

Analiza utjecaja zaštitnog plina na svojstva zavara pri MAG zavarivanju dupleks čelika

Kapuđija, Petra

Master's thesis / Diplomski rad

2023

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:783205>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-06-26**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Petra Kapudija

Zagreb, 2023.godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2023.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na savjetima i pruženoj podršci kroz izradu diplomskog rada i tokom cijelog diplomskog studija.

Hvala višoj asistentici dr. sc. Maji Jurica (Remenar) na velikoj pomoći, strpljenju i vođenju kroz rad.

Veliko hvala asistentu Marku Frajzmanu na velikom strpljenju, podijeljenom znanju i uvijek ukazanoj pomoći tijekom pripreme i izrade ovog rada.

Hvala tehničkom osoblju Laboratorija za zavarene konstrukcije za pomoć oko provođenja eksperimentalnog dijela rada.

Hvala mojoj obitelji, braći Jakovu i Mislavu, sestri Niki te roditeljima Tanji i Damiru na bezuvjetnoj podršci tijekom studiranja, ali i vjeri i potpori za završetak studija.

Hvala kolegama i prijateljima na motivaciji, pomoći i podršci tijekom studiranja.

Petra Kapuđija



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite

Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:

Proizvodno inženjerstvo, inženjerstvo materijala, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
mehatronika i robotika, autonomni sustavi i računalna inteligencija



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 23 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 23 -	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Petra Kapudija** JMBAG: 0035196274

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Analiza utjecaja zaštitnog plina na svojstva zavara pri MAG zavarivanju dupleks čelika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Analysis of shielding gas influence on the weld properties at MAG welding of duplex steel**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu na osnovi literaturnog pregleda proučiti zavarljivost dupleks čelika. Navesti osnovne značajke MAG postupka zavarivanja te analizirati utjecaj parametara na svojstva spoja. Detaljno opisati zavarivanje pulsним strujama te modificirane MAG postupke. Specificirati zaštitne plinove koji se koriste pri MAG zavarivanju dupleks čelika te njihov utjecaj na mikrostrukturu metala zavara.

U eksperimentalnom dijelu provesti zavarivanje MAG postupkom na osnovnom materijalu dupleks čelika uz primjenu više vrsta zaštitnog plina. Prilikom rada procijeniti operativna svojstva sa stanovišta stabilnosti električnog luka i prijenosa metala. Na zavarenim uzorcima provesti odgovarajuća ispitivanja te donijeti zaključke o prikladnosti pojedinih mješavina kao i učincima na eksploatacijska svojstva zavarene konstrukcije.

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

Zadatak zadan:

4. svibnja 2023.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Datum predaje rada:

6. srpnja 2023.

Predvideni datumi obrane:

17. – 21. srpnja 2023.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Garašić

SADRŽAJ

1	UVOD.....	1
2	VISOKOLEGIRANI Cr-Ni ČELICI.....	2
2.1	Feritni čelici.....	3
2.2	Austenitni čelici.....	4
2.3	Martenzitni čelici.....	5
2.4	Dupleks čelici.....	5
2.5	Precipitacijski očvrsnuti čelici.....	6
3	DUPLEKS (AUSTENITNO-FERITNI) VISOKOLEGIRANI Cr-Ni ČELICI.....	7
3.1	Mikrostruktura dupleks čelika.....	7
3.1.1	Legirni elementi.....	8
3.1.2	Štetne intermetalne sekundarne faze.....	11
3.2	Svojstva dupleks čelika.....	14
3.2.1	Mehanička svojstva.....	14
3.2.2	Korozijska postojanost.....	15
3.3	Primjena dupleks čelika.....	17
4	ZAVARLJIVOST DUPLEKS ČELIKA.....	18
4.1	Karakteristike zavarenog spoja dupleks čelika.....	18
4.2	Unos topline kod dupleks čelika.....	19
4.3	Dodatni materijal kod zavarivanja dupleks čelika.....	19
4.4	Pojava krhkosti 475 °C.....	19
5	MIG/MAG ZAVARIVANJE.....	21
5.1	Prednosti i nedostaci MIG/MAG zavarivanja.....	22
5.2	Osnovni parametri MAG zavarivanja.....	22
5.3	Načini prijenosa metala u električnom luku.....	24
5.3.1	Prijenos metala kratkim spojevima.....	26
5.3.2	Prijenos metala prijelaznim lukom.....	26
5.3.3	Prijenos metala štrcajućim lukom.....	26
5.3.4	Prijenos metala impulsnim lukom.....	27
5.4	Uređaji za MIG/MAG zavarivanje.....	28
5.5	Izvori struje za zavarivanje.....	29

5.6 Sustavi i uređaji za dodavanje žice.....	29
5.7 Dodatni materijal (žica) za zavarivanje.....	30
5.8 Sustav za upravljanje protoka zaštitnog plina	31
5.9 Pištolji za MIG/MAG zavarivanje.....	31
6 ZAŠTITNI PLINOVI	32
6.1 Svojstva zaštitnih plinova.....	32
6.1.1 Utjecaj zaštitnih plinova na zavar.....	32
6.2 Zaštitni plinovi u zavarivanju	33
6.2.1 Dvokomponentna mješavina M1	34
6.2.2 Trokomponentne plinske mješavine.....	35
6.2.3 Plinska mješavina s dodatkom dušika do 3%.....	36
6.3 Zaštitni plinovi kod MAG zavarivanja.....	36
7 EKSPERIMENTALNI DIO	38
7.1 Opis i ciljevi eksperimenta	38
7.2 Osnovni materijal	38
7.3 Dodatni materijal	40
7.4 Oprema za zavarivanje	42
7.4.1 Izvor struje za zavarivanje.....	42
7.4.2 Zaštitni plin.....	43
7.4.3 Modularni pogonski sustav za automatsko zavarivanje BUG-O Systems	44
7.4.4 Priprema spoja	44
7.5 Zavarivanje ispitnih uzoraka	46
7.6 Izrada makroizbrusaka.....	47
7.7 Rezultati i analiza makrostrukture.....	52
8 DETALJNA ANALIZA MIKROSTRUKTURE UZORAKA.....	57
9 ZAKLJUČAK	60
10 LITERATURA.....	61

POPIS SLIKA

Slika 1	Kristalne strukture A) feritnih, B) austenitnih i C) martenzitnih nehrđajućih čelika [3]	3
Slika 2	Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [2]	3
Slika 3	Mikrostruktura dupleks nehrđajućih čelika [2]	6
Slika 4	Mikrostruktura nehrđajućeg dupleks čelika	7
Slika 5	Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70% Fe=konst. [11]	8
Slika 6	Promjena udjela austenita i ferita s temperaturom zagrijavanja dupleks čelika [5]	8
Slika 7	Ovisnost udjelnog koeficijenta o temperaturi kod legiranih elemenata [12]	9
Slika 8	Schaefflerov strukturni dijagram	10
Slika 9	Mikrostruktura čelika ovisna o udjelu nikla [14]	10
Slika 10	TTT-dijagram nastanka štetnih faza za 2205 dupleks čelika [16]	11
Slika 11	Prikazuje difuziju kroma, molibdena i nikla pri nastanku ovih faza na granici između Sigma i Chi faza [16]	12
Slika 12	Mikrostruktura sigma faze [17]	12
Slika 13	Shema sadržaja kroma preko karbida M ₂₃ C ₆ na feritno-austenitnoj granici [18]	13
Slika 14	Ovisnost mehaničkih svojstava dupleks čelika X2CrNiMoN 22 5 o temperaturi gašenja [5]	15
Slika 15	Tanker za prijevoz kemikalija Sunrise Hope [22]	17
Slika 16	Krhkost 475 °C [26]	20
Slika 17	Shematski prikaz MAG zavarivanja [27]	21
Slika 18	Ovisnost jakosti struje o promjeru žice 1,2 mm i brzini zavarivanja [29]	23
Slika 19	Slobodan kraj žice [29]	24
Slika 20	Shematski prikaz prijenosa metala prirodnim načinom: a) kratkim spojevima; b) prijelaznim lukom; c) štrcajućim lukom [31]	25
Slika 21	Shema uređaja za MIG MAG zavarivanje [32]	28
Slika 22	Sustav dovođenja žice: A) kabinski, B) univerzalni, C) parni uređaj, D) "push-pull" [33]	30
Slika 23	Shema dovoda žice [33]	30
Slika 24	Izgled profila zavara u ovisnosti o zaštitnom plinu [37]	33
Slika 25	Zavarivanje s M1 mješavinom zaštitnog plina [38]	35
Slika 26	Ovisnost udjela dušika u plinskoj mješavini s udjelom u zavarenom spoju nakon zavarivanja [35]	36
Slika 27	Ispitni uzorak - osnovni materijal X2 CrNiMoN 22-5-3	38
Slika 28	Priprema ispitnih uzoraka za zavarivanje	39
Slika 29	MIG WELD žica promjera 1,2mm	40
Slika 30	Sustav za dobavu žice pri zavarivanju	41
Slika 31	Izvor struje OTC Welbee W400 dual	42
Slika 32	Identifikacijska pločica uređaja OTC Welbee W400	42
Slika 33	Prikaz Messer zaštitnog plina	43
Slika 34	BUG-O automatizirani sustav za zavarivanje	44
Slika 35	Pripojeni, očišćeni i odmašćeni ispitni uzorci	45

Slika 36	Priprema za zavarivanje na BUG-O sustavu	45
Slika 37	Prikaz postavki programa na izvoru struje	46
Slika 38	Grafički prikaz utjecaja različitih struja na parametre zavarivanja	47
Slika 39	Prikaz ispitnih uzoraka prije čišćenja površine zavara	47
Slika 40	Prikaz ispitnih uzoraka nakon čišćenja površine zavara	48
Slika 41	Usporedba zavarenih spojeva uzoraka	49
Slika 42	Poliranje ispitnih uzoraka na uređaju Struers	50
Slika 43	Usporedba uzorka prije i poslije poliranja	50
Slika 44	Prikazani parametri nagrivanja	51
Slika 45	Postupak nagrivanja makroizbrusaka	52
Slika 46	Makroizbrusak uzorak 1	53
Slika 47	Makroizbrusak uzorak 2	53
Slika 48	Makroizbrusak uzorak 3	54
Slika 49	Makroizbrusak uzorak 4	54
Slika 50	Grafički prikaz utjecaja zaštitnog plina na penetraciju i širinu metala zavara	56
Slika 51	Uređaj za mjerenje udjela ferita – Ferritgehaltmesser	57
Slika 52	Specifikacijska pločica Ferritgehaltmesser uređaja	57
Slika 53	Mjerenje udjela ferita na uzorku 1	58
Slika 54	Raspored točaka mjerenja udjela ferita	58
Slika 55	Grafički prikaz udjela ferita u uzorcima	59

POPIS TABLICA

Tablica 1	Najčešće primjenjivani dupleks čelici.....	6
Tablica 2	Podaci o pojedinim zaštitnim plinovima za zavarivanje [1]	34
Tablica 3	Kemijski sastav čelika X2 CrNiMoN 22-5-3	39
Tablica 4	Mehanička svojstva čelika X2 CrNiMoN 22-5-3	40
Tablica 5	Kemijski sastav dodatnog materijala.....	41
Tablica 6	Mehanička svojstva elektrode	41
Tablica 7	Sastav za korištenje zaštitnih plinova prema proizvođaču.....	43
Tablica 8	Parametri uzoraka pri MAG zavarivanju	46
Tablica 9	Prikazuje analizu dimenzija makrostrukture uzoraka	55
Tablica 10	Dobiveni udjeli ferita kod uzoraka.....	59

POPIS KRATICA

Oznaka	Opis
Ar	Argon
BCC	Body Centered Cubic Lattice - prostorno centrirana kubična rešetka
BCT	Tetragonska prostorno centrirana rešetka
CBT	engl. Controlled Bridge Transfer
CMT	engl. Cold Metal Transfer, Rapid Arc Transfer
CO ₂	Ugljični dioksid
Cr	Krom
DC	Istosmjerna struja (od eng. Direct Current)
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom
F	Ferit
FCC	Plošno centrirana kubična rešetka
He	Helij
HRC	Tvrdoća po Rockwellu
HV	Tvrdoća po Vickersu
I	Jakost struje
MAG	Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina (od eng. Metal Active Gas)
MIG	Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina (od eng. Metal Inert Gas)
Mn	Mangan
Mb	Molibden
N	Dušik

O ₂	Kisik
PH	čelici engl. Precipitation Hardenable ili Precipitation Hardened
PIT	engl. Pinch Instability Theory
PREN	Pitting resistance equivalent number
PVC	Poli(vinil-klorid)
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
SCC	engl. Stress Corrosion Cracking
SFBT	engl. Static Force Balance Theory
Si	Silicij
STT	engl Surface Tension Transfer
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (od eng. Tungsten Inert Gas)
U	Napon
W	Volfram

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
ε	%	Istezljivost
I	A	Jakost struje
KV	J	Udarni rad loma
U	V	Napon
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	N/mm^2	Konvencionalna granica razvlačenja
T	$^{\circ}C$	Temperatura
$v_{\dot{z}}$	cm/min	Brzina dodavanja žice
v_z	cm/min	Brzina zavarivanja
q	kJ/mm	Unos zaštitnog plina

SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada opisani su visokolegirani čelici općenito i podjela, a posebno su objašnjeni dupleks (austenitno-feritni) čelici. Naveden je povijesni razvoj dupleks čelika, mikrostruktura, svojstva te primjena dupleks čelika. Obradena je i tema zavarljivosti i zavarivanja dupleks čelika. U daljnjem radu opisan je MAG postupak zavarivanja i karakteristični načini prijenosa metala kod istog postupka. Opisani su osnovni parametri MAG zavarivanja, izbor dodatnih materijala, izvori struje za zavarivanje, sustav i uređaji za dodavanje žice, sustav za upravljanje protoka zaštitnog plina i pištolj za MIG/MAG zavarivanje. U posljednjem poglavlju teorijskog dijela opisani su zaštitni plinovi, njihova svojstva, podjele te karakteristični plinovi kod MAG zavarivanja.

Cilj eksperimentalnog dijela bio je provesti ispitivanje utjecaja različitih plinskih mješavina uz MAG zavarivanje na osnovnom materijalu dupleks čelika. Opisan je osnovni i dodatni materijal, korištena oprema za zavarivanje. Nadalje, opisano je zavarivanje ispitnih uzoraka, izrada makroizbrusaka te rezultati i analiza makrostrukture. Na kraju rada analizirani su rezultati dobivenih rezultata.

Ključne riječi: MAG zavarivanje, dupleks, zaštitni plinovi

SUMMARY

In the theoretical part of the thesis are described the high-alloy steels in general and their division, and duplex (austenitic-ferritic) steels. The historical development of duplex steel, microstructure, properties and application of duplex steel are listed. The subject of weldability and welding of duplex steel is also covered. In the following, it contains also, the MAG welding process and the characteristic ways of metal transfer during the same process. The basic parameters of MAG welding, the choice of additional materials, sources of welding power, the system and devices for adding wire, the system for controlling the flow of shielding gas and the gun for MIG/MAG welding are described. The last chapter contains the theoretical part the subject shielding gases, their properties, divisions and characteristic gases in MAG welding.

The goal of the experimental part was to test the influence of different gas mixtures with MAG welding on the basic material of duplex steel. Basic and additional material, used welding equipment are described. Furthermore, the welding of test samples, the production of macrosamples, and the results and analysis of the macrostructure are described. The end of the thesis contains the results and analysis of the obtained samples.

Key words: MAG welding, duplex, shielding gas mixtur

1 UVOD

Visokolegirani Cr-Ni čelici su najčešće korišteni konstrukcijski materijal u industriji. Primjena im je raznolika, no jedna od značajnijih je izrada zavarenih konstrukcija. Jedna vrsta Cr-Ni čelika jesu dupleks čelici, razvijeni 1930-ih godina. Dvofazna mikrostruktura, po kojoj su i dobili ime, sastoji se od ferita i austenita. Glavna karakteristike su im vrlo dobra mehanička svojstva, visoka žilavost i duktilnost, otpornost na visoku temperaturu i kiseline, povećana otpornost na koroziju zbog svoje relativno visoke čvrstoće. Zbog visokog udjela ferita u mikrostrukturi (40 – 60 %) oni su feromagnetični, imaju višu toplinsku vodljivost i nižu toplinsku rastezljivost od austenitnih čelika. Na mjestima gdje se traži visoka otpornost na napetosnu i rupičastu koroziju, bolji su izbor od austenitnih čelika. Dupleks čelici najčešće se primjenjuju u industriji plina i nafte, kemijsko-procesnoj industriji, brodogradnji, petrokemijskoj industriji.

Većina proizvodnje zavarivanjem, više od 90% prerađenog materijala, obavlja se sa svega pet, šest postupaka za zavarivanje. Jedan od tih postupaka je elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina MIG/MAG. Zbog svog stalnog razvoja i poboljšavanja proces zavarivanja MAG-om je odlične kvalitete i produktivnosti. Na kvalitetu zavarenog spoja, najveći utjecaj imaju parametri zavarivanja. Nekoliko je načina prijenosa metala u električnom luku: kratkim spojevima, prijelaznim lukom, impulsnim lukom i štrcajućim lukom, zato MAG postupak ima široku primjenu, najčešće u čeličnim konstrukcijama, cjevovodima, automobilskoj industriji, mostovima.

2 VISOKOLEGIRANI Cr-Ni ČELICI

Nehrđajući čelik (engl. stainless steel) je naziv koji se koristi još od najranijih faza razvoja ovih čelika tj. početka 20. stoljeća.

Obilježava ih minimalni udio kroma od 12 % kao i dodatak ostalih legirajućih elemenata poput nikla, molibdena, titana, dušika, kojima se modificira njihova struktura.

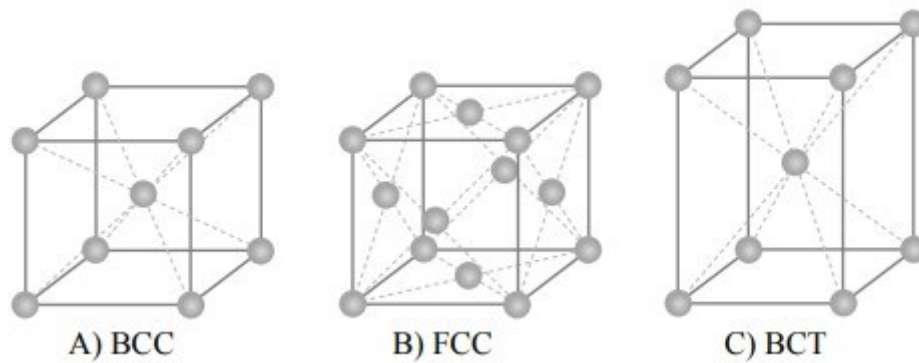
Posebno su važni zbog odlične korozijske i toplinske otpornosti, visokog odnosa čvrstoće s obzirom na masu, dobrih svojstava kod niskih temperatura, niske magnetske permeabilnosti, itd

Primjena visokolegiranih Cr-Ni čelika je manja od primjene nelegiranog ugljičnog čelika, ali je proizvodnja visokolegiranih Cr-Ni čelika u konstantnom porastu.

Zbog svojih odličnih svojstva korozijske postojanosti ovi materijali imaju vrlo široku primjenu u gotovo svim područjima ljudskog djelovanja. Visokolegirani Cr-Ni čelik se primjenjuje za opremu u naftnoj, procesnoj kemijskoj i prehrambenoj industriji te za potrošačke proizvode. Najviše primjenjivan visokolegirani Cr-Ni čelik je austenitni čelik Cr-Ni (18-8) prema standardu AISI oznake 304/304L koji zauzima više od 50 % primjene visokolegiranih Cr-Ni čelika. [2]

Visokolegirani Cr-Ni čelici su definirani nacionalnim standardima (HRN, DIN, AISI).

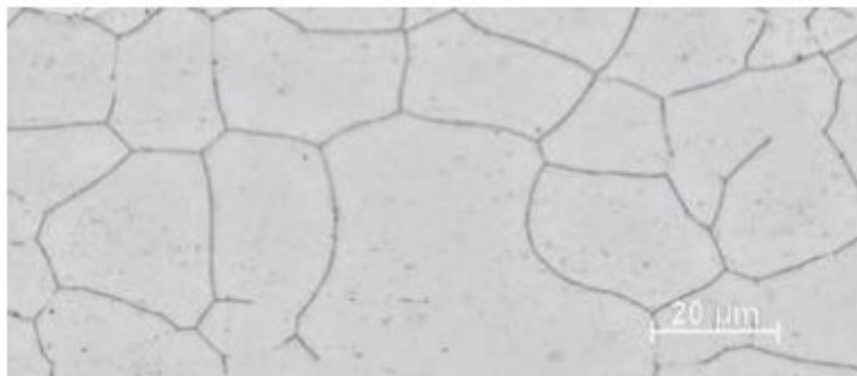
Dijele se na feritne, austenitne, martenzitne, dupleks čelike i precipitacijski očvrsnute čelike. Nazivi podjela potječu od alotropskih modifikacija željeza kao osnovne komponente svih čelika. Željezo pokazuje alotropiju, tj. javlja se u više kristalnih formi (alotropskih modifikacija) ovisno o temperaturi. Alfa faza željeza (α -Fe), je primarna alotropska modifikacija željeza stabilna na sobnoj temperaturi i ima kubičnu prostorno centriranu rešetku (BCC). Gama željezo (γ -Fe) je visokotemperaturna modifikacija željeza stabilna iznad 910 °C, ima kubičnu plošno centriranu rešetku (FCC). Ferit je intersticijski kristal mješanac ugljika i α željeza. Ima deformiranu BCC rešetku jer je atom ugljika puno veći od raspoloživih praznina. Austenit je intersticijski kristal mješanac ugljika i γ željeza. Ima deformiranu FCC rešetku jer je atom ugljika veći od raspoloživih praznina. Naglim hlađenjem austenita nastaje martenzitna struktura, koja pak podrazumijeva tetragonsku prostorno centriranu rešetku (BCT). [3] Kristalne strukture nehrđajućih čelika prikazane su na Slika 1. [3]



Slika 1 Kristalne strukture A) feritnih, B) austenitnih i C) martenzitnih nehrđajućih čelika [3]

2.1 Feritni čelici

Feritni visokolegirani Cr-Ni čelici sadrže od 12 do 17 % Cr i manje od 0,1 % C. Pri gotovo svim temperaturama zadržavaju feritnu mikrostrukturu (ne mogu očvrnuti postupcima toplinske obrade jer nemaju faznu pretvorbu) koja je prikazana na Slika 2. Takav ferit se naziva δ -ferit (prostorno centrirana kubna rešetka - BCC) [4].



Slika 2 Mikrostruktura feritnih nehrđajućih čelika [2]

Prednosti feritnih čelika su visoka korozivna otpornost na djelovanje dušične kiseline i njenih vodenih otopina, smjesa dušične, fosforne i solne kiseline dok na djelovanje 4 rastaljenih metala (aluminij, olovo), amonijevog biflourida, barijevog klorida, broma i octene kiseline nisu otporni [5].

Ostala svojstva feritnih nehrđajućih čelika [5]:

- feromagnetični su,
- relativno su mekani,
- slaba deformabilnost,
- slabo su zavarljivi zbog sklonosti pogrubljenju zrna pri temperaturama iznad 900 °C što je najviše izraženo na područjima ZUT-a (već iznad 600 °C veličina zrna počinje znatno rasti što rezultira padom mehaničkih vrijednosti),

- skloni su pojavi „krhkosti 475“ pri držanju u temperaturnom rasponu od 350 °C do 520 °C (posljedice su smanjenje duktilnosti i povećanje čvrstoće i tvrdoće),
- skloni su stvaranju krhke σ -faze pri držanju u temperaturnom rasponu od 520 °C do 850 °C,
- dobra obradljivost odvajanjem čestica,
- nisu osjetljivi na pojavu napetosne korozije,
- skloni su lomu pri niskim temperaturama,
- ekonomski prihvatljiviji od ostalih visokolegiranih Cr-Ni čelika.

Uklanjanje ili smanjenje navedenih nedostataka postiže se povišenjem udjela kroma, sniženjem udjela ugljika ili legiranjem s molibdeno i niklom u svrhu povećanja njihove otpornosti na koroziju i titanom i niobijem u svrhu poboljšanja zavarljivosti. Velika poboljšanja svojstava postižu se i porastom čistoće feritnih čelika (vrlo niski udjeli nečistoća i primjesa) što se postiže pomoću suvremenih metoda rafinacije (npr. indukcijska vakuumska peć, elektronski mlaz i sl.) [5].

2.2 Austenitni čelici

Austenitni visokolegirani Cr-Ni čelici sadrže od 15 do 20 % kroma, između 0,02 i 0,15 % ugljika i između 7 i 20 % nikla uz mogućnost dodavanja određene količine molibdena, titana, niobija i tantala koji pospješuju nastanak ferita u mikrostrukturi i djeluju stabilizirajuće na otpornost prema interkristalnoj koroziji, a dodaje se i dušik radi povišenja čvrstoće i otpornosti na napetosnu i rupičastu koroziju [5], [6].

Austenitni nehrđajući čelik čini dvije trećine svih proizvedenih nehrđajućih čelika na svijetu. Glavna mana austenitnog visokolegiranog Cr-Ni čelika je visoka osjetljivost na napetosnu koroziju, posebice u okolini s prisustvom klorida. S druge strane, feritni visokolegirani Cr-Ni čelik je gotovo imun na tu vrstu korozije. Naspram feritnog, austenitni čelik ima puno lošiji udarni rad loma i lošiju zavarljivost. Treba također naglasiti kako je feritni čelik magnetičan, dok austenitni nije [7].

Svojstva austenitnih čelika: nemagnetični su, nema mogućnosti usitnjavanja zrna, veće su napetosti i deformacije tijekom zavarivanja nego kod feritnih čelika, odlična plastičnost, legiranjem s molibdenom, volframom i vanadijem postiže se dobra otpornost prema puzanju pri temperaturama iznad 600°C, visoka žilavost, oksidacijska i korozijska otpornost, visok odnos čvrstoća/masa, dobra svojstva pri niskim temperaturama, postojana austenitna struktura od "solidus" temperature do ispod sobne temperature, kubično plošno centrirana kristalna rešetka koja osigurava visoku deformabilnost, nisu skloni povećanju kristalnog zrna u zoni utjecaja topline tijekom zavarivanja [8].

Primjenjuju se u prehrambenoj, kemijskoj, farmaceutskoj, tekstilnoj, filmskoj i foto industriji, industriji celuloze i papira, za izradu kućanskih aparata, za izradu ugostiteljske opreme, za proizvodnju kirurških i medicinskih instrumenata itd [8].

2.3 Martenzitni čelici

Martenzitni visokolegirani Cr-Ni čelici u pravilu imaju od 13 do 18 % Cr te zbog potrebe zakaljivanja imaju povišen udio ugljika koji iznosi od 0,2 do 1 %. U mikrostrukturi mogu sadržavati i do 2,5 % nikla i do 1,3 % molibden. Kaljenjem na zraku ili u ulju i nakon toga popuštanjem postižu se optimalna mehanička svojstva i korozijska postojanost martenzitnih čelika. Martenzitni čelici iz taline kristaliziraju u δ -ferit, a zatim pri hlađenju prelaze u austenit koji daljnjim hlađenjem prelazi u martenzit [5].

Martenzitni čelici dijele se u dvije podskupine : konstrukcijske čelike koji sadrže do 0,3 % ugljika, poboljšavaju se i korozijski su postojani te alatni čelici koji sadrže preko 0,3 % ugljika, nakon kaljenja se nisko popuštaju i otporni su na abrazijsko trošenje [5].

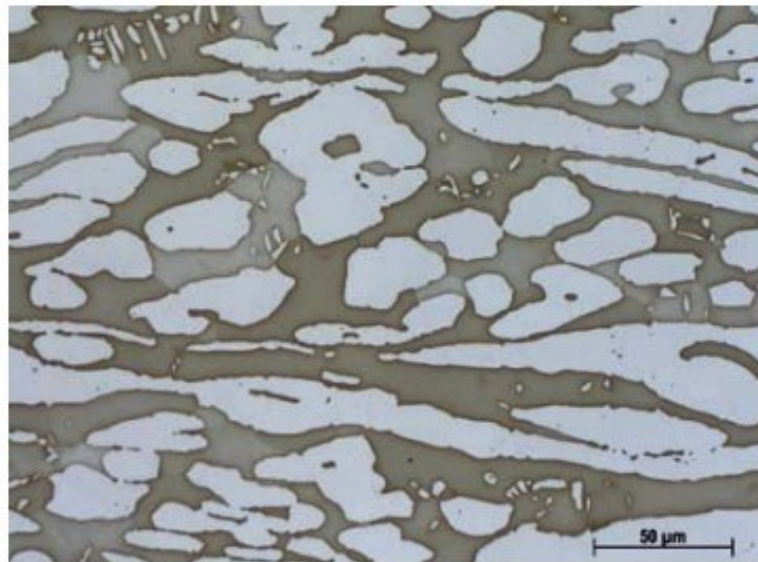
Svojstva martenzitnih nehrđajućih čelika [5]:

- osjetljivost prema vodikovoj krhkosti posebno u sulfidnim okolišima,
- mogu se kaliti, jer imaju transformaciju $\gamma \leftrightarrow \alpha$,
- magnetični su,
- imaju višu tvrdoću, čvrstoću i otpornost na trošenje u odnosu na feritne i austenitne nehrđajuće čelike,
- loša otpornost na udarni lom kod sniženih temperatura,
- poboljšana granica razvlačenja i otpor puzanju pri povišenim temperaturama,
- ne koriste se na temperaturama višim od 650 °C,
- najčešće se koriste u poboljšanom stanju.

Najčešći i najveći problem kod zavarivanja martenzitnih čelika je pojava hladnih (vodikovih) pukotina zbog prisustva vodika u zavaru, strukture zavarenog spoja, djelovanja naprezanja, nepovoljan položaj uključaka u zavaru te sklonosti materijala zakaljivanju .

2.4 Dupleks čelici

Dupleks čelici posjeduju dvofaznu austenitno-feritnu mikrostrukturu prikazanu na Slika 3 , s 40-60% ferita. Čelik s 22-24% kroma i 6-8% nikla pri temperaturi 20 °C, tj. zagrijan do ≈ 1000 °C sastojati će se od ferita i austenita. Ukoliko su prisutni ostali legirajući elementi tada vrijedi da dodatak molibdena, silicija, titana i niobija djeluje slično kao porast sadržaja kroma, a mangana, bakra, dušika i ugljika kao povišenje sadržaja nikla. Povišenjem temperature iznad 1000°C poraste udio ferita, a smanjuje se udio austenita tako da čelik s 22% kroma i 8% nikla pri 1350°C posjeduje jednofaznu feritnu mikrostrukturu [5].



Slika 3 Mikrostruktura dupleks nehrđajućih čelika [2]

Tablica 1 Najčešće primjenjivani dupleks čelici

Vrste dupleks čelika	X4	X6	X2	X2	X8	X2	X3
	CrNiMoNb	CrNiMoTi	CrNiMoSi	CrNiMoN	CrNiMoN	CrN	CrNiMoCuN
	25 7 2	20 6 2	18 5 3	22 5 3	27 5 2	26 5 4	24 5 2

U praksi se najčešće koriste vrste dupleks čelika (prema VDEh) prikazani u Tablica 1. [5].

2.5 Precipitacijski očvrnuti čelici

Razvojem precipitacijski očvrnutih čelika (PH-čelici engl. Precipitation Hardenable ili Precipitation Hardened) nastojalo se postići visoku granicu razvlačenja uz istovremeno zadržavanje visoke korozivne postojanosti. Pored niskog masenog udjela ugljika i visokog stupnja legiranosti visoko očvrnuće postiže se precipitacijom intermetalnih spojeva [5].

S obzirom na mikrostrukturu čelika prije precipitacije razlikujemo [5]:

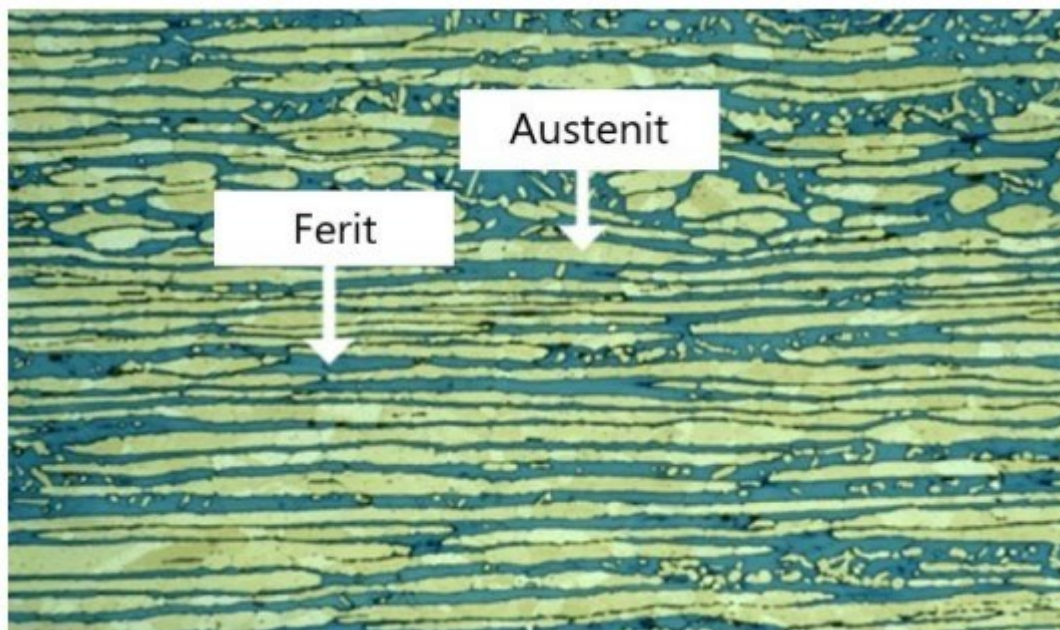
- martenzitne PH čelike,
- poluaustenitne PH-čelike,
- austenitne PH-čelike.

3 DUPLEKS (AUSTENITNO-FERITNI) VISOKOLEGIRANI Cr-Ni ČELICI

Otpornost na koroziju je glavna karakteristika nehrđajućih čelika. Ona je posljedica stvaranja kromovog oksida na površini metala koji čini pasivni sloj koji izolira i „čuva“ površinu od štetnog djelovanja okolne atmosfere [9].

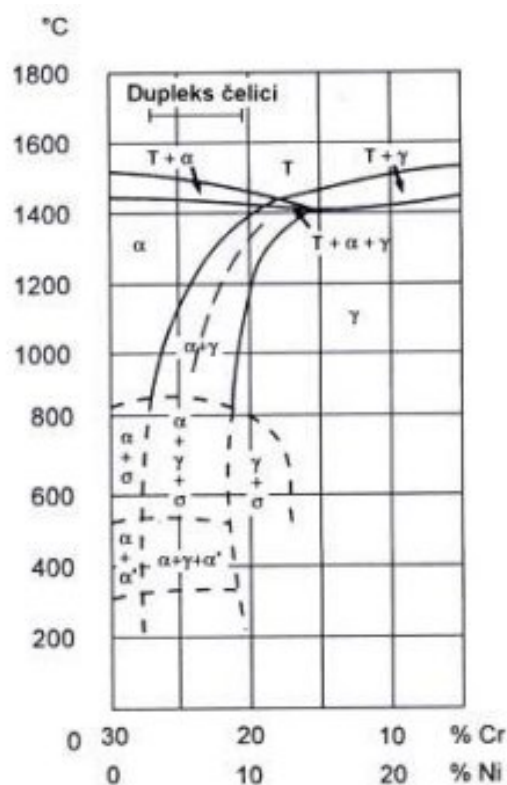
3.1 Mikrostruktura dupleks čelika

Glavni legirni elementi koji omogućuju stabilnu mikrostrukturu dupleks čelika su krom, molibden, nikal, mangan, dušik i volfram [10]. Mikrostruktura se sastoji od austenita i ferita prikazanim na Slika 4.



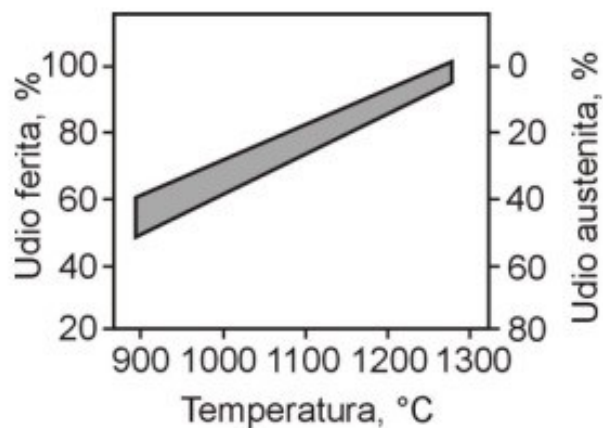
Slika 4 Mikrostruktura nehrđajućeg dupleks čelika

Na Slika 5 u prikazanom pseudobinarnom dijagramu stanja može se pratiti formiranje strukture dupleks čelika.



Slika 5 Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70% Fe=konst. [11]

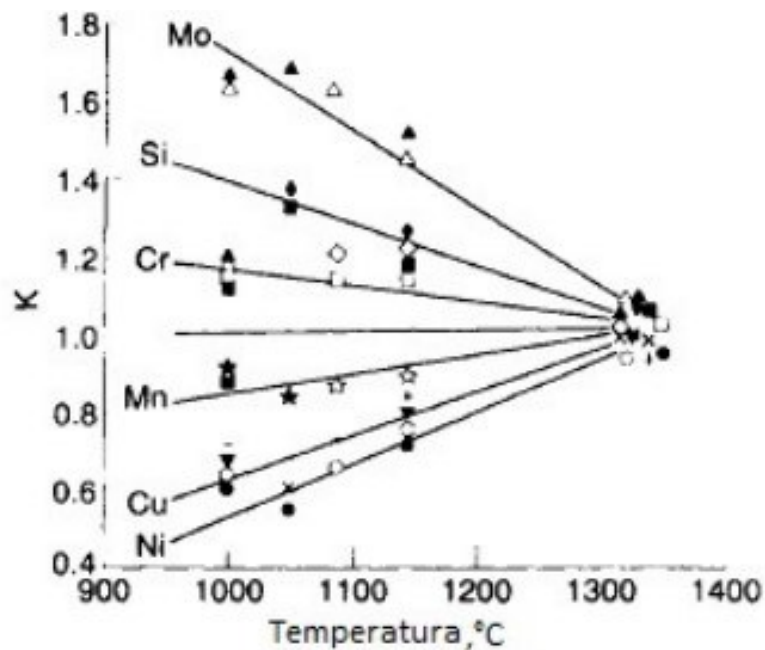
Slika 6 prikazuje promjenu udjela austenita i ferita obzirom na temperaturu zagrijavanja tj, toplinske obrade dupleks čelika.



Slika 6 Promjena udjela austenita i ferita s temperaturom zagrijavanja dupleks čelika [5]

3.1.1 Legirni elementi

Jedan od glavnih ciljeva legiranja dupleks čelika je održavanje dovoljno visokog udjela austenita što je posebice važno tijekom zavarivanja (u zoni metala zavara i zoni utjecaja topline). Previsoki udio ferita može uzrokovati sniženje korozijske postojanosti te pojavu krhkosti [8]. Kako je važan njihov omjer, može se vidjeti iz Slika 7, gdje K označava omjer austenita i ferita.



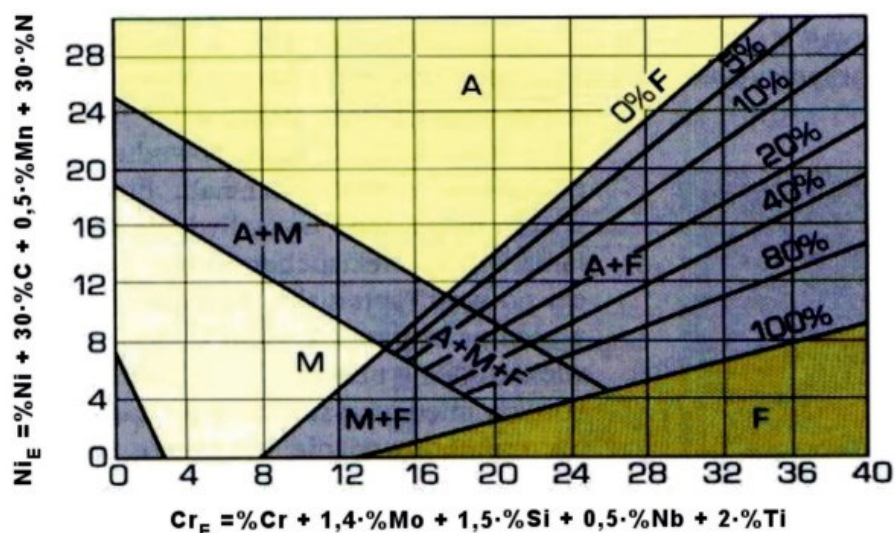
Slika 7 Ovisnost udjelnog koeficijenta o temperaturi kod legirnih elemenata [12]

Ako se promatra utjecaj legirnih elemenata na dijagram stanja Fe-C, tada legirne elemente dijelimo na [13]:

- gamagene elemente koji proširuju područje austenita (mangan, nikal, kobalt),
- alfagene elemente koji proširuju područje ferita (krom, molibden, vanadij, volfram).

Monofazna feritna mikrostruktura postiže se legiranjem s alfagenim elementima (feritotvorcima), od kojih je najjači krom, a tu su još silicij, aluminij, molibden, vanadij, niobij i titan. Gamageni elementi (austenitotvorci) omogućavaju stvaranje monofazne austenitne mikrostrukture; od ovih elemenata najjači je nikal, a tu su još mangan, kobalt, bakar i dušik [13].

Dobar uvid u postizivu mikrostrukturu na osnovi poznatog kemijskog sastava daje tzv. strukturni Schaefflerov dijagram (Slika 8), koji pomaže u definiranju strukturnog stanja čelika na osnovi poznavanja Cr-ekvivalenta (Cr_e) i Ni-ekvivalenta [13].



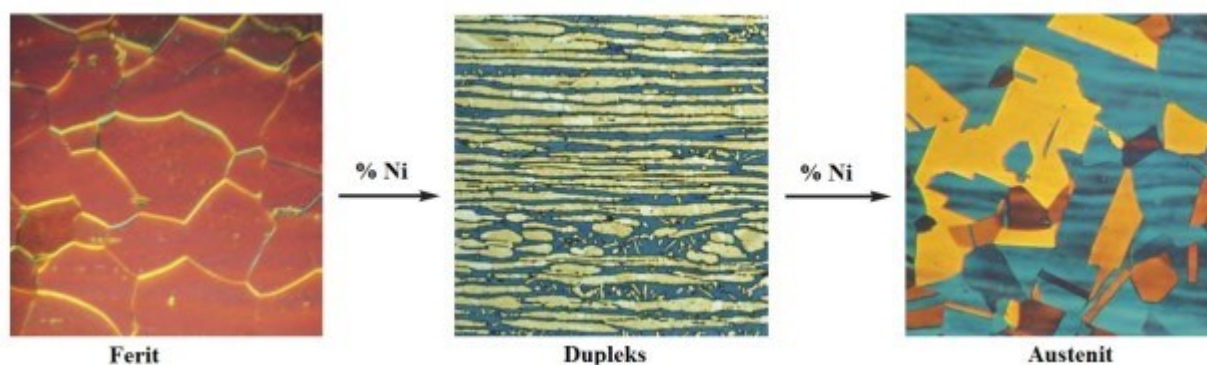
Slika 8 Schaefflerov strukturni dijagram

3.1.1.1 Krom

Krom omogućuje stvaranje pasivnog sloja na površini te je njegov minimalni udio 10,5%. Njegovim povišenjem otpornost na koroziju raste, međutim pri visokim udjelima počinje negativno utjecati zbog stvaranja intermetalnih faza [10].

3.1.1.2 Nikal

Nikal se dodaje dupleks čeliku radi stabilizacije austenita i povećanja udarnog rada loma materijala [10]. Sniženi udio nikla u dupleks čelicima (u odnosu na 68 čelik 18/8) potrebno je kompenzirati dodatkom dušika ili mangana [5]. Na Slika 9 vidi se ovisnost mikrostrukture čelika o niklu.



Slika 9 Mikrostruktura čelika ovisna o udjelu nikla [14]

3.1.1.3 Mangan

Mangan zovu stabilizatorom austenita kod austenitnih nehrđajućih čelika, a za dupleks čelike rezultati su mješoviti. Iako mangan nema veliki utjecaj na ravnotežu faza kod dupleks čelika, može povećati temperaturni raspon i tako ubrzati razvoj štetne sigma faze [12].

Dodaci mangana povećavaju otpornost na trošenje i povisuje vlačnu čvrstoću [10]. Međutim, dodaci mangana veći od 3% do 6%, uz dušik od 0,1% odnosno 0,23% , značajno smanjuju rupičastu koroziju [12].

3.1.1.4 Dušik

Dušik poboljšava otpornost na koroziju i također povisuje vlačnu čvrstoću te je iznimno bitan element pri zavarivanju dupleks čelika [10].

3.1.1.5 Molibden

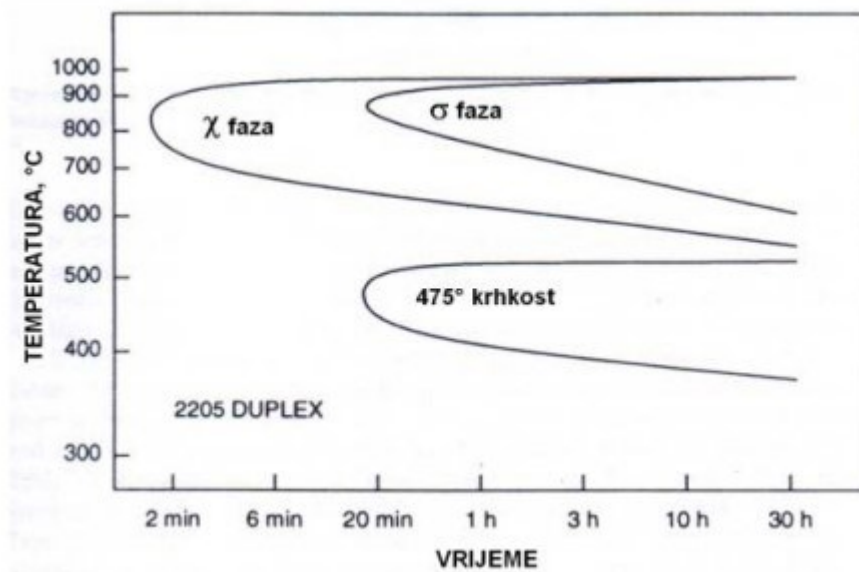
Molibden također povisuje antikorozivna svojstva, posebice u kloridnim okruženjima, međutim njegov udio treba biti manji od 4%. Ova dva elementa su alfa-ageni elementi što znači da potiču stvaranje ferita i njihov udio utječe na stabilnost faza (50:50) dupleks mikrostrukture [10].

3.1.1.6 Wolfram, Bakar i Silicij

Wolfram, bakar i silicij dodaju se dupleks čelicima zbog poboljšanja otpornosti na rupičastu koroziju te koroziju u procjepu.

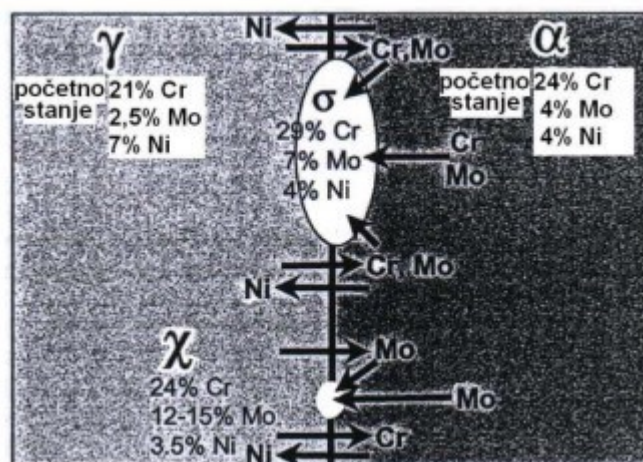
3.1.2 Štetne intermetalne sekundarne faze

Tijekom zavarivanja dolazi do promjene izgleda mikrostrukture i formacija različitih faza. Osim feritne i austenitne faze javljaju se i štetni intermetalni spojevi i sekundarne faze koje imaju velik utjecaj na mehanička i antikorozivna svojstva [15]. Slika 10 prikazuje TTT dijagram koji pokazuje vrijeme inkubacije za sigma-fazu i chi-fazu ovisno o temperaturi za standardni 2205 dupleks čelik te pojavu krhkosti 475. Treba se obratiti posebna pozornost na temperature više od 600°C gdje kreću nastajati sigma i chi faze, posebice sigma faze koja uvelike utječe na mehanička i korozivna svojstva dupleks čelika.



Slika 10 TTT-dijagram nastanka štetnih faza za 2205 dupleks čelika [16]

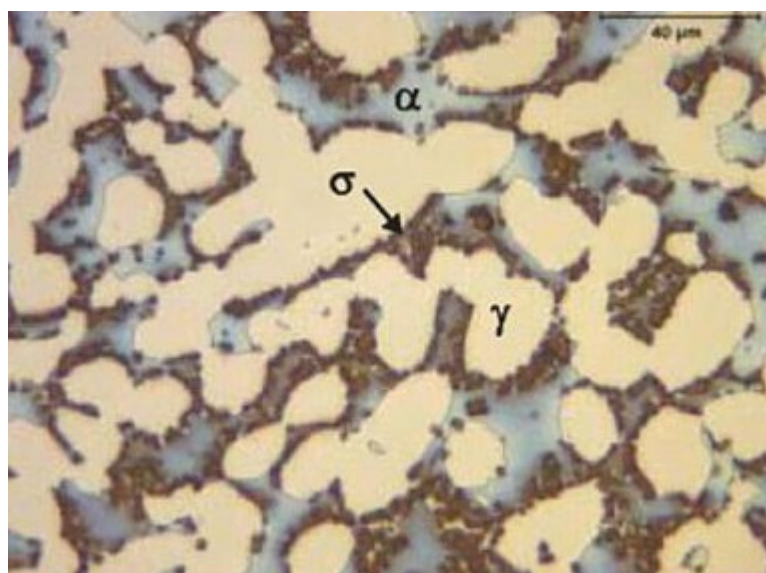
Slika 11 prikazuje difuziju kroma, molibdena i nikla pri nastanku ovih faza na granici između feritnog i austenitnog zrna. Chi-faza nastaje brže i često predstavlja nukleus nastanka sigma faze u koju se potpuno pretvara duljim zadržavanjem na povišenim temperaturama [16].



Slika 11 Prikazuje difuziju kroma, molibdena i nikla pri nastanku ovih faza na granici između Sigma i Chi faza [16]

3.1.2.1 Sigma faza (σ)

Intermetalna sigma-faza može nastati u austenitu i feritu, ona je i najopasnija [5]. Sigma faza je tvrda, oko 940 HV (68 HRC) i iznimno krhka faza obogaćena Cr, Mo i Si te djeluje i u malim postocima iznimno štetno na mehanička i antikorozivna svojstva zavarenog spoja. Osiromašuje okolno područje od kroma te povećava posebno rizik od nastanka rupičaste korozije. Slika 12 prikazuje mikrostrukturu duplex čelika nakon jednog ciklusa žarenja, njegovu sigma fazu, ali i chi i ferit fazu.



Slika 12 Mikrostruktura sigma faze [17]

Sigma faza se može ukloniti žarenjem iznad 1000 °C.

3.1.2.2 Chi faza (χ)

Chi (χ) faza je kubična intermetalna faza, bogata molibdenom koja nastaje pri temperaturama od 700°C do 900°C. Obično sadrži oko 28 % kroma i 22 % molibdena te ostalih legiranih elemenata u manjim količinama za razliku od sigma faze. Razvoj chi faze je brz zbog njegove prostorno kubične rešetke, dok je njen rast spor. Slika 12 osim sigma faze, prikazuje i Chi fazu kod dupleks čelika.

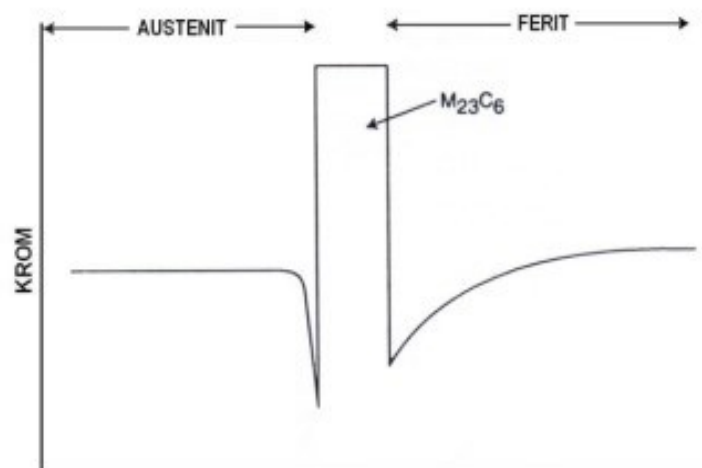
3.1.2.3 Nitridi (π -faza)

π -faza je identificirana kao nitrid koji se formira na interkristalnim mjestima u dupleks nehrđajućem čeliku nakon izotermalne toplinske obrade na 600 °C u trajanju od nekoliko sati. Radi velikog udjela kroma i molibdena često ju se miješalo sa sigma fazom. Djeluje negativno na žilavost i otpornost na rupičastu koroziju. Za otkrivanje π – faze koriste se metode kao i za chi fazu [18].

Kromovi nitridi mogu se taložiti na dva različita mehanizma: ravnotežnog i neravnotežnog mehanizma. Ravnotežni nitridi talože se tijekom izotermnog starenja. Oni su CrN ili Cr₂N i talože se na granicama austenit/ferit ili ferit/ferit. Također se mogu naći unutar austenita blizu granica faza zbog rasta sekundarnog austenita u ferit. Neravnotežni nitridi, s druge strane, talože se u uzorcima koji se zagrijavaju do visokih temperatura nakon čega slijedi brzo hlađenje što je tipično kod zavarivanja [13].

3.1.2.4 Karbidi

Karbidi nastaju sporim ohlađivanjem ili zadržavanjem na temperaturi između 820 i 480 °C. Najveći tehnički značaj ima karbid tipa M₂₃C₆ koji nastaje na granici između feritnog i austenitnog zrna [18]. Slika 13 prikazuje sadržaj kroma preko karbida na feritno-austenitnoj granici.



Slika 13 Shema sadržaja kroma preko karbida M₂₃C₆ na feritno-austenitnoj granici [18]

Žarenjem na 870-950 °C mogu se učinkovito ukloniti izlučeni karbidi kroma koji nastaju po granicama ferit/austenit. Nakon takvog žarenja potrebno je provesti hlađenje na zraku ili u ulju radi izbjegavanja nastanka sigma faze i “krhkosti 475°C“ [5].

3.1.2.5 R faza

R-faza se formira na temperaturama između 550 i 800 °C i bogata je molibdenom. Kao i druge intermetalne faze, R-faza smanjuje udarnu žilavost i korozijsku postojanost dupleks čelika. R-faza se jako brzo stvara između 550 i 650 °C, a na višim temperaturama se pretvara u sigma fazu u vrlo kratko vrijeme [18].

3.1.2.6 Sekundarni austenit (γ_2)

Sekundarni austenit (γ_2) formira se na temperaturi između 700 i 900 °C. Sadrži manje dušika, kroma, i molibdena u odnosu na austenit formiran na višim temperaturama. Oblik sekundarnog austenita može biti Widmannstättenovog ili globularnog tipa što ovisi o transformacijskom mehanizmu i mjestu nastanka. Widmannstättenov tip je najčešće prisutan u metalu zavara. Potpomaže izlučivanje faza bogatih kromom i smanjuje otpornost na rupičastu koroziju [16].

3.1.2.7 Epsilon faza (ϵ)

Epsilon faza stvorit će se jedino kod duplex nehrđajućih čelika koji sadrže bakar kao legirni element. Epsilon faza se formira nakon 100-satnog izlaganja temperaturi od 500 °C radi zasićenja feritne matrice i pada topivosti na nižim temperaturama. Epsilon faza pokazala je svojstvo poboljšanja mikrostrukture, no utjecaj na žilavost i korozijsku postojanost nisu adekvatno dokumentirani [18].

3.2 Svojstva dupleks čelika

3.2.1 Mehanička svojstva

Mehanička svojstva dupleks čelika su spoj mehaničkih svojstava njegovih mikrostrukture, tj mehaničkih svojstava ferita i austenita. Žilavost austenita i tvrdoća ferita čine dupleks čelike materijalima široke primjene [12]. Prijelaz iz žilavog u krhko područje je vrlo postupan, a dobru žilavost zadržavaju do 40 °C.

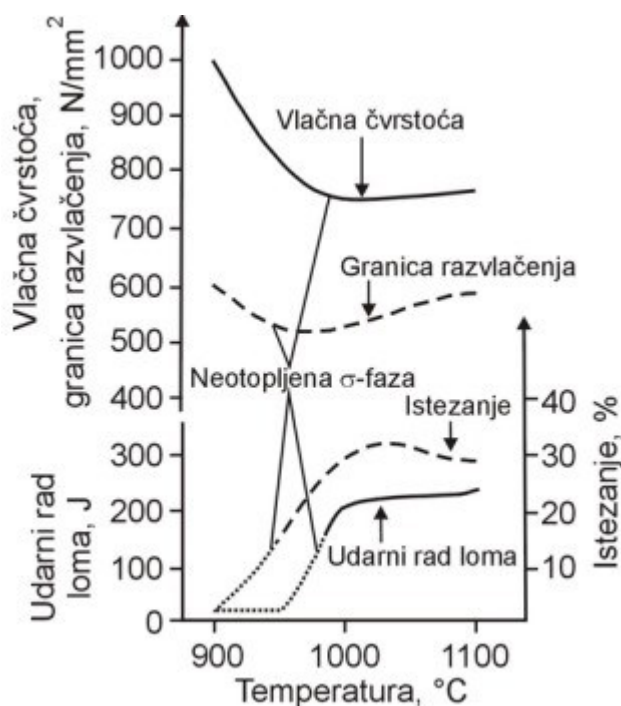
Tvrdoća dupleks čelika viša je i od feritnih i austenitnih nehrđajućih čelika zbog njihove mikrostrukture. Super dupleks čelici imaju odlična mehanička svojstva pri temperaturama do 300°C. No, pri višim temperaturama imaju ograničenu primjenu zbog problema pojave sekundarnih faza. Kod temperatura iznad 500°C dolazi do nastanka sigma i chi faza koje znatno smanjuju žilavost dupleks čelika [15].

Za mehanička svojstva dupleks čelika općenito vrijedi sljedeće [19]:

- Tvrdoća dupleks čelika kreće se u rasponu od 250 do 350 HV po Vickersu;
- Mikrotvrdoća: austenita ~ 300 HV po Vickersu, ferita od 300 do 550 HV po Vickersu;

- Vlačna čvrstoća, R_m : 700-1100 N/mm² ;
- Konvencionalna granica razvlačenja, $R_{p0,2}$: 500-800 N/mm²;
- Udarni rad loma, KV: do 170 J.

Slika 14 pokazuje ovisnost mehaničkih svojstava dupleks čelika o temperaturi gašenja, tj. kako pri temperaturi gašenja ispod 1050 °C zaostaje dio neotopljene sigma faze. Međutim, budući da iznad 1100 °C dolazi do znatnog porasta sadržaja ferita dupleks čelici se uglavnom ne zagrijavaju iznad 1100 °C [5].



Slika 14 Ovisnost mehaničkih svojstava dupleks čelika X2CrNiMoN 22 5 o temperaturi gašenja [5]

3.2.2 Korozijska postojanost

Dupleks čelici se dijele u nekoliko grupa prema antikorozivnim svojstvima uslijed svog različitog kemijskog sastava.

Zbog dvofazne austenitno-feritne mikrostrukture dupleks čelici pokazuju manju otpornost prema općoj korozijskoj, ali imaju znatno povišenu postojanost prema napetosnoj korozijskoj u kloridnim otopinama kao i u atmosferi H₂S-a [5].

3.2.2.1 Rupičasta korozijska

Jedan od pokazatelj antikorozivnih svojstava je PREN indeks (PREN – eng. Pitting Resistance Equivalent Number) koji pokazuje otpornost prvenstveno na rupičastu korozijsku i računa se prema jednadžbi (1); [10]

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

Tako su dupleks čelici podijeljeni u tri grupe; [10]

- lean dupleks čelici; $PREN < 30$,
- standardni dupleks čelici; $30 < PREN < 40$,
- super dupleks čelici; $PREN > 40$.

Odnosno prema normi HRN EN 1011-3:2018 za niskolegirane, srednje legirane i visoko legirane dupleks čelike. Dupleks 2205 čelik spada u standardne nehrđajuće čelike s $PREN = 35$ odnosno srednje legirane čelike [10].

3.2.2.2 Napetosna korozija

Napetosna korozija (engl. SCC – Stress Corrosion Cracking) je selektivni oblik korozije koji nastaje u tehničkim materijalima zbog istodobnog djelovanja okoline, eksploatacije, mehaničkih napreznja te korozijskih reakcija. Okolina eksploatacije ima veliki utjecaj na nastanak i širenje napetosne korozije, neki od parametara su: temperatura, tlak, vrsta otopine, koncentracija otopine i njena aktivnost, pH vrijednost, elektrodni potencijal, viskoznost otopine i miješanje. [20]

Napetosna korozija Cr-Ni čelika je lokalni korozijski proces koji ni do danas u cijelosti nije obrađen i razjašnjen. Radi se o korozijskom fenomenu koji transkristalno ili interkristalno razara strukturu materijala i nerijetko iznenada dovodi postrojenja izvan upotrebe. Na nastanak i razvoj napetosne korozije djeluje više čimbenika te ju je najčešće teško predvidjeti i otkriti prije njene završne faze – loma. Ovaj oblik selektivne korozije ujedno je i najčešći korozijski proces koji zahvaća ovu skupinu materijala. [20]

Korozijski procesi koji izazivaju napetosnu koroziju teško su uočljivi, a najčešće se javljaju tijekom eksploatacije. Rezultiraju velikim gubitkom mehaničke čvrstoće, kasnije i lomom, a sve to uz mali gubitak mase materijala. Srećom, za pojavu i nastanak napetosne korozije istodobno moraju biti ispunjena tri uvjeta [20]:

1. Materijal sklon napetosnoj koroziji
2. Agresivni medij koji u kombinaciji s materijalom pogoduje nastanku napetosne korozije
3. Napreznje

Proces napetosne korozije možemo podijeliti u 4 glavne faze [20]:

1. Inkubacija
2. Inicijacija pukotine
3. Prodiranje (propagacija) pukotine
4. Lom

Ako je to moguće, napetosnu koroziju je najlakše izbjeći pravilnim konstrukcijskim rješenjima te odabirom materijala koji u kombinaciji s agresivnim okruženjem nije podložan ovom obliku korozije. [20]

3.3 Primjena dupleks čelika

Dupleks čelici se najčešće primjenjuju u [5].:

- industriji nafte i plina (crpke, desulfurizatori, destilatori, desalinizatori, ventili, cjevovodi, pumpe),
- petrokemijskoj industriji (alati za ekstruziju PVC filma, apsorberi, separatori, izmjenjivači topline),
- kemijsko-procesnoj industriji (u proizvodnji kiselina, rad s otopinama u dušićnoj kiselini, uređaji za sumpornu kiselinu, sapnice),
- brodogradnji (osovine propelera, kormila, crpke, grijači, ležajevi),
- industriji papira (ventili, cijevi regeneracijskih peći, osovine mješača, pročišćavanje vode),
- transportu (cisterne).

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 . [21] Na Slika 15 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. [22]



Slika 15 Tanker za prijevoz kemikalija Sunrise Hope [22]

4 ZAVARLJIVOST DUPLEKS ČELIKA

Dupleks čelici se smatraju dobro zavarljivim visokolegiranim Cr-Ni čelicima iako je zavarivanje dupleks čelika dugo vremena predstavljalo dosta velik problem.

Zavarljivost dupleks čelika odnosno optimizacija udjela faze austenita i ferita u mikrostrukturi uvelike poboljšana uvođenjem dušika kao dodatnog legirnog elementa kao i zaštitnog plina. Iako je zavarljivost dupleks čelika danas vrlo dobra, zavarivanje je nužno izvoditi kontroliranim uvjetima u smislu pravilnog odabira parametara [23], [24]:

- prikladnog postupka za zavarivanje dupleks čelika,
- skladištenje, rukovanje i priprema,
- zaštitni plinovi,
- odabir dodatnog materijala,
- predgrijavanje,
- unos topline,
- osjetljivost na tople i hladne pukotine,
- korozijska postojanost nakon zavarivanja,
- naknadna toplinska obrada,
- čišćenje uzoraka.

Za zavarivanje dupleks čelika mogu se primijeniti sljedeći postupci zavarivanja:

- MIG, MAG,
- REL ,
- TIG,
- EPP,
- Plazma zavarivanje,
- zavarivanje praškom punjenom žicom,
- Zavarivanje laserom.

Predgrijavanje duplex čelika je nepotrebno, ali se može predgrijavati eventualno na 40/50 °C u svrhu uklanjanja vlage sa površine [24].

4.1 Karakteristike zavarenog spoja dupleks čelika

Dupleks čelici s niskim udjelom ili potpuno bez dušika često su imali prevelik udio ferita u metalu zavara i zoni utjecaja topline. Kao posljedica zavarenog spoja je imao nisku korozijsku postojanost i nisku žilavost. Dodatnim legiranjem s dušikom se postigla ujednačenost austenitne i feritne faze te se smanjila intenzivna feritizacija koja se događala tokom hlađenja nakon postupka zavarivanja [25].

4.2 Unos topline kod dupleks čelika

Unos topline za dupleks nehrđajuće čelike treba biti unutar određenih granica. Nisko i srednje legirani dupleks čelici se obično zavaruju s unosom topline između 0,5 kJ/mm i 2,5 kJ/mm te s temperaturom međuprolaza manjom od 100°C [24].

Za visokolegirane dupleks čelike unos topline treba biti između 0,2 kJ/mm i 1,5 kJ/mm, s maksimalnom temperaturom međuprolaza ispod 100 °C. Razlog ograničavanja donjeg i gornjeg iznosa unosa topline leži u tome što se dupleks čelik uslijed premalog unosa topline prebrzo hladi što uzrokuje visoke udjele ferita. Suprotno tome, uslijed prevelikog unosa topline dolazi do precipitacije intermetalnih faza. Navedeno je kako su ovo generalne smjernice te treba obavezno uzeti u obzir i debljinu materijala i vrstu procesa zavarivanja [24].

4.3 Dodatni materijal kod zavarivanja dupleks čelika

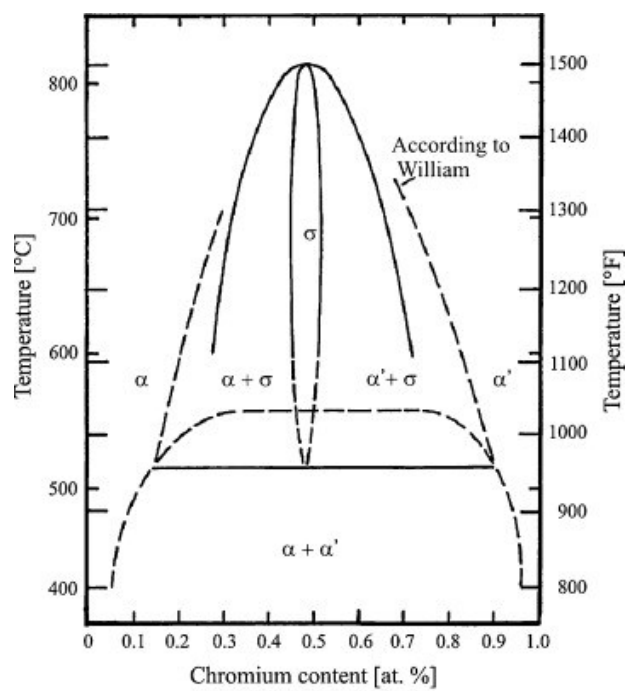
Pri zavarivanju dupleks čelika, dodatan materijal treba sadržavati veće udjele nikla od osnovnog. Kako je gamageni element, doprinosi nastanku i balansu austenitno feritne strukture u metalu zavara. Time se smanjuje štetan efekt brzog hlađenja i većeg stupnja miješanja što je posebno slučaj za korijenski prolaz. Prema tome se primjerice za srednje legirani dupleks čelik treba koristiti dodatan materijal od visokolegiranog dupleks čelika [24].

4.4 Pojava krhkosti 475 °C

Uslijed visokih temperatura, nakon feritizacije, dolazi do pogrubljenja zrna uslijed sporog ohlađivanja do mogućih pojava izlučivanja, posebice, stvaranja uvjeta za tzv. "krhkost 475 °C".

Pojave koje uzrokuju krhkost dupleks čelika slične su pojavama koje se javljaju kod feritnih čelika: sigma faza (600-900 °C) i "krhkost 475 °C" (400-500 °C). Uklanjanje krhkosti 475 može se provesti zagrijavanjem čelika na 1050- 1100 °C te hlađenjem u vodi. Žarenjem na 870-950 °C mogu se učinkovito ukloniti izlučeni karbidi kroma koji nastaju po granicama ferit/austenit. Nakon takvog žarenja potrebno je provesti hlađenje na zraku ili u ulju radi izbjegavanja nastanka sigma faze i "krhkosti 475 °C". Pritom, ferit ima višu granicu razvlačenja, nižu vlačnu čvrstoću i nižu plastičnost nego austenit. U dupleks čelicima ferit predstavlja anodu austenitu, tj. austenit je katodno zaštićen. Kod izrazito visokih naprezanja ferit može biti trajno deformiran tako da napukne austenitno zrno, ali se napuklina ipak zaustavlja na graničnoj površini ferit/austenit te tek na kraju puca ferit [5].

Slika 16 prikazuje ovisnost temperature o udjelu kroma kod dupleks čelika za pojavu krhkosti 475.

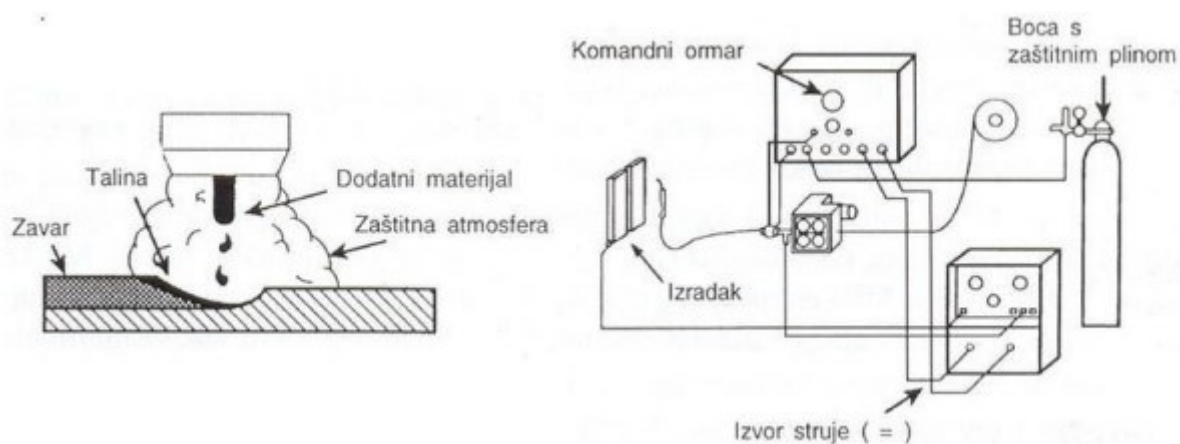


Slika 16 Krhkost 475 °C [26]

5 MIG/MAG ZAVARIVANJE

MIG/MAG odnosno elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog/aktivnog plina, je elektrolučni postupak zavarivanja taljenjem, gdje se električni luk uspostavlja između kontinuirane, taljive elektrode u obliku žice i radnog komada (prikazani na shemi (Slika 17)). [27] Osnovna oprema sastoji se od izvora struje, koluta sa žicom, sustava za dobavu žice, sustava za dovod plina i plinske boce, pištolja za zavarivanje i polikabela. Elektroda u obliku žice kontinuirano se dovodi kroz polikabel do pištolja za zavarivanje, kao što se vidi na Slika 17.

Električni luk generira toplinu za taljenje dodatnog i osnovnog materijala. Zaštitne atmosfere mogu biti inertne (argon, helij) i aktivne (ugljikov dioksid i mješavine). Postupak može biti poluautomatiziran (dodavanje žice je automatizirano, a vođenje pištolja ručno) ili potpuno automatiziran, odnosno robotiziran.



Slika 17 Shematski prikaz MAG zavarivanja [27]

Prema normi HRN EN ISO 4063:2023 Zavarivanje i srodni postupci - Nomenklatura postupaka i referentni brojevi označava se oznakom 131 (MIG) i 135 (MAG) .

Aktivni zaštitni plin koji se koristi u procesu je ugljikov dioksid ili neka njegova mješavina s argonom, helijem ili kisikom, a njegova zadaća je zaštititi električni luk i rastaljeni metal od negativnog utjecaja okoline i ionizirati vodljivi prostor za održavanje električnog luka. Električni luk je snažno i trajno pražnjenje u ionizirajućem plinu između radnog komada i elektrode u obliku žice, koja je u pravilu spojena na „+“ pol istosmjernog (DC) izvora struje, u strujnom krugu. Proces se odvija tako da pogonski sistem konstantnom brzinom dodaje žicu u električni luk kroz cijevni paket i pištolj. Pri zavarivanju na udaljenosti većoj od 5 m od izvora struje potrebno je koristiti dodatni pogon za dodavanje žice smješten u samom pištolju da bi se smanjio rizik gužvanja žice unutar cijevnog vodiča. Taj sistem naziva se „push-pull“, a koristi se i na manjim udaljenostima u slučaju rada sa žicama manjeg promjera (0,6 - 0,8 mm). Žica istovremeno obavlja zadaću elektrode i dodatnog materijala, odnosno njenim taljenjem popunjava se unaprijed pripremljeni žlijeb. MAG postupak lako je automatizirati i danas, ovisno o potrebi, postoji izbor između poluautomatskog

(dodavanje žice je mehanizirano, a vođenje pištolja ručno), automatskog (glava pištolja pokretana je automatskim mehanizmom, a radni komad je nepomičan ili obratno) ili robotiziranog sustava za MAG zavarivanje. [27]

5.1 Prednosti i nedostaci MIG/MAG zavarivanja

Prednosti postupka su sljedeće [27]:

- kontinuirano dovođenje žice bez prekida električnog luka omogućava formiranje dugih zavara,
- veliki izbor načina prijenosa metala
- velika proizvodnost i učinkovitost,
- postupak je pogodan automatiziranju,
- mogućnost zavarivanja u svim položajima,
- nema troske,
- zavarivanje je moguće u radionici i na terenu,
- velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa metala,
- postupak je primjenjiv za zavarivanje gotovo svih vrsta materijala,
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina,
- mogućnost primjene praškom punjene žice,
- širok raspon debljine materijala,
- moguća primjena za lemljenje.

Nedostaci [27]:

- otežana zaštita plinskom atmosferom na terenu,
- problemi pri dovođenju žice,
- greške uslijed neodgovarajuće tehnike i loše izabranih parametara zavarivanja,
- pojava štrcanja prilikom zavarivanja kratkim spojevima,
- relativno složen uređaj.

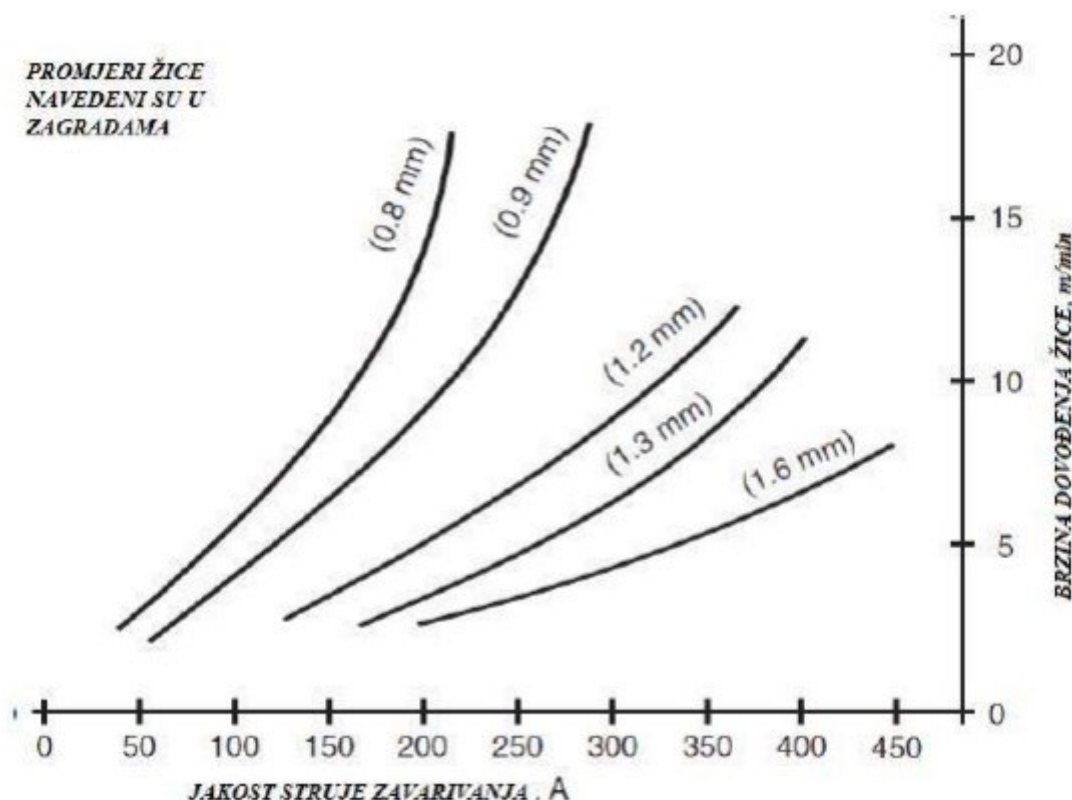
5.2 Osnovni parametri MAG zavarivanja

Najutjecajniji čimbenici o kojima ovisi kvaliteta zavarenog spoja nakon zavarivanja MAG postupkom zavarivanja nazivaju se parametri zavarivanja. Najvažniji parametri zavarivanja kod MAG postupka zavarivanja su [28]:

- jakost struje

O jakosti struje ovise način na koji će se rastaljeni metal prenositi u električnom luku, stabilnost električnog luka, penetracija, količina taline i brzina zavarivanja. Sama jakost struje ovisi, odnosno određuje se prema promjeru žice, položaju zavarivanja i vrsti i debljini materijala, a razlikuje se i

za različite načine prijenosa metala u električnom luku. Na Slika 18 prikazana je ovisnost jakosti struje o promjeru žice i brzini zavarivanja [29], [28].



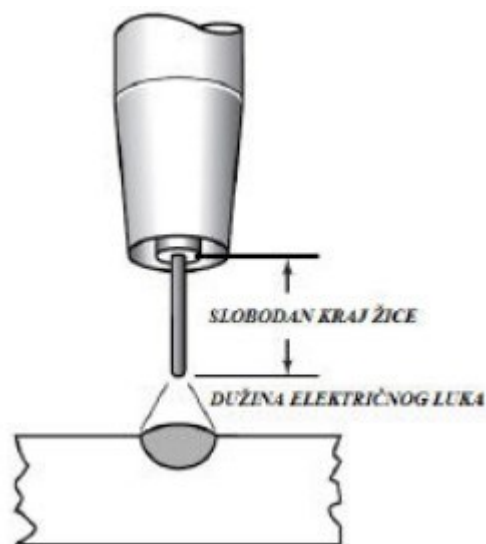
Slika 18 Ovisnost jakosti struje o promjeru žice 1,2 mm i brzini zavarivanja [29]

- brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja je parametar o kojem ovisi produktivnost postupka zavarivanja te zbog toga treba obratiti pozornost kako bi se pravilno odabrala. Kod ručnog postupka ona ovisi o zavarivaču. Odabir brzine zavarivanja ovisi o položaju zavarivanja i jakosti struje zavarivanja (ovisnost brzine zavarivanja o jakosti struje prikazana je na Slika 18). Izgled profila zavara ovisi o brzini zavarivanja (povećanjem brzine zavarivanja zavar postaje uži, a penetracija manja. [29], [28])

- slobodni kraj žice

Slobodnim krajem žice naziva se dio od kraja kontaktne vodilice do kraja žice (dio koji je vidljiv zavarivaču) i njegova promjena utječe na jakost struje u električnom luku. Povećanjem slobodnog kraja žice povećava se otpor protoku struje što uzrokuje pad jakosti struje zavarivanja. Da bi se održala konstantna vrijednost penetracije potrebno je slobodni kraj žice održavati konstantnim i izbjegavati njegovo smanjenje ili povećanje. Na Slika 19 definiran je slobodni kraj žice [29].



Slika 19 Slobodan kraj žice [29]

- Napon

O naponu ovise stabilnost električnog luka te njegova duljina i širina. Veći napon uzrokuje duži električni luk čime se dobiva širi zavar uz manju penetraciju. Iznos napona drugačiji je za različite načine prijenosa metala. [29]

- Induktivitet

Induktivitet (uspon struje) se može mijenjati (količina induktiviteta primijenjenog na električni luk može se podesiti) ili biti fiksno podešen (optimalni nivo induktiviteta ugrađen je u izvor struje za zavarivanje). [29]

- Vrsta i protok zaštitnog plina

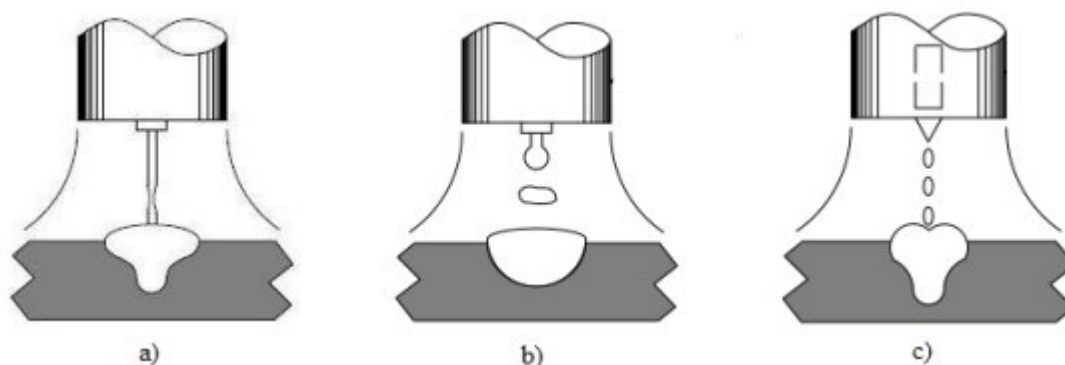
Zaštitni plin je parametar koji ima veliki utjecaj na stabilnost električnog luka, oblik profila zavara (širinu i penetraciju) i brzinu zavarivanja. Zaštitni plin mora čuvati područje zavara od negativnog utjecaja plinova iz atmosfere. Protok zaštitnog plina regulira se u odnosu na promjer žice, računa se otprilike množenjem iznosa promjera žice sa deset do 12. Za veću struju zavarivanja potreban je i veći protok zaštitnog plina. [29]

5.3 Načini prijenosa metala u električnom luku

Prijenos metala predstavlja proces leta rastaljene kapljice od vrha elektrode kroz električni luk do taline metala zavara. Kod MIG/MAG zavarivanja prijenos metala igra veliku ulogu jer je odabirom parametara zavarivanja moguće definirati odgovarajući prijenos metala koji za odabranu primjenu predstavlja optimalan odabir. Dobro poznavanje procesa prijenosa metala vrlo je bitno kako bi se postigla visoka kvaliteta i produktivnost procesa zavarivanja. Formiranje kapljice teoretski je vrlo teško opisati zbog dinamike rasta kapljice rastaljenog metala, toplinskih promjena u elektrodi te prijenosa toplinske energije putem električnog luka. Zbog navedene kompleksnosti,

u literaturi se modeli za predviđanje prijenosa metala kod MIG/MAG zavarivanja temelje na pojednostavljenim opisima utjecajnih čimbenika na formiranje kapljice rastaljenog metala. Dvije najpoznatije teorije modela prijenosa metala su teorija ravnoteže statičkih sila (eng. SFBT – Static Force Balance Theory) i teorija nestabilnosti magnetskog štipanja (eng. PIT – Pinch Instability Theory) [79]. SFBT teorija se temelji na ravnoteži između sila gravitacije, elektromagnetskih sila, sila plazme električnog luka i sila zbog površinske napetosti. Prema SFBT teoriji, do otkinuća kapljice dolazi u trenutku kada statičke sile koje djeluju na otkidanje kapljice postignu veću ukupnu vrijednost od onih statičkih sila koje djeluju na zadržavanje kapljice na elektrodi [80]. PIT teorija uzima u obzir nepravilnosti koje se javljaju tijekom djelovanja radijalne komponente elektromagnetske sile na beskonačan cilindričan stup tekućeg metala. Prema toj teoriji do otkinuća kapljice dolazi zbog djelovanja elektromagnetske sile (njene radijalne komponente) koja prekida mlaz tekućeg metala u kapljice – dolazi do „pinch“ efekta [30], [31].

Parametri koji utječu na promjenu u načinu prijenosa metala su: kemijski sastav i promjer dodatnog materijala, sastav zaštitnog plina, jakost struje i njen polaritet te duljina električnog luka (napon električnog luka). Pri elektrolučnom zavarivanju taljivom elektrodom postoje dva načina prijenosa dodatnog materijala od elektrode do radnog komada tj. taline. Materijal se može prenositi slobodnim letom kapljica ili premošćivanjem. Zbog specifičnosti pojava i duljine električnog luka kod prijenosa premošćivanjem razlikujemo prijenos metala kratkim spojevima i prijenos metala mješovitim lukom (prijelaznim lukom), a kod prijenosa slobodnim letom kapljica štrcajući i impulsni luk. Prijenos metala kratkim spojevima, mješovitim i štrcajućim lukom spadaju u prirodne prijenose, dok impulsni prijenos kapljica spada u kontrolirani prijenos metala. [30], [31] Shematski prikaz prijenosa metala prirodnim načinom prijenosa metala prikazan je na Slika 20



Slika 20 Shematski prikaz prijenosa metala prirodnim načinom: a) kratkim spojevima; b) prijelaznim lukom; c) štrcajućim lukom [31]

Osim impulsnog, kao trenutno najraširenijeg kontroliranog načina prijenosa metala, postoje još i razne vrste modificiranih načina prijenosa metala: CBT – engl. Controlled Bridge Transfer, STT – engl. Surface Tension Transfer, CMT – engl. Cold Metal Transfer, Rapid Arc Transfer, itd.. Zbog sve većeg broja i primjene novorazvijenih kontroliranih načina prijenosa metala, sve se više pažnje posvećuje modificiranju postojećih klasifikacija koje uključuju samo prirodne načine prijenosa metala. [30]

5.3.1 Prijenos metala kratkim spojevima

Prijenosom metala kratkim spojevima dolazi do taljenja kontinuirano dobavljane žice pomoću električnih kratkih spojeva koji se periodički ponavljaju. Kod prijenosa kratkim spojevima, ovisno o promjeru žice, koriste se male struje zavarivanja (od 50 A do 170 A), niski naponi (od 13 V do 21 V) te zaštitni plin ugljikov dioksid ili mješavine (CO_2+Ar , $\text{CO}_2+\text{Ar}+\text{O}_2$). Glavne značajke su mali unos topline i činjenica da se sav prijenos dodatnog metala vrši pri fizičkom kontaktu žice i osnovnog materijala odnosno taline. Period pri kojem se odvaja jedna kapljica metala dijeli se na fazu kratkog spajanja i fazu električnog luka. Do odvajanja kapljice dolazi u prvoj fazi u kojoj se vrh elektrode nalazi u fizičkom kontaktu s rastaljenim metalom pri čemu raste jakost struje što dovodi do povećanja magnetske sile koja stišće kapljicu taline i vrška žice, a javlja se na kraju elektrode zbog djelovanja elektromagnetskog polja. Glavni nedostaci prijenosa metala kratkim spojevima su veća količina štrcanja i mali učin taljenja, ali i velika vjerojatnost pojave naljepljivanja [30]

5.3.2 Prijenos metala prijelaznim lukom

Prijenos metala prijelaznim lukom je kombinacija prijenosa slobodnim letom kapljica i u manjoj mjeri kratkim spojevima. Odvija se stvaranjem krupne kapljice metala na vrhu elektrodne žice koja se pod djelovanjem sila u električnom luku odvaja i pada u talinu bez kratkog spoja. Pojedine kapljice, ovisno o duljini električnog luka, gustoći i jakosti struje te naponu luka, mogu toliko narasti da u određenom trenutku dodirnu talinu čime nastupa kratki spoj. [30]

Za postizanje prijenosa metala krupnokapljicastim prijenosom prikladne su veće struje zavarivanja (od 170 A do 235 A) i naponi (od 22 V do 25 V), ovisno o promjeru žice. Takvi parametri uzrokuju pojavu većih kapljica koje se nepravilno odvajaju s vrha elektrode i padaju u talinu. Posljedica toga je više prskanja, neregularnost prijenosa (pojava kratkih spojeva je slučajna i izaziva nepredvidivo štrcanje materijala), teško se kontrolira, položaj zavarivanja je ograničen na položeni položaj, lošije je kvašenje taline, što može uzrokovati nepotpuno spajanje materijala i nastajanje pukotina, a zavar je izbrazdan i nepravilan. Ovaj prijenos metala posebno je izražajan kod zavarivanja u zaštiti ugljičnog dioksida ili mješavina s njegovim snažnim utjecajem. Zbog svih nabrojanih nedostataka prijenos metala prijelaznim lukom se izbjegava te se pokušava minimalizirati u praksi. [30]

5.3.3 Prijenos metala štrcajućim lukom

Prijenos metala štrcajućim lukom karakterizira prijenos puno malih kapljica koji se vrši slobodnim letom kroz atmosferu luka od elektrode prema radnom komadu. Niti u jednom trenutku u vremenu održavanja luka elektroda ne dolazi u dodir s osnovnim materijalom. Sile koje djeluju u električnom luku otkidaju kapi i usmjeruju ih (radijalno u odnosu na elektrodu) prema radnom komadu prije nego vrh elektrode može dodirnuti radni komad. Koristi se relativno visok napon (od 24 V do 40 V), struja (od 200 V do 600 A). Broj kapljica metala otkinutih u sekundi može biti i

više od nekoliko stotina. Promjer kapljice je manji od promjera žice kojom se zavaruje. Veliki unos topline i velika količina nataljenog materijala svojstveni su ovom prijenosu, pa se primjenjuje kod zavarivanja debljih dijelova u vodoravnom položaju. Nije pogodan za zavarivanje u prisilnim položajima, već se isključivo koristi u položenom položaju. Zaštitne plinske mješavine koje posebno podržavaju ovaj način prijenosa jesu one s pretežnim udjelom argona. [30]

Prednosti prijenosa metala štrcajućim lukom su, velika penetracija, veliki depozit, mogućnost korištenja većih promjera žice. Nedostatci ovakvog prijenosa su opasnost od progaranja kod tanjih materijala (koristi se kod materijala od 5 mm i debljih) i opasnost od slijevanja velike količine rastaljenog materijala u prisilnim položajima zbog djelovanja gravitacijske sile. [30]

5.3.4 Prijenos metala impulsnim lukom

Prijenos metala impulsnim lukom po načinu prijenosa kapljica u talinu spada u kontrolirani način prijenosa metala, slobodnim letom kapljica. Prijenos metal se prenosi slobodnim letom kapljica, bez kratkih spojeva odnosno kontroliranim štrcajućim lukom. Kod impulsnog zavarivanja izvor struje generira promjenjiv oblik struje (impuls), koji omogućava otkidanje samo jedne kapljice tijekom impulsa, a količina prijenosa materijala se regulira promjerom žice i brojem impulsa. [30]

Impulsnim načinom prijenosa kapljica osigurava se stabilan i miran električni luk, praktički bez rasprskavanja kapljica. Ovisno o načinu proizvodnje impulsa kod zavarivanja, mogu se koristiti sinusoidni oblik impulsa, pravokutni oblik te drugi oblici impulsa poput trapeznog ili trokutastog. Kod prijenosa impulsnim lukom metal se prenosi bez kratkih spojeva, a najvažnije sile koje utječu na prijenos su elektromagnetska sila i sila površinske napetosti. Upravo je mogućnost upravljanja elektromagnetskom silom omogućila razvoj impulsnih struja. [30]

Prosječna struja zavarivanja kod impulsnog zavarivanja manja je od kritične struje koja rezultira nepravilnim i neprihvatljivim prijenosom metala u grubim kapima. Jakost struje zavarivanja modulira se tako da varira između minimalne (osnovna struja impulsa) i maksimalne struje (vršna struja impulsa). Osnovna struja održava električni luk, dok je duljina trajanja i visina impulsa vršne struje prilagođena tako da premaši kritičnu struju i osigura odvajanje jedne kapi po svakom impulsu. Primjenjiv je u cjelokupnom rasponu od niskih do visokih struja zavarivanja. [30]

Kod impulsnog načina zavarivanja podešavanje parametara je nešto složenije budući da treba uskladiti 5 osnovnih parametara zavarivanja (jakost vršne i osnovne struje, širinu impulsa, frekvenciju impulsa i brzinu dodavanja žice) koji utječu na način i stabilnost prijenosa metala kroz električni luk. Može se primijeniti u svim položajima, te za materijale koji su osjetljivi na količinu unosa topline. [30]

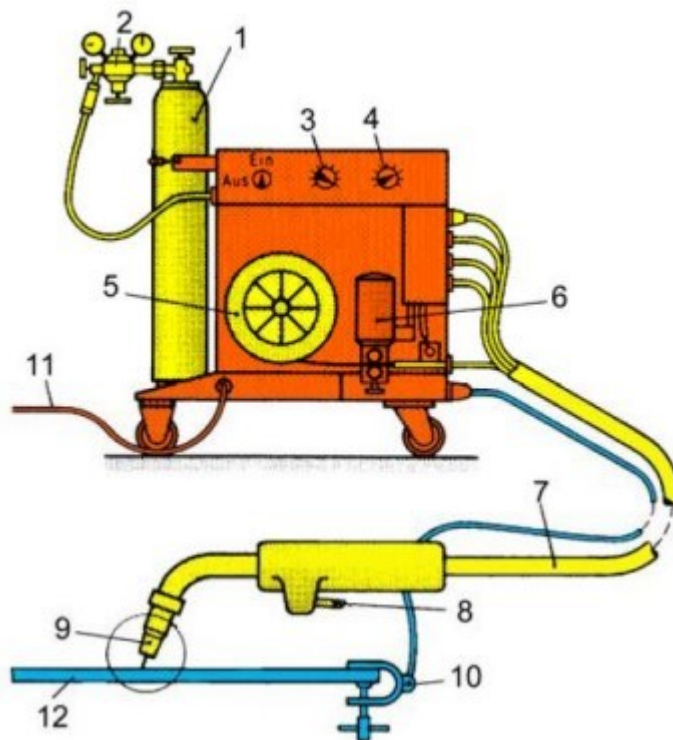
5.4 Uređaji za MIG/MAG zavarivanje

Uređaji za zavarivanje u principu se sastoje od izvora struje, sustava za dovod žice, sustava za upravljanje protokom zaštitnog plina, upravljačkog sustava, pištolja za zavarivanje, sustava za hlađenje pištolja tekućinom itd. [28]

Po svojoj složenosti mogu biti vrlo jednostavni pa sve do programibilnih s ugrađenim računalom i velikom bazom podataka parametara za zavarivanje. Odabir uređaja ovisi o primjeni, zahtjevima korisnika te ujedno i o financijskim mogućnostima korisnika. [28]

Prema konstrukciji prikazanoj na ih dijelimo na [28]:

- Kompaktne uređaje, kod kojih su svi dijelovi smješteni u jednom kućištu,
- Modularne uređaje, kod kojih su izvor struje i uređaj za dodavanje žice s pripadajućim upravljanjima u odvojenim kućištima



Slika 21 Shema uređaja za MIG/MAG zavarivanje [32]

Na Slika 21 prikazan je uređaj za MIG/MAG zavarivanje koji se sastoji od sljedećih dijelova [32]:

- 1 - Boca sa zaštitnim plinom
- 2 - Redukcijski ventil
- 3 - Regulator brzine žice
- 4 - Regulator jakosti struje zavarivanja

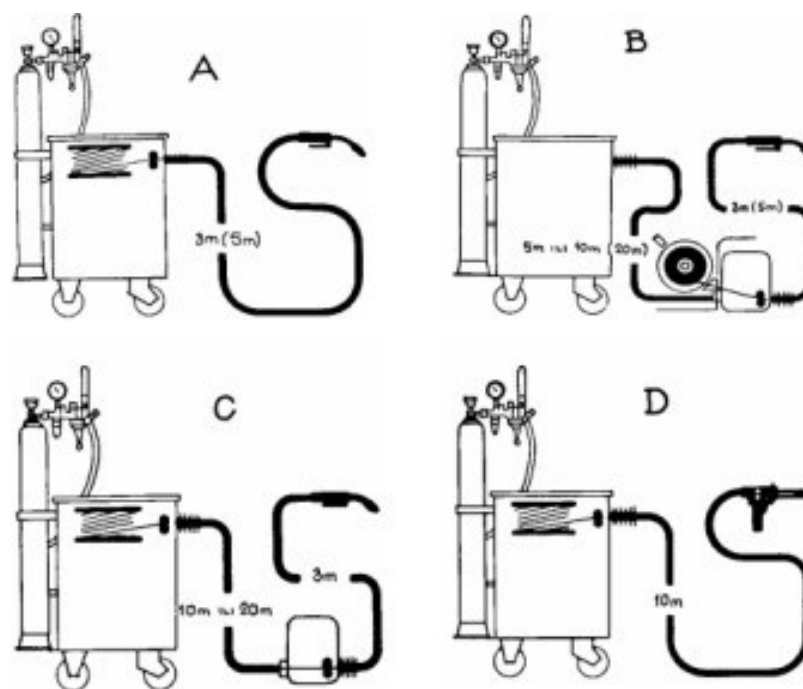
- 5 - Kalem žice
- 6- Pogon žice
- 7- Polikabel
- 8 – Pištolj
- 9 – Sapnica
- 10 - priključak mase
- 11 - Strujni vodič
- 12 - Osnovni materijal.

5.5 Izvori struje za zavarivanje

U novije vrijeme sve više se koriste inverterski ispravljači koji su znatno lakši i pogodniji za upotrebu od ostalih izvora struje za zavarivanje. Dodatna prednost invertera je njihova povećana efikasnost jer su gubici u željeznoj jezgri transformatora manji u odnosu na konvencionalne transformatore pa je stupanj iskorištenja invertera veći od svih ostalih izvora zavarivanja. [30]

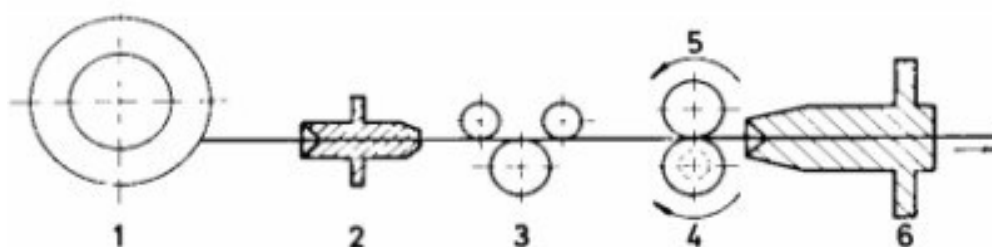
5.6 Sustavi i uređaji za dodavanje žice

Postoje različiti sustavi dovođenja žice, Slika 22. Kabinski sustav se primjenjuje kod nepokretnog radnog mjesta, jer su i kolut žice i pogonski mehanizam smješteni u kućište izvora struje, Slika 22.a Kod univerzalnog sustava cijeli uređaj za dovod žice se nalazi van kućišta, što omogućava rad na promjenjivim radnim mjestima i na velikim radnim komadima, Slika 22b. parni uređaj ima dva pogonska mehanizma, jedan u kućištu izvora struje direktno do koluta žice, a drugi u blizini radnog mjesta, Slika 22c, što također omogućava rad na promjenjivim radnim mjestima i na velikim i nepristupačnim radnim komadima. Uređaj tipa "push-pull" također ima dva pogonska mehanizma, jedan u kućištu, dok je drugi pogon u gorioniku, tako da vuče ("pull") žicu umjesto da je gura ("push"), Slika 22d. Ovaj uređaj je pogodan za zavarivanje na nepristupačnim mjestima, gdje bi kolut žice smetao, a traži se pouzdano vođenje žice na veće udaljenosti. Uobičajene radne daljine pojedinih sustava su naznačene na Slika 22a-d. [33]



Slika 22 Sustav dovođenja žice: A) kabinski, B) univerzalni, C) parni uređaj, D) "push-pull" [33]

Slika 23 prikazuje Shemu dovoda žice: 1 - kolut sa žicom, 2 - vodilica, 3 - valjci za ravnanje žice, 4 - pogonski valjci, 5 - pritisni valjak, 6 - vodilica. [33]



Slika 23 Shema dovoda žice [33]

Pravilan izbor kontaktne vodilice i mehanizma za dovod žice od presudnog značaja za kvalitetno MIG/MAG zavarivanje, posebno kada se koristi punjena žica ili puna žica od obojenih metala i legura aluminija. [33]

5.7 Dodatni materijal (žica) za zavarivanje

Žica se proizvodi u kolutima mase 1 - 100 kg u nizu promjera od 0,8 do 2 mm sa korakom 0,4 mm, a posebno 2,4 i 3,2 mm, pri čemu se žice manjeg promjera (do 1,2 mm) obično koriste pri zavarivanju kratkim spojevima, a žice većeg promjera (preko 1,2 mm) za prijenos štrcajućim lukom i impulsno. [33] No, najčešća primjena dodatnog materijala je promjera 1,2 mm.

Pri zavarivanju čelika žica treba imati povećan sadržaj silicija i mangana kako bi došlo do dezoksidacije metala zavara i nadoknade sagorjelih elemenata u osnovnom materijalu. Kako bi sprječili nastanak poroznosti u metalu zavara i zakaljenja, sadržaj ugljika je ograničen na 0,12 %.

Pri izboru dodatnog materijala treba uzeti u obzir kemijski sastav i mehanička svojstva osnovnog materijala, stanje i čistoću osnovnog materijala, položaj zavarivanja i vrstu prijenosa dodatnog materijala. Žice za zavarivanje i navarivanje standardizirane su po HRN EN ISO 14341:2020. [33]

Da bi MAG zavarivanje bilo moguće, žica mora biti posebnog kemijskog sastava. Tipično joj se dodaju 0,7 % do 1,0 % silicija i 1,3 % do 1,6 % mangana, koji sudjeluju kao dezoksidanti u kemijskoj reakciji s ugljikovim dioksidom koji se događa u električnom luku. [28]

5.8 Sustav za upravljanje protoka zaštitnog plina

Sustav za upravljanje protokom zaštitnog plina se sastoji od [28]:

- Redukcijskog ventila s mjerачem protoka, koji se priključuje na bocu s zaštitnim plinom. Današnji ventili su uglavnom namijenjeni za argon i ugljikov dioksid te za njihove mješavine. Željeni protok plina koji ovisi o parametrima zavarivanja podešava se na regulatoru protoka na ventilu.
- Elektromagnetskog ventila za otvaranje i zatvaranje protoka prema sapnici (pištolju za zavarivanje) i mjestu zavarivanja. On se uvijek nalazi oko uređaja za dodavanje žice, a redosljed otvaranja i zatvaranja protoka vrši se elektronički.

5.9 Pištolji za MIG/MAG zavarivanje

Pištolj za zavarivanje je zavarivačev osnovni alat kod MIG/MAG zavarivanja, vrh gorionika se nalazi skoro u električnom luku, tj. izložen je vrlo velikim toplinskim i mehaničkim naprezanjima. Za struje 150-500 A proizvode se pištolji bez posebnog hlađenja, za struje 250-600 A proizvode se pištolji hlađeni tekućinom (vodom). [28]

Kroz pištolj prolazi žica za zavarivanje, struja zavarivanja, zaštitni plin, upravljački signali, a ponekad, ovisi o izvedbi i rashladna tekućina. [28]

Pištolj sam po sebi spada u potrošni materijal, a kod njega samoga postoje potrošni dijelovi koji se mijenjaju po potrebi, ovisno o režimu rada i zavarivaču (kontaktna vodilica, plinski razdjelnik, plinska sapnica, vodilica žice). [28]

6 ZAŠTITNI PLINOVI

Industrija tehničkih i specijalnih plinova i plinskih mješavina nastoji slijediti zahtjeve tehnologija spajanja, zavarivanja i rezanja te iznaći ekonomična rješenja za aplikaciju kako zaštitnih plinova i plinskih mješavina za zavarivanje, tako i plinova i mješavina za različite tehnologije rezanja [1].

U konstrukcijama sve više se primjenjuju visoko legirani materijali na bazi nikla otporni na koroziju kao i aluminij i legure aluminija. Korijenski zavari visokolegiranih materijala vrlo su podložni koroziji te treba onemogućiti stvaranje površinskih oksida i promjenu boje. Isto tako treba zaštititi korijen zavora uporabom odgovarajućeg plina. Nužna je uporaba mješavina argona i aktivnog plina ugljikovog dioksida i kisika kod ugljičnih čelika, argona i vodika kod visokolegiranih čelika te mješavina s dodatkom dušika. Povećan unos topline osigurat će odgovarajući dodatak helija [1].

6.1 Svojstva zaštitnih plinova

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

Svi zaštitni plinovi su standardizirani po Europskom standardu HRN EN ISO 14175:2008 [34] te pokriva šest glavnih plinova koji se koriste u zavarivanju; helij, vodik, ugljikov dioksid, kisik i argon.

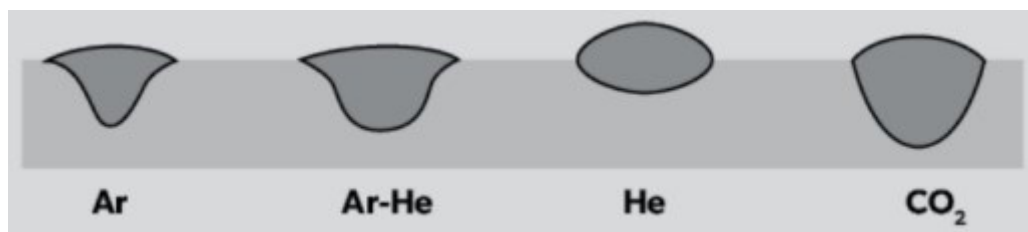
Glavna svojstva koja ovi plinovi imaju koja su bitna za uspostavu električnog luka i svojstva luka su ionizacijski potencijal, toplinska vodljivost, kemijska aktivnost luka, energija disocijacije i gustoća plina. Što je niži ionizacijski potencijal, to je lakša uspostava električnog luka i njegova veća stabilnost tijekom zavarivanja. Veća toplinska vodljivost znači lakši i veći prijenos topline po cijeloj širini električnog luka, što uzrokuje širi oblik zavora, ali ne i veću penetraciju, primjer takvog plina je helij.

6.1.1 Utjecaj zaštitnih plinova na zavar

Plinovi kao što je argon s manjom toplinskom vodljivošću rezultiraju prstastim oblikom penetracije jer je prijenos topline koncentriran u jezgri električnog luka. Kemijska aktivnost govori kako plin kemijski reagira s elementima iz zavarenog spoja, a ukoliko postoji kemijska reakcija plin se klasificira kao aktivan, u suprotnom kao inertan. Gustoća plina utječe na potrebni protok plina (plinovi teži od zraka kao što su ugljikov dioksid i argon zahtijevaju manje protoke nego npr. helij koji je lakši od zraka), a energija disocijacije zajedno sa ionizacijskim potencijalom čini

potrebnu energiju za uspostavu električnog luka. Naime, višeatomski plinovi kao što je ugljikov dioksid najprije potrebno disocirati na atome, kako bi se onda oni mogli ionizirati. Također, još je zanimljiva činjenica da plin ugljikov dioksid unatoč manjoj toplinskoj vodljivosti, postiže efekt plinova s većom toplinskom vodljivosti kao što je to helij i još se pritom povećava penetracija zbog fenomena rekombinacije disociranih atoma pri dodiru s hladnom površinom metala pri čemu se oslobađaju velike količine energije. Upravo zato ugljikov dioksid ima karakterističan oblik zavara koji je širok s velikom penetracijom. [35], [36].

Tipični oblici zavara u ovisnosti o zaštitnom plinu ili njihovoj mješavini može se vidjeti na Slika 24.



Slika 24 Izgled profila zavara u ovisnosti o zaštitnom plinu [37]

6.2 Zaštitni plinovi u zavarivanju

Glavni fokus je stavljen na plinove i plinske mješavine pogodne za visokolegirane Cr-Ni čelike zbog toga što se pokušavaju maksimizirati mehanička i antikorozivna svojstva navara od dupleks čelika. [7].

Osnovni zaštitni plin za MIG zavarivanje je argon i/ili helij te njihova mješavina. Mali dodatak kisika ili ugljičnog dioksida kod MAG postupaka može poboljšati stabilnost električnog luka, odvajanje kapljica i poboljšati kakvoću depozita. Kod primjene na visokolegiranim Cr-Ni čelicima, rabe se i dodaci malih količina vodika [1]. Na Tablica 2 vide se podaci o pojedinim zaštitnim plinovima za zavarivanje.

Tablica 2 Podaci o pojedinim zaštitnim plinovima za zavarivanje [1]

	Argon	Uglj.dioksid	Helij	Vodik	Dušik	Kisik
Kemijski simbol	Ar	CO ₂	He	H	N ₂	O ₂
Molna težina	39,95	44,01	4,00	2,016	28,01	32,00
Spec.Gustoća	1,38	1,53	0,1368	0,0695	0,967	1,105
Gustoća(kg/m ³) 0°C; 1,01325 bar	1,7834	1,9768	0,1785	0,0899	1,2505	1,4290
Ionizacijski potencijal (eV)	15,7	14,4	24,5	13,5	14,5	13,2
Temp.vodljivost (W/mK), 0°C	0,01633	0,01424	0,14363	0,17543	0,02386	0,02428
MDK (ppm)						4000

Aktivne komponente plinskih mješavina za zavarivanje niskolegiranih i nelegiranih čelika su kisik i ugljični dioksid, koji se dodaju pojedinačno, ili zajedno u određenim omjerima osnovnom zaštitnom plinu – argonu. Poznate i opće prihvaćene plinske mješavine po normi HRN EN ISO 14175:2008 tipa: M21 s 18 % ugljikov dioksida u argonu daju relativno mali udio štrcanja kod zavarivanja u više prolaza. No, u posljednje vrijeme zamjenjuju se s niskoaktivnim mješavinama tipa M2 s 8 % ugljikov dioksida u argonu i M22s 4 % kisika u argonu, koje daju još povoljnije rezultate u pogledu smanjenja štrcanja, pojačanih mehaničkih svojstava zavarenog spoja, a pogodne su i za primjenu s visokim strujama zavarivanja. Kod većih debljina/struja zavarivanja može se dodati helij zbog povećanja unosa topline. [1].

Tijekom razvoja specifičnih visokoučinskih postupaka zavarivanja u području visokih struja i rotirajućeg luka), razvijena je i specifična četverokomponentna mješavine argona, helija, ugljikov dioksida i kisika. Mješavine M2 i M22, po grupi ISO 14175, su pokazale vrlo dobre rezultate upravo pri zavarivanju u području visokih struja [1].

6.2.1 Dvokomponentna mješavina M1

M1 plinska mješavina argona i 2,5 % ugljikov dioksida, po normi HRN EN ISO 14175:2008, je česta plinska mješavina za zavarivanje nehrđajućih čelika je mješavina argona s niskim udjelima nekih od oksidanata; ugljikov dioksida ili kisika. Zvaraivanje M1 mješavinom prikazano je na Slika 25. Naglasak na niski udio ovih elemenata je iz razloga što povišenjem njihovih udjela dolazi do gubitka mangana, kroma i niobija iz strukture visokolegiranih Cr-Ni čelika. Dodavanjem ugljikovog dioksida postiže se bolje kvašenje taline, a time se postiže bolji izgled samog zavara. Osim toga vrlo je jeftin s ekonomskog gledišta.



Slika 25 Zavarivanje s M1 mješavinom zaštitnog plina [38]

Glavna zabrinutost oko njegovog korištenja proizlazi iz opasnosti od apsorpcije ugljika koja može rezultirati stvaranjem krom karbida odnosno senzibilizaciji nehrđajućeg čelika (moguć nastanak martenzita) čime se povećava krhkost i podložnost koroziji. Međutim, apsorpcija ugljika je dovoljno mala ukoliko ga se dodaje u malim količinama, normom HRN EN 1011-3:2018 [9] je taj iznos ograničen na maksimalno 2,5 % [24], [7].

6.2.2 Trokomponentne plinske mješavine

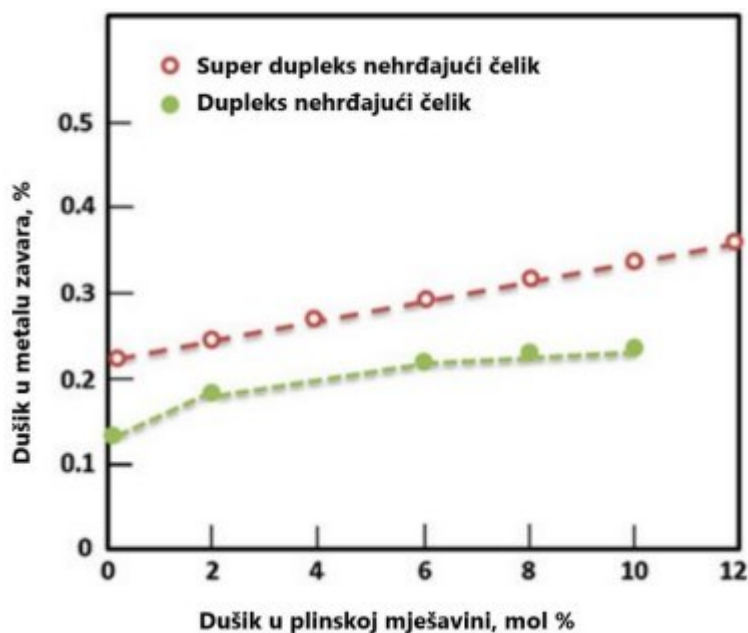
Trokomponente plinske mješavine sastoje se od argona, helija i ugljikov dioksida ili kisika. Helij se dodaje u plinsku mješavinu kako bi povećali penetraciju i fluidnost taline zavora. Također njime su omogućene veće brzine zavarivanja i manja deformacija radnog komada. Problem helija je što je veoma skup s ekonomskog stajališta. Kada bi se helij samostalno koristio dao bi bolje rezultate u usporedbi s čistim argonom. Helij proizvodi električni luk viših temperatura te time omogućuje pogodniju brzinu hlađenja za transfer iz feritne u austenitnu fazu, što poboljšava udarni rad loma zavarenog spoja. Sam argon daje zavar s nepogodnim udjelima ferita i austenita. [36]

U malim količinama (ispod 2 %) kisik daje pogodna svojstva zavaru, iako se čini da nije logično jer se upravo pokušava spriječiti oksidiranje vrućih metala u dodiru sa zrakom. Kisik smanjuje površinsku napetost između taline i okružujuće atmosfere. To rezultira ravnijim i glađim zavarom s manjim rizikom od zajeda i prevelikog kut prijelaza površine šava na osnovni metal. Pri većim udjelima kisika dolazi do gubitka legiranih elemenata, uključina kisika i slično. Pobojanost u zavarenom području raste s dodatkom kisika. [7]

6.2.3 Plinska mješavina s dodatkom dušika do 3%

Uvođenje dušika kao zaštitnog plina pri zavarivanju dupleks čelika ostvario se veliki skok u dobivenim svojstvima zavara. Glavni problem dupleks čelika je održati omjer feritne i austenitne faze u metalu zavara i zoni utjecaja topline. Dušik je jaki austenitni stabilizator, što znači da povisuje temperaturu pretvorbe austenita odnosno austenit se prije kreće izlučivati. Prilikom zavarivanja, a posebice zavarivanja MIG postupkom, dolazi do gubitka dušika iz zavarenog spoja. Gubitkom dušika naglo raste osjetljivost na rupičastu koroziju koja je iznimno opasna. Suprotno tome, kada je dušik prisutan u zavarenom spoju, udio austenita je puno viši, a austenit sprječava prodiranje rupičaste korozije kroz osjetljivu feritnu fazu. Još jedna prednost dušika je homogenizacija distribucije kroma između feritne i austenitne faze. [36]

Međutim, udio dušika mora biti nizak, jer pri višim udjelima on premašuje topivost u zavarenom spoju i uzrokuje poroznost jer dolazi do njegovog pokušaja izlaska iz zavara tijekom hlađenja. Prikaz ovisnosti dušika u plinskoj mješavini u odnosu na njegovu topivost u zavarenom spoju prikazana je na Slika 26. Udio dušika u zaštitnom plinu mora odgovarati udjelu dušika metala koji se zavaruje. Tako primjerice za dupleks čelik sa tipičnim udjelom dušika od 0,16 % može koristiti zaštitni plin s udjelom od 1-1,2 % dušika, a super dupleks čelici koji imaju tipičan udio dušika od 0,25 % mogu koristiti zaštitne plinove s dodatkom od 2,0-2,5 % dušika. [36]



Slika 26 Ovisnost udjela dušika u plinskoj mješavini s udjelom u zavarenom spoju nakon zavarivanja [35]

6.3 Zaštitni plinovi kod MAG zavarivanja

Kod MAG postupka zavarivanja, dobro provarivanje i dobar prijenos dodatnog materijala omogućuju dodaci aktivnih plinova u plinskoj mješavini s osnovnim plinom argonom. Smatra se da kod izbora zaštitnog plina gdje je god moguće, treba rabiti mješavinu s najmanje 20% argona

(ostatak ugljikov dioksida i/ili dodatak kisika) umjesto primjene atmosfere čistog ugljikovog dioksida. U prvom redu zbog povećanja austenita u mikrostrukturi, mogućnosti zavarivanja slobodnim letom kapljica te ušteda smanjenjem naknadne obrade [1].

Pri MAG zavarivanju nehrđajućih čelika impulsnim lukom kao zaštitni plinovi najčešće se koriste mješavine iznad navedenih plinova i to [29]:

- dvokomponentne mješavine od kojih su najčešće mješavine argona i ugljikov dioksida gdje je udio ugljikov dioksida manji od 4 %,
- trokomponentne mješavine od kojih su najčešće mješavine helij, argon i ugljikov dioksid u raznim omjerima.

7 EKSPERIMENTALNI DIO

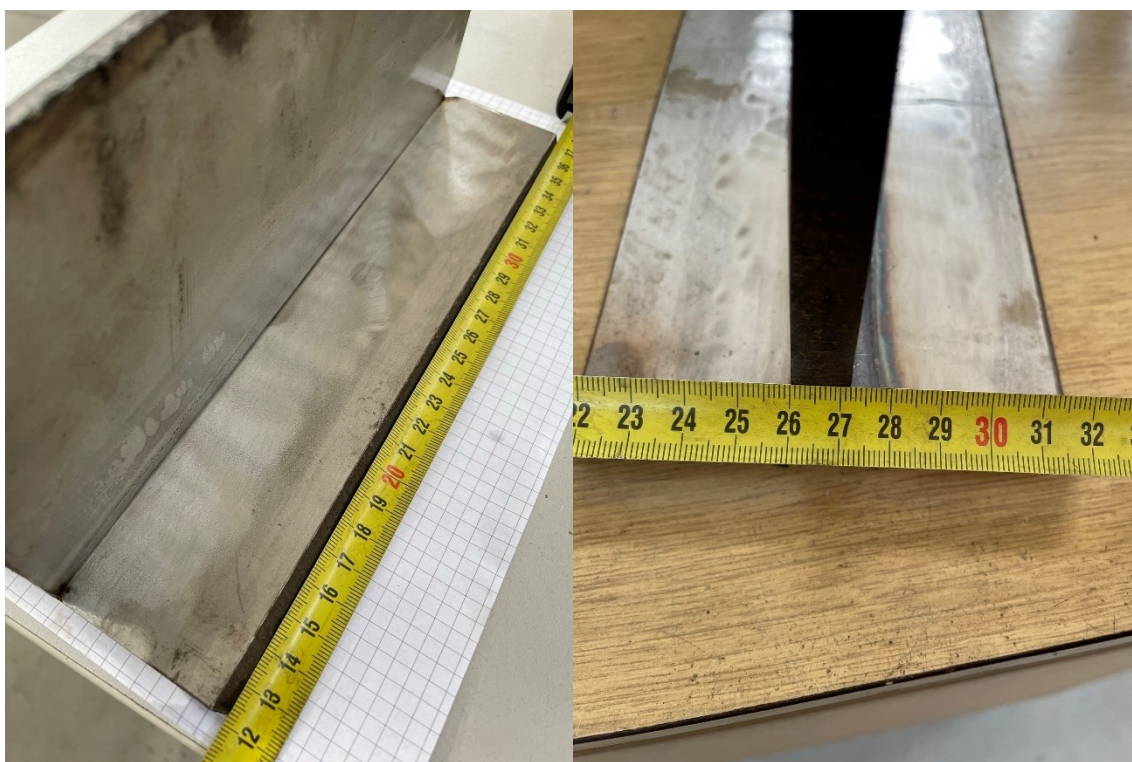
7.1 Opis i ciljevi eksperimenta

U eksperimentalnom dijelu cilj je provesti zavarivanje MAG postupkom na osnovnom materijalu dupleks čelika uz primjenu više vrsta zaštitnih plinova. Kao osnovni materijal je korišten standardni dupleks čelik 2205 (X2 CrNiMoN 22-5-3). Korištene vrste zaštitnih plinova: Inoxline C2 (97,5 % Ar i 2,5 % CO₂), u grupi M12 prema ISO 14175, za uzorak 1 i uzorak 2 te Inoxline N2 (97,5 % Ar i 2,5 % N₂), u grupi N2 prema ISO 14175, na uzorcima 3 i 4. Također su korištene različite vrste struja za zavarivanje AC pulsna i DC + pulsna.

Cilj je analizirati uzorake 1, 2, 3 i 4 i donijeti adekvatne zaključke, poput razlike u makrostrukturi i mikrostrukturi uzoraka (udjele ferita i austenita), razlike stabilnosti električnog lukam razlike očitane vizualnom metodom zavarenih spojeva (penetracije, nadvišenja zavara, lica zavara, prskanja).

7.2 Osnovni materijal

Osnovni materijal korišten za izradu uzoraka „1“, „2“, „3“ i „4“ je od dupleks čelika X2 CrNiMoN 22-5-3, dimenzije ploča osnovnog materijala su 250x120mm i debljine 12 mm (Slika 27).



Slika 27 Ispitni uzorak - osnovni materijal X2 CrNiMoN 22-5-3

Prije samog početka zavarivanja, izvršeno je pripajanje ploča ispitnih uzoraka kako bi se osigurala njihova krutost tijekom izvođenja zavarivanja i samim time spriječile neželjene deformacije i

pomicanja ploča. Takvi ispitni uzorci su smješteni na automat za zavarivanje i stegnuti na posebnu napravu koja omogućuje kutno zavarivanje u PA položaju (Slika 28).



Slika 28 Priprema ispitnih uzoraka za zavarivanje

Čelik X2 CrNiMoN 22-5-3 odnosno W. Nr. 1.4462 prema normi HRN EN 10088-3:2015 jedan je od najčešće korištenih dupleks čelika zbog svoje izvrsne korozivne postojanosti te visoke čvrstoće. Kemijski sastav navedenog čelika prikazan je u Tablica 3.

Tablica 3 Kemijski sastav čelika X2 CrNiMoN 22-5-3

Element	Kemijski sastav elemenata, %
Ugljik	≤ 0,03
Nikal	4,5-6,5
Krom	21,0-23,0
Mangan	≤ 2,00
Silicij	≤ 1,00
Fosfor	0,035
Sumpor	≤ 0,015
Dušik	0,10-0,22
Molibden	2,50-3,50

Obzirom kako iz Tablica 3 se vidi postotak elemenata, može se izračunati PREN broj za X2 CrNiMoN 22-5-3 dupleks čelik po formuli:

$$\text{PREN} = \%Cr + 3.3 \times (\%Mo + 0.5 \times \%W) + 16 \times \%N,$$

Gdje uvrsteći pripadajuće postotke, dobivamo PREN broj=35 te spada u drugu grupu čelika sa $30 < \text{PREN} < 40$ tj. standardne duplex čelike.

U Tablica 4 prikazana su mehanička svojstva čelika X2 CrNiMoN 22-5-3.

Tablica 4 Mehanička svojstva čelika X2 CrNiMoN 22-5-3

Svojstvo materijala	Vrijednost
Granica razvlačenja R_e [N/mm ²]	450
Vlačna čvrstoća R_m [N/mm ²]	620
Istezljivost ϵ [%]	25
Tvrdoća po Rockwellu [HRC]	31

7.3 Dodatni materijal

Kao dodatni materijal koristila se žica promjera 1,2 mm duplex čelika ML 22.9.3 NL proizvođača MIG WELD po normi EN ISO 14343-A/G. Žica je prikazana namotana u kalemu na Slika 29. Kemijska i mehanička svojstva dodatnog materijala (žice) prikazana su u Tablica 5 i Tablica 6. Na Slika 30 prikazan je sustav za dovod žice koji je smješten na izvoru struje za zavarivanje.



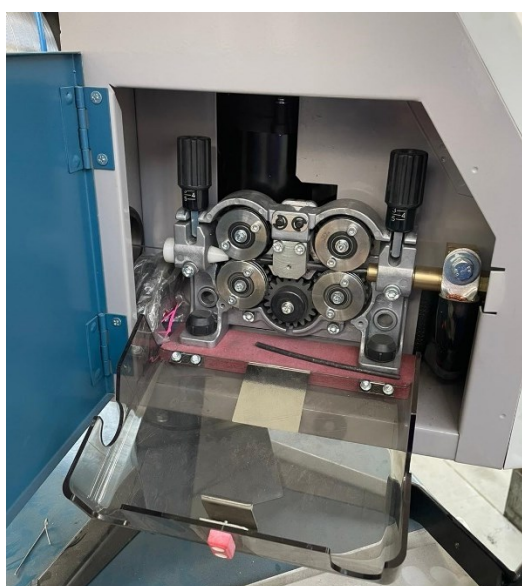
Slika 29 MIG WELD žica promjera 1,2mm

Tablica 5 Kemijski sastav dodatnog materijala

Kemijski elementi	Kemijski sastav dodatnog materijala, %
Ugljik	$\leq 0,020$
Fosfor	$\leq 0,020$
Silicij	0,50
Mangan	1,6
Sumpor	$\leq 0,015$
Krom	23,00
Nikal	9,00
Molibden	3,20
Dušik	0,16

Tablica 6 Mehanička svojstva elektrode

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



Slika 30 Sustav za dobavu žice pri zavarivanju

7.4 Oprema za zavarivanje

Oprema za zavarivanje u eksperimentalnom dijelu se sastojala od sustava za automatsko zavarivanje (Bug-O Systems), izvora struje te opreme za izradu i pripremu uzorka koja se sastojala od uređaja za fino brušenje i poliranje i uređaja za elektrokemijsko nagrizanje.

7.4.1 Izvor struje za zavarivanje

Kao izvor struje za zavarivanje, korišten je uređaj OTC Welbee W400, prikazan na Slika 31. Njegove karakteristike vidljive su na identifikacijskoj pločici prema normi HRN EN IEC 60974-1:2022 koja je prikazana na Slika 32.



Slika 31 Izvor struje OTC Welbee W400 dual



Slika 32 Identifikacijska pločica uređaja OTC Welbee W400

7.4.2 Zaštitni plin

Zaštitni plinovi korišteni u eksperimentalnom dijelu su Inoxline N2 i Inoxline C2 proizvođača Messer GmbH, prikazano na Slika 33, prema normi HRN EN ISO 14175:2008. prikazano u Tablica 2.

Tablica 7 Sastav za korištenje zaštitnih plinova prema proizvođaču

Naziv	Grupa prema ISO 14175	Kemijski sastav		
		Ar	N ₂	CO ₂
Inoxline N2	N2	97,5	2,5	-
Inoxline C2	M12	97,5	-	2,5



Slika 33 Prikaz Messer zaštitnog plina

7.4.3 Modularni pogonski sustav za automatsko zavarivanje BUG-O Systems

Na Sliku 34 prikazan je automatski sustav za zavarivanje BUG-O na kojem je moguće podesiti konstantnu brzinu zavarivanja, nagiba te udaljenost pištolja za zavarivanje od radnog komada. Samim time, omogućuje se kontinuiranost izvođenja eksperimenta i eliminira eventualno odstupanje u radu zavarivača.



Slika 34 BUG-O automatizirani sustav za zavarivanje

7.4.4 Priprema spoja

Uzorci „1, 2, 3 i 4“ pripremljeni su tako da su se ploče od čelika debljine 12mm izrezale na 8 uzoraka dimenzija 250x120mm. Nakon toga, ispitni uzorci su očišćeni od produkata rezanja, masti i nečistoća koje su se nalazile na njihovoj površini. Nakon izvršene pripreme ispitnih uzoraka (Slika 35) ploče uzoraka su postavljane i stegnute na posebnoj napravi koja omogućuje zavarivanje kutnih spojeva u PA pložaju. Zatim su se podesili ostali parametri zavarivanja kako bi uzorci bili spremni za zavarivanje na automatu za zavarivanje BUG-O (Slika 36).



Slika 35 Pripojeni, očišćeni i odmašćeni ispitni uzorci



Slika 36 Priprema za zavarivanje na BUG-O sustavu

7.5 Zavarivanje ispitnih uzoraka

Pri zavarivanju uzoraka korišteni su različiti parametri prikazani na Slika 37: AC impulsno i DC+pulsna vrsta struje te zaštitni plinovi Inoxline CO₂ i Inoxline N₂. Kao što je prikazano u Tablica 8 uzorci 1 i 2 zavareni su u atmosferi zaštitnog plina Inoxline CO₂ dok su uzorci 3 i 4 zavareni su u atmosferi zaštitnog plina Inoxline N₂, slobodnog kraja žice 17 mm. Nagib pištolja tijekom zavarivanja bio je 90 ° u PA položaju.

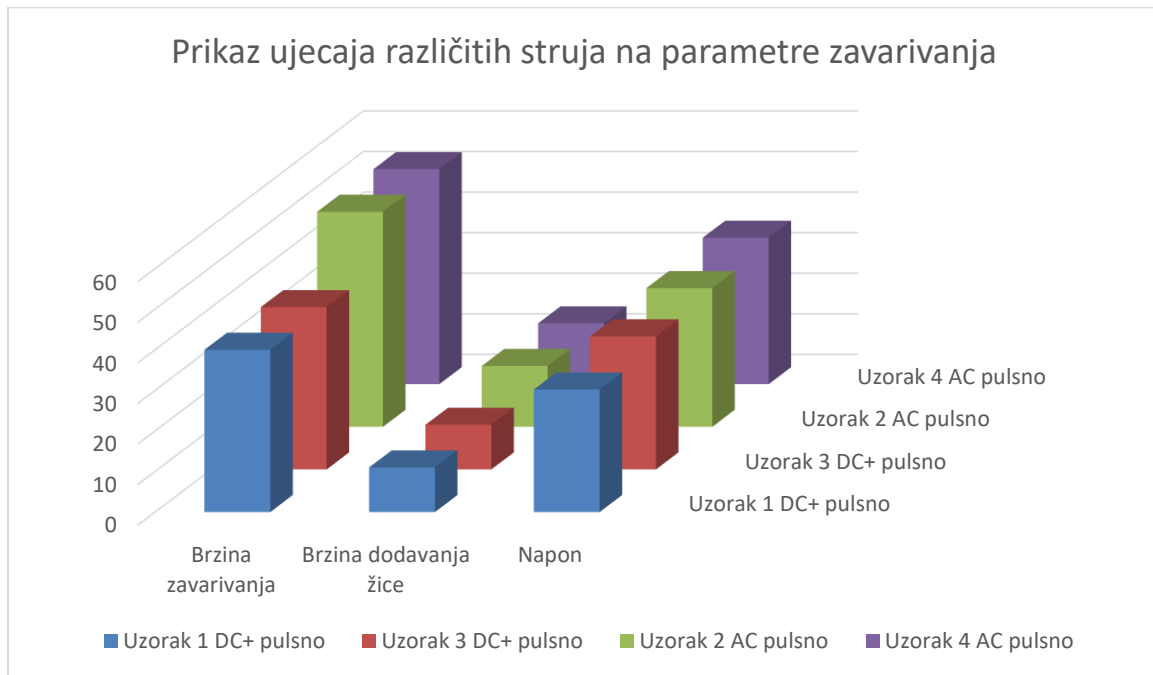


Slika 37 Prikaz postavki programa na izvoru struje

Tablica 8 Parametri uzoraka pri MAG zavarivanju

	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 4
Vrsta zaštitnog plina	Inoxline CO ₂	Inoxline CO ₂	Inoxline N ₂	Inoxline N ₂
Vrsta struje	DC+ pulsno	AC pulsno	DC+ pulsno	AC pulsno
Struja I, [A]	300	300	300	300
Stvarna struja I _S , [A]	294	286	272	281
Napon U, [V]	30	31	30	31
Stvarni napon U _S , [V]	30,2	34,2	32,8	36,1
Brzina zavarivanja v _z , [cm/min]	40	53	40	53
Brzina žice v _ž , [cm/min]	11	15	11	15
Protok plina q _p , [l/min]	17	17	17	17

Iz podataka iz grafa „Prikaz utjecaja različitih struja na parametre zavarivanja“, na Slika 38, vidi se da uzorci 1 i 3 kod kojih je korištena DC+ pulsna struja imaju manju brzinu zavarivanja i dodavanja žice te manje vrijednosti stvarnog napona od uzoraka 2 i 4 gdje je korištena AC pulsna struja



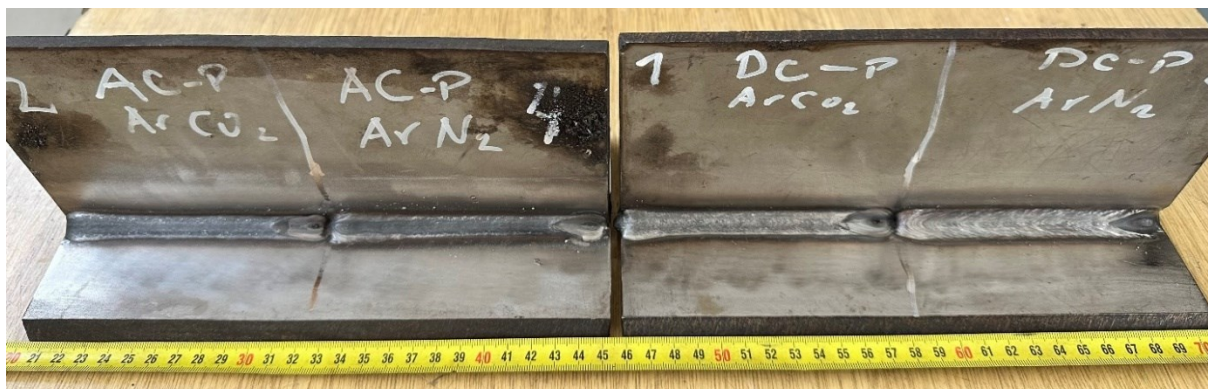
Slika 38 Grafički prikaz utjecaja različitih struja na parametre zavarivanja

7.6 Izrada makroizbrusaka

Na slikama Slika 39 i Slika 40 se vidi razlika prije i poslije čišćenja.

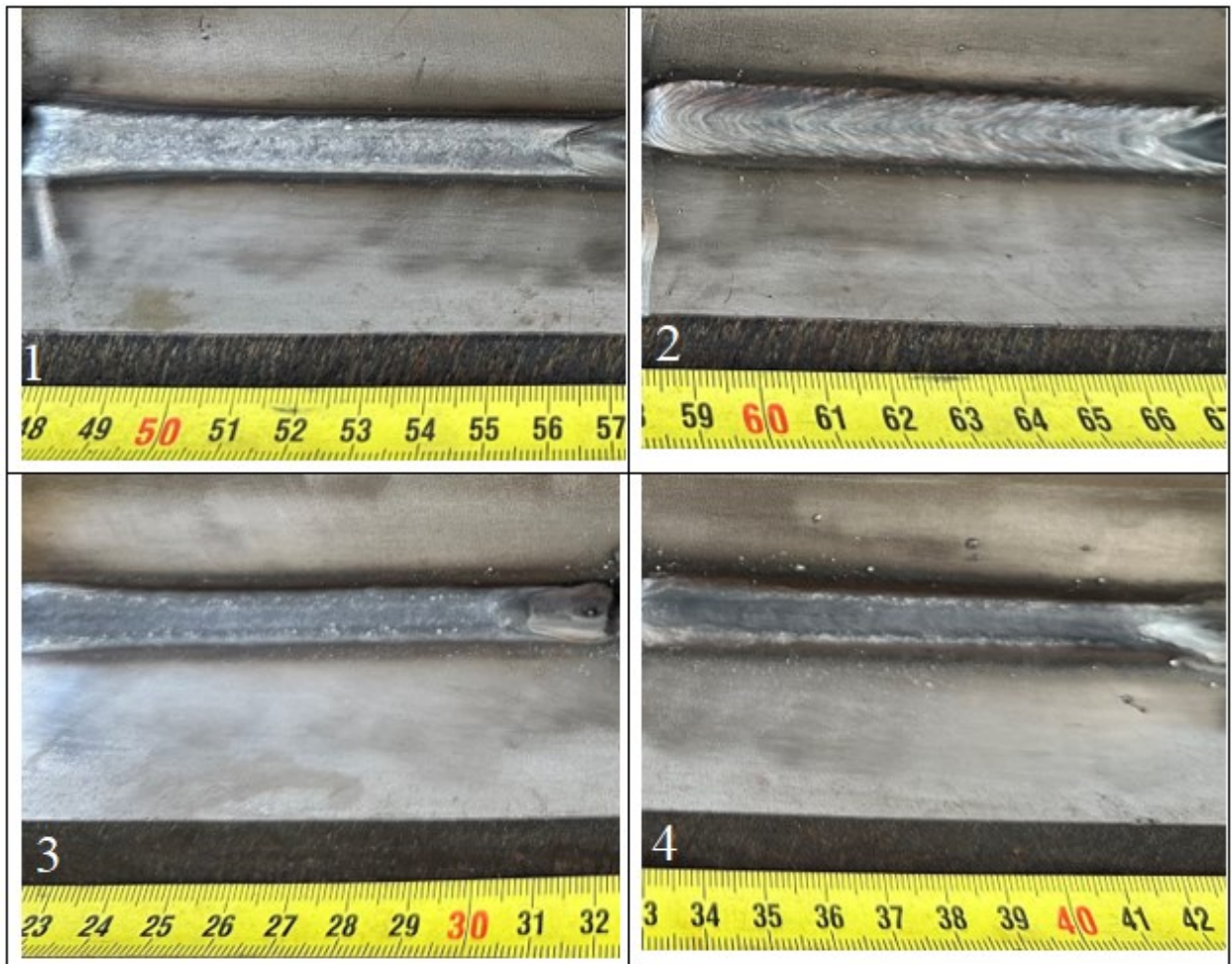


Slika 39 Prikaz ispitnih uzoraka prije čišćenja površine zavara



Slika 40 Prikaz ispitnih uzoraka nakon čišćenja površine zavara

Slika 41 prikazuje razliku u estetskom izgledu lica zavara ovisno o korištenom zaštitnom plinu i postupku zavarivanja. Na slici je jasno vidljiva razlika u estetici lica zavara ovisno o tome dali je korištena plinska mješavina od 97,5% Ar + 2,5% CO₂ (Uzorci 1 i 2) ili je korištena plinska mješavina od 97,5% Ar + 2,5% N₂ (Uzorci 3 i 4). Uzorci 1 i 2 imaju puno grublju površinu lica zavara, a uzorci 3 i 4 imaju puno bolje zaglađenu površinu lica zavara. Također, postoji i određena razlika u količini prskotina u području oko zavarenog spoja, pri čemu najmanje prskotina ima uzorak 1 (od 97,5% Ar + 2,5% CO₂ izveden s DC+), a najviše ima uzorak 4 (97,5% Ar + 2,5% N₂ izveden s AC pulsno).

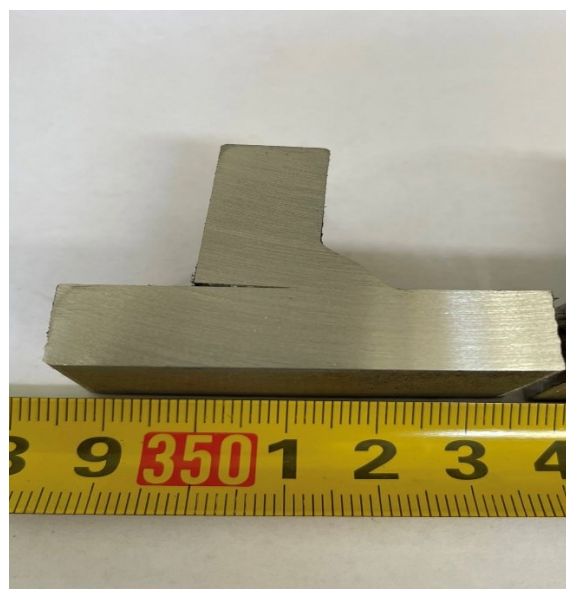
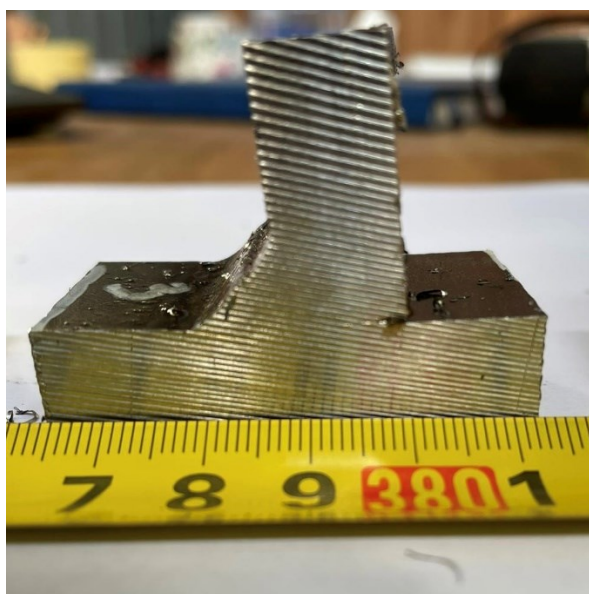


Slika 41 Usporedba zavarenih spojeva uzoraka

Zatim je slijedilo rezanje i poliranje makroizbrusaka na uređaju Struers prikazan na Slika 42.



Slika 42 Poliranje ispitnih uzoraka na uređaju Struers

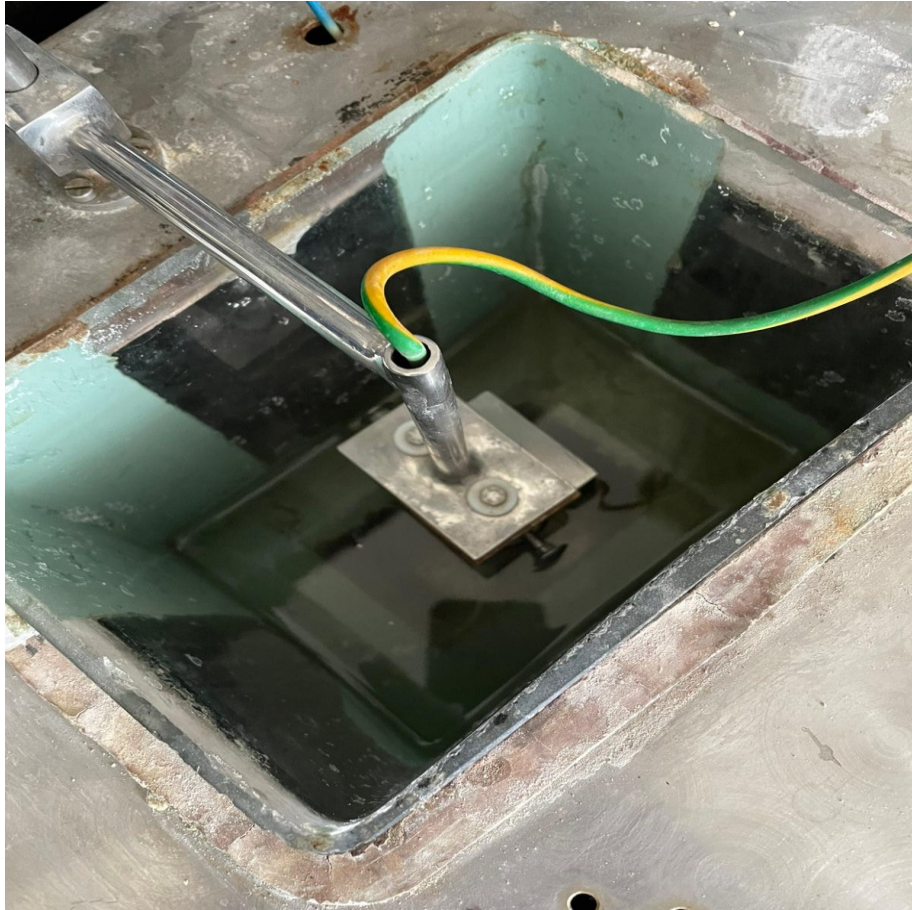


Slika 43 Usporedba uzorka prije i poslije poliranja

Nagrizanjem (Slika 45) makroizbrusaka u 10% oksalnoj kiselini dobiven je odličan rezultat jer se jasno raspoznaju osnovni materijal i zavar. Parametri nagrizanja su napon i struja, vrijednosti su prikazane na Slika 44 . Iznos napona $U=11V$, a struje $I=10A$.



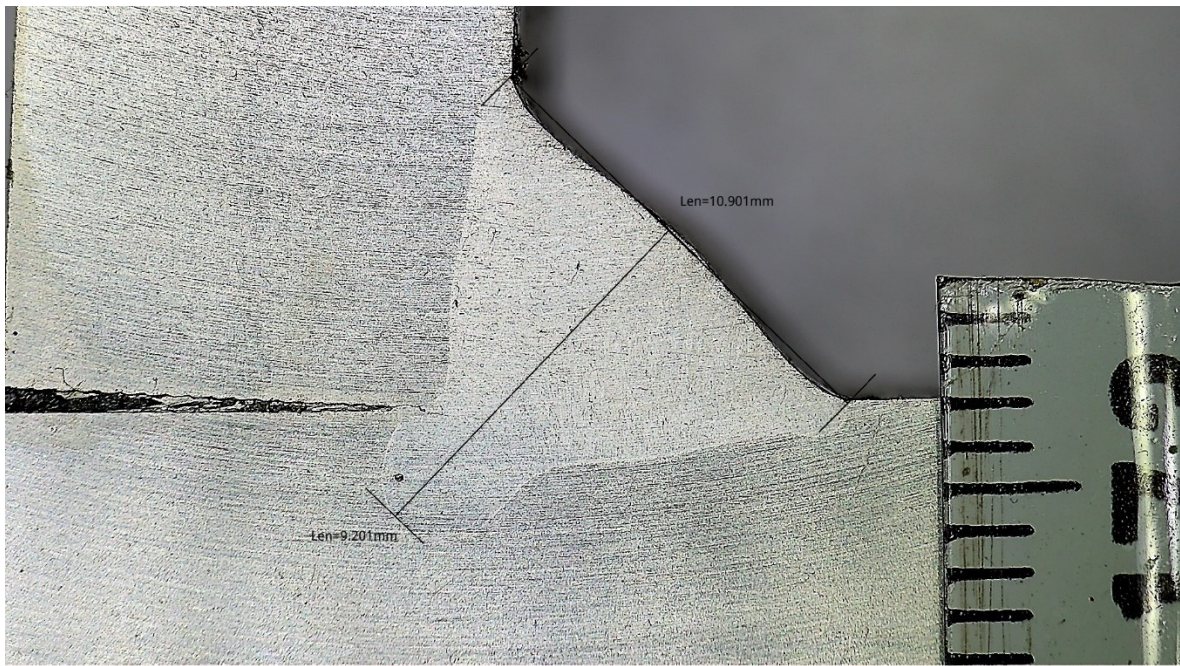
Slika 44 Prikazani parametri nagrizanja



Slika 45 Postupak nagrizanja makroizbrusaka

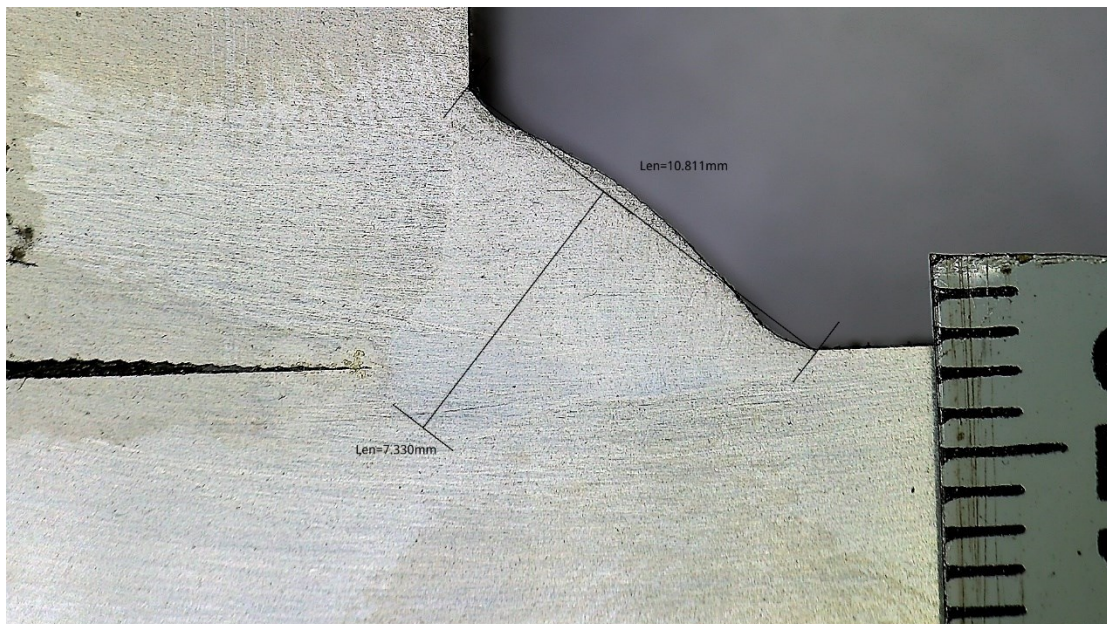
7.7 Rezultati i analiza makrostrukture

Pomoću analize fotografije napravljene kamerom visoke rezolucije provela se kvantitativna (i kvalitativna) analiza makrostrukture uzoraka (Slika 46, Slika 47, Slika 48 i Slika 49). S ciljem detaljnije analize, potrebno je izmjeriti nadvišenje, širinu, penetraciju i površinu presjeka metala navara.



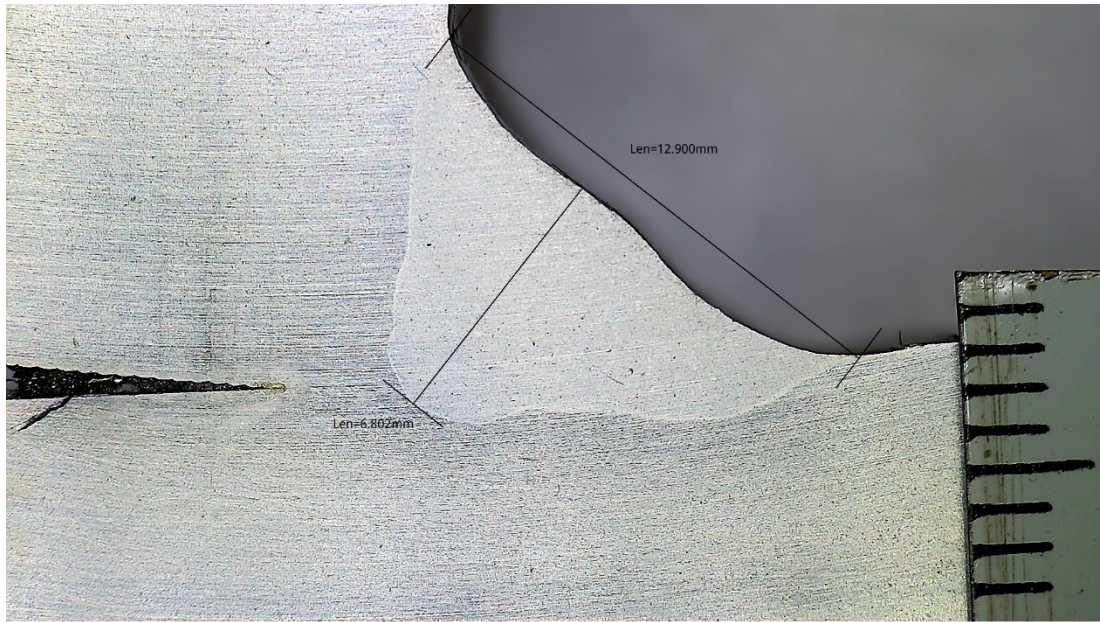
Slika 46 Makroizbrusak uzorak 1

Kako je kod uzorka 1 korišten zaštitni plin argon koji ima manju toplinsku vodljivost kao rezultat daje, prikazano na Slika 46, ima prstasti oblik veće penetracije u odnosu na uzorak broj 3 i 4. Presjek zavarenog spoja uzorka 1 ima blago konveksan izgled ujednačene geometrije. Također, povećana penetracija karakteristična je kod plinskih mješavina sa udjelom CO_2 .



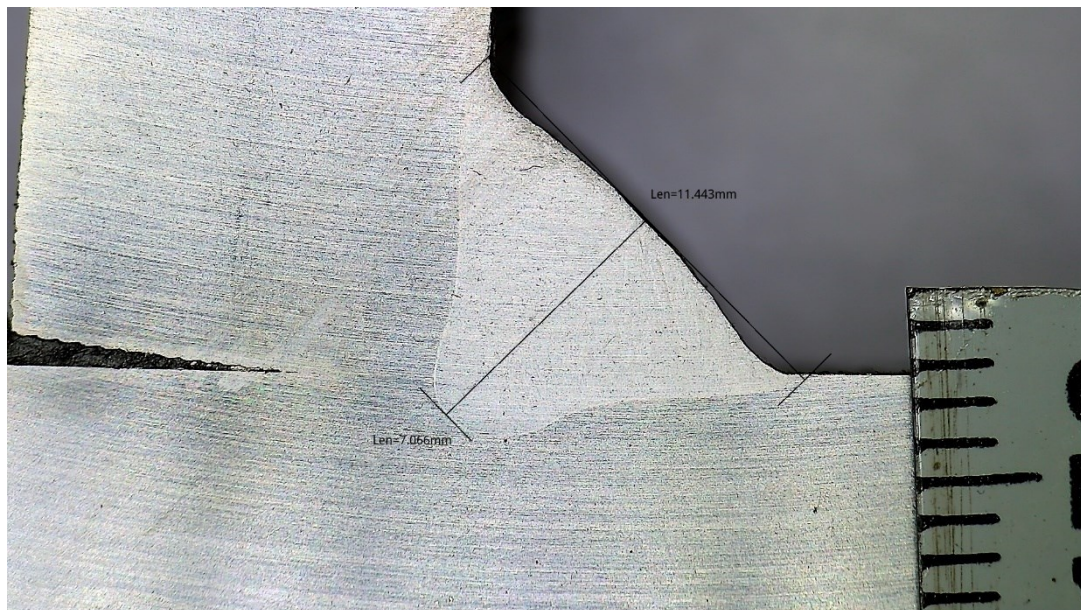
Slika 47 Makroizbrusak uzorak 2

Presjek metala zavara uzorka 2 prikazan na Slika 47 ima „prstoliki“ oblik metala zavara veće penetracije u odnosu na uzorak broj 3 i 4. Povećana penetracija karakteristična je kod plinskih mješavina sa udjelom CO_2 . Presjek zavarenog spoja uzorka 1 ima konveksan izgled ujednačene geometrije bez vidljivih grešaka.



Slika 48 Makroizbrusak uzorak 3

Presjek metala zavara uzorka 3 ima blago nadvišenje površine lica zavara tj. presjek metala zavara bez vidljivih grešaka. Penetracija uzorka 3 manja je nego kod uzoraka 1 i 2, prikazano na Slika 48.



Slika 49 Makroizbrusak uzorak 4

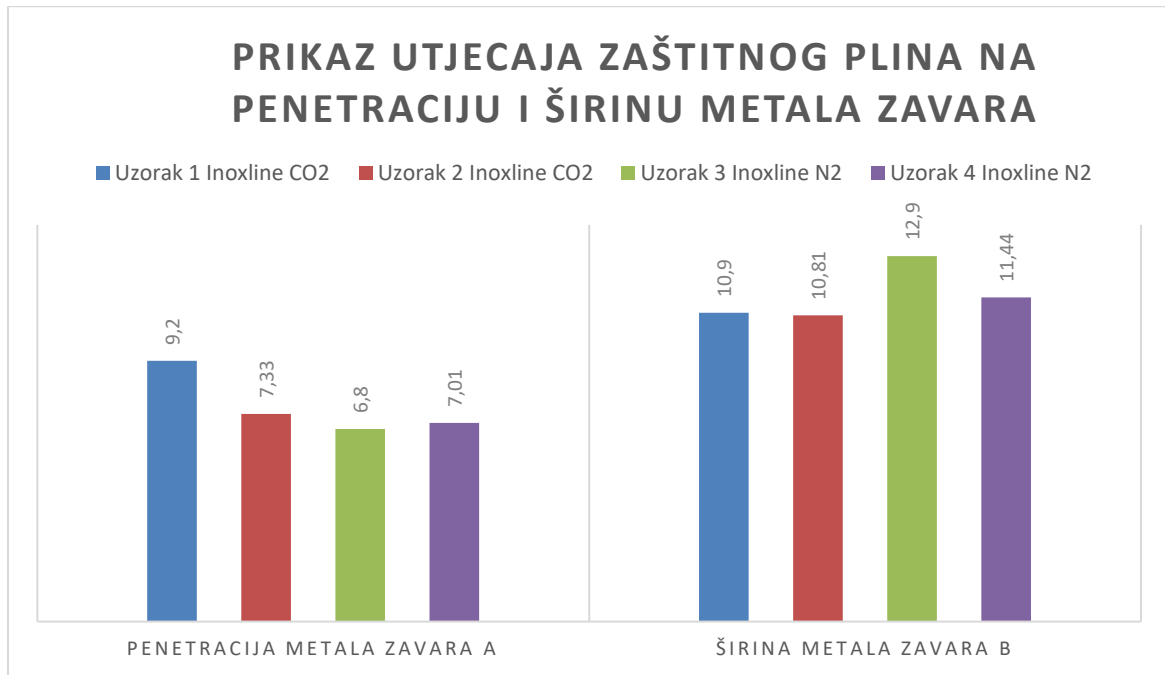
Presjek metala zavara uzorka 4 je urednog konveksnog oblika bez vidljivih grešaka. Manja je penetracija nego kod uzoraka 1 i 2, prikazano na Slika 49.

Tablica 9 Prikazuje analizu dimenzija makrostrukture uzoraka

	Plinska mješavina	Vrsta izvora struje	Penetracija metala zavara a, [mm]	Širina metala zavara b, [mm]
Uzorak 1	Inoxline CO ₂	DC+	9,201	10,901
Uzorak 2	Inoxline CO ₂	AC impulsno	7,330	10,811
Uzorak 3	Inoxline N ₂ .	DC+	6,802	12,900
Uzorak 4	Inoxline N ₂ .	AC impulsno	7,066	11,443

U Tablica 9 prikazuju se vrijednosti širine i penetracije metala zavara uzoraka 1, 2, 3 i 4.

Vizualnom metodom, kao i podacima iz Tablica 9, zaključuje se da presjek zavara uzoraka 1 i 2, zbog korištenja plinske mješavine Inoxline CO₂ imaju „prstoliki“ oblik metala zavara veće penetracije nego uzorci 3 i 4. Također, zavari uzoraka 1 i 2 imaju manje širine presjeka metala zavara nego uzorci 3 i 4 korišteni plinskom mješavinom Inoxline N₂., što se može vidjeti na grafu „Prikaz utjecaja zaštitnog plina na penetraciju i širinu metala zavara“, na Slika 50. No, zavari uzoraka 2 i 4 gdje se koristila AC pulsna struja su površinski manji, nego kod uzoraka 1 i 3 gdje se koristila DC+ pulsna struja.



Slika 50 Grafički prikaz utjecaja zaštitnog plina na penetraciju i širinu metala zavara

8 DETALJNA ANALIZA MIKROSTRUKTURE UZORAKA

Detaljnu analizu mikrostrukture tj. udio ferita i austenita kod makroizbrusaka (Slika 53) rađena je mjerenjem udjela ferita pomoću stroja „Ferritgehaltmesser 1.054“ prikazanog na Slika 51.

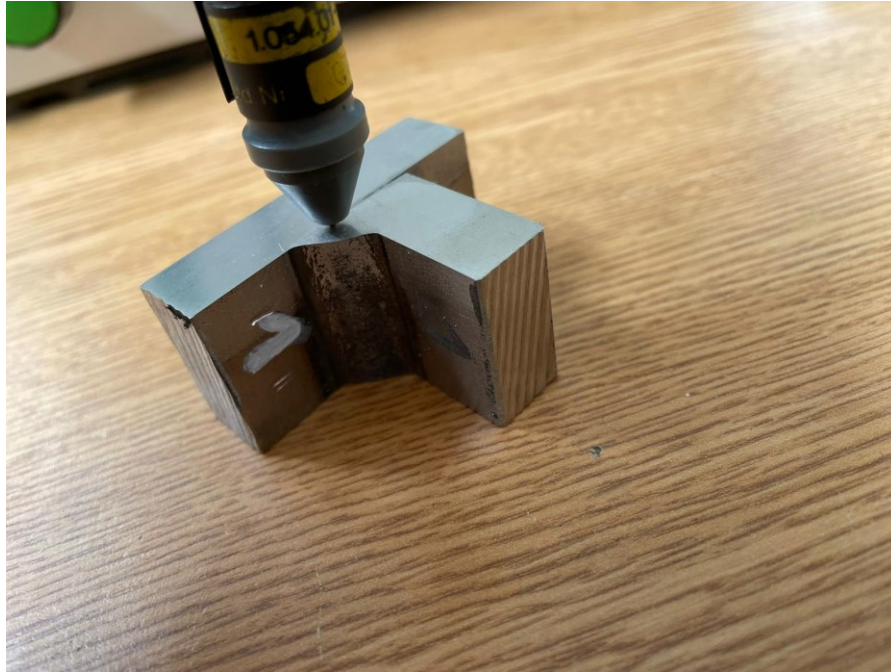


Slika 51 Uređaj za mjerenje udjela ferita – Ferritgehaltmesser

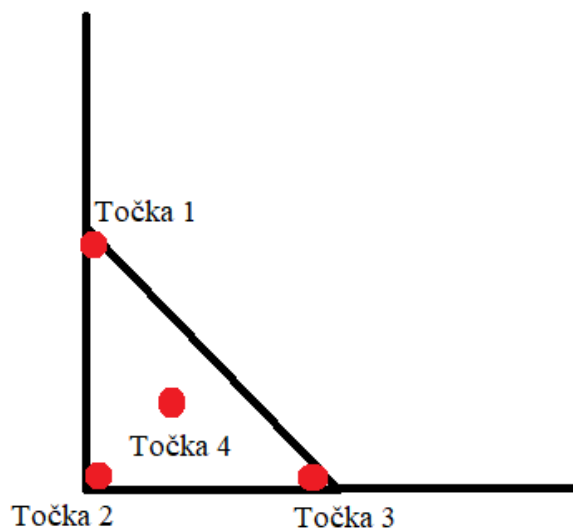


Slika 52 Specifikacijska pločica Ferritgehaltmesser uređaja

Mjerenje je provedeno pomoću mjerne sonde (Slika 53) koju prislanjamo na 4 točke (Slika 54) metala zavara i mjerenje ponavljamo tri puta u istoj točki. Rezultati mjerenja udjela ferita na rubovima i sredini presjeka metala zavara prikazani su u Tablica 10.



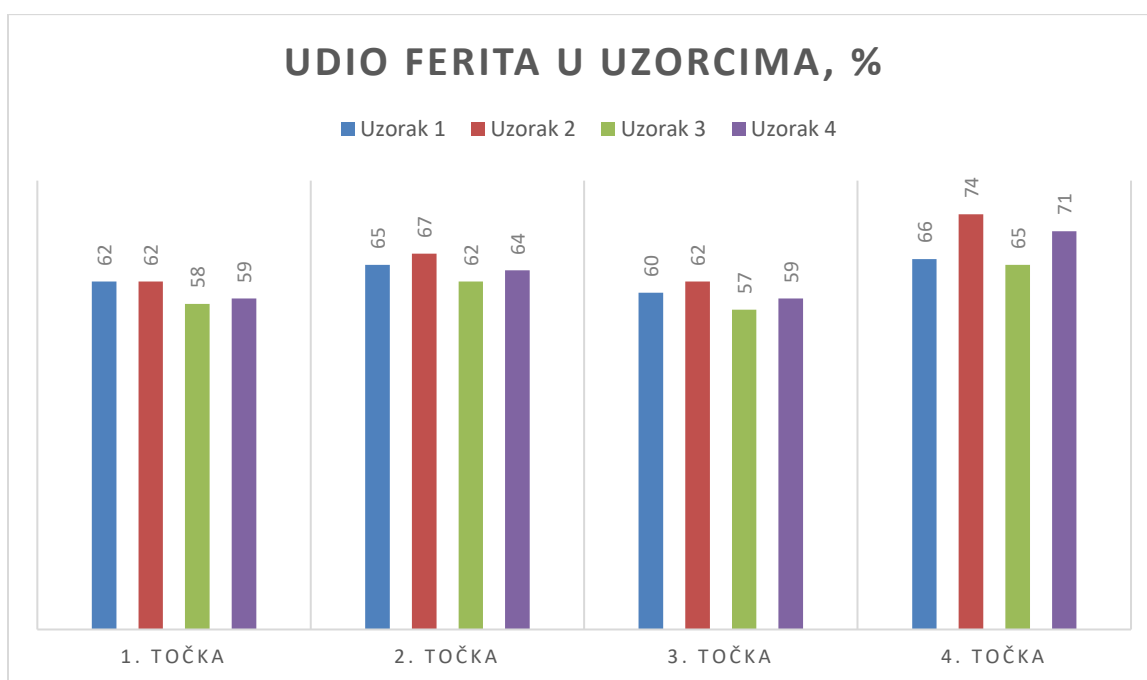
Slika 53 Mjerenje udjela ferita na uzorku 1



Slika 54 Raspored točaka mjerenja udjela ferita

Tablica 10 Dobiveni udjeli ferita kod uzoraka

Uzorak	Točka 1	Točka 2	Točka 3	Točka 4
1	62%	65%	60%	66%
2	62%	67%	62%	74%
3	58%	62%	57%	65%
4	59%	64%	59%	71%



Slika 55 Grafički prikaz udjela ferita u uzorcima

Prema prikazanom grafu „Udio ferita u uzorcima, %“ na Slika 55, može se zaključiti sljedeće:

- Uzorak 2 ima najviši udio ferita u mikrostrukтури, po točkama mjerenja (62 %, 67 %, 62 % i 74 %) jer je došlo do feritizacije 1100 °C i udio nikla nije bio dovoljan da je spriječi,
- Uzorak 3 ima najmanji udio ferita u mikrostrukтури, po točkama mjerenja (58 %, 62 %, 57 % i 65 %),
- Uzorci 3 i 4 zavareni zaštitnim plinom Inoxline N2 (97,5 % Ar i 2,5 % N₂) imaju najmanje udjela ferita u strukturi nego uzorci 1 i 2 zavareni zaštitnim plinom Inoxline C2 (97,5 % Ar i 2,5 % CO₂),
- Uzorci 1 i 2 kod kojih je korišten zaštitni plin Inoxline C2, ali različite struje, AC pulsno i DC + pulsno, nemaju znatne razlike u mikrostrukтури između uzoraka,
- U točki 4 je vidljivo najviši postotak udjela ferita kod svih uzoraka jer je zavareni spoj osjetljiv na feritizaciju.

9 ZAKLJUČAK

U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada provedeno je ispitivanje i analiza u cilju utvrđivanja udjela ferita u mikrostrukturi te utjecaja parametra zavarivanja na kvalitetu i geometriju zavarenog spoja. Ispitivanje i analiza provedeni su na četiri uzorak od dupleks čelika X2 CrNiMoN 22-5-3, uz različite parametre MAG zavarivanja sa posebnim naglaskom na vrstu struje te kemijski sastav mješavine zaštitnog plina (Inoxline N₂ i Inoxline CO₂ navedenih u Tablica 7). Analizom rezultata ispitivanja je utvrđen različiti utjecaj parametra zavarivanja (vrsta struje i vrsta zaštitnog plina) na estetiku lica zavara, količinu prskotina u području oko zavarenog spoja, penetraciju metala zavara, vidljivo na Slika 41, Slika 46, Slika 47, Slika 48 i Slika 49. Također napravljena je detaljna analiza mikrostrukture uzoraka mjerenjem udijela ferita čime se dobio odnos feritno-austenitne strukture u metalu zavara, prikazano u Tablica 10.

Korištene su dvije različite vrste struje, DC+ pulsno i AC pulsno, samim time, ostale parametre zavarivanja je bilo potrebno prilagoditi kako bi se postigle jednake struje zavarivanja. Tijekom zavarivanja sa DC+ pulsno (uzorci 1 i 3), uočena je promjena na parametrima zavarivanja u odnosu na AC pulsno.. Brzinu zavarivanja, brzinu dodavanja žice te iznos stvarnog napona bili su manje vrijednosti kod DC+ pulsno.

Kod korištenja zaštitnog plina Inoxline N2 (uzorci 3 i 4) zaključuje se:

- Uzorci imaju zaglađeniju površinu lica zavara u odnosu na uzorke 1 i 2,
- Uzorak 4 ima veću količina prskotina oko metala zavara,
- Uzorci 3 i 4 imaju veću širina presjeka metala zavara,
- Uzorci 3 i 4 imaju najmanje udjela ferita u mikrostrukturi

Kod korištenja zaštitnog plina Inoxline C2 (Uzorci 1 i 2), zaključuje se:

- Uzorci imaju grublju površinu lica zavara u odnosu na uzorke 3 i 4,
- Količina prskotina vidljivo je manja, posebice kod uzorka 1 naspram uzorka 4,
- Povećana penetracija kod zavarivanja, vidljivo na Slika 46 gdje presjek metala zavara ima „prstoliki“ oblik,
- Manja širina presjeka metala zavara,
- nemaju znatne razlike u mikrostrukturi između uzoraka, obzirom na korištenje različitih vrsta struja (AC pulsno i DC+ pulsno).

Na temelju donesenih zaključaka iz rezultata ispitivanja, može se zaključiti da je plinska mješavina argona i dušika (97,5 % Ar i 2,5 % N₂) korištena pri zavarivanju uzoraka 3 i 4, bolji izbor od plinske mješavine argona i ugljičnog dioksida (97,5 % Ar i 2,5 % CO₂) koja je korištena pri zavarivanju uzoraka 1 i 2. Samim time, preporučuje se upotreba argona i dušika kao zaštitnog plina tijekom zavarivanja dupleks čelika zbog pozitivnog djelovanja na geometriju metala zavara i postizanja ujednačenijeg omjera ferita i austenita u mikrostrukturi.

10 LITERATURA

- [1] Z. Salopek, »RAZVOJ ZAŠTITNIH PLINOVA ZA ZAVARIVANJE,« 50. GODINA ZAVARIVAČKE TRADICIJE ZA BUDUĆNOST, Messer, Slavonski Brod, 2005.
- [2] O. S. AB, Handbook of Stainless Steel, Avesta, Sweden: Avesta Resarch Centre, 2013.
- [3] I. Bačić, »Poboljšanje korozijske zaštite nehrđajućeg čelika nanostrukturnim sol-gel ZrO₂ filmovima,« Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb, 2016.
- [4] T. Filetin, F. Kovačićek i J. Indof, Svojstva i primjena materijala, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, 2002.
- [5] K. Stjepan, »Specijalni čelici,« Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2010.
- [6] B. Schiller i M. Kekić, »Atestacija postupaka zavarivanja visokolegiranih korozijski postojanih čelika,« *Znanstveno - stručni časopis Zavarivanje*, br. 44, pp. 23-26, 2021.
- [7] M. Čuže, »Analiza utjecaja zaštitnih plinova pri AC MIG navarivanju dupleks čelika,« Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 2022.
- [8] SERTO-BEL, »Općenito o nehrđajućem čeliku - Inoxy,« [Mrežno]. Available: <https://www.serto-bel.hr/inox-opcenito/index.html>. [Pristupljeno 15 June 2023].
- [9] A. Ikram i H. Chung, »The effect of EN ratio and current on microstructural and mechanical properties of weld joined by AC-GMAW on square groove butt joints,« *Applied Sciences*, svez. 7, br. 3, p. 261, 2017.
- [10] I. Juraga, I. Stojanović i B. Ljubenkov, »EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE DUPLEX STAINLESS STEEL WELDS IN SHIP BUILDING,« *Brodogradnja: Teorija i praksa brodogradnje i pomorske*, svez. 65, br. 2, pp. 73-85, 2014.
- [11] N. Dolić, Z. Glavaš i Z. Zovko Brodarac, Sustainable Development in Foundry Materials and Technologies, Sisak: Metalurški fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2012.
- [12] N. R. Gunn, »Microstructure, properties and applications,« u *Duplex Stainless Steel*, Arington Publishing.

- [13] I. Kostadin, »Materijali II,« [Mrežno]. Available: https://www.vuka.hr/images/50013288/MATERIJALI_II-KOSTADIN.pdf. [Pristupljeno Srpanj 2023].
- [14] I. M. A. (IMOA), »Practical Guidelines for the Fabrication of Duplex Stainless Steel,« *IMOA, The voice of the Molybdenum Industry*, br. 3, 2014.
- [15] V. Hosseini, »Influence of multiple welding cycles on microstructure and corrosion resistance of a super duplex stainless steel,« University West, Trollhättan, Sweden, 2016.
- [16] V. Rede, »Mikrostrukturne promjene u zavarenom spoju dupleks čelika,« *Zavarivanje*, br. 55, pp. 155-163, 2012.
- [17] A. Cunha Rocha, A. P. Rocha Santos i G. Ribeiro Pereira, »Phase Transformations in Duplex Stainless Steel,« u *Stainless Steel and Alloys*, IntechOpen, 2018.
- [18] N. Babić, »A-TIG zavarivanje duplex čelika, Diplomski rad,« Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [19] V. Rede, »Utjecaj mikrostrukture zavara dupleks čelika na otpornost prema trošenju, Doktorska disertacija,« Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2004.
- [20] M. Horvat, I. Samardžić i V. Kondić, »Napetosa korozija,« [Mrežno]. Available: <https://hrcak.srce.hr/file/124726>. [Pristupljeno Srpanj 2023].
- [21] M. Novosel i D. Krumes, *Posebni čelici*, Slavonski Brod, 1998.
- [22] »First chemical tanker use combination duplex stainless steel,« *Marinesight*, [Mrežno]. Available: <https://www.marineinsight.com/category/shipping-news/>. [Pristupljeno 07 2023].
- [23] I. Juraga, V. Šimunović i I. Stojanović, »Zavarivanje Cr-Ni čelika, Korozijska postojanost,« Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [24] *Zavarivanje, Preporuke za zavarivanje metalnih materijala 3. dio: Elektrolučno zavarivanje nehrđajućih čelika HRN EN 1011-3:2001*.
- [25] F. M. Elsabbagh, A. El-Sabbagh, R. M. Hamouda i M. A. Taha, »Analysis of Super Duplex Stainless Steel Properties as an Austenite-Ferrite Composite,« *Materials Sciences and Applications*, svez. 6, br. 12, 2015.

- [26] J. Sahu, U. Krupp, R. Ghosh i H.-J. Christ, »Effect of 475°C embrittlement on the mechanical properties of duplex stainless steel,« *Materials Science and Engineering*, svez. 508, br. 1-2, 2009.
- [27] I. Garašić, »Autorizirana predavanja iz kolegija „Postupci zavarivanja“,« Sveučilište strojarstva i brodogradnje, Zagreb.
- [28] M. Rudan, »Zavarivanje u zaštiti plina taljivom elektrodom (MIG/MAG) - Seminar, Društvo za tehniku zavarivanja Istra, Pula, 2005. [Mrežno]. Available <http://www.dtzi.hr/upload/pdf/2.%20SEMINAR/Brosura%20seminar%202.pdf>. [Pristupljeno July 2023].
- [29] J. Nadzam, »Gas Metal Arc Welding,« Lincoln Electric, 08 2014. [Mrežno]. Available https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf. [Pristupljeno July 2023].
- [30] J. Maja, »Utjecaj zaštitnoga plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80,« Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [31] Millerwelds, »Guidelines For Gas Metal Arc Welding (GMAW),« 2012. [Mrežno]. Available: <https://www.millerwelds.com/-/media/miller-electric/import/literature/file/guidelines-for-gas-metal-arc-welding-gmaw.pdf>. [Pristupljeno 07 2023].
- [32] »Tehnologija strojarskih instalacija,« Webador, [Mrežno]. Available <https://tsi.webador.com/1-godina>. [Pristupljeno July 2023].
- [33] G. Bratić, D. Šimić, J. Laća, M. Antunović i N. Blažević, »MIG MAG postupak zavarivanja, Skripta za zavarivače,« [Mrežno]. Available: <http://pvtr-szkz.com.hr/wp-content/uploads/2020/10/5.-Postupak-zavarivanja-MIG-MAG-skripta.pdf>. [Pristupljen July 2023].
- [34] »Dodatni i potrošni materijali za zavarivanje - Plinovi i plinske mješavine za zavarivanje taljenjem i srodne postupke - HRN EN ISO 14175:2008«.
- [35] B. Mvola i P. Kah, »“Effects of shielding gas control: welded joint properties in GMAW process optimization,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* svez. 88, br. 9, p. 2369–2387, 2017.

- [36] P. Kah i M. J., »Influence of shielding gases in the welding of metals,« *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, svez. 64, br. 9, p. 1411–1421, 2013.
- [37] ASSDA, »Shielding gases for welding and their effects on stainless steel properties,« Australian Stainless Steel Development Association, October 2019. [Mrežno]. Available: <https://www.assda.asn.au/blog/311-shielding-gases-for-welding-and-their-effects-on-stainless-steel-properties>. [Pristupljeno June 2023].
- [38] »ProInstal,« [Mrežno]. Available: <https://proinstal.hr/moze-li-se-koristiti-argon-co2-mjesavina-za-tig-zavarivanje/>. [Pristupljeno 07 2023].
- [39] V. Rede, *Nehrđajući čelici*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.

PRILOZI

I. CD-R disc