos topline za dupleks nehrđajuće čelike treba biti unutar određenih granica. Nisko i srednje legirani dupleks čelici se obično zavaruju s unosom topline između 0,5 kJ/mm i 2,5 kJ/mm te s temperaturom međuprolaza manjom od 250°C.

Za visokolegirane dupleks čelike unos topline treba biti između 0,2 kJ/mm i 1,5 kJ/mm, s maksimalnom temperaturom međuprolaza od 100-150 °C.

Razlog ograničavanja donjeg i gornjeg iznosa unosa topline leži u tome što se duplex čelik uslijed premalog unosa topline prebrzo hladi što uzrokuje visoke udjele ferita. Suprotno tome, uslijed prevelikog unosa topline dolazi do precipitacije intermetalnih faza.

Navedeno je kako su ovo generalne smjernice te treba obavezno uzeti u obzir i debljinu materijala i vrstu procesa zavarivanja. [9]

3.3.5. Dodatan materijal

Pri zavarivanju dupleks čelika, dodatan materijal treba sadržavati veće udjele nikla od osnovnog. Time se smanjuje štetan efekt brzog hlađenja i većeg stupnja miješanja što je posebno slučaj za korijenski prolaz. Prema tome se primjerice za srednje legirani dupleks čelik treba koristiti dodatan materijal od visokolegiranog dupleks čelika. [9]

3.3.6. Zaštitni plinovi

Zaštitni plinovi preporučeni za MAG zavarivanje su: [9]

- mješavina argona i do 2,5% CO₂
- argon-helij-kisik mješavine
- argon-helij-CO₂ mješavine
- navedene mješavine s dodatkom do 3% N.

Utjecaj navedenih zaštitnih plinova i plinskih mješavina detaljno je opisan u poglavlju 4.

3.3.7. Svojstva nakon zavarivanja

U pojave nakon zavarivanja spada precipitacija intermetalnih spojeva i faza, tople i hladne pukotine, maksimalna tvrdoća te utjecaj zavarivanja na otpornost koroziji.

3.3.7.1. Precipitacija

Generalno gledajući, visokolegirani dupleks čelici su puno osjetljiviji na precipitaciju intermetalnih faza, međutim srednje legirani dupleks čelici također mogu imati takve probleme. Navedene faze imaju štetan utjecaj na mehanička svojstva i otpornost koroziji. [9]

3.3.7.2. Tople pukotine

Dupleks čelici nisu osjetljivi na tople pukotine zbog visokog udjela ferita. [9]

3.3.7.3. Hladne pukotine

Dupleks čelici mogu biti osjetljivi na hladne pukotine ukoliko je udio ferita visok ($> 110 FN =$ približno 75% ferita) s visokim udjelom vodika kao glavnim krivcem. Međutim, opasnost se dodatno povećava ukoliko je njegova distorzija fizički onemogućena tj. ograničena. [9]

3.3.7.4. *Maksimalna tvrdoća*

Postoje ograničenja maksimalne tvrdoće srednje i visokolegiranih dupleks čelika ukoliko se koriste u atmosferama gdje je prisutan vodikov sulfid. Tada maksimalna tvrdoća smije iznositi 28 HRC za srednje legirane dupleks čelike (npr. 2205 dupleks čelik), a za visokolegirane 32 HRC. U tom slučaju, posebno je potrebno pripaziti na tvrdoću u korijenskom zavaru kojem je nametnuto visoko zaostalo naprezanje zbog nadolazećih prolaza. [9]

3.3.7.5. *Otpornost koroziji*

Dupleks čelici su generalno vrlo otporni na rupičastu i napetosnu koroziju. Za to svojstvo je usko vezan balans ferita i austenita u mikrostrukturi zavara i osnovnog materijala, gdje se zahtjeva da udjeli ferita budu između 30 FN i 100 FN.

Dodatkom dušika kao legirnog elementa osnovnog i dodatnog materijala postiže se maksimalna otpornost koroziji. Mogući problem može nastati kod postupaka kao što su TIG i MIG/MAG tijekom kojih može doći do gubitka dušika. Tako se dodavanjem dušika u zaštitni plin otklanja taj problem te može još dodatno povećati otpornost na rupičastu koroziju.

No postoji i lošija strana dodavanja dušika u materijal kao i u zaštitni plin. Dupleks čelici s većim udjelom dušika ($> 0,20\%$) su više podložni pojavi poroznosti tijekom zavarivanja.

Ovaj problem se rješava tako što se zaštitni plin s dodanim dušikom koristi samo u kritičnim prolazima tj. korijenskom i završnom prolazu. Također treba pripaziti da protok plina ne bude pretjeran. [9]

3.4. Naknadna toplinska obrada

Naknadna toplinska obrada normalno nije potrebna za dupleks čelike. Međutim, kao što je opisano u poglavlju 3.3.1, ukoliko se zavaruje bez dodatnog materijala i plinske mješavine s dodatkom dušika, potrebno je rastvorno žariti i gasiti u vodi. [9]

3.5. Čišćenje uzoraka

Otpornost koroziji nehrđajućih čelika je posebno osjetljiva na stanje površine.

Čišćenje nakon zavarivanja se može izvesti na nekoliko načina koji se mogu koristiti samostalno ili u kombinaciji, primjerice: [9]

- četkanje – koriste se četke koje su izrađene od nehrđajućeg čelika ili drugog kompatibilnog materijala. Potrebno je pripaziti kod rotirajućih četki da se ne stvore mikro pukotine koje mogu biti pogubne za otpornost koroziji. Često je potrebno nagristi zavareni spoj nakon četkanja.
- sačmarenje – potrebno je koristiti sačme od nehrđajućeg čelika ili stakla. Služi također da bi se stvorilo tlačno površinsko zaostalo naprezanje koje dodatno sprječava nastanak i širenje rupičaste korozije.
- brušenje – potrebno je koristiti brusne diskove, remene ili kotače bez prisutnosti elementa željeza. Ovo je za najgrublju površinsku obradu te treba pripaziti da ne dođe do neželjenih površinskih oštećenja.
- nagrivanje – nagrivanjem površine se miču površinski oksidi kemijskom reakcijom. Nagrizajuće sredstvo koje se koristi ovisi o vrsti čelika, vremenu koje je dostupno za nagrivanje i temperaturi samog sredstva. Posebno treba posvetiti pažnju pravilnom uklanjanju sredstva nakon obavljenog procesa
- elektropoliranje – elektropoliranje se koristi kod nestabiliziranih nehrđajućih čelika kako bi dali glatku površinu za optimalnu otpornost koroziji.

Za optimalnu otpornost koroziji najpovoljniji procesi su nagrivanje i elektropoliranje, nakon čega slijedi prirodna ili umjetna pasivacija. [9]

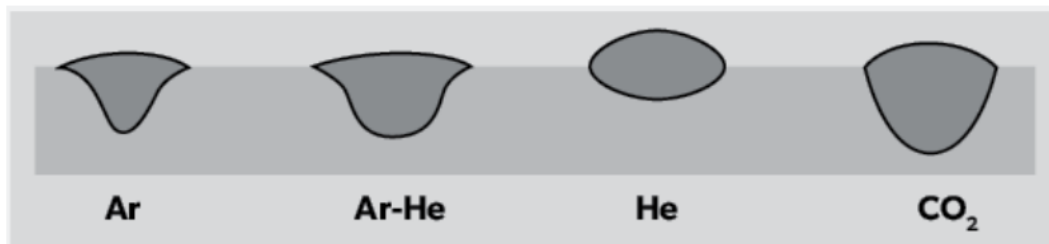
4. ZAŠTITNI PLINOVI

Zaštitni plinovi, osim svoje primarne funkcije da štiti rastaljeni metal od vanjski utjecaja, značajno utječe na oblik profila zavara. Geometrija zavara, izgled šava zavara, metalurgijska i mehanička svojstva zavara, antikorozivna svojstva zavara, penetracija, stabilnost luka, prijenos metala, brzina zavarivanja, tvorba i količina plinova zavarivanja su parametri koji se mijenjaju kako se mijenja vrsta i protok zaštitnog plina. Stoga treba biti vrlo dobro upoznat sa benefitima i manama različitih zaštitnih plinova i plinskih mješavina. [19]

4.1. Osnovna svojstva zaštitnih plinova i njihov utjecaj na izgled profila zavara

Svi zaštitni plinovi su standardizirani po Europskom standardu HRN EN ISO 14175:2008 [20] te pokriva šest glavnih plinova koji se koriste u zavarivanju; helij (He), vodik (H_2), ugljikov dioksid (CO_2), kisik (O_2) i Argon (Ar). Glavna svojstva koja ovi plinovi imaju koja su bitna za stvaranje luka i svojstva luka su ionizacijski potencijal, toplinska vodljivost, kemijska aktivnost luka, energija disocijacije i gustoća plina. Što je niži ionizacijski potencijal, to je lakša uspostava električnog luka i njegova veća stabilnost tijekom zavarivanja. Veća toplinska vodljivost znači lakši i veći prijenos topline po cijeloj širini električnog luka, što uzrokuje širi oblik zavara, ali ne i veću penetraciju, primjer takvog plina je He. Plinovi kao što su Ar s manjom toplinskom vodljivošću i rezultira prstastim oblikom penetracije jer je prijenos topline koncentriran u jezgri električnog luka. Kemijska aktivnost govori kako plin kemijski reagira s elementima iz zavarenog spoja, a ukoliko postoji kemijska reakcija plin se klasificira kao aktivan, u suprotnom kao inertan. Gustoća plina utječe na potrebni protok plina (plinovi teži od zraka kao što su CO_2 i Ar zahtijevaju manje protoke nego npr. He koji je lakši od zraka), a energija disocijacije zajedno sa ionizacijskim potencijalom čini potrebnu energiju za uspostavu električnog luka. Naime, višeatomski plinovi kao što je CO_2 je najprije potrebno disocirati na atome, kako bi se onda oni mogli ionizirati. Također, još je zanimljiva činjenica da plin CO_2 , unatoč manjoj toplinskoj vodljivosti, postiže efekt plinova s većom toplinskom vodljivošću kao što je to He i još se pritom povećava penetracija zbog fenomena rekombinacije disociranih atoma pri dodiru s hladnom površinom metala pri čemu se oslobađaju velike količine energije. Upravo zato CO_2 ima karakterističan oblik zavara koji je širok s velikom penetracijom. [19], [21]

Tipični oblici zavara u ovisnosti o zaštitnom plinu ili njihovoj mješavini može se vidjeti na slici 8.



Slika 8 Izgled profila zavara u ovisnosti o zaštitnom plinu [22]

4.2. Utjecaj zaštitnih plinskih mješavina na dupleks nehrđajuće čelike

U ovome radu glavni fokus je stavljen na plinove i plinske mješavine pogodne za nehrđajuće čelike zbog toga što se pokušavaju maksimizirati mehanička i antikorozivna svojstva navara od dupleks nehrđajućeg čelika.

Već su, prema normi HRN EN 1011-3:2001 [9], dani zaštitni plinovi preporučeni za MAG zavarivanje u poglavlju 3.3.6. Opis mješavina, njihovih karakteristika i utjecaja na nehrđajuće čelike, s posebnim naglaskom na dupleks čelike dan je u sljedećim poglavljima.

4.2.1. Ar + maks. 2,5% CO₂

Česta plinska mješavina za zavarivanje nehrđajućih čelika je mješavina argona s niskim udjelima nekih od oksidanata; ugljikovog dioksida ili kisika. Naglasak na niski udio ovih elemenata je iz razloga što povišenjem njihovih udjela dolazi do gubitka mangana, kroma i niobija iz strukture nehrđajućih čelika. Dodavanjem CO₂ postiže se bolje kvašenje taline, a time se postiže bolji izgled samog zavara. Osim toga vrlo je jeftin s ekonomskog gledišta. Glavna zabrinutost oko njegovog korištenja proizlazi iz opasnosti od apsorpcije ugljika koja može rezultirati stvaranjem krom karbida odnosno senzibilizaciji nehrđajućeg čelika (moguć nastanak martenzita) čime se povećava krhkost i podložnost koroziji. Međutim, apsorpcija ugljika je dovoljno mala ukoliko ga se dodaje u malim količinama, normom HRN EN 1011-3:2001[9] je taj iznos ograničen na maksimalno 2,5%. Ako se može tolerirati povišena oksidacija zavara, CO₂ će uvelike poboljšati prijenos metala posebnu u zavarivanju kratkim spojevima kod MIG postupka zavarivanja. Još jedna mana je što uslijed brzog hlađenja može doći do stvaranja martenzita na granicama ferita čime se iznimno smanjuje udarni rad loma zavara. [22], [23]

4.2.2. Ar-He-CO₂ / O₂ mješavine

Helij se dodaje u plinsku mješavinu kako bi povećali penetraciju i fluidnost taline zavara. Također njime su omogućene veće brzine zavarivanja i manja distorzija. Problem helija je što

je veoma skup s ekonomskog stajališta. Kada bi se helij samostalno koristio dao bi bolje rezultate u usporedbi s čistim argonom. Helij proizvodi električni luk viših temperatura te time omogućuje pogodniju brzinu hlađenja za transfer iz feritne u austenitnu fazu, što poboljšava udarni rad loma zavarenog spoja. Sam argon daje zavar s nepogodnim udjelima ferita i austenita. [23]

Iako se čini kontra intuitivno jer se upravo pokušava spriječiti oksidiranje vrućih metala u dodiru sa zrakom, u malim količinama (ispod 2%) kisik daje pogodna svojstva zavaru. Kisik smanjuje površinsku napetost između taline i okružujuće atmosfere. To rezultira ravnijim i glađim zavarom s manjim rizikom od zajeda i prevelikog kut prijelaza površine šava na osnovni metal. Pri većim udjelima kisika dolazi do gubitka legiranih elemenata, uključina kisika i slično. Pobojanost (lagano oksidirana površina) u zavarenom području raste s dodatkom kisika. [22]

4.2.3. Dodatak do 3% N

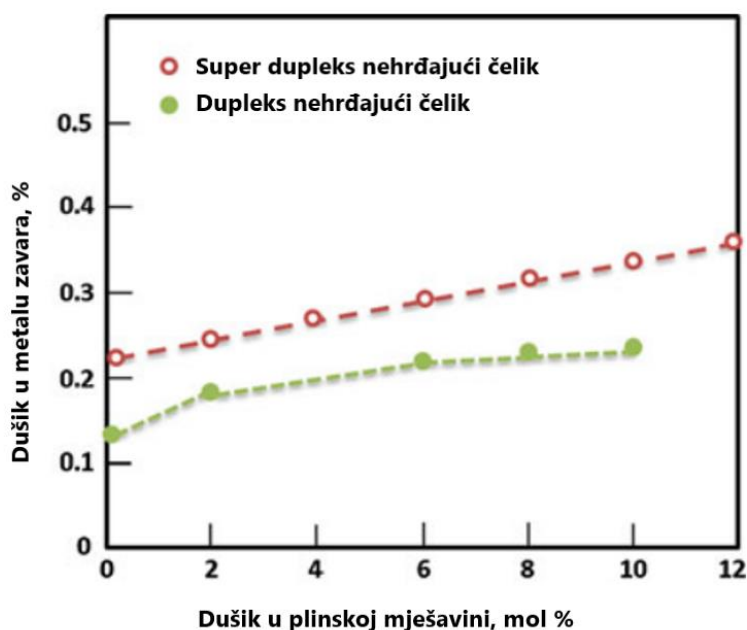
Uvođenje dušika u plinske mješavine dupleks čelika ostvario je veliki skok u dobivenim svojstvima zavara. Glavni problem dupleks čelika je održati omjer feritne i austenitne faze u metalu zavara i zoni utjecaja topline. Dušik je jaki austenitni stabilizator, što znači da povisuje temperaturu pretvorbe austenita odnosno austenit se prije kreće izlučivati. Prilikom zavarivanja, a posebice zavarivanja MIG postupkom, dolazi do gubitka dušika iz zavarenog spoja. Gubitkom dušika naglo raste osjetljivost na rupičastu koroziju koja je iznimno opasna. Suprotno tome, kada je dušik prisutan u zavarenom spoju, udio austenita je puno viši, a austenit sprječava prodiranje rupičaste korozije kroz osjetljivu feritnu fazu. Još jedna prednost dušika je homogenizacija distribucije kroma između feritne i austenitne faze. [23]

Međutim, udio dušika mora biti nizak, jer pri višim udjelima on premašuje topivost u zavarenom spoju i uzrokuje poroznost jer dolazi do njegovog pokušaja izlaska iz zavara tijekom hlađenja. Prikaz ovisnosti dušika u plinskoj mješavini u odnosu na njegovu topivost u zavarenom spoju prikazana je na slici 9. Udio dušika u zaštitnom plinu mora odgovarati udjelu dušika metala koji se zavaruje. Tako primjerice za dupleks čelik sa tipičnim udjelom dušika od 0,16% može koristiti zaštitni plin s udjelom od 1-1,2% dušika, a super dupleks čelici koji imaju tipičan udio dušika od 0,25% mogu koristiti zaštitne plinove s dodatkom od 2.0-2,5% dušika. [23]

Još jedna mana dodavanja dušika je povećano rasprskavanje kapljica. [19]

4.2.4. Četverokomponentna mješavina Ar/He/CO₂/N₂

Jedna od odličnih mješavina za zavarivanje dupleks čelika bi bila četverokomponentna plinska mješavina Ar/He/CO₂/N₂, gdje, ako se udjeli helija, ugljikovog dioksida i dušika drže u pravilnim granicama, postiže odlična kontrola električnog luka, kvašenje taline, visoki depozit i dobar profil zavara sa odličnim omjerom feritne i austenitne mikrostrukture koja iziskuje odlična mehanička i antikorozivna svojstva. [19]



Slika 9 Ovisnost udjela dušika u plinskoj mješavini s udjelom u zavarenom spoju nakon zavarivanja [19]

4.2.5. Vodik

Dodatak vodika je obično moguć kod austenitnih nehrđajućih čelika jer je gotovo potpuno imun na hladne pukotine (osim u slučajevima iznimnog hladnog oblikovanja). Dodaje se u udjelima od 2% do čak 5% (veći udjeli mogući kod automatiziranih procesa) kako bi se povećala penetracija, omogućio veći depozit ili povećala brzina zavarivanja. Dodatak vodika kod zaštite dupleks nehrđajućih čelika je moguć jer nisu toliko podložni hladnim pukotinama kao npr. ugljični čelici, ali se ipak ne preporučuje. Još postoji i dodatan razlog gdje dodavanjem vodika pri zaštiti dupleks čelika dolazi do njegove apsorpcije u austenitnu fazu, a time direktno smanjuje mogućnost apsorpcije dušika u spomenuti austenit. To rezultira povećanjem udjela feritne faze i time se uvelike smanjuju antikorozivna i mehanička svojstva. [19], [22]

5. NAVARIVANJE DUPLEKS ČELIKA

Brojne kompanije nastoje smanjiti troškove koje iziskuju korištenja skupih nehrđajućih čelika. Jedan od takvih primjera je izrada tlačnih nehrđajućih spremnika. Obično se izrađuju od nehrđajućeg čelika te zavaruje prikladnim dodatnim materijalom od nehrđajućeg čelika. Međutim, određeni spremnici zahtijevaju vrlo debele stijenke, a tada cijena izrade skače strmovito. Za takve slučajeve postoji vrlo ekonomično i prikladno rješenje, navarivanje (oblaganje) nehrđajućeg čelika na osnovni i puno jeftiniji, primjerice običan S355 konstrukcijski čelik. [24]

5.1. Postupci navarivanja dupleks čelika

Postupci zavarivanja kojima se obično provodi takvo navarivanje su: [25]

- MIG zavarivanje (*eng.* Metal inert gas – MIG)
- zavarivanje pod praškom - EPP (*eng.* Submerged Arc Welding - SAW)
- ručno elektrolučno zavarivanje - REL (*eng.* Shielded metal arc welding – SMAW, Manual metal arc welding - MMA)
- zavarivanje praškom punjenom žicom (*eng.* Flux cored arc welding – FCAW)
- zavarivanje električnom troskom (*eng.* Electroslag welding – ESW)
- plinsko zavarivanje (*eng.* Oxy-fuel welding – OAW)
- eksplozijsko zavarivanje (*eng.* Explosion welding - EXW)

Jedna od kompanija koja se bavi isključivo oblaganjem tlačnih spremnika, Didion Vessel, koristi primarno postupak zavarivanja električnom troskom (ESW), međutim ukoliko su manji promjeri spremnika onda se koriste postupci kao što su MAG, EPP i ostali nabrojani postupci, ovisno o konkretnom problemu.[24]

Primjer postupka navarivanja nehrđajućeg čelika na običan konstrukcijski čelik prikazan je na **Error! Reference source not found..**

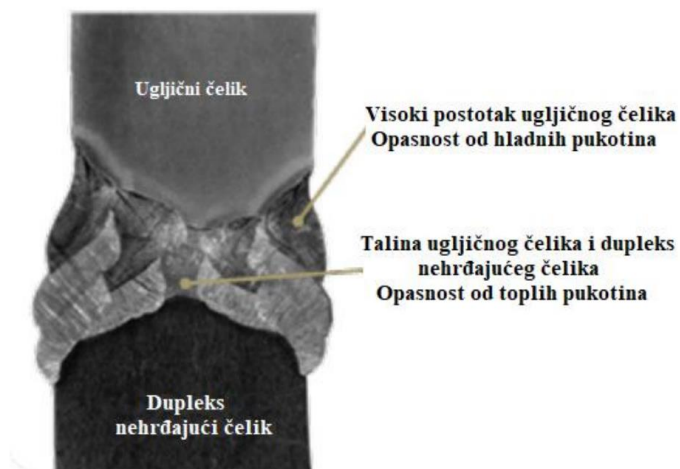
U ovome radu je fokus na MIG postupak navarivanja, koji ima brojne prednosti za ovu primjenu od kojih su neke visoka pouzdanost, visoka produktivnost, mogućnost automatizacije, jednostavnost korištenja i brojni drugi.



Slika 10 Oblaganje konstrukcijskog čelika nehrđajućim čelikom [24]

[24]

Pri navarivanju raznorodnih čelika posebna napomena treba biti na stupnju miješanja osnovnog i dodatnog materijala. Prilikom većeg miješanja dupleks čelika s ugljičnim dolazi do stvaranja krhke strukture i toplih pukotina. Iz slike 11 se može zaključiti kako u zoni gdje prevladava ugljični čelik postoji opasnost od hladnih pukotina, a u zoni gdje prevladava dupleks čelik postoji opasnost od toplih pukotina. [15]



Slika 11 Primjer zavarivanja dupleks i ugljičnog čelika [15]

5.2. Osnovni parametri navarivanja MIG postupkom

Kako bi se postupak oblaganja nehrđajućim čelikom pravilno izveo, potrebno je pripaziti na pravilan odabir parametara zavarivanja koji izravno utječu na mehanička i antikorozivna svojstva. Kvalitetna mehanička i antikorozivna svojstva će se jedino postići ako se postigne optimalan profil zavara.

Unutar znanstvenog rada [26] postavljen je matematički model koji može predvidjeti izgled profila zavara s obzirom na određene parametre. Odabrani ulazni parametri bili brzina dodavanja žice (v_z), brzina zavarivanja (v), slobodni kraj žice (N) i nagib pištolja zavarivanja (T), a izlazni parametri koji su se pratili su bili širina zavara (W), dubina penetracije (P), visina nadvišenja zavara (R), faktor oblika nadvišenja zavara ($RFF = W/R$) i faktor oblika penetracije ($PSF = W/P$). Postupak se sastoji od niza ispitivanja gdje jedan od ulaznih parametara varira, a ostali ostaju isti te je rezultat zabilježen u obliku matrice. Na temelju statističkih rezultata stvara se matematički model, a primjer jedne takve formule, u ovom slučaju za širinu zavara je [26]

$$W = 15,52 + 0,767v_z - 0,300v + 0,698T + 0,748N - 0,315v_z^2 - 0,671 T^2 + 0,231TN \quad (3)$$

gdje je:

W – širina zavara, mm

v_z – brzina dodavanja žice, m/min

v – brzina zavarivanja, mm/min

T – nagib pištolja za zavarivanje, °

N – slobodni kraj žice, mm

Drugi primjer odabranih ulaznih parametara dan je u [24], a to su struja zavarivanja I (koja direktno ovisi o brzini dodavanja žice, točna relacija u tome slučaju je:

$$v_z = - 6,2 + 0,0860I \quad (4)$$

gdje je:

I - struja zavarivanja, A

v_z - brzina dodavanja žice, m/min.

Slično kao u [26], izlazni parametri su bili širina zavara (W), penetracija (P) i nadvišenje zavara (R). Uz pomoć digitalnog planimetra izračunate su površine rastaljenog osnovnog materijala (A_p) i površine nadvišenja zavara pa je na temelju toga izračunat stupanj miješanja materijala (γ). Također su izračunati koeficijenti oblika zavara (koeficijent vanjskog oblika $\varphi_e = W/R$ i koeficijent unutarnjeg oblika $\varphi_a = W/P$). [27]

Najpoželjnija svojstva navarivanja nehrđajućeg čelika bi sadržavala minimalnu penetraciju, minimalan postotak miješanja osnovnog i dodatnog materijala te pravilan oblik nadvišenja zavara. Kombinaciju takvih parametara iz postojećeg matematičkog modela koji opisuje ovisnost navedenih parametara, moguće je postići metodom odzivnih površina (*eng.* Response surface methodology - RSM), korištenjem metode višeciljne optimizacije parametara, o čemu više riječi ima u [27].

6. AC MIG POSTUPAK

AC MIG postupak se također naziva VP MIG postupak odnosno MIG s varijabilnim polaritetom (*eng.* VP GMAW). To predstavlja točniji naziv jer se opisuju valni oblici u kojem omjeri polariteta mogu varirati. Izraz AC se obično koristi kada se opisuju sinusoidni valovi, iako se može smatrati da se ipak opisuje struju koja varira između pozitivnog i negativnog polariteta. [6]

6.1. Razvoj i princip AC MIG postupka

AC MIG postupak kombinira karakteristike kada se elektroda nalazi na pozitivnom polu (konvencionalni MIG) te negativnom polu u kojem se mijenjaju svojstva luka. Svojstva i pojave kada se elektroda nalazi na pozitivnom i negativnom polu su sljedeća: [6]

- pozitivan pol elektrode (*eng.* direct current electrode positive - DCEP)
 - elektroni se kreću od osnovnog materijala do elektrode (žice)
 - snižena efikasnost taljenja elektrode
 - većina topline je koncentrirana na osnovni materijal.
- negativan pol elektrode (*eng.* direct current electrode negative - DCEN)
 - elektronski tok se kreće od elektrode do osnovnog materijala
 - visoka efikasnost taljenja elektrode
 - većina topline je koncentrirana na elektrodi.

Ovaj proces je stekao zasluženu popularnost tek vrlo nedavno, zbog brojnih ograničenja starijih uređaja za zavarivanje, koje moderna tehnologija sadržana u današnjim aparatima za zavarivanje rješava bez problema. Problem leži u nestabilnosti luka kada je polaritet struje negativan koji je limitaran na prijelazni luk kod MIG postupka zavarivanja. Postupci zavarivanja koje koriste prašak, npr. zavarivanje praškom punjenom žicom ili EPP puno su prije i jednostavnije rješavali problem nestabilnosti luka u negativnom polaritetu tako što su se dodavali stabilizirajući elementi u praškastom obliku. Međutim takvo slično rješenje, dodavajući legirne stabilizirajuće elemente u punu žicu bilo je jako skupo i neefikasno jer je riječ o rijetkim materijalima i lužinama. Korištenjem plinske mješavine Ar i O₂ i/ili CO₂ problem nestabilnog luka se djelomično ublažio no to je vrijedilo samo pri visokim strujama. Tijekom promjene polariteta struja prelazi u nulu pa opet raste te nastaje problem u ponovnom paljenju električnog luka. Ovaj problem se nastojao riješiti korištenjem visokog napona, ali to

predstavlja veliku opasnost od strujnog udara jer su vrijednosti napona znale prekoračiti 400V.[6]

S napretkom tehnologije ovaj problem je vrlo jednostavno riješen. Korištenjem invertera omogućeno je jednostavno i jeftino stvaranje izvora struje koji mogu generirati gotovo bilo kakve valne oblike struje. Tako je problem ponovnog paljenja luka jednostavno riješen korištenjem pravokutnog valnog oblika struje koji smanjuje vrijeme u kojem struja ima iznose blizu nuli i više nisu potrebni jako visoki i opasni naponi.[6]

Uz već navedene probleme, ovaj postupak sadrži zahtjevan odabir parametara kako bi luk bio stabilan. To je još jedan od razloga tako kasne popularnosti. No, benefiti koje AC MIG nudi su ogromni: veći depozit uz manji unos topline, kontrola nad geometrijom oblika profila zavara, kontrola penetracije te niska deformacija čine ovaj proces nadmoćnijim nad konvencionalnim MIG postupkom zavarivanja, posebice u industrijama koje koriste materijale koji su osjetljivi na unos topline, kao što su to visokočvrsti čelici i nehrđajući čelici.[6]

6.2. Parametri AC MIG postupka

Temelj za odabir parametara koji rezultiraju stabilnim lukom tijekom cijelog procesa, na kojem se zasniva članak [6], je utvrđivanje stope taljenja elektrode kada se ona nalazi na negativnom i na pozitivnom polu. Na negativnom polu ona je veća nego na pozitivnom polu te se zbog toga pojavljuje varijacija u duljini luka. Kako bi se varijacija duljine luka svela na nulu, jednadžbe parametara koji utječu na stopu taljenja žice se mogu utvrditi tako da se stope taljenja za negativni pol i pozitivni izjednače. Stopa taljenja se utvrđuje eksperimentalno tako što se duljina luka drži konstantnom mijenjajući brzinu dobave žice, a formula za to je sljedeća:[6]

$$v_z = \alpha I_m + \beta L I_{ef}^2 \quad (5)$$

gdje je:

v_z – brzina dodavanja žice, m/s

I_m - srednja jakost struje, A

I_{ef} - efektivna jakost struje, A.

Navedene struje se bilježe tijekom eksperimenta. Na kraju se nelinearnom regresijom dobivaju vrijednosti konstanti α i β .

Glavne varijable su izgled dinamičke karakteristike (kojoj obično na izvorima za zavarivanje ne postoji direktan pristup) i promjena trajanja EN omjera, često izražena u %. [6]

6.2.1. EN omjer i njegov utjecaj na geometriju zavara

Elektronegativni (EN) period predstavlja period u kojem je elektroda na minus polu (-), a radni komad na plus polu (+) u AC ciklusu. Elektropozitivni period (EP) predstavlja period u kojem je elektroda na pozitivnom polu (+), a radni komad na negativnom (-). AC ciklus se sastoji od EN i EP perioda. EN omjer predstavlja udio EN perioda u AC ciklusu. Formula za računanje EN omjera glasi;[28]

$$\text{EN omjer} = \frac{A_{\text{en}}}{A_{\text{ep}} + A_{\text{en}}} \cdot 100\% \quad (6)$$

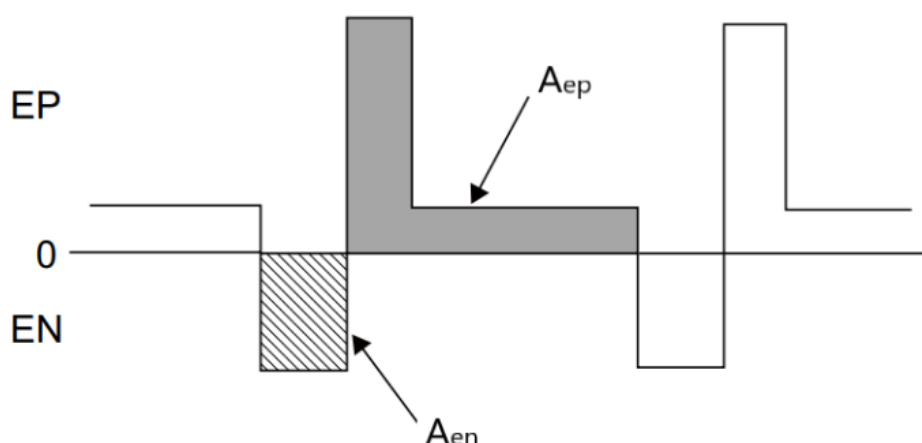
gdje su:

EN omjer – omjer EN perioda u AC ciklusu, %

A_{en} – površina elektronegativnog dijela AC ciklusa

A_{ep} - površina elektropozitivnog dijela AC ciklusa.

Ulazni podaci za formulu su shematski prikazani na slici 12.

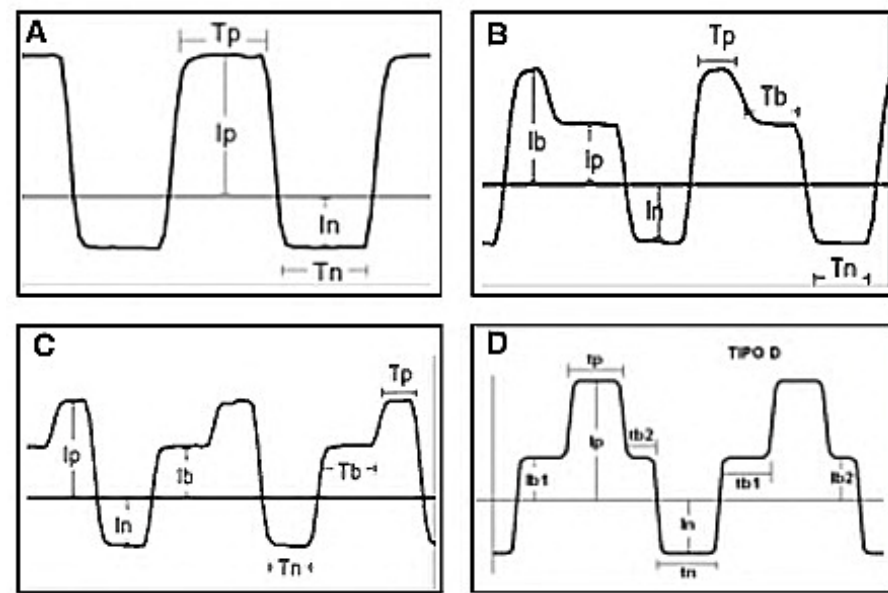


Slika 12 Shematski prikaz ulaznih podataka za računanje EN omjera [28]

To znači da ukoliko je omjer 50%, odnos površina A_{en} i A_{ep} je jednak. Za postotke manje od 50% prevladava A_{ep} , što znači da je EN period kraći od EP perioda, a za veće od 50% prevladava A_{en} , što znači da je EN period duži od EP perioda.

6.2.2. Dinamička karakteristika AC MIG postupka zavarivanja i utjecaj EN omjera na geometriju zavara

U [6] su utvrđeni oblici valova, slika 13, koji su ispitani za različite EN omjere, izražena u postocima.



Slika 13 Različiti oblici strujnih valova [6]

Na slici 13 razlikujemo sljedeće oznake:

I_p – vršna struja pozitivnog polariteta

I_b – bazna struja pozitivnog polariteta

I_n – struja negativnog polariteta

T_p – period trajanja vršne struje pozitivnog polariteta

T_b – period trajanja bazne struje pozitivnog polariteta

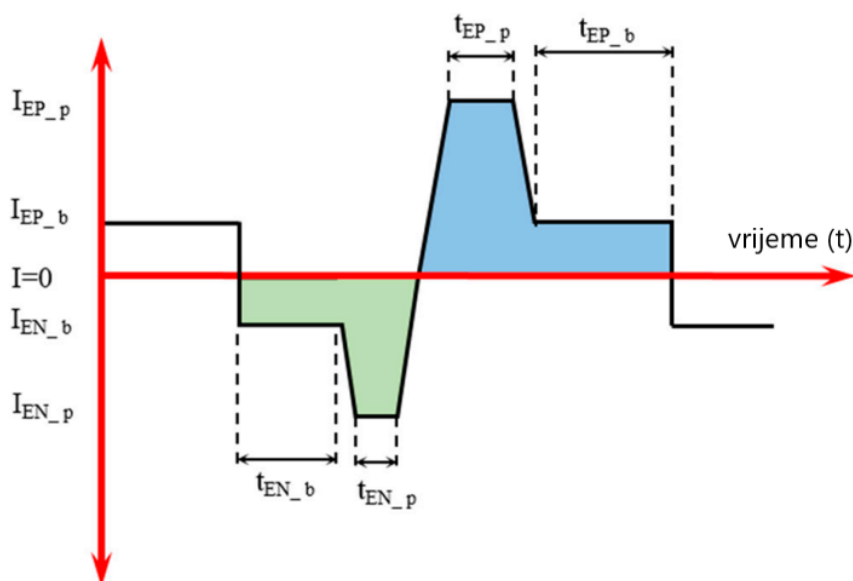
T_n – period trajanja struje negativnog polariteta

Dokazano je da je moguće ostvariti odvajanje samo jedne kapljice po impulsu (*eng.* One droplet per pulse – ODPP), ali samo za valne oblike B-D. Valni oblik A ne sadrži baznu struju (I_b) na pozitivnom polaritetu koja ublažava polarnu inverziju i zbog toga rezultira nestabilnim lukom i velikim rasprskavanjem za sve EN omjere. Valni oblik B je također bio nestabilniji među drugima, jer je trajanje i pozicija bazne struje (I_b) na pozitivnom polaritetu postavljena tako da se kapljica odvaja netom nakon vršne struje (I_p) pozitivnog polariteta i ne uspije doći do bazne struje (I_b) koja bi ublažila odvajanje kapljice. C oblik je stabilniji od A i B jer se kapljica odvaja u trenutku polarne inverzije gdje dolazi do pojave pri kojoj se smanjuje brzina kapljice uslijed

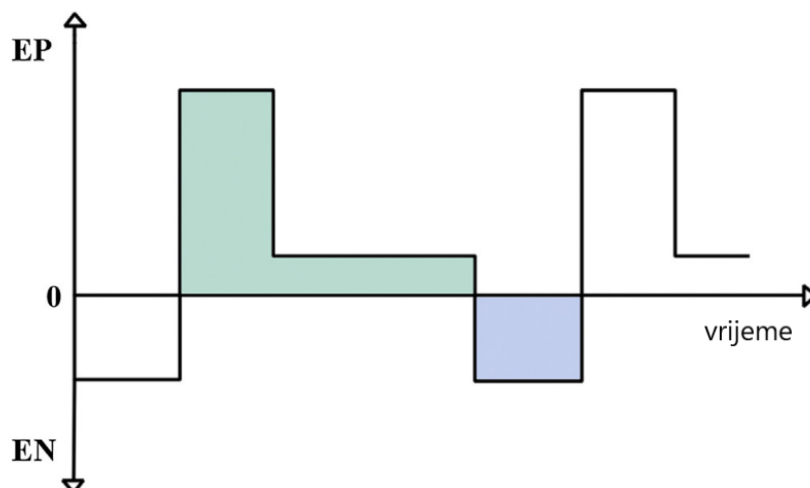
odbojnih sila koje se javljaju pri promjeni polariteta te se time znatno ublaži njeno odvajanje. Međutim valni oblik D je pokazao najbolje rezultate, s baznim strujama prije i poslije pozitivne vršne struje. [6]

Jedna od glavnih primjena AC MIG postupka je zavarivanje aluminija, a posebice tankih aluminijskih ploča. Razloga iza toga je što AC MIG, osim što ima sposobnost katodnog čišćenja aluminijevog oksida, pri nižim strujama i većim EN omjerima smanjuje unos topline na osnovni materijal, sprječava njegovo pregorijevanje te ima odličnu sposobnost premošćivanja razmaka između ploča. Sva navedena istraživanja su pokazala da povišenjem EN omjera penetracija postaje manja. Međutim, počela su se provoditi istraživanja i za čelične ploče. U početku su se bavili istraživanjima na tankim limovima, međutim, otkriveno je kako uz poboljšanu dinamičku karakteristiku), pri većim strujama, povećanjem EN omjera penetracija raste, slika 14. To je dalo veliku mogućnost zavarivanju čeličnih ploča velikih debljina. [7]

Konvencionalna dinamička karakteristika prikazana je na slici 15 i jednaka je onoj na slici 12 koja ujedno predstavlja dinamičku karakteristiku OTC Welbee W400 stroja za zavarivanje koji je upotrijebljen u eksperimentalnom dijelu ovoga rada.

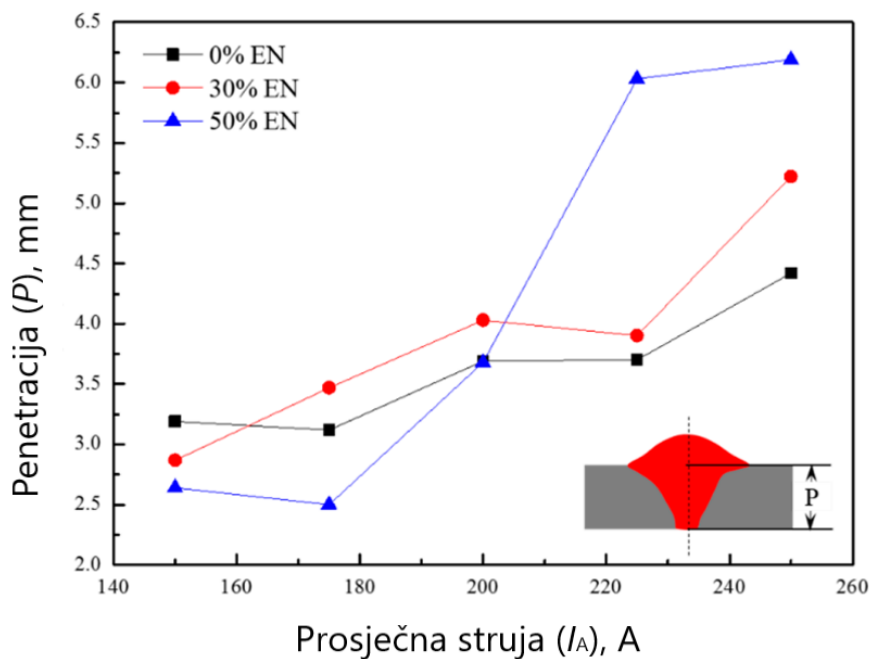


Slika 14 Povoljšana dinamička karakteristika za AC MIG zavarivanje [7]

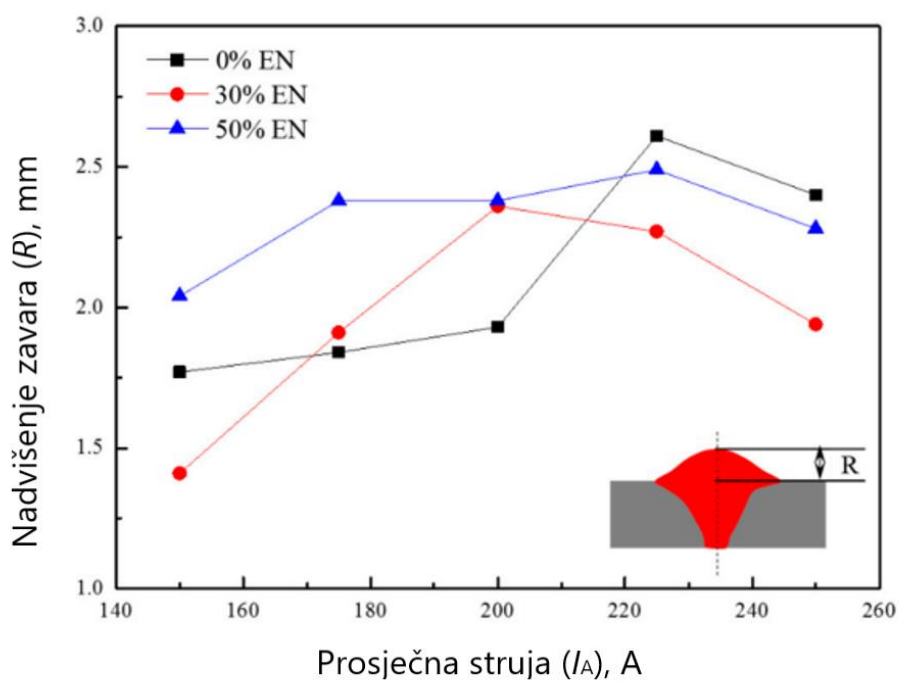


Slika 15 Konvencionalna dinamička karakteristika AC MIG postupka [29]

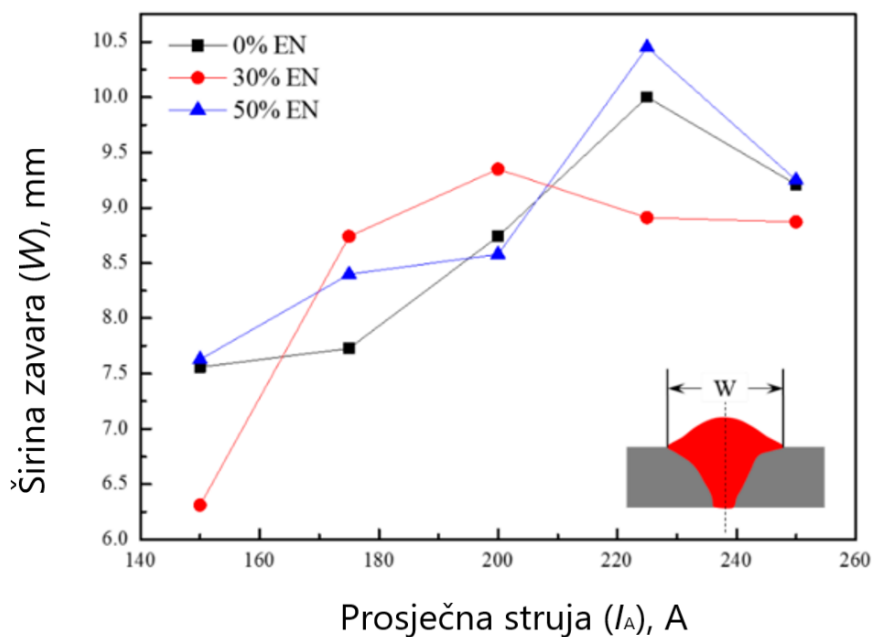
U članku [7] je dodatno provedeno ispitivanje na 5mm debelim čeličnim pločama, na sučeljenom spoju bez pripreme, varirajući EN polaritet u iznosima 0%, 30% i 50%, a jakost struje od 150A – 250 A, s poboljšanom dinamičkom karakteristikom. Dokazano je kako na većim iznosima jakosti struje i većem EN omjeru, penetracija raste. Najveća penetracija postignuta je upravo s 250A i 50% EN omjeru. Osim toga, vlačna čvrstoća se poboljšala povećanjem iznosa struje, a mikro tvrdoća se nije značajno mijenjala pri različitim EN omjerima. Suprotno tome, dokazano je kako pri nižim jakostima struje, penetracija se snižavala s porastom EN omjera. Penetracija je manja za EN omjer od 50% u usporedbi s EN omjerom od 30% i 0%. Navedeni zaključci mogu se odlično vidjeti na slici 16. Osim toga, vrijednosti nadvišenja i širine zavara u ovisnosti o jakosti struje i EN omjerima se također mogu vidjeti na slici 17 i 18. Izgled presjeka zavara se može vidjeti na slici 19.



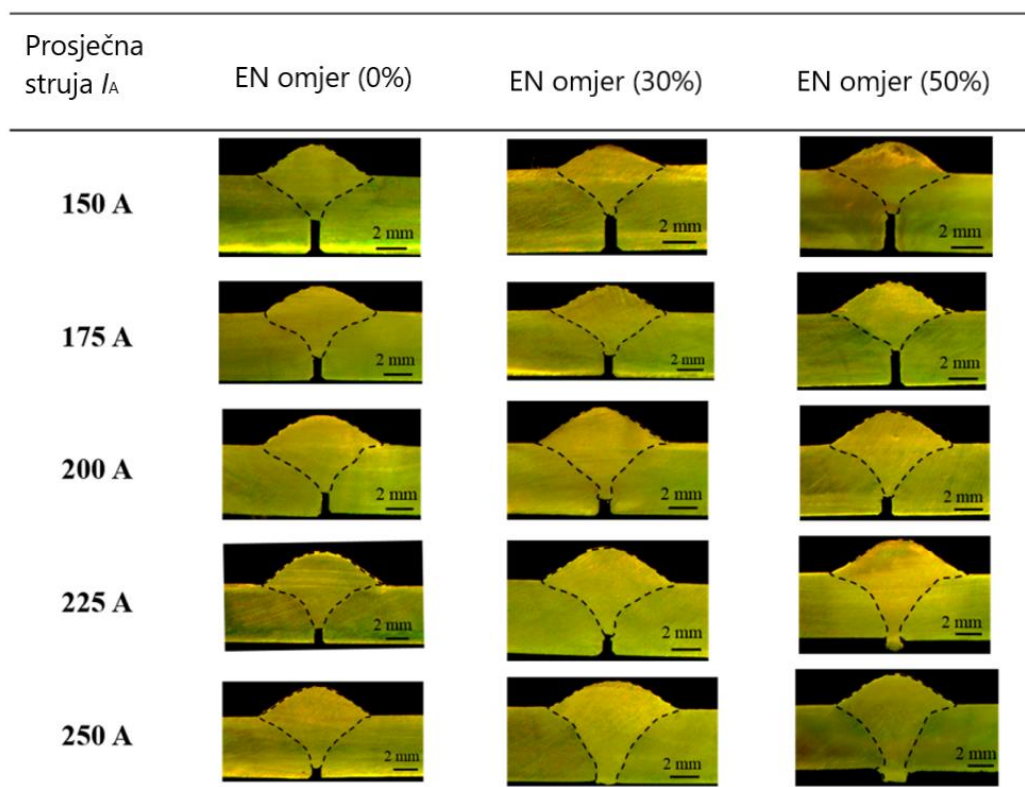
Slika 16 Ovisnost penetracije o struji i EN omjeru [7]



Slika 17 Ovisnost nadvišenja zavara o struji i EN omjeru [7]



Slika 18 Ovisnost širine zavora o struji i EN omjeru [7]



Slika 19 Presjeci zavora u ovisnosti o jakosti struje I i EN omjeru [7]

U [6] su odabrani EN omjeri iznosa 30%, 50% i 70%. EN omjeri 30% i 50% su rezultirali stabilnim lukom (valni oblici C i D), dok je električni luk pri EN omjeru od 70% rezultirao velikim rasprskavanjem za sve oblike valova koji su se ispitivali u radu. Čak se dio kapljica akumulirao na mlaznici pištolja za zavarivanje koji je sprječavao prolazak zaštitnog plina što je rezultiralo još većom nestabilnošću. Zaključeno da za predugo držanje na EN polaritetu uvijek dolazi do velikih nestabilnosti bez obzira na oblik vala struje [6]. Drugi primjeri odabira ispitivanih EN vrijednosti su 0%, 30%, 50% [7] te 0%, 20% i 40% [30] koji su rezultirali stabilnim lukom za sve navedene EN omjere. Odabir vrijednosti navedenih EN omjera nije obrazložen, ali se na temelju članaka [6], [7] i [30] uočava trend odabira EN vrijednosti koje ne prelaze 50% kako bi se dobila prihvatljiva stabilnost luka.

7. EKSPERIMENTALNI RAD

Cilj ovoga eksperimentalnog rada je utvrđivanje utjecaja parametara AC MIG postupka navarivanja na makrostrukturu i mikrostrukturu dobivenog navara uz korištenje dvaju različitih plinskih mješavina na bazi argona.

Navarivao se običan konstrukcijski čelik S355JR debljine 10 mm i dimenzija 120x70 mm dodatnim materijalom odnosno žicom dupleksa 2205. Plinovi koji su korišteni su na bazi argona, jedan s dodatkom 2,5% CO₂, a drugi s dodatkom 2,5% N₂ te su dodatno opisani u poglavlju 7.1.3.

Uz zaštitni plin, jedini parametar koji je mijenjan i čiji utjecaj je ispitan je EN omjer polariteta AC MIG zavarivanja. Ostali parametri su držani konstantnim tako što je korišten automatski uređaj za zavarivanje koji je održavao isti nagib pištolja, brzinu zavarivanja i udaljenost sapnice od radnog komada, a na izvoru struje su podešeni stalni parametri jakosti struje, napona električnog luka, dinamičke karakteristike odabirom sinergijskog programa na uređaju te je protok plina također držan konstantnim.

Pomoću makroanalize izračunat je stupanj miješanja i donesen je zaključak na temelju oblika penetracije, a pomoću analize mikrostrukture utvrđen je omjer faza austenita i ferita navara dupleks čelika, pa su na temelju rezultata objašnjena mehanička i antikorozivna svojstva koja obično rezultiraju iz takve mikrostrukture.

7.1. Osnovni, dodatni materijal i zaštitni plin

U ovome poglavlju dani su kemijski sastavi i mehanička svojstva osnovnog i dodatnog materijala koji su korišteni u eksperimentu.

7.1.1. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal korišten je konstrukcijski čelik S355JR od kojeg su izrađeni uzorci debljine 10 mm i dimenzija 120x70 mm. Oznaka „S“ predstavlja konstrukcijski čelik, broj „355“ minimalnu granicu razvlačenja, a „JR“ udarni rad loma od 27 J na +20 °C. Tipični kemijski sastav S355JR čelika za debljine manje od 40 mm prikazan je u tablici 1. Mehanička svojstva prikazana su u tablici 2.

Tablica 1 Kemijski sastav čelika S355JR, za debljine < 40 mm [31]

Kemijski sastav, %	
C	≤ 0,24
Mn	≤ 1,6
P	≤ 0,035
S	≤ 0,55
Cu	≤ 0,55
N	≤ 0,012

Tablica 2 Mehanička svojstva konstrukcijskog čelika S355 za debljine od 3-16 mm [31]

Razred	Granica razvlačenja, MPa	Vlačna čvrstoća, MPa	Udarni rad loma pri 20°C, J
S355JR	355 min	470-630	17

7.1.2. Dodatni materijal

Kao dodatni materijal korištena je elektroda (žica) dupleks nehrđajućeg čelika 2205 (1.4462) - MIG WELD ML 22.9.3 NL, promjera 1,2 mm šarže 271692. Obično se koristi za zavarivanje drugih dupleks nehrđajućih čelika, primjerice 1.4417, 1.4462 i 1.4362. Ima odličnu otpornost na interkristalnu i rupičastu koroziju, posebice u okolini koja sadržava sumporovodik (H₂S) i kloride. [32]

Kemijski sastav je prikazan u tablici 3, a mehanička svojstva u tablici 4.

Tablica 3 Kemijski sastav žice MIG WELD ML 22.9.3 NL [33]

Kemijski sastav, %	
C	≤ 0,020
P	≤ 0,020
Si	0,50
Mn	1,60
S	≤ 0,015
Cr	23,00
Ni	9,00
Mo	3,20
N	0,16

Tablica 4 Mehanička i fizikalna svojstva žice dupleks 2205 nehrđajućeg čelika [33]

Mehanička i fizikalna svojstva (približne vrijednosti) pri 20°	
Granica razvlačenja $R_{p0,2}$, MPa	600 (20°C); 420 (300°C)
Vlačna čvrstoća R_m , MPa	750 (20°C); 600 (300°C)
Istezanje A , %	25 (20°C); 20 (300°C)
Udarni rad loma, J	130 (20°C); 50 (-196°C)
Tvrdoća, HV10	240
Toplinska provodljivost, W/m °C,	16
Toplinsko razvlačenje po °C, od 20°C - 400°C	14,5 x 10 ⁻⁶
Gustoća, g/cm ³	7,9

7.1.3. Zaštitni plin

Zaštitni plinovi koji se koriste u ovome eksperimentu su Inoxline N2 (Ar + 2,5% N₂) i Inoxline C2 (Ar + 2,5% CO₂) proizvođača Messer, a kemijski sastav te grupa prema normi HRN EN ISO 14175:2008 [34] su prikazani u tablici 5.

Tablica 5 Opis i kemijski sastav zaštitnih plinova [35]

Trgovački naziv	Proizvođač	Kemijski sastav, % vol			HRN EN ISO 14175
		Ar	N ₂	CO ₂	
Inoxline N2	Messer GmbH	97,5	2,5	-	N2
Inoxline C2		97,5	-	2,5	M12

7.2. Oprema korištena u eksperimentu

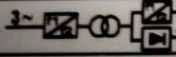

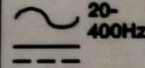





Oprema za zavarivanje korištena u eksperimentu se sastojala od izvora struje, sustava za automatsko zavarivanje te opreme za ispitivanje makrostrukture i mikrostrukture koja se sastojala od uređaja za fino brušenje i poliranje, profesionalnog fotoaparata i invertnog mikroskopa.

7.2.1. Izvor struje

Izvor struje za zavarivanje bio je uređaj Welbee W400 proizvođača OTC, prikazan na slici 20. Specifikacijska pločica prema normi EN 60974-1 prikazana je na slici 21.



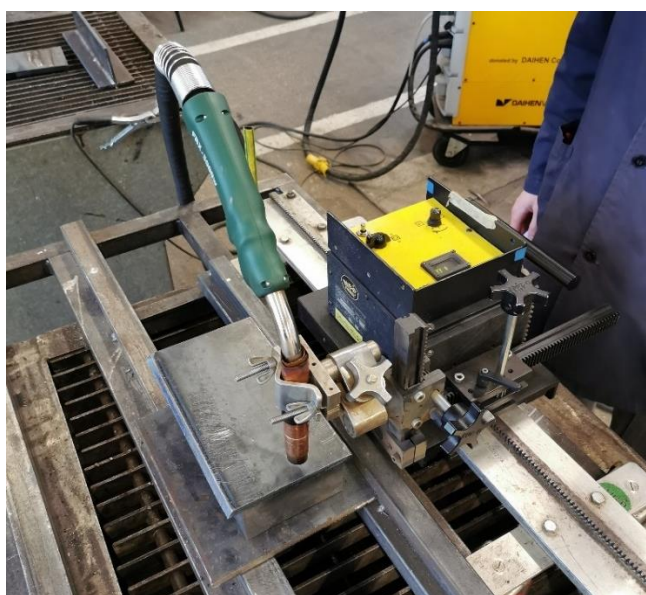
Slika 20 OTC Welbee W400 dual-inverterski izvor struje

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	
		30 A / 15.5 V - 400 A / 34.0 V	
		X	40% 60% 100%
S	U_0 106 V	I_2	400 A 360 A 350 A
		U_2	34.0 V 32.0 V 31.5 V
	$U_1 = 400 V$	$I_{1max} = 30.9 A$	$I_{1eff} = 19.8 A$
3 - 50/60 Hz			
IP23			
			Mass: 86 kg
			<small>NA 808344.00</small>

Slika 21 Specifikacijska pločica stroja OTC Welbee W400

7.2.2. Sustav za automatsko zavarivanje „BUG-O Systems“

Na slici 22 prikazan je automatski sustav za zavarivanje proizvođača „BUG-O“ koji se modularno sastavlja s obzirom na potrebe zavarivanja. Na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Laboratoriju za zavarivanje „BUG-O“ sustav ima mogućnost podešavanja konstantne brzine zavarivanja te nagiba i udaljenosti pištolja za zavarivanje od radnog komada.



Slika 22 BUG-O Systems modularni pogonski sistem za automatizirano zavarivanje

7.2.3. Oprema za ispitivanje makrostrukture i mikrostrukture

Za ispitivanje i analizu makrouzoraka najprije je korišten uređaj za fino brušenje i poliranje Minitec 233, slika 23, a kasnije su fotografije snimljene profesionalni fotoaparatom Cannon 1000D prikazan na slici 24.



Slika 23 Uređaj za fino brušenje i poliranje uzoraka PRESI Minitec 233



Slika 24 Profesionalni fotoaparatom Cannon 1000D

Za analizu mikrostrukture korišten je invertni mikroskop Olympus GX5, prikazan na slici 25.



Slika 25 Invertni mikroskop Olympus GX51

7.3. Postupak ispitivanja

Prije samog provođenja eksperimenta provedena je izrada plana eksperimenta. Plan se sastojao od zavarivanja uzoraka s različitim EN omjerima i dvije različite plinske mješavine. Prema mogućim postavkama uređaja za zavarivanje OTC W400, postavka EN omjera se mogla podešavati u rasponu od -50 do +50. Stoga su odlučene uzete EN vrijednosti u inkrementima od 25 što je rezultiralo zavarivanju po 5 uzoraka za svaku plinsku mješavinu, što je u konačnici rezultiralo s 10 različitih uzoraka. Plan eksperimenta prikazan je u tablici 6.

Tablica 6 Plan eksperimenta

Oznaka uzorka	Plinska mješavina	EN omjer
6	Ar + 2,5% N ₂	-50
7		-25
8		0
12		25
11		50
2	Ar + 2,5% CO ₂	-50
3		-25
1		0
4		25
5		50

Na uređaju OTC W400, promjena postavke EN omjera za „1“ predstavlja promjenu od oko 1%. Iznos standardne vrijednosti (postavka „0“) te minimalne (-50) i maksimalne (+50) vrijednosti ovisi o procesu i struji zavarivanja. Međutim, generalno vrijedi da povećanjem postavke EN omjera duljina trajanja elektronegativnog pola raste, odnosno EN omjer raste. [28]

U ovome eksperimentu točna relacija postavke EN omjera na OTC W400 u odnosu na stvarni EN omjer u % nije određena. To je moguće točno odrediti pomoću očitavanja s osciloskopa što premašuje doseg ovoga rada.

Nakon određenog plana zavarivanja, slijedila je priprema uzoraka. Uzorci su pripremljeni na način da se od ploče čelika S355JR debljine 10 mm na tračnoj pili izrezalo 10 uzoraka dimenzija 120x70 mm, nakon čega su od sredstva za hlađenje, ispiranje i podmazivanje (SHIP) očišćeni i odmašćeni alkoholom, a hrđa s površine je uklonjena metalnom četkom.

Nakon pripreme uzoraka slijedilo je postavljanje pištolja za zavarivanje na automatski sustav zavarivanja BUG-O te podešavanje ostalih parametara zavarivanja što je opisano u sljedećem poglavlju.

7.4. Parametri zavarivanja

Nakon pravilne pripreme uzoraka i radnog prostora postavljeni su parametri zavarivanja. Parametri zavarivanja koji su držani konstantnim za zavarivanje svih 10 uzoraka prikazani su u tablici 7. Navedeni parametri su fiksni (konstantni) kako bi se mogao ispitati utjecaj EN omjera i vrste zaštitnog plina na makro i mikrostrukturu zavara. EN omjer i vrste zaštitnog plina koje su mijenjani su opisani u već spomenutom planu eksperimenta (tablica 6).

Tablica 7 Fiksni parametri zavarivanja

Parametar	Oznaka	
Struja	I	160 A
Protok plina	Q	18 L/min
Napon	U	25 V
Brzina zavarivanja	v	25 cm/min
Nagib pištolja	/	90°
Slobodni kraj žice	N	15 mm
Brzina dodavanja žice	v_z	8,3 m/min
Dodatni materijal	/	DUPLEX 2205
Osnovni materijal	/	S355JR

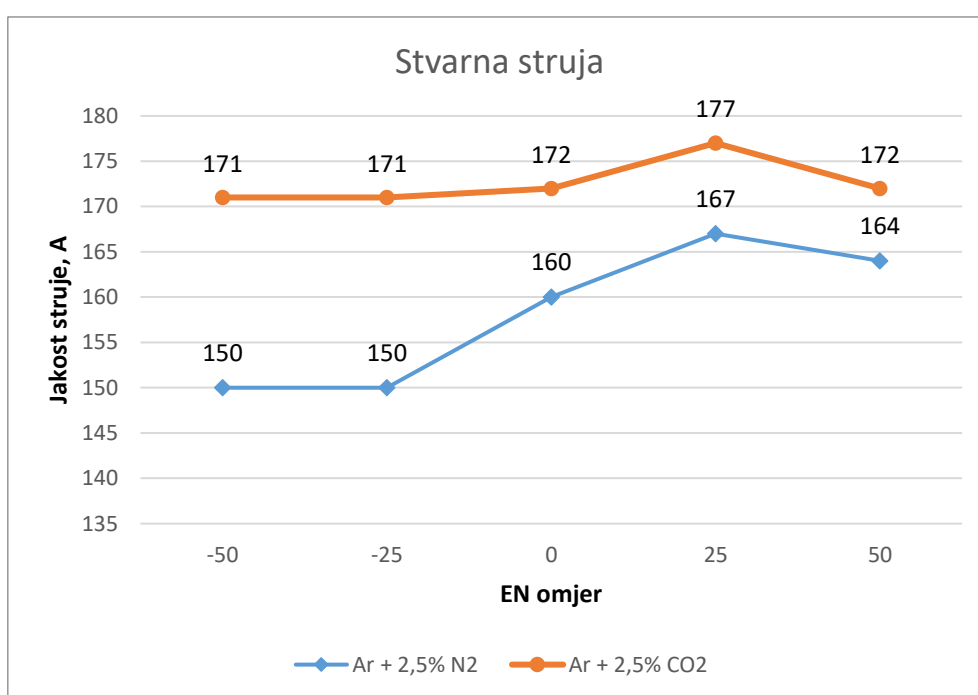
Osim navedenih fiksnih parametara, na stroju za zavarivanje su za svih 10 uzoraka držane iste postavke sinergijskog programa, prikazane na slici 26.



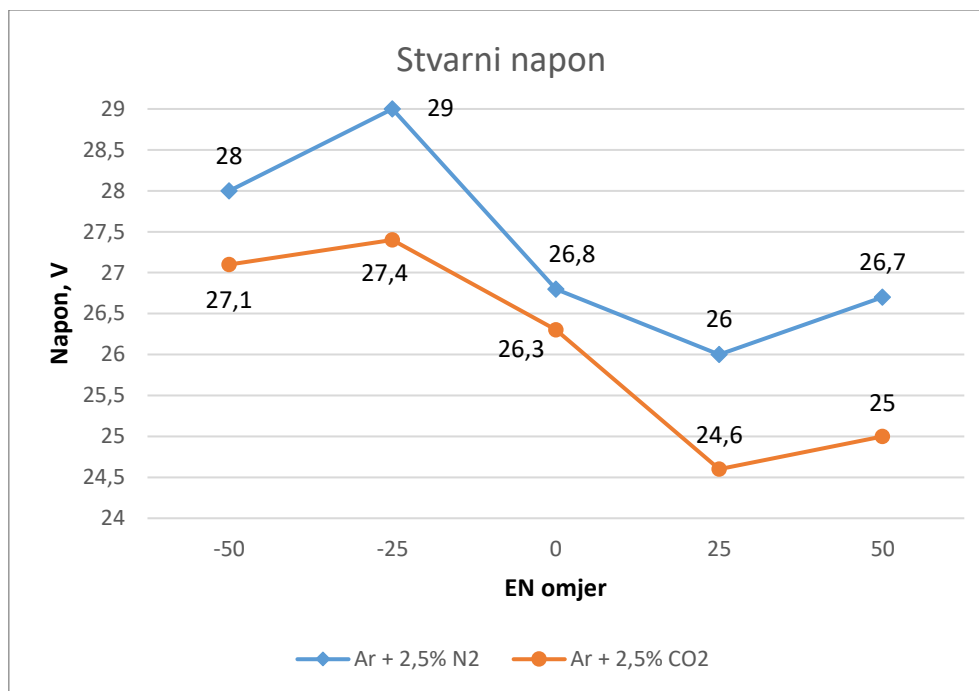
Slika 26 Podešene postavke programa na izvoru struje

Međutim, tijekom zavarivanja određeni parametri su se mijenjali ovisno o postavki EN omjera i vrsti zaštitnog plina. Ti parametri su bili jakost struje, napon električnog luka, ali i brzina dodavanja žice. Stvarni (prosječni) parametri jakosti struje u ovisnosti o EN omjeru i zaštitnom plinu prikazani su na slici 27, a stvarni prosječni napon u ovisnosti o EN omjeru na slici 28.

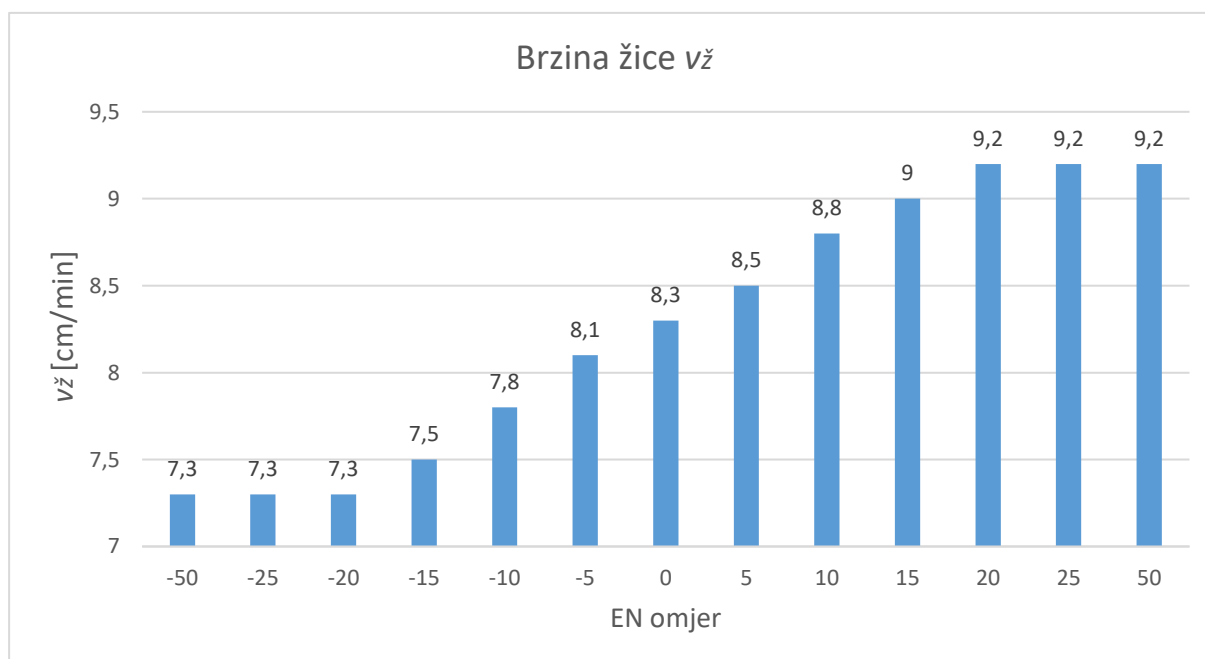
Ovisnost promjene brzine dodavanja žice izmjerena je u ovisnosti o promjeni EN omjera. Zapisane su vrijednosti brzine dodavanja žice za EN omjere u inkrementima od 5 jedinica kako bi se dobio nešto precizniji uvid u taj odnos. Ovisnost brzine dodavanja žice o EN omjeru prikazano je na slici 29.



Slika 27 Ovisnost jakosti stvarne prosječne struje o EN omjeru i vrsti zaštitnog plina



Slika 28 Ovisnost stvarnog prosječnog napona o EN omjeru i vrsti zaštitnog plina



Slika 29 Ovisnost brzine dodavanja žice o EN omjeru

Iz slike 27 se može jasno vidjeti kako stvarni iznos struje raste s porastom postavke EN omjera. Ovim putem se stopa taljenja nastoji izjednačiti, a za to je pri većim EN omjerima potreban nešto veći iznos prosječne struje. Tim putem se varijacija napona električnog luka u periodu

pozitivnog u odnosu na negativni svodi na nulu. Napon tada automatski pada s porastom struje što je rezultat CV karakteristike AC MIG izvora struje. Brzina žice znatno raste s porastom EN omjera jer je stopa taljenja veća zbog duljeg trajanja negativnog dijela polariteta koji koncentrira veći iznos topline na elektrodu, ali i zbog nešto veće prosječne struje pri većim EN omjerima.

Isto tako se iz navedenih grafova može vidjeti utjecaj plinske mješavine na napon i struju. Potreban je veći napon pri zavarivanju s Ar + N₂ plinskom mješavinom. To je iz razloga što N₂ posjeduje veću termalnu vodljivost od CO₂ (27,7 naspram 18,4 mW/mK) i stoga je potreban veći napon kako bi se održao električni luk. [36], [37]

7.5. Unos topline, temperatura predgrijavanja i naknadna toplinska obrada

U zavarivanju raznorodnih čelika prilikom odabira unosa topline, predgrijavanja i naknadne toplinske obrade prednost se daje dupleks nehrđajućem čeliku nad običnim konstrukcijskim čelikom jer je puno važnije dobiti kvalitetna svojstva navarenog dupleks čelika. Osim toga, običan konstrukcijski čelik ne posjeduje gotovo nikakve zahtjeve, dok je duplex nehrđajući čelik puno osjetljiviji te odabir krivih parametara, pripreme i obrade nakon zavarivanja može biti iznimno štetno i rezultirati greškama, koroziji ili čak havariji.

Stoga je za dupleks nehrđajuće čelike, kao što je opisano u uvodnom dijelu ovoga rada, potrebno pripaziti na unos topline i međuprolaznu temperaturu. Predgrijavanje nehrđajućih čelika nije dozvoljeno i degradira čelik, kao i naknadna toplinska obrada.

Unos topline za dupleks 2205 mora iznositi između 0,5 kJ/mm i 2,5 kJ/mm s temperaturom međuprolaza manjom od 250°C. U ovome radu broj navarenih prolaza je bio samo jedan stoga se na temperaturu međuprolaza nije moralo paziti. Međutim, na unos topline se moralo pripaziti i to pravilnim odabirom parametara. Generalno se unos topline računa prema normi HRN EN 1011-1:2009, prema formuli [18]:

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I}{v} \cdot 10^{-3} \quad (7)$$

gdje je

Q – unos topline, kJ/mm

k – koeficijent iskoristivosti električnog luka postupka zavarivanja (za postupak 131 što predstavlja MIG postupak zavarivanja, $k = 0,8$)

U – napon zavarivanja, V

I - struja zavarivanja, A

v – brzina zavarivanja, mm/s.

Za fiksne parametre struje u iznosu od 160 A, napona od 25 V, brzine zavarivanja 25 cm/min i koeficijenta iskoristivosti električnog luka 0,8, unos topline iznosi 0,768 kJ/mm.

Međutim, pošto je riječ o modificiranom postupku sa smanjenim unosom topline, ovo predstavlja samo grubi izračun. Moguće je računati unos topline na drugačije načine, a jedan moderniji pristup je računanjem energije luka.

Ovdje je unos topline blizu donje granice te je primjenom modificiranog AC MIG postupka taj unos još više smanjen, stoga je posebno potrebno obratiti pažnju na udio ferita u mikrostrukturi jer uslijed prebrzog hlađenja smanjenim unosom topline njegov udio raste.

7.6. Rezultati i analiza ispitivanja

U ovome poglavlju će detaljno biti analizirani i objašnjeni rezultati analize rasprskavanja kapljica, makrostrukture, mikrostrukture i stupnja miješanja.

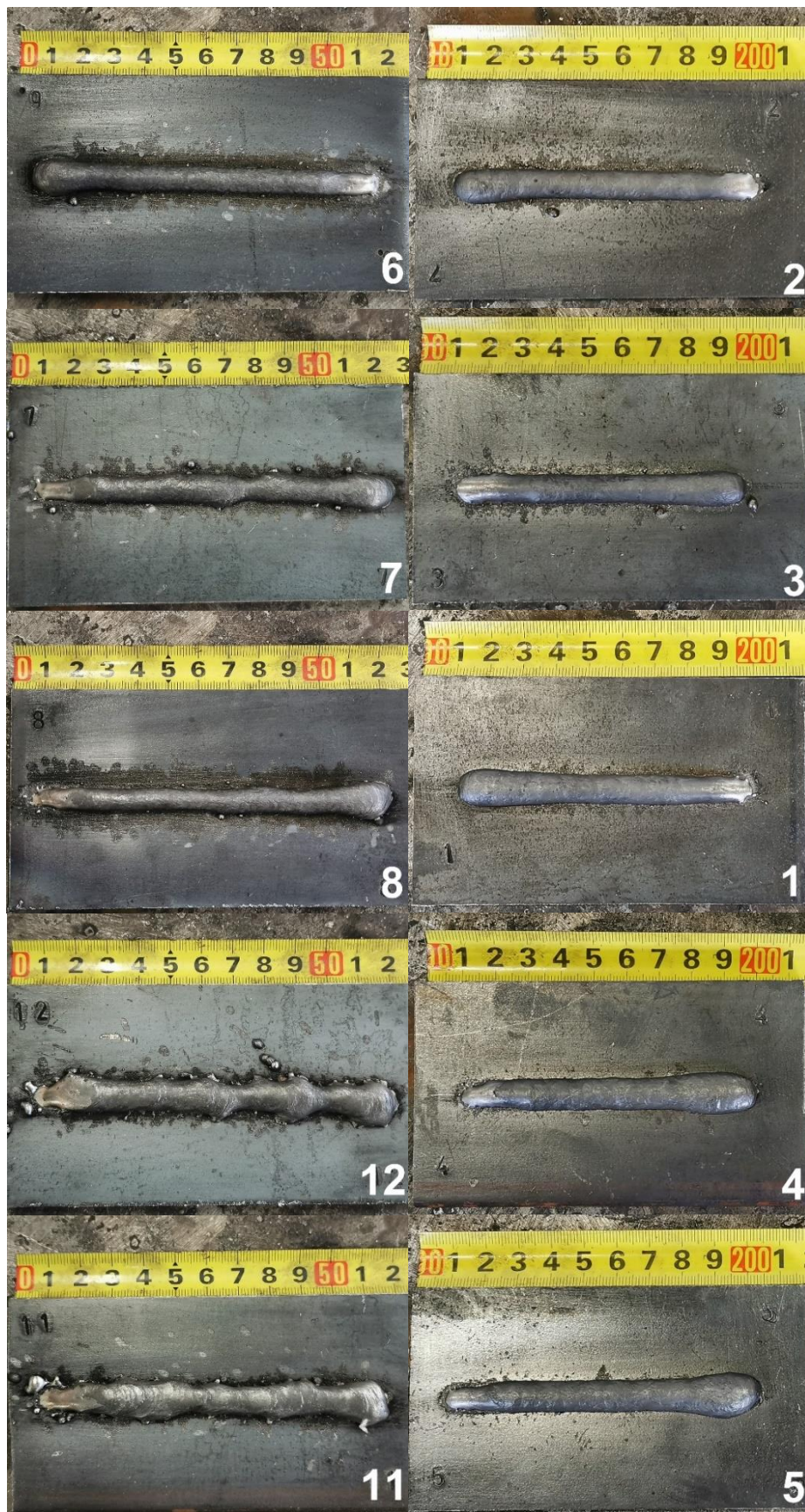
7.6.1. Analiza rasprskavanja kapljica i stabilnosti luka tijekom zavarivanja

Na slici 30 su prikazani rezultati navarivanja nakon čišćenja metalnom četkom i odmašćivanja alkoholom.

Uzorci na lijevoj strani su zavarivani pod zaštitnim plinom Ar + 2,5% N₂ te je evidentno povećano rasprskavanje koje je bilo zapaženo i tijekom zavarivanja zbog veće nestabilnosti električnog luka. Osim toga, za navedene uzorke zavarene pod zaštitnim plinom Ar + 2,5% N₂, može se jasno vidjeti kako na uzorcima s većim vrijednostima EN omjera, +25 i +50, što predstavlja duže trajanje EN polariteta, rezultira većom nestabilnosti električnog luka, a time i većim rasprskavanjem i nepravilnim izgledom navara. Ovdje najpravičniji i s najmanje rasprskavanjem ima uzorak 6 koji je zavaren s EN omjerom od -50.

Uzorci zavareni pod zaštitnim plinom Ar + 2,5% CO₂ imaju puno manje raspršenih kapljica te su pravilnijeg oblika. Čak i na uzorcima s postavkom EN omjera +25 i +50 uzorci izgledaju jednako dobro kao i s kraćim trajanjem EN polariteta. U usporedbi s uzorcima zavarenih pod zaštitnim plinom s dodatkom dušika jedino može konkurirati uzorak 6 (EN = -50), gledajući izgled zavara i rasprskavanje kapljica.

Za detaljniju analizu potrebno je analizirati makro i mikrostrukturu.



Slika 30 Rezultati navarivanja uzoraka

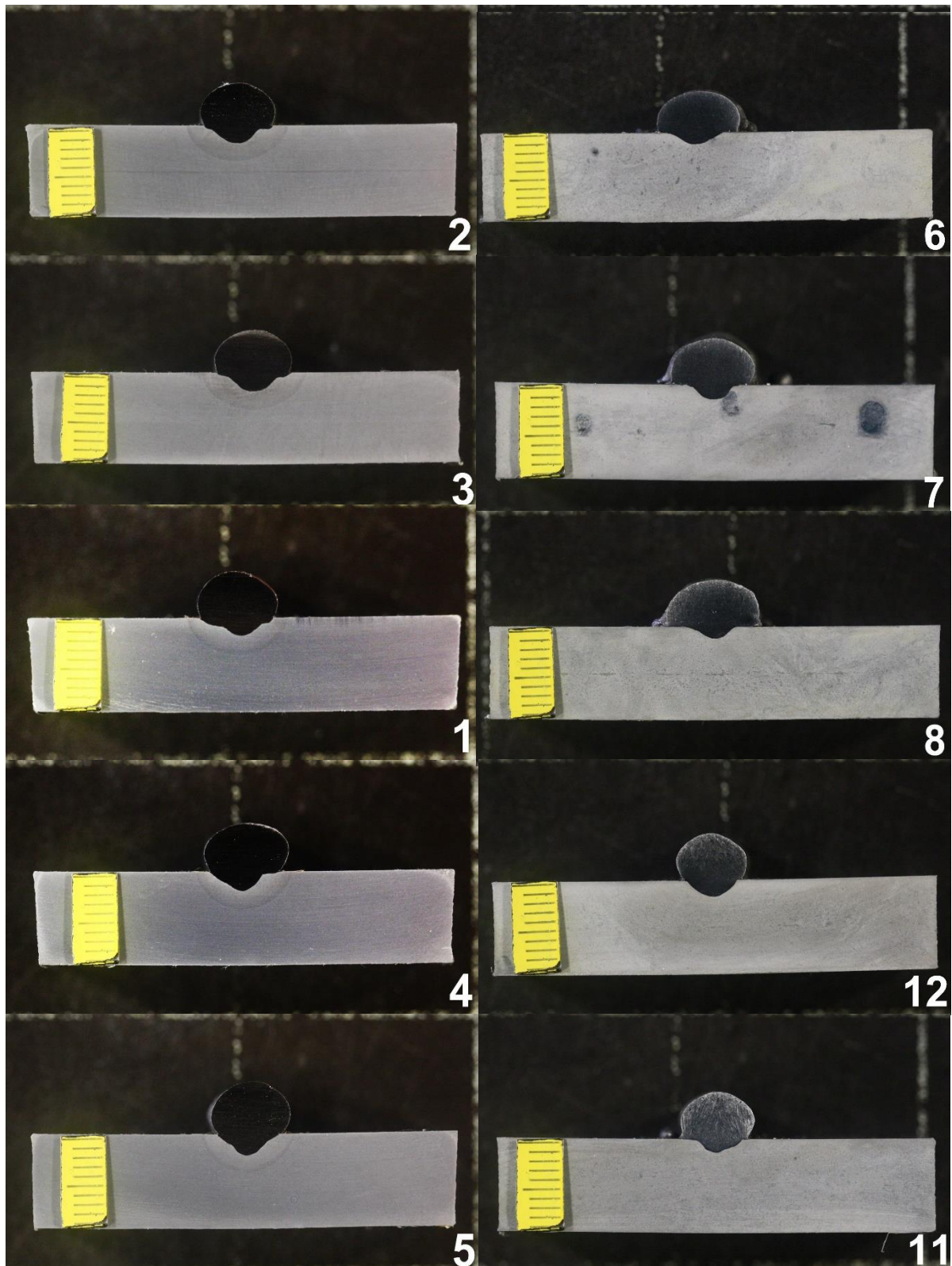
7.6.2. Analiza makrostrukture

7.6.2.1. Priprema i rezultati makrostrukture uzoraka

U svrhu dobivanja kvalitetne makrostrukture, uzorke je potrebno najprije adekvatno pripremiti.

Priprema makrostrukture za ovaj eksperimentalni rad se sastojala od:

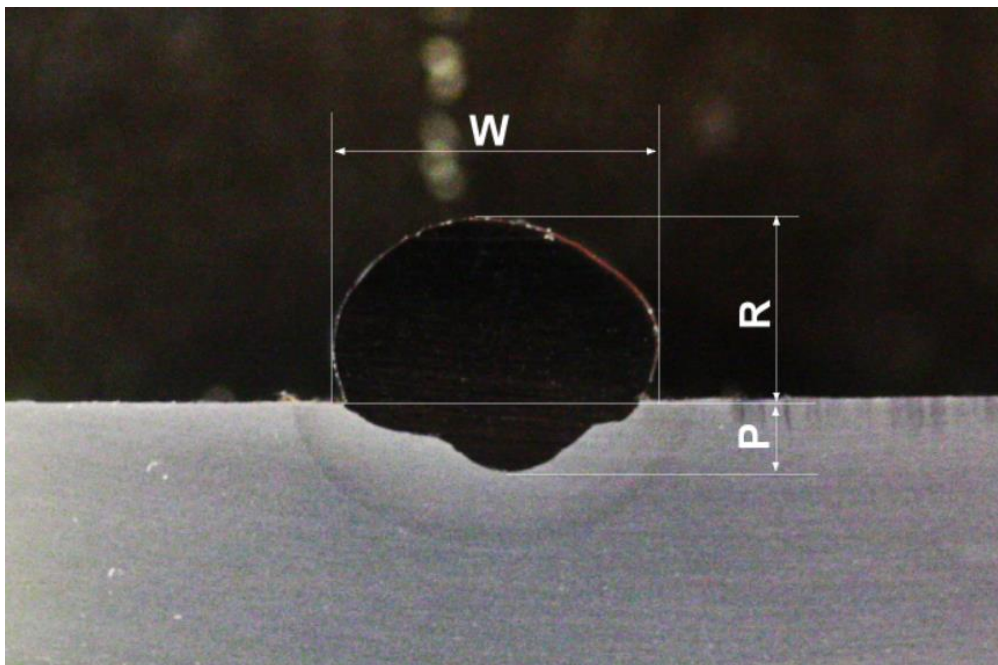
1. rezanja dijela uzorka na tračnoj pili
 - a. prema normi HRN EN ISO 15614-1:2017 [38] uzorci moraju biti odrezani tako da novo dobiveni uzorak sadrži minimalno grešaka i nesavršenosti
 - b. minimalna mjera uzduž zavora je iznosila oko 25 mm što također nalaže norma.
2. ručno brušenje uzoraka
 - a. korišteni su brusni papiri granulacija navedenim redoslijedom: P100, P150, P240 i P320.
3. poliranje
 - a. uzorci su odneseni u Laboratorij za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje
 - b. poliranje je izvedeno na stroju Minitex 233 - brzina rotacije tanjura je iznosila 300 o/min, a uz korištenje vode koja služi za hlađenje i uklanjanje odvojenih čestica koristili su se brusni papiri granulacija P320, P600, P1000, P2400 i P4000, tim redoslijedom.
4. Elektrokemijsko nagrivanje
 - a. navedeni uzorci su se nagrivali elektrokemijskim postupkom u Laboratoriju za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje
 - b. najprije su uzorci očišćeni alkoholom, pa su zatim uronjeni u tri postotni nital vremenom držanja oko 20 sekundi
 - c. nakon toga je ponovno slijedilo ispiranje alkoholom i toplom vodom
 - d. ovim putem se dupleks čelik nije nagrivo već samo čelik S355, ali s odličnim rezultatom jer se vrlo jasno raspoznaju osnovni materijal i zavar.
5. Analiza makrostrukture
 - a. za fotografiranje dobivenih uzoraka korišten je fotoaparati Cannon 1000D te se pomoću programa ImageJ može provesti kvantitativna (i kvalitativna) analiza makrostrukture uzoraka.



Slika 31 Makrostruktura uzoraka

7.6.2.2. Kvantitativna analize makrostrukture

Izlazni parametri makrostrukture, kao što je opisano u teorijskom dijelu i u člancima [26] i [27] bit će širina zavora (W), nadvišenje zavora (R) i penetracija (P). Navedeni izlazni parametri računati su mjerenjem duljina linija u programu ImageJ, prema slici 32.



Slika 32 Prikaz parametara širine zavora (W), nadvišenja zavora (R) i penetracije (P)

Rezultati mjerenja navedenih parametara svih 10 uzoraka prikazani su u tablici 8.

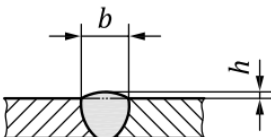
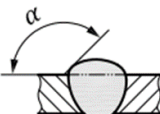
Tablica 8 Kvantitativni izlazni parametri makrostrukture

Uzorak	EN omjer	Plinska zaštita	<i>W</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	<i>W/R</i>	<i>W/P</i>
6	-50	Ar + 2,5% N ₂	9,7	1,3	4,9	2,0	7,5
7	-25		10,3	1,6	5,3	1,9	6,4
8	0		11,3	1,4	5,4	2,1	8,1
12	25		8,2	1,9	5,4	1,5	4,3
11	50		8,7	1,6	5,4	1,6	5,4
2	-50	Ar + 2,5% CO ₂	8,3	1,9	4,6	1,8	4,4
3	-25		8,5	2,1	4,7	1,8	4,0
1	0		8,8	1,9	5	1,8	4,6
4	25		9,6	2,1	5,2	1,8	4,6
5	50		9	2,3	5,6	1,6	3,9

7.6.2.3. Pojašnjenje rezultata makroanalize

Kao što je već napomenuto u teorijskom dijelu ovoga rada, poželjna geometrija navara treba biti sa što manjom penetracijom, najvećom širinom zavara te pravilnog nadvišenja zavara odnosno dobro razlivenog zavara. Na dobivenim uzorcima se odmah uočava veliko nadvišenje zavara tj. njegov nepoželjan oblik, a posebno za potrebe navarivanja. Tu leži opasnost od zareznog djelovanja pri dinamičkom opterećenju, čime se iznimno smanjuje dinamička izdržljivost materijala. U normi HRN EN ISO 5817:2014 [39] opisane su glavne greške zavara. Tako je oznakom 502 opisana greška prevelikog nadvišenja zavara, a zahtjevi su prikazani u tablici 9. U tablici je naveden zahtjev za samo „D“ stupanj kvalitete koji je najniži stupanj kvalitete od tri postojeća.

Tablica 9 Maksimalna dopuštena vrijednost nadvišenja zavara prema normi HRN EN ISO 5817:2014 [39]

Oznaka prema ISO 6520-1 i naziv greške	Shema zavara	Ograničenja za „D“ stupanj kvalitete
502 – preveliko nadvišenje zavara		$h \leq 1 \text{ mm} + 0,25b$, max .10 mm
505 – nepravilan kut prijelaza površine šava na osnovni metal		$\alpha \geq 90^\circ$

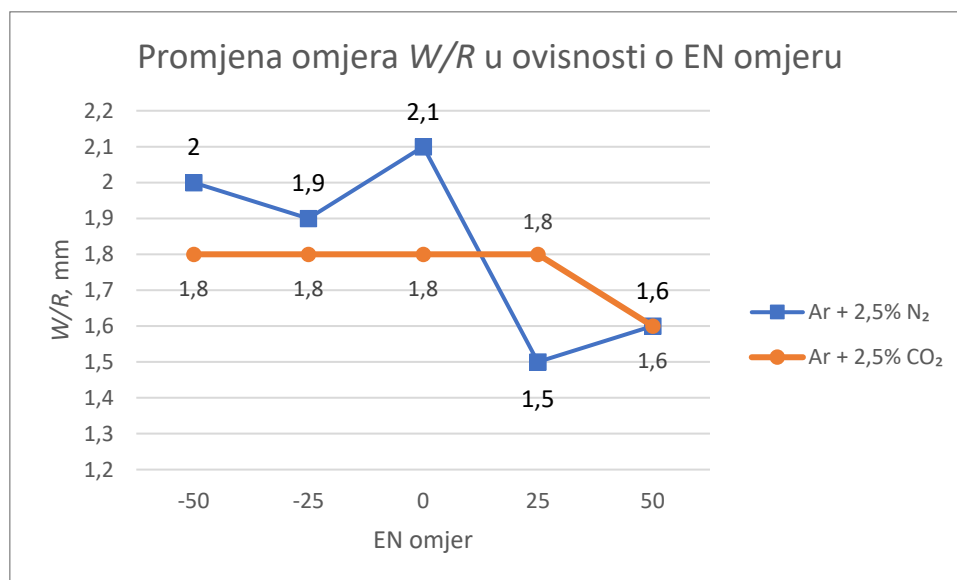
Kada bi u tablici 8 gledali uzorak koji je imao najveću širinu zavara (W), to bi bio uzorak 8. Nakon uvrštavanja u formulu iz tablice 9 dobije se da maksimalno nadvišenje zavara iznosi $h = 3,825 \text{ mm}$. Tako uzorak 8 s nadvišenjem $R = 5,4$ ne zadovoljava te uvjete. Čak da se uzme i najmanja vrijednost nadvišenja (uzorak 2), $R = 4,6 \text{ mm}$ s rezultatom maksimalnog nadvišenja uz širinu od $11,3 \text{ mm}$ i dalje prelazi dopuštene granice, što znači da niti jedan uzorak nije valjan prema normi HRN EN ISO 5817:2014 [39].

Osim toga u normi je napomenut pravilan kut prijelaza površine šava na osnovni metal, gdje kut α treba biti veći od 90° , a to nije slučaj za niti jedan zavareni uzorak.

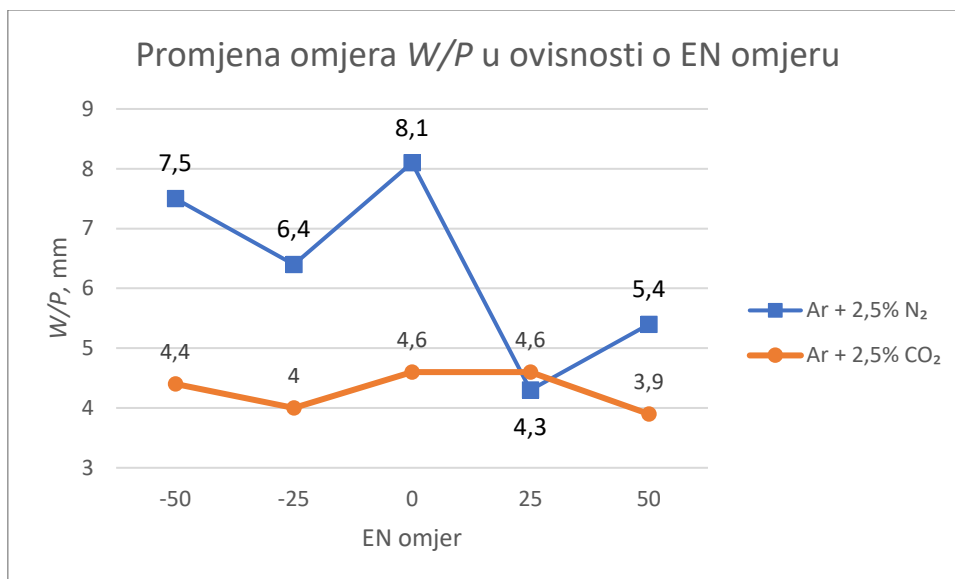
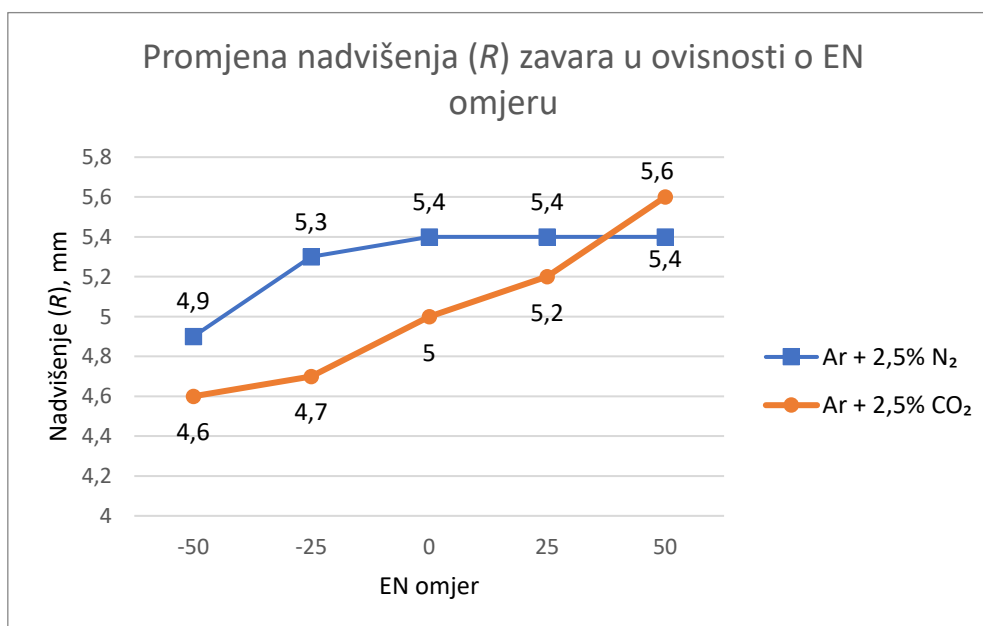
Ipak, kada bi se gledao utjecaj EN omjera i zaštitnog plina na poželjnu geometriju zavara, neki parametri daju bolje rezultate od drugih. Najpoželjniji rezultat bi bio da W/R i W/P budu najveći, odnosno da zavar ima najveću širinu (W), uz najmanju penetraciju (P) i nadvišenje (R). Dijagram koji pokazuje poredak rezultate faktora W/R je prikazan na slici 33, a faktora W/P na slici 34. Tako najpoželjnije rezultate za oba faktora (W/R i W/P) daju uzorci zavareni zaštitnim plinom $\text{Ar} + 2,5\% \text{ N}_2$, za EN omjere 0, -50, -25, tim redoslijedom. No, ovi rezultati se trebaju interpretirati s oprezom – pri zavarivanju sa zaštitnim plinom $\text{Ar} + 2,5\% \text{ N}_2$ i EN omjerima +25 i +50 nestabilnost luka je bila vrlo izražena. To je rezultiralo vrlo nepravilnim izgledom zavara po duljini, što znači da vrijednosti penetracije (P), nadvišenja (R), a posebno širine (W) zavara za te uzorke nisu reprezentativne zbog velike devijacije u rezultatima.

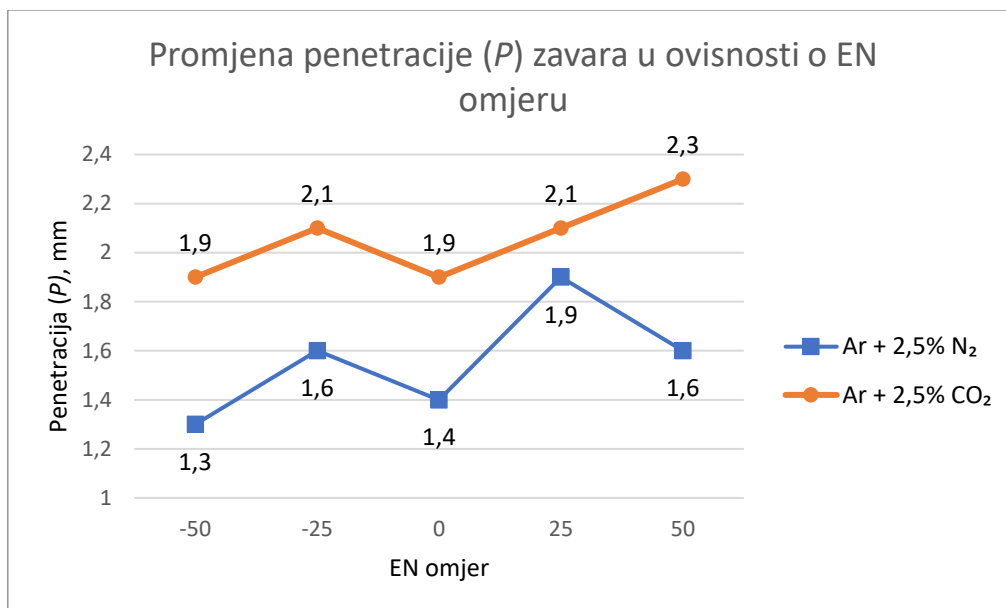
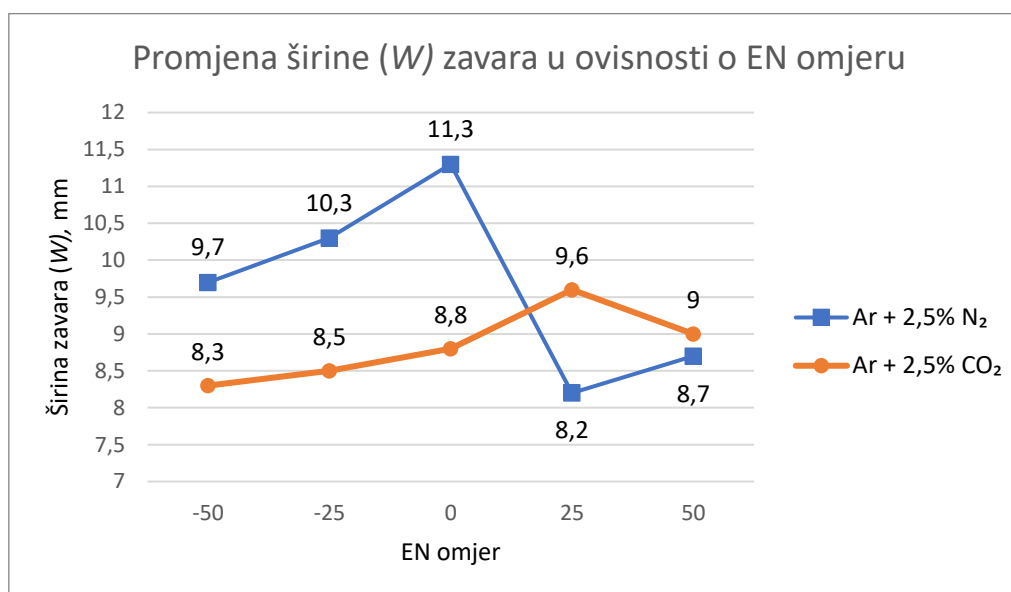
No, za većinu rezultata se mogu uočiti generalni trendovi rasta penetracije (P), nadvišenja (R) i širine (W) zavara u odnosu na EN omjer i plinsku mješavinu:

- nadvišenje zavara raste s porastom EN omjera za obje plinske mješavine, međutim, rast je izraženiji pri zaštiti s plinskom mješavinom Ar + 2,5% CO₂, slika 35,
- penetracija je rasla s porastom vrijednosti EN omjera za obje plinske mješavine, slika 36,
- širina zavara je rasla s povećanjem EN omjera za obje plinske mješavine, no, ovdje se najviše uočava rezultat nestabilnosti luka (pri zavarivanju s Ar + 2,5% N₂ plinskom mješavinom i EN omjerima +25 i +50), gdje širine zavara znatno „odskaku“ od navedenog trenda, slika 37,
- uspoređujući utjecaj plinskih mješavina, veću penetraciju je rezultirala zavarivanjem s Ar + 2,5% CO₂ plinskom mješavinom, a veće nadvišenje i širina zavara dobivena je na uzorcima zavarenim Ar + 2,5% N₂ plinskom mješavinom.



Slika 33 Utjecaj EN omjera i vrste zaštitnog plina na faktor W/R

Slika 34 Utjecaj EN omjera i vrste zaštitnog plina na faktor W/P Slika 35 Utjecaj EN omjera i vrste zaštitnog plina na nadvišenje zavora (R)

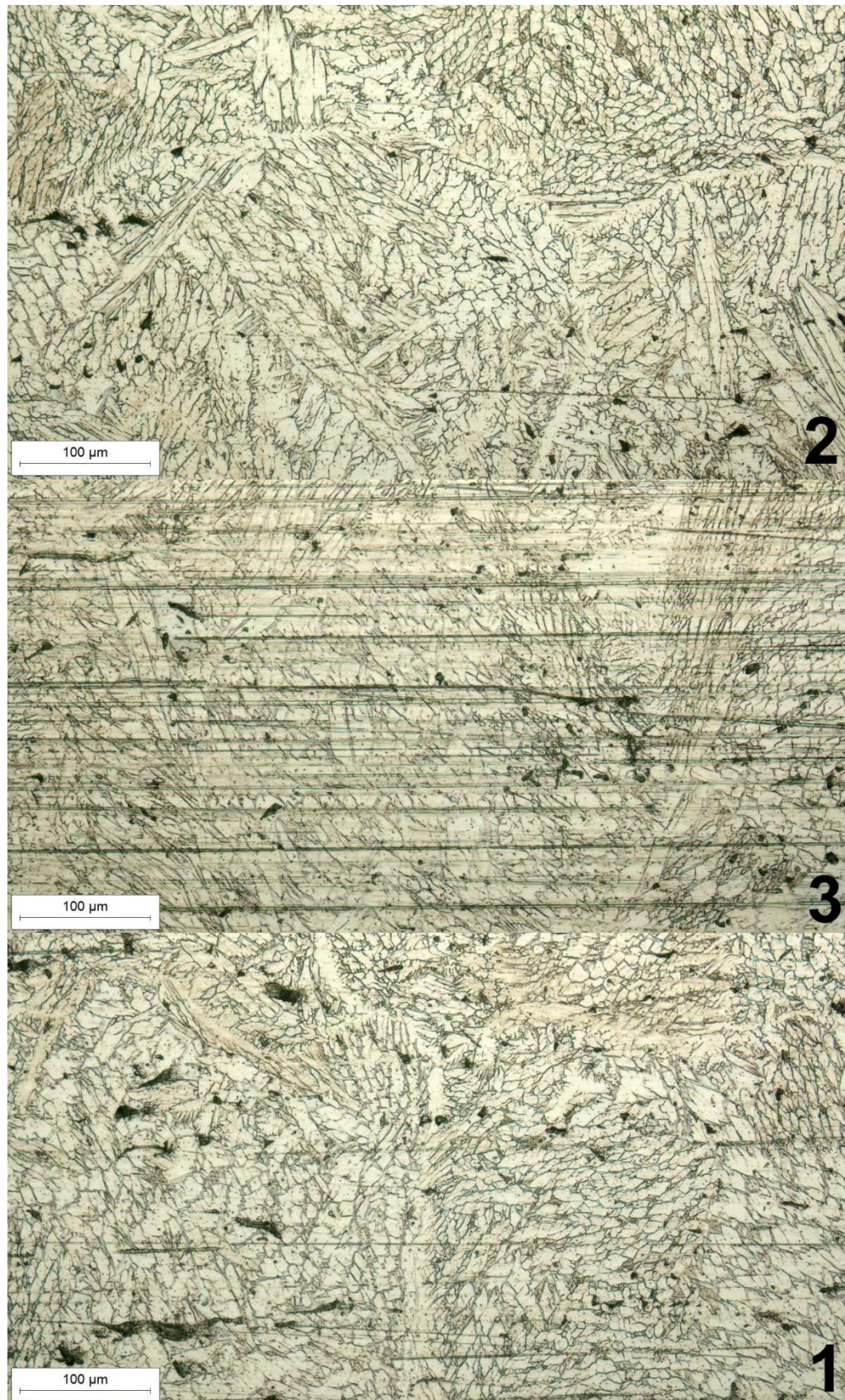
Slika 36 Utjecaj EN omjera i vrste zaštitnog plina na penetraciju zavara (P)Slika 37 Utjecaj EN omjera i vrste zaštitnog plina na širinu zavara (W)

7.6.3. Analiza mikrostrukture

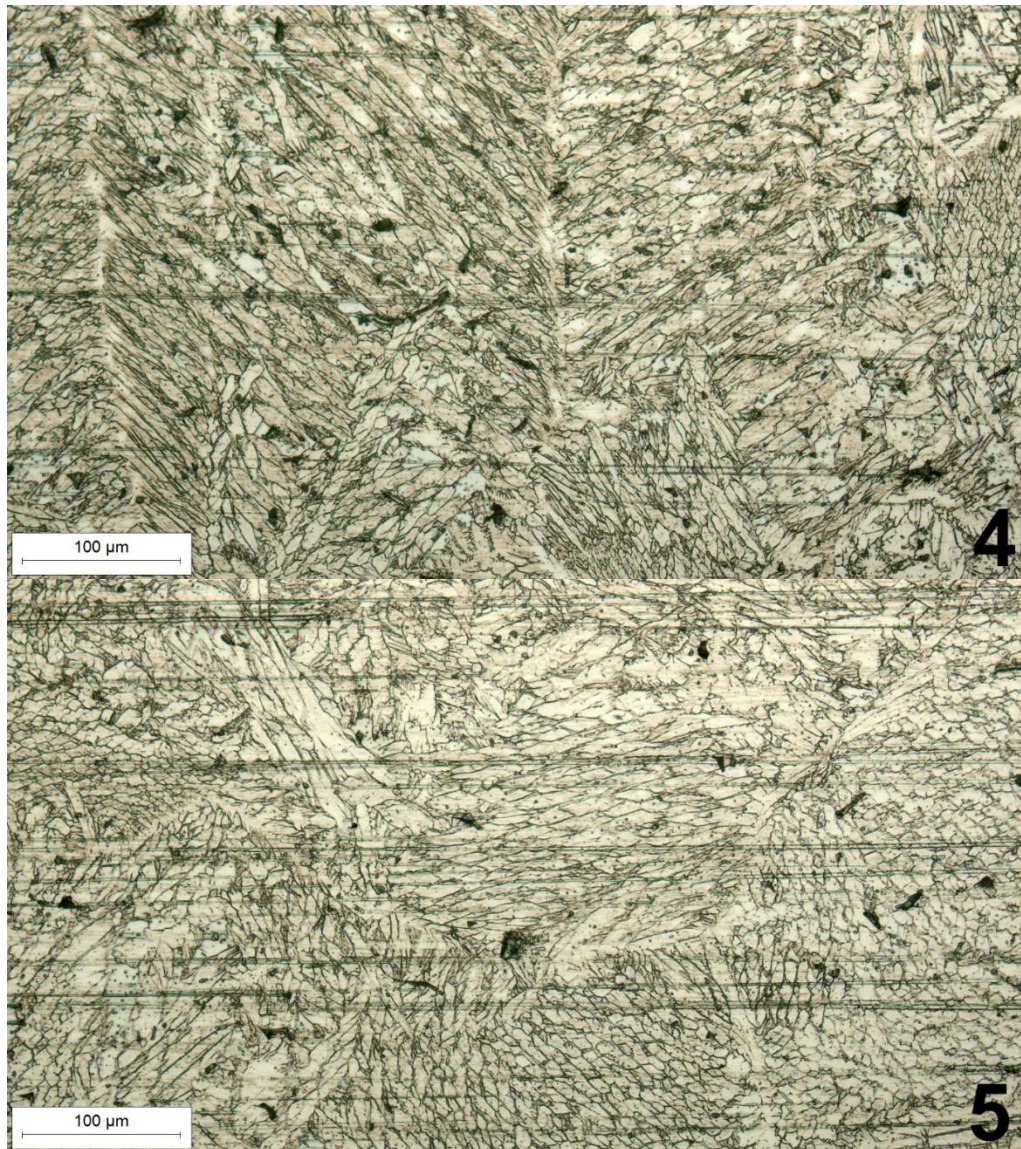
7.6.3.1. Priprema i rezultati uzoraka mikrostrukture

Priprema uzoraka za analizu mikrostrukture slijedila je nakon analize makrostrukture. Tako je površina bila već gotovo pripremljena, samo je bilo potrebno još jednom nagristi mikrostrukturu, ali ovaj puta dupleks čelik (nital je nagrizao samo ugljični čelik). Elektrokemijsko nagrizanje uzoraka provedeno je u 10% oksalnoj kiselini uz jakost struje od Fakultet strojarstva i brodogradnje

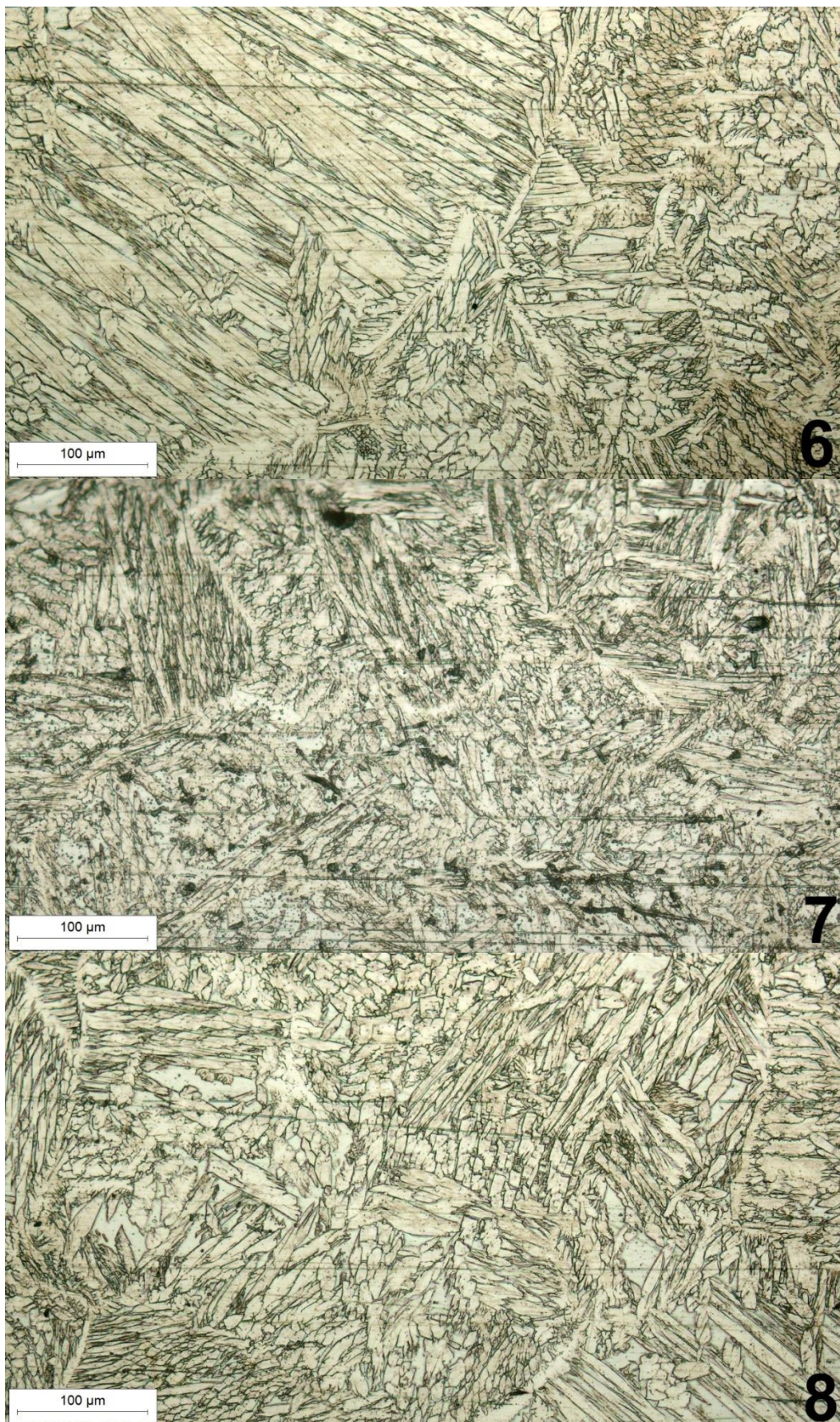
6A pri naponu od 8V, sa vremenom držanja od 30 sekundi. Za dobivanje fotografija mikrostrukture korišten je invertni Mikroskop Olympus GX51, a uvećanje je iznosilo 200 puta. Snimljen dio predstavlja lica zavara. Rezultati su prikazani su na slikama 38, 39, 40 i 41.



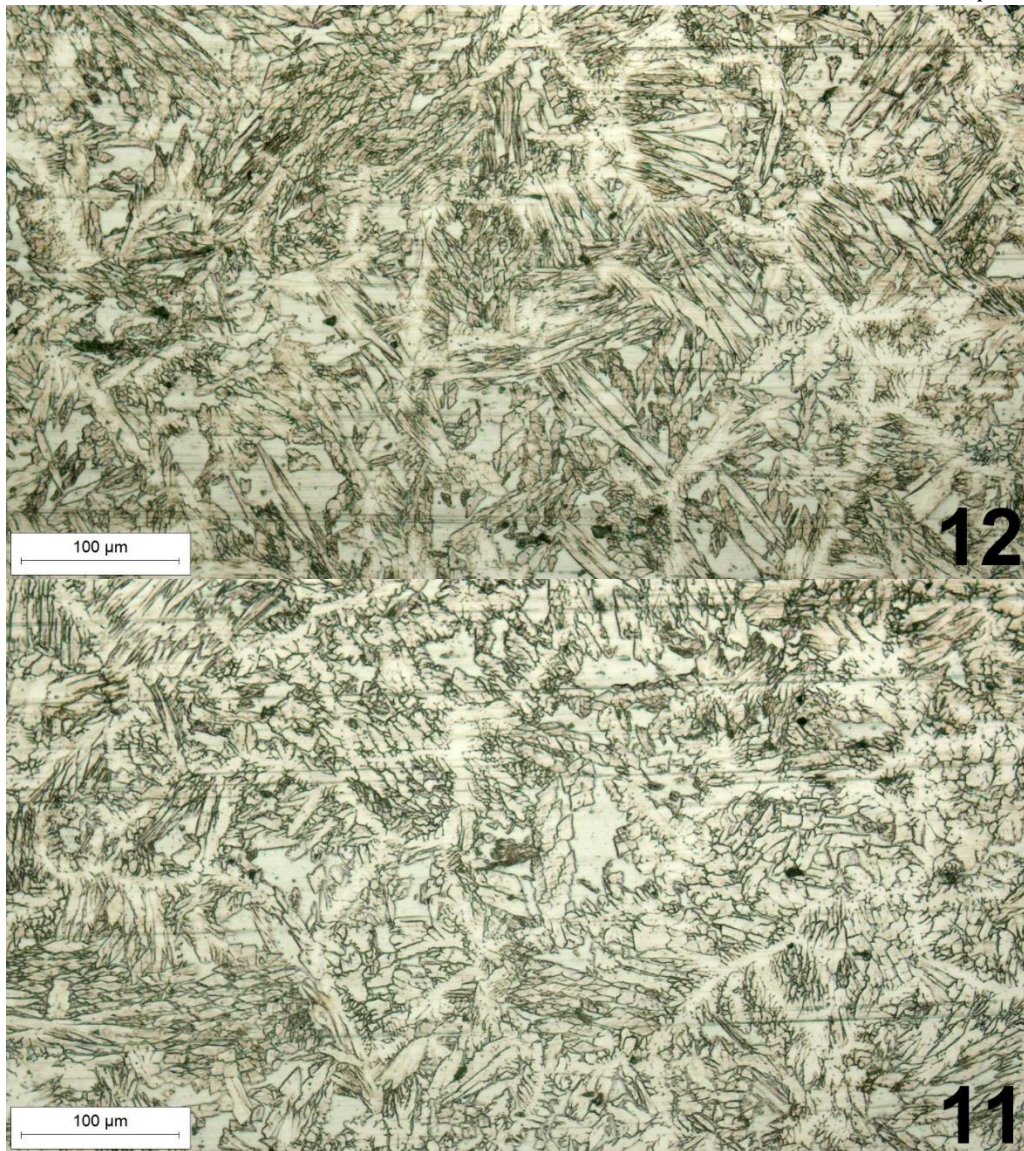
Slika 38 Mikrostruktura uzoraka 2,3 i 1



Slika 39 Mikrostruktura uzoraka 4 i 5



Slika 40 Mikrostruktura uzoraka 6,7 i 8

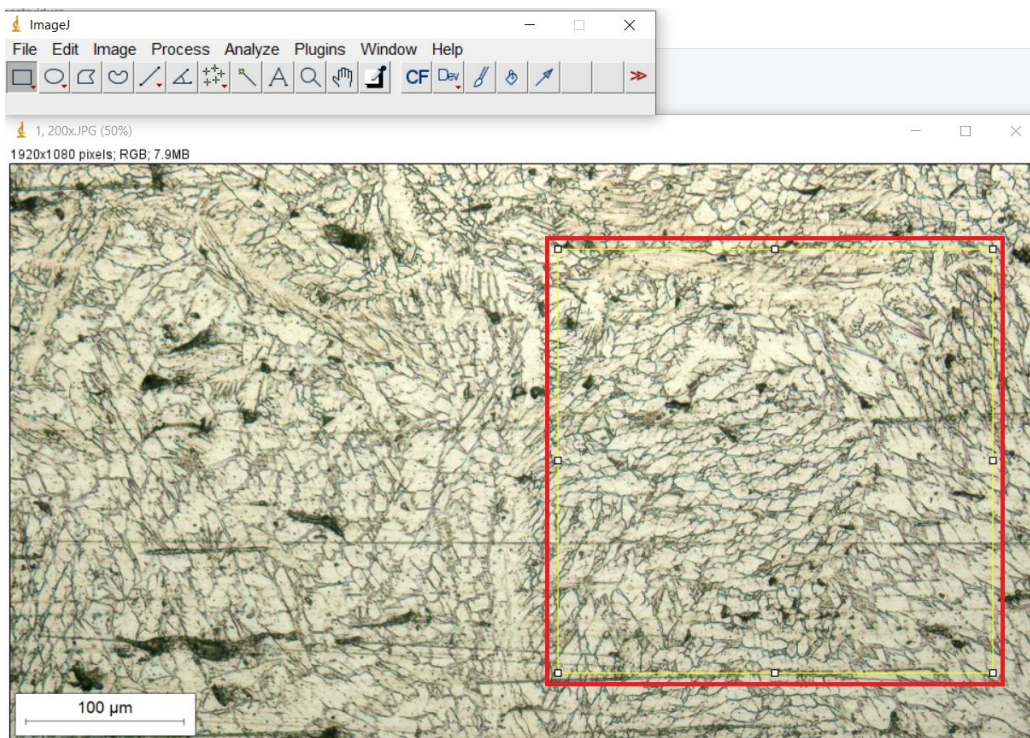


Slika 41 Mikrostruktura uzoraka 12 i 11

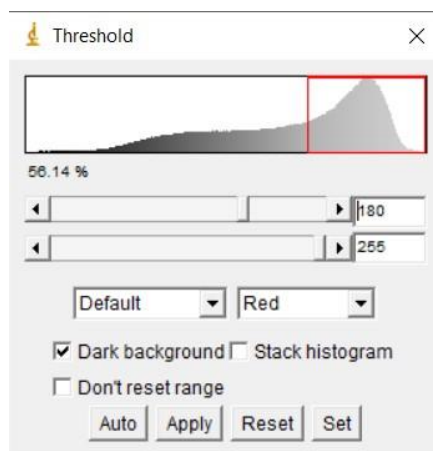
7.6.3.2. Kvantitativna analiza mikrostrukture

Kvantitativna analiza mikrostrukture je izvršena putem računalnog programa ImageJ. U ovome slučaju bilo je riječ o programskoj analizi slike gdje se udjeli faza računaju preko površine koju zauzimaju. Postupak programske analize slike pomoću programa ImageJ sastojao se od sljedećih koraka:

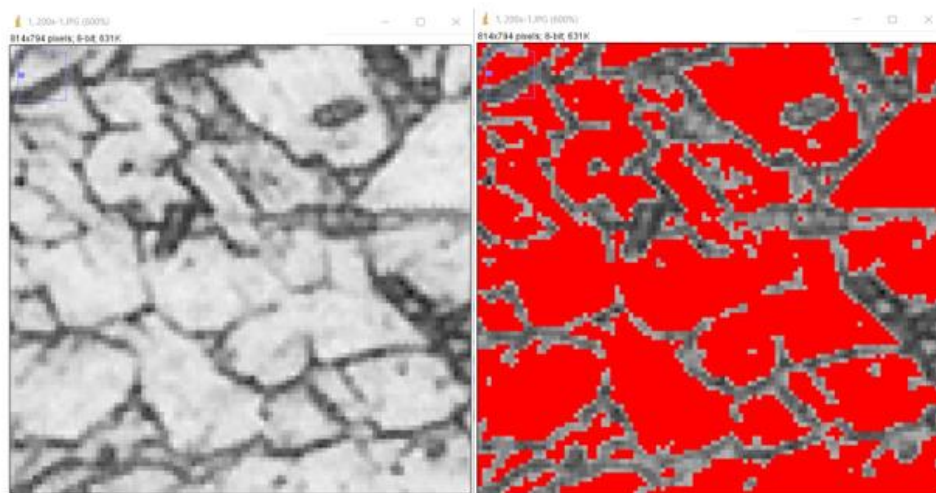
1. odabir pravilnog područja interesa (*eng.* Region of interest - ROI)
 - a. u ovome slučaju ROI iznosi 800x800 piksela i odabrani su dijelovi mikrostrukture koji nema ogrebotina, previše nagriženih dijelova i slično, slika 42.
2. pretvorba slike u 8-bitni zapis i upotreba funkcije „Threshold“ koja pretvara sliku u crno bijeli zapis.
 - a. Bitno je pravilno postaviti gornje i donje vrijednosti „Threshold“ funkcije koja je za slike svih mikrostrukture bila 180 i 255, slika 43. Time se postupkom nastoje razdijeliti faze, u ovome slučaju crveni dio mora što točnije pokriti feritnu fazu, prikazano na uvećanom detalju mikrostrukture uzorka 1 na slici 44.
 - b. Obično se vrijednost „Threshold“ funkcije automatski postavi na temelju razine kontrasta, međutim, pošto je u ovome slučaju kontrast na određenim dijelovima slabiji, te granice su ručno postavljene.
 - c. Nakon primjene funkcije „Threshold“, dobiva se slikovni zapis kao na slici 45— ovdje se može primijetiti kako je slika invertirana, odnosno da je crnom bojom označena feritna faza, a bijelom austenitna faza, iako je u stvarnosti svjetlija faza feritna (matrica), a tamnija austenitna.
3. analiza površinskih udjela faze uzorka opcijom „Analyze particles“
 - a. pokazuje odnos površine austenita u odnosu na ferit, odnosno crne površine (nakon „threshold“ funkcije) u odnosu na bijelu, rezultati svih ispitivanja prikazani su u tablici 10.



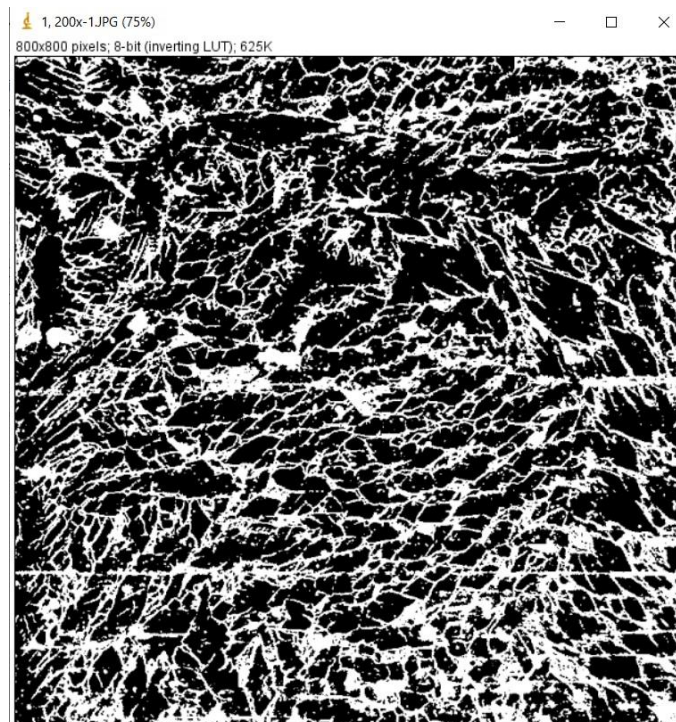
Slika 42 Pravilan odabir ROI-a (800 x 800 piksela)



Slika 43 Postavke opcije "Threshold"



Slika 44 Uvećani detalj mikrostrukture uzorka 1



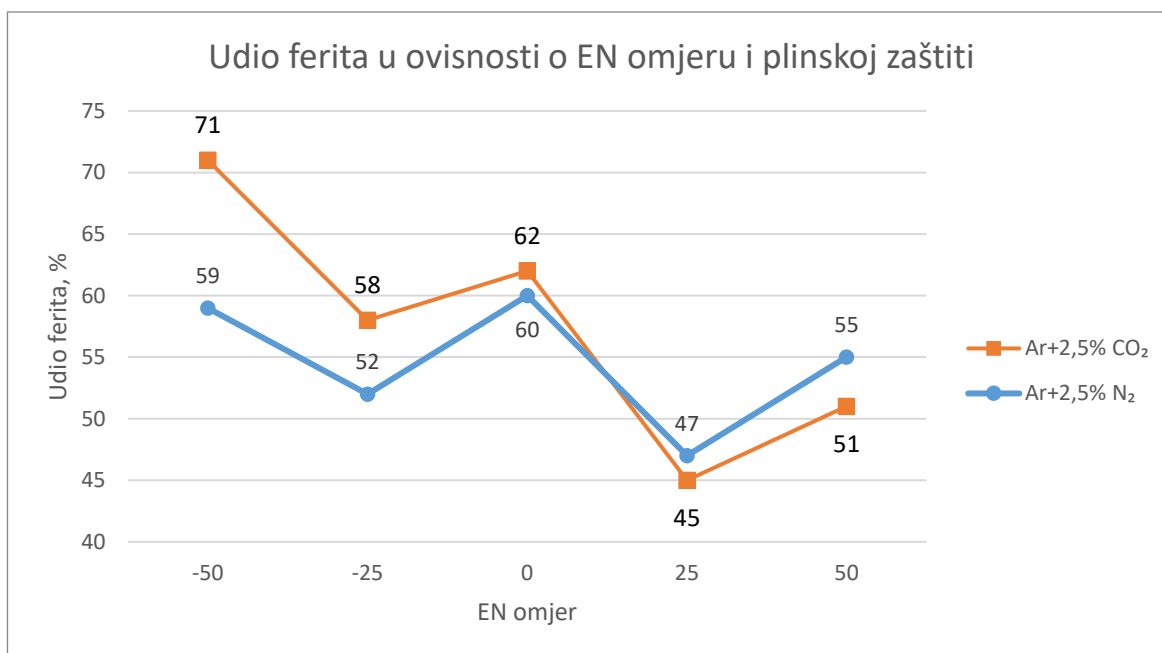
Slika 45 Rezultat nakon primjene funkcije "Threshold"

Tablica 10 Rezultati kvantitativne analize mikrostrukture

Uzorak	EN omjer	Plinska zaštita	Udio ferita, %
2	-50	Ar + 2,5% CO ₂	71
3	-25		>58 – tragovi brušenja
1	0		62
4	25		45
5	50		51
6	-50	Ar + 2,5% N ₂	59
7	-25		52
8	0		60
12	25		47
11	50		55

7.6.3.3. Pojašnjenje rezultata analize mikrostrukture

Rezultati kvantitativne slikovne analize iz tablice 10 su grafički prikazani na slici 46.



Slika 46 Utjecaj EN omjera i vrste zaštitnog plina na udio ferita

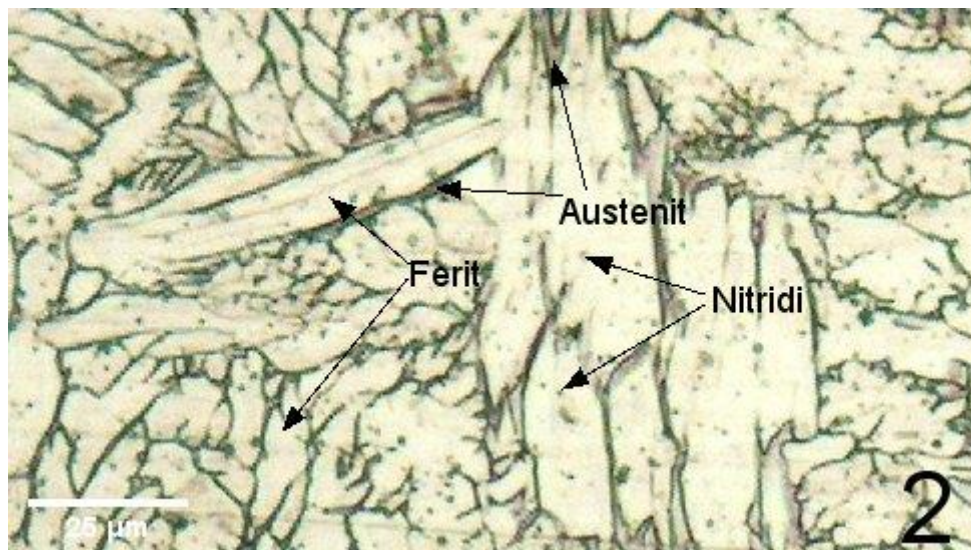
Uspoređujući najprije utjecaj plinske mješavine na udio ferita u mikrostrukturi, rezultati kvantitativne slikovne analize govore kako su udjeli ferita manji pri korištenju plinske zaštite s dodatkom dušika, ali samo pri EN omjerima -50, -25 i 0. Pri EN omjeru +25 i +50, koji su za obje plinske mješavine dali najmanje udjele ferita, uzorci zavareni s dodatkom CO₂ dali su vrlo slične rezultate što je iznenađujući rezultat, ali ga je potrebno uzeti s oprezom zbog nesigurnosti mjerenja, o čemu će više riječi biti u nastavku ovog poglavlja. To vrijedi i za činjenicu da su najbolji rezultati zavarana pri korištenju i jedne i druge plinske mješavine dobiveni s EN omjerom +25, a drugi najbolji pri korištenju EN omjera +50 što bi značilo kako povećanjem EN omjera udio austenita raste što je vrlo poželjno.

Međutim, razlog navedene nesigurnosti mjerenja proizlazi iz činjenice opisane u [16], gdje je pokazano kako je elektrokemijskim nagrizanjem s 10% oksalnom kiselinom dalo rezultate mikrostrukture s najmanjim kontrastom između faza ferita i austenita u odnosu na ostale procedure nagrizanja. Štoviše, procedure i sredstvo nagrizanja su poredani prema razini kontrasta među feritnim i austenitnim fazama, počevši od procedure koja je dala maksimalan kontrast [16]:

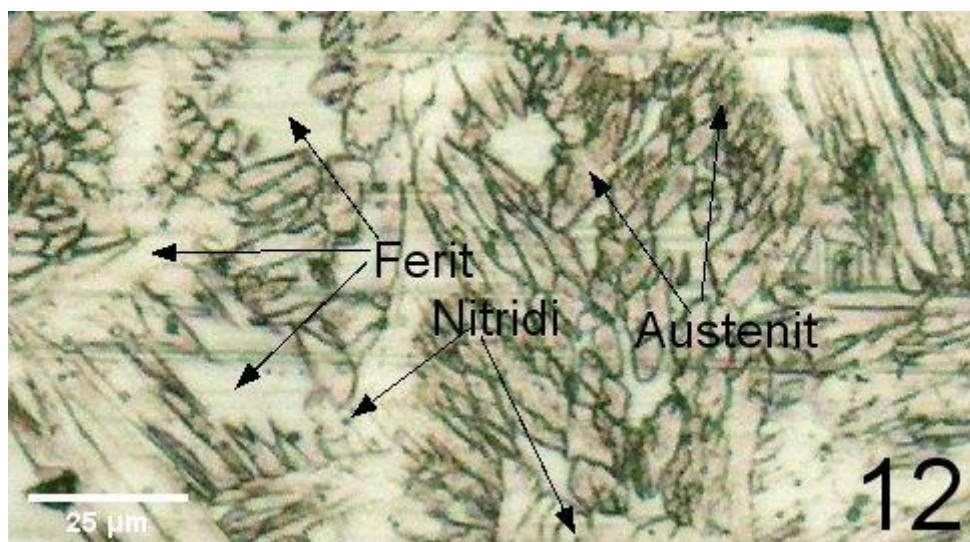
1. nagrizanje bojom (*eng.* color etching) modificiranim Beraha reagentom (60 mL vode, 30 mL HCl, 0,75 g kalijev bisulfid)
2. 20% NaOH elektrokemijsko nagrizanja
3. nagrizanje u dva koraka sa 7% oksalnom kiselinom i 10% NaOH kiselinom
4. nagrizanje s 10% oksalnom kiselinom

Istaknuto je kako je loš rezultat kontrasta nakon nagrizanja s 10% oksalnom kiselinom očekivan jer se elektrokemijsko nagrizanje oksalnom kiselinom obično koristi kako bi se pronašle senzitivizirana područja kao što su lokacije pored nitrida i intermetalnih spojeva. [16]

Prema tome, pretpostavlja se da zapravo najtamniji dijelovi mikrostrukture predstavljaju granice među fazama austenita i ferita te sekundarnih i intermetalnih faza. Ali, unatoč tome što su faze austenita i ferita teško raspoznatljive, pretpostavlja se kako tamniji, odnosno smeđi dijelovi slike predstavljaju austenit, dok svijetli dijelovi ferit. Osim toga, crne točke koje se javljaju u središtima svjetlijih faza (feritnoj fazi) vrlo vjerojatno predstavljaju nitride. Ovi zaključci su doneseni na temelju slika i objašnjenja iz poglavlja 3.1. Navedene faze su označene na uzorku 2 (jer je dao najgori rezultat udjela ferita od 71% *F*), slika 47 i na uzorku 12 (najbolji rezultat udjela ferita od 47% *F*), slika 48, pod uvećanjem.



Slika 47 Mikrostrukturne faze metala zavara uzorka 2



Slika 48 Mikrostrukturne faze metala zavara uzorka 12

Dakle, prema svim dosadašnjim zaključcima, rezultat iz tablice 10 treba uzeti s oprezom. „Threshold“ funkcija razdjeljuje faze na samo dvije nijanse. Kao primjer na slici 44, crvenom bojom su označena sva svjetlija područja koja predstavljaju feritnu fazu, a u preostalo područje se ubrajaju samo tamnije smeđi dijelovi austenitne faze te granice sekundarnih faza (nitridi, karbidi) i intermetalnih spojeva i sl. To znači da dolazi do takve raspodjele da se određeni svjetlije smeđi dijelovi, koji su u stvarnosti austenitna faza, ubroje u feritnu fazu, ali i da se intermetalni spojevi, nitridi i sl. ubroje pod austenitnu fazu. Dodatno uz ovu tvrdnju, pravilno određivanje sekundarnih i intermetalnih faza zahtjeva iznimno visoko znanje i ekspertizu u području metalografije što premašuje doseg ovoga rada.

7.7. Stupanj miješanja

Jedan od najutjecajnijih čimbenika kod zavarivanja raznovrsnih čelika je stupanj miješanja (protaljivanja) (γ). On je određen kao udio osnovnog metala u zavaru, odnosno formulom [40]

$$\gamma = \frac{n}{(n + m)}, \% \quad (8)$$

gdje su:

n – površinski udio osnovnog materijala u zavaru

m – površinski udio nadvišenja zavara (nataljenog metala).

Kako ne bi došlo do prevelike kemijske raznorodnosti što rezultira većem riziku od nastanka krhkih mikrostruktura i pukotina, prijelazna zona treba biti što manja odnosno stupanj miješanja treba biti što manji. Ovo je osobito bitno kod zavarivanja materijala s visokim antikorozivnim svojstvima i ugljičnih feritno-perlitnih čelika.[40]

Potrebno je još naglasiti kako različiti postupci zavarivanja daju različite stupnjeve miješanja. Gruba procjena stupnja miješanja prikazana je u tablici 11.

Tablica 11 Ovisnost stupnja miješanja o postupku zavarivanja [40]

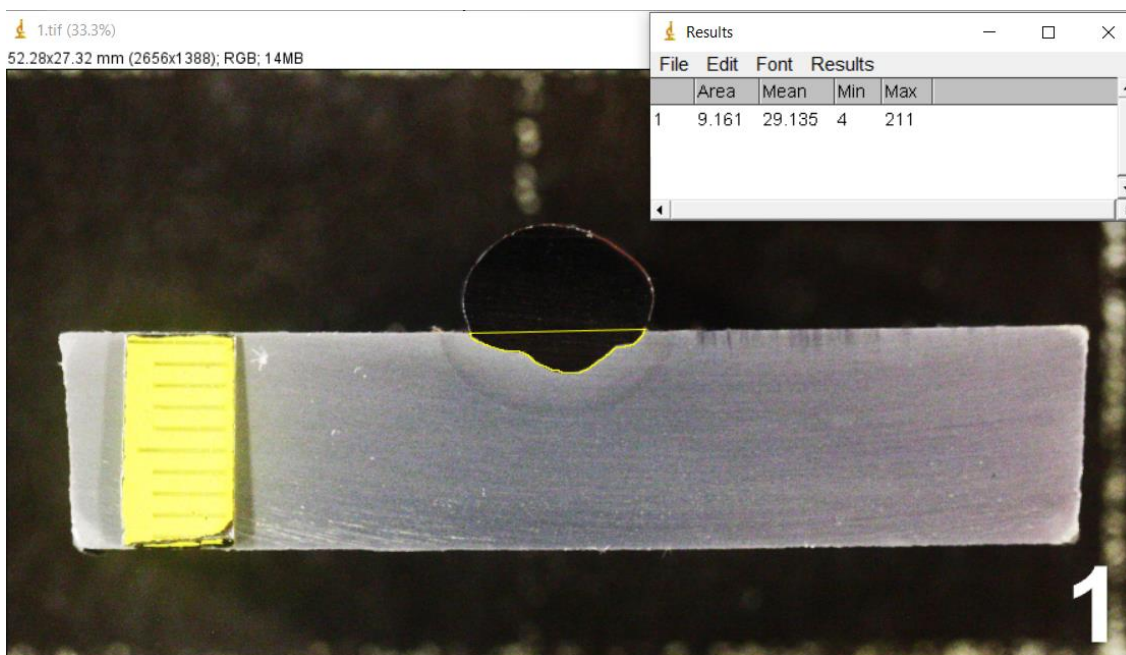
Postupak zavarivanja	Stupanj miješanja, %
EPP zavarivanje trakom / TIG s toplom žicom	8 – 20
TIG	15 – 100
REL	s rutilnom elektrodom 15 – 25
REL	s bazičnom elektrodom 20 – 30
MAG	20 – 40
MAG impulsno	10 – 30
EPP	zavarivanje s žicom 30 - 50

Može se vidjeti kako modificirani postupci kao što je to primjerice MAG implusno daje puno bolje rezultate (manji stupanj miješanja) od konvencionalnog MAG postupka zbog sniženog unosa topline. Prema tome principu je stvorena premisa o korištenju AC MIG postupka za zavarivanje raznorodnih materijala.

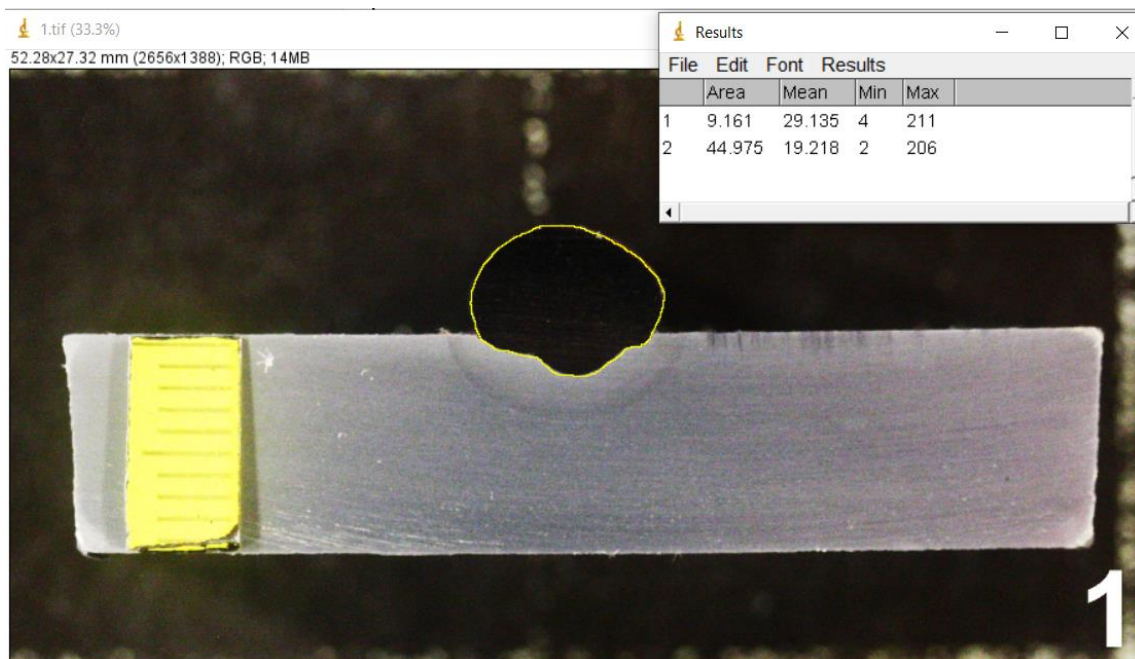
7.7.1.1. Postupak računanja stupnja miješanja i rezultati

Za računanje stupnja miješanja ponovno je korišten program ImageJ. Postupak računanja stupnja miješanja uključuje sljedeće korake:

1. postavljanje skale (naredbom „Set scale“) odnosno postavljanje odnosa piksela i stvarne udaljenosti. Na svim slikama makrostrukture skala je bila 51 piksela/ mm.
2. mjerenjem područja koja je ručno označena funkcijom „Freehand selection“ pomoću funkcije „Measure“ – ovdje je potrebno izmjeriti područje penetracije i područje cijeloga zavora; primjeri navedenih područja čije se područje mjeri (zajedno s dobivenim rezultatom) je prikazano na slici 49 i 50, a konkretno je na slici riječ o uzorku 1.
3. izračunati stupanj miješanja prema formuli (8) – rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 12.



Slika 49 Rezultat mjerenja površine penetracije



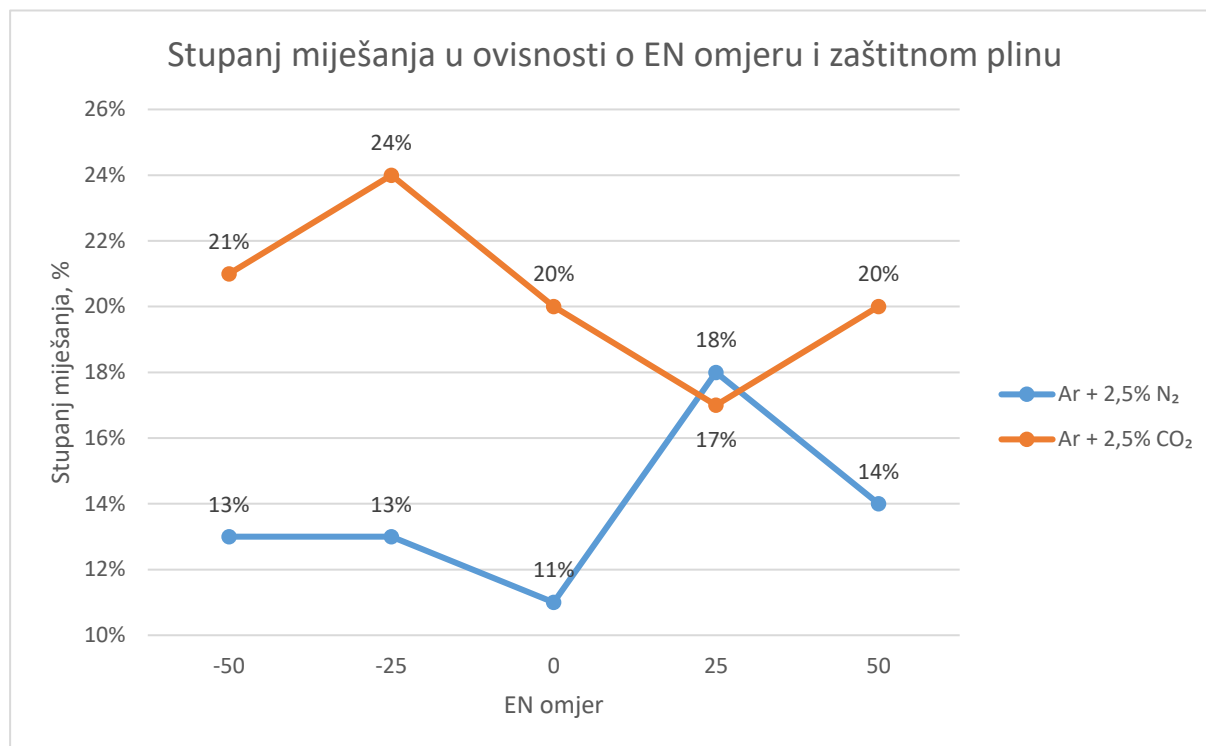
Slika 50 Rezultat mjerenja površine cijelog zavara (pod brojem 2)

Tablica 12 Podaci izmjerenih površina i dobivenog stupnja miješanja

Oznaka uzorka	EN omjer	Zaštitni plin	A_{pen} , mm ²	A_{uk} , mm ²	Stupanj miješanja, %
2	-50	Ar + 2,5% CO ₂	8,2	40,0	21%
3	-25		10,1	42,9	24%
1	0		9,2	45,0	20%
4	25		8,7	49,8	17%
5	50		9,8	50,2	20%
6	-50	Ar + 2,5% N ₂	5,7	45,0	13%
7	-25		6,7	51,1	13%
8	0		5,9	56,1	11%
12	25		7,8	44,1	18%
11	50		6,5	45,1	14%

7.7.1.2. Obrazloženje rezultata stupnja miješanja

Na slici 51 su grafički prikazani rezultati stupnjeva miješanja iz tablice 12, u ovisnosti o EN omjeru i plinskoj mješavini.



Slika 51 Utjecaj EN omjera i plinske zaštite na stupanj miješanja osnovnog i dodatnog materijala

Uspoređujući najprije utjecaj plinskih mješavina na stupanj miješanja, znatno bolje rezultate dali su uzorci zavarivani pod zaštitom plina Ar + 2,5% N₂. Najbolji rezultat (s 11% miješanja) dao je uzorak 8 koji je zavaren s EN omjerom 0 i zaštitnim plinom Ar + 2,5% N₂.

Uspoređujući utjecaj EN omjera na stupanj miješanja pri zaštiti s Ar + 2,5% N₂, najbolji rezultat je bio za EN = 0 (11%), a najgori za EN = +25 (18%). Rezultati miješanja za EN = 50, - 25 i +50 su podjednaki i iznose oko 13%.

Pri zaštiti s Ar + 2,5% CO₂, najbolji rezultat dao je za EN = +25 (17%). To je upravo suprotno od slučaja sa zaštitnim plinom Ar + 2,5% N₂. Najgori rezultat stupnja miješanja za EN = -25 (24%). Ostali rezultati miješanja pri EN = -50, 0 i +50 su podjednaki i iznose oko 20%.

Prosječni stupanj miješanja pri zaštiti s Ar + 2,5% N₂ iznosi 13,8%, a pri zaštiti s Ar + 2,5% CO₂ iznosi 20,4%, što je razlika od gotovo 7%.

8. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenih istraživanja u eksperimentalnom dijelu ovoga rada, za parametre navedene u tablici 7, korištenjem AC MIG postupka pri navarivanju dupleks 2205 nehrđajućeg čelika na čelik S355JR, gdje se varirao parametar EN omjera i vrsta zaštitnog plina ($\text{Ar} + 2,5\% \text{CO}_2$, $\text{Ar} + 2,5\% \text{N}_2$), može se zaključiti sljedeće:

- znatno stabilniji proces zavarivanja, manje rasprskavanje i pravilniji izgled zavara je rezultiralo kod uzoraka zavarenih s $\text{Ar} + 2,5\% \text{CO}_2$ plinskom mješavinom,
- na uzorcima s većim vrijednostima EN omjera (duže trajanje EN polariteta) uočena je veća nestabilnost električnog luka, a time i veće rasprskavanje i nepravilni izgled navara (izraženije kod $\text{Ar} + 2,5\% \text{N}_2$ plinske mješavine),
- AC MIG postupak za parametre u tablici 7 nije dao zadovoljavajuću geometriju navara za bilo koji EN omjer i plinsku mješavinu – nadvišenje zavara je bilo preveliko te kut prijelaza površine šava na osnovni metal je iznosio $>90^\circ$, što je neprihvatljivo,
- nadvišenje i penetracija raste s porastom EN omjera za obje plinske mješavine,
- širina zavara je rasla s povećanjem EN omjera za obje plinske mješavine, no širina uzoraka zavarenih $\text{Ar} + 2,5\% \text{N}_2$ pri EN omjeru +25 i +50 je odstupala od pravila zbog velike nepravilnosti zavara što je posljedica velike nestabilnosti električnog luka,
- veću penetraciju su imali uzorci zavareni s $\text{Ar} + 2,5\% \text{CO}_2$ plinskom mješavinom, a veće nadvišenje i širina zavara na uzorcima zavarenim $\text{Ar} + 2,5\% \text{N}_2$ plinskom mješavinom,
- znatno manji stupanj miješanja (poželjno kod zavarivanja raznorodnih čelika) dali su uzorci zavarivani pod zaštitom plina $\text{Ar} + 2,5\% \text{N}_2$ – prosječna razlika je iznosila 7%,
- najbolji rezultat stupnja miješanja (s 11% miješanja) dao je uzorak 8 koji je zavaren s EN omjerom 0 i zaštitnim plinom $\text{Ar} + 2,5\% \text{N}_2$,
- povećanjem EN omjera udio austenita raste, a najbolji rezultati za obje plinske mješavine dobiveni za EN omjer +25, pri zaštiti s $\text{Ar} + 2,5\% \text{CO}_2$ je iznosio 45%F, a pri zaštiti s $\text{Ar} + 2,5\% \text{N}_2$ 47%F, no ove rezultate treba uzeti s oprezom zbog nesigurnosti mjerenja koja proizlazi iz smanjenog kontrasta među fazama

(austenitna i feritna faza) dobiveni elektrokemijskim nagrivanjem u 10% oksalnoj kiselini,

- uspoređujući utjecaj plinskih mješavina na udio ferita u metalu zavara, pri višim EN omjerima (0, +25 i +50) udjeli ferita su slični, no pri nižim EN omjerima (-50 i -25) Ar + 2,5% N₂ daje bolje rezultate nego Ar + CO₂,
- elektrokemijskim nagrivanjem u 10% oksalnoj kiselini se odlično raspoznaju granice faza te se relativno lako uočavaju sekundarne faze i intermetalni spojevi, međutim kontrast između ferita i austenita je vrlo nizak.

Optimalnu kombinaciju variranih parametara EN omjera i plinske mješavine je vrlo teško utvrditi jer niti jedna od testiranih kombinacija ne daje apsolutno najbolje rezultate. Primjerice, uzorak zavaren pod plinskom mješavinom s dodatkom CO₂ dao je odličan udio ferita (45%F), stabilan luk i malo rasprskavanja, no penetracija, nadvišenje i stupanj miješanja su bili povećani što kod navarivanja nije poželjan rezultat. S druge strane, uzorci zavareni pod plinskom mješavinom s dodatkom N₂ dali su poželjniji stupanj miješanja, no stabilnost luka i rasprskavanje je bilo puno lošije nego kod plinova zavarenih s dodatkom CO₂. Najbolje udjele ferita i srednje rezultate stupnja miješanja dali su povećani EN omjeri, no nestabilnost luka, rasprskavanje, nadvišenje i penetracija su rasli.

Za nastavak istraživanja predlaže se dodatno ispitivanje utjecaja porasta EN omjera na udio austenita u zavaru, odnosno ispitati dobije li se maksimalan udio austenita pri EN +25 kao što je to dobiveno u eksperimentalnom dijelu ovoga rada. Također, predlaže se smanjiti korak kako bi se točno moglo zaključiti koji EN daje najbolje rezultate. Za pravilno utvrđivanje rezultata, preporuča se uporaba feritoscopa radi preciznijeg utvrđivanja udjela feritne i austenitne faze te kvantitativna i kvalitativna analiza mikrostrukture. No, za pripremu mikrostrukture odnosno za nagrivanje dupleks čelika bi najpoželjnije bilo koristiti postupak nagrivanja bojom s modificiranim Beraha reagentom (60 mL vode, 30 mL HCl, 0,75 g kalijev bisulfid) kako bi se dobio maksimalan kontrast među fazama i omogućilo lako razlikovanje faza. Dodatna ispitivanja kao što su otpornost na koroziju i udarni rad loma su u tom slučaju neizostavna kako bi se precizno ustanovilo dolazi li do pojave neželjenih faza kao što su intermetalni spojevi, nitridi i slično, koje je vrlo zahtjevno utvrditi analizom mikrostrukture.

Što se tiče navarivanja, u radu je istaknuto kako je potrebno postići što nižu penetraciju, veću širinu, manje nadvišenje zavara i što manji kut prijelaza lica navara na osnovni metal. Kako bi se to ostvarilo, predlaže se smanjiti jakost struje, povećati napon električnog luka, povećati EN

omjer, povećati brzinu zavarivanja, upotrijebiti metodu njihanja te zavarivati u zaštiti četverokomponentne plinske mješavine Ar/He/CO₂/N₂, a razlozi za to su sljedeći:

- smanjenjem struje kao fiksnog parametra dobiva se manja penetracija, a u tom slučaju povećanjem EN omjera penetracija bi se još više smanjivala – pri višim strujama efekt povećanja EN omjera je obrnut, odnosno daje veću penetraciju za veće EN omjere i to je dokazano u eksperimentu,
 - tada će unos topline biti manji, brzine hlađenja veće, no to ne znači nužno da će zavar rezultirati s većim udjelom ferita; primjer je dan u [14] gdje je postupkom PCGTAW pokazano kako uz vrlo visoku stopu hlađenja, oko 139°C/s, udio austenita je porastao tj. postigla se pravilna ravnoteža udjela faza,
- povećanjem EN omjera se dobiva povoljniji balans feritne i austenitne faze,
- povećanjem napona dobila bi se veća širina zavara,
- brzinu zavarivanja treba povećati kako bi se smanjio depozit i nadvišenje zavara, a metodu njihanja upotrijebiti kako bi se pokrio što veći dio površine,
- predlaže se korištenje četverkomponentne plinske mješavine Ar/He/CO₂/N₂ gdje bi He dao veću širinu zavara i nižu penetraciju i omogućio veće brzine zavarivanja, CO₂ potrebnu stabilnost luka (posebno pri većim EN omjerima), smanjio površinsku napetost i poboljšao razlijevanje zavara, a N₂ poticao rast austenitne faze u metalu i zoni utjecaj a ZUT-u zavara,
 - eventualno je moguće koristiti niske udjele O₂ umjesto CO₂,
 - potrebno je pripaziti da maksimalan udio dušika u mješavini za dupleks 2205 bude oko 1,0-1,2% kako ne bi došlo do poroznosti i stvaranja nitrida zbog njegovog prevelikog udjela.

LITERATURA

- [1] Past, present and future of the duplex stainless steels, <https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Pastpresentandfutureoftheduplexstainlesssteels.pdf>, dostupno 22. lipnja 2022.
- [2] Duplex Stainless Steel: Properties, Standards, and Applications, <https://matmatch.com/learn/material/duplex-stainless-steel>, dostupno 22. lipnja 2022.
- [3] IMOA: Duplex stainless steel. <https://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php>, dostupno 22. lipnja 2022.
- [4] K. and L. G. Weman, *MIG welding guide*. Woodhead Publishing, 2006.
- [5] J. E. Talkington, *Variable polarity gas metal arc welding*. The Ohio State University, 1998.
- [6] L. O. Vilarinho, A. S. Nascimento, D. B. Fernandes, and C. A. M. MOTA, "Methodology for parameter calculation of VP-GMAW: A straightforward procedure is presented for the calculation of welding parameters to reach both arc and metal transfer stability," *Welding Journal*, vol. 88, no. 4, 2009.
- [7] A. Ikram and H. Chung, "The effect of EN ratio and current on microstructural and mechanical properties of weld joined by AC-GMAW on square groove butt joints," *Applied Sciences*, vol. 7, no. 3, p. 261, 2017.
- [8] G. R. Mohammed, M. Ishak, S. N. Aqida, and H. A. Abdulhadi, "Effects of heat input on microstructure, corrosion and mechanical characteristics of welded austenitic and duplex stainless steels: A review," *Metals (Basel)*, vol. 7, no. 2, p. 39, 2017.
- [9] HRN EN 1011-3:2001
- [10] ISSF: Stainless steel in figures 2021, [https://www.worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/ISSF Stainless Steel in Figures 2021 English public version.pdf](https://www.worldstainless.org/files/issf/non-image-files/PDF/ISSF%20Stainless%20Steel%20in%20Figures%202021%20English%20public%20version.pdf), dostupno 22. lipnja 2022.
- [11] SANDVIK: DUPLEX STAINLESS STEELS – AN INTERPLAY BETWEEN FERRITE AND AUSTENITE, <https://www.materials.sandvik/en/materials-center/expert-columns/archive/2017/11/duplex-stainless-steels-an-interplay-between-ferrite-and-austenite/>, dostupno 22. lipnja 2022.

- [12] I. Juraga, I. Stojanović, and B. Ljubenković, “Experimental research of the duplex stainless steel welds in shipbuilding,” *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske tehnike*, vol. 65, no. 2, pp. 73–85, 2014.
- [13] V. Hosseini, “Influence of multiple welding cycles on microstructure and corrosion resistance of a super duplex stainless steel,” *University West*, 2016.
- [14] J. Verma and R. V. Taiwade, “Effect of welding processes and conditions on the microstructure, mechanical properties and corrosion resistance of duplex stainless steel weldments—A review,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 25, pp. 134–152, 2017.
- [15] Industeel: Duplex Stainless Steels Welding Guidelines, <https://industeel.arcelormittal.com/wp-content/uploads/2021/03/Duplex-Stainless-Steels-Welding-Guidelines-EN-Juin-2019-Web.pdf>, dostupno 22. lipnja 2022.
- [16] V. A. Hosseini, K. Hurtig, D. Eyzop, A. Östberg, P. Janiak, and L. Karlsson, “Ferrite content measurement in super duplex stainless steel welds,” *Welding in the World*, vol. 63, no. 2, pp. 551–563, 2019.
- [17] B. Varbai, T. Pickle, and K. Májlínger, “Development and comparison of quantitative phase analysis for duplex stainless steel weld,” *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, vol. 62, no. 3, pp. 247–253, 2018.
- [18] HRN EN 1011-1:2009
- [19] B. Mvola and P. Kah, “Effects of shielding gas control: welded joint properties in GMAW process optimization,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 88, no. 9, pp. 2369–2387, 2017.
- [20] HRN EN ISO 14175:2008
- [21] M. Jurica, “Utjecaj zaštitnoga plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80,” University of Zagreb. Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, 2015.
- [22] Shielding gases for welding and their effects on stainless steel properties. <https://www.assda.asn.au/blog/311-shielding-gases-for-welding-and-their-effects-on-stainless-steel-properties>, dostupno 22. lipnja 2022.

- [23] P. Kah and J. Martikainen, "Influence of shielding gases in the welding of metals," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 64, no. 9, pp. 1411–1421, 2013.
- [24] Overview - Weld Overlay Cladding Services. <https://didionvessel.com/pressure-vessels/weld-overlay/>, dostupno 22. lipnja 2022.
- [25] A. S. M. Handbook, "Welding, brazing and soldering," *ASM international*, vol. 6, p. 1187, 1993.
- [26] T. Kannan and J. Yoganandh, "Effect of process parameters on clad bead geometry and its shape relationships of stainless steel claddings deposited by GMAW," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 47, no. 9, pp. 1083–1095, 2010.
- [27] P. K. Palani and N. Murugan, "Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 190, no. 1–3, pp. 291–299, 2007.
- [28] Welbee Inverter W400 Owner's Manual, <https://www.daihen-usa.com/wp-content/uploads/documents/WB-W400P30206-1.pdf>, , dostupno 22. lipnja 2022.
- [29] N. Arif and H. Chung, "Alternating current-gas metal arc welding for application to thick plates," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 222, pp. 75–83, 2015.
- [30] H. J. Park, D. C. Kim, M. J. Kang, and S. Rhee, "The arc phenomenon by the characteristic of EN ratio in AC pulse GMAW," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 66, no. 5, pp. 867–875, 2013.
- [31] S355 EN 10025 : 2004 Standard Structural Steel Plate, https://www.joostdevree.nl/bouwkunde2/jpgs/staal_23_standaarden_s355_european_standard_steel.pdf, dostupno 22. lipnja 2022.
- [32] MIG WELD: WELDING, https://hegpont.hu/wp-content/uploads/2014/08/MIG_WELD_WELDING_EN.pdf, dostupno 22. lipnja 2022.
- [33] MIGAL.CO: Stainless steel welding wire, <https://migal.co/en/products/stainless-steel-welding-wire/4462-2209-ml-2293-nl>, dostupno 22. lipnja 2022.
- [34] HRN EN ISO 14175:2008
- [35] MESSER: Gasses for welding and cutting, <https://applications.messergroup.com/documents/20136/2219613/Welding+gases+and>

- [+their+application.pdf/0084a2af-06bd-93f4-4b92-f80a075fb033?version=1.3&t=1596544633977&download=true](#), dostupno 22. lipnja 2022.
- [36] ESAB: MIG Handbook, https://www.esabna.com/euweb/mig_handbook/592mig4_2.htm, dostupno 22. lipnja 2022.
- [37] M. Luginbühl, R. Lauber, P. Feigenwinter, and A. M. Zbinden, “Monitoring xenon in the breathing circuit with a thermal conductivity sensor,” *J Clin Monit Comput*, vol. 17, no. 1, pp. 23–30, 2002.
- [38] HRN EN ISO 15614-1:2017
- [39] HRN EN ISO 5817:2014
- [40] B. MATEŠA, I. SAMARDŽIĆ, and M. DUNĐER, “ZAVARLJIVOST RAZNOVRSNIH ČELIKA I PRIMJENA SCHAEFFLER-OVOG DIJAGRAMA DISSIMILAR STEELS WELDABILITY AND SCHAEFFLERS DIAGRAM APPLICATION”.

PRILOZI

I. CD-R disk