

Zavarljivost i primjena duplex čelika u brodogradnji

Hnatek, Matija

Undergraduate thesis / Završni rad

2022

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:442738>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-18**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Matija Hnatek

Zagreb, 2022

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh, dipl. ing.

Student:

Matija Hnatek

Zagreb, 2022.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Zoranu Kožuhu na ukazanom strpljenju i podršci prilikom izrade završnog rada.

Hvala asistentu Mislavu Štefoku, mag.ing., na pomoći i savjetima tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se djelatnicima Laboratorija za zavarivanje i Laboratorija za zaštitu materijala na pomoći prilikom izrade eksperimentalnog dijela rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i djevojci Antoniji na beskonačnoj podršci tijekom studiranja i izrade ovog rada.

Matija Hnatek



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:

proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala i mehatronika i robotika



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 22 -	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Matija Hnatek**

JBMAG: **0035216535**

Naslov rada na hrvatskom jeziku:

Zavarljivost i primjena dupleks čelika u brodogradnji

Naslov rada na engleskom jeziku:

Weldability and application of duplex steel in shipbuilding

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno je dati pregled i analizirati osnovne vrste dupleks čelika te navesti njihovu primjenu u brodogradnji. Detaljno objasniti problematiku zavarljivosti dupleks čelika i kako proces zavarivanja utječe na mikrostrukturu zavarenog spoja. Opisati i navesti primjenjive tehnologije zavarivanja dupleks čelika s posebnim naglaskom na MAG zavarivanje. Također je potrebno dati pregled mogućih dodatnih materijala za zavarivanje.

U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno na odgovarajućim uzorcima od dupleks čelika definirati tehnologiju zavarivanja kao i pripremu spoja. Definiranim planom pokusa analizirati utjecaj zaštitnog plina na mikrostrukturu zavarenog spoja. Zavareni spoj potrebno je podvrgnuti ispitivanjima na temelju kojih je moguće analizirati mikrostrukturu metala zavara. Analizom dobivenih rezultata donijeti zaključak o utjecaju parametara zavarivanja na kvalitetu zavarenog spoja.

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

Zadatak zadan:

30. 11. 2021.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Datum predaje rada:

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

Predviđeni datumi obrane:

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

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. DUPLEKS ČELICI I NJIHOVA PRIMJENA	2
2.1. Primjena dupleks čelika u brodogradnji.....	5
2.1.1. Spremnici za transport kemikalija.....	8
2.1.2. Brodski propeleri.....	13
2.1.3. Brodovi visokih performansi od dupleks čelika	14
3. PROBLEMATIKA ZAVARLJIVOSTI DUPLEKS ČELIKA	17
3.1. Štetne pojave koje nastaju tijekom procesa zavarivanja.....	19
3.2. Zavareni spojevi dupleks čelika i drugih materijala	20
3.3. Rukovanje s dupleks čelicima i napomene za zavarivanje	21
4. TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA DUPLEKS ČELIKA	23
4.1. REL postupak zavarivanja dupleks čelika	24
4.2. EPP postupak zavarivanja dupleks čelika	24
4.3. Zavarivanje dupleks čelika praškom punjenom žicom	24
4.4. MIG/MAG i impulsno MIG/MAG zavarivanje dupleks čelika.....	25
4.5. MIG/MAG postupak zavarivanja.....	26
4.6. TIG postupak zavarivanja dupleks čelika	28
5. DODATNI MATERIJAL ZA ZAVARIVANJE DUPLEKS ČELIKA	29
6. ZAŠTITNI PLINOVI ZA ZAVARIVANJE DUPLEKS ČELIKA.....	32
7. EKSPERIMENTALNI RAD.....	35
7.1. Oprema za zavarivanje.....	35
7.2. Osnovni materijal.....	37

7.3. Dodatni materijal.....	37
7.4. Zaštitni plin	39
7.5. Parametri zavarivanja.....	40
7.6. Priprema i izrada uzoraka za mikrostrukturna i makrostrukturna ispitivanja	41
7.7. Mjerenje geometrijskih značajki makroizbrusaka	44
7.8. Analiza rezultata dobivenih mjerenjem geometrijskih značajki navara	46
7.9. Analiza mikrostrukture navarenih uzoraka	49
8. ZAKLJUČAK.....	56
LITERATURA.....	58
PRILOZI.....	60

POPIS SLIKA

Slika 1. Dvofazna mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika [4]	2
Slika 2. Tanker za prijevoz kemikalija Sunrise Hope [9]	6
Slika 3. Shematski prikaz spremnika od dupleks nehrđajućeg čelika na brodu Odfjell SE Bow Star [10]	8
Slika 4. Unutrašnjost spremnika od dupleks čelika na tankeru za prijevoz kemikalija [10].....	9
Slika 5. Prikaz rasporeda spremnika za kemikalije na tankeru tijekom proizvodnje[10]	10
Slika 6. Shematski prikaz presjeka spremnika tankera [8].....	11
Slika 7. Brodski propeler izrađen iz dupleks nehrđajućeg čelika [12].....	13
Slika 8. Vratila broskog propelera od dupleks nehrđajućeg čelika [14]	13
Slika 9. Shema trupa broda izrađenog od dupleks čelika [15]	15
Slika 10. Trup broda od dupleks nehrđajućeg čelika prije poliranja podvodnog dijela i bojanja gornjeg dijela [15]	16
Slika 11. Kvazibinarni dijagram stanja duplex čelika uz 70% Fe = const [7]	17
Slika 12. Promjena udjela austenita i ferita u dupleks čeliku prilikom zagrijavanja [6].....	18
Slika 13. Utjecaj hlađenja od 1200 do 800°C ($t_{12/8}$) na udio austenita [7]	19
Slika 14. Temperaturni raspon nastajanja pojedinih intermetalnih faza dupleks čelika [16] ..	20
Slika 15. Zavareni spoj dupleks čelika i ugljičnog čelika [5]	21
Slika 16. Shema procesa taljenja kod MIG/MAG postupka zavarivanja [17]	26
Slika 17. Shema uređaja za MIG/MAG zavarivanje [17]	27
Slika 18. BUG-O Systems automatizirani sustav za zavarivanje.....	35
Slika 19. Izvor struje DAIHEN Varstroj WB P-500L	36
Slika 20. Uzorci dupleks čelika 2205	37
Slika 21. Zaštitni plin Messer Argon 4,8	39
Slika 22. Zaštitni plin Messer Inoxline N2	39
Slika 23. Navareni uzorci nakon čišćenja	41
Slika 24. Ispitni uzorci nakon grubog brušenja.....	42
Slika 25. PRESI Minitelch 233	42
Slika 26. Oprema za elektrokemijsko nagrizanje uzoraka	43
Slika 27. Pripremljeni uzorci za daljnja ispitivanja.....	43

Slika 28. Geometrija navara uzorka 1A	44
Slika 29. Geometrija navara uzorka 1B.....	45
Slika 30. Geometrija navara uzorka 2A	45
Slika 31. Geometrija navara uzorka 2B.....	45
Slika 32. Grafički prikaz promjene širine metala navara po uzorcima	46
Slika 33. Grafički prikaz promjene nadvišenja metala navara po uzorcima	47
Slika 34. Grafički prikaz promjene penetracije navara po uzorcima	48
Slika 35. Mikroskop Olympus GX51	49
Slika 36. Mikrostruktura osnovnog materijala uz povećanje 200x	50
Slika 37. Mikrostruktura navara uzorka 1A uz povećanje 200x	50
Slika 38. Mikrostruktura navara uzorka 1B uz povećanje 200x	51
Slika 39. Mikrostruktura navara uzorka 2A uz povećanje 200x	51
Slika 40. Mikrostruktura navara uzorka 2B uz povećanje 200x	52
Slika 41. Mikrostruktura korijena navara uzorka 1A uz povećanje 50x	53
Slika 42. Mikrostruktura korijena navara uzorka 1B uz povećanje 50x	53
Slika 43. Mikrostruktura korijena navara uzorka 2A uz povećanje 50x	54
Slika 44. Mikrostruktura korijena navara uzorka 2B uz povećanje 50x	54
Slika 45. Grafički prikaz postotnih udjela ferita i austenita u mikrostrukturi navara i osnovnog materijala	55

POPIS TABLICA

Tablica 1. Popis dupleks čelika i njihovih mehaničkih svojstava [7]	4
Tablica 2. Kemijski sastav nekih dupleks čelika [8]	5
Tablica 3. Usporedba mehaničkih svojstava materijala za spremnike tankera prema ASTM A 240 [11]	10
Tablica 4. Usporedba kemijskog sastava nekih materijala spremnika za tankere prema ASTM A 240 [11].....	11
Tablica 5. Pregled korištenih metoda zavarivanja spremnika tankera sa slike 6. [8].....	12
Tablica 6. Pregled kompatibilnih postupaka zavarivanja dupleks čelika [5].....	23
Tablica 7. Dodatni materijal za zavarivanje dupleks čelika [1]	30
Tablica 8. Primjeri oblika zavarenih spojeva korištenih za zavarivanje dupleks čelika [1]	31
Tablica 9. Zaštitni plinovi za MIG/MAG zavarivanje visokolegiranih čelika [18]	33
Tablica 10. Zaštitni plinovi za TIG zavarivanje visoko legiranih čelika [18].....	34
Tablica 11. Način označavanja uzoraka	35
Tablica 12. Tehničke karakteristike izvora struje DAIHEN Varstroj WB P-500L [19].....	36
Tablica 13. Kemijski sastav dodatnog materijala ML 22.9.3. NL [21].....	38
Tablica 14. Mehanička svojstva dodatnog materijala ML 22.9.3. NL [21]	38
Tablica 15. Kemijski sastav dodatnog materijala Cromacore DW 329AP Duplex [22].....	38
Tablica 16. Mehanička svojstva dodatnog materijala Cromacore DW 329AP Duplex [22] ...	38
Tablica 17. Parametri navarivanja uzoraka	40
Tablica 18. Usporedba geometrije navara makroizbrusaka	44

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
PREN	Pitting Resistance Equivalent Number
EN	Europska norma
UNS	Unified Numbering System
AISI	American Iron and Steel Institute
GDP	Gross domestic product
FRP	Fibre-reinforced plastic
ZUT	Zona utjecaja topline
FCAW	Flux Cored Arc Welding
SAW	Submerged Arc Welding
GMAW	Gas Metal Arc Welding
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
TIG	Tungsten Inert gas
ESW	Electroslag welding
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom
ASTM	American Society for Testing and Materials
WRC	Welding Research Council
FN	Ferrite number

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja
A_5	%	Istezljivost
KU_{DVM}	J	Udarni rad loma prema Charpyju
β	1/K	Izobarni koeficijent prostornog termičkog rastezanja
R_e	MPa	Granica razvlačenja
ϑ_g	°C	Temperatura gašenja
$\vartheta_{r \max}$	°C	Maksimalna temperatura korištenja dupleks čelika
ε	%	Duljinska elastična deformacija
$HV10$	-	Tvrdoća prema Vickersu
I	A	Jakost struje
U	V	Napon
v_z	cm/min	Brzina zavarivanja
t	mm	Debljina osnovnog materijala
d	mm	Udaljenost između dvaju materijala
k	mm	Visina korijena zavara
α	°	Skošenje zavarenog spoja
η	-	Stupanj iskoristivosti postupka zavarivanja

SAŽETAK

U ovome završnom radu analizirana je problematika zavarljivosti dupleks nehrđajućih čelika, te utjecaj parametara zavarivanja na mikrostrukturu zavarenog spoja.

U teorijskom dijelu rada prikazan je detaljan opis dupleks čelika, prikazana je sistematika dupleks čelika, te njihova primjena u brodogradnji. Opisane su štetne pojave koje nastaju prilikom zavarivanja dupleks čelika i na koji način ih eliminirati. Dan je pregled raspoloživih postupaka zavarivanja dupleks čelika, te je detaljnije prikazan MIG/MAG postupak zavarivanja. Prikazani su mogući dodatni materijali i zaštitni plinovi za zavarivanje dupleks čelika.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je navarivanje uzoraka od dupleks čelika 2205, gdje su korištene dvije vrste dodatnog materijala i dvije vrste zaštitnog plina. Potom su izrađeni uzorci na kojima je provedena mikrostrukturna i makrostrukturna analiza.

Ključne riječi: dupleks čelici, MIG zavarivanje, mikrostruktura, brodogradnja

SUMMARY

In this final thesis it is analyzed the problem of duplex stainless steels weldability and how are welding parameters affecting on microstructure of welded joint.

In theoretical part duplex stainless steels are explained in details, systematics of duplex steels is shown and their application in naval architecture. Bad phases which are occurring during welding of duplex steels are shown and how to eliminate them. It is given an overview of available welding procedures for duplex steel welding, while MIG/MAG welding procedure is explained in more details. Different types of filler metals and shielding gases that can be used for welding of duplex steels are shown.

In experimental part of thesis duplex steel 2205 samples are welded, while using two types of filler metal and two types of shielding gas. After that samples were made, on which were conducted microstructural and macrostructural analysis.

Key words: duplex steels, MIG welding, microstructure, Naval architecture

1. UVOD

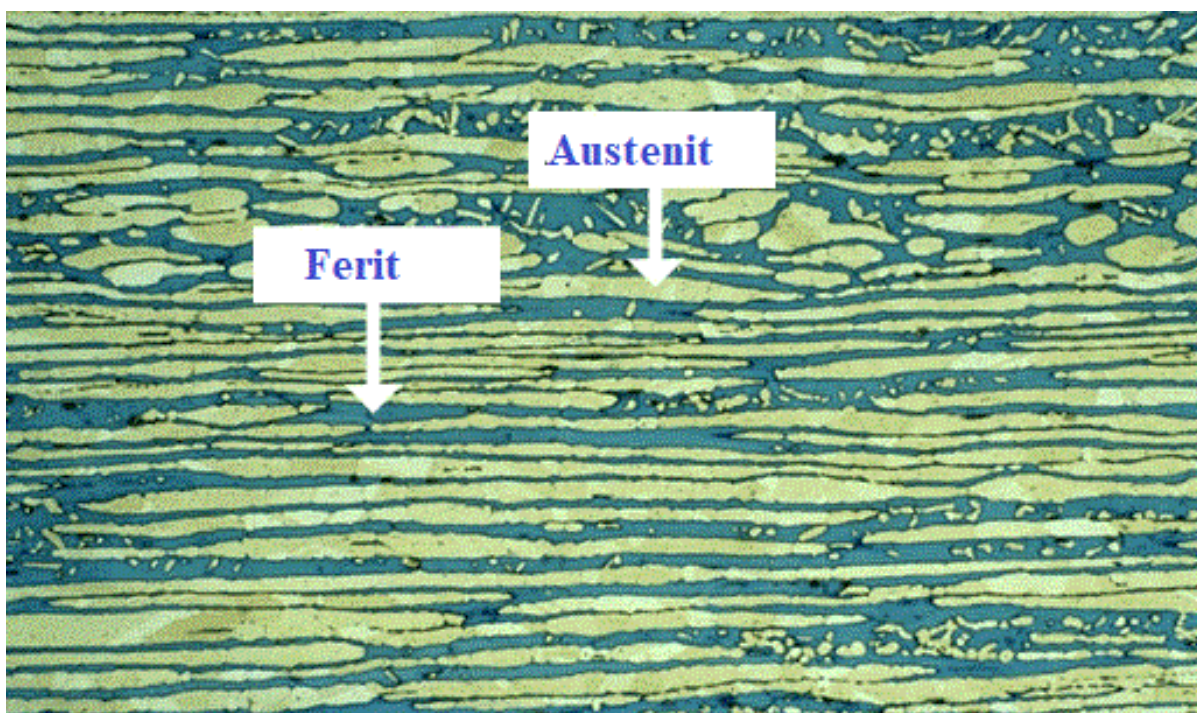
Dupleks nehrđajući čelici, čija se struktura sastoji od približno jednakih omjera ferita i austenita, postoje duže od 90 godina. Prve serije dupleks čelika bile su legure kroma, nikla i molibdena. Prvi kovani dupleks čelik proizveden je u Švedskoj 1930. godine za uporabu u industriji papira. Ova serija čelika je razvijena kako bi smanjila problem interkristalne korozije kod ranih austenitnih nehrđajućih čelika s visokim sadržajem ugljika. Prvi lijevani dupleks čelik proizveden je u Finskoj 1930. godine, patentiran je u Francuskoj 1936. godine, a preteča je današnjeg Uranus 50 nehrđajućeg čelika. Dupleks čelik AISI 329 (1.4460) razvijen je nakon Drugog svjetskog rata, a korišten je za cijevi izmjenjivača topline postrojenja za proizvodnju dušične kiseline. Dupleks čelik 3RE60 (1.4424) je prvi dupleks čelik koji je specifično razvijen radi poboljšane otpornosti prema kloridnoj napetosnoj koroziji. Narednih godina razvijene su brojne vrste dupleks čelika radi primjene u proizvodnji izmjenjivača topline, proizvodnji pumpi, te brodogradnji. [1]

Dupleks nehrđajući čelici su serija čelika koja kombinira svojstva dobre otpornosti na koroziju, visoke čvrstoće i jednostavne proizvodnje. Njihova mehanička svojstva su bolja nego kod austenitnih nehrđajućih čelika, te vrlo slična mehaničkim svojstvima feritnih i ugljičnih čelika. Dupleks nehrđajući čelici su otporni na rupičastu koroziju u kloridima i koroziju u procijepu. Također svi dupleks nehrđajući čelici imaju veću otpornost na napetosnu koroziju u kloridima od bilo kojeg austenitnog nehrđajućeg čelika serije 300. Dupleks nehrđajući čelici pružaju bolju čvrstoću nego austenitni nehrđajući čelici, te ujedno zadržavaju dobru duktilnost i žilavost. [1]

Dupleks nehrđajući čelici pronalaze sve veću upotrebu u sektoru brodogradnje, posebice kod tankera za kemikalije. Istraživanje 138 glavnih distributera kemikalija iz 2012 pokazalo je 1800 aktivnih tankera za kemikalije u to vrijeme, od kojih je njih 400 imalo spremnike od nehrđajućeg čelika. Ta brojka pokazuje potražnju od 75-80 tankera za kemikalije godišnje, od kojih 15-20 sadrži spremnike od nehrđajućeg čelika. Novija statistika iz 2016./2017. objavljena od strane IHS Markit-a otkriva 144 broda sa spremnicima od nehrđajućeg čelika u procesu izgradnje ili u narudžbi. Ovo pokazuje da je tržište za nove tankere kemikalija poraslo 1,3 do 1,7 puta svjetske stope BDP-a. Porast svjetske potražnje za kemikalijama potaknuo je gradnju tankera kemikalija, pogotovo onih koji koriste spremnike od nehrđajućeg čelika. Zamjena brodova, rast tržišta, te promjena u izboru materijala za spremnike tankera potiču proizvodnju desetaka tisuća tona dupleks čelika svake godine. [2]

2. DUPLEKS ČELICI I NJIHOVA PRIMJENA

Dupleks čelici ili austenitno-feritni čelici su vrsta nehrđajućih čelika čija je struktura miješana, te sadrži 40 - 60% ferita, dok je ostatak austenit, što je vidljivo na slici 1. Glavni legirni elementi su krom (18 - 27 %), nikal (5 - 8 %) i molibden (1 - 4 %). Dupleks čelici se odlikuju svojom otpornošću prema rupičastoj i napetosnoj koroziji. Zahvaljujući niskom sadržaju ugljika nisu sklони interkristalnoj koroziji. Zahvaljujući dobroj zavarljivosti, dobrim mehaničkim svojstvima, kao i pogodnim omjerom cijene i svojstava pronalaze primjenu u raznim industrijama kao što su naftna i plinska industrija, kemijska industrija, industrija celuloze i papira, vodovodni sustavi, postrojenja za desalinizaciju, oprema za kontrolu onečišćenja, te brodogradnja [3].



Slika 1. Dvofazna mikrostruktura dupleks nehrđajućeg čelika [4]

Dupleks čelici su atraktivni za korištenje iz razloga što je njihova dvofazna struktura postojana i uz danas kritične oblike agresije, kao što su djelovanje morske vode, djelovanje kloridnih i sumporovodičnih medija, djelovanje jakih oksidirajućih kiselina, interkristalna i jamičasta korozija. [5]

Faktor koji se uzima u obzir prilikom izbora materijala je otpornost na rupičastu (engl. „pitting“) koroziju, koji se iskazuje kao (engl. „Pitting Resistance Equivalent Number“ ili skraćeno PREN. PREN se može iskazati sa ili bez utjecaja dušika, prema formuli [6]:

$$\text{PREN} = \% \text{Cr} + 3,3 \cdot (\% \text{Mo} + 0,5 \cdot \% \text{W}) + (16 \cdot \% \text{N}) \quad (1)$$

Iz formule je vidljivo da molibden (Mo) ima vrlo veliku ulogu u otpornosti na rupičastu koroziju. Što je PREN broj veći, to će biti veća otpornost čelika na rupičastu koroziju i koroziju u procijepu. [6]

Dupleks čelici se prema PREN broju dijele u 3 grupe [6]:

- čelici sa $\text{PREN} < 30$ - lean dupleks čelici
- čelici sa $30 < \text{PREN} < 40$ - standardni dupleks čelici
- čelici sa $\text{PREN} > 40$ - superdupleks čelici.

Stabilna dupleks mikrostruktura, kao i dobra svojstva materijala postižu se legiranjem kemijskim elementima. Najvažniji su krom, nikal, molibden, mangan i dušik. Krom sa minimalnim udjelom od 10,5% omogućuje stvaranje pasivnog filma na površini materijala. Sa porastom udjela kroma, otpornost na koroziju se uglavnom povećava, ali prevelik udio kroma može imati negativan utjecaj na strukturu materijala zbog stvaranja intermetalnih faza. Molibden također povećava otpornost na koroziju, pogotovo u kloridnim okruženjima, ali njegov sadržaj u leguri ne smije biti veći od 4%. Ova dva elementa pridonose stvaranju feritne strukture, zbog čega njihov prevelik sadržaj može imati utjecaja na stabilnost dupleks čelika. Nikal se dodaje dupleks čelicima za stabilizaciju austenita i povećanje žilavosti materijala. Za povećanje otpornosti trošenju legira se manganom koji također povećava vlačnu čvrstoću čelika. Dušik poboljšava otpornost na koroziju, povećava čvrstoću i potiče stvaranje austenita. Zahvaljujući legirnim elementima razvijene su razne vrste dupleks čelika. [7]

U tablici 1. prikazane su neke vrste dupleks čelika i njihova mehanička svojstva.

Tablica 1. Popis dupleks čelika i njihovih mehaničkih svojstava [7]

Oznaka čelika	Ostali sastav	Mehanička svojstva							β , 20-100°C, K ⁻¹
		R_m , MPa	$R_{p0,2}$, N/mm ² , pri:				A_5 , %, min.	KU_{DVM} , J, min.	
			20°C	100°C	200°C	300°C			
X4CrNiMoNb 25 7 2	0,5 Nb	640-900	490	420	370	350	25	55	11,5
X6CrNiMoTi 20 6 2	0,4 Ti	700-750	500-550	-	-	-	40-45	80-100	11,5
X2CrNiMoSi 18 5 3	1,5 Cu 1,7 Si	700-750	500-550	-	-	-	40-45	80-100	11,5
X2CrNiMoN 22 5 3	0,15 N	650-900	440	350	310	280	30	70	11,5
X8CrNiMoN 27 5 2	0,10 N	640-900	490	420	370	350	25	55	11,5
X2CrNiMoN 26 5 4	2,2 Mo 0,35 N	min. 750	590	500	460	440	25	55	-
X3CrNiMoCuN 24 5 2	1,0 Cu 0,10 N	700-750	500-550	-	-	-	40-45	80-100	11,5

Većina naziva dupleks čelika proizlazi iz brojke koja označava njihov standardan udio kroma i nikla. Primjerice dupleks čelik 2205 sadrži 22% Cr i 5% Ni. Dupleks čelik 2205 (EN 1.4462, UNS S31803) je najčešće korišteni dupleks čelik. To je dupleks čelik legiran dušikom. Dušik povisuje i granicu razvlačenja koja je duplo veća nego kod austenitnih nehrđajućih čelika, posebice u zavarenom stanju. [6]

Kemijski sastav pojedinih dupleks čelika prikazan je u tablici 2.

Tablica 2. Kemijski sastav nekih dupleks čelika [8]

Naziv čelika	Naziv po normi		Kemijski sastav (%)										
	EN	UNS	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Cu	W
44LN	-	S31200	0,03	2	0,05	0,03	1	24 - 26	5,5 - 6,5	1,2 - 2,0	0,14 - 0,20	...	...
DP3	-	S31260	0,03	1	0,03	0,03	0,75	24 - 26	5,5 - 7,5	2,5 - 3,5	0,1 - 0,3	0,2 - 0,8	0,1 - 0,5
2205	1.4462	S31803	0,03	2	0,03	0,02	1	23	4,5 - 6,5	2,5 - 3,5	0,08 - 0,20	...	...
Nitronic 19D	-	S32001	0,03	4 - 6	0,04	0,03	1	19,5 - 21,5	1 - 3	0,6	0,05 - 0,17	1	...
AL 2203	-	S32003	0,03	2	0,03	0,02	1	19,5 - 21,5	3 - 4	1,5 - 2,0	0,14 - 0,20	...	...
LDX 2101	1.4162	S32101	0,04	4 - 6	0,04	0,03	1	21 - 22	1,35 - 1,70	0,1 - 0,8	0,20 - 0,25	0,10 - 0,80	...
2205 UR45N	1.4462	S32205	0,03	2	0,03	0,02	1	22 - 23	4,5 - 6,5	3,0 - 3,5	0,14 - 0,20	...	...
2304	1.4362	S32304	0,03	2,5	0,04	0,03	1	21,5 - 24,5	3,0 - 5,5	0,05 - 0,60	0,05 - 0,20	0,05 - 0,60	...
Uranus 52N+	1.4507	S32520	0,03	1,5	0,04	0,02	0,80	24 - 26	5,5 - 8,0	3 - 4	0,20 - 0,35	0,5 - 2,0	...
Ferralium 255	1.4507	S32550	0,04	1,5	0,04	0,03	1	24 - 27	4,5 - 6,5	2,9 - 3,9	0,10 - 0,25	1,5 - 2,5	...
2507	1.4510	S32750	0,03	1,2	0,04	0,02	0,80	24 - 26	6 - 8	3 - 5	0,24 - 0,32	0,5	...
Zeron 100	1.4501	S32760	0,03	1	0,03	0,01	1	24 - 26	6 - 8	3 - 4	0,2 - 0,3	0,5 - 1,0	0,5 - 1,0
329 44L 453S	1.4460	S32900	0,08	1	0,04	0,03	0,75	23 - 28	2 - 5	1 - 2	...	...	...
7Mo Plus	-	S32950	0,03	2	0,04	0,01	0,60	26 - 29	3,5 - 5,2	1,5 - 2,5	0,15 - 0,35	...	...
DP3W	-	S39274	0,03	1	0,03	0,02	0,80	24 - 26	6 - 8	2,5 - 3,5	0,24 - 0,32	0,2 - 0,8	1,5 - 2,5

2.1. Primjena dupleks čelika u brodogradnji

Dupleks čelici se u brodogradnji primjenjuju za izradu propelera i propelerskih osovina, kormila, dijelova crpki, grijača napojne vode, kliznih ležaja, spremnika za prijevoz agresivnih tekućina i raznih vrsta kemikalija itd. [7]

Korozijska postojanost dupleks čelika na opću koroziju je bolja u odnosu na ostale korozijski postojane čelike. Tako će dupleks čelici imati bolju zaštitu od austenitnih u razrijeđenim kiselinama kao što su 40%-tna sumporna kiselina do 50°C, 5%-tna limunska kiselina, 10%-tna mliječna kiselina, 10%-tna octena kiselina itd. Dupleks čelici neće biti otporni na rastaljeni Al,

Sb, Sn, boraks, NaOH, soli, vlažan klorni plin, željezni klorid, barijev klorid, klornu octenu kiselinu, carsku vodicu. [7]

Velika prednost dupleks čelika u odnosu na martenzitne i martenzitno-feritne čelike je ta što su postojani na napetosnu koroziju u kloridnom okruženju. Dupleks čelici su također manje osjetljivi na pojavu vodikove krhkosti, koja se javlja u kloridnoj i sulfidnoj napetosnoj koroziji. Ukoliko čelik sadrži molibden i dušik, povećava mu se otpornost u jako kiselim kloridnim okruženjima. [7]

Dupleks čelici se sve više koriste u brodogradnji zbog svojih dobrih mehaničkih svojstava i korozijske postojanosti. Dupleks čelici se koriste u mnogim korozivnim okruženjima, pri temperaturama od -50°C do 300°C . [7]



Slika 2. Tanker za prijevoz kemikalija Sunrise Hope [9]

Na slici 2. prikazan je prvi tanker na svijetu za prijevoz kemikalija koji koristi kombinaciju dupleks čelika i obloge od nehrđajućeg čelika za konstrukciju spremnika. Brod je izgrađen 2014. godine u Japanu, u brodogradilištu Usuki Shipyard Co. Ltd. Dupleks čelici su korišteni za izgradnju spremnika za prijevoz tereta. [9]

Dupleks čelici su odabrani kao materijal spremnika zbog svoje velike čvrstoće i odličnih korozijskih svojstava u usporedbi sa često korištenim SUS316LN austenitnim nehrđajućim čelikom. Iako se dupleks čelici koriste u brodogradnji već godinama, ovo je prvi put da se

koristi kombinacija dupleks čelika i nehrđajućih čelika za konstrukciju spremnika za prijevoz tereta na tankerima. Također, ovo je prvi brod u Japanu za koji se koristio dupleks čelik umjesto dotad korištenog lean dupleks čelika koji sadrži niži udio nikla. [9]

Na brodu Sunrise Hope dupleks nehrđajući čelik KSUS329J3L zamjenjuje tradicionalno korišteni austenitni nehrđajući čelik SUS316LN za izradu pregrada unutar teretnih spremnika, dok su za vanjski dio pregrade usporedno sa spremnikom korišteni obični nehrđajući čelici tlačno spojeni s ugljičnim čelikom u jednu ploču. [9]

Dupleks čelici su neizostavna stavka u industriji gradnje brodova, gdje se prevoze vrlo korozivne tekućine. Uslijed globalizacije, sve se više proizvoda prijevozi plovilima preko mora. Proizvodi koja se često prijevoze tankerima su primjerice sirovo ulje i uljni produkti, kemikalije, nafta, tekući plin, sumporna kiselina, fosforna kiselina, riblje ulje, lubrikanti, metanol, jestivo ulje, biodizel, octena kiselina, med, sok od naranče, brašno, vino itd. [2]

Spremnici se konstruiraju ovisno o opterećenju i vrsti robe koja se prijevozi. Tako se primjerice ukapljeni zemni plin prijevozi na vrlo niskim temperaturama, oko -164°C , dok se rastaljeni bitumen prevozi u zasebnim spremnicima na vrlo visokim temperaturama, oko 250°C . [2]

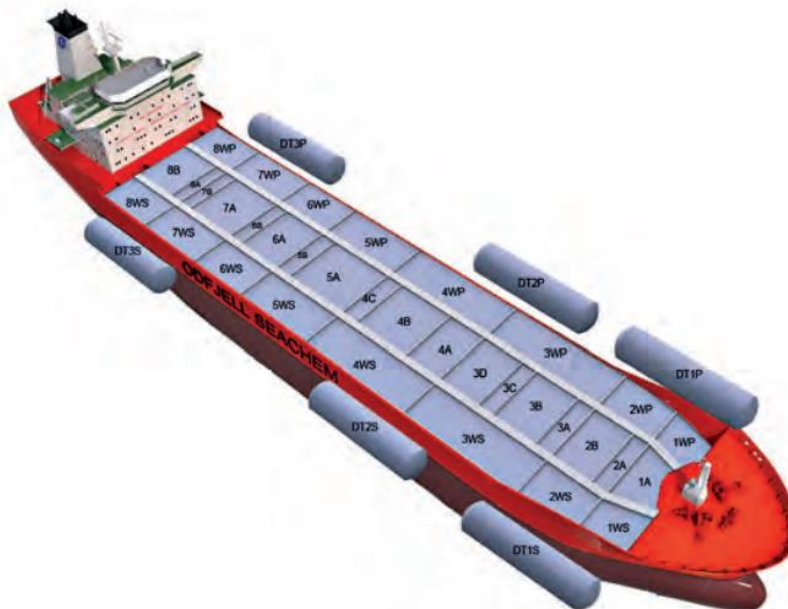
Prednosti korištenja dupleks čelika u brodogradnji [2]:

- vrlo dobra otpornost na koroziju prema raznim medijima i tekućinama
- visoka čvrstoća koja omogućuje izradu konstrukcije sa tanjom stijenkom i profilima smanjene mase, što čini ukupnu masu spremnika i do 40% manjom od mase spremnika izrađenog od konvencionalnog austenitnog čelika
- specijalni profili mogu biti proizvedeni ovisno o zahtjevima projekta
- dobra zavarljivost.

Zbog sigurnosti i zaštite okoliša, danas je potrebno koristiti spremnike za transport sa dvostrukom stijenkom. Često je potrebno koristiti posebne profile od dupleks čelika iz razloga što standardni profili od austenitnih čelika ne zadovoljavaju tražene zahtjeve u pogledu otpornosti na koroziju i čvrstoće. [2]

2.1.1. Spremnici za transport kemikalija

Spremnici za prijevoz tereta moraju zadovoljavati brojne uvjete jer prijevoze razne vrste medija koji su u njima privremeno uskladišteni. Razlozi zbog kojih dupleks čelici sve više zamjenjuju standardne konstrukcijske čelike u izradi spremnika jesu niži troškovi životnog ciklusa (konstruiranje, transport, zavarivanje, troškovi održavanja), dok su u drugu ruku lakši od standardnih čelika. [2]



Slika 3. Shematski prikaz spremnika od dupleks nehrđajućeg čelika na brodu Odfjell SE Bow Star [10]

Tanker za prijevoz kemikalija može se prepoznati po mnoštvu cijevi duž njegove palube. Tekuće kemikalije se provode kroz ove cijevi i skladište u razne spremnike. Tanker prikazan na slici 3. sadrži 34 pravokutnih i kvadratnih spremnika od dupleks čelika ispod palube, te još 6 cilindričnih na palubi. Odfjell SE Bow Star sagrađen je 2004. u Poljskom brodogradilištu Szczecin New Shipyard. Tanker je 183 metra dug i 32 metra širok, dok mu je kapacitet 39832 bruto tona. Za proizvodnju spremnika ovog tankera utrošeno je 3000 tona dupleks čelika i oko 90 tona molibdena, koji čine 52106 kubnih metara skladišnog volumena. [10]



Slika 4. Unutrašnjost spremnika od dupleks čelika na tankeru za prijevoz kemikalija [10]

Unutarnji spremnici sadrže otvore, ljestve, sustave grijanja, cijevi i odvode. Stijenka spremnika je obično 20 do 25mm debljine, te je valovitog oblika kako bi se povećala krutost spremnika, što je prikazano na slici 4. Na taj način poboljšava se strukturna krutost broda, te se štedi na masi u usporedbi sa spremnicima s ravnim stijenkama. Jedna izbočina, odnosno val je metar širok i metar dubok. Proizvođači spremnika moraju primijeniti vrlo precizne tehnike zavarivanja kako bi se osigurao integritet zavara. Nakon zavarivanja slijedi čišćenje kako bi se osigurala kvaliteta zavara i korozijska postojanost površine nehrđajućeg čelika.

Na slici 5. su prikazani spremnici za prijevoz kemikalija na tankeru u tijeku proizvodnje. Odvojeni spremnici za teret omogućuju nezavisan utovar i istovar, te transport više različitih vrsta kemikalija istovremeno. [10]



Slika 5. Prikaz rasporeda spremnika za kemikalije na tankeru tijekom proizvodnje[10]

Prvi spremnici za kemikalije na tankerima su bili izrađivani od nehrđajućeg čelika 304L, dok je danas standard čelik s 2 – 3,5% molibdena. Za izradu spremnika se ponekad koristi austenitni nehrđajući čelik 316, a najčešće se koristi dupleks nehrđajući čelik 2205. [10]

Ova klasa čelika je cijenjena jer je čvršća i korozijski postojanija od austenitnog nehrđajućeg čelika 316. Zbog svoje visoke čvrstoće dupleks čelici zahtijevaju manje željeza, što ih čini lakšima. Dok je vlačna čvrstoća dupleks čelika 20% viša od 316L, granica razvlačenja je 120% viša nego kod 316L. Imaju superiornu otpornost na koroziju, čemu doprinosi dodatak 3% molibdena, što im omogućava transport raznih vrsta agresivnih medija. Usporedba mehaničkih svojstava i kemijskog sastava najčešćih austenitnih nehrđajućih čelika i najčešće korištenog dupleks nehrđajućeg čelika prikazana je u tablici 3. i 4.

Tablica 3. Usporedba mehaničkih svojstava materijala za spremnike tankera prema ASTM A 240 [11]

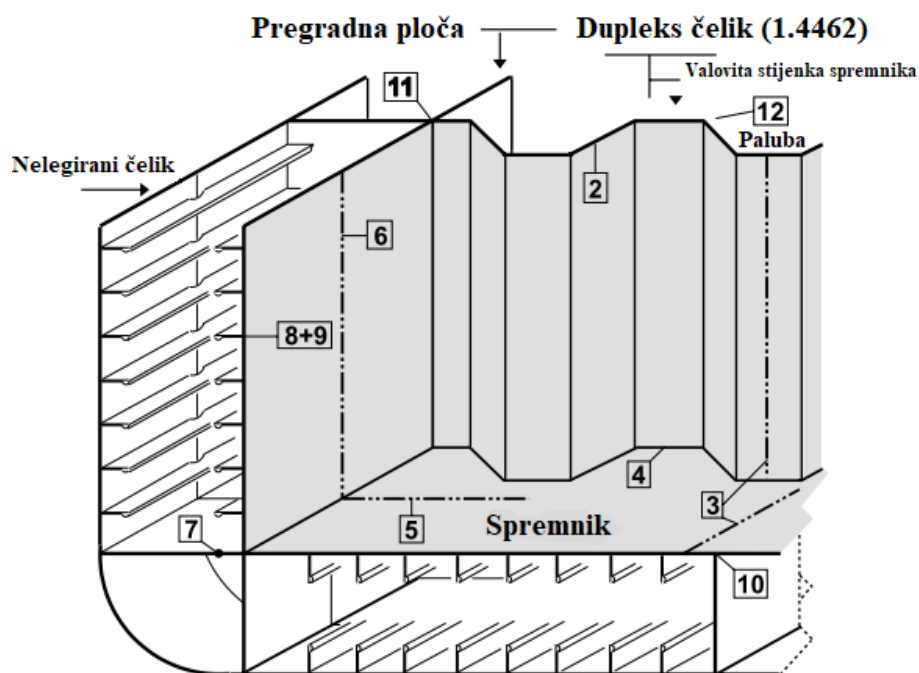
UNS	AISI	R_e , MPa	R_m , MPa	A_4 , %
S31653	316LN	≥ 205	≥ 515	≥ 40
S31753	317LN	≥ 240	≥ 550	≥ 40
S31803	2205 (1.4462)	≥ 450	≥ 620	≥ 25

Tablica 4. Usporedba kemijskog sastava nekih materijala spremnika za tankere prema ASTM A 240 [11]

Osnovni materijal		Kemijski sastav					PREN		
UNS	AISI	C max.	Cr	Ni	Mo	N	min.	max.	srednja vrij.
S31653	316LN	0,03	16-18	10 - 14	2-3	0,10–0,16	24,2	30,5	27,3
S31753	317LN	0,03	18-20	11 - 15	3-4	0,10–0,22	29,5	36,7	33,1
S31803	2205 (1.4462)	0,03	21-23	4,5 – 6,5	2,5 – 3,5	0,08–0,20	30,5	37,8	34,2

Koeficijent toplinske ekspanzije dupleks čelika 2205 je sličan kao i kod austenitnih čelika 304 i 316, što ih čini prikladnima za rad s okolnim konstrukcijama od drugih vrsta čelika. Limovi od dupleks nehrđajućih čelika biti će duplo tanji od onih izrađenih iz austenitnih nehrđajućih čelika, što znači manju količinu zavarivanja i veću nosivost broda. [10]

Zbog sigurnosti i zaštite okoliša, danas je potrebno koristiti spremnike za transport sa dvostrukom stijenkom. Često je potrebno koristiti posebne profile od dupleks čelika iz razloga što standardni profili od austenitnih čelika ne zadovoljavaju tražene zahtjeve u pogledu otpornosti na koroziju i čvrstoće. [2]

**Slika 6. Shematski prikaz presjeka spremnika tankera [8]**

Na slici 6. je prikazan shematski izgled unutrašnjosti spremnika za prijevoz kemikalija na tankerima. Kao što je vidljivo sa slike, unutrašnja stijenka spremnika je napravljena od dupleks nehrđajućeg čelika 2205, dok je vanjska stijenka spremnika napravljena od nelegiranog ugljičnog čelika. Dupleks čelik spremnika tereta i brodograđevni čelik strukture broda imaju sličan faktor toplinskog rastezanja, zbog čega se lako međusobno zavaruju. Položaji zavarivanja, vrste zavarenih spojeva i korišteni postupci zavarivanja spremnika sa slike 6. prikazani su u tablici 5.

Kratice postupaka zavarivanja navedene u tablici 5. imaju sljedeće značenje:

- FCAW (Flux Cored Arc Welding) - Elektrolučno zavarivanje taljivom praškom punjenom žicom
- SAW (Submerged Arc Welding) – Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom pod zaštitom praška ili EPP
- GMAW (Gas Metal Arc Welding) – Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti plina ili MIG/MAG.

Tablica 5. Pregled korištenih metoda zavarivanja spremnika tankera sa slike 6. [8]

Broj (sl. 6.)	Materijal	Položaj zavarivanja	Postupak zavarivanja	Zavareni spoj
1	Dupleks/ dupleks	PB	FCAW	Dvostruki kutni spoj (visina = 4mm)
2		2PD		
3		PA	SAW	I-spoj
4		PB	FCAW	1/2 V-spoj (50°) i kutni spoj
5		PA		
6		PF			V-spoj sa keramičkom podlogom
7	Dupleks/ ugljični čelik	PA	FCAW	Dvostruki kutni spoj (visina = 4mm)
8		PB		
9		PB		
10		PD		
11		PF		
12	Dupleks/ dupleks	PG + PF	GMAW + FCAW	V-spoj (60°)

2.1.2. Brodski propeleri

Osim spremnika za prijevoz kemikalija dupleks čelici služe i za izradu brodskih propelera i vratila propelera. Propeleri izrađeni od dupleks nehrđajućih čelika su duplo izdržljiviji od onih izrađenih od standardnih nehrđajućih čelika, manje se troše, te ih je vrlo lako popraviti. Na slici 7. je prikazan brodski propeler izrađen od dupleks nehrđajućeg čelika.



Slika 7. Brodski propeler izrađen iz dupleks nehrđajućeg čelika [12]

Vratilo propelera jedno je od najvažnijih komponenti motorom pogonjenih brodova. Vratilo mora izdržati visoka naprezanja prilikom prijenosa snage motora na propeler. Također mora biti otporno na koroziju, s obzirom da radi u morskome okruženju. Na slici 8. prikazana su vratila brodskih propelera izrađena od dupleks nehrđajućih čelika. [13]



Slika 8. Vratila broskog propelera od dupleks nehrđajućeg čelika [14]

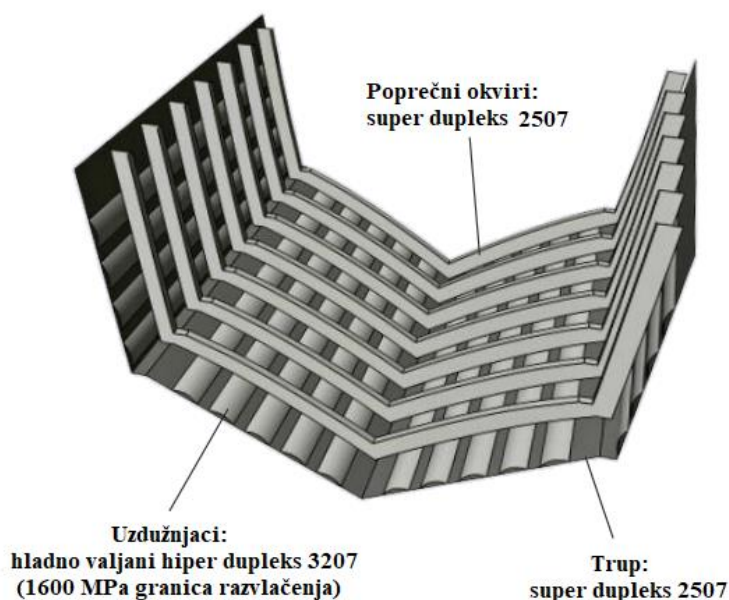
Jahte koje su dugo vremena usidrene u vodi zahtijevaju vratila maksimalne otpornosti na koroziju, za što se najviše koriste austenitni i dupleks nehrđajući čelici. Zahvaljujući svojoj visokoj čvrstoći, dupleks čelici dozvoljavaju smanjenje dimenzija vratila, kućišta i brtvi. Na taj način se ujedno smanjuje težina i otpor, a poboljšavaju se performanse i učinkovitost plovila. [13]

Dupleks čelik 2205 osim što ima veliku čvrstoću i otpornost na koroziju, otporan je na abraziju i eroziju pri velikim brzinama strujanja oko plovila. Dupleks čelici se koriste za izradu vratila i propelera koji rade pri velikom opterećenju i od kojih se zahtijeva veliko ubrzanje, kao što je to kod brodova obalne straže i mega jahti. [13]

2.1.3. Brodovi visokih performansi od dupleks čelika

Ovisno o veličini i svrsi, brodovi se uglavnom izrađuju od čelika, aluminijske i polimera ojačanim vlaknima (engl. „*fibre reinforced plastic*“ - FRP). Brodovi su uglavnom skupi za održavati iz razloga što su konstantno izloženi vodi i vlazi, koja razorno djeluje na bilo koji konstrukcijski materijal tijekom vremena. Čelični brodovi su čvrsti i žilavi, ali čelik je težak i zahtijeva korozijsku zaštitu i dosta održavanja. Aluminij je kao materijal lagan, ali veoma mekan, lako se udubljuje, te ima problema sa zamornim lomovima. Plastika ojačana ugljičnim vlaknima je vrlo lagana, ali skupa, može puknuti ako lupi u kamen, te se zapaliti ukoliko dođe do požara na brodu. [15]

Jedan od najvažnijih konstrukcijskih aspekata koji utječe na performanse broda je njegova masa i kvaliteta površine trupa. Smanjivanjem mase broda povećava se njegova agilnost, maksimalna brzina, te se posljedično smanjuje potrošnja goriva zbog smanjenja otpora broda. Za brodove visokih performansi koji su lagani, brzi i čvrsti, sve se češće koriste nehrđajući čelici, odnosno dupleks i superdupleks čelici. Tradicionalni austenitni nehrđajući čelici tipa 304 i 316 nisu dovoljno korozijski postojani u morskoj vodi. Iako su dosta žilavi, nisu toliko čvrsti. Dupleks čelici imaju odličnu kombinaciju visoke čvrstoće i otpornosti na koroziju. Sa nehrđajućim čelikom koji je tri puta čvršći od standardnog ugljičnog čelika koji se koristi u brodogradnji, moguće je značajno smanjiti debljinu trupa i težinu cijeloga broda. [15]



Slika 9. Shema trupa broda izrađenog od dupleks čelika [15]

Problem tankih ploča je taj što koliko god čvrst materijal bio, on će se savijati pod opterećenjem. Kako bi se riješio taj problem na trup broda od superdupleks čelika 2507 se točkasto zavaruju uzdužnjaci od hiperdupleks čelika 3207, na koje se zatim poprečno zavaruje okvir od superdupleks čelika 2507. Na taj način se dobiva lagana i čvrsta konstrukcija prikazana na slici 9. Plovilo s ovakvim trupom ima snižen otpor, ekonomičnije je, te može izdržati značajan udar bez da procuri ili izgubi strukturni integritet. Dobra duktilnost i svojstva apsorpiranja energije dupleks čelika daju trupu dobra antibalistička svojstva, osiguravajući njegovu deformaciju i apsorpciju udarca bez loma. [15]

Superdupleks čelik 2507 sadrži oko 4% molibdena, a hiperdupleks čelik 3207 sadrži oko 3,5% molibdena. Ova razina molibdena značajno povisuje otpornost na koroziju nehrđajućeg čelika, čineći ga idealnim za okruženja s visokom razinom kloridnih soli kao što je morska voda. [15]

Visokočvrsti nehrđajući čelici također doprinose značajno ekonomičnosti, odnosno sniženoj potrošnji goriva brodova izrađenih od njih. Povećana čvrstoća znači i da će potrebna količina materijala biti znatno manja nego kod tradicionalno konstruiranih brodova. Primjerice stražarski brodovi od nehrđajućeg čelika koji su 15 do 25 metara dugi zahtijevaju ploče nehrđajućeg čelika koje su 2 do 3 mm debljine. To je trećina do petina iznosa debljine čelika koji se tradicionalno koristi pri gradnji brodova. Sve u svemu ovakva agilna plovila imaju 50% manju masu od

sličnih plovila izrađenih od ugljičnih čelika. Također su lakši i od brodova izrađenih od aluminija i plastike ojačane ugljičnim vlaknima. [15]

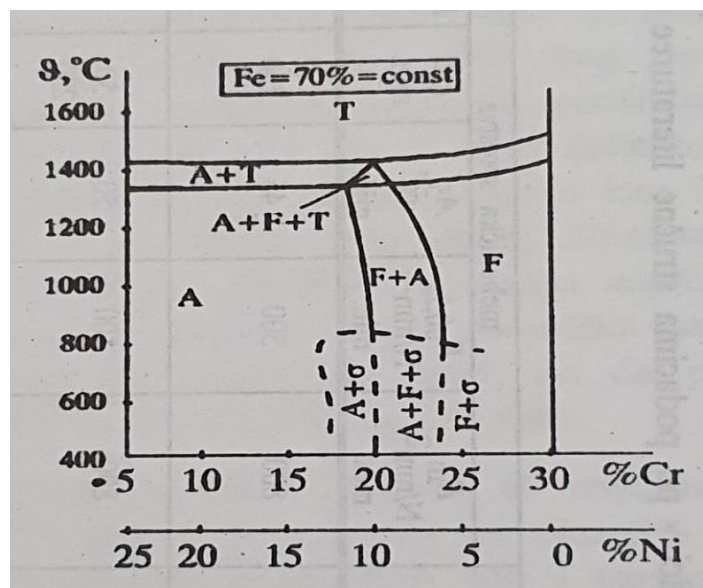
Polirani trup broda od dupleks nehrđajućeg čelika prikazan je na slici 10. Ovakav trup smanjuje otpor i trenje, što pozitivno utječe na ekonomičnost i agilnost plovila. Ovakav trup broda također sprječava morsko obraštanje iz razloga što se školjke teško primaju za ovakvu površinu. Na taj način se izbjegavaju troškovi čišćenja i ponovnog bojanja trupa. Zahvaljujući svojoj lakoći, optimiziranoj konstrukciji i efektivnim tehnikama zavarivanja, ovakvi brodovi od nehrđajućeg čelika koštaju jednako kao i tradicionalni brodovi od aluminija, čelika i kompozitnih materijala. [15]



Slika 10. Trup broda od dupleks nehrđajućeg čelika prije poliranja podvodnog dijela i bojanja gornjeg dijela [15]

3. PROBLEMATIKA ZAVARLJIVOSTI DUPLEKS ČELIKA

Prilikom zavarivanja duplex čelika potrebno je održati dovoljan postotak austenitne strukture u zavarenom spoju, što se postiže korištenjem dodatnih materijala obogaćenih niklom. Sve se češće koristi dušik (N_2) kao zaštitni plin, koji također proširuje područje austenita. Feritizacija je nepoželjna posljedica zavarivanja prilikom koje sadržaj feritne strukture raste i do 80%, zbog čega materijal postaje iznimno krhak. Feritizacija također dovodi do smanjene otpornosti prema koroziji i krhkosti duplex čelika, stoga je posebnu pažnju potrebno obratiti na unos topline prilikom zavarivanja. Rad s duplex čelicima zahtjeva veliku pozornost u svakoj fazi proizvodnog procesa, od skladištenja i rukovanja materijalom, pa sve do zavarivanja i kasnije obrade nakon zavarivanja. [6]



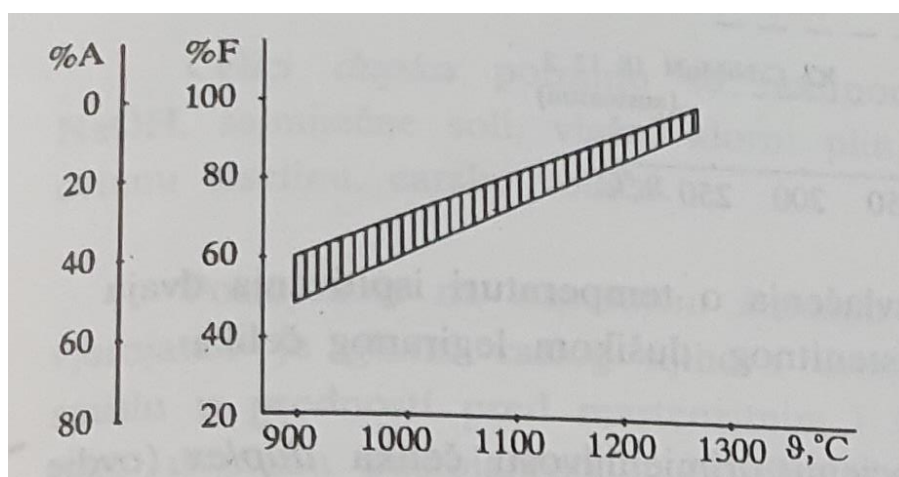
Slika 11. Kvazibinarni dijagram stanja duplex čelika uz 70% Fe = const [7]

Sa slike 11. se može uočiti da će legura s 22 - 24% kroma i 8 - 6% nikla zagrijavanjem do 1000°C i dalje imati strukturu ferita i austenita, u omjeru 60:40 do 40:60. Porastom temperature iznad 1000°C doći će do porasta udjela ferita, a sniženja udjela austenita. Dodavanjem legirajućih elemenata Mo, Si, Ti i Nb (alfageni elementi) potiče se stvaranje ferita, dok se dodavanjem Mn, Cu, N i C (gamageni elementi) potiče stvaranje austenita. No glavni cilj legiranja duplex čelika je održavanje dovoljnog udjela austenita u zavaru. Sniženi udio nikla se kompenzira dodavanjem dušika i mangana. [7]

Svi gamageni elementi će biti otopljeni u austenitu, a alfaženi u feritu, osim u slučajevima kada ugljik i karbidotvorci skupa tvore karbide, željezo i krom tvore σ -fazu (FeCr), a molibden i krom tvore χ -fazu itd. Dalje je vidljivo da u sustavu može nastati σ -faza u austenitu i u feritu. Ova faza se uklanja žarenjem čelika iznad 850°C. [7]

Snižanjem postotka ugljika u čeliku snizuje se i granica razvlačenja čelika, što se kompenzira dodavanjem dušika i molibdena, koji uz Nb sudjeluju u stvaranju precipitata intermetalnih spojeva i time očvršćuju čelik. [7]

Na slici 12. vidljiva je promjena masenog omjera ferita i austenita zagrijavanjem dupleks čelika iznad 900°C.



Slika 12. Promjena udjela austenita i ferita u dupleks čeliku prilikom zagrijavanja [6]

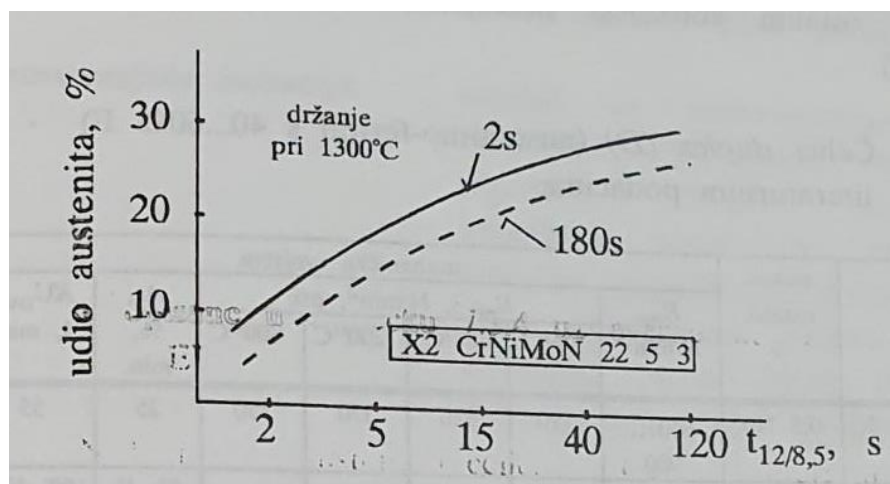
Temperature ispod 1050°C nisu dovoljno visoke da se otopi ranije zaostala σ -faza, zbog čega bi donja granica temperature gašenja (ϑ_g) trebala biti 1000°C.

Pri višim temperaturama žarenja raste udio ferita u dupleks čeliku, a time i problemi povezani sa njime, zbog čega ih se neće zagrijavati iznad 1100°C bez opravdanog razloga. [7]

Slika 13. prikazuje važnost reguliranog hlađenja dupleks čelika, te utjecaj hlađenja na uspostavu dvofazne strukture dupleks čelika. Kao što je vidljivo sa slike, sporim hlađenjem s 1200°C na 800°C postiže se veći udio austenita. Na temperaturi oko 800°C hlađenje treba ubrzati kako bi se izbjegla σ -krhkosti i “krhkost 475”.

Krhkost 475 nastaje u feritnoj fazi dupleks čelika, njegovim dugim izlaganjem temperaturnom rasponu 400 – 520°C. Pri temperaturi od otprilike 475°C dolazi do vrlo izraženog pada žilavosti i istezljivosti dupleks čelika, zbog čega se ova pojava naziva “krhkost 475”.

σ -krhkost nastaje izlučivanjem kromom i molibdenom bogate σ faze u temperaturnom rasponu 600 – 900°C. To je tvrda i krhka faza koja uzrokuje pad žilavosti i pad otpornosti na koroziju dupleks nehrđajućih čelika. [7]



Slika 13. Utjecaj hlađenja od 1200 do 800°C ($t_{12/8}$) na udio austenita [7]

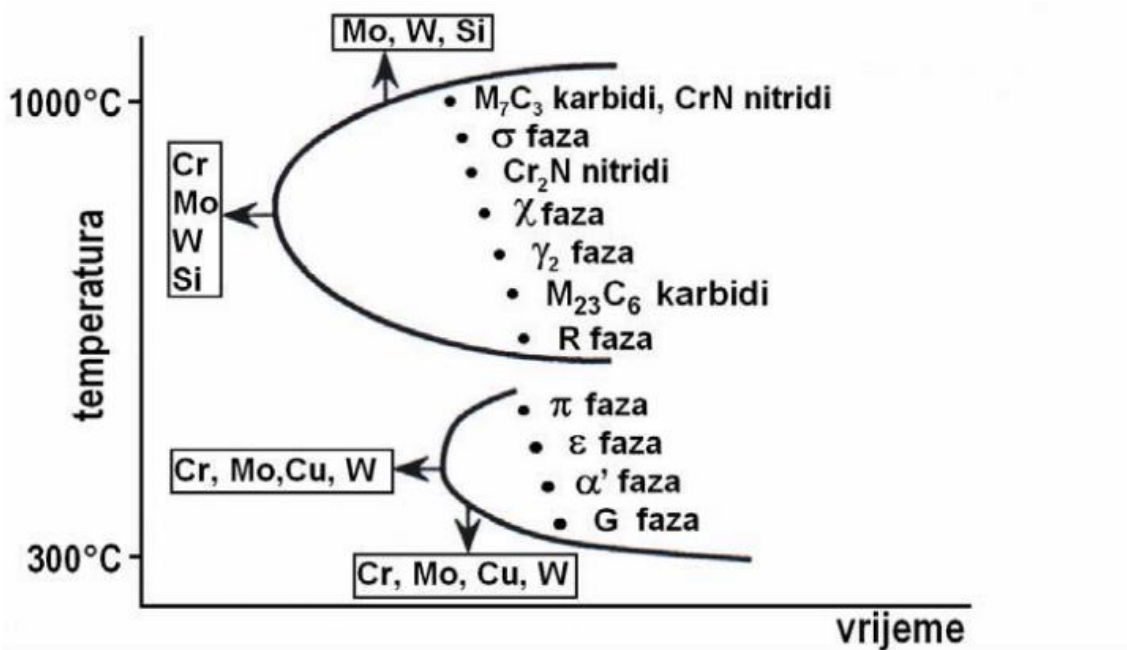
3.1. Štetne pojave koje nastaju tijekom procesa zavarivanja

Dvofaznost dupleks čelika uzrokuje probleme i prilikom zavarivanja. U zoni utjecaja topline (ZUT) se tijekom zavarivanja ovisno o temperaturi mijenja udio ferita i austenita, a u korist ferita. U udaljenijim fazama može doći do izlučivanja kromovih karbida $Cr_{23}C_6$, σ -faze i χ -faze ukoliko čelik sadrži molibden.

Senzibilizacija dupleks čelika je teža ako je u čeliku manje ugljika. Zbog svoje dvofazne strukture, dupleks čelici imaju dva temperaturna raspona za senzibilizaciju, a to je od 550°C do 800°C i 900°C do 1250°C. Do eliminacije senzibilizacije, odnosno ponovne stabilizacije dolazi žarenjem pri 1050°C do 1100°C, nakon čega slijedi gašenje u vodi. No treba imati na umu da se na ovaj način ne eliminiraju precipitati koji nastaju pri temperaturi od 1200°C do 1300°C, koji nastaju u procesu zavarivanja.

Žarenjem na 870°C do 950°C eliminiraju se izlučeni kromovi karbidi na međufaznim granicama. Nakon žarenja slijedi hlađenje na zraku ili gašenje u ulju ili vodi, kako bi se izbjegao ponovni nastanak σ -krhkosti i “krhkosti 475°C”. [7]

Na slici 14. prikazane su moguće intermetalne faze u dupleks čelicima, te temperature pri kojima nastaju.



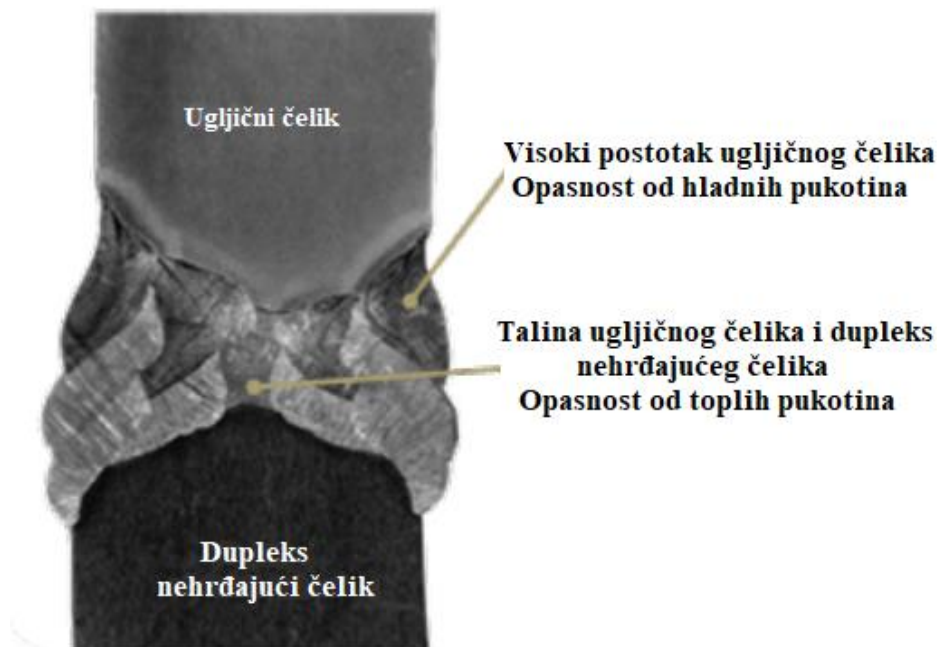
Slika 14. Temperaturni raspon nastajanja pojedinih intermetalnih faza dupleks čelika [16]

Dupleks čelici su skloni stvaranju krhkosti ako su predugo izloženi visokim temperaturama. σ -krhkost nastaje izotermičkim držanjem na 600 do 900°C, a “krhkost 475°C” nastaje držanjem ili sporim hlađenjem u rasponu 400 do 550°C. Ove krhkosti se mogu pojaviti i prilikom preradbe dupleks čelika, ukoliko je hlađenje nakon kovanja ili zavarivanja velikih presjeka presporo, te nije moguće osigurati dovoljno brzo hlađenje jezgre materijala. Krhkost dupleks čelika može nastati i ukoliko se on koristi za rad pri temperaturama većim od 350°C. [7]

3.2. Zavareni spojevi dupleks čelika i drugih materijala

Dupleks čelik se vrlo lako može zavariti za ugljični, niskolegirani ili austenitni nehrđajući čelik. Pritom se može koristiti dodatni materijal od dupleks, superdupleks ili austenitnog nehrđajućeg čelika. Posebnu pozornost je potrebno obratiti na spoj dvaju vrsta materijala kako bi se izbjeglo stvaranje krhke strukture i smanjila opasnost od toplih pukotina. [5]

Na slici 15. prikazan je zavareni spoj ugljičnog čelika i dupleks nehrđajućeg čelika, izveden u više prolaza. Područje zavora u kojem prevladava rastaljeni ugljični čelik je potencijalno izloženo nastanku hladnih pukotina. Područje gdje se miješaju rastaljeni ugljični čelik i dupleks nehrđajući čelik je sklono nastanku toplih pukotina.



Slika 15. Zavareni spoj dupleks čelika i ugljičnog čelika [5]

3.3. Rukovanje s dupleks čelicima i napomene za zavarivanje

Rad s dupleks čelicima zahtijeva dobro poznavanje svojstava materijala, zavarljivosti i korozijske postojanosti kako bi se kvalitetno napravila tehnička dokumentacija tijekom procesa proizvodnje. Neprikladno rukovanje materijalom dovodi do naknadnih intervencija i troškova. Cijena dupleks čelika nekoliko je puta veća od niskougljičnih čelika, što pogreške tijekom procesa proizvodnje čini vrlo skupima. [6]

Prije početka proizvodnog procesa, u fazi skladištenja potrebno je odvojiti dupleks čelike od nelegiranih čelika i čelika s visokom vlačnom čvrstoćom. Ploče i šipke od dupleks čelika moraju biti transportirane bez nanese štete na materijalu. Mehanička šteta uništava pasivni film na površini dupleks čelika, zbog čega materijal postaje sklon koroziji. [6]

Prilikom zavarivanja dupleks nehrđajućih čelika mogu se koristiti svi konvencionalni postupci zavarivanja. Problem kod zavarivanja dupleks čelika je taj što vizualna kontrola zavara nije efektivna, budući da greške nisu vidljive golim okom. Stoga je potrebno provesti makrostrukturnu i mikrostrukturnu analizu. Sve tehnološke operacije tijekom procesa zavarivanja moraju biti odgovarajuće provedene. Tehnološke operacije su rukovanje materijalom, priprema spoja za zavarivanje, izbor dodatnog materijala i zaštitnog plina,

parametri predgrijavanja, parametri zavarivanja, čišćenje zavarenog spoja, naknadna toplinska obrada zavara i pasivacija zavarenog spoja. [6]

Kvalitetno zavaren dupleks nehrđajući čelik zahtijeva odgovarajuće parametre zavarivanja i odgovarajući unos topline tijekom zavarivanja. Ukoliko je unos topline prenizak, udio ferita u materijalu će se povisiti, a korozijska postojanost i mehanička svojstva smanjiti. Ukoliko je unos topline previsok, moguć je nastanak intermetalnih faza u materijalu. Parametri zavarivanja ovise o odabranoj metodi zavarivanja. Izbor zaštitnog plina veoma je važan jer utječe na učinkovitost proizvodnje, mehanička svojstva zavarenog spoja, otpornost na koroziju, izgled i geometriju zavarenog spoja, uspostavljanje električnog luka i njegovu stabilnost. Dodatni materijal mora biti legiran više nego osnovni materijal, a udio nikla u dodatnom materijalu mora biti 2-4% veći od sadržaja nikla u osnovnom materijalu. [6]

Preporuke za zavarivanje dupleks čelika [6]:

- visok unos topline u materijal uzrokuje feritizaciju u zoni zavara i ZUT-u, stoga je preporučeno korištenje metode zavarivanja sa manjim intenzitetom struje, što rezultira manjim unosom topline
- dodatni materijal za zavarivanje dupleks čelika mora imati sadržaj nikla 2-4% veći nego osnovni materijal, dok dušika mora imati malo manje nego osnovni materijal
- maksimalna temperatura međuprolaza mora biti ispod 150°C
- nakon zavarivanja, zavareni spojevi se moraju izbrusiti sa ručnim alatima za primjenu kod dupleks čelika, kako ne bi nastale mehaničke greške koje bi imale negativan učinak na korozijsku postojanost materijala
- kod sučeljenog spoja se preporuča zavarivanje s jedne strane sa keramičkom podlogom kako bi se dobio što bolji izgled korijenskog zavara
- nakon zavarivanja potrebno je provesti kemijsko čišćenje i pasivaciju zavarene površine, kako bi se povećala otpornost na koroziju.


4. TEHNOLOGIJE ZAVARIVANJA DUPLEKS ČELIKA


Dupleks čelici i općenito nehrđajući čelici se mogu zavarivati većinom konvencionalnih postupaka zavarivanja ukoliko se koriste odgovarajući parametri zavarivanja i odgovarajući dodatni materijal. [9] Pregled dostupnih postupaka zavarivanja prikazan je u tablici 6.

Tablica 6. Pregled kompatibilnih postupaka zavarivanja dupleks čelika [5]

	Sa dodatnim materijalom	Bez dodatnog materijala
Klasični postupci zavarivanja	<ul style="list-style-type: none"> - REL - Zavarivanje praškom punjenom žicom (FCAW) - EPP (SAW) 	
	<ul style="list-style-type: none"> - MIG/MAG - TIG - Plazma zavarivanje (PAW) 	<ul style="list-style-type: none"> - TIG - Plazma zavarivanje (PAW)
Posebni postupci zavarivanja	<ul style="list-style-type: none"> - EPP (ESW) 	<ul style="list-style-type: none"> - Zavarivanje laserom - Zavarivanje zrakom elektrona - Varijante TIG-a - Elektrootporno zavarivanje - Zavarivanje trenjem - Elektrolučno zavarivanje svornjaka

Dodatak dušika u zaštitni plin ili naknadna toplinska obrada zavara





Potrebno je napomenuti da zavarivački procesi bez dodatnog materijala zahtijevaju posebnu pozornost zbog gubitka sadržaja dušika u metalu zavara koji se pokušava nadomjestiti dodatkom dušika u zaštitni plin ili naknadnom toplinskom obradom zavarenog spoja, a u svrhu postizanja optimalne mikrostrukture i korozijske postojanosti metala zavara.

4.1. REL postupak zavarivanja dupleks čelika

REL postupak zavarivanja se može koristiti za zavarivanje materijala debljih od 5mm. Dupleks čelici se mogu zavarivati bazičnom, rutilnom i bazično-rutilnom elektrodom. Najveće razine žilavosti i deformabilnosti se postižu sa bazičnim elektrodama. Bazične elektrode će se koristiti u slučajevima kada zavar treba izdržati jake deformacije ili kada zavar mora imati dobra svojstva žilavosti na niskim temperaturama. [5]

Prilikom odabira promjera elektrode u obzir je potrebno uzeti preporučeni unos topline. Zavar je potrebno izvesti bez njihanja, što znači da širina zavara ne smije prekoračiti dva promjera elektrode. Kod izrade korijenskog zavara REL postupkom zavarivanja, potrebno je koristiti zaštitni plin kao kod TIG zavarivanja. Zavarivač mora održavati kratki električni luk kako bi izbjegao kontaminaciju zavara atmosferskim dušikom, koji dovodi do nepoželjne poroznosti metala zavara dupleks čelika koji je već legiran dušikom. [5]

4.2. EPP postupak zavarivanja dupleks čelika

EPP zavarivanje iako nudi veliku produktivnost, ograničeno je na zavarivanje na ravnim površinama, stoga se koristi za sučeljeno zavarivanje ploča. EPP postupak zavarivanja koristi se za zavarivanje ploča debljih od 10 mm u ravnome položaju. Bazičnim praškom dobivaju se najbolja svojstva žilavosti i duktilnosti metala zavara. Korištenjem rutilnog praška lakše se uklanja troska nakon zavarivanja, te je zavar manje osjetljiv na poroznost. [5]

Potrebno je izabrati mali promjer elektrode kako unos topline ne bi bio previsok, zbog čega se često koristi promjer elektrode od 2,4 mm. Za dani unos topline vrlo je važan izbor parametara jakosti struje I , napona U i brzine zavarivanja v_z . Korištenjem umjerene jakosti struje i niske brzine zavarivanja ($v_z < 45\text{cm/min}$), izbjegava se nastajanje pukotina i šupljina prilikom hlađenja materijala, te poroznost materijala zavara. Potrebno je izbjegavati preuske prolaze zavarivanja, kakvi nastaju prilikom CO_2 rezanja ili prestrmog brušenja rubova zavara. Širina zavara mora uvijek biti veća od njene dubine. [5]

4.3. Zavarivanje dupleks čelika praškom punjenom žicom

Prema vrsti punjenja žice moguće je razlikovati žice punjene mineralnim i žice punjene metalnim praškovima. Žice punjene mineralnim praškom mogu biti punjene bazičnim ili

rutilnim metalnim praškovima. Žice s mineralnom jezgrom moguće je koristiti i kod MIG/MAG postupka zavarivanja. Rutilni tip punjene žice stvara metal zavara niske žilavosti, koji je primjenjiv samo pri sobnim temperaturama. Bazični tip praškom punjene žice daje puno kvalitetniji zavareni spoj nego što je to kod žice punjene rutilnim praškom. Spojevi zavareni bazičnom punjenom žicom imaju višu vrijednost udarnog rada loma, te otpornost na krhki lom čak i pri niskim temperaturama. [5]

Prednosti korištenja praškom punjene žice od nehrđajućeg čelika u usporedbi s klasičnom punom žicom [10]:

- mogućnost zavarivanja širokim rasponom jakosti struje
- 30% veći depozit
- glatka površina nadvišenja zavara
- manje pukotina i oksidacije uz zavar
- manje prskanje i manje čišćenja nakon zavarivanja
- bolja svojstva kvašenja
- manja cijena zaštitnog plina (Ar + CO₂ ili 100% CO₂).

4.4. MIG/MAG i impulsno MIG/MAG zavarivanje dupleks čelika

Ovi poluautomatski i automatski procesi koriste se za zavarivanje debljina uglavnom većih od 5 mm [5]:

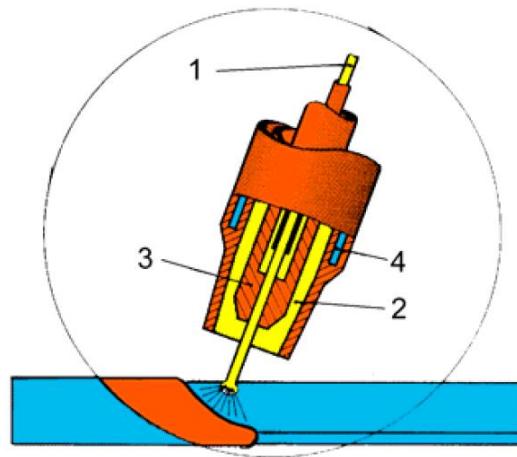
- prijenos kratkim spojevima koristi se za niske unose topline i male debljine materijala (3mm), posebno je koristan kod zavarivanja tankih materijala koji bi se deformirali pod velikim unosom topline
- prijenos štrcajućim lukom postiže se namještenom velikom jakosti struje i visokim naponom, što stvara stabilan luk i veliki depozit materijala, ali je ograničeno na zavarivanje na ravnim površinama
- prijenos impulsnim lukom postiže se pomoću posebnih izvora struje. Prednosti ovog načina prijenosa metala su nizak unos topline i mogućnost zavarivanja u svim položajima.

Zaštitni plin je veoma bitna stavka kod zavarivanja MIG/MAG i impulsnog MIG/MAG zavarivanja dupleks čelika. Zaštitni plin mora spriječiti gubitke dušika iz metala zavara, te njegovu oksidaciju. Kao smjese plinova koriste se smjese 3 plina ($\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{N}_2$) i 4 plina ($\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{He} + \text{N}_2$). Kvaliteta zaštitnog plina mora biti konstantna. Gubitak vode iz vodom hlađenog pištolja ili kontaminacija zavara atmosferskim dušikom moraju se izbjeći zbog gubitka kompaktnosti zavara, odnosno poroznosti u metalu zavara. Kada se korijenski zavar izrađuje MIG postupkom najčešće se koristi čisti argon ($\text{Ar} > 99,95\%$). [5]

4.5. MIG/MAG postupak zavarivanja

Proces zavarivanja se koristi uz upotrebu izvora struje konstantnog napona i varijabilnom kontrolom induktivnosti, odnosno mogućnošću pulsirajućeg strujnog luka.

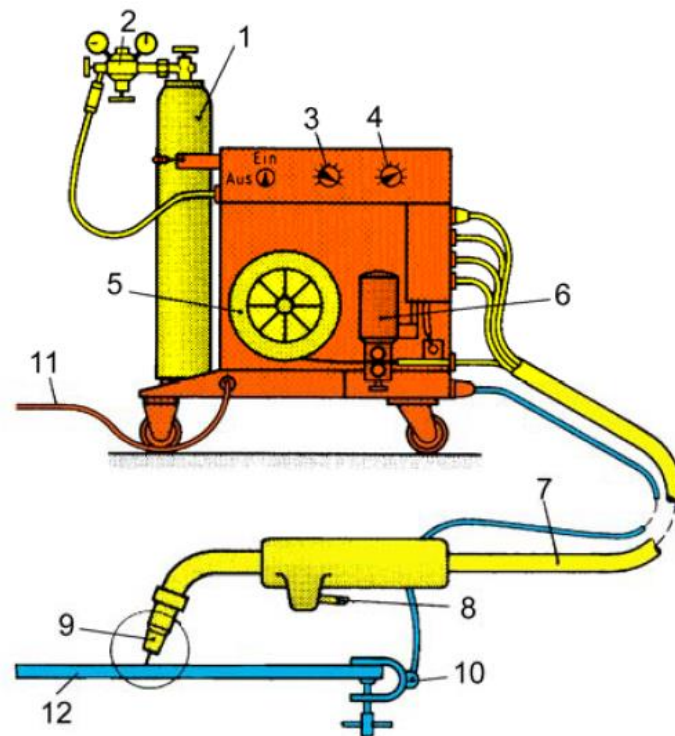
Kod MAG postupka zavarivanja električni luk se održava između taljive kontinuirane elektrode u obliku žice, koja se uglavnom spaja na plus pol istosmjernog izvora struje i osnovnog materijala. Zaštitnu atmosferu osiguravaju aktivni plinovi poput CO_2 i drugih mješavina. [17]



Slika 16. Shema procesa taljenja kod MIG/MAG postupka zavarivanja [17]

Na slici 16. prikazana je shema elektrolučnog zavarivanja taljivom metalnom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plinova. Brojevima je označeno slijedeće [17]:

- 1 - Taljiva metalna elektroda (žica)
- 2 - Zaštitni plin
- 3 - Vodilica žice
- 4 - Sustav hlađenja



Slika 17. Shema uređaja za MIG/MAG zavarivanje [17]

Na slici 17. prikazan je uređaj za MIG/MAG zavarivanje koji se sastoji od sljedećih dijelova [17]:

- 1 - Boca sa zaštitnim plinom
- 2 - Redukcijski ventil
- 3 - Regulator brzine žice
- 4 - Regulator jakosti struje zavarivanja
- 5 - Kalem žice
- 6 - Pogon žice
- 7 - Savitljivo crijevo
- 8 – Pištolj
- 9 – Sapnica
- 10 - Kleme mase
- 11 - Strujni vodič
- 12 - Osnovni materijal

4.6. TIG postupak zavarivanja dupleks čelika

TIG ručni ili automatski koristi se za zavarivanje ploča dupleks čelika koje su tanje od 15 mm ili za korijenske prolaze, dok se popuna radi REL ili EPP postupkom zavarivanja. TIG postupak zavarivanja stvara najčišći metal zavara s najmanjim udjelom kisika u usporedbi s ostalim postupcima.

Kod korištenja žice od dupleks čelika preporuča se korištenje smjese zaštitnog plina Ar (98%) + N₂ (2%). Dodatni dušik se može dodati, ali također može dovesti do uništenja volframove elektrode. U ovom slučaju dodatak dušika u zaštitnom plinu je važan zbog očuvanja zadovoljavajuće mikrostrukture i prikladne korozijske postojanosti. U slučaju da je dodatni materijal austenitni čelik, kao zaštitni plin se mora koristiti čisti argon.

Brzina protoka zaštitnog plina mora se pažljivo namjestiti u skladu s promjerom mlaznice i difuzorom plina. Turbulencije odnosno prevelika brzina protoka mora se izbjegavati zbog unošenja atmosferskog zraka u rastaljeni metal zavara. Udaljenost volframove elektrode od mjesta zavarivanja ne smije prelaziti veličinu dva do tri promjera elektrode, osim kada pištolj ima sapnicu s mrežicom koja povećava stabilnost protoka. U tom slučaju udaljenost od 20mm može riješiti problem teške dostupnosti pojedinih mjesta. Pritom je potrebno kontrolirati dodatak dušika u metal zavara, jer u suprotnom može doći do smanjivanja udjela ferita, te stvaranja grešaka. U tom slučaju kao zaštitni plin potrebno je koristiti čisti argon (Ar > 99,95%).

Zavar mora biti ravan, odnosno bez njihanja električnog luka, sa umjerenim debljinama zavara. Predebeli prolazi zavara su osjetljiviji na poroznost zbog otežanog otplinjavanja. Plinovi za zavarivanje s dodatkom vodika nisu dopušteni za zavarivanje dupleks čelika zbog opasnosti od stvaranja krhkosti metala zavara.

Kod TIG zavarivanja je potrebno koristiti konstantan izvor struje, po mogućnosti sa visokofrekventnim strujnim krugom radi lakšeg ostvarivanja električnog luka. TIG postupak zavarivanja dupleks čelika se treba provoditi uz primjenu istosmjerne struje, te negativnim polaritetom na elektrodi. Primjena istosmjerne struje i pozitivnog polariteta na elektrodi uzrokovala bi vrlo brzo trošenje volframove elektrode. [5]

5. DODATNI MATERIJAL ZA ZAVARIVANJE DUPLEKS ČELIKA

Dupleks čelik 2205 moguće je zavariti za ugljične čelike, niskolegirane čelike ili austenitne nehrđajuće čelike uz uporabu superdupleks, dupleks, 309L ili 309LMo dodatnog materijala. Prilikom korištenja austenitnog dodatnog materijala smanjuje se vlačna čvrstoća u usporedbi sa osnovnim materijalom zbog nižeg sadržaja dušika i sadržaja ferita u zavarenom spoju.

Za zavarivanje dupleks čelika najčešće se koristi dodatni materijal od dupleks čelika sa povećanim udjelom nikla u odnosu na osnovni materijal. Povećanim udjelom nikla u dodatnom materijalu moguće je osigurati formiranje adekvatne razine austenita u metalu zavara prilikom hlađenja.

Prilikom zavarivanja dupleks nehrđajućeg čelika za austenitni, koristi se dodatni materijal od austenitnog nehrđajućeg čelika sa niskim sadržajem ugljika i molibdena. Za to se najčešće koristi AWS E309LMo/ER309LMo. Za zavarivanje dupleks čelika i ugljičnih čelika, te niskolegiranih čelika, koristi se isti dodatni materijal ili AWS E309L/ER309L. Ukoliko se koristi dodatni materijal koji sadrži nikal, on nebi smio sadržavati niobij. Budući da austenitni nehrđajući čelici imaju nižu čvrstoću od dupleks nehrđajućih čelika, zavareni spojevi sa austenitnim dodatnim materijalom neće biti čvrsti kao osnovni materijal od dupleks čelika.

Prilikom zavarivanja dupleks čelika, zavar mora biti potpuno provaren, te ne smije biti uključaka ili pora u metalu zavara. Pripremu zavarenog spoja je najbolje provesti mehaničkom obradom umjesto brušenja ruba zavara. Prilikom brušenja, posebnu pažnju je potrebno obratiti na ujednačenu pripremu zavara. Oštri rubovi i izbočine moraju se ukloniti kako bi se postigao potpuni spoj i penetracija. Prilikom zavarivanja austenitnog nehrđajućeg čelika, iskusni zavarivač može nadvladati nedostatke u pripremi spoja zavara manipulacijom pištolja za zavarivanje. Kod dupleks čelika isti taj postupak može uzrokovati predugo izlaganje potencijalno štetnom temperaturnom rasponu, što je nepoželjno. [1]

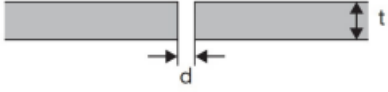
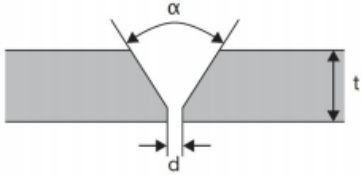
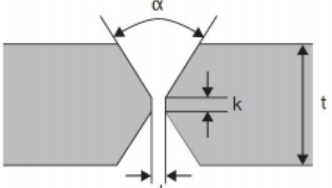
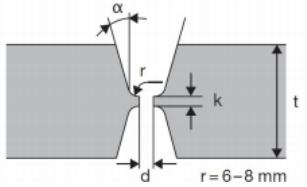
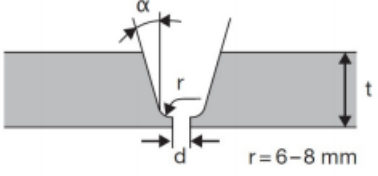
Vrste dodatnih materijala koje se koriste prilikom zavarivanja dupleks čelika u različitim kombinacijama prikazane su u tablici 7.

Tablica 7. Dodatni materijal za zavarivanje dupleks čelika [1]

	Lean dupleks	Standardni dupleks	25 Cr dupleks Superdupleks
Lean dupleks	E2309 E2209 E309L	E2209	E2209
Standardni dupleks	E2209	E2209	E2594
25 Cr dupleks Superdupleks	E2209	E2594	E2594
304	E309L E309LMo E2209	E309LMo E2209	E309LMo E2209
316	E309LMo E2209	E309LMo E2209	E309LMo E2209
Ugljični čelik Niskolegirani čelik	E309L E309LMo E2209	E309L E309LMo E2209	E309L E309LMo E2209

U tablici 8. prikazani su oblici zavarenih spojeva koji se koriste prilikom zavarivanja dupleks čelika. Moguće je koristiti i druge oblike spojeva ukoliko spoj osigurava potpunu penetraciju zavara, te smanjuje opasnost od prevelikog unosa topline.

Tablica 8. Primjeri oblika zavarenih spojeva korištenih za zavarivanje dupleks čelika [1]

Oblik spoja	Postupak	Debljina t , mm	Zračnost d , mm	Korijen k , mm	Skošenje α , °
	TIG	>3	1-3	-	-
	MIG/MAG	>3	1-3	-	-
	REL	>3	1-3	-	-
	REL	3-15	1-3	1-2	55-70
	TIG	2,5-8	1-3	1-2	60-70
	MIG/MAG	3-12	1-3	1-2	60-70
	EPP	4-12	0-3	1-5	70-80
	REL	>10	1,5-3	1-3	55-65
	MIG/MAG	>10	1,5-3	1-3	60-70
	EPP	>10	0	3-5	90
	REL	>25	1-3	1-3	10-15
	MIG/MAG	>25	1-3	1-3	10-15
	EPP	>25	0	3-5	10-15
	REL	12-60	1-2	2-3	10-15
	TIG	>8	1-2	1-2	10-15
	MIG/MAG	>12	1-2	2-3	10-15
	EPP	>10	1-2	1-2	10-15

6. ZAŠTITNI PLINOV I ZA ZAVARIVANJE DUPLEKS ČELIKA

Zaštitni plinovi su plinovi koji se koriste tijekom zavarivanja kako bi se postigli optimalni rezultati zavarivanja. Zaštitni plinovi sprječavaju reakciju atmosferskog kisika s talinom, što dovodi do razvoja korozije, izgaranja legiranih elemenata i na kraju pada kvalitete zavarenog spoja.

Zaštitni plinovi za zavarivanje koriste se u elektrolučnom zavarivanju u kojemu se termalna energija dobiva iz električnog luka. Danas na tržištu prevladavaju plinske mješavine za MIG i TIG postupke zavarivanja, koje se sastoje od niza komponenti kao što su argon, CO₂, kisik, helij, dušik i vodik.

MAG i MIG postupci zavarivanja su se pokazali kao vrlo moderni i efikasni postupci zavarivanja. MAG postupak zavarivanja koristi aktivne zaštitne plinove, a to su najčešće mješavine argona i CO₂, odnosno argona i O₂. U usporedbi s MAG postupkom zavarivanja, kod MIG postupka se koriste inertni plinovi. Ova vrsta plina neće reagirati s osnovnim materijalom ni dodatnim materijalom, primjenjivi su i pri visokim temperaturama, te se koriste prilikom zavarivanja nehrđajućih čelika i zavarivanja neželjeznih materijala.

Messer ima veliki izbor standardiziranih plinskih mješavina za sve navedene primjene. Cijeli asortiman se može podijeliti na temelju materijala za koje je skupina plinskih mješavina namijenjena [18]:

- Ferroline – zaštitni plinovi za nelegirane i niskolegirane čelike
- Inonline – zaštitni plinovi za visokolegirane čelike i čelike na bazi nikla
- Aluline – zaštitni plinovi za aluminij i neželjezne materijale.

U tablici 9. prikazani su zaštitni plinovi proizvođača Messer za zavarivanje visokolegiranih čelika MIG/MAG postupkom. Argon je najčešće korišten zaštitni plin, te je glavna komponenta ostalih mješavina zaštitnih plinova. Tako se primjerice Inonline C2 sastoji od 98% argona i 2% ugljičnog dioksida. Plinske mješavine koje sadrže helij i argon koriste se za dobivanje zavarenih spojeva visoke kvalitete, te za zavarivanje debljih materijala. [18]

Tablica 9. Zaštitni plinovi za MIG/MAG zavarivanje visokolegiranih čelika [18]

Naziv plina	ISO 14175	Kemijski sastav (% u volumenu)						Glavna upotreba
		Ar	CO ₂	O ₂	He	H ₂	N ₂	
Inoxline C2	M12	98	2	-	-	-	-	Visokolegirani čelici
Inoxline X2	M13	98	-	2	-	-	-	Visokolegirani čelici
Inoxline X8	M22	92	-	8	-	-	-	Visokolegirani čelici
Inoxline C3 X1	M14	96	3	1	-	-	-	Visokolegirani čelici
Inoxline C5 X5	M23	90	5	5	-	-	-	Niskolegirani i visokolegirani čelici
Inoxline He15 C2	M12	83	-	2	15	-	-	Visokolegirani čelici
Inoxline He30 H2 C	Z	67,88	0,12	-	30	2	-	Legure na bazi nikla

Potrošnja zaštitnog plina ovisi o načinu prijenosa metala električnim lukom tijekom postupka zavarivanja. U načinu prijenosa metala kratkim spojevima pri struji 150A potrošnja zaštitnog plina iznosi oko 12 do 15 l/min. Kod prijenosa štrcajućim lukom te impulsnim lukom pri struji zavarivanja 300A, potrošnja zaštitnog plina iznosit će 15 do 18 l/min. Kod visokoučinskog zavarivanja pri struji od 350A potrošnja plina iznosit će 20 do 25 l/min. Količina zaštitnog plina može se regulirati mjeračem protoka. [18]

U tablici 10. prikazane su mješavine plinova u Messerovoj ponudi, koji služe za zavarivanje visokolegiranih čelika TIG postupkom zavarivanja.

Tablica 10. Zaštitni plinovi za TIG zavarivanje visoko legiranih čelika [18]

Proizvod	ISO 14175	Kemijski sastav (% u volumenu)						Glavna upotreba
		Ar	CO ₂	O ₂	He	H ₂	N ₂	
Argon 4,6	I1	100	-	-	-	-	-	Svi visokolegirani čelici
Argon 4,8	I1	100	-	-	-	-	-	Svi visokolegirani čelici
Inoxline H2	R1	98	-	-	-	2	-	Svi visokolegirani čelici
Inoxline H5	R1	95	-	-	-	5	-	Visokolegirani čelici i austenitni čelici
Inoxline H7	R1	92,5	-	-	-	7,5	-	Visokolegirani čelici i austenitni čelici
Inoxline He3 H	R1	95,5	-	-	3	1,5	-	Visokolegirani čelici i austenitni čelici
Inoxline N2	N2	97,5	-	-	-	-	2,5	Dupleks i superdupleks čelici
Inoxline N1	N2	98,75	-	-	-	-	1,25	Dupleks i superdupleks čelici

7. EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni rad je proveden u svrhu analize utjecaja zaštitnog plina, dodatnog materijala i parametara zavarivanja na mikrostrukturu i makrostrukturu zavarenog dupleks čelika. Navarivanje uzoraka je provedeno u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Kao osnovni materijal korišten je dupleks čelik 2205. Navarivanje uzoraka izvedeno je pomoću automatskog uređaja BUGO MDS 1002 koji je bio uparen sa MIG aparatom za zavarivanje marke DAIHEN Varstroj WB-500L. Također su korištene dvije vrste dodatnog materijala, puna žica i praškom punjena žica, te dvije vrste zaštitnog plina, 100% argon komercijalnog naziva Argon 4,8, te 2,5% dušik i 97,5% argon komercijalnog naziva Inonline N2. Ukupno je navareno četiri različita uzorka, posebno za svaki plin, te posebno za svaku žicu. Označavanje uzoraka je prikazano u tablici 11. Nakon navarivanja slijedilo je izrezivanje makroizbrusaka i analiza mikrostrukture, te analiza geometrije navara.

Tablica 11. Način označavanja uzoraka

	Puna žica	Praškom punjena žica
Argon 4,8	1A	2A
Inonline N2	1B	2B

7.1. Oprema za zavarivanje

BUG-O automat za zavarivanje je modularni automatizirani sustav koji omogućava razne konfiguracije uređaja za različite primjene. Sastoji se od upravljačke jedinice MDS-1002, pogonske jedinice, nosača pištolja za zavarivanje MDS 1040, nosača pogonske jedinice, te tračnica, odnosno zubne letve. Cijeli sustav je prikazan na slici 18.



Slika 18. BUG-O Systems automatizirani sustav za zavarivanje

Kao izvor struje korišten je MIG/MAG uređaj za zavarivanje marke DAIHEN Varstroj Welbee P-500L koji je prikazan na slici 19. To je najnovija generacija izvora struje koja ima mnoge prednosti u ručnom i automatiziranom zavarivanju. Tehničke karakteristike ovog uređaja prikazane su u tablici 12.



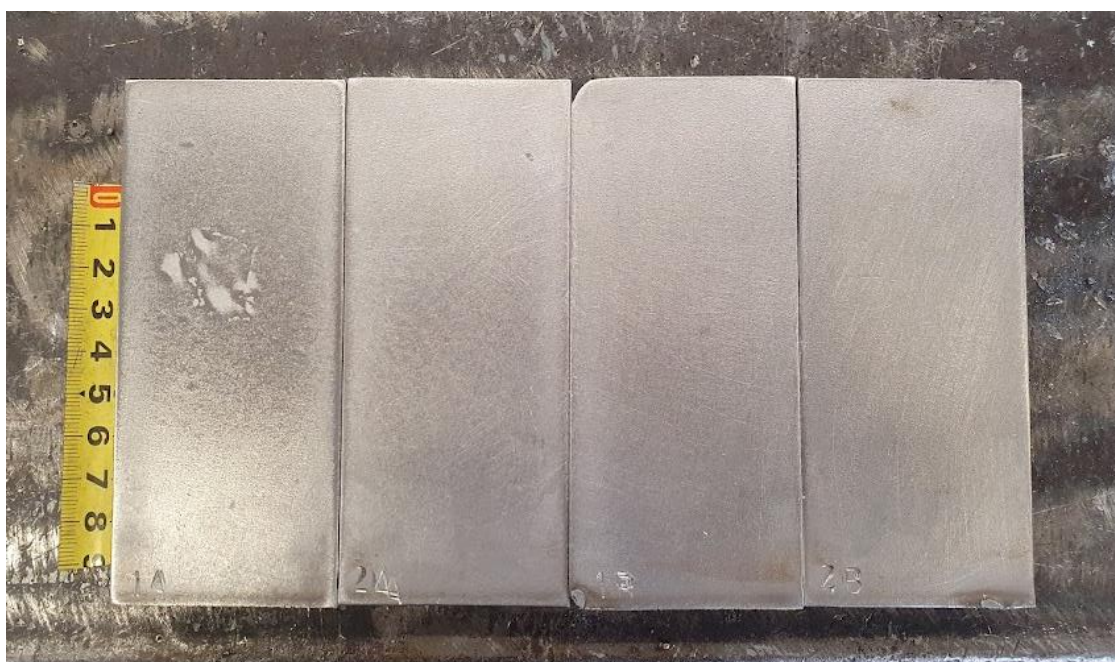
Slika 19. Izvor struje DAIHEN Varstroj WB P-500L

Tablica 12. Tehničke karakteristike izvora struje DAIHEN Varstroj WB P-500L [19]

Frekvencija	50/60 Hz	
Priključni napon	3 x 400 V ± 15%	
Nazivna ulazna snaga	25 kVA, 22,9 kW	
Način rada	DC	Impulsno
Struja zavarivanja	30 - 500 A	30 - 400 A
Napon zavarivanja	12 - 39 V	12 - 34 V
Intermitencija pri 400A	60%	80%
Radna temperatura	-10 – 40°C	
Masa	83 kg	
Vanjske dimenzije (ŠxDxV)	395 mm x 710 mm x 762 mm	

7.2. Osnovni materijal

Osnovni materijal korišten u eksperimentu je dupleks nehrđajući čelik 2205, čija su mehanička svojstva ranije prikazana u tablici 1, a kemijski sastav u tablici 2. Prema EN ISO 10028-7 još se označava kao 1.4462 – X2 Cr Ni Mo N 22-5-3. PREN vrijednost ovog čelika je veća ili jednaka 33. Predgrijavanje i naknadno toplinsko zagrijavanje čelika nakon zavarivanja nije preporučeno [20]. Prije procesa zavarivanja površina uzoraka je izbrušena brusnim papirom i očišćena etilnim alkoholom, kako bi se uklonile nečistoće i masnoće. Pripremljeni uzorci dupleks čelika 2205 prikazani su na slici 20. Dimenzije uzoraka su 116 x 50 x 135 mm.



Slika 20. Uzorci dupleks čelika 2205

7.3. Dodatni materijal

Prilikom navarivanja dupleks čelika 2205 korištene su dvije vrste dodatnog materijala, puna žica i praškom punjena žica, obje promjera 1,2 mm. Puna žica je žica od dupleks čelika 1.4462, odnosno ML 22.9.3. NL proizvođača MIG WELD. Koristi se za zavarivanje dupleks čelika, te ju odlikuje vrlo dobra otpornost na rupičastu i interkristalnu koroziju. Također ima dobru otpornost na napetosnu koroziju, posebno u okruženju koje sadrži kloride i sumporovodik [21]. Kemijski sastav ovog dodatnog materijala prikazan je u tablici 13, a mehanička svojstva u tablici 14.

Tablica 13. Kemijski sastav dodatnog materijala ML 22.9.3. NL [21]

Naziv	Kemijski sastav, %								
ML 22.9.3. NL	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
	≤0,020	0,50	1,60	≤0,020	≤0,015	23	9	3,2	0,16

Tablica 14. Mehanička svojstva dodatnog materijala ML 22.9.3. NL [21]

Naziv	Mehanička svojstva			
ML 22.9.3. NL	$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	A, %	KV, J
	600 (20°C); 420 (300°C)	750 (20°C); 600 (300°C)	25 (20°C); 20 (300°C)	130 (20°C); 50 (-196°C)

Drugi korišteni dodatni materijal je Cromacore DW 329AP Duplex, rutilnim praškom punjena žica. Ona stvara depozit od dupleks nehrđajućeg čelika sa niskim sadržajem ugljika, te nominalnim feritnim brojem FN 40. Koristi se za zavarivanje dupleks čelika, pri čemu pruža odličnu kombinaciju visoke čvrstoće i vrlo dobre otpornosti na rupičastu i napetosnu koroziju. Ova žica pruža vrlo stabilan električni luk bez puno prskanja. Površina zavara je ravna, te se troska sama otpušta nakon zavarivanja [22]. Tipični kemijski sastav ovog dodatnog materijala je prikazan u tablici 15., dok su mehanička svojstva prikazana u tablici 16.

Tablica 15. Kemijski sastav dodatnog materijala Cromacore DW 329AP Duplex [22]

Naziv	Kemijski sastav, %											
Cromacore DW 329AP	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	N
	0,02	0,8	1,3	0,02	0,007	22,9	9,2	3,0	0,02	0,1	0,08	0,1

Tablica 16. Mehanička svojstva dodatnog materijala Cromacore DW 329AP Duplex [22]

Naziv	Mehanička svojstva			
Cromacore DW 329A	$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	A5, %	KV, J
	610	800	32	42 (-46°C)

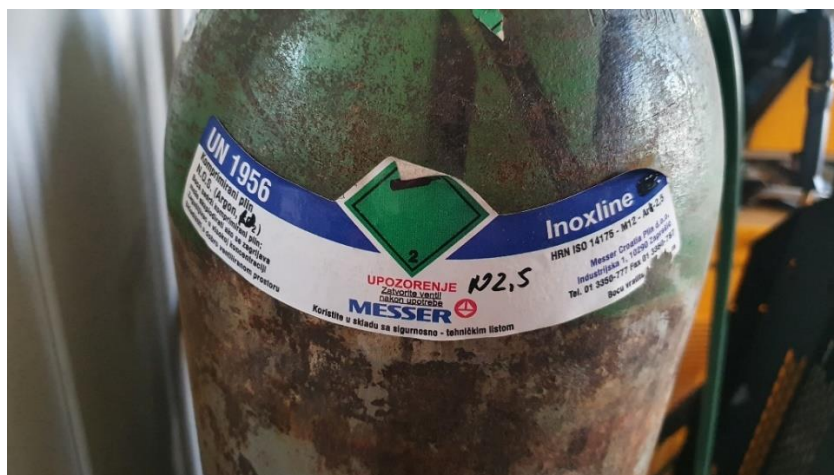
7.4. Zaštitni plin

Budući da je u eksperimentalnom dijelu rada bilo potrebno ispitati utjecaj zaštitnog plina na mikrostrukturu zavarenog spoja, korištene su dvije vrste zaštitnog plina. Prvi je argon 4,8 proizvođača Messer, što je ustvari 99,998% čisti argon, a prikazan je na slici 21. Argon ne reagira s ostalim plinovima, što ga čini idealnim plinom za zavarivanje. Argon za razliku od dušika ostaje inertan i pri vrlo visokim temperaturama, te je odličan plin za MIG i TIG zavarivanje.



Slika 21. Zaštitni plin Messer Argon 4,8

Drugi korišteni plin tijekom eksperimentalnog dijela rada bio je Inoxline N2 proizvođača Messer, slika 22., čiji je kemijski sastav prikazan u tablici 10. Ovaj plin se posebno koristi za zavarivanje dupleks i superdupleks čelika. Zahvaljujući dodatku dušika povećava se otpornost zavora na koroziju, te se postiže idealan omjer austenita i ferita u zavoru.



Slika 22. Zaštitni plin Messer Inoxline N2

7.5. Parametri zavarivanja

Unos topline prilikom zavarivanja računa se prema sljedećoj formuli:

$$Q = \eta * \frac{I * U}{v_z} * \frac{60}{1000}, \text{ kJ/mm}, \quad (2)$$

gdje je:

I – jakost struje zavarivanja, A

U – napon zavarivanja, V

v_z – brzina zavarivanja, mm/min

η - stupanj iskoristivosti postupka zavarivanja, te za MIG iznosi 0,8.

Jakost struje držana je konstantnom, te je iznosila 200 A tijekom navarivanja svakog od uzoraka. Napon se mijenjao tijekom procesa navarivanja, a u tablici 17. je dana srednja vrijednost napona zavarivanja očitana sa upravljačkog sučelja izvora struje DAIHEN Varstroj Welbee P-500L. Unos topline tijekom procesa zavarivanja dupleks nehrđajućih čelika mora biti unutar određenih granica. Prenizak unos topline dovodi do visoke brzine hlađenja, što uzrokuje visoku razinu ferita, a previsok unos topline dovodi do precipitacije intermetalnih faza. Prema normi EN 1011-3: 2000, niskolegirani i srednjelegirani dupleks nehrđajući čelici se zavaruju sa unosom topline od 0,5 kJ/mm do 2,5 kJ/mm, dok se visokolegirani dupleks čelici zavaruju sa unosom topline od 0,2 kJ/mm do 1,5 kJ/mm [22]. Također je potrebno napomenuti da su ovo samo preporuke i da unos topline ovisi i o procesu zavarivanja i debljini materijala koji se zavaruje. U skladu s preporučenim unosom topline i očitanim podacima napona i jakosti struje zavarivanja, prema izrazu (2) određena je brzina zavarivanja koja je držana konstantnom tijekom procesa navarivanja i iznosila je 35,5 cm/min.

Tablica 17. Parametri navarivanja uzoraka

	Jakost struje, A	Napon, V	Brzina zavarivanja, cm/min	Protok plina, l/min	Brzina žice, m/min	Unos topline, kJ/mm
1A	200	27	35,5	16	6,9	0,73
1B	200	27	35,5	16	6,9	0,73
2A	200	27,6	35,5	16	10	0,75
2B	200	27,6	35,5	16	10	0,75

Kao način zavarivanja korišten je impulsni MIG postupak. Navarivanje je provedeno u vodoravnom položaju sa neutralnom tehnikom rada, odnosno pištoljem za zavarivanje pod kutem od 90°.

Protok plina je također bio konstantan tijekom procesa zavarivanja, te je iznosio 16 l/min. Plin počinje teći 2 sekunde prije početka zavarivanja i još teče 3 sekunde nakon završetka zavarivanja. Slobodni kraj žice je iznosio 1,5 mm.

Na slici 23. prikazani su navareni uzorci nakon hlađenja na zraku i čišćenja žičanom četkom. Vizualnim pregledom navarenih uoraka moguće je primijetiti manje prskanje metala na uzorcima 2A i 2B kod kojih je kao dodatni materijal korištena praškom punjena žica u odnosu na uzorke 1A i 1B kod kojih je korištena puna žica.

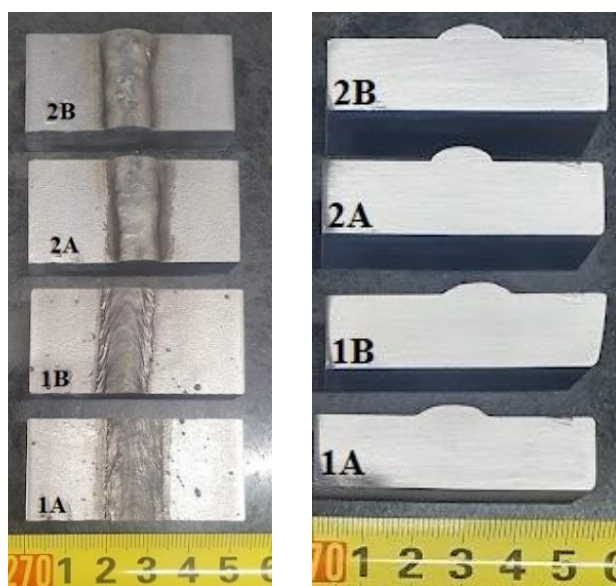


Slika 23. Navareni uzorci nakon čišćenja

7.6. Priprema i izrada uzoraka za mikrostrukturna i makrostrukturna ispitivanja

Iz svakog navarenog uzorka izrezuje se po jedan ispitni uzorak pomoću tračne pile. Prema normi 15614-1, uzorci moraju biti izrezani s mjesta uzorka koje sadrži što manje grešaka i nesavršenosti. Uzorke je potrebno izrezati na minimalno 2,5 cm udaljenosti od početka zavara [23]. Izrezani ispitni uzorci prikazani su na slici 24. Nakon izrezivanja uzoraka slijedilo je ručno

brušenje brusnim papirima redom: P100, P150, P280, P400, P600. Površina uzoraka nakon grubog brušenja je vidljiva na slici 24. desno.



Slika 24. Ispitni uzorci nakon grubog brušenja

Nakon grubog brušenja uzoraka slijedi poliranje na uređaju PRESI Minitech 233. Brzina rotacije je podešena na 300 okr/min. Uzorci se poliraju brusnim papirima sve sitnije granulacije, te se na kraju završava brusnim papirom zrnatosti P4000. Uzorci se pritom hlade vodom koja služi kao sredstvo za hlađenje i za odvođenje odvojenih čestica. Uređaj za poliranje ispitnih uzoraka prikazan je na slici 25.



Slika 25. PRESI Minitech 233

Nakon poliranja uzoraka slijedi elektrokemijsko nagrizanje u 10%-tnoj oksalnoj kiselini. Uzorci su nagrizani 10 sekundi pri struji od 10 A i 10 V. Uređaj za nagrizanje uzoraka se sastoji od izvora struje i kutije s kiselinom u koju se uranja uzorak, što je prikazano na slici 26.



Slika 26. Oprema za elektrokemijsko nagrizanje uzoraka

Gruba priprema uzoraka i poliranje je provedeno u Laboratoriju za zavarivanje, dok je nagrizanje provedeno u Laboratoriju za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Nakon nagrizanja, na uzorcima se jasno može razlikovati zavar, zona utjecaja topline i osnovni materijal. Na slici 27. su prikazani gotovi i obrađeni uzorci.



Slika 27. Pripremljeni uzorci za daljnja ispitivanja

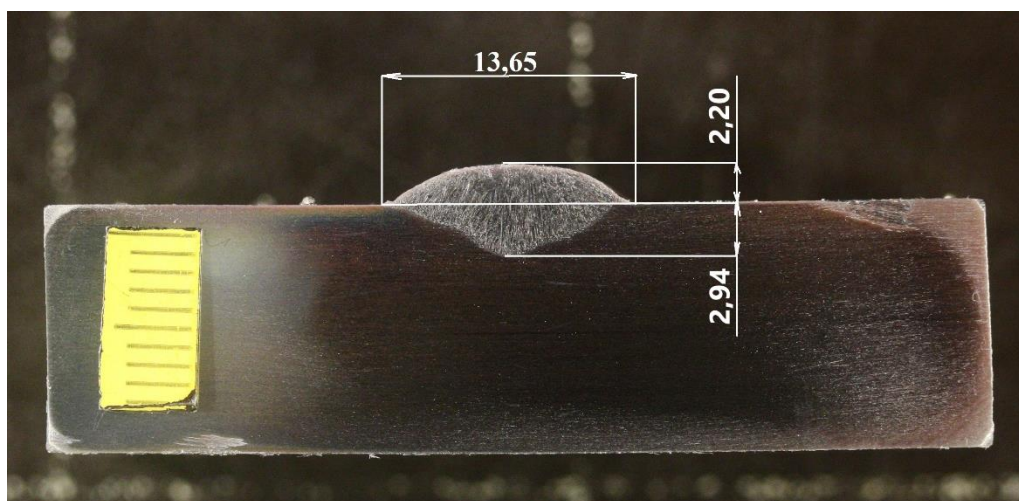
7.7. Mjerenje geometrijskih značajki makroizbrusaka

Pripremljeni uzorci se zatim fotografiraju, te se pomoću dobivenih fotografija analizira makrostruktura uzoraka. U programu ImageJ mjere se širina, nadvišenje, penetracija i površina metala zavara. Prije početka mjerenja potrebno je pomoću naredbe Set Scale postaviti odnos piksela i milimetra. Izmjerene vrijednosti prikazane su u tablici 18.

Tablica 18. Usporedba geometrije navara makroizbrusaka

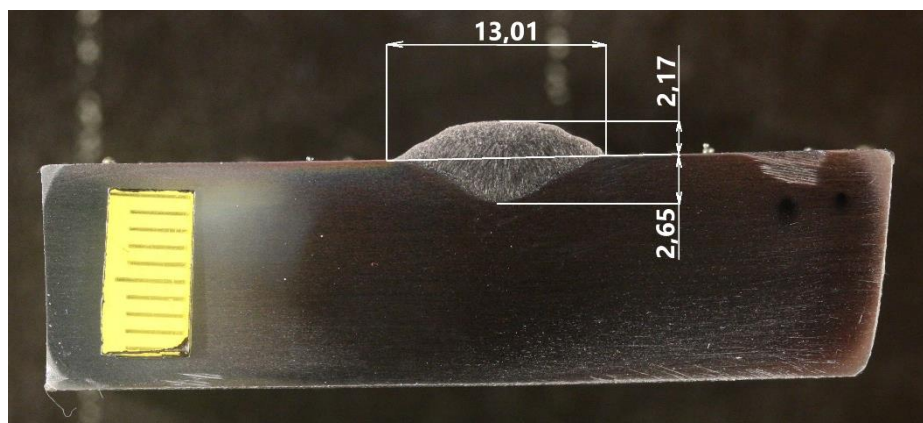
Oznaka uzorka	Širina metala zavara, mm	Nadvišenje metala zavara, mm	Penetracija, mm	Površina metala zavara, mm ²
1A	13,65	2,20	2,94	38,43
1B	13,01	2,17	2,65	36,53
2A	11,03	2,76	1,14	29,83
2B	11,98	2,85	1,37	31,52

Na slici 28. prikazana je geometrija navara makroizbruska 1A.



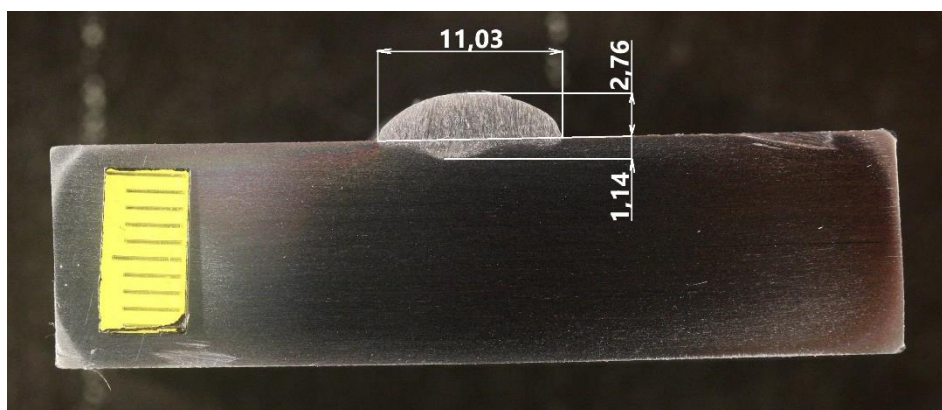
Slika 28. Geometrija navara uzorka 1A

Na slici 29. prikazana je geometrija navara makroizbruska 1B.



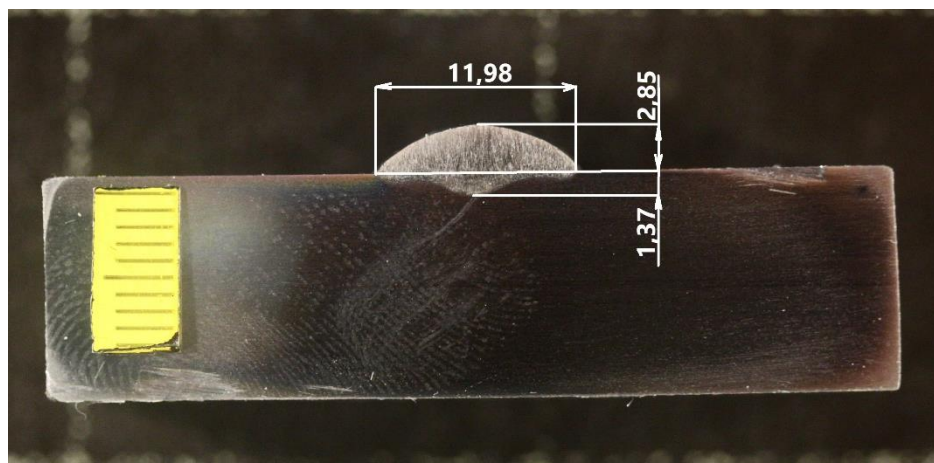
Slika 29. Geometrija navara uzorka 1B

Na slici 30. prikazana je geometrija navara makroizbruska 2A.



Slika 30. Geometrija navara uzorka 2A

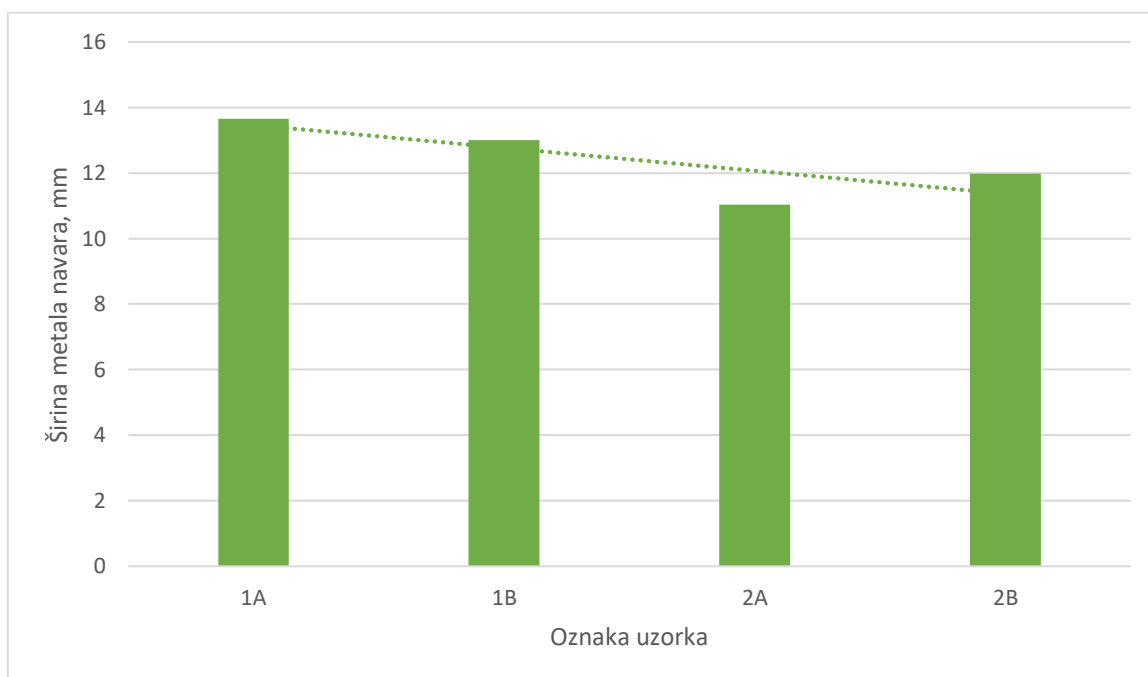
Na slici 31. prikazana je geometrija navara makroizbruska 2B.



Slika 31. Geometrija navara uzorka 2B

7.8. Analiza rezultata dobivenih mjerenjem geometrijskih značajki navara

Izmjereni rezultati širine metala navara prikazani su grafički na slici 32.



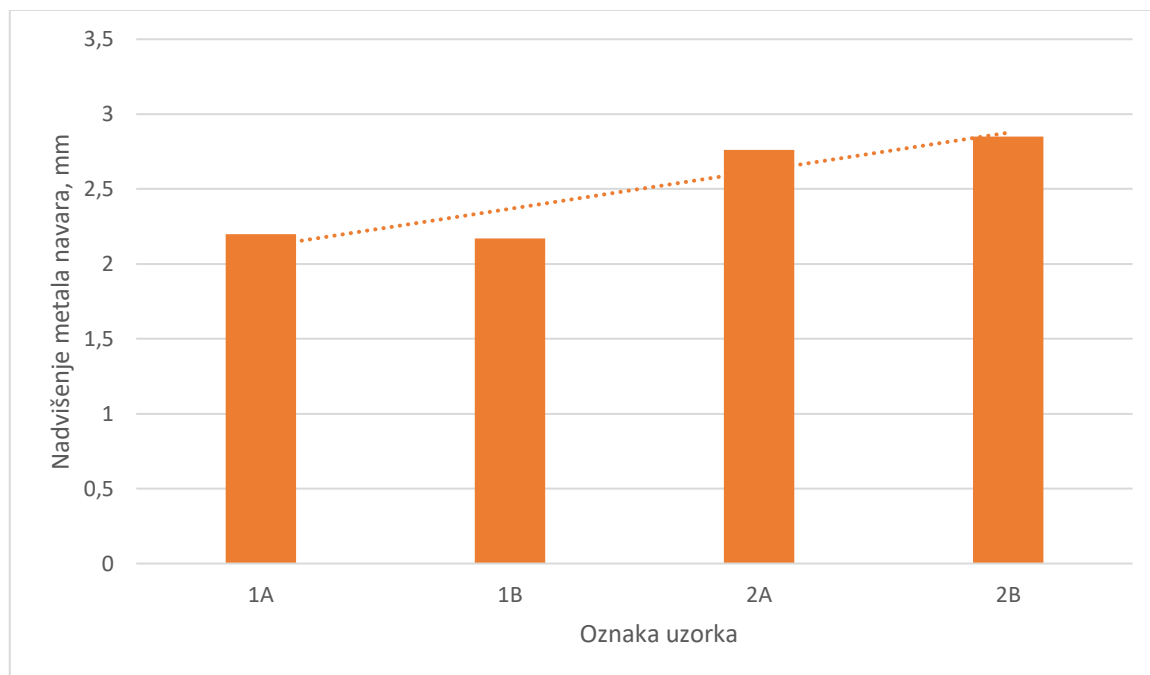
Slika 32. Grafički prikaz promjene širine metala navara po uzorcima

Na slici je vidljiv trend pada širine metala navara među uzorcima. Na uzorcima 1A i 1B kod kojih je korištena puna žica AWS ER 2209 (DIN 8556 - 1.4462), postignuta je 9 – 24 % veća širina navara u usporedbi s uzorcima 2A i 2B, kod kojih je korištena praškom punjena žica AWS E 2209T 1-4/-1 (Cromacore DW 329AP Duplex).

Usporedbom uzoraka 1A i 1B, gdje A označava zaštitni plin 100% argona (Argon 4,8), a B označava plin sadržaja 2,5% dušika i 97,5% argona (Inoxline N2), vidljivo je da je uporabom 100% argona postignuta 5% veća širina navara u odnosu na uzorak pod zaštitom dušika i argona.

Usporedbom uzoraka 2A i 2B, moguće je primijetiti da je korištenjem zaštitnog plina Inoxline N2 postignuta 9% veća širina navara u odnosu na uzorak gdje je korišten Argon 4,8.

Slika 33. grafički prikazuje rezultate mjerenja nadvišenja metala navara po uzorcima.



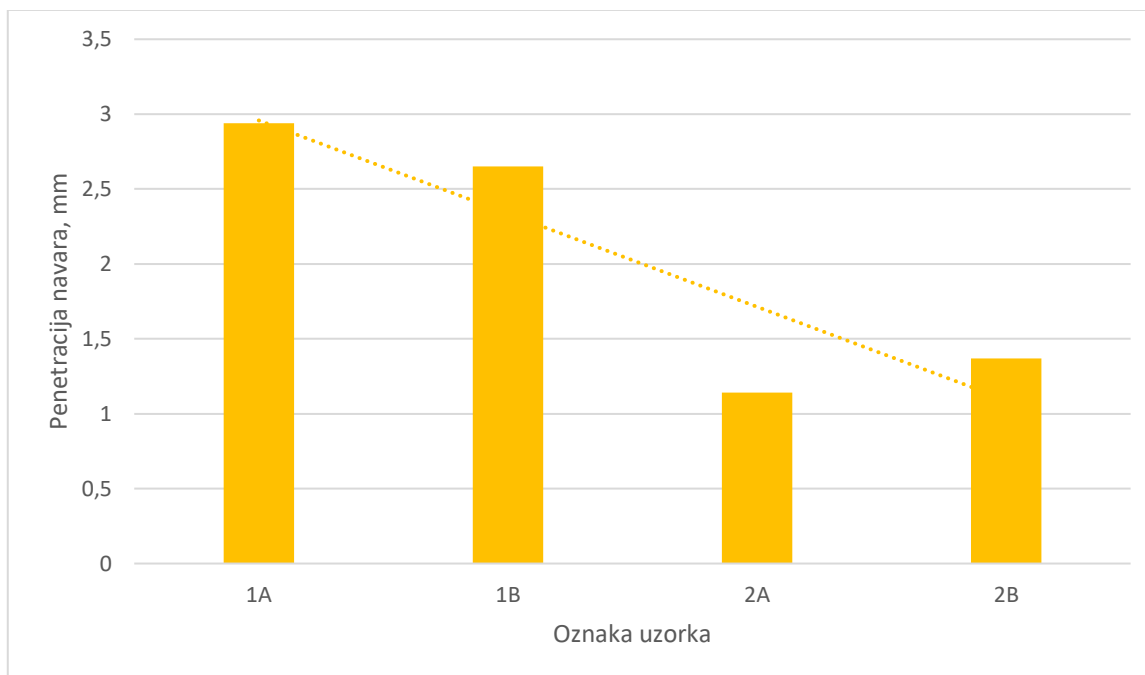
Slika 33. Grafički prikaz promjene nadvišenja metala navara po uzorcima

Na slici je vidljiv trend rasta nadvišenja metala navara među uzorcima. Na uzorcima 2A i 2B kod kojih je korištena praškom punjena žica, postignuto je 25 – 30 % veće nadvišenje metala navara u usporedbi s uzorcima 1A i 1B, kod kojih je korištena puna žica.

Usporedbom uzoraka navarivanih punom žicom 1A i 1B, moguće je uočiti približno isto nadvišenje metala navara, a razlika je tek 1% veće nadvišenje kod uzorka 1A navarivanog pod zaštitom Argona 4,8.

Usporedbom uzoraka navarivanih praškom punjenom žicom 2A i 2B, kod uzorka 2B navarivanog pod zaštitom plina Inoxline N2 je postignuto 3% veće nadvišenje metala navara nego kod uzorka 2A navarivanog pod zaštitom plina Argon 4,8.

Slika 34. grafički prikazuje rezultate mjerenja penetracije navara po uzorcima.



Slika 34. Grafički prikaz promjene penetracije navara po uzorcima

Na slici je vidljiv padajući trend penetracije metala navara među uzorcima. Korištenjem pune žice postignuta je gotovo 100% veća penetracija u oba uzorka u usporedbi s uzorcima kod kojih je korištena praškom punjena žica. Kod uzoraka 1A i 1B gdje je korištena puna žica, penetracija je ravnomjerna po cijeloj širini navara, dok je kod uzoraka 2A i 2B na kojima je korištena praškom punjena žica penetracija uska i koncentrirana na sredini navara.

Usporedbom uzoraka navarivanih punom žicom 1A i 1B, vidljivo je da je uporabom zaštitnog plina Argona 4,8 postignuta 11% veća penetracija navara u odnosu na uzorak pod zaštitom plina Inoxline N2.

Usporedbom uzoraka navarivanih praškom punjenom žicom 2A i 2B, moguće je zaključiti da je korištenjem zaštitnog plina Inoxline N2 postignuta 20% veća penetracija odnosno na uzorak gdje je korišten Argon 4,8.

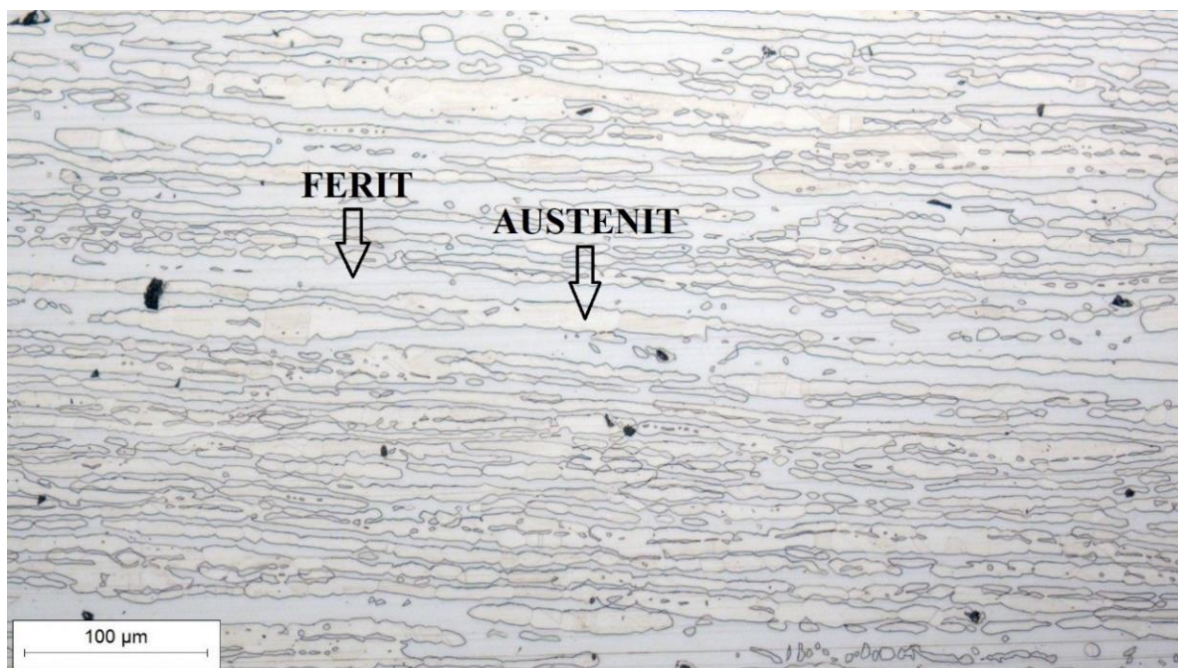
7.9. Analiza mikrostrukture navarenih uzoraka

Za snimanje mikrostrukture uzoraka korišten je invertni metalurški mikroskop Olympus GX51 prikazan na slici 35. Pritom je snimljen osnovni materijal, korijen navara, lice navara i zona utjecaja topline uvećanjem 50x, 100x i 200x. Mikrostrukturu uzoraka je moguće analizirati na nekoliko načina, te je u ovome radu korištena linijska analiza mikrostrukture. Kao i kod makrostrukturne analize korišten je program ImageJ, koji omogućava mjerenje raznih veličina na slici. Prije početka mjerenja potrebno je postaviti odnos piksela i mjerila na slici. Zatim se preko slike mikrostrukture povlači nekoliko pravaca, te se zbrajaju duljine dijelova jednog pravca koji presijecaju određenu mikrostrukturnu fazu, primjerice ferit. Nakon što se zbroje duljine jedne faze, zbroj duljina te faze se dijeli sa ukupnom duljinom pravca. Dobiveni rezultat se množi sa 100, nakon čega se dobiva postotni udio tražene mikrostrukturne faze. Na kraju se računa aritmetička sredina svih povučenih pravaca kako bi se dobio što točniji rezultat.



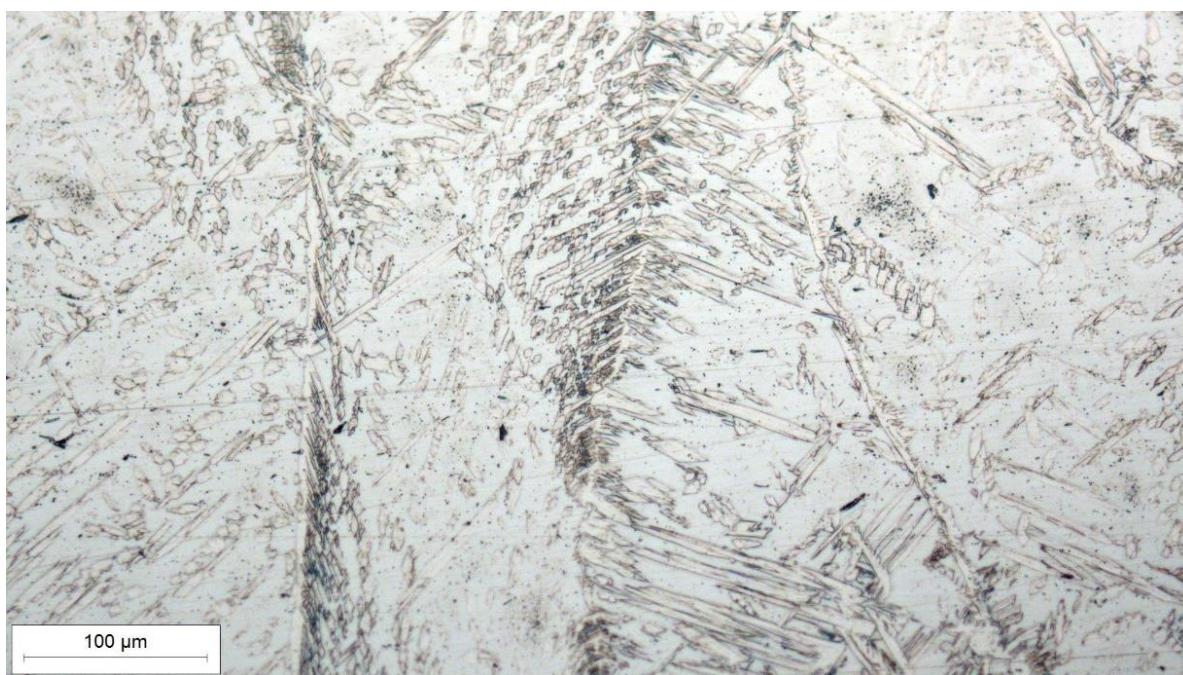
Slika 35. Mikroskop Olympus GX51

Na slici 36. je vidljiva mikrostruktura osnovnog materijala uz povećanje 200 puta. Mikrostruktura je dvofazna, a sastoji se od približno jednakih udjela ferita i austenita. Crne točke su nečistoće nastale tijekom procesa brušenja, poliranja ili nagrivanja uzoraka. Zrna ferita su izdužena u smjeru valjanja ploča čelika tijekom procesa proizvodnje. Linijskom analizom mikrostrukture osnovnog materijala izmjeren je udio od 45% ferita, te 55% austenita.



Slika 36. Mikrostruktura osnovnog materijala uz povećanje 200x

Na slici 37. je prikazana mikrostruktura lica navara uzorka 1A uz povećanje 200 puta. Linijskom analizom mikrostrukture izračunat je udio 38% austenita i 62% ferita.



Slika 37. Mikrostruktura navara uzorka 1A uz povećanje 200x

Na slici 38. prikazana je mikrostruktura lica navara uzorka 1B uz povećanje 200 puta. Linijskom analizom mikrostrukture navara izmjeren je udio 46% austenita i 54% ferita. Uzorak 1B sadrži 7,75% više austenita u mikrostrukтури nego uzorak 1A, što dovodi do zaključka da dodatak 2,5% dušika argonu pozitivno utječe na formiranje austenita u metalu zavara.



Slika 38. Mikrostruktura navara uzorka 1B uz povećanje 200x

Na slici 39. prikazana je mikrostruktura lica navara uzorka 2A uz povećanje 200 puta. Mikrostruktura se sastoji od 45% austenita i 55% ferita.



Slika 39. Mikrostruktura navara uzorka 2A uz povećanje 200x

Na slici 40. prikazana je mikrostruktura lica navara uzorka 2B uz povećanje 200 puta. Mikrostruktura se sastoji od 47% austenita i 53% ferita. Ponovno je moguće primijetiti da zaštitni plin s dodatkom 2,5% dušika pozitivno djeluje na stvaranje austenita u metalu zavara. Također je moguće primijetiti da uzorci navareni praškom punjenom žicom postižu ravnomjerniji omjer austenita i ferita nego uzorci navareni punom žicom.



Slika 40. Mikrostruktura navara uzorka 2B uz povećanje 200x

Na slikama 41. i 42. vidljivi su korijeni navara, zone utjecaja topline i osnovni materijal uzoraka 1A i 1B uz povećanje 50x. U korijenu navara vidljiv je prijelaz na grubozrnatu i umreženu mikrostrukturu. Uspoređujući strukturu navara ova dva uzorka, vidljivo je da je sitnije zrno postignuto u navaru pod zaštitom 2,5% dušika i argona. Također u mikrostrukturi navara 1B moguće je primijetiti veći udio austenita nego u mikrostrukturi uzorka 1A kod kojeg je korišten zaštitni plin 100% argona.



Slika 41. Mikrostruktura korijena navara uzorka 1A uz povećanje 50x



Slika 42. Mikrostruktura korijena navara uzorka 1B uz povećanje 50x

Na slikama 43. i 44. prikazane su mikrostrukture korijena navara uzoraka 2A i 2B pod uvećanjem 50x. U zoni utjecaja topline oba uzoraka vidljiv je porast zrna ferita, posebice kod uzorka 2A kod kojeg su vidljivi otoci ferita u zoni utjecaja topline. Kao i kod uzoraka 1A i 1B u metalu navara uzoraka 2A i 2B moguće je primijetiti grubu i dendritnu mikrostrukturu.

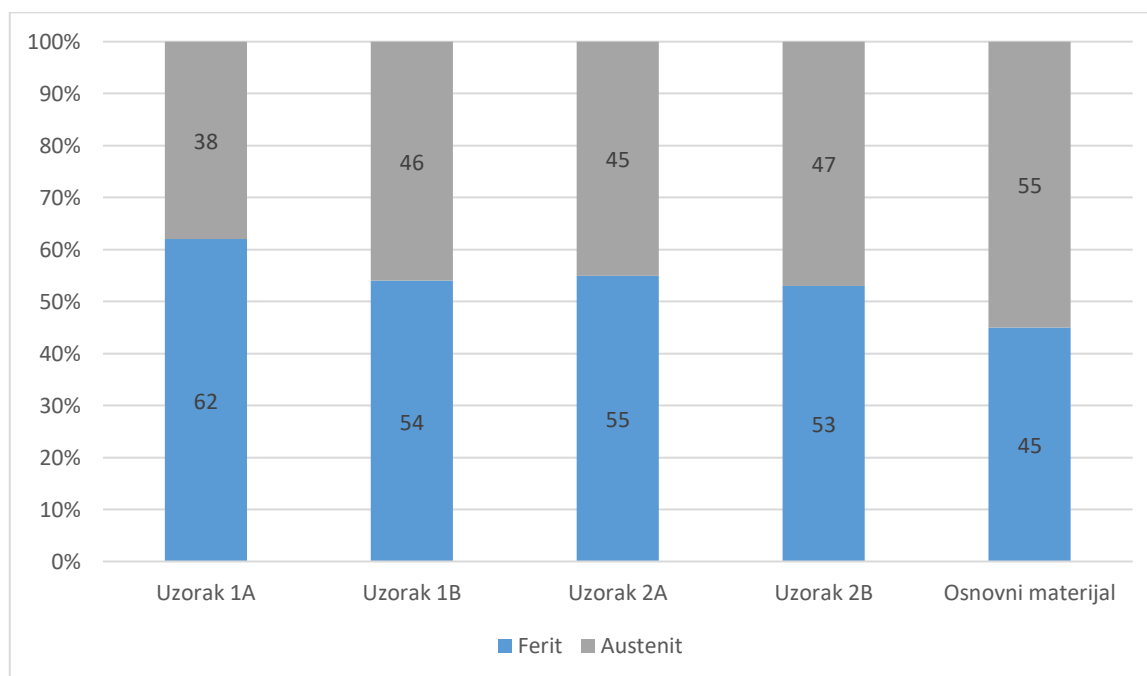


Slika 43. Mikrostruktura korijena navara uzorka 2A uz povećanje 50x



Slika 44. Mikrostruktura korijena navara uzorka 2B uz povećanje 50x

Na slici 45. grafički su prikazani udjeli ferita i austenita u pojedinim uzorcima u usporedbi sa osnovnim materijalom. U metalu navara uzorka 1A došlo je do intenzivne feritizacije, s obzirom da je izmjeren udio od 62% ferita i 38% austenita. Uzorak 1B koji je bio pod zaštitom plina Inoxline N2, sadrži veći udio austenita u odnosu na uzorak 1A koji je bio pod zaštitom Argona 4,8. Također omjer austenita i ferita kod uzorka 1B je puno ravnomjerniji nego kod uzorka 1A. Uspoređujući uzorke 2A i 2B, moguće je primijetiti da uzorak 2B koji je bio pod zaštitom plina Inoxline N2 ponovno sadrži veći udio austenita nego uzorak 2A koji je bio pod zaštitom Argona 4,8. Omjer austenita i ferita je najravnomyjerniji kod uzorka 2B.



Slika 45. Grafički prikaz postotnih udjela ferita i austenita u mikrostrukturi navara i osnovnog materijala

8. ZAKLJUČAK

Dupleks čelici se mogu zavarivati konvencionalnim i nekonvencionalnim postupcima zavarivanja uz korištenje odgovarajućih parametara zavarivanja. Važna stavka prilikom zavarivanja dupleks čelika je količina unesene topline. Prenizak unos topline uzrokuje izrazitu feritizaciju metala zavara i zone utjecaja topline, dok previsok unos topline uzrokuje precipitaciju nepoželjnih intermetalnih faza. Dodatni materijal koji se koristi kod zavarivanja dupleks čelika dodatno je legiran niklom kako bi se postigla odgovarajuća mikrostruktura metala zavara. Zaštitni plin koji se koristi kod MIG/MAG zavarivanja dupleks čelika je najčešće argon s dodatkom dušika, helija, ugljičnog dioksida ili kisika. Dušik se dodaje zaštitnom plinu kako bi se spriječio njegov gubitak iz metala zavara, kako bi se poboljšala njegova korozivna postojanost, te kako bi se postigao ravnomjeran odnos ferita i austenita u mikrostrukturi zone utjecaja topline i metala zavara. Također dušik je gamageni element, što znači da sprječava intenzivnu feritizaciju metala zavara i zone utjecaja topline.

U eksperimentalnom dijelu rada provedeno je navarivanje četiri uzorka od dupleks čelika 2205 u varijaciji dva zaštitna plina i dva dodatna materijala. Zavarivanje je bilo automatizirano, a parametri zavarivanja su bili konstantni. Nakon izrade uzoraka primijećen je sljedeći utjecaj zaštitnog plina i dodatnog materijala na mikrostrukturu i kvalitetu navara:

- Mjerenjem geometrije navara utvrđena je veća širina navara, veća penetracija i veća površina metala navara kod uzoraka kod kojih je korištena puna žica u usporedbi s uzorcima kod kojih je korištena praškom punjena žica. Punom žicom je postignuta gotovo 100% veća penetracija nego što je to bilo s praškom punjenom žicom. Prskanje metala tijekom zavarivanja je manje prilikom korištenja praškom punjene žice.
- Korištenjem zaštitnog plina 2,5% dušika i 97,5% argona postignut je vizualno bolji izgled navara u oba uzorka nego što je to kod korištenja zaštitnog plina s 100% argona. Ova razlika se najviše vidi na uzorcima 2A i 2B, gdje je korijen navara uzorka 2B pravilno koncentriran na sredini, dok je korijen navara 2A koncentriran na lijevoj strani navara.
- Analizom mikrostrukture uzoraka moguće je zaključiti da je na uzorcima 1B i 2B kod kojih je korišten zaštitni plin 2,5% dušika i 97,5% argona postignut veći udio austenita u mikrostrukturi, te ravnomjerniji omjer austenita i ferita nego što je to kod uzoraka 1A

i 2A kod kojih je korišten 100% argon. Ova razlika je najviše uočljiva na uzorcima 1A i 1B, gdje je kod uzorka 1A izmjeren udio austenita od 38% i ferita od 62%, a kod uzorka 1B 46% austenita i 54% ferita. Također se može uočiti da je kod uzoraka navarivanih pod zaštitom 2,5% dušika i 97,5% argona postignuta sitnozrnatija mikrostruktura nego što je to kod uzoraka navarivanih pod zaštitom 100% argona.

Analizom rezultata se može zaključiti da se pri istim parametrima navarivanja korištenjem pune žice postiže veća penetracija i veća površina metala navara nego praškom punjenom žicom, što može biti korisno kod zavarivanja materijala većih debljina. Zaštitni plin argona s dodatkom 2,5% dušika postiže vizualno ljepši zavar, te bolju mikrostrukturu materijala zavara, s ravnomjernijim odnosom ferita i austenita. Ova stavka je vrlo bitna kod zavarenih spojeva od dupleks čelika jer prekomjerna feritizacija dovodi do smanjenih mehaničkih svojstava i slabije korozijske postojanosti metala zavara i zone utjecaja topline.

LITERATURA

- [1] Practical guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steels, Second Edition, Dissimilar metal welds and weld joint design for duplex stainless steel, IMO, 2009
- [2] <https://www.montanstahl.com/blog/tanks-and-container-from-duplex-steel-for-shipping-and-oil-and-gas-industry/>, posjećeno 19.10.2021.
- [3] Srećko Brkić: Nehrđajući čelici u farmaceutskoj, prehrambenoj i kemijskoj industriji, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2007
- [4] <https://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php>, posjećeno 15.12.2021.
- [5] Duplex stainless steel welding guidelines, Industeel ArcelorMittal, English Edition June 2019
- [6] Ivan Juraga, Ivan Stojanović, Boris Ljubenković: Experimental research of the duplex stainless steel welds in shipbuilding, Zagreb, 2014
- [7] Mladen Novosel, Dragomir Krumes: Posebni čelici, Slavonski brod, 1998
- [8] Fred Neessen, Piet Bandsma, Lincoln Smitweld: Tankers - A Composition in Duplex Stainless, Eindhoven, Welding Innovation, 2001, Vol. XVIII, No.3
- [9] <https://www.marineinsight.com/shipping-news/first-chemical-tanker-use-combination-duplex-stainless-steel-stainless-clad-steel-delivered/>, posjećeno 18.10.2021.
- [10] <https://stainless-steel-world.net/safer-seas-with-stainless-steel/>, posjećeno 19.10.2021.
- [11] ASTM A240, Standard Specification for Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Plate, Sheet, and Strip for Pressure Vessels and for General Applications
- [12] <https://steelcraftpropellers.fi/en/propellers/>, posjećeno 15.11.2021.
- [13] Molyreview Issue 1, International Molybdenum Association, Propelling the boating world, 2016
- [14] <https://www.nauticexpo.com/prod/teignbridge/product-21507-87418.html>, posjećeno 15.11.2021.
- [15] MolyReview, International Molybdenum Association, Making eco-friendly waves, 2020

- [16] Rede V., Utjecaj mikrostrukture zavara dupleks čelika na otpornost prema trošenju, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2004
- [17] <https://tsi.webador.com/tois-mig-mag-postupak-zavarivanja>, posjećeno 14.12.2021.
- [18] <https://www.messer.hr/plinovi-rezanje-zavarivanje>, posjećeno 12.01.2022.
- [19] <https://www.varstroj.si/eng/>, posjećeno 07.02.2022.
- [20] EN ISO 1011-3:2000, Recommendations for welding of metallic materials, Part 3: Arc welding of stainless steels
- [21] https://hegpont.hu/wp-content/uploads/2014/08/MIG_WELD_WELDING_EN.pdf, posjećeno 07.02.2022.
- [22] <https://www.project-welding.com/>, posjećeno 07.02.2022.
- [23] ISO 15614-1:2004(E), Specification and qualification of welding procedures for metallic materials – Welding procedure test, Part 1: Arc and gas welding of steels and arc welding of nickel and nickel alloys

PRILOZI

I. CD-R disc