

Robotizirano MAG zavarivanje dupleks čelika

Ptičar, Martin

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:774579>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-26**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Martin Ptičar

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Martin Ptičar

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću na savjetima i pružanoj podršci kroz izradu diplomskog rada.

Hvala asistentu Ivanu Juriću na velikom strpljenju i 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 na velikoj pomoći i bezuvjetnoj podršci tijekom cijelog mog studiranja.

Martin Ptičar



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur. broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Martin Ptičar**

Mat. br.:0035191145

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Robotizirano MAG zavarivanje dupleks čelika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Robotized MAG Welding of Duplex Steel**

Opis zadatka:

Analizirati osnovne vrste dupleks čelika koji se primjenjuju u proizvodnji zavarivanjem. Detaljno izdvojiti problematiku zavarljivosti i opisati specifičnosti MAG postupka za zavarivanje dupleks čelika. Pojasniti odabir dodatnih materijala i zaštitnih plinova te opisati prikladne modalitete prijenosa metala u električnom luku. Posebno se osvrnuti na primjenu robotiziranog MAG zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu na odgovarajućim uzorcima odabrati parametre zavarivanja i vrstu dodatnog materijala za robotizirano MAG zavarivanje dupleks čelika. Analizirati više razina unosa topline u kombinaciji sa zaštitnim plinom. Provesti potrebna razorna i nerazorna ispitivanja te posebno analizirati mikrostrukture u metalu zavara i zoni utjecaja topline. Zaključno definirati primjenjivost robotiziranog MAG zavarivanja za spajanje dupleks čelika i dati smjernice za izradu proizvodne tehnologije.

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

Zadatak zadan:

28. rujna 2017.

Datum predaje rada:

30. studenog 2017.

Predviđeni datum obrane:

6., 7. i 8. prosinca 2017.

Zadatak zadao:

Predsjednica Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić

Prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. VISOKOLEGIRANI ČELICI	2
2.1. Grupe nehrđajućih čelika.....	3
2.1.1. Feritni čelici.....	4
2.1.2. Austenitni čelici.....	5
2.1.3. Martenzitni čelici.....	6
2.1.4. Dupleks čelici.....	7
2.2. Mikrostruktura dupleks čelika.....	11
2.3. Svojstva dupleks čelika	20
2.3.1. Mehanička svojstva.....	20
2.3.2. Korozijska postojanost	22
2.3.3. Otpornost na trošenje	22
2.3.4. Fizička svojstva	23
2.4. Primjena dupleks čelika	23
3. ZAVARIVANJE DUPLEKS ČELIKA.....	24
3.1. Pojava krhkosti dupleks čelika.....	33
3.2. Utjecaj hlađenja na mehanička svojstva.....	36
4. MAG ZAVARIVANJE	38
4.1. PRIJENOS METALA U ELEKTRIČNOM LUKU	41
4.1.1. Prijenos kratkim spojevima.....	41
4.1.2. Prijenos prijelaznim lukom	42
4.1.3. Prijenos štrcajućim lukom.....	43
4.1.4. Prijenos impulsnim lukom	44
4.2. Uloga zaštitnog plina pri MAG zavarivanju	44
4.3. Dodatni materijal za MAG zavarivanje.....	45

4.3.1. Dodatni materijal i zaštitni plin za MAG zavarivanje dupleks nehrđajućih čelika	45
5. ROBOTIZIRANO MAG ZAVARIVANJE	47
5.1. Programiranje robota za zavarivanje	48
5.1.1 Mjerenje napona	49
5.1.2. Mjerenje jakosti struje	49
5.1.3. Mjerenje brzine dovođenja žice	49
5.2. Glavne vrste programiranja robota za zavarivanje	49
5.3. Senzori za praćenje žlijeba i putanje zavarivanja	50
5.3.1. Mehanički senzori	50
5.3.2. Električni senzori	50
5.3.3. Optički senzori	51
5.3.4. Električni luk kao senzor	52
6. EKSPERIMENTALNI DIO	54
6.1. Robotska stanica VRC-1G MIG + 1G TIG/1dm	55
6.2. Izvor struje	59
6.3. Osnovni materijal	61
6.4. Dodatni materijal	62
6.5. Zaštitni plin	63
6.6. Priprema uzoraka za zavarivanje	63
6.7. Zavarivanje kutnog spoja	65
6.8. Analiza kutnog zavarenog spoja	66
6.9. Priprema uzoraka za brušenje	70
6.10. Analiza makrostrukture	71
6.11. Mjerenje tvrdoće metodom Vickers	76
6.13. Analiza tvrdoće	83
6.14. Analiza mikrostrukture	85
7. ZAKLJUČAK	91
PRILOZI	94

POPIS SLIKA

Slika 1. Schaefflerov strukturni dijagram [6].....	3
Slika 2. Mikrostruktura feritnog čelika [5].....	5
Slika 3. Mikrostruktura austenitnog čelika [5].....	6
Slika 4. Mikrostruktura martenzitnog čelika [5]	7
Slika 5. Mikrostruktura dupleks čelika [5].....	8
Slika 6. Pseudobinarni dijagram sranja Cr-Ni-Fe uz 70% Fe=const [3].....	13
Slika 7. Shematski prikaz tipičnih precipitacija u dupleks čelicima [3]	14
Slika 8. Shema rasporeda kroma preko karbida $M_{23}C_6$ na granici ferit-austenit [3].....	15
Slika 9. Model nastanka i rasta sigma faze [3].....	16
Slika 10. Udio kroma preko σ -faze na granici ferit-austenit [3]	17
Slika 11. TTT-dijagram nastanka σ - i χ -faze za čelik 1.4462 [3]	18
Slika 12. Shematski prikaz difuzije kroma, molibdena i nikla pri σ i χ precipitaciji [3]	18
Slika 13. Promjena mehaničkih svojstava čelika 1.4462 [3].....	21
Slika 14. Strukturne promjene u zavaru i ZUT-u pri zavarivanju dupleks čelika [7].....	26
Slika 15. Krivulja hlađenja u području zavarenog spoja [7]	27
Slika 16. Prikaz vremena $t_{12/8}$ na neka svojstva u području zavarenog spoja [7].....	27
Slika 17. Utjecaj kemijskog sastava i brzine ohlađivanja na sadržaj ferita u metalu zavora [7]	28
Slika 18. Izotermički dijagram izlučivanja u čeliku X2CrNiMoN 25 5 3 [7].....	33
Slika 19. Utjecaj režima izotermičkog držanja i temperature ispitivanja na udarni rad loma [4]	34
Slika 20. Promjena udarnog rada loma zavisno o različitim temperaturama držanja [7]	35
Slika 21. Ovisnost udarnog rada loma i trajanju izotermičkog držanja pri 475 °C [7].....	35
Slika 22. MAG zavarivanje [11]	38
Slika 23. Proces taljenja [11].....	38
Slika 24. Prijenos metala kratkim spojevima [11]	42
Slika 25. Prijenos metala prijelaznim lukom [11].....	43
Slika 26. Prijenos metala štrcajućim lukom [11]	43
Slika 27. Modularna arhitektura adaptivnog upravljanja robotiziranim procesom zavarivanja [18]	48

Slika 28. Način detekcije radnog komada uz pomoć kontaktnog električnog senzora [18]	51
Slika 29. Grafički model robota s optičkim senzorom za praćenje žlijeba [18]	51
Slika 30. Shematski prikaz procesa zavarivanja kod kojeg nema devijacije žlijeba [18]	53
Slika 31. Prikaz robotske stanice [19]	55
Slika 32. Privjesak za učenje	56
Slika 33. Robot Almega AX-V6	57
Slika 34. Izvor struje Daihen Varstroj DP400	59
Slika 35. Korisničko sučelje izvora struje Daihen Varstroj DP400	60
Slika 36. Specifikacija dodatnog materijala	62
Slika 37. Rezanje uzoraka plazmom	64
Slika 38. Brušenje površina za zavarivanje	64
Slika 39. Uzorak broj 1	66
Slika 40. Uzorak broj 2	67
Slika 41. Uzorak broj 3	68
Slika 42. Uzorak broj 4	69
Slika 43. Postavljanje skale na točnu dimenziju mjerne trake u programu ImageJ	71
Slika 44 Makroizbrusak - uzorak 1	72
Slika 45 Makroizbrusak - slika 2	73
Slika 46 Makroizbrusak - uzorak 3	74
Slika 47 Makroizbrusak - uzorak 4	75
Slika 48. Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće [24]	76
Slika 49. Uređaj za mjerenje tvrdoće	77
Slika 50. Pozicioniranje točke mjerenja tvrdoće	78
Slika 51. Pozicije mjerenja tvrdoće na uzorku 1	79
Slika 52. Pozicije mjerenja tvrdoće na uzorku 2	80
Slika 53. Pozicije mjerenja tvrdoće na uzorku 3	81
Slika 54. Pozicije mjerenja tvrdoće na uzorku 4	82
Slika 55. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoće na uzorku broj 1	83
Slika 56. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoće na uzorku broj 2	83
Slika 57. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoće na uzorku broj 3	84
Slika 58. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoće na uzorku broj 4	84
Slika 59. Mikrostruktura osnovnog materijala, povećanje 200 puta	85
Slika 60. Mikrostruktura metala zavara na uzorku broj 1, povećanje 200 puta	86

Slika 61. Mikrostruktura metala zavara na uzorku broj 2, povećanje 200 puta	86
Slika 62. Mikrostruktura metala zavara na uzorku broj 3, povećanje 200 puta	87
Slika 63. Mikrostruktura metala zavara na uzorku broj 4, povećanje 200 puta	87
Slika 64. Mikrostruktura ZUT-a uzorka 1, povećanje 200 puta.....	88
Slika 65. Mikrostruktura ZUT-a uzorka 2, povećanje 200 puta.....	89
Slika 66. Mikrostruktura ZUT-a uzorka 3, povećanje 200 puta.....	89
Slika 67. Mikrostruktura ZUT-a uzorka 4, povećanje 200 puta.....	90

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav dupleks čelika u % mase [3]	10
Tablica 2. Mehanička svojstva nehrđajućih dupleks čelika [6]	21
Tablica 3. Fizička svojstva dupleks čelika [3]	23
Tablica 4. Kemijsko sastav i brzine ohlađivanja [7]	28
Tablica 5. Načini pripreme spoja za zavarivanje, parametri te položaj zavarivanja za jednostrano i dvostrano zavarivanje [7]	30
Tablica 6. Vremena trajanja inkubacije [7]	33
Tablica 7. Volumni udio austenita u pojedinim zonama zavara i ZUT-a [10].....	36
Tablica 8. Zaštitni plinovi za MAG zavarivanje nehrđajućih čelika [13]	46
Tablica 9. Tehničke karakteristike robota [20]	58
Tablica 10 Intermitencija izvora struje Daihen Varstroj DP400.....	59
Tablica 11 Kemijski sastav dupleks čelika 2205 [22].....	61
Tablica 12 Mehanička svojstva dupleks čelika 2205 [22]	61
Tablica 13. Volumni sastav plinskih mješavina Inoxline C2 i Inoxline N2	63
Tablica 14. Parametri zavarivanja	65
Tablica 15. Analiza dimenzija makrostrukture uzoraka.....	72
Tablica 16 Vrijednosti tvrdoće na uzorku 1	79
Tablica 17 Vrijednosti tvrdoće na uzorku 2	80
Tablica 18 Vrijednosti tvrdoće na uzorku 3	81
Tablica 19 Vrijednosti tvrdoće na uzorku 4	82

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
--------	----------	------

AISI		American Iron and Steel Institute
ASTM		American Society for Testing and Materials
BCC		Body Centered Cubic Lattice - prostorno centrirana kubična rešetka
FCC		Face Centered Cubic Lattice - plošno centrirana kubična rešetka
f	Hz	Frekvencija
I	A	Jakost struje
KV	J	Udarni rad loma po Charpyu
Q	kJ/mm	Unos topline
PREN		Pitting resistance equivalent number
R	Ω	Električni otpor
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
SCC		Stress Corrosion Cracking - napetosna korozija
t	s	Vrijeme
U	V	Napon
v_ž	m/min	Brzina dodavanja žice
v_z	cm/min	Brzina zavarivanja
η	-	Stupanj iskorištenja postupka zavarivanja

SAŽETAK

U teorijskom dijelu obrađeno je polje visokolegiranih čelika općenito, a posebno su objašnjeni austenitno-feritni (dupleks) čelici. Ukratko je opisan povijesni razvoj dupleks čelika, objašnjena je mikrostruktura i uloga pojedinih faza i legiranih elemenata, te su opisana svojstva otpornosti na koroziju i trošenje, fizička i na kraju mehanička svojstva. Najveća pažnja usmjerena je na zavarljivost i tehnologiju zavarivanja dupleks čelika. U daljenjem radu opisan je MAG postupak zavarivanja i karakteristični načini prijenosa metala kod istog postupka. Opisani su uvjeti za izbor dodatnih materijala i njihova primjena. U posljednjem poglavlju teorijskog dijela opisano je robotizirano zavarivanje. Pojašnjene su dvije vrste programiranja robota - *off line* i *on line*, te su prikazane prednosti i nedostaci primjene robota u proizvodnji.

U eksperimentalnom dijelu opisana je korištena oprema za zavarivanje: izvor struje za zavarivanje i robotska stanica. Nadalje, opisan je osnovni i dodatni materijal za zavarivanje te korišteni zaštitni plinovi. Osmišljen je plan pokusa kojim se mogu usporediti unosi topline kod jednoprolaznog i višeprolaznog zavarivanja te utjecaj različitih plinskih mješavina na geometriju zavarenog spoja. Na kraju, analizirani su rezultati dobiveni vizualnom metodom kontrole kutnog zavarenog spoja, uzorci makroizbrusaka, ispitivanja tvrdoće te slika mikrostrukture.

Ključne riječi:

MAG zavarivanje, robotizirano zavarivanje, visokolegirani čelici, dupleks čelik

SUMMARY

The aim of this master's thesis is: "Robotized MAG welding of Duplex Steel". It consists of two parts: theoretical and experimental.

Theoretical part contains description of high-alloyed steels in general with detailed elaboration of duplex steel. In the first part, historical development of duplex steel is mentioned, microstructure of duplex is described and corrosion resistance with mechanical properties are explained. Emphasis of the theoretical part is on welding and weldability of duplex steels. Further, MAG welding is analyzed with metal transfer modes through the electric arc. Filler material is explained with it's application in industry. In the last chapter, robotized welding is mentioned and two most common kind of programming are presented. Also, advantages and disadvantages of robotized manufacturing are described.

In the experimental part used equipment, robotic station, base and filler material and shielding gases are described. The experiment was conceived to compare heat inputs in single and multi-pass welding in a combination of two different shielding gas mixtures. In the end, results of visual control method of a welded part, microstructural changes and hardness test are analyzed.

Key words:

MAG welding, robotized welding, high-alloyed steel, duplex steel

1. UVOD

Zavarivanje spada u novije tehnologije metaloprerađivačke industrije, ali počeci zavarivanja i lemljenja seže u duboku prošlost prije Krista. Zajedno s pojavom kovanja i lijevanja pojavilo se je zavarivanje i lemljenje. Jedan od najstarijih načina zavarivanja je kovačko zavarivanje, gdje se dva komada zagrijana u kovačkoj vatri udarcima čekića spajaju u jedan. Ljevačko zavarivanje je također poznato u vrijeme prije Krista jer su i Kini pronađena željezna kola čiji se sastavni dijelovi spajai lijevanjem željezne taline preko njihovih rubova i nakon skrućivanja nastajao je nerastavljivi spoj. U egipatskim kraljevskim grobovima nađen je nakit čiji dijelovi se u davnoj prošlosti lemljeni [1].

Dugo vremena, sve do 19. stoljeća, kovačko je zavarivanje bilo jedini način zavarivanja. Najčešća primjena je bila za izradu oružja, posuđa i nakita. Unatoč dugoj povijesti početaka zavarivanja i lemljenja zavarivački i srodni postupci su doživjeli nagli razvoj tek u posljednjih 130 godina otkrićem električnoj luka kao izvora topline za zavarivanje [1].

Najveći dio proizvodnje zavarivanjem, više od 90% ukupne mase prerađenog materijala, obavlja se sa svega pet, šest postupaka univerzalne primjene. To su prvenstveno ručno elektrolučno zavarivanje obloženim elektrodama (REL), zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plina ili plinskih mješavina (MIG/MAG), zavarivanje netaljivom elektrodom od volframa u zaštitnoj atmosferi argona ili helija (TIG), zavarivanje pod praškom (EPP) i elektrootporno zavarivanje (EO). Ostali postupci su razvijeni i primjenjuju se ili za pojedine vrste materijala loše zavarljivosti, za dijelove i konstrukcije složenog oblika ili dijelove vrlo malih ili vrlo velikih dimenzija ili za spojeve nepristupačne za uobičajene postupke [1].

2. VISOKOLEGIRANI ČELICI

Visokolegirani Cr-Ni čelici pojavili su se početkom 20. stoljeća, točnije 1912. godine kada ih je patentirao proizvođač čelika Krupp i od tada su u konstantnom razvoju. U posljednjih 25 godina proizvodnja visokolegiranih čelika se udvostručila iz čega se vidi njihova važnost u industriji. Nazivaju se još nehrđajući čelici (eng. stainless steel) i korozijski postojani čelici. Obilježja visokolegiranih Cr-Ni čelika su minimalan udio kroma od 10,5% i dodatak još nekih legiranih elemenata kao što su nikel, molibden, titan, bakar, dušik i ugljik kojima se modificira njihova struktura ili poboljšavaju svojstva obradivosti, čvrstoće, žilavosti na sniženim temperaturama ili korozijske postojanosti. Zbog korozijske postojanosti prvenstveno se koriste za specifičnu primjenu ili specifični okoliš. Visokolegirani Cr-Ni čelici definirani su nacionalnim standardima (HRN, DIN, AISI), a u našem okruženju ustalila se upotreba oznaka prema američkom standardu AISI (American Iron and Steel Institute) i to vjerojatno zbog utjecaja brodogradnje [2].

Nehrđajući čelici se u osnovi temelje na Fe-Cr, Fe-Cr-C i Fe-Cr-Ni sastavima, ali mogu sadržavati i dodatne legirne elemente koji poboljšavaju njihova svojstva i mijenjaju mikrostrukturu. Korozijska otpornost nehrđajućih čelika prvenstveno proizlazi iz legiranja kromom i to udjelima većim od 12 %. Taj udio kroma jamči stvaranje zaštitnog oksidnog sloja na površini čelika. Osim toga, materijal postaje plemenitiji, što ga čini otpornijim na djelovanje elektrolita [3].

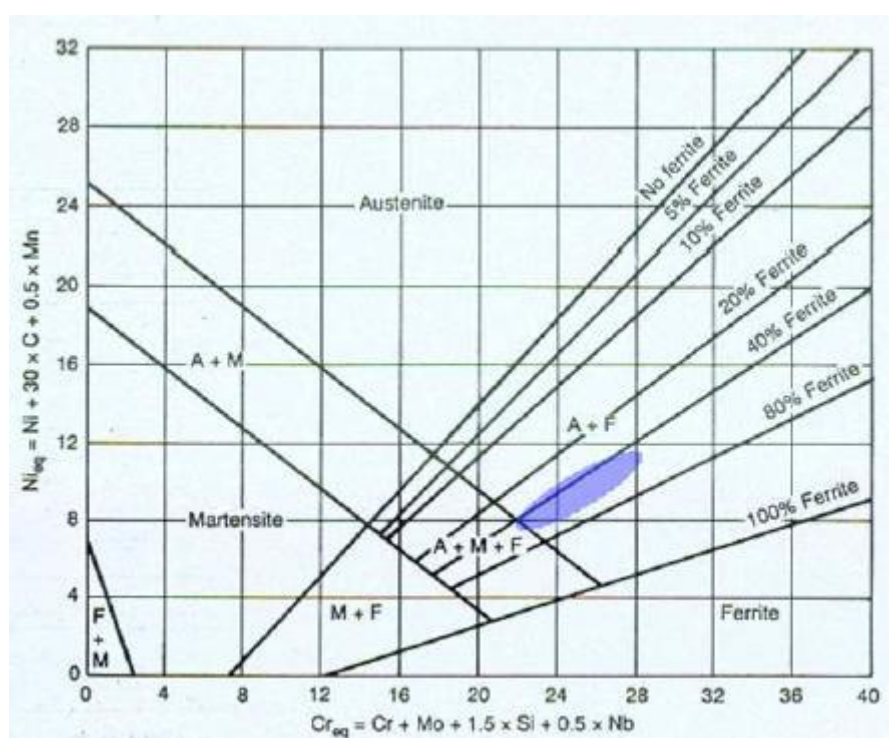
Izraz nehrđajući čelici koristi se za čelike koji su korozijski postojani na djelovanje okolnog medija. Uvjet korozijske postojanosti čelika temelji se na sposobnosti pasiviranja površine (odnosno ranije spomenutog stvaranja zaštitnog oksidnog sloja na površini), tj. stvara se tanka gusta zaštitna prevlaka koja se sastoji od kromovih oksida (Cr_2O_3). Na intenzivnost pasivacije čelika najviše utječe maseni udio kroma i ostalih legiranih elemenata, npr. Ni, W, Mo, Ti i Al koji moraju biti otopljeni kristalu mješancu željeza te kisik koji mora biti obavezno prisutan u cjelokupnom procesu. Isto tako i maseni udio ugljika djeluje na korozijsku postojanost. Porastom udjela ugljika (%C) raste i opasnost od stvaranja karbida (Cr_{23}C_6), čime se osiromašuje čvrsta otopina legirnim elementima, a posebice se osjeća nedostatak kroma koji je vrlo bitan element nehrđajućih čelika. Za potpunu korozijsku postojanost moraju istovremeno biti ispunjena dva uvjeta [3]:

1. čelik mora sadržavati barem 12 % kroma u čvrstoj otopini
2. mora biti postignuta homogena monofazna mikrostruktura.

Koja od mikrostruktura nehrđajućeg čelika će nastati ovisi o udjelu legirnih elemenata. Ovi se legirni elementi mogu podijeliti u dvije skupine [3]:

1. feritotvorce ili alifagene elemente (Cr, Si, Mo, Al, V, Nb i Ti),
2. austenitotvorce ili gamagene elemente (Ni, Mn, Co, Cu i N).

Stvaran uvid u konačnu mikrostrukturu na osnovi poznatog kemijskog sastava daju strukturni dijagrami. Schaefflerov dijagram za gašeno stanje (slika 1) pomaže u definiranju strukturnog stanja čelika na osnovi poznavanja Cr-ekvivalenta (Cr_e) i Ni-ekvivalenta (Ni_e) [3].



Slika 1. Schaefflerov strukturni dijagram [6]

2.1. Grupe nehrđajućih čelika

Nehrđajući čelici mogu se podijeliti u pet grupa prema različitim mikrostrukturnim obilježjima [3]:

1. feritni nehrđajući čelici
2. austenitni nehrđajući čelici
3. austenitno - feritni (dupleks) nehrđajući čelici

4. martenzitni nehrđajući čelici

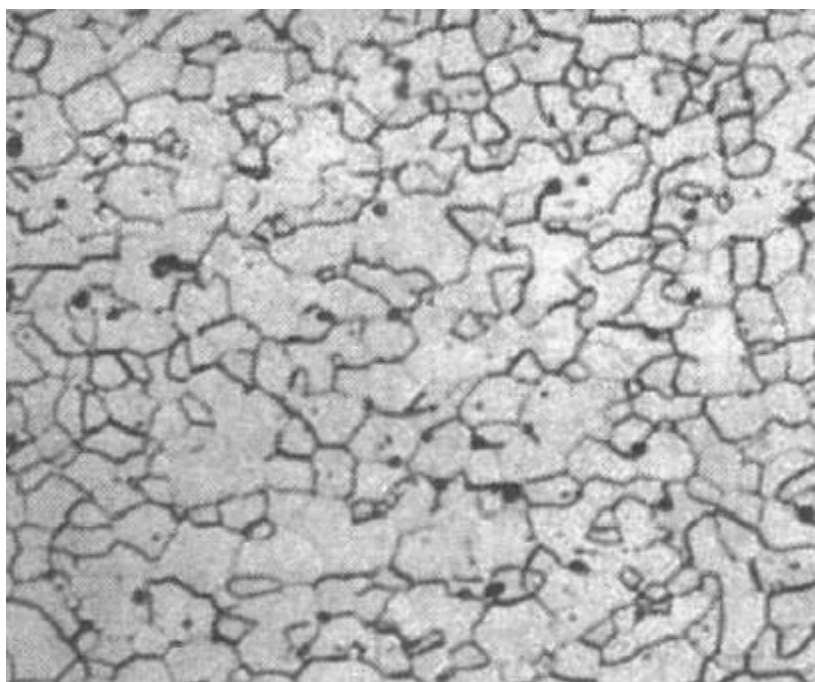
5. precipitacijski očvršnuti (PH) nehrđajući čelici.

2.1.1. Feritni čelici

Feritni čelici sadrže $< 0,1 \%$ C i 13 do 17 % Cr i zbog toga zadržavaju feritnu mikrostrukturu (slika 2) pri gotovo svim temperaturama pa se ne mogu zakaliti. Primjenjuju se u brušenom ili fino poliranom žarenom stanju [4].

Osnovna svojstva feritnih čelika su [4]:

- relativno su mekani
- magnetični su
- slabo oblikovljivi deformiranjem
- bolje obradivi odvajanjem česticama od austenitnih čelika
- postojani su prema oksidirajućim kiselinama i neosjetljivi na plinove koji sadrže sumpor, za razliku od Cr-Ni čelika
- nisu osjetljivi na pojavu napetosne korozije čak i u kloridnim otopinama (morska voda)
- niže su cijene od ostalih nehrđajućih čelika
- sklони lomljivosti pri niskim temperaturama.



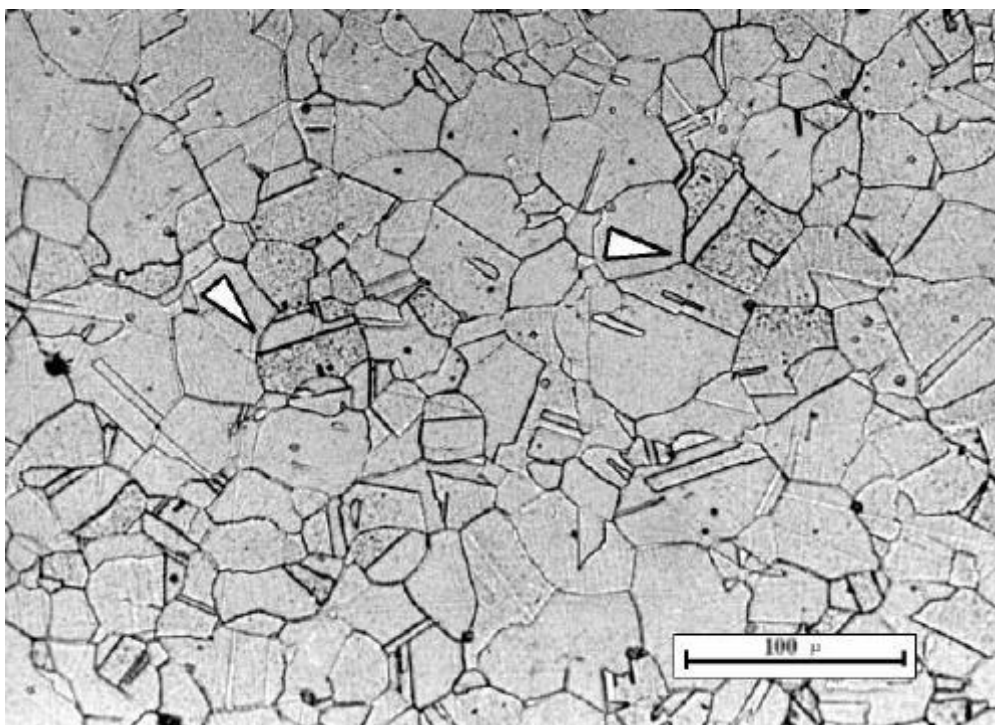
Slika 2. Mikrostruktura feritnog čelika [5]

2.1.2. Austenitni čelici

Radi se o visokolegiranim čelicima s Cr i Ni (Mn) koji proširuju austenitno područje sve do temperature od 200 °C [4].

Neka od svojstva austenitnih čelika jesu [4]:

- nemagnetični zbog austenitne mikrostrukture (slika 3)
- dobro oblikovljivi u hladnom stanju, a hladnom deformacijom mogu očvrsnuti (vučena žica ili hladnovaljane trake)
- uz dodatno legiranje s Mo, W i V pokazuju vrlo dobru otpornost na puzanje pri temperaturama > 600 °C
- zbog zadovoljavajućeg udarnog rada loma pri sniženim temperaturama primjenjuju se teorijski do -273 °C
- otporni na organske i anorganske kiseline, lužine i soli.



Slika 3. Mikrostruktura austenitnog čelika [5]

2.1.3. Martenzitni čelici

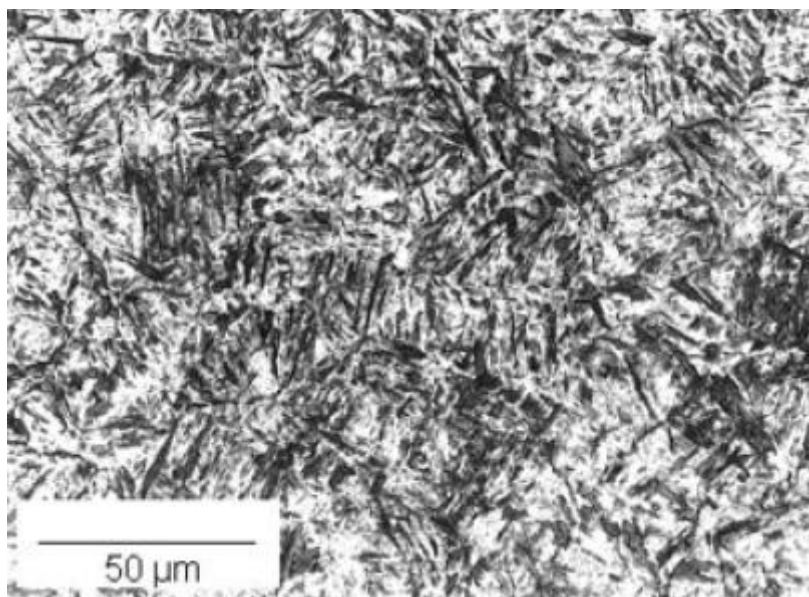
Zbog potrebe zakaljivanja imaju povišen maseni udio ugljika (0,15 do 1,0 % C) te u pravilu preko 13 % Cr. Moguće je legiranje s Mo i Ni.

Optimalna mehanička svojstva i korozijsku postojanost postižu kaljenjem na zraku ili u ulju i naknadnim popuštanjem. Konstrukcijski martenzitni nehrđajući čelici sadrže manje ugljika (< 0,30 % C) od alatnih i popuštaju se pri višim temperaturama (poboljšavaju se).

Mala toplinska vodljivost ovih čelika zahtijeva postepeno ugrijavanje na temperaturu austenitizacije i gašenje u ulju ili u vakuumu (i zbog opasnosti od oksidacije). Što je viši %C i %Cr, to će biti potrebna viša temperatura austenitizacije da se otopi što više ugljika u austenitu (zbog zakaljivosti) i što više kroma (zbog korozijske postojanosti).

Kod konstrukcijskih čelika u prvom je planu korozijska postojanost, a kod alatnih dodatno i otpornost na abrazijsko trošenje. Radi toga alatni čelici imaju često dvofaznu martenzitno-karbidnu mikrostrukturu čija je korozijska postojanost manja od čiste martenzitne mikrostrukture (slika 4).

U odnosu na feritne i austenitne čelike imaju višu tvrdoću i čvrstoću te otpornost na trošenje [4].

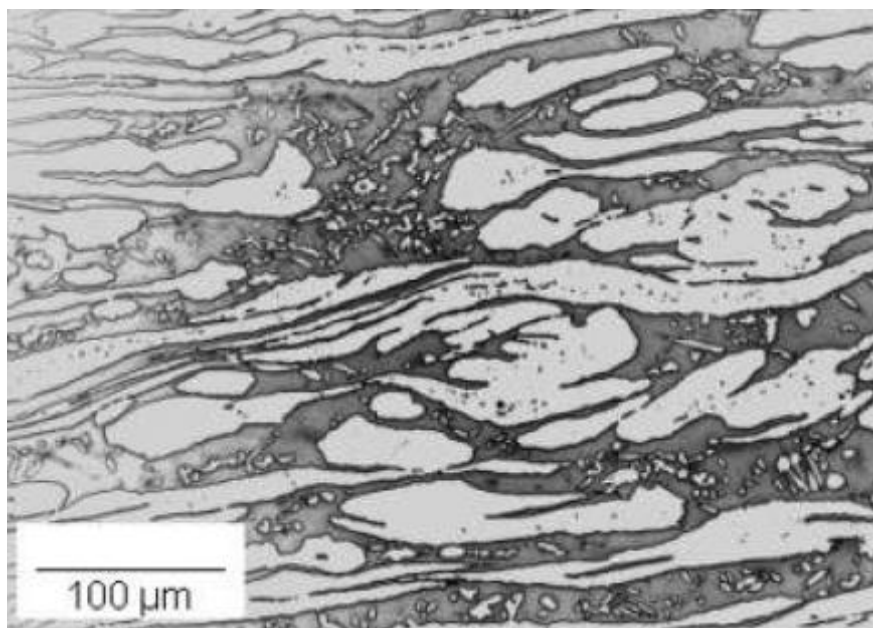


Slika 4. Mikrostruktura martenzitnog čelika [5]

2.1.4. Dupleks čelici

Čelici iz ove skupine nemaju monofaznu mikrostrukturu, nego dvofaznu austenitno - feritnu s 40 do 60 % ferita (slika 5). Na taj se način odstupilo od nužnog uvjeta postojanosti na opću koroziju, ali je zato povećana postojanost na napetosnu koroziju u kloridnom okolišu kao i na H_2S . Vrlo je velika postojanost na jamičastu koroziju.

Dvofaznost čelika može izazvati teškoće pri zavarivanju zbog sklonosti ferita krhkom lomu i mogućnosti izlučivanja karbida po granicama zrna ferit/austenit [4].



Slika 5. Mikrostruktura dupleks čelika [5]

Dupleks čelici pripadaju skupini korozijski postojanih čelika zajedno s austenitnim, feritnim, martenzitnim i precipitacijski očvrnutim čelicima. Dupleks čelici su posebni po tome što, za razliku od ostalih, nemaju monofaznu već bifaznu strukturu sastavljenu od ferita (BCC) i austenita (FCC) u podjednakim količinama. Smještaj dupleks čelika u Schaefflerovom dijagramu prikazan je na slici 2.1. Njihovo glavno obilježje jest izvanredno dobra otpornost prema interkristalnoj, napetosnoj i rupičastoj koroziji u kombinaciji s visokom vlačnom čvrstoćom, visokom granicom tečenja i dobrim udarnim radom loma [3].

Prvi nehrđajući dupleks čelik proizveden je u Švedskoj 1930. godine i uspješno je primijenjen u industriji papira kao zamjena za austenitni nehrđajući čelik koji je osjetljiv na interkristalnu koroziju. Istodobno je u Finskoj proizveden prvi dupleks lijev. Poslije Drugog svjetskog rata počinje intenzivnija primjena i gnječenih i lijevanih dupleks legura u procesnoj industriji. Ovi prvi dupleks čelici, tzv. dupleks čelici prve generacije, nisu sadržavali dušik. Posljedica toga bila su niža mehanička svojstva i niža korozijska postojanost u usporedbi s kasnije razvijenim dupleks čelicima u kojima je dušik neizostavan legirni dodatak. Osim toga, pri zavarivanju dupleks čelika prve generacije dolazilo je do znatnog porasta udjela ferita u zoni utjecaja topline. Feritizacija ZUT-a uzrokovala je pad vrijednosti udarnog rada loma i pad korozijske otpornosti zavarenog spoja u odnosu na osnovni materijal, pa se zbog toga dupleks čelici prve generacije nisu primjenjivali u zavarenom stanju. Uvođenjem dušika kao obveznog legirnog

dodatka, sedamdesetih godina prošlog stoljeća, nastaju dupleks čelici druge generacije, otporni na rupičastu koroziju i manje osjetljivi na feritizaciju ZUT-a [3].

Svi današnji, moderni dupleks čelici mogu se podijeliti u četiri grupe [3]:

1. Fe-23Cr-4Ni-0,1N ili dupleks čelici bez Mo
2. Fe-22Cr-5,5Ni-3Mo-0,15N ili dupleks čelici s 22% Cr
3. Fe-25Cr-5Ni-2,5Mo-0,17N-Cu ili dupleks čelici s 25% Cr
4. Fe-25Cr-7Ni-3,5Mo-0,25N-W-Cu ili super dupleks čelici s 25% Cr

Navedena podjela napravljena je na osnovi postojanosti dupleks čelika na rupičastu koroziju tj. prema vrijednosti djelotvorne sume PRE (engl. Pitting Resistance Equivalent), što se izračunava prema izrazu:

$$PRE = \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%N \quad (1)$$

Kemijski sastav dupleks čelika prve i druge generacije prikazan je u tablici 1. Razlika između dupleks i super dupleks čelika nije standardizirana. Super dupleks čelici sadrže oko 25% Cr, najmanje 3,5 % Mo i barem 0,2 % N, što im osigurava $PRE > 40$.

Tablica 1. Kemijski sastav dupleks čelika u % mase [3]

Legura	UNS broj	EN	C	Cr	Ni	Mo	N	Cu	W
<u>Dupleks čelici prve generacije</u>									
329	S32900	1.4460	0,08	23,0-28,0	2,5-5,0	1,0-2,0		-	-
3RE60	S31500	1.4417	0,030	18,0-19,0	4,3-5,2	2,5-3,0	0,05-0,1	-	-
Uranus 50	S32404		0,04	20,5-22,5	5,5-8,5	2,0-3,0	-	1,00-2,00	-
<u>Dupleks čelici druge generacije</u>									
Fe-23Cr-4Ni-0.1N									
2304	S32304	1.4362	0,030	21,5-24,5	3,0-5,5	1,05-0,6	0,05-0,20	-	-
Fe-22Cr-5.5Ni-3Mo-0.15N									
2205	S31803	1.4462	0,030	21,0-23,0	4,5-6,5	2,5-3,5	0,08-0,20	-	-
2205	S32205	1.4462	0,030	22,0-23,0	4,5-6,5	3,0-3,5	0,14-0,20	-	-
Fe-25Cr-5Ni-2.5Mo-0.17N-Cu									
DP-3	S31260		0,030	24,0-26,0	5,5-7,5	5,5-7,5	0,10-0,30	0,20-0,80	0,10-0,50
UR 52N+	S32520	1.4507	0,030	24,0-26,0	5,5-8,0	3,0-5,0	0,20-0,35	0,50-3,00	-
255	S32550	1.4507	0,04	24,0-27,0	4,5-6,5	2,9-3,9	0,10-0,25	1,50-2,50	-
Fe-25Cr-7Ni-3.5Mo-0.25N-Cu-W									
DP-3W	S39274		0,03	24,0-26,0	6,8-8,0	2,5-3,5	0,24-0,32	0,20-0,80	1,50-2,50
2507	S32750	1.4410	0,030	24,0-26,0	6,0-8,0	3,0-5,0	0,24-0,32	0,50	-
Zeron 100	S32760	1.4501	0,030	24,0-26,0	6,0-8,0	3,0-4,0	0,20-0,30	0,50-1,00	0,50-1,00

2.2. Mikrostruktura dupleks čelika

Dvofazna struktura u realnim dupleks čelicima razlikuje se od idealne dupleks strukture, i premda sličnu dupleks strukturu imaju još neki čelici, naziv "dupleks čelici" (engl. Duplex Stainless Steel, njem. nichtrostende Duplex-Stähle) odnosi se samo na visokolegirane nehrđajuće feritno-austenitne čelike [3].

Odlučujući utjecaj na mikrostrukturu dupleks čelika ima kemijski sastav legure i režim toplinske obrade.

Osnovni legirni elementi dupleks čelika su krom i nikal, a vrlo važnu ulogu u formiranju strukture imaju još i dušik, molibden, bakar, silicij i volfram. Međusobni utjecaj legirnih elemenata je vrlo složen, pa se, zbog postizanja izbalansiranog odnosa između ferita i austenita, mora paziti na količinu svakog elementa. Količina pojedinih legirnih elemenata direktno utječe na formiranje nepoželjnih intermetalnih faza na povišenoj temperaturi. Tako kod dupleks čelika s visokim udjelom kroma i molibdena relativno brzo dolazi do izlučivanja sigma i chi (ili ksi) faze, dok dodatak dušika smanjuje mogućnost formiranja ovih faza [3].

1. Krom

Sadržaj kroma u dupleks čelicima iznosi između 22 % i 26 %. Minimalna količina kroma dovoljna da spriječi atmosfersku koroziju čelika stvaranjem stabilnog pasivnog filma na površini iznosi oko 11 %. Krom je alfa-geni legirni element što znači da se dodavanjem kroma stabilizira feritna, prostorno centrirana kubična struktura. Porastom sadržaja kroma raste otpornost na koroziju. Krom također povišuje otpornost prema oksidaciji na povišenim temperaturama. Ako je sadržaj kroma viši, potrebno je više nikla radi formiranja željene dupleks strukture. Povećanjem sadržaja kroma povećava se i sklonost precipitiranju štetnih intermetalnih faza [3].

2. Nikal

Dupleks čelici sadrže između 4 % i 7 % nikla. Nikal stabilizira austenitnu, plošno centriranu kubičnu kristalnu strukturu koja je zaslužna za vrlo dobar udarni rad loma dupleks čelika. Dodavanjem nikla smanjuje se izlučivanje nepoželjnih intermetalnih faza [3].

3. Dušik

Dodavanjem dušika značajno se smanjuje formiranje intermetalnih faza na povišenim temperaturama. Dušik je jaki gama-geni element i zajedno s niklom osigurava dovoljnu količinu austenita u strukturi dupleks čelika što je posebno važno kod zavarivanja ovih čelika.

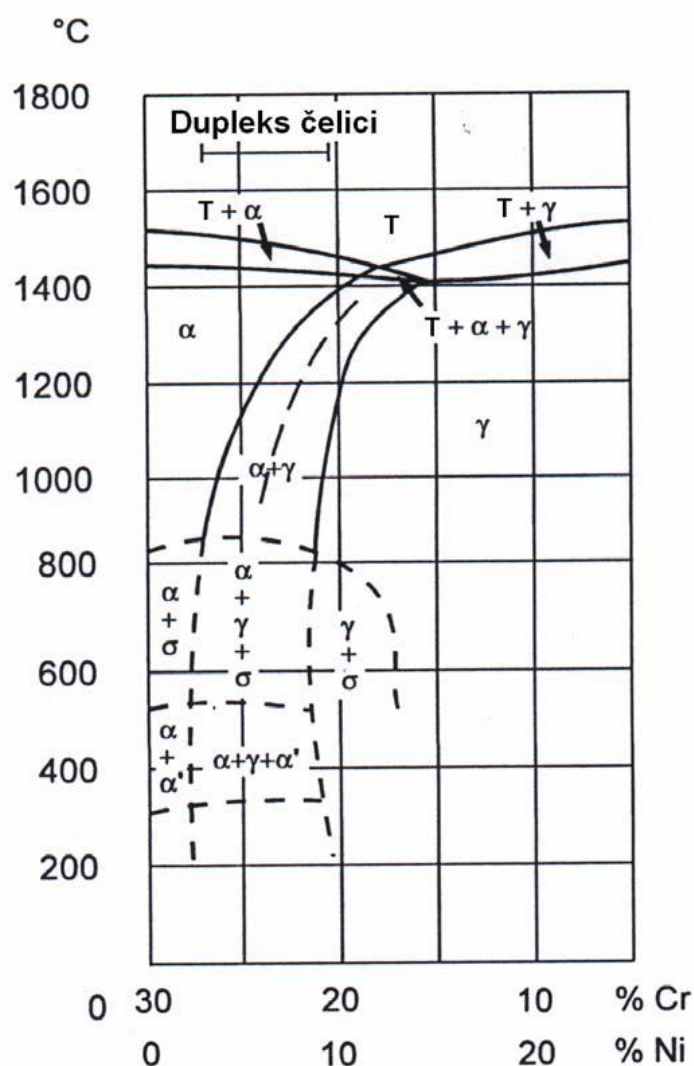
Kod dupleks čelika s visokim sadržajem kroma i molibdena dušik sprječava nastanak nepoželjne sigma faze. Dušik bitno povisuje čvrstoću, otpornost na rupičastu i koroziju u procijepu [3].

4. Molibden

Dupleks čelici sadrže do 4 % molibdena. Molibden je alfageni element kao i krom i skupa s kromom djeluje u smislu poboljšanja otpornosti dupleks čelika na koroziju uzrokovanu kloridima. Povećanjem sadržaja molibdena raste opasnost od izlučivanja nepoželjnih intermetalnih faza [3].

5. **Bakar, volfram i silicij** dodaju se dupleks čelicima zbog poboljšanja otpornosti na rupičastu koroziju te koroziju u procijepu [3].

Formiranje feritno-austenitne strukture u dupleks čelicima može se pratiti u pseudobinarnom dijagramu stanja za trojni sustav Fe-Cr-Ni, slika 6. Dupleks čelici primarno kristaliziraju u stopostotni ferit. Odvođenjem topline i hlađenjem ferita stvara se po granicama feritnih zrna austenit. Daljnjim hlađenjem austenitna zrna rastu, prvo po granicama, a onda i po određenim kristalografskim ravninama unutar feritnog zrna. Pri procesu transformacije ferita u austenit, legirni elementi koji stabiliziraju austenit (ugljik, nikal, dušik i bakar) difundiraju u austenit, a legirni elementi koji podržavaju ferit (krom, molibden i volfram) otapaju se u feritu. Količina austenita ovisi o brzini ohlađivanja ferita, vrsti i udjelu legirnih elemenata te o brzini difuzije svakog pojedinog legirnog elementa. Optimalna fazna ravnoteža kod dupleks čelika postiže se pri podjednakim volumnim udjelima ferita i austenita. Zato se za određeni kemijski sastav brzina ohlađivanja podešava tako da u temperaturnom intervalu između 1050°C i 1150°C u strukturi ima 50 % ferita i 50 % austenita. Dalje se hlađenje nastavlja gašenjem u vodi što osigurava zadržavanje postignutog faznog omjera i na sobnoj temperaturi [3].

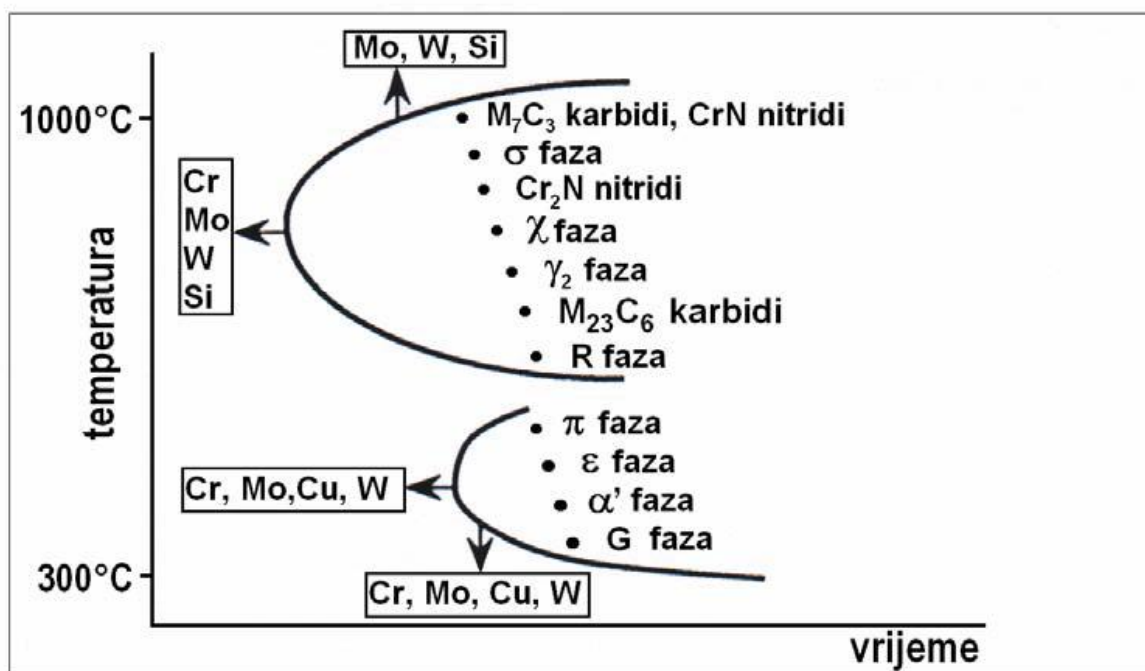


Slika 6. Pseudobinarni dijagram sranja Cr-Ni-Fe uz 70% Fe=const [3]

Osim postizanja uravnoteženog faznog omjera, gašenjem se sprečava stvaranje štetnih precipitata: karbida, nitrida, sigma faze, Chi faze, Lavesove faze, α' -faze i još nekih. Izlučivanje ovih faza uzrokuje snižavanje udarnog rada loma i korozijske postojanosti. Opasnost od nastanka nepoželjnih faza povećava se povećanjem udjela legirnih elemenata, pa je posebno izražena kod super duplex čelika (DSS) [3].

Sve nepoželjne strukturne tvorevine (izlučevine ili precipitati) mogu se, prema temperaturi na kojoj nastaju, svrstati u dva temperaturna područja, slika 7. Na temperaturi između 600 °C i 1300 °C nastaju karbidi ($M_{23}C_6$, M_7C_3), nitridi (CrN , Cr_2N), sigma faza (σ), Chi faza (χ), Lavesova faza (η), R-faza (Fe_2Mo) te sekundarni austenit (γ_2). U temperaturnom intervalu između 300 °C i 550 °C dolazi do izlučivanja π -faze, bakrom bogate ϵ -faze, G-faze te

najvažnije u ovom području, α' -faze. Na slici je strelicama naznačeno kako pojedini legirni elementi djeluju na kinetiku nastanka nabrojanih faza [3].

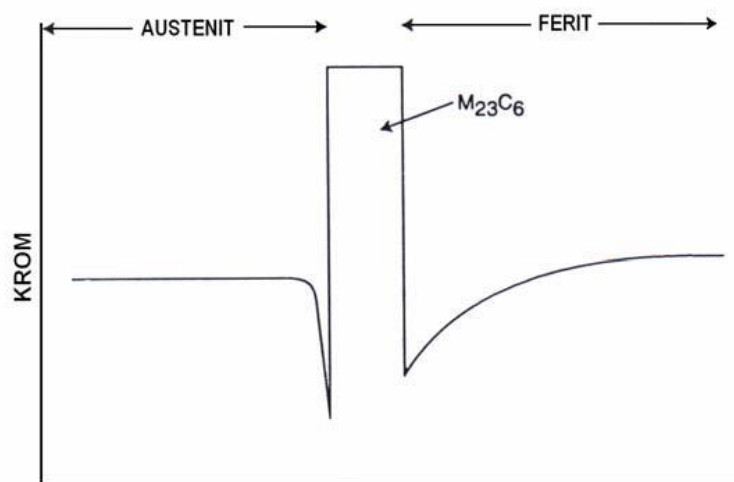


Slika 7. Shematski prikaz tipičnih precipitacija u dupleks čelicima [3]

Karbidi

Noviji tipovi dupleks čelika imaju sniženi udio ugljika, pa je izlučivanje karbida, često zvano senzibilizacija, kod njih svedeno na najmanju moguću mjeru. Ako se ipak dogodi, izlučeni karbidi su tipa $M_{23}C_6$, M_7C_3 , M_6C , i M_3C kao i monokarbidi tipa MC te karbonitridi tipa $M(C,N)$. Karbidi nastaju sporim ohlađivanjem ili zadržavanjem na temperaturi između 820 i 480°C. Najveći tehnički značaj ima karbid tipa $M_{23}C_6$ koji nastaje na granici između feritnog i austenitnog zrna. Nastankom kromom bogatih karbida, u okolini se smanjuje koncentracija kroma. Ovo osiromašenje je jače izraženo u feritu nego u austenitu. Na slici 8, shematski je prikazan profil koncentracije kroma preko karbida na feritno-austenitnoj granici. Područje osiromašeno kromom na strani austenitnog zrna je duboko i usko, a na strani feritnog zrna plitko i široko. Kako je difuzija kroma u feritu oko 100 puta brža nego u austenitu, karbid puno brže raste u feritno zrno. Obratnom difuzijom kroma brzo se eliminira osiromašenje uskog područja u austenitu. Iako je koncentracija kroma u feritu nastankom karbida smanjena, to smanjenje nije dovoljno da se izazove interkristalna korozija. Ako se karbidi izluče na kristalnim granicama austenit-austenit, vjerojatnost nastanka interkristalne korozije je znatno veća [3].

Karbidi tipa M_7C_3 rijetko se izlučuju zbog niskog udjela ugljika u modernim dupleks čelicima. Ako ipak nastanu onda su mjesta nastanka nukleusa drugih faza, npr. sigma faze [3].



Slika 8. Shema rasporeda kroma preko karbida $M_{23}C_6$ na granici ferit-austenit [3]

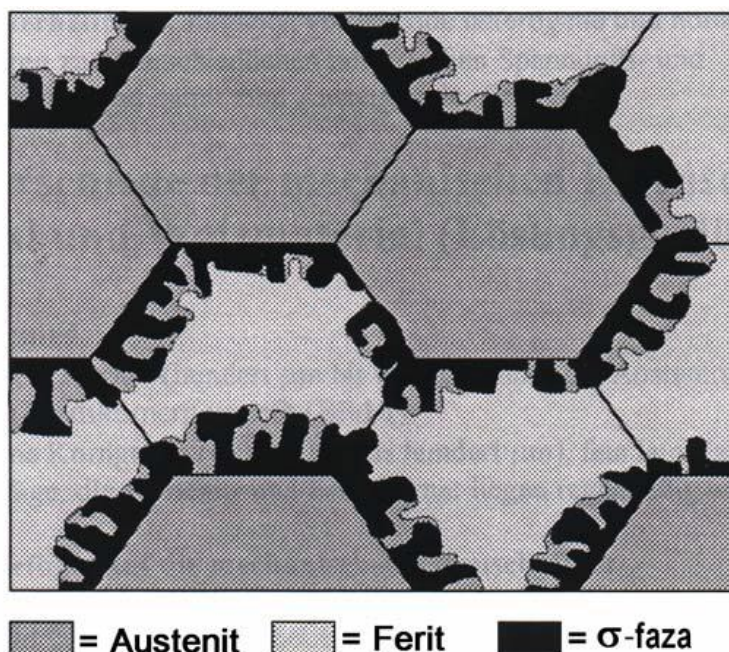
Nitridi

Nitrid Cr_2N precipitira u krupnim feritnim zrnima naglim hlađenjem s temperature od oko 1200 °C. Nastaje zbog prezasićenja feritne faze dušikom. Uzrokuje smanjenje udarnog rada loma i otpornosti na rupičastu koroziju.

Nitrid CrN se također formira u feritu, ali nema gotovo nikakav utjecaj na svojstva [3].

Sigma faza

σ -faza je kromom bogata, tvrda i krhka, nemagnetična intermetalna faza koja nastaje zadržavanjem dupleks čelika na temperaturi između 560 °C i 980 °C. Sklonost nastanku σ -faze raste s povećanjem sadržaja kroma i molibdena, pri čemu molibden ima 4 do 5 puta veći utjecaj od kroma. I svi drugi α -geni elementi potiču stvaranje sigma faze. Sigma faza nastaje eutektoidnom pretvorbom ferita, ferit prekrystalizira u sigma fazu i austenit, ($\alpha \rightarrow \sigma + \gamma$). Sigma faza primarno se formira na faznim granicama ferit/austenit i odatle se dalje širi u ferit. Model nastanka i rasta sigma faze prikazan je na slici 9 [3].



Slika 9. Model nastanka i rasta sigma faze [3]

Sigma faza ima tetragonalnu, prostorno centriranu kristalnu strukturu s približnim omjerom parametara $c/a = 0,52$. Parametri kristalne rešetke izraženi u nanometrima iznose [3]:

$$a = 0,87 - 0,92 \quad (2)$$

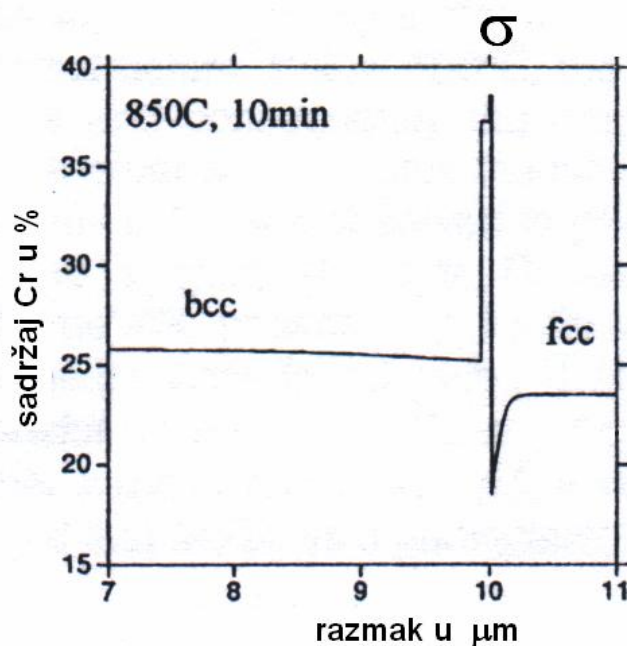
$$c = 0,4544 - 0,48 \quad (3)$$

Pripadni broj atoma (broj atoma po jediničnoj ćeliji) je 30 do 32.

Kemijski sastav sigma faze najčešće je FeCr, ali može biti i nešto drukčiji, ovisno o kemijskom sastavu legure u kojoj nastaje. Može se prikazati na sljedeći način [3]:



Na slici 10 vidi se kako nastanak σ -faze osiromašuje feritno i austenitno zrno s kromom. Precipitacija σ -faze izazvana je žarenjem dupleks čelika s 22 % Cr na 850 °C u trajanju od 10 minuta. Područje osiromašenja na strani austenitnog zrna je usko i duboko a na strani feritnog zrna plitko i široko [3].



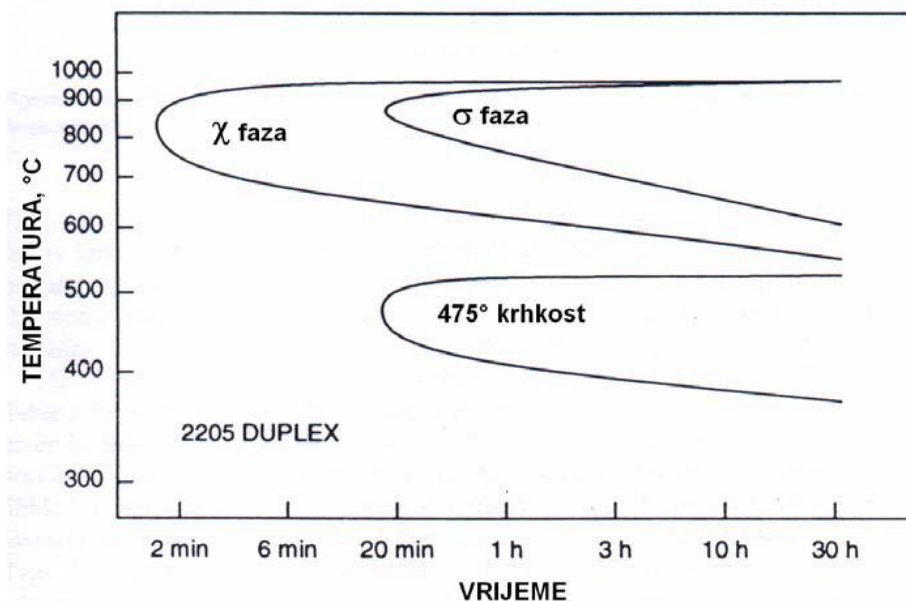
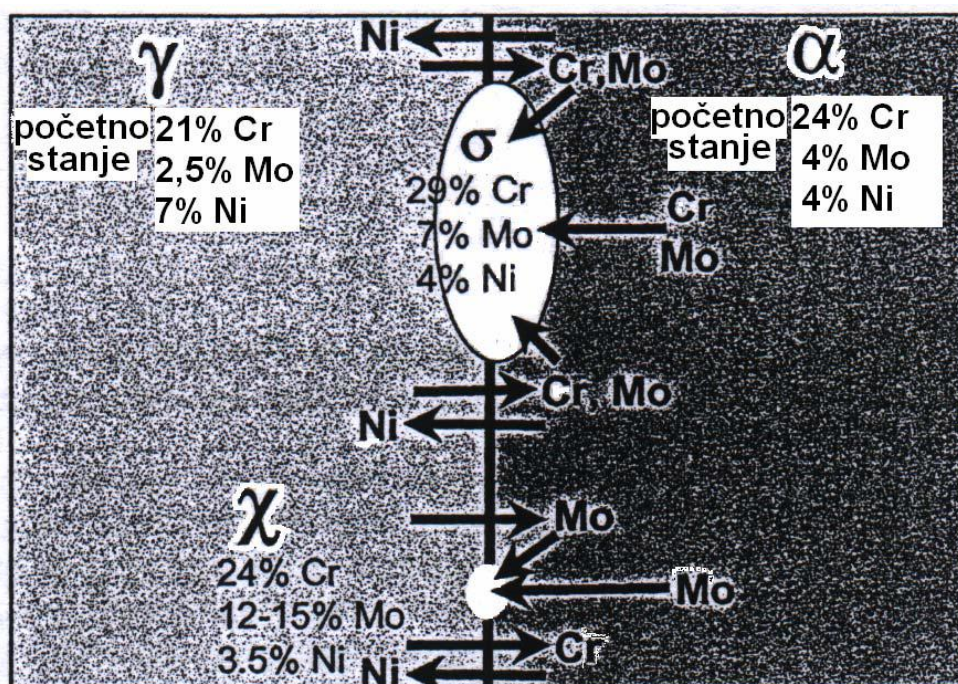
Slika 10. Udio kroma preko σ -faze na granici ferit-austenit [3]

Tvrdoća sigma faze je oko 940 HV (68 HRC). Već vrlo male količine izlučene σ -faze značajno utječu na pad udarnog rada loma i istezljivosti. Prema Pohlu i drugima, prisutnost sigma faze može povisiti makrotvrdoću dupleks čelika do 450 HV50, [3].

Korozijska postojanost dupleks čelika značajno se smanjuje nastankom sigma faze.

Chi faza

χ -faza je kompleksna, kubična, Fe-Ni-Cr-Mo intermetalna faza, koja može nastati na temperaturama između 730 °C i 1010 °C, (prema nekim izvorima između 700 °C i 900°C, ovisno o sastavu legure), samo ako u čeliku ima molibdena. Nominalni sastav χ -faze je najčešće 20 % - 28% Cr, 3 % - 5,5 % Ni, 9 % - 22% Mo u čelicima bez volframa. U dupleks čelicima s volframom χ -faza sadrži uz Cr i Ni još i 4% - 17% Mo i 3 % - 16 % W. Negativno djeluje na udarni rad loma. Na slici 11 prikazano je vrijeme inkubacije za σ - i χ -fazu ovisno o temperaturi za standardni dupleks čelik 1.4462, a na slici 12 nalazi se shematski prikaz difuzije kroma, molibdena i nikla pri σ i χ precipitaciji na faznoj granici između ferita i austenita. χ -faza nastaje brže i često predstavlja nukleus nastanka σ -faze u koju se potpuno pretvara duljim zadržavanjem na povišenim temperaturama [3].

Slika 11. TTT-dijagram nastanka σ - i χ -faze za čelik 1.4462 [3]Slika 12. Shematski prikaz difuzije kroma, molibdena i nikla pri σ i χ precipitaciji [3] **α' -faza**

α' -faza je precipitat koji nastaje u Fe-Cr legurama s 13 % do 90 % Cr, kada se duže vrijeme nalaze u temperaturnom području između 400 °C i 520 °C (prema [5] između 350 i 525°C). α' - faza ima istu kristalnu strukturu (BCC rešetka) kao α -faza uz neznatno veći parametar rešetke:

α' -faza: $a = 0,289 \text{ nm}$

α -faza: $a = 0,286 \text{ nm}$

Unatoč istoj kristalnoj strukturi α' i α faza imaju potpuno različit kemijski sastav. α' -faza je bogata kromom (sadrži oko 80 % Cr) a α -faza je bogata željezom. α' -faza je nemagnetična i ekstremno sitna, promjera oko 15 nm do 30 nm. Zbog toga se vrlo teško detektira optičkim mikroskopom. Sitni precipitati α' -faze u mikrostrukturi se mogu uočiti kao nešto šire granice i tamnija unutrašnjost feritnog zrna. Pojava ove faze izaziva povećanje tvrdoće feritne faze koje se može registrirati mjerenjem mikrotvrdoće i nanotvrdoće. Također se povisuje vlačna čvrstoća, a drastično padaju udarni rad loma, istezljivost i korozijska postojanost. Pad žilavosti i istezljivosti najjače je izražen grijanjem na oko 475 °C pa se ova pojava naziva "krhkost 475°C".

Količina α' -faze raste s povećanjem sadržaja kroma. Na isti način djeluje molibden, vanadij, titan i niobij. Na povećanje *krhkosti* 475°C utječe i povećanje ugljika te dušika.

Pojava *krhkosti* 475°C je reverzibilna. α' -faza može biti otopljena, a dobra svojstva čelika vraćena žarenjem na temperaturi iznad 675°C, [3].

Sekundarni austenit

γ_2 se formira na temperaturi između 700 °C i 900°C. Sadrži manje N, Cr, i Mo 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 [3].

π -faza, ε -faza, G-faza, Lavesova faza (η) i R-faza (Fe_2Mo) su još neke štetne i nepoželjne faze koje mogu nastati u dupleks čelicima.

Sve štetne faze i precipitate koji su na bilo koji način nastali u dupleks čelicima moguće je otopiti zagrijavanjem na temperaturi između 1250 °C i 1400°C, ovisno o sastavu dupleks čelika.

Homogenizacijskim žarenjem pri temperaturama od 1050 °C do 1100 °C i naglim gašenjem uklanja se većina neželjenih izlučevina, ali ovu toplinsku obradbu nije uvijek moguće provesti [3].

2.3. Svojstva dupleks čelika

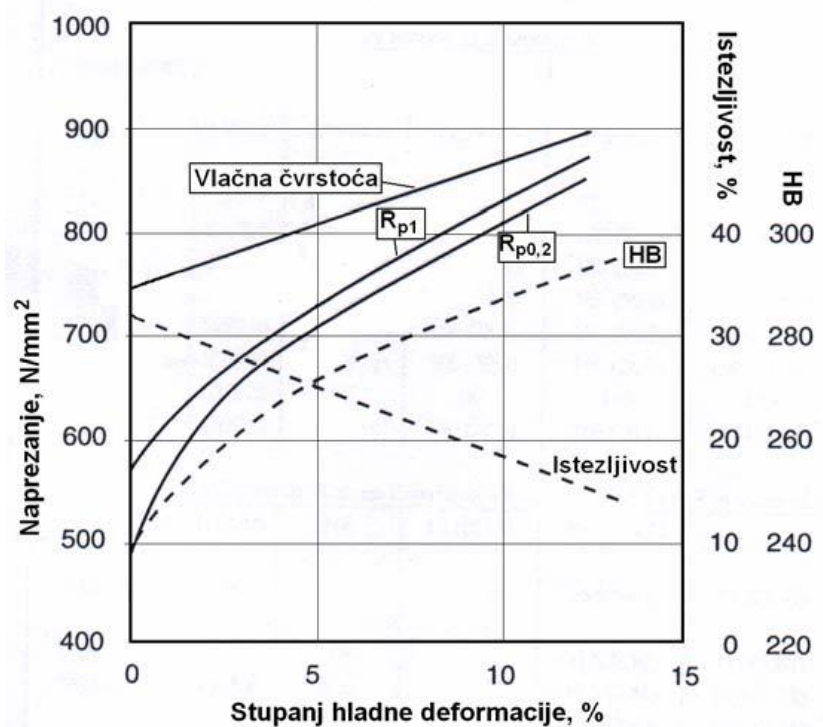
Dupleks čelici posjeduju visoku čvrstoću i unatoč tomu, dobru istezljivost i dobar udarni rad loma. Prijelaz iz žilavog u krhko područje vrlo je postupan, a dobru vrijednost udarnog rada loma zadržavaju do - 40 °C.

2.3.1. Mehanička svojstva

Dupleks čelici posjeduju izvanredna mehanička svojstva. Na sobnoj temperaturi imaju više od dva puta višu granicu tečenja od austenitnih čelika. Također posjeduju visoku čvrstoću i unatoč tomu, dobru istezljivost i dobar udarni rad loma. Prijelaz iz žilavog u krhko područje kod dupleks čelika je vrlo postupan, a dobru vrijednost udarnog rada loma zadržavaju na temperaturama čak do -40 °C. Mehanička svojstva dupleks čelika su anizotropna, tj. ovisna su o orijentaciji mikrostrukture. Vlačna čvrstoća je viša u smjeru okomitom na smjer valjanja nego u smjeru valjanja. Udarni rad loma je viši ako epruveta pri ispitivanju puca u smjeru okomitom na smjer valjanja nego u smjeru valjanja.

Značajan utjecaj na mehanička svojstva ima i završna toplinska obradba tj. temperatura gašenja dupleks čelika, prvenstveno zbog promjene omjera ferit/austenit, ali i zbog moguće nazočnosti zaostalih (neotopljenih) izlučevina. Zbog opasnosti od pojave *krhkosti* 475 °C u feritnoj fazi, dupleks čelici se ne primjenjuju iznad 315 °C, prema ASME (American Society of Mechanical Engineers) kodeksu. Njemački kodeks TÜV (Technischer Überwachungs-Verein) propisuje još niže maksimalne temperature primjene i pravi razliku između zavarenih konstrukcija i konstrukcija u kojima nema zavarenih spojeva.

Mehanička svojstva dupleks čelika vrlo su osjetljiva na stupanj ugnječenja pri hladnoj deformaciji. Na slici 13 prikazana je ovisnost mehaničkih svojstava o iznosu hladne deformacije [3].



Slika 13. Promjena mehaničkih svojstava čelika 1.4462 [3]

Za mehanička svojstva dupleks čelika općenito vrijedi sljedeće:

- tvrdoća dupleks čelika kreće se u rasponu od 250 HV do 350 HV.
- mikrotvrdoća: austenita $\sim 300 \text{ HV}_{0,02}$, ferita od $300 \text{ HV}_{0,002}$ do $550 \text{ HV}_{0,002}$
- vlačna čvrstoća, R_m : 700 N/mm^2 - 1100 N/mm^2
- konvencionalna granica razvlačenja, $R_{p0,2}$: 500 N/mm^2 - 800 N/mm^2
- udarna radnja loma, KV: do 170 J

Tablica 2. Mehanička svojstva nehrđajućih dupleks čelika [6]

Oznake materijala		R_m N/mm^2	R_e N/mm^2	A %
X3CrNiMoN27-5-2	1.4460	620	485	15
X2CrNiN23-4	1.4362	600	400	25
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	620	450	25
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	620	450	25
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	770	550	25
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	760	550	15
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	795	550	15
X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	750	550	25

2.3.2. Korozijska postojanost

Dupleks čelici posjeduju izvanrednu korozijsku postojanost što u kombinaciji s dobrim mehaničkim svojstvima predstavlja njihovu glavnu komparativnu prednost pred drugim nehrđajućim čelicima.

Postojanost dupleks čelika prema rupičastoj koroziji (pittingu) je jako dobra zahvaljujući prvenstveno visokom udjelu kroma, molibdena i dušika. Mikrostrukturne promjene koje mogu nastati na povišenoj temperaturi, npr. pri zavarivanju, nepovoljno djeluju na otpornost prema rupičastoj koroziji. Osobito nepovoljan utjecaj ima sigma faza te kromovi nitridi (Cr_2N) koji se izlučuju u krupnim feritnim zrnima u ZUT-u. Narušavanje izbalansiranog omjera između ferita i austenita također nepovoljno utječe na otpornost prema rupičastoj koroziji, [3].

Za dupleks čelike je karakteristična i vrlo dobra otpornost prema napetosnoj koroziji u kloridnom okruženju. Zavarivanje ne utječe značajnije na smanjenje ove otpornosti ako udio ferita u zavaru ne padne ispod 25 %.

Dupleks čelici su potpuno otporni na senzibilizacijom izazvanu interkristalnu koroziju u gotovo svakom okruženju. Zbog vrlo niskog udjela ugljika ne dolazi do stvaranja kromovih karbida po granicama između feritnih i austenitnih zrna, a ako i nastanu, sniženje udjela kroma u njihovoj okolini nije toliko da izazove interkristalnu koroziju.

Ostale izlučevine, (sigma faza, χ -faza, sekundarni austenit, α' -faza i bakrom bogate faze), negativno utječu na otpornost prema interkristalnoj koroziji [3].

2.3.3. Otpornost na trošenje

Kada se govori o otpornosti na trošenje dupleks materijala, prvenstveno se misli na lijevove koji sadrže visoki udio kroma i ugljika i koji su znatno otporniji na trošenje od gnječenih dupleks legura. Udio ugljika u lijevovima je obično oko 1,5 % a udio kroma mora biti dostatno visok da omogući izbalansiranu dupleks strukturu, očuva korozijsku postojanost i povisi volumni udio kromovih karbida na više od 20 %. Kromovi karbidi u strukturi dupleks legura nositelji su dobre otpornosti na abrazijski i druge mehanizme trošenja. Za poboljšanje otpornosti na trošenje dupleks čelicima se dodaju niobij, titan i volfram. Sljedeća tri tipa dupleks čelika su razvijena s namjerom da se poboljša otpornost na trošenje:

X 40 CrNi 27 4 (1.4340)

X 40 CrNiMo 27 5 (1.4464)

X 40 CrNiSi 27 4 (1.4823)

Dupleks čelici se često primjenjuju na mjestima gdje istodobno djeluju dva mehanizma trošenja materijala: erozija i korozija. Neki dupleks čelici su, u odnosu na austenitne, puno otporniji na ovakve uvjete, [3].

2.3.4. Fizička svojstva

Fizička svojstva dupleks čelika su po vrijednostima negdje na sredini između feritnih i austenitnih čelika.

Neka važnija fizička svojstva dupleks čelika dana su u tablici 3.

Tablica 3. Fizička svojstva dupleks čelika [3]

Legura	UNS broj	Gustoća g/cm ³	Specifični toplinski kapacitet J/kgK	Električna otpornost μΩm	Modul elastičnosti		
					20°C	100°C	200°C
329	S32900	7,70	460	0,80	200	195	185
3RE60	S31500	7,75	482	-	200	190	180
2304	S32304	7,75	482	0,80	200	190	180
2205	S31803	7,85	482	0,80	200	190	180
DP-3	S31260	7,80	502	-	200	-	-
UR 47N	S32750	7,85	480	0,80	205	194	181
Ferralium 255	S32550	7,81	488	0,84	210	200	198
DP-3W	S39274	7,80	502	-	200	-	-
Zeron 100	S32760	7,84	-	0,85	190	-	-
UR 52N+	S32520	7,85	450	0,85	205	185	185
2507	S32750	7,79	485	0,80	200	190	180

2.4. Primjena dupleks čelika

Vrlo povoljna svojstva dupleks čelika osiguravaju im široko područje upotrebe. Ipak otpornost na napetosnu koroziju u okruženju klorida njihova je najvažnije prednost. Primjenjuju se u industriji nafte i plina za izradu crpki, destilatora, desalinitizatora morske vode, lopatica miješalica, zasuna, ventila, cjevovoda, crpki za mulj itd. U petrokemijskoj industriji koriste se za izradu uređaja sinter-monomer, alata za izradu PVC-a, separatora polipropilena, cijevi izmjenjivača topline, cijevi dekompozera itd. Kod kemijsko-procesne industrije koriste se u proizvodnji masnih kiselina. U brodogradnji od njih se izrađuju propeleri, osovine, kormila, grijači napojne vode, klizni ležajevi itd. U industriji papira služe za izradu ventila digestora, usmjerivača ploče ciklona, cijevi regeneracijskih peći, a primjenu nalaze i u prehrambenoj industriji u transportu jestivih ulja, voćnih sokova, mlijeka itd. Dupleks čelik zbog poželjnih svojstava ima važnu ulogu i u gradnji mostova [7].

3. ZAVARIVANJE DUPLEKS ČELIKA

Zavarivanje dupleks čelika je dugo vremena predstavljalo dosta velik problem. Dupleks čelici prve generacije s niskim udjelom ili potpuno bez dušika, redovito su imali prevelik udio ferita u metalu zavora i zoni utjecaja topline. Zbog toga je zavareni spoj imao nisku korozijsku postojanost i nisku vrijednost udarnog rada loma. Da bi se postigla zadovoljavajuća svojstva metal zavora mora imati između 25 % i 60 % ferita. Povećanjem udjela nikla u dodatnom materijalu, riješen je problem prevelike feritizacije i loših svojstava u metalu zavora, ali je i dalje ostao prisutan u zoni utjecaja topline. Daljnjim razvojem dupleks čelika i uvođenjem dušika kao obveznog legirnog elementa, omogućeno je smanjenje feritizacije i poboljšanje mehaničkih i korozijskih svojstava i u ZUT-u [3].

L.van Nassau i drugi objavili su 1993. godine svoj rad pod naslovom "Zavarivanje dupleks i super dupleks nehrđajućih čelika – Priručnik za industriju", koji je predstavljao svojevrsnu prekretnicu i dao izvanredan doprinos razumijevanju i unapređenju procesa zavarivanja i kvalitete zavarenih spojeva dupleks čelika. Napredak u tehnologiji proizvodnje i prerade osnovnog materijala kao i napredak u tehnici zavarivanja je evidentan. Zbog svega navedenog, značajno je porasla potrošnja i primjena dupleks i super dupleks čelika, osobito čelika 1.4462 [3].

Danas se suvremeni dupleks čelici zavaruju bez poteškoća zahvaljujući boljem razumijevanju utjecaja različitih parametara na kvalitetu zavora.

Ovisno o situaciji i prilikama, za zavarivanje dupleks čelika mogu se primijeniti različiti zavarivački postupci:

- GTAW (engl. Gas Tungsten Arc Welding) ili TIG odnosno WIG
- SMAW (engl. Shielded Metal Arc Welding) ili MMA odnosno REL
- GMAW (engl. Gas Metal Arc Welding) ili MIG, MAG
- FCAW (engl. Flux Cored Arc Welding) ili zavarivanje praškom punjenom žicom
- SAW (engl. Submerged Arc Welding) ili EPP
- PAW (engl. Plasma Arc Welding) ili plazma zavarivanje
- LW (engl. Laser Welding) ili zavarivanje laserom

Dominantni postupci zavarivanja dupleks čelika su TIG i REL, ali i MIG se koristi sve češće [3].

– MIG postupci osiguravaju visoku produktivnost, visoku kvalitetu metala zavara i nisku emisiju para. Osobito su prikladni za dugačke zavare. Mogu biti automatizirani za zavare jednostavne geometrije.

–TIG postupak zavarivanja daje vrlo kvalitetan zavar s malom količinom uključaka i visokim iznosima udarnog rada loma (oko 200 J na -50 °C). Slaba točka ovog postupka je niska produktivnost. Prikladan je za ručno zavarivanje kraćih zavara, za reparaturno zavarivanje i za završne spojeve na konstrukcijama. Može se automatizirati kod izvođenja zavara jednostavnih oblika.

–REL zavarivanje vrlo je prikladno za sve položaje i za složene oblike zavara.

– FCAW ili zavarivanje praškom punjenom žicom jedan je od novijih postupaka zavarivanja razvijen specijalno za dupleks čelike. Dodatni materijal je praškom punjena žica. Prašak kojim je punjena žica i zaštitni plin čuvaju zavareni spoj od atmosferskog utjecaja. Ovaj postupak je vrlo ekonomičan i prikladan za zavarivanje materijala u širokom rasponu debljina. Oprema za zavarivanje je identična opremi za MIG zavarivanje.

– EPP postupak zavarivanja primjenjuje se vrlo efikasno kod debelih i dugih zavara masivnih konstrukcija, te kod zavarivanja debelih stijenki cjevovoda. Prikladan je samo za vodoravan položaj.

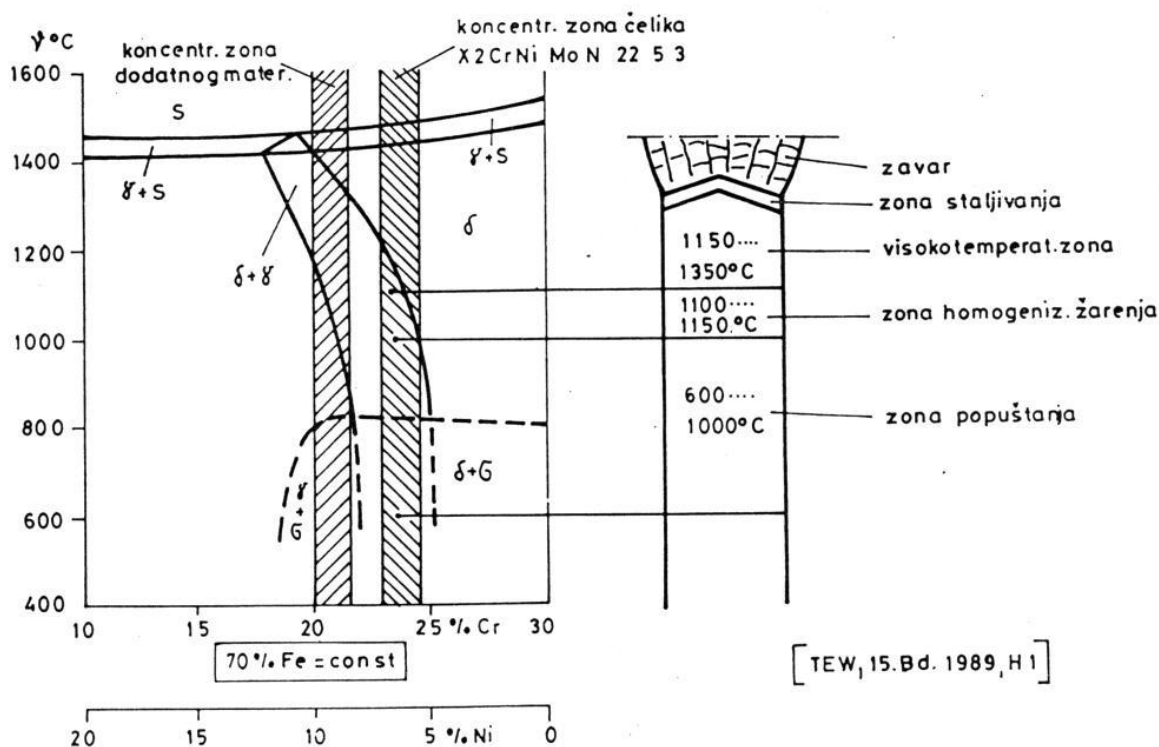
–plazma zavarivanje karakteriziraju vrlo velike brzine zavarivanja i potpuno mehaniziran postupak. Prikladno je za zavarivanje tanjih limova i zavarivanje korijena kod uzdužnog zavarivanja cijevi. Vrlo često se primjenjuje bez dodatnog materijala.

–zavarivanje laserom bez dodatnog materijala izaziva jaku feritizaciju i veliki rast zrna u metalu zavara, bez obzira na parametre zavarivanja [3].

Dupleks čelici se uspješno zavaruju s austenitnim nehrđajućim čelicima te s ugljičnim i niskolegiranim čelicima.

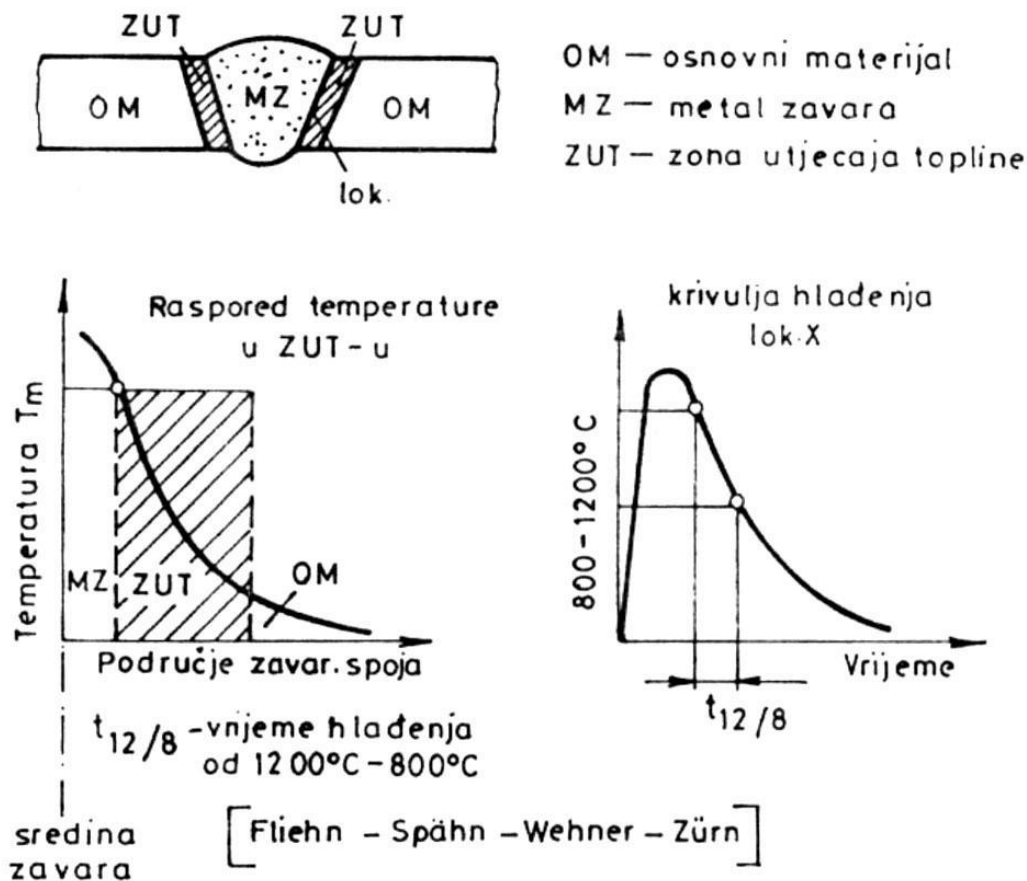
Zbog svoje dvofazne strukture, dupleks čelici su snižene strukturne stabilnosti, što naročito dolazi do izražaja pri zavarivanju. Posebno se ta nestabilnost odražava promjenom strukture, povećanjem omjera ferita prema austenitu u korist ferita. Svako zavarivanje uzrokuje feritizaciju u ZUT-u dupleks čelika.

Na slici 14 prikazan je dijagram stanja čelika dupleks, konstantnog udjela željeza (70%), a promjenjivih udjela kroma i nikla. Iz dijagrama slijedi da će u ZUT-u već iznad 1150 °C do 1200 °C nastupiti potpuna feritizacija.

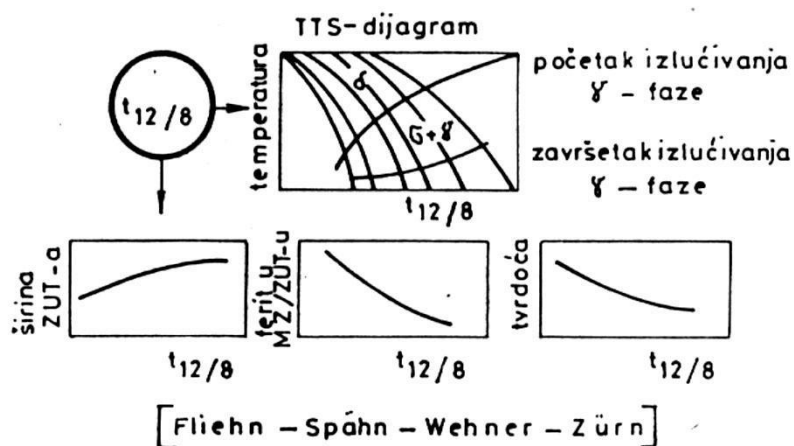


Slika 14. Strukturne promjene u zavaru i ZUT-u pri zavarivanju dupleks čelika [7]

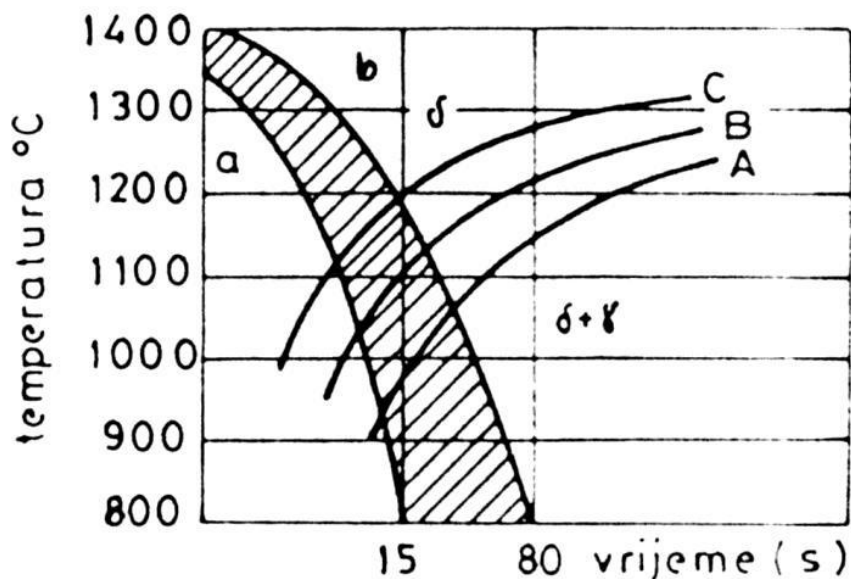
U temperaturnom intervalu od 800 °C do 1200 °C zbivaju se najvažnije strukturne promjene u zoni utjecaja topline. Kao posljedica temperaturnog šoka tijekom zavarivanja, u području linije staljivanja zavarenog spoja (metal zavora / zona utjecaja topline) razvijaju se pogrubljenja feritna zrna u zoni 50 μm do 1200 μm koja su obavijena austenitnom mrežicom. Širina tog područja se povećava s povećanjem unosa energije na što se izravno utječe uvjetima zavarivanja, te sa smanjenjem debljine osnovnog materijala odnosno manjim brzinama hlađenja. Slika 15. prikazuje zavareni spoj sa svojim karakterističnim područjima i kvalitativna krivulja hlađenja u području zavarenog spoja odnosno lokaliteta naznačenog u neposrednoj blizini linije miješanja, slika 15. prikazuje i utjecaj vremena $t_{12/8}$ na neka svojstva u području zavarenog spoja [7].



Slika 15. Krivulja hlađenja u području zavarenog spoja [7]

Slika 16. Prikaz vremena $t_{12/8}$ na neka svojstva u području zavarenog spoja [7]

U promjeni udjela feritne faze u području zavarenog spoja koji nastaje kao posljedica zavarivanja, osim navedenih utjecaja (postupak te parametri zavarivanja, debljina osnovnog materijala, broj slojeva zavora, toplinska obrada itd.) značajno utječe i kemijski sastav osnovnog odnosno dodatnog materijala, slika 17 i tablica 4.



Slika 17. Utjecaj kemijskog sastava i brzine ohlađivanja na sadržaj ferita u metalu zavara [7]

Tablica 4. Kemijsko sastav i brzine ohlađivanja [7]

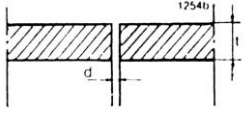
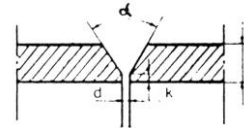
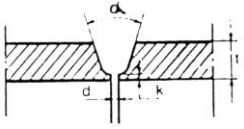
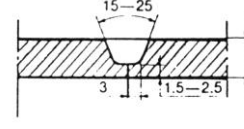
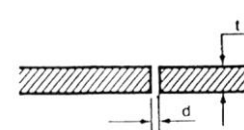
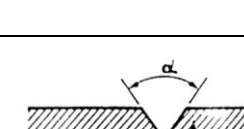
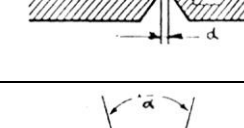
Metal zavara	Kemijski sastav				Sadržaj ferita pri sobnoj temp.	
	Cr	Mo	Ni	N	Krivulja hlađenja	Krivulja hlađenja
	%	%	%	%	«a» %	«b» %
A	22,5	3,0	5,5	0,05	95	85
B	22,5	3,0	5,5	0,15	80	70
C	22,5	3,0	5,5	0,15	45	40

Iz ranije navedenih činjenica zaključuje se kako je potrebno sporo i kontrolirano ohlađivanje feritizirane strukture. Vrlo je važno znati da će uslijed visokih temperatura, nakon feritizacije, doći do pogrubljenja zrna uslijed sporog ohlađivanja do mogućih pojava izlučivanja i posebno, stvaranja uvjeta za tzv. "krhkost 475 °C". Posljedice izlučivanja, odnosno i sve pojave krhkosti, mogu se dovoljno djelotvorno odstraniti gašenjem u postupku toplinske obrade nakon zavarivanja. S druge strane, jednom pogrubjelo zrno neće se moći više usitniti jer dupleks čelici, kao ni monofazni austenitni odnosno, feritni čelici, nisu podložni alotropskim modifikacijama te nema normalizacijskog učinka pri ohlađivanju s temperature homogenizacije.

Pri utvrđivanju potrebne temperature homogenizacije valja znati da se njezinim povišenjem sve više dušika gomila u preostalim austenitnim zrnima, pa ukoliko se dosegne granica topivosti, potrebno je računati s pojavom kromova nitrida Cr_2N na granicama ferit/ferit i ferit/austenit te unutar feritnih zrna. Ukoliko dođe do te pojave, snižava se udarni rad loma čelika. Pri reguliranom sporom ohlađivanju treba uzeti u obzir da će se austenit stvarati prvenstveno po granicama feritnih zrna te urastati u feritna zrna. Morfološki se pojava reaustenitizacije ne bi smjela kvalificirati kao strogo reverzibilna pojava. Stoga treba očekivati i određene negativne posljedice na udarni rad loma, kao i na otpornost na napetosnu i interkristalnu koroziju u zoni toplinskog utjecaja [7].

Visokolegirani dupleks čelici danas se uspješno zavaruju gotovo svim klasičnim postupcima zavarivanja, uz primjenu određenih tehnoloških zahtjeva, te odgovarajućih dodatnih materijala. Dakako, vrlo je važna i priprema spoja za zavarivanje. Glavni parametri pripreme prikazani su u tablici 5 za jednostrano i dvostrano zavarivanje različitim postupcima zavarivanja koji se uglavnom koriste pri izradi zavarenih konstrukcija [7].

Tablica 5. Načini pripreme spoja za zavarivanje, parametri te položaj zavarivanja za jednostrano i dvostrano zavarivanje [7]

Oblik spoja	t mm	d mm	k mm	α °	Postupak zavarivanja
	<3	0-3	-	-	REL TIG MIG
	3-15 2,5-8 3-10	2-4 2-3 2-3	0-2	50 60 60	REL TIG MIG
	12 < 6 8	1-3	2-3 1-2 2-3	30	REL TIG MIG
	> 8	Preporuča se zavarivanje korijena TIG postupkom bez dodatnog materijala dok se ostali spojevi mogu zavariti REL, TIG ili MIG postupkom			
	3-5 3-5 3-6 5-8	2-3 2-3 2-3 1-2	-	-	REL TIG MIG EP
	>10	2-3	0-3	50	REL MIG EP
	>25	1-3	1-3	10 15	REL MIG EP

Uzevši u obzir sve činjenice koje su navedene, za zavarivanje dupleks čelika potrebno je navesti slijedeće [8]:

- koristiti odgovarajuće dodatne materijale legirane sa dušikom i odgovarajućim sadržajem nikla
- obložene elektrode kao i praškove za zavarivanje potrebno je sušiti, minimalna temperatura 300 °C
- miješanje metala zavara i osnovnog materijala osigurati do maksimalno 30 %
- predgrijavanje se u pravilu ne preporučuje (kod debljina iznad 20 mm preporuča se 150 °C
- međuslojnu temperaturu držati do maksimalno 150 °C
- zavarivanje bez dodatnog materijala može izazvati porast sadržaja ferita i do 80 %, što dovodi do problema održavanja mehaničkih i antikorozivnih svojstava.

Iz svega navedenog može se zaključiti da je zavarivanje dupleks čelika specifično, eventualne pogreške nastale zavarivanjem, često nisu vidljive zavarivaču, a isto tako ne može ih se otkriti metodama ispitivanja bez razaranja. Prilikom zavarivanja dupleks čelika potrebno je voditi računa i o količini unesene topline koja se mora kretati u rasponu od 0,5 kJ/mm do 2,5 kJ/mm. Također, vrlo je važno praćenje međuslojne temperature koja se treba kretati između 150 °C - 200 °C. Dupleks čelik se ne smije zavarivati sa premalim unosom topline jer to može dovesti do prebrzog hlađenja i porasta ferita, dok kod prevelikog unosa topline i sporog hlađenja dolazi do pada sadržaja ferita. Sadržaj ferita mora se kretati između 20 % i 70 % i tada zavar ima dobra korozijska i mehanička svojstva. Ako je sadržaj ferita ispod 20 % javlja se rizik od smanjenja čvrstoće te smanjenja otpornosti na pukotine uslijed napetosne korozije, dok u slučaju kada je sadržaj ferita veći od 70 % javlja se rizik od smanjenja otpornosti na rupičastu (engl. pitting) koroziju te rizik od smanjenja vrijednosti udarnog rada loma. Navedenome treba još pridodati i veću tendenciju nehrđajućih čelika prema pojavi deformacija uslijed unosa topline prilikom zavarivanja nego što je to slučaj kod ugljičnog čelika [3].

Dodatni materijal je vrlo važan za postizanje dobre kvalitete zavarenog spoja dupleks čelika. Pravilno odabran dodatni materijal osigurava dovoljnu količinu austenita u metalu zavara tijekom hlađenja. Da bi se to postiglo u sastavu dodatnog materijala treba biti oko 9 % nikla. Ako dodatni materijal ima manje nikla (5,5 % - 7 % Ni), nakon zavarivanja je obvezna toplinska obradba. Zavarivanje bez dodatnog materijala ili smanjenje udjela nikla u metalu

zavara zbog prevelikog miješanja s osnovnim materijalom, može dovesti (zbog povećanja udjela ferita) do povećane krhkosti i smanjene kemijske postojanosti zavarenog spoja. Zanimljivo je da su dva tipa dodatnog materijala dovoljna za kvalitetno zavarivanje svih dupleks čelika:

- prvi je standardni dodatni materijal oznake 22 % Cr 9 % Ni 3 % Mo 0,15 % N, a koristi se pri zavarivanju grupe dupleks čelika s 23 % Cr bez Mo i grupe s 22 % Cr
- drugi standardni dodatni materijal ima oznaku 25 % Cr 9 % Ni 4 % Mo 0,25 % N, a koristi se kod zavarivanja grupe s 22% Cr i ostalih grupa dupleks čelika s većim sadržajem legiranih elemenata [3].

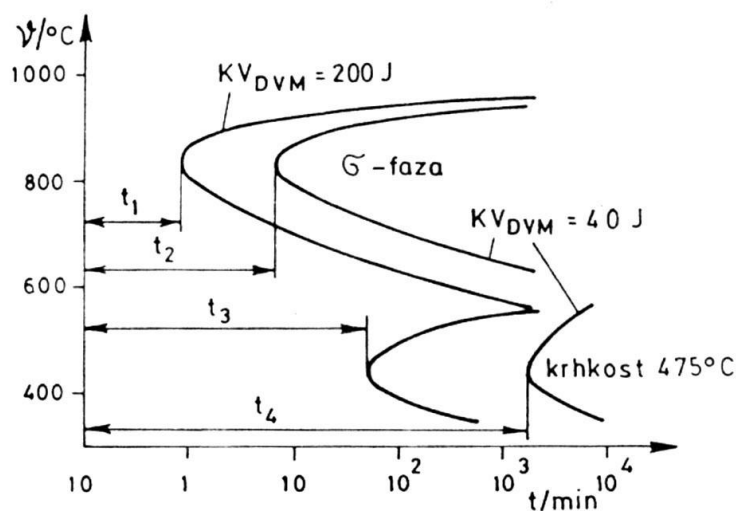
Zaštitni plin i pomoćni plin imaju veliku ulogu u prevenciji gubitka dušika u zavarenom spoju. Gubitak dušika uzrokuje gubitak korozijske postojanosti i udarnog rada loma. Najčešće se kao zaštitni plin koristi čisti argon ili mješavina argona i dušika. Vrlo često se argonu dodaje helij. Kod nekih postupaka zavarivanja korisno je dodati CO₂. Pomoćni plin je čisti argon ili čisti dušik ili mješavina ovih dvaju plinova. Utjecaj dušika u zaštitnom plinu na udio ferita u metalu zavara i ZUT-u istraživali su u svom radu F.Olivier i drugi. Došli su do zaključka da udio dušika u zaštitnom plinu nema utjecaja na udio ferita u ZUT-u, ali utječe na udio ferita u metalu zavara bez obzira na to radi li se o zavarivanju sa ili bez dodatnog materijala [3].

Predgrijavanje dupleks čelika uglavnom je nepotrebno. Treba ga primijeniti samo kod čelika s niskim udjelom nikla i malih debljina dijelova koji se zavaruju osobito ako je unos topline nizak, jer postoji opasnost od prebrzog hlađenja i visokog udjela ferita u zoni utjecaja topline. Za visokolegirane dupleks čelike predgrijavanje može biti izrazito nepoželjno jer može smanjiti korozijsku postojanost i mehanička svojstva [3].

Naknadna toplinska obradba provodi se samo kod zavarivanja s dodatnim materijalom u kojemu nema dovoljno nikla. Ako se pri zavarivanju koristi dodatni materijal s dovoljnom količinom nikla (~ 9 %), u metalu zavara i ZUT-u će se postići odgovarajuća količina austenita i ferita, a neželjeni uključci se neće pojaviti. Toplinska obradba se sastoji od zagrijavanja na temperaturu od 1050 °C - 1100 °C, zadržavanja na toj temperaturi kroz određeno vrijeme i naglog hlađenja. Grijanje i naglo hlađenje omogućit će podjednaku količinu austenita i ferita u mikrostrukturi zavara i spriječiti nastanak štetnih faza [3].

3.1. Pojava krhkosti dupleks čelika

Najčešće pojave krhkosti ove kategorije čelika su: krhkost uslijed sigma faze i tzv. "krhkost 475 °C", a svojstvene su i monofaznim feritnim čelicima. Iz toga slijedi logičan zaključak, da će se pojave krhkosti u dupleks čelicima trebati barem djelomično pripisati procesima u feritnoj fazi. Sve češća primjena čelika X2CrNiMoN 25 5 3 koncentrira i intezitet istraživanja upravo na taj čelik. Tako, na primjer, dijagram izotermičkih izlučivanja na slici 18 i tablica 6, pokazuju razmjerno kratka trajanja inkubacije izlučivanja različitih faza odnosno pojave "krhkosti 475 °C" (pri 800 °C svega blizu 2 min, a približno 15 min, pri 475°C). To svakako upozorava na potreban oprez pri ugrijavanju i hlađenju nakon zavarivanja ili toplinske obrade, a i u primjeni pri temperaturama iznad 350°C [7].



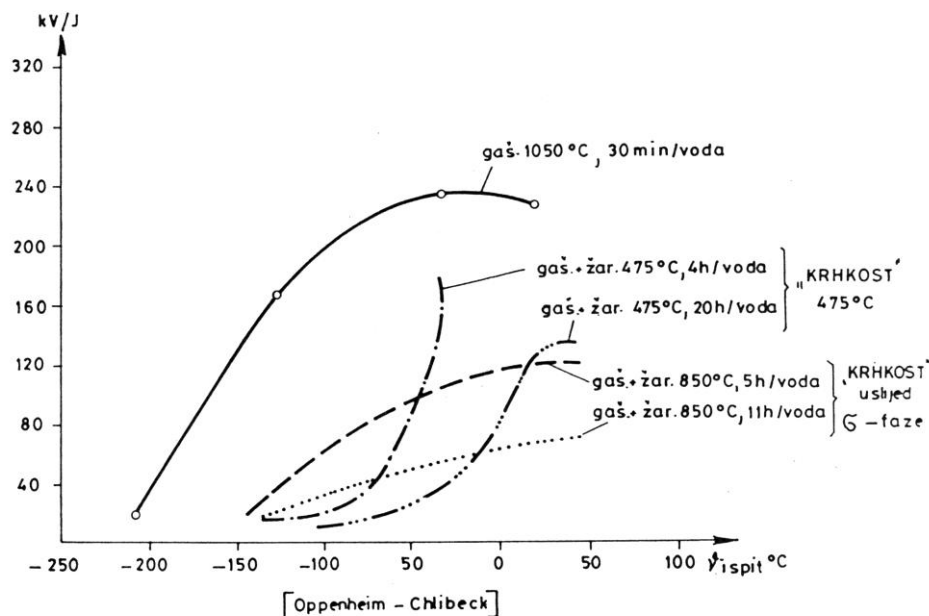
Slika 18. Izotermički dijagram izlučivanja u čeliku X2CrNiMoN 25 5 3 [7]

Tablica 6. Vremena trajanja inkubacije [7]

Čelik	t_1 , min	t_2 , min	t_3 , min	t_4 , min
X2CrNiTi 22 6	200	2000	10	500
X2CrNiMoTi 21 6 2	10	200	200	400
X2CrNiMoN 22 53	1	100	10	100

Također je vidljiv negativni utjecaj udjela molibdena na visokotemperaturnu krhkost, tj. činjenica da se u prisutnosti molibdena pojačava izlučivanje hi-faze ($\text{Fe}_{36}\text{Cr}_{12}\text{Mo}_{10}$), kromova nitrida (Cr_2N) i eventualno karbida M_{23}C_6 , što sve nakon duljih držanja prelazi u štetnu sigma-fazu (FeCr), koja snižava udarni rad loma čelika s 200 J na svega 30 J. No, pri gašenju limova debljine do 30 mm još ne dolazi do takvih pojava izlučivanja i krhkosti [7].

Učinci nastali precipitacijom kao i sami precipitati mogu se ukloniti homogenizacijom i gašenjem. Pri utvrđivanju režima homogeniziranja potrebno je uzeti u obzir težu topivost sigma faze, tj. potrebu produljenja trajanja držanja pri temperaturi homogenizacije, ali ne i njezinog povišenja. Na slici 19. prikazan je utjecaj izotermičkog držanja pri 475 °C odnosno 800 °C, praktički vrijedi za čelike: X2CrNiMoN 25 5 3, X2CrNiMoTi 21 6 , X2CrNiTi 22 6.

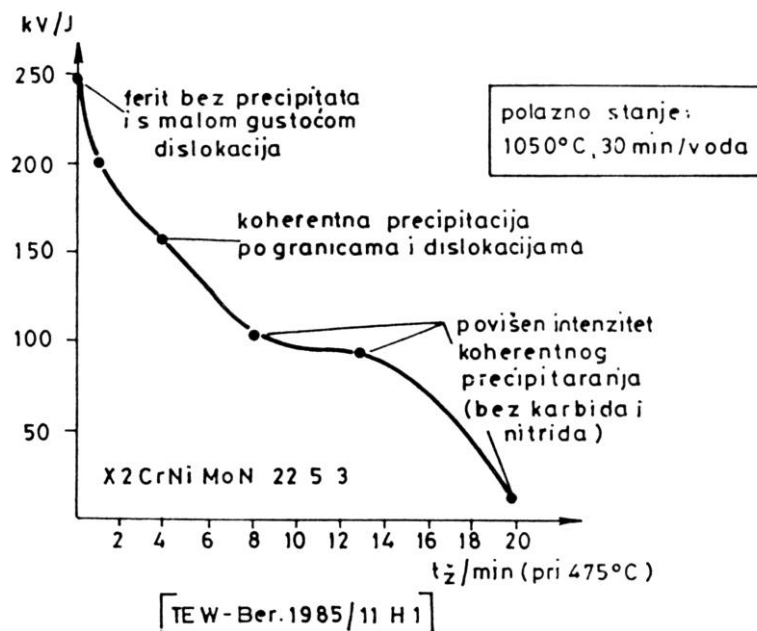


Slika 19. Utjecaj režima izotermičkog držanja i temperature ispitivanja na udarni rad loma [4]

Jasno se uočava, uz pad iznosa udarnog rada loma, još i pomak prijelazne temperature s približno -100 °C na temperaturu blizu 0 °C, pa i više.

Procesi pada udarnog rada loma nastupaju naročito nakon toplog oblikovanja predmeta većih dimenzija. Zbog razmjerno niske temperature završetka oblikovanja izostaje dinamička rekristalizacija te je i razgradnja napetosti nepotpuna. Sporo hlađenje u oba kritična temperaturna područja, uz postojanje napetosti, izazvat će još i pad udarnog rada loma, što može dovesti do pojave unutrašnjih pukotina. Te pojave valja ubrojiti među najozbiljnije nedostatke dupleks čelika [7].

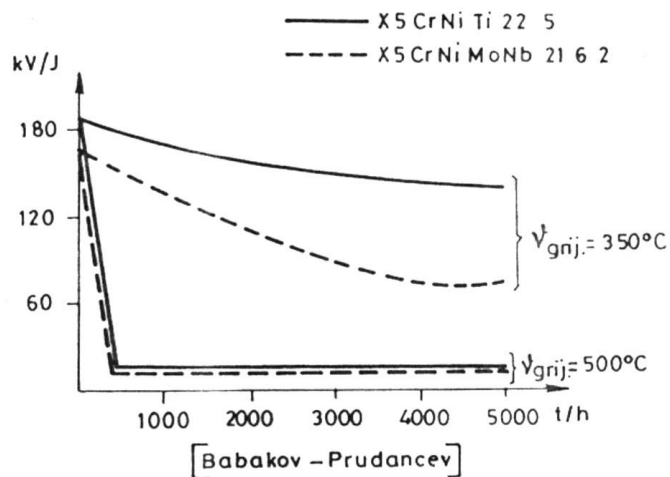
Ništa manje neugodan problem nije ni pojava tzv. "krhkosti 475 °C". Pojava te vrste krhkosti, ustvari i ograničenje temperature primjenjivosti dupleksa praktički na približno 320 °C (Slika 18). Drastični pad udarnog rada loma dvaju dupleks čelika prikazan je na slici 20.



Slika 20. Promjena udarnog rada loma zavisno o različitim temperaturama držanja [7]

Drugi dio problema "krhkosti $475^\circ C$ " je nepoznavanje točnog uzroka ovoj pojavi. Pretpostavlja se da uzrok valja tražiti također u nekim procesima precipitacije, no karakter i sastav tih hipotetičkih precipitata još nije identificiran.

Pokušaj kvantitativnog karakteriziranja precipitata po granicama zrna dupleks čelika X2CrNiMoN 22 5 3 prikazuje slika 21.



Slika 21. Ovisnost udarnog rada loma i trajanju izotermičkog držanja pri $475^\circ C$ [7]

Babakov i Prudancev iznose najprihvatljiviju hipotezu o uzrocima pojave "krhkosti $475^\circ C$ ": "Mikrorentgenska spektralna analiza uzoraka dupleks čelika pokazala je da se nakon grijanja uzoraka na $450^\circ C$ povećao parametar alfarešetke tek nakon držanja kroz $100 h$, dok je nakon

držanja od 1000 h došlo do daljnjeg jakog i vjerojatnog diskontinuiranog povećanja. Pri tom se parametar gama - rešetaka nije uopće promijenio."

Povećanje parametara rešetke ukazuje na pojavu starenja ferita, što bi moglo biti uzrokom pojave krhkosti. No, da li je pojava starenja rezultat samo povećanja parametara rešetke ili su pojavi pridonijeli i još nepotpuno identificirani precipitati, tek će se vjerojatno pokazati daljnjim istraživanjem monofaznih feritnih i feritno - austenitnih (dupleks) čelika [9].

3.2. Utjecaj hlađenja na mehanička svojstva

Tijekom i nakon zavarivanja dolazi do nekoliko transformacija kako u zavaru tako i u zoni utjecaja topline. Tablica 7. prikazuje austenitni volumni udio u zoni zavarivanja i u osnovnom metalu određen za različite načine hlađenja uzoraka (zrakom i vodom) [10].

Tablica 7. Volumni udio austenita u pojedinim zonama zavara i ZUT-a [10]

	Udio austenita u osnovnom materijalu, %	Udio austenita u djelomično zakaljenoj zoni, %	Udio austenita u pregrijanoj zoni, %	Udio austenita u zoni taljenja, %
Zrakom hlađeni zavareni spojevi	48,3 ± 3,7	37,2 ± 2	20,3 ± 1,3	53,3 ± 3
Vodom hlađeni zavareni spojevi		35,4 ± 1,7	20 ± 2	43,1 ± 1,6

Iz tablice je vidljivo da u zoni staljivanja volumni udio austenita pada s oko 53% za zrakom hlađeni uzorak, na oko 43% za uzorak hlađen vodom. Hlađenje pospješuje formiranje austenita, tijekom većeg perioda hlađenja dolazi do formiranja austenitnih zrna iz feritne faze. Isto tako dobiveni su različiti oblici zrna. Vodom hlađeni uzorci za posljedicu imaju veću duljinu zrna.

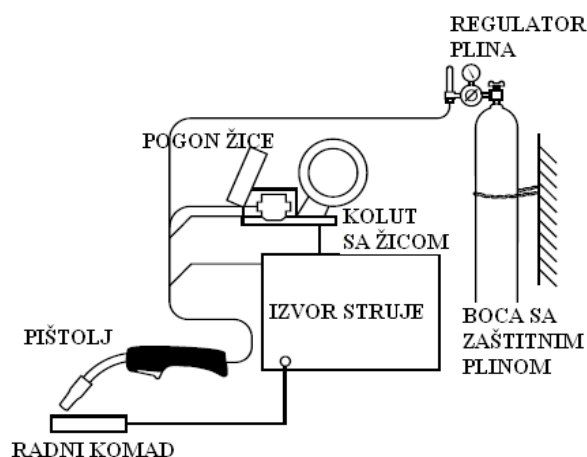
U pregrijanoj zoni, blizu linije taljenja, nalaze se temperaturni maksimumi koji su uzrok produljenja vremena hlađenja uzoraka. Posljedica produljenja vremena hlađenja jest rast feritnih zrna te dolazi do promjene odnosa austenit-ferit u korist ferita. Samo 20 % austenita je sačuvano u pregrijanoj zoni za oba načina hlađenja. Isto tako različiti načini hlađenja direktno utječu i na širinu ZUT-a, posebice pregrijane zone. Unutar djelomično zakaljane zone odnos ferita i austenita ovisi o temperaturi. Ta temperatura ne smije prelaziti 1300 °C u blizini pregrijane zone. U ovoj zoni dolazi do rasta feritnog zrna.

Sadržaj austenita iznosi oko 36 % dok sadržaj austenita u osnovnom metalu iznosi oko 49 % [10].

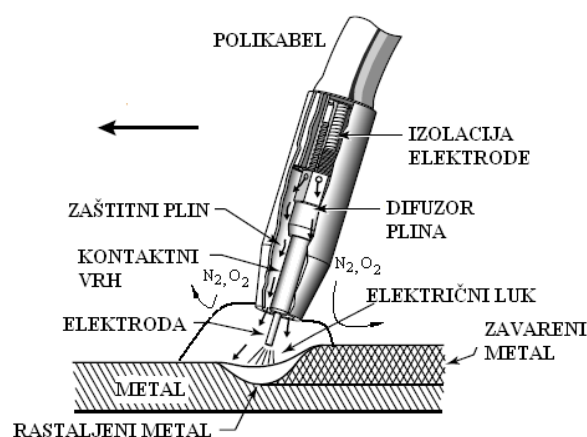
Velika brzina hlađenja duplex čelika povećava širinu feritne zone s 500 μm na 600 μm , koliko iznosi širina feritne zone kod duplex čelika hlađenog zrakom. Brzina hlađenja ima utjecaj i na tvrdoću zavarenog spoja, kao direktnu posljedicu različite strukture zavarenog spoja. Hlađenje vodom daje veću čvrstoću čeliku zbog većeg volumnog udjela ferita u zavarenom spoju. Vodom hlađeni zavareni spojevi imaju bolju postojanost na rupičastu koroziju i na napetosnu koroziju od zrakom hlađenih zavarenih spojeva. Ferit je osjetljiviji na rupičastu koroziju dok austenit veću slabost iskazuje prema napetosnoj koroziji. Zavarivanje u većoj mjeri utječe na rupičastu koroziju. Brzo vodeno hlađenje povećava udarni rad loma zavarenog spoja.

4. MAG ZAVARIVANJE

MAG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak (koristi se toplina električnog luka za taljenje osnovnog i dodatnog materijala) zavarivanja u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (CO_2) ili njegovih mješavina ($\text{CO}_2 + \text{Ar}$, $\text{O}_2 + \text{Ar}$, $\text{CO}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$). Opremu za MAG zavarivanje čine: izvor istosmjerne struje sa ravnom statičkom karakteristikom, polikabel, uređaj za hlađenje, mehanizam za dovod žice, boca sa zaštitnim plinom, pištolj za zavarivanje te regulator protoka zaštitnog plina. Slika 22. prikazuje opremu za MAG postupak zavarivanja, a slika 23. proces taljenja [11].



Slika 22. MAG zavarivanje [11]



Slika 23. Proces taljenja [11]

Zaštitni plin ima ulogu zaštite električnog luka i rastaljenog metala od utjecaja plinova iz atmosfere i ionizacijom osigurava vodljivi prostor za održavanje električnog luka. Zaštitni plin na mjesto zavarivanja dovodi se kroz posebnu sapnicu na pištolju koja se nalazi oko kontaktne cjevčice (Slika 23).

Električni luk uspostavlja se između elektrodne žice (spojene na „+“ pol izvora istosmjerne struje) i osnovnog materijala. Električni luk je usmjereno kretanje elektrona kroz ionizirani prostor između dviju elektroda termoemisijom i emisijom električnog polja za kojeg ne vrijedi Ohmov zakon te on mora biti konstantne duljine, a njegovo gibanje mora biti jednoliko da bi se ostvarila jednolika kvaliteta zavora. Taljenje dodatnog materijala i njegov prijenos u talinu praćen je pojavom sila, kao što su elektromagnetska i gravitacijska, sile od strujanja i eksplozije plinova, sile od pritiska plazme, te sila od površinske napetosti. Pogonski sistem dodaje žicu konstantnom brzinom kroz polikabel i pištolj u električni luk.

Kod MAG postupka zavarivanja najčešće se koriste žice promjera od 0,6 mm do 2,4 mm. Žice od čeličnih materijala su pobakrene ili poniklane radi boljeg električnog kontakta i zaštite od korozije. Osim punih žica koriste se i praškom punjene žice, a mogu se koristiti sa ili bez plinske zaštite (same sebi stvaraju zaštitnu atmosferu raspadanjem jezgre). Pune žice dobivaju se hladnim vučenjem, dok se punjene žice proizvode raznim načinima proizvodnje od kojih je najzastupljeniji od metalne trake (debljine do 0,5 mm) koja se savija po duljini i puni bazičnim ili rutilnim praškom. Zavarivanje žicom punog presjeka moguće je u svim položajima, dok se kod praškom punjene žice zavaruje u vodoravnom i okomitom položaju.

Ograničenje kod MAG postupka može biti pojava poroznosti, rasprskavanja i naljepljivanja uslijed neodgovarajuće tehnike rada i izbora parametara za zavarivanje. Na kvalitetu zavarenog spoja upravo ti parametri imaju velik utjecaj koji se biraju obzirom na vrstu i debljinu materijala, oblik spoja i položaj zavarivanja.

Parametri MAG postupka zavarivanja su:

- struja zavarivanja
- brzina zavarivanja
- duljina slobodnog kraja žice
- napon električnog luka
- induktivitet
- položaj zavarivanja

- tehnika zavarivanja
- protok i vrsta zaštitnog plina.

Struja zavarivanja ovisi o debljini i vrsti materijala, položaju zavarivanja, definirana je brzinom dodavanja žice (veća brzina→veća jakost struje) i promjerom žice (veći promjer→veća struja), utječe na količinu rastaljenog materijala u jedinici vremena, dubinu protaljivanja, oblik zavara te na količinu unesene topline.

Brzinu zavarivanja potrebno je uskladiti s količinom taline jer može doći do naljepljivanja uslijed prevelike brzine zavarivanja i male količine taline i obrnuto, utječe na produktivnost i bira se u zavisnosti od jačine struje i položaja zavarivanja.

U zavisnosti od jačine struje razlikuju se tri međusobno zavisna položaja slobodnog kraja žice i sapnice za zaštitni plin:

1. slobodni kraj žice manji od odstojanja mlaznice, za struje od 50 do 150 A
2. slobodni kraj žice jednak odstojanju mlaznice, za struje od 150 do 350 A i
3. slobodni kraj žice veći od odstojanja mlaznice, za struje iznad 350 A.

Induktivitetom se regulira brzina promjene struje pri kratkim spojevima i prijelaznom luku.

Ovisno o položaju zavarivanja primjenjuju se i različiti prijenosi metala. Kod horizontalnog i vodoravnog položaja to su štrcajući i prijelazni, dok se kod svih ostalih položaja primjenjuje prijenos kratkim spojevima i impulsni prijenos metala. Kod prisilnih položaja koriste se elektrodne žice manjih promjera.

Napon električnog luka ovisi od duljine luka (dulji luk→veći napon→širi i nizak zavar), utječe na način prijenosa metala te protaljivanje, širinu i izgled zavara.

Postoje tri osnovne tehnike zavarivanja, a to su:

1. Lijeva tehnika - širi zavar i manja penetracija, koristi se za tanje materijale
2. Okomito (neutralno) širi zavar i srednja penetracija
3. Desna tehnika - uži zavar i veća penetracija, koristi se za deblje materijale.

Zaštitni plin osigurava područje zavara od reakcije s plinovima iz atmosfere te ima velik utjecaj na oblik profila zavara tj. širinu i penetraciju, brzinu zavarivanja i stabilnost električnog luka

4.1. PRIJENOS METALA U ELEKTRIČNOM LUKU

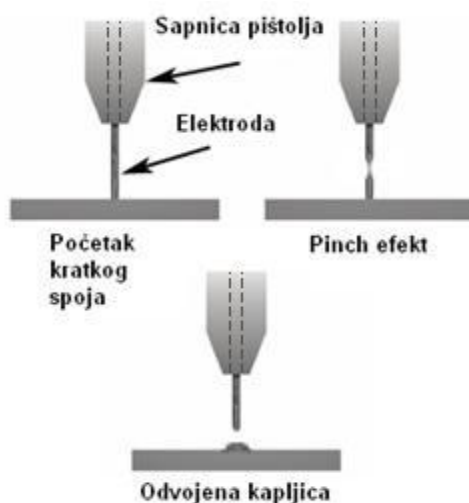
Prijenos metala predstavlja proces leta rastaljene kapljice od vrha elektrode kroz električni luk do taline metala zavora. Kod MIG/MAG zavarivanja prijenos metala igra veliku ulogu jer je odabirom parametara zavarivanja moguće definirati odgovarajući prijenos metala koji za odabranu primjenu predstavlja optimalan odabir. Dobro poznavanje procesa prijenosa metala vrlo je bitno kako bi se postigla visoka kvaliteta i produktivnost procesa zavarivanja [4].

Metode prijenosa metala ovise o jakosti struje, naponu električnog luka, vrsti dodatnog materijala i promjeru žice, vrsti zaštitnog plina ili plinske mješavine. Dije se na:

4.1.1. Prijenos kratkim spojevima

Ovim načinom prijenosa metala dolazi do taljenja kontinuirano dobavljane žice pomoću kratkih spojeva koji se periodički ponavljaju. Glavne značajke su mali unos topline i činjenica da se sav prijenos dodatnog metala vrši pri kontaktu elektrode i osnovnog materijala odnosno taline. Period pri kojem se odvaja jedna kapljica metala dijeli se na fazu kratkog spoja i fazu električnog luka. Do odvajanja kapljice dolazi u ovoj prvoj fazi u kojoj se vrh elektrode nalazi u kontaktu sa rastaljenim metalom pri čemu raste jakost struje što dovodi do povećanja magnetske sile koja se javlja na kraju elektrode zbog djelovanja elektromagnetskog polja i steže kapljicu taline vrha žice. Ova pojava je još poznata i kao „pinch effect“. Ovaj prijenos metala u luku daje talinu malog volumena koja se brzo hladi pa je pogodan za zavarivanje tankih limova i korijena zavora kod debljih komada, a najčešće se vrši u zaštiti ugljičnog dioksida i njegovih mješavina [12].

Kod prijenosa kratkim spojevima, ovisno o promjeru žice, koriste se male struje zavarivanja, te zaštitni plin CO₂ ili mješavine (CO₂+ Ar, CO₂ + Ar + O₂) Za promjer žice od 1,2 mm koriste se struje od 50 A do 170 A i naponi od 13 V do 21 V.

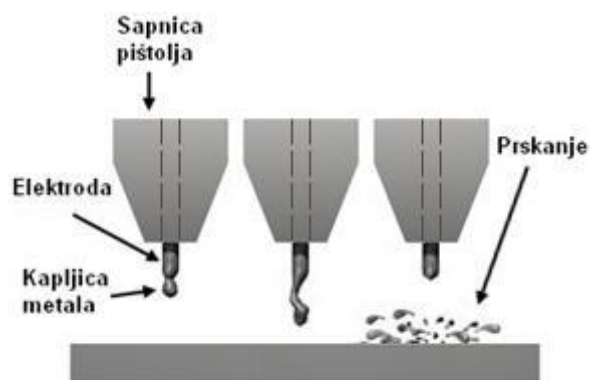


Slika 24. Prijenos metala kratkim spojevima [11]

4.1.2. Prijenos prijelaznim lukom

Prijenos metala prijelaznim lukom odvija se stvaranjem krupne kapljice metala na vrhu žice elektrode koja se zatim 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. Prijelazni luk se javlja u području jakosti struja i napona između vrijednosti prijenosa kratkim spojevima i štrcajućim lukom. Promjer kapljice metala veći je od promjera žice kojom se zavaruje. Proces zavarivanja s prijenosom metala prijelaznim lukom teško se kontrolira, javlja se intenzivno rasprskavanje, slabije je kvašenje taline, što uzrokuje nepotpuno spajanje materijala, a površina zavareske je izbrazdana i nepravilna. Ovaj prijenos metala posebno je izražajan kod zavarivanja u zaštiti čistog ugljičnog dioksida ili mješavina s njegovim snažnim utjecajem [12].

Za postizanje prijenosa metala krupnokapljčastim prijenosom za promjer žice od 1,2 mm, prikladne su veće struje zavarivanja od 170 A do 235 A i naponi od 22 V do 25 V.

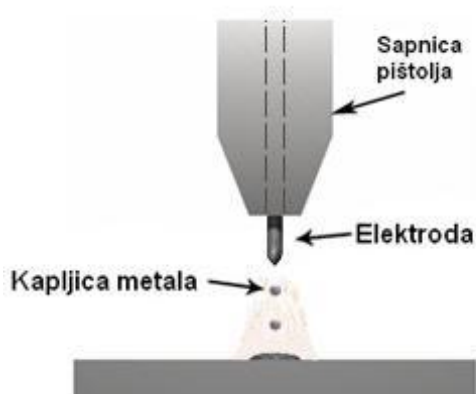


Slika 25. Prijenos metala prijelaznim lukom [11]

4.1.3. Prijenos štrcajućim lukom

Kod prijenosa metala štrcajućim lukom, kontinuirano dovođena žica elektrode se tali u području većeg napona i veće jakosti struje zavarivanja pri čemu se stvara mlaz malih kapi koje aksijalno putuju kroz električni luk te velikim brzinama uranjaju u rastaljeni osnovni materijal. 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. Zaštitne plinske mješavine koje posebno podržavaju ovaj način prijenosa jesu one s pretežnim udjelom argona [12].

Koristi se relativno visoki napon (od 24 V do 40 V) i struja (200 A do 600 A) za žicu promjera 1,2 mm.



Slika 26. Prijenos metala štrcajućim lukom [11]

4.1.4. Prijenos impulsnim lukom

Prijenos metala u kratkom, prijelaznom i štrcajućem luku spada u tzv. prirodni prijenos metala. Danas se sve više koristi prijenos metala upravljan djelovanjem impulsnih električnih struja (pulzirajući ili impulsni električni luk). Impulsni luk se postiže samo u zaštiti argona ili u mješavinama bogatim argonom. Ovaj oblik prijenosa kapljica metala u luku pruža mogućnost dobrog zavarivanja aluminija, bakra i CrNi čelika.

Za impulsne uređaje za zavarivanje karakteristični su strujni impulsi određene frekvencije i trajanja. Osnovna jakost struje tali vrh elektrode, a kap se otkida i prenosi odabranim strujnim impulsom. Na taj se način lijepo i kontrolirano zavaruju tanki materijali i provaruju korijeni te izvodi zavarivanje u prisilnim položajima. Frekvencija impulsa, a time i broj kapi, može se namještati (optimalna frekvencija je 50 Hz). Pri prijenosu kapi ne dolazi do kratkih spojeva. Svaki impuls uzrokuje povišenje temperature metalne kapi pa se može upravljati smjerom prijenosa metala [12].

Glavne prednosti impulsnog prijenosa metala su:

- jednoličan zavar
- smanjeno rasprskavanje
- stabilan luk
- mogućnost primjene žice većih promjera za tanje materijale
- primjenjivost u svim položajima zavarivanja.

4.2. Uloga zaštitnog plina pri MAG zavarivanju

Odabir zaštitnog plina za željenu primjenu je ključno za kvalitetu izvedbe zavarenog spoja jer zaštitni plin utječe, prije svega, na mehanička i metalurška svojstva zavarenog spoja. Proviđa se na temelju brojnih kriterija od kojih su neki: vrsta dodatnog materijala, željena mehanička svojstva zavarenog spoja, debljina osnovnog materijala, priprema zavara, stanje osnovnog materijala (korozija, antikorozivne prevlake, masnoće), željeni način prijenosa metala u električnom luku, položaj zavarivanja, željeni profil zavara itd. Tri su osnovna parametra za razumijevanje svojstava zaštitnih plinova: ionizacijski potencijal, toplinska vodljivost i reaktivnost plina [13].

Funkcija zaštitnog plina pri zavarivanju prema [14] jest:

- zaštita procesa i rastaljenog metala od pristupa okolnog zraka
- određivanje načina prijenosa materijala
- definiranje oblika i strukture električnog luka
- utjecaj na kemijski sastav zavarenog spoja
- definiranje izgleda i geometrijskog oblika zavarenog spoja
- utjecaj na viskozitet taline (metalne kupke)
- utjecaj na mehanička svojstva zavarenog spoja.

4.3. Dodatni materijal za MAG zavarivanje

Za MAG postupak zavarivanja koriste se pune (promjera 0,6; 0,8; 1,0; 1,2 i 1,6 mm koje se namotavaju u kolute) i praškom punjene žice. Za dobivanje kvalitetnog zavarenog spoja MAG postupkom žica mora zadovoljiti određene uvjete u pogledu kemijskog sastava, kvalitete površine, odmatanja s koluta tijekom zavarivanja i dr. Kemijski sastav žice treba biti sličan osnovnom materijalu koji se zavaruje. Zbog boljeg električnog kontakta i veće otpornosti na koroziju pune žice su pobakrene ili poniklirane. Kvaliteta namotaja žice na kolut mora biti takva da se žica pri zavarivanju pravilno i jednako odmeta s koluta. Površina žice mora biti glatka, točnih dimenzija i uredno namotana na kolutove koji se postavljaju u uređaj za dodavanje [15].

4.3.1. Dodatni materijal i zaštitni plin za MAG zavarivanje dupleks nehrđajućih čelika

Izbor dodatnih materijala za zavarivanje nehrđajućih čelika ovisi o kemijskom sastavu osnovnog materijala. Dodatni materijali koji se koriste za zavarivanje dupleks čelika u pravilu imaju isti sastav kao i osnovni materijal, osim što im je u odnosu na osnovni materijal sadržaj nikla povećan s 5,5 % na 9 %, kako bi se dobila pravilna ravnoteža između ferita i austenita u metalu zavora. Ukoliko je omjer kroma i nikla u dodatnom materijalu jednak kao i omjer kroma i nikla u osnovnom materijalu, tada će uslijed brzog skrućivanja i hlađenja taline metala zavora doći do prevelikog udjela ferita u zavarenom spoju. Za postizanje optimalnih mehaničkih svojstava i otpornosti na napetosnu koroziju udio ferita u metalu zavora treba biti do 65 %.

Da bi se zadržala korozijska otpornost prilikom zavarivanja dupleks čelika, osim pravilnog odabira dodatnog materijala potrebno je koristiti odgovarajući zaštitni plin. Korištenjem

odgovarajućih zaštitnih plinova ili mješavine plinova, istiskuje se štetan zrak iz područja zavora i na taj način se dobiva zaštićeni zavor. Ovdje se obavezno moraju izbjegavati zaštitni plinovi koji sadrže vodik, kako ne bi došlo do stvaranja vodikovih pukotina. Za zaštitu korijenske strane zavora kod zavarivanja dupleks čelika kao zaštitni plinovi koriste se argon i dušik ili njihove mješavine.

Dušik iz zaštitnog plina često preuzima ulogu nikla iz dodatnog materijala, tj. ulogu postizanja povoljnog omjera austenita i ferita u metalu zavora. Dušik se prilikom zavarivanja uvodi u talinu stimulirajući formiranje austenita [16].

Neki od primjera plinskih zaštita mogu se vidjeti u tablici 8.

Tablica 8. Zaštitni plinovi za MAG zavarivanje nehrđajućih čelika [13]

Naziv proizvoda	Grupa po ISO 14175	Ar	He	O ₂	CO ₂	H ₂	N ₂
Inoxline X2	M13	98 %		2 %			
Inoxline C2	M12	97,5 %			2,5 %		
Inoxline C3 X1	M14	96 %		1 %	3 %		
Inoxline He15 C2	M12	83 %			2 %		
Inoxline He30 H2 C	Z	67,88 %	30 %		0,12 %	2 %	
Inoxline N2	N2	97,5 %					2,5%

5. ROBOTIZIRANO MAG ZAVARIVANJE

Zavarivanje se često automatizira radi većeg profita kod velikih serija, odnosno sam proces zavarivanja se ubrzava, što se ostvaruje ponovljivošću i točnošću robota, a robot se za razliku od čovjeka ne umara te se omogućava kontinuiran i besprekidan rad. Vrlo je čest slučaj gdje roboti zamjenjuju ljude u tzv. 4D poslovima (dangerous = opasno, dirty = prljavo, dummy = glupo, difficult = teško).

Osnovne odrednice pojma robota:

- programibilnost
- višefunkcionalnost
- automatičnost (može raditi bez pomoći čovjeka).

Roboti za zavarivanje su automatski strojevi za zavarivanje koji imaju više od tri stupnja slobode gibanja, a upravljaju se računalom s mogućnošću programiranja i reprogramiranja. Na proizvodnim linijama različitih tvornica, transportne radnike i zavarivače sve više zamjenjuju roboti i automati za zavarivanje. Razvoj i automatizacija zavarivanja temelje se na primjeni različitih senzora i računala za praćenje, bilježenje i upravljanje parametrima zavarivanja uz predviđanje grešaka i istodobno otklanjanje uzroka. Najčešće se pod pojmom robota podrazumijeva "industrijski robot" koji se još naziva i "robotski manipulator" ili "robotska ruka" [17].

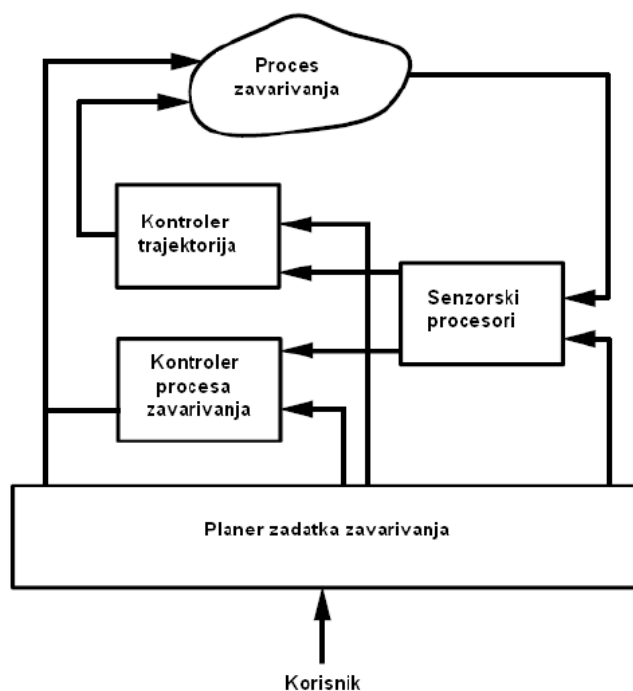
Postupci zavarivanja koje ima smisla robotizirati su:

- EPP zavarivanje
- elektrootporno zavarivanje (posebice točkasto)
- MIG/MAG zavarivanje
- lasersko zavarivanje
- plazma zavarivanje
- TIG zavarivanje.

5.1. Programiranje robota za zavarivanje

Ovaj se proces najčešće naziva "učenje" robota. Robot za zavarivanje je potrebno isprogramirati za obavljanje često složenih i teških zadataka zavarivanja gdje su putanje robota u pravilu vrlo nelinearne. Razlikujemo dva ključna pojma: putanja i trajektorija. Pod pojmom putanja se podrazumijeva krivulja koja dovoljno točno definira prostorne pozicije i orijentacije alata. Trajektorija definira promjene brzine i ubrzanja duž putanje zavarivanja. Kretanje vrha alata može biti od točke do točke ili kontinuirano, po linearnoj ili kružnoj putanji.

Da bi robotizirani postupak zavarivanja bio kvalitetan, nužno je da se robot može prilagoditi određenim promjenama u uvjetima i okolini zavarivanja te izvršiti odgovarajuću reakciju u vidu korekcije gibanja ili čak parametara procesa, a to se postiže adaptivnim upravljanjem procesa. Struktura adaptivne kontrole temelji se na modulima koji imaju određene zadaće i koji međusobno komuniciraju, slika 27 [18].



Slika 27. Modularna arhitektura adaptivnog upravljanja robotiziranim procesom zavarivanja [18]

Senzori prve skupine mjere tehnološke parametre procesa zavarivanja važne za njegovu stabilnost i koriste se za svrhe praćenja i kontrole. Senzori druge skupine se uglavnom primjenjuju za traženje žlijeba i praćenje linije zavarivanja te omogućuju robotu da korigira

putanju ukoliko se jave geometrijska odstupanja, ali i za praćenje slobodnog kraja žice, taline te skrutnutog zavara [18].

5.1.1 Mjerenje napona

U pravilu vršiti što je moguće bliže električnom luku. Struja preko kontaktne cjevčice ulazi u elektrodu odnosno žicu, ali i u razmaku od kontaktnog dijela, pa do vrha žice javlja se pad napona od otprilike 0,3 V, ovisno o karakteristikama procesa.

5.1.2. Mjerenje jakosti struje

Za takvo mjerenje se koriste dvije vrste senzora za mjerenje jakosti struje, a to su senzor na principu Hallovoeg efekta koji se sastoji od željezne jezgre kroz koju prolazi vodič sa strujom te shunt gdje struja prolazi kroz statički otpornik pri čemu se mjeri vrijednost napona iz kojeg se potom izvodi jakost struje.

5.1.3. Mjerenje brzine dovođenja žice

Iako se za definiranje procesa obično zadaju parametri napona i jakosti struje, u stvarnim uvjetima jakost struje je posljedica određene brzine dovođenja žice. Porastom brzine dovođenja žice raste jakost struje i dolazi do bržeg trošenja elektrode, smanjenjem brzine dovođenja opada jakost struje, a s njome i brzina taljenja elektrode.

Senzori za mjerenje napona i brzine dovođenja žice odnose se na MIG postupak.

5.2. Glavne vrste programiranja robota za zavarivanje

Postoje dvije osnovne metode programiranja robota: *on-line* i *off-line*.

Karakteristike *on-line* programiranja:

- programiranje se vrši na radnoj poziciji robota
- robot za vrijeme programiranja ne može obavljati proizvodnu funkciju
- ne treba poseban softver ni hardver
- koristi se kada nema puno robota za programiranje
- nemoguće unaprijed programirati robota prema crtežu
- robot se pomiče pomoću kursorских tipki i *joysticka* na privjesku za učenje.

Karakteristike *off-line* programiranja:

- odvija se na mjestu neovisno o robotu
- potreban je specijalizirani software za izradu programa
- mogućnost 3D simulacije robotske stanice i procesa zavarivanja
- robot za vrijeme programiranja može obavljati proizvodnu funkciju
- moguće unaprijed programirati robota prema nacrtu
- moguća jednostavna provjera kolizije robota i radnog komada
- potreban visokoobrazovni programer.

5.3. Senzori za praćenje žlijeba i putanje zavarivanja

Ovi senzori služe robotu u svrhu traženja i praćenja žlijeba te putanje zavarivanja za vrijeme procesa zavarivanja.

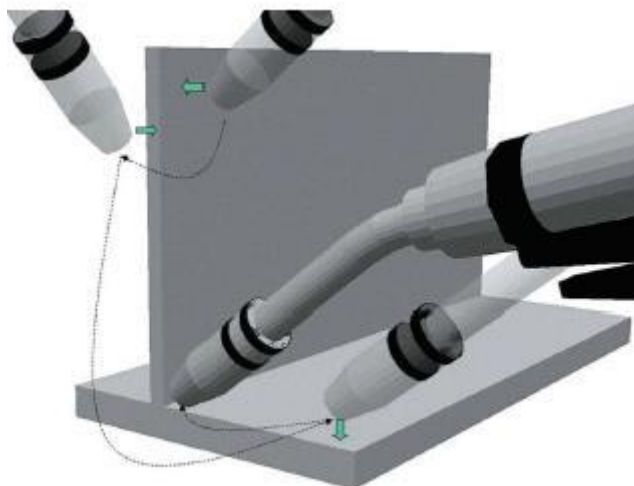
5.3.1. Mehanički senzori

Ova vrsta senzora koristi igličaste, kuglaste ili valjkaste senzore za detekciju radne površine i poziciju pripreme zavara. Nedostatak im je što se mogu primijeniti samo kod priprema zavara većih dimenzija i ograničeni su na detekciju samo ravnih zavara.

5.3.2. Električni senzori

Električni senzori uz pomoć dodatnog napajanja spojenog na metalnu sapnicu i taljivu elektrodu pomiču se do radnog komada sve do trenutka kada ga dodirnu.

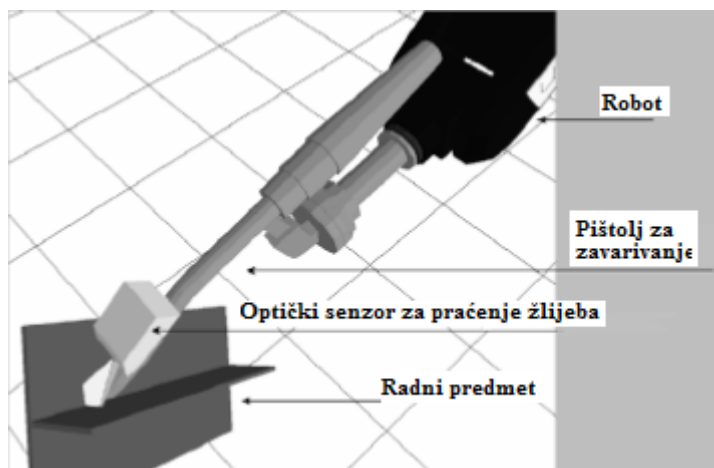
U trenutku kada sapnica ili elektroda dođe u kontakt s radnim komadom električni krug se zatvara u točki dodira kratkog spoja, a signal se proslijeđuje do kontrolne kutije koja određuje točnu koordinatu gdje je nastao kratki spoj, slika 28.



Slika 28. Način detekcije radnog komada uz pomoć kontaktnog električnog senzora [18]

5.3.3. Optički senzori

Optički senzori prate žlijeb tijekom procesa zavarivanja projiciranjem i cikličkim njihanjem laserskog snopa, u ravni okomitoj na liniju zavora i os skeniranja, koji se reflektira prema CCD kameri. Primljeni analogni signali se pretvaraju u digitalne iz kojih se potom definiraju geometrijske značajke spoja te se vrši potrebno korigiranje položaja i orijentacije. Senzor je spojen tako da se nalazi na prednjem dijelu pištolja i skenira područje ispred samog električnog luka [18].



Slika 29. Grafički model robota s optičkim senzorom za praćenje žlijeba [18]

Za vrijeme procesa zavarivanja optički senzor vrši triangulacijsko skeniranje u ravni okomitoj na liniji zavarivanja i na taj način dobiva 2D sliku geometrije žlijeba u obliku mreže 2D koordinata.

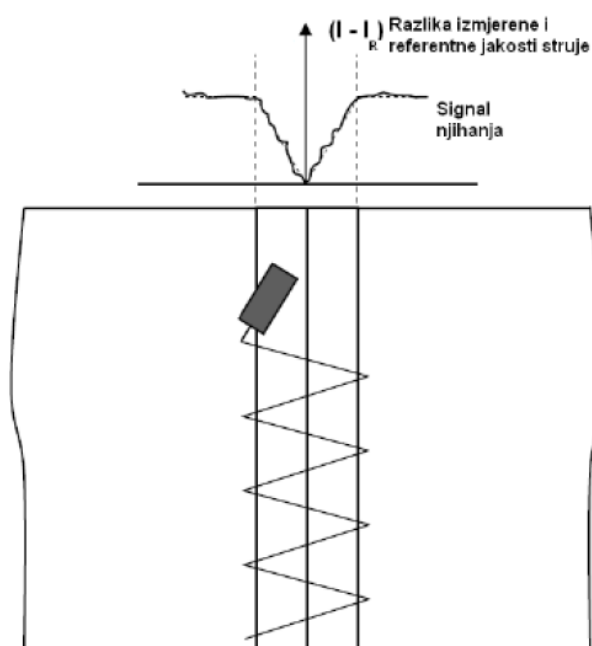
Optički senzor za praćenje žlijeba obično u potpunosti kompenzira izmjerene greške u položaju. Ispravljanje se uglavnom odvija pri zavarivanju po zadanoj, nominalnoj putanji pri čemu robot samo korigira greške u položaju, točnije robotski kontroler prima podatke o novim položajima od senzora i modificira putanju mijenjajući koordinate TCP-a uz zadržavanje iste orijentacije. U ovom slučaju problemi vezani uz ograničenja zglobova, singularnosti i eventualne kolizije, ali nedostatak leži u činjenici da korisnik mora programirati putanju. Nasuprot tome, ako se robotu ispostave samo početna i završna točka, prisiljen je stvarati putanju samo na osnovi informacija iz senzora, što zahtijeva modifikacije položaja, ali i orijentacije, pa su prisutne opasnosti od dinamički singularnih područja, ograničenja zglobova i mogućih kolizija s predmetima iz okoline.

Ipak, primjenom odgovarajućeg filtriranja te generiranjem polinomnog i vektorskog opisa putanja zavarivanja praćenje nenominalne, kompleksne trajektorije je izvedivo.

5.3.4. Električni luk kao senzor

Na ideju električnog luka kao senzora došlo se još 1980. godine. Bit je da se njihanjem odnosno variranjem udaljenosti između vrha žice i predmeta praktično iskoriste izmjerene promjene jakosti struje koje posljedično nastaju.

Praktična korist pronalazila se upravo u praćenju linije zavarivanja. Pojednostavljeno rečeno, ako nema devijacije praćenog žlijeba od pretpostavljene putanje u okviru procesa zavarivanja, tada izmjerena jakost struje u središnjoj točki njihanja mora biti jednaka nominalnoj (referentnoj), odnosno jakosti struje kod savršeno centriranog pištolja u odnosu na žlijeb, dakle razlika tih dviju jakosti mora biti jednaka nuli, slika 24. U slučaju pojave devijacije, središnja linija ili os njihanja se više ne poklapa sa središnjom osi spoja, što znači da se u točki na osi njihanja smanjila udaljenost vrha žice od izratka i ujedno povećala jakost struje koja je sada veća od referentne. I ostalim točkama na krivulji njihanja se pri tome promijenila vrijednost jakosti struje i ne odgovara onima u slučaju centriranog položaja. Na osnovi ovih informacija generira se novi položaj i šalje robotskom kontroleru koji korigira gibanje i kompenzira devijaciju [18].



Slika 30. Shematski prikaz procesa zavarivanja kod kojeg nema devijacije žlijeba [18]

Za usporedbu električni luk ima znatno manju točnost kod praćenja, a razlog tome leži i u signalnoj buci koju proizvode uvjeti koji su prisutni u samome luku. Isto tako, „vidno polje“ mu je ograničeno njihanjem i ne može izvršavati funkcije traženja žlijeba na razini na kojoj to obavlja optički senzor, no s druge strane je svojstva poput praktičnosti, jednostavnije opreme, neopterećivanja pištolja, niske cijene u kombinaciji s širokom primjenom, stavljaju veliki naglasak na postojeću vrijednost, ali i potencijal ovog jednostavnog senzora [18].

6. EKSPERIMENTALNI DIO

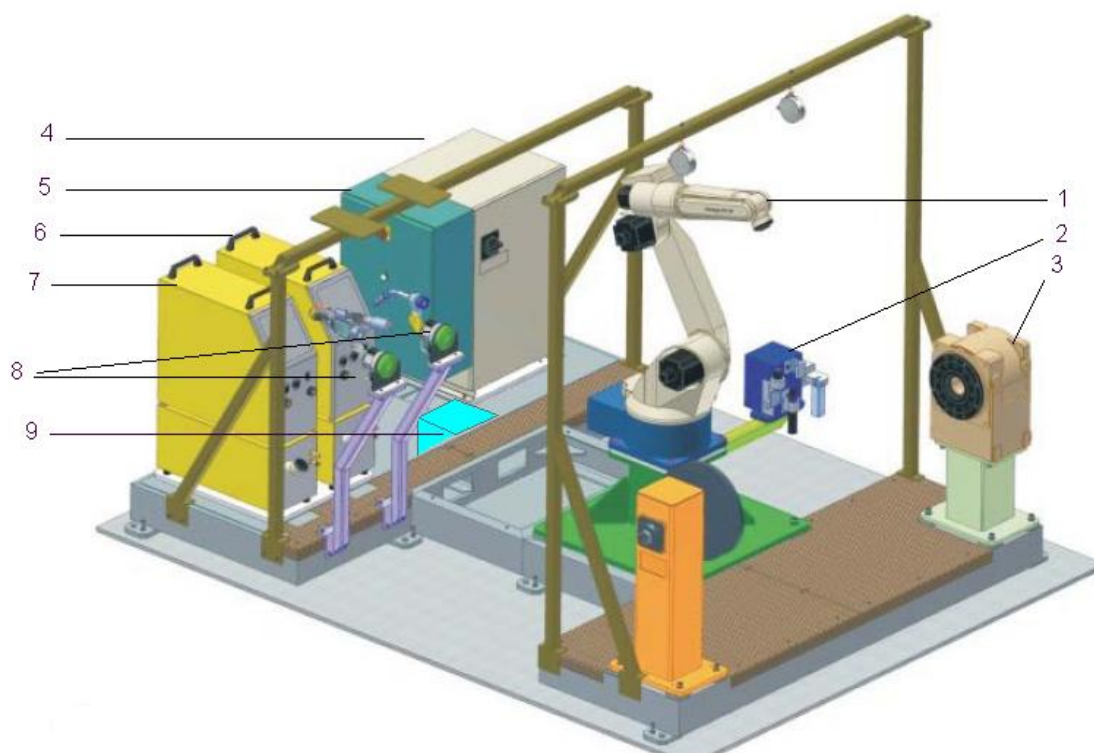
Eksperimentalni dio diplomskog rada izveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu na robotskoj stanici OTC Almega AX-V6.

Prema odgovarajućim uzorcima odabrani su parametri zavarivanja i vrsta dodatnog materijala za robotizirano MAG zavarivanje dupleks čelika u svrhu analize procesa zavarivanja na više razina unosa topline u kombinaciji sa dva različita zaštitna plina. Nakon provedbe zavarivanja kutnog spoja na 4 različita uzorka, provedena je analiza makrostrukture i mikrostrukture u metalu zavara i zoni utjecaja topline. Zaključno, definirana je primjenjivost robotiziranog MAG zavarivanja za spajanje dupleks čelika.

6.1. Robotska stanica VRC-1G MIG + 1G TIG/1dm

Robotska stanica (slika 31) sastoji se od:

1. robota OTC Almega AX-V6
2. uređaja za čišćenje sapnice, rezanje žice i nanošenja sredstva protiv naljepljivanja kapljica
3. pozicionera P250V ROBO
4. električne jedinice
5. upravljačke jedinice
6. izvora struje MIG/MAG DP400
7. izvora struje TIG DP300
8. sustava za automatsku izmjenu pištolja
9. senzora električnog luka AX-V6.



Slika 31. Prikaz robotske stanice [19]

U sustav je integrirana i funkcija Synchromotion koja objedinjuje složeno gibanje robota i pozicionera i osigurava konstantnu brzinu zavarivanja i nagib pištolja pri zavarivanju složenih oblika i proizvoda. U sustavu su dva izvora struje za zavarivanje i to za MIG/MAG DP400 i TIG DP300 DC/AC pri čemu je izmjena pištolja i načina zavarivanja automatska. Oba izvora

su vodom hladene inverterske jedinice s mogućnošću impulsnog zavarivanja. To konkretno znači da se na jednom proizvodu mogu izmjenjivati TIG i MIG/MAG, ovisno o tehnološko – ekonomskim zahtjevima. Uz to, za MIG/MAG zavarivanje ugrađen je i alat za čišćenje sapnice, rezanje žice i nanošenje sredstva protiv naljepljivanja kapljica. Za praćenje spoja pri zavarivanju ugrađen je senzor električnog luka koji regulira putanju gibanja na osnovu napona električnog luka. Također je ugrađen i tzv. „shock“ senzor koji reagira u slučaju kolizije glave za zavarivanje i radnog komada, naprave i sl. *On-line* programiranje se provodi pomoću privjeska za učenje (slika 32.).



Slika 32. Privjesak za učenje

Podešavanje parametara zavarivanja provodi se preko privjeska za učenje tako da nisu potrebne dodatne aktivnosti za podešavanje na samim izvorima struje za zavarivanje.



Slika 33. Robot Almega AX-V6

Robot Almega AX-V6 (Slika 33.) ima kinematičku strukturu određenu sa 6 rotacijskih stupnjeva slobode gibanja. Takva struktura omogućuje robotu potpuno pozicioniranje i orijentaciju pištolja za zavarivanje.

Tehničke karakteristike robota AX-V6 prikazane su u tablici 9.

Tablica 9. Tehničke karakteristike robota [20]

Naziv robota (manipulatora)		Almega AX-V6
Operacijski način rada (struktura)		Vertikalno artikuliran
Broj stupnjeva slobode gibanja		6
Maksimalna opteretivost		6 kg
Ponovljivost		± 0.08 mm
Doseg gibanja	Os 1 (okretanje)	$340^\circ (\pm 170^\circ)$
	Os 2 (donja ruka)	$245^\circ (-145^\circ \sim +90^\circ)$
	Os 3 (gornja ruka)	$360^\circ (-170^\circ \sim +190^\circ)$
	Os 4 (valjanje šake)	$360^\circ (\pm 180^\circ)$
	Os 5 (posrtanje)	$280^\circ (-50^\circ \sim +230^\circ)$
	Os 6 (valjanje šake)	$720^\circ (\pm 360^\circ)$
Maksimalna brzina oko pojedinih osi	Os 1 (okretanje)	2,62 rad/s (150 °/s)
	Os 2 (donja ruka)	2,79 rad/s (160 °/s)
	Os 3 (gornja ruka)	2,97 rad/s (170 °/s)
	Os 4 (valjanje šake)	5,93 rad/s (340 °/s)
	Os 5 (posrtanje)	5,93 rad/s (340 °/s)
	Os 6 (valjanje šake)	9,08 rad/s (520 °/s)
Dozvoljeni moment oko pojedinih osi	Os 4 (valjanje šake)	11,8 Nm
	Os 5 (posrtanje)	9,8 Nm
	Os 6 (valjanje šake)	5,9 Nm
Dozvoljeni moment inercije oko	Os 4 (valjanje šake)	0,30 kgm ²
	Os 5 (posrtanje)	0,25 kgm ²
	Os 6 (valjanje šake)	0,06 kgm ²
Doseg gornje ruke		3,14 m ² x 340°
Uvjeti okoline	Temperatura	0° ~ 45°C
	Vlažnost zraka	20% ~ 80 % (nekondenzirajuća)
Masa		155 kg
Maksimalna nosivost gornje ruke		10 kg
Vrsta motora za pogon		Ac Servo motor
Snaga motora za pogon		2750 W
Informacija o poziciji		Apsolutni enkoder
Mogućnost instaliranja		Podno ili na zidne nosače
Boja		Ruke: bijela, Postolje: plavo

6.2. Izvor struje

Korišteni izvori struje je OTC Daihen Varstroj DP400 (slika 34). Izvor struje za zavarivanje koristi sinergijske programe za parametre zavarivanja. Potpuno je integriran u robotski sustav za zavarivanje preko digitalne komunikacijske sabirnice.

Navedeni izvor struje ima napon praznog hoda $U_0 = 80$ V. Tablica 10 prikazuje podatke s pločice intermitencije struje zavarivanja na stražnjoj strani izvora struje.

Tablica 10 Intermitencija izvora struje Daihen Varstroj DP400

30A / 15.5 V do 400 A / 34.0 V			
X	50 %	60 %	100 %
I_2	400 A	365 A	283 A
U_2	34.0 V	32.3 V	28.2 V



Slika 34. Izvor struje Daihen Varstroj DP400



Slika 35. Korisničko sučelje izvora struje Daihen Varstroj DP400

6.3. Osnovni materijal

Korišteni osnovni materijal je dupleks čelik oznake 2205 (oznaka prema europskoj normi: 22Cr-5Ni-3Mo-N).

Većina dupleks čelika imaju oznaku prema sadržaju kroma i nikla. Prema tome, čelik 2205 sadrži 22 % kroma i 5 % nikla. 2205 je najčešće korišteni dupleks čelik legiran dušikom. Dušik služi za poboljšavanje otpornosti na koroziju, kao i za skoro dvostruko povećavanje vlačne čvrstoće u usporedbi sa austenitnim nehrđajućim čelicima [21]. Tablica 11 prikazuje kemijski sastav dupleks čelika oznake 2205.

Tablica 11 Kemijski sastav dupleks čelika 2205 [22]

Kemijski element	Maseni udio, %
C	0,03 %
Mn	2 %
Si	1 %
Cr	21 % - 23 %
Ni	4,5 % - 6,5 %
Mo	2,5 % - 3,5 %
P	0,03 %
N	0,08 % - 0,2 %
S	0,02 %

U tablici 12 prikazana su mehanička svojstva dupleks čelika 2205.

Tablica 12 Mehanička svojstva dupleks čelika 2205 [22]

Mehaničko svojstvo	Vrijednost
Granica razvlačenja, MPa	450
Vlačna čvrstoća, MPa	620
Produljenje ϵ , %	25
Tvrdoća, HV	310

6.4. Dodatni materijal

Korišteni dodatni materijal u eksperimentalnom dijelu je puna žica od dupleks čelika 2205 promjera 1,2 mm kemijskog sastava prema slici 36.



ABNAHMEPRÜFZEUGNIS / INSPECTION CERTIFICATE / CERTIFICAT DE RECEPTION

EN 10204 - 3.1

MIG WELD GmbH International											
Ø : 1.2mm						HERSTELLDATUM / DATE: 02.02.2012					
BEZEICHNUNG / DESIGNATION: ML22.9.3.NL DIN EN ISO 14343-A: G 22 9 3 NL VERPACKUNG / PACKAGING: BS-300 / 15kg WERKSTOFFNUMMER: 1.4462						CHARGE / BATCH: 231780_010148863					
CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG / CHEMICAL COMPOSITION [%]											
NACH ANALYSE DES LIEFERANTEN / ACCORDING TO SUPPLIERS ANALYSIS											
% C	% Si	% Mn	% Ni	% Cr	% Mo	% Cu	% Co	% S	% P	% N	
0,009	0,370	1,630	8,76	22,8	3,150	0,050	0,028	0,001	0,013	0,1405	
NACH ANALYSE DES LIEFERANTEN / ACCORDING TO SUPPLIERS ANALYSIS											
MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN / PHYSICAL PROPERTIES											
DURCHMESSER/DIAM. 1 [mm]						DURCHMESSER/DIAM. 2 [mm]					
1,187						1,188					
FERRIT / FERRITE											
Delong Ferrit FN						Ferrit WRC %					
MIG WELD GmbH International · Wattstraße 2 · 94405 Landau/Isar											

Dieses Zeugnis wurde maschinell erstellt und wird nicht unterschrieben.
QUAL 1.1-1 Rev0 02.06.2003

Slika 36. Specifikacija dodatnog materijala

6.5. Zaštitni plin

Eksperimentalni dio sastoji se od provedbe zavarivanja kutnog spoja s dva različita plina radi njihove usporedbe. U prvom dijelu pokusa korišteni plin je Inoxline C2 (mješavina 82 % Ar i 18 % CO₂), dok je u drugom dijelu pokusa korišten Inoxline N2 (mješavina 97,5 % Ar i 2,5 % N₂). Proizvođač korištenih mješavina plinova je Messer Croatia.

Tablica 13. Volumni sastav plinskih mješavina Inoxline C2 i Inoxline N2

Naziv proizvoda	Grupa po ISO 14175	Volumni udio [%]						Postupak po HRN EN 14610	Primjena
		Ar	He	O ₂	CO ₂	H ₂	N ₂		
Inoxline C2	M12	97,5	-	-	2,5	-	-	MAG M	Visokolegirani čelici i čelici na bazi Ni
Inoxline N2	N2	97,5	-	-	-	-	2,5	TIG	

6.6. Priprema uzoraka za zavarivanje

Prvi korak pripreme uzoraka za zavarivanje je rezanje zračnom plazmom. Parametri rezanja su: $v_{rez} = 40$ cm/min, $I = 80$ A. Slika 37 prikazuje rezanje uzoraka plazmom.



Slika 37. Rezanje uzoraka plazmom

Drugi korak pripreme uzoraka za zavarivanje je brušenje površine zavarivanja na odrezanim uzorcima (slika 38).



Slika 38. Brušenje površina za zavarivanje

Treći korak pripreme je pripajanje pripremljenih uzoraka za kutni spoj, te njihovo stezanje na pozicioner robota.

6.7. Zavarivanje kutnog spoja

Zavarivanje kutnog spoja provedeno je na četiri uzorka sa dvije različite razine unosa topline u kombinaciji s dvije različite mješavine zaštitnih plinova.

Prijenos metala kod svih uzoraka obavljao se impulsnim načinom rada u PA položaju koristeći pozicioner koju omogućuje okretanje uzoraka za 45°.

Prvi dio pokusa je napravljen u zaštitnoj atmosferi plinske mješavine Inoxline C2 na dva uzorka, dok je drugi u zaštitnoj atmosferi plinske mješavine Inoxline N2 isto na dva uzorka.

Protok zaštitnog plina tijekom zavarivanja bio je konstantan u vrijednosti od 17 l/min.

Tablica 14. prikazuje postupak provedbe eksperimentalnog dijela rada.

Tablica 14. Parametri zavarivanja

Uzorak	Plinska mješavina	Broj prolaza	Namješteno		Očitano		$v_{žice}$ m/min	v_z cm/min	Unos topline, kJ/cm
			Struja, A	Napon, V	Struja, A	Napon, V			
1	Inoxline C2	2	100 / 120	19 / 20	125 / 110	21,5 / 22	3,3	18 / 11	7,16 + 10,56
2	Inoxline C2	1	290	28,5	239	29,5	11,5	35	9,67
3	Inoxline N2	2	100 / 120	19 / 20	110 / 90	21,5 / 23,3	3,3	18 / 11	6,31 + 9,15
4	Inoxline N2	1	290	28,5	230	29,5	11,5	30	10,86

Unos topline računa se prema izrazu:

$$Q = \frac{U \times I}{v_z} \times \eta$$

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v_z – brzina zavarivanja, cm/min

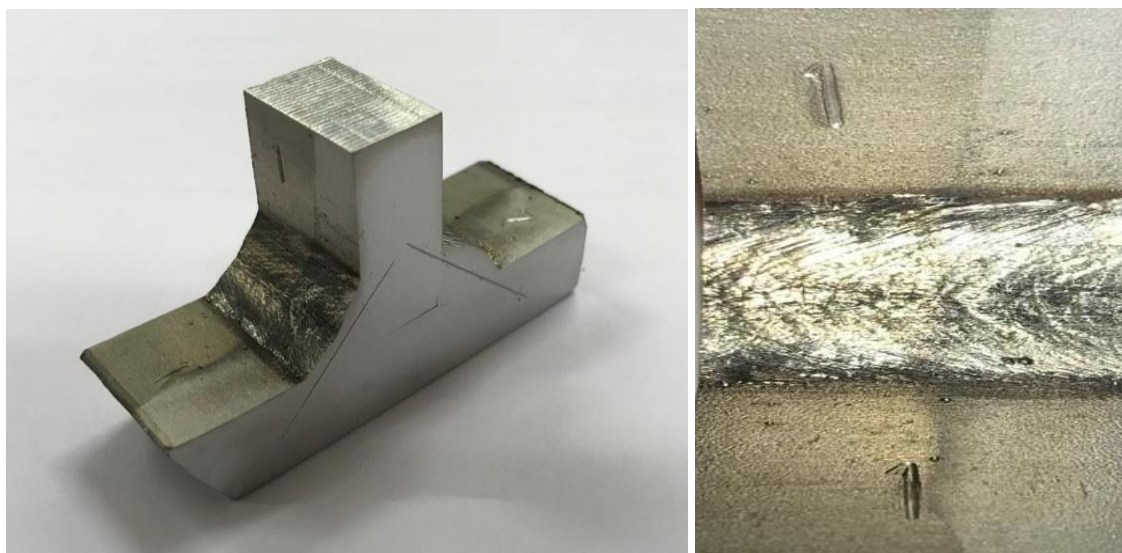
η – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja (MAG = 0,8).

Tehnologija procesa zavarivanja osmišljena je na način da se dobije približno jednaka širina zavora na različitim unosima topline, odnosno na način da se jednaka širina zavora dobivena tehnikom povlačenja strujama zavarivanja gornje granice primjene (300 A) dobije i višeprolaznim (dva prolaza) zavarivanjem strujama blizu donje granice (100 A) njihovim električnog luka.

Vizualna kontrola zavarenog spoja provedena je prije, tijekom i nakon zavarivanja.

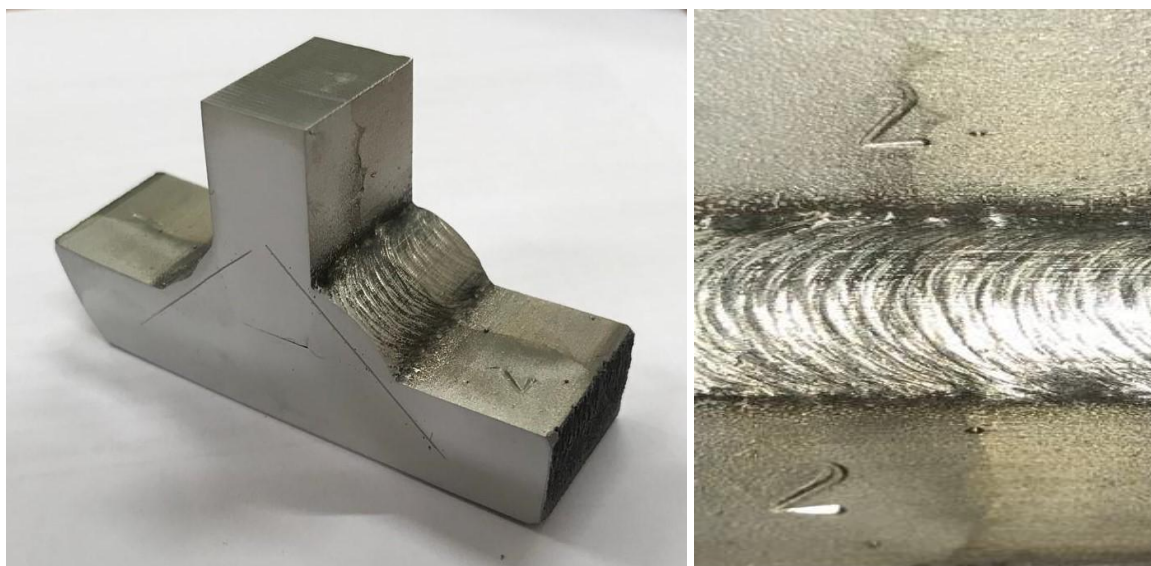
6.8. Analiza kutnog zavarenog spoja

Na slikama 39 - 42 prikazani su odrezani uzorci 1, 2, 3 i 4 nakon zavarivanja.



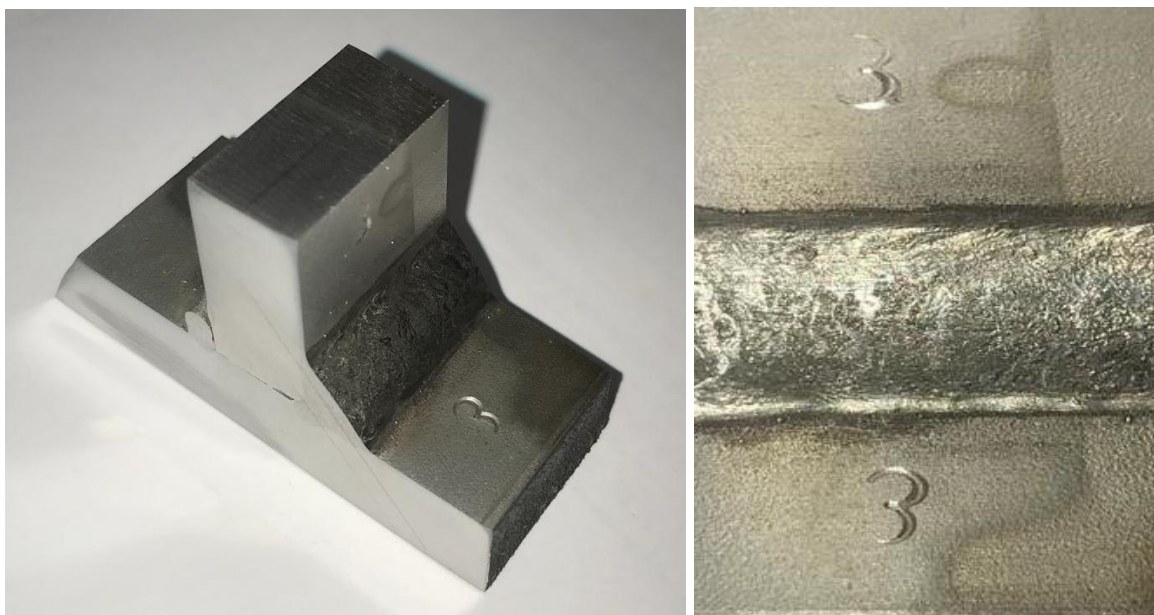
Slika 39. Uzorak broj 1

Zavar broj 1 zavaren je u zaštiti plinske mješavine 97,5% Ar + 2,5% N₂. Upravo ta mješavina se preporučuje za zavarivanje dupleks čelika što se i dokazuje izgledom zavora. Korištena struja zavarivanja je 290 A što pripada gornjoj granici primjenjivanja kod impulsnog načina prijenosa metala. Proces je vođen stabilnim lukom. Nakon zavarivanja ne uočavaju se nikakve kapljice od rasprskavanja metala te je iz tog razloga nepotrebna svaka daljnja mehanička obrada zavora.



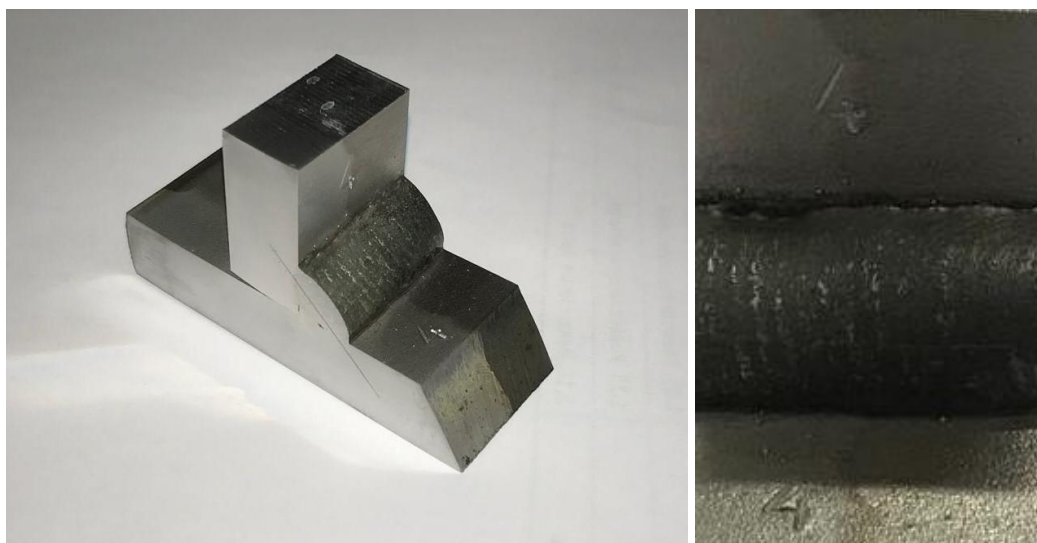
Slika 40. Uzorak broj 2

Zavar broj 2 je također zavaren plinskom mješavinom 97,5 % Ar + 2,5 % N₂, ali sa puno manjim strujama zavarivanja u 2 prolaza. Struja zavarivanja kod prvog prolaza bila je 100 A, a drugog 120 A što su relativno niske jakosti struja za eksploatacijske uvjete. Niske struje zavarivanja rezultiraju manjom penetracijom i većom mogućnošću nalijepljivanja. Drugi prolaz napravljen je sinusoidalnim njihanjem amplitude 3 mm i kratkim zadržavanjem na rubovima u trajanju od 0,3 sekunde. Kao i kod prvog uzorka, ne uočavaju se kapljice nastale uspijed rasprskavanja metala prilikom zavarivanja.



Slika 41. Uzorak broj 3

Kod zavarivanja uzorka broj 3 korištena je plinska mješavina 97,5 % Ar + 2,5 % CO₂. Ta mješavina se u načelu koristi za zavarivanje visokolegiranih čelika, ali u manjoj mjeri za dupleks čelike. Korištena struja zavarivanja je također 290 A kao i kod uzorka broj 1.



Slika 42. Uzorak broj 4

Zavar broj 4 također je zavaren plinskom mješavinom 97,5 % Ar + 2,5 % CO₂. Korišteni princip je isti kao i kod zavarivanja drugog uzorka. Prvi prolaz zavaren je strujom od 100 A, a drugi strujom od 120 A uz jednako njihanje. Njihanje nam služi za bolje razlijevanje zavara i postizanja većih širina zavara kod malih struja i brzina zavarivanja. Upravo je njihanje razlog postizanju približno jednake širine zavara u jednom prolazu kod malih struja od 120 A (uzorci 2 i 4) u usporedbi sa zavarivanjem samo povlačenjem većim strujama (uzorci 1 i 3).

6.9. Priprema uzoraka za brušenje

Nakon zavarivanja, zavareni kutni spojevi režu se tračnom pilom na označenim presjecima.

Grubo brušenje obavljeno je ručnim postupkom brusnim papirima prema redoslijedu veličine zrna: P80, P120, P240, P320, P400 i P500.

Fino brušenje obavljeno je na uređaju Phoenix Alpha Grinder/Polisher (Slika 31) brusnim papirima veličina zrnatosti: P500, P1000, P2000, P4000. Brzina brušenja je 350 okr/min. Kod mijenjanja rotacijskih brusnih papira s grubljeg na finiji papir, uzorci se rotiraju za 90°. Koristi se vodeno hlađenje, tako da nebi došlo do zagrijavanja uzorka. S finijim papirom se brusi sve dok se tragovi brušenja prethodnog, grubljeg, papira skroz ne izbruse.

Nakon brušenja, uzorci su polirani dijamantnom pastom veličine zrna 3 μm i 1 μm .

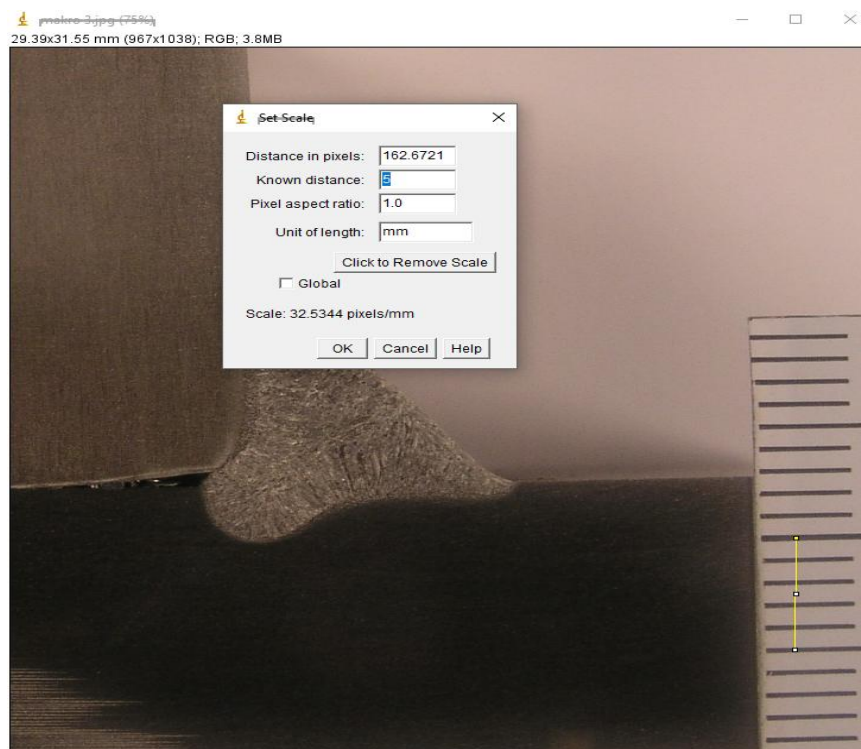
Na kraju, uzorci se nagrizzaju u 10 % oksalnoj kiselini u Laboratoriju za zaštitu materijala. Nagrizanje je obavljeno pod naponom od 8 V u trajanju od 1 min.

Uzorci se zatim slikaju namještenim fotoaparatom Canon, u Laboratoriju za materijalografiju.

6.10. Analiza makrostrukture

U cilju detaljnije analize, potrebno je izmjeriti nadvišenje, širinu, penetraciju i površinu presjeka metala navara koristeći program *ImageJ*.

Koristeći naredbu *Set scale*, prvo se postavlja mjerna skala prema poznatoj dimenziji mjerne trake, te se tako dobije odnos piksela po milimetru (slika 43).

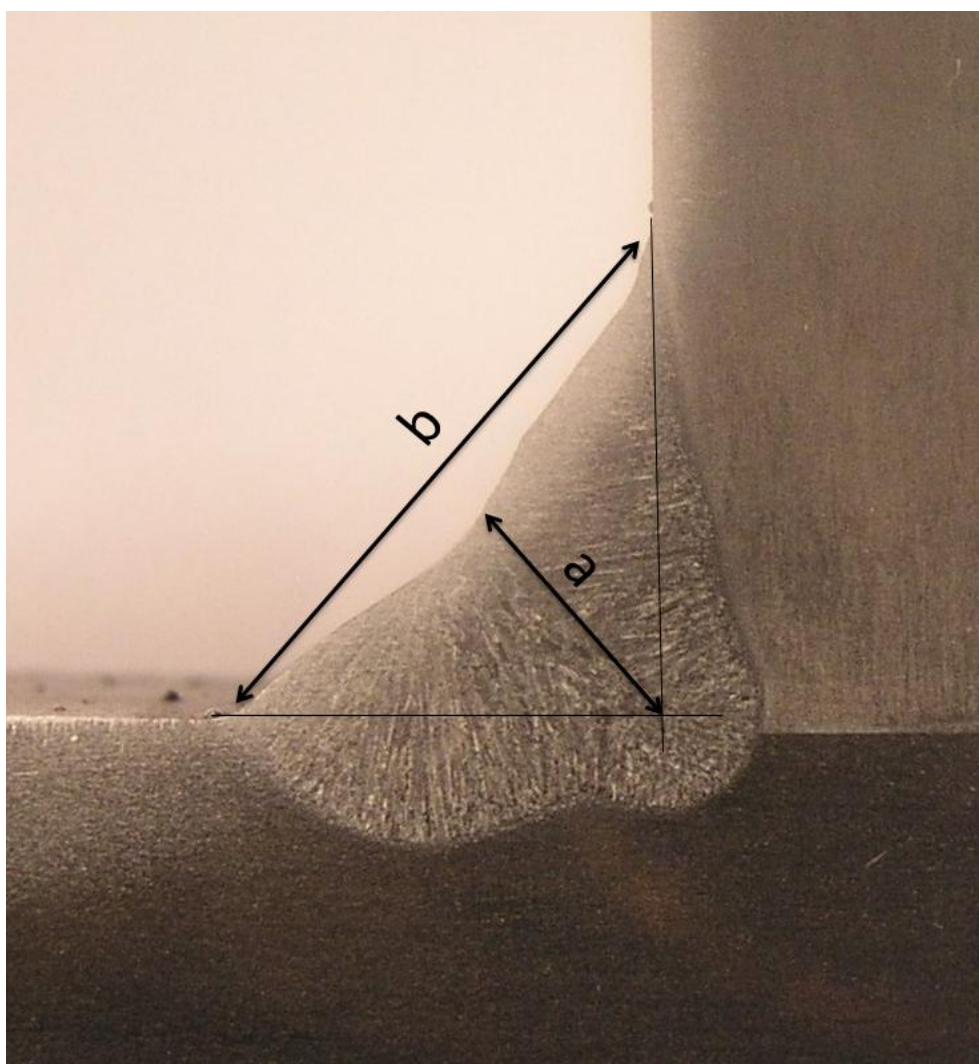


Slika 43. Postavljanje skale na točnu dimenziju mjerne trake u programu ImageJ

Tablica 15 prikazuje analizu dimenzija makrostrukture uzoraka.

Tablica 15. Analiza dimenzija makrostrukture uzoraka

Uzorak	Korištena plinska mješavina	Broj prolaza	Površina metala zavara, mm ²	a	Širina metala zavara b, mm
1	Inoxline N2	1	72,5	6	14,1
2	Inoxline N2	2	63,7	8	14,7
3	Inoxline C2	1	61,5	6	13,1
4	Inoxline C2	2	69,3	8	12,9



Slika 44 Makroizbrusak - uzorak 1

Vizualnom kontrolom utvrđeno je da zavar nema grešaka. Presjek spoja ima blago konkavan izgled ujednačene geometrije.



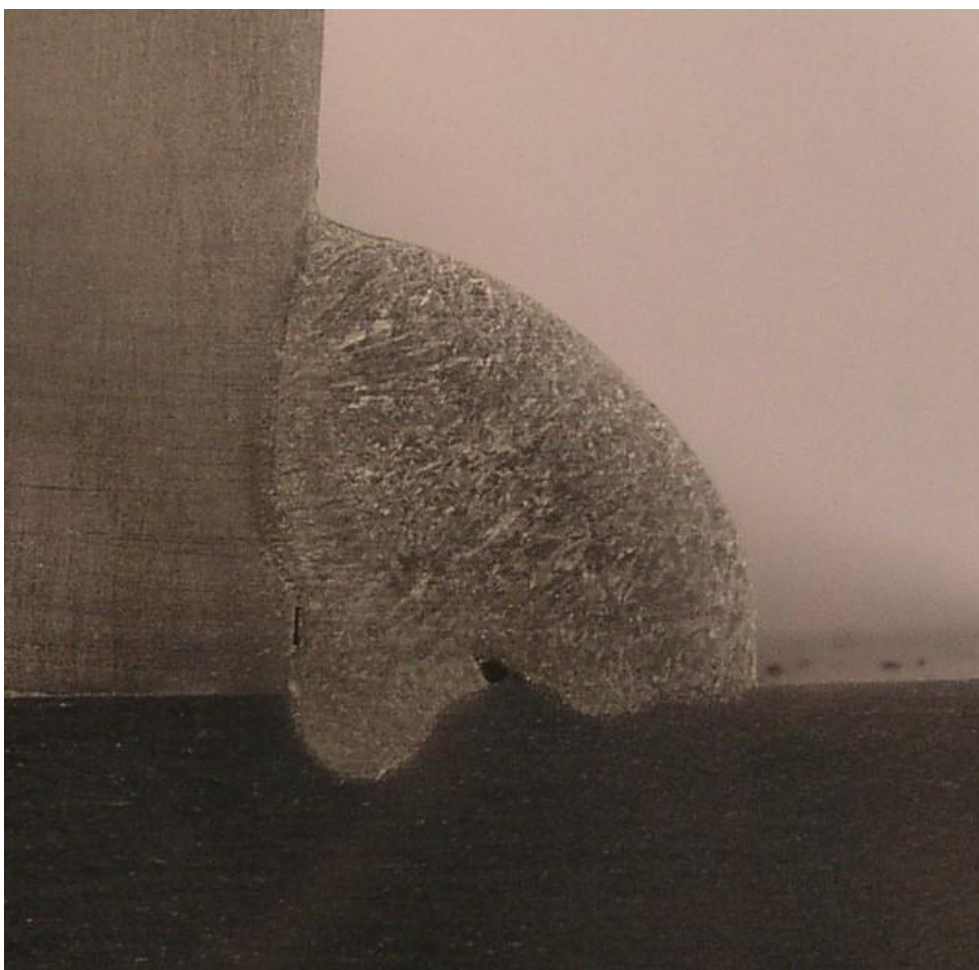
Slika 45 Makroizbrusak - slika 2

Rezultat premale jakosti struje je slabo zagrijavanje bez pretaljivanja površine spoja, pa talina dodatnog materijala naliježe bez dovoljnog strukturnog povezivanja. Uslijed toga, dolazi do pogreške naljepljivanja (oznaka EN 4011) na vertikalnom osnovnom materijalu. Također, zbog loše pripreme spoja dolazi do smaknuća na spoju dijelova osnovnih materijala. Presjek zavora ima konveksan oblik.



Slika 46 Makroizbrusak - uzorak 3

Presjek zavora pokazuje prstoliki oblik metala zavora veće penetracije u odnosu na uzorak broj 1. Povećana penetracija karakteristična je kod plinskih mješavina sa udjelom CO₂. Zavar ima ravnu površinu bez vidljivih grešaka. Jedina grešaka koja se pojavila je smaknuće osnovnih materijala zbog loše pripreme.

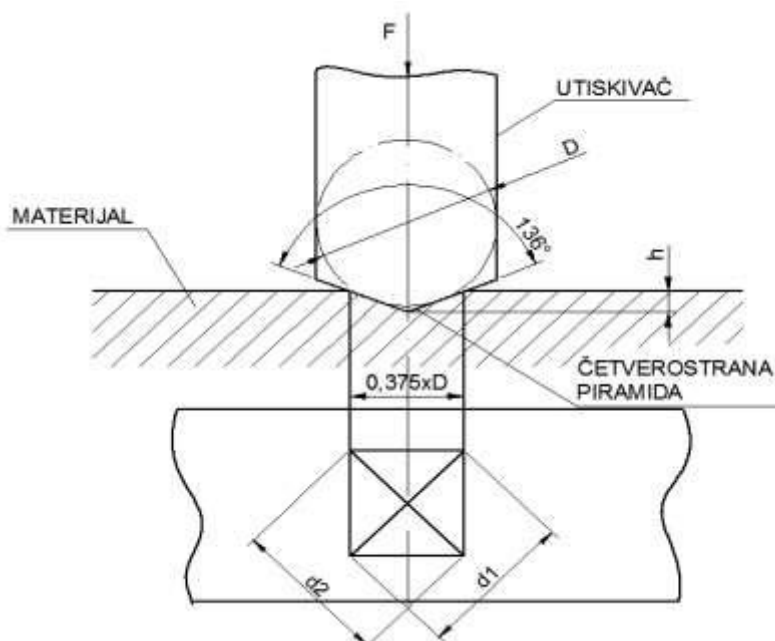


Slika 47 Makroizbrusak - uzorak 4

Zbog niskog unosa topline, također je došlo do nalijepljenja na vertikalnoj strani kao i pri već spomenutom uzorku broj 2. Nadalje, vidljiva je šupljina na horizontalnoj strani nastala zbog loše međuprolazne pripreme spoja. Prema slici 47 vidi se izraženija konveksnost presjeka zavora zbog prekratkog zadržavanja luka prilikom njihavanja na rubovima te se talina nije dovoljno razlijala po cijeloj širini zavora.

6.11. Mjerenje tvrdoće metodom Vickers

Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće (slika 48.) je univerzalna te su uklonjeni glavni nedostaci koji se javljaju kod Brinellove metode kao što su ograničeno područje mjerenja tvrdoća i ovisnost tvrdoće o sili utiskivanja.



Slika 48. Vickersova metoda ispitivanja tvrdoće [24]

Ova metoda se koristi za mekane i tvrde materijale, a kao penetrator koristi četverostranu istostraničnu dijamantnu piramidu vršnim kutom od 136. Ispitni uzorci na kojima se ispituje tvrdoća moraju imati glatku ravnu površinu bez oksida, stranih tijela i maziva osim u slučaju kada je to drugačije propisano standardima proizvoda koji se ispituju.

Za očitavanje rezultata koristi se mjerni mikroskop kojim se očitavaju duljine dijagonala otiska, a ispitna površina mora biti brižljivo pripremljena. Trajanje opterećenja iznosi od 10 sek do 15 sek, a za mekše materijale može trajati i dulje [24].

Kod Vickersove metode površina otisnuća se računa pomoću dijagonale d koja je dobivena kao srednja vrijednost između dviju očitanih dijagonala:

$$HV = \frac{0,189 \cdot F}{d^2}$$

Prednosti Vickersove metode [24]:

- nakon mjerenja ostaje malen otisak pa se jako ne oštećuje površina
- mogućnost mjerenja vrlo tankih uzoraka
- metoda je neovisna o mjernoj sili.

Nedostaci Vickersove metode [24]:

- potreba za fino obrađenom površinom
- potreban je mjerni mikroskop za mjerenje dijagonale otiska.

Za potrebe ovog rada, mjerenje tvrdoće HV10 provedeno je u Laboratoriju za zavarivanja, na uređaju Reichert (slika 49).



Slika 49. Uređaj za mjerenje tvrdoće

Postupak mjerenja tvrdoće započinje stezanjem uzorka u škripac na uređaju. Zatim, potrebno je podesiti odgovaraju visinu uzorka, tj. koristeći grubi i fini fokus uzorak se pozicionira po vertikalnoj osi na potrebnu visinu na kojoj se jasno vidi mikrostruktura uzorka. Nakon fokusiranja, pomoću 2 mikrometra uzorak se pozicionira u horizontalnoj ravnini u željenu točku mjerenja. Pri odabranoj točki mjerenja, gornji dio uređaja zakrene se za 90° te se tako prebaci iz položaja sustava za mjerenje u položaj mehanizma za opterećivanje dijamantne

čtetverostrane piramide. Okretanjem ručke, obavlja se se penetracija indentora u uzorak koja traje oko 10 sekundi. Po završetku penetracije, ručka se vraća u prvobitni položaj, kao i gornji dio uređaja. Pomoću mikroskopa očitaju se vrijednosti dijagonala u vertikalnom i horizontalnom smjeru te prema tim vrijednostima izračuna se srednja vrijednost dijagonala koja služi za izračunavanje vrijednosti tvrdoće po Vickersu.

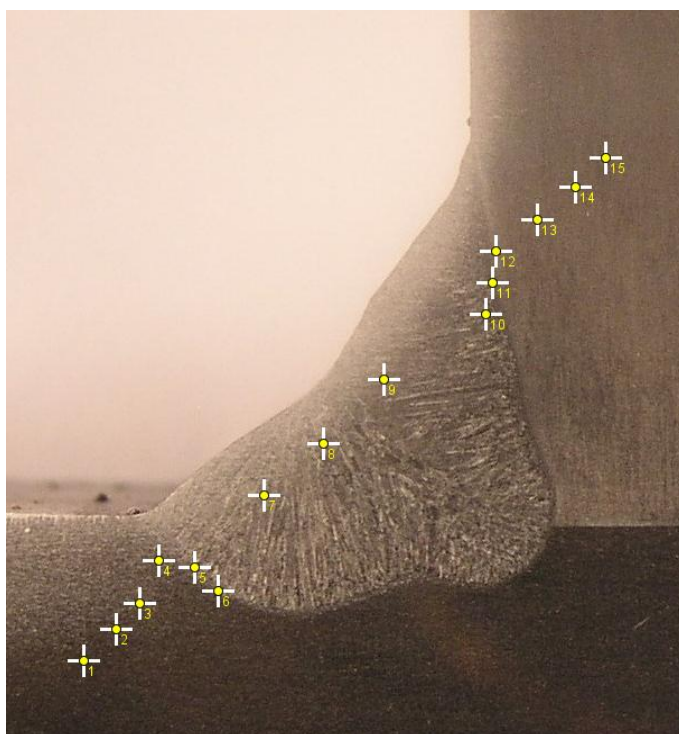
Mjerenje makrotvrdoće (slika 50.) na uzorcima 1, 2, 3 i 4 provedeno je u 15 različitih točaka na svakom uzorku, po zacrtanoj liniji koja je pod 45° u odnosu na ravninu horizontalnog osnovnog materijala.



Slika 50. Pozicioniranje točke mjerenja tvrdoće

Napravljena su po 3 mjerenja horizontalno i vertikalno u osnovnom materijalu, po 3 mjerenja u zoni utjecaja topline horizontalno i vertikalno i 3 mjerenja u samom metalu zavora.

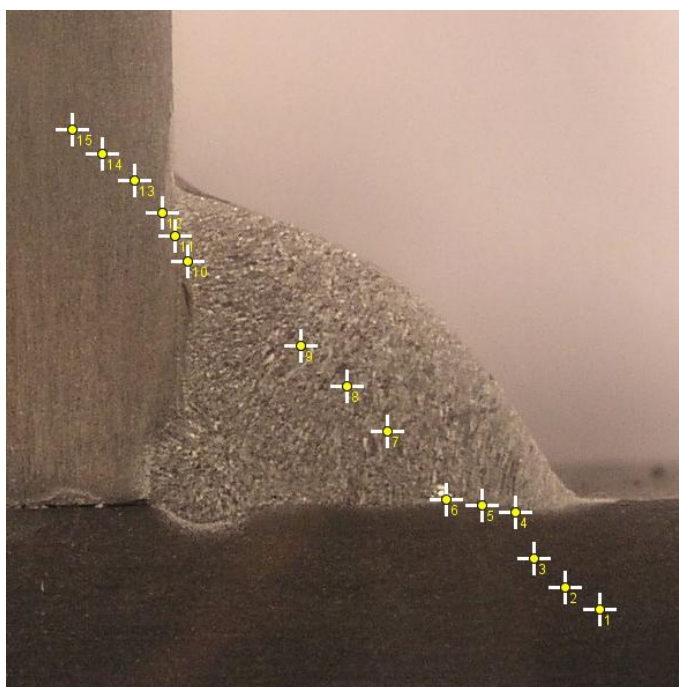
Slikama 51 - 54 prikazane su pozicije mjerenja tvrdoće po presjeku kutnog zavarenog spoja, dok su tablicama 16 - 19 prikazane srednje vrijednosti dijagonala otiska četverostrane piramide i pripadajuća vrijednost tvrdoće HV 10.



Slika 51. Pozicije mjerenja tvrdoće na uzorku 1

Tablica 16 Vrijednosti tvrdoće na uzorku 1

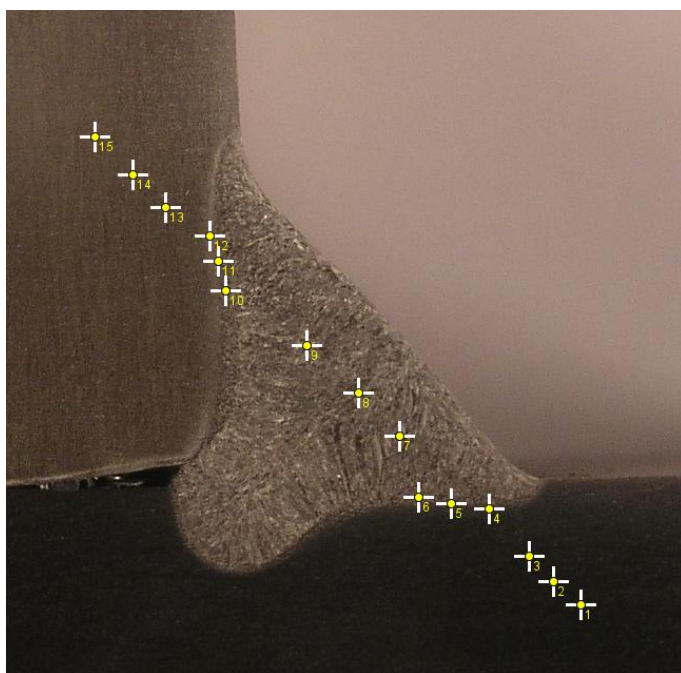
Točka	Srednja vrijednost dijagonale, mm	Vrijednost HV10	Područje mjerenja
1	0,242	317	Osnovni materijal
2	0,242	317	
3	0,241	319	
4	0,234	339	ZUT
5	0,231	348	
6	0,236	333	
7	0,233	342	Metal zavara
8	0,231	348	
9	0,232	345	
10	0,232	345	ZUT
11	0,233	342	
12	0,233	342	
13	0,239	325	Osnovni materijal
14	0,240	322	
15	0,243	314	



Slika 52. Pozicije mjerenja tvrdoće na uzorku 2

Tablica 17 Vrijednosti tvrdoće na uzorku 2

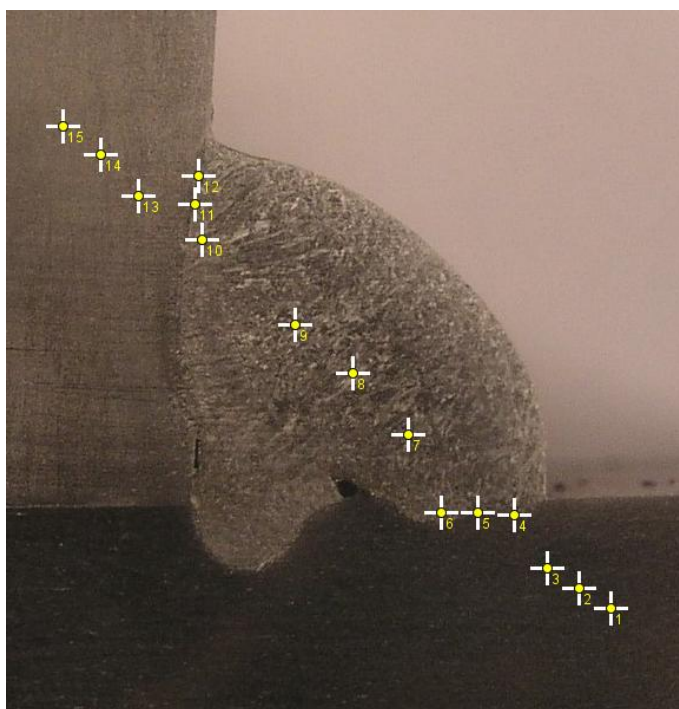
Točka	Srednja vrijednost dijagonale, mm	Vrijednost HV10	Područje mjerenja
1	0,246	306	Osnovni materijal
2	0,248	302	
3	0,245	309	
4	0,248	302	ZUT
5	0,246	306	
6	0,244	312	
7	0,248	302	Metal zavara
8	0,240	322	
9	0,242	317	
10	0,235	336	ZUT
11	0,238	327	
12	0,237	330	
13	0,236	333	Osnovni materijal
14	0,237	330	
15	0,242	317	



Slika 53. Pozicije mjerenja tvrdoće na uzorku 3

Tablica 18 Vrijednosti tvrdoće na uzorku 3

Točka	Srednja vrijednost dijagonale, mm	Vrijednost HV10	Područje mjerenja
1	0,242	317	Osnovni materijal
2	0,244	312	
3	0,245	309	
4	0,243	314	ZUT
5	0,240	322	
6	0,241	319	
7	0,238	327	Metal zavora
8	0,232	345	
9	0,239	325	
10	0,237	330	ZUT
11	0,237	330	
12	0,238	327	
13	0,241	319	Osnovni materijal
14	0,245	309	
15	0,245	309	



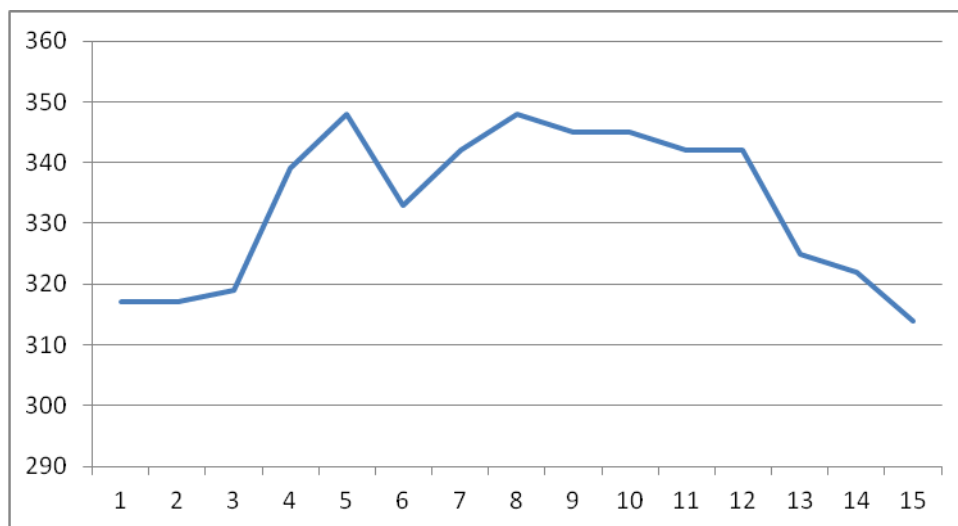
Slika 54. Pozicije mjerenja tvrdoće na uzorku 4

Tablica 19 Vrijednosti tvrdoće na uzorku 4

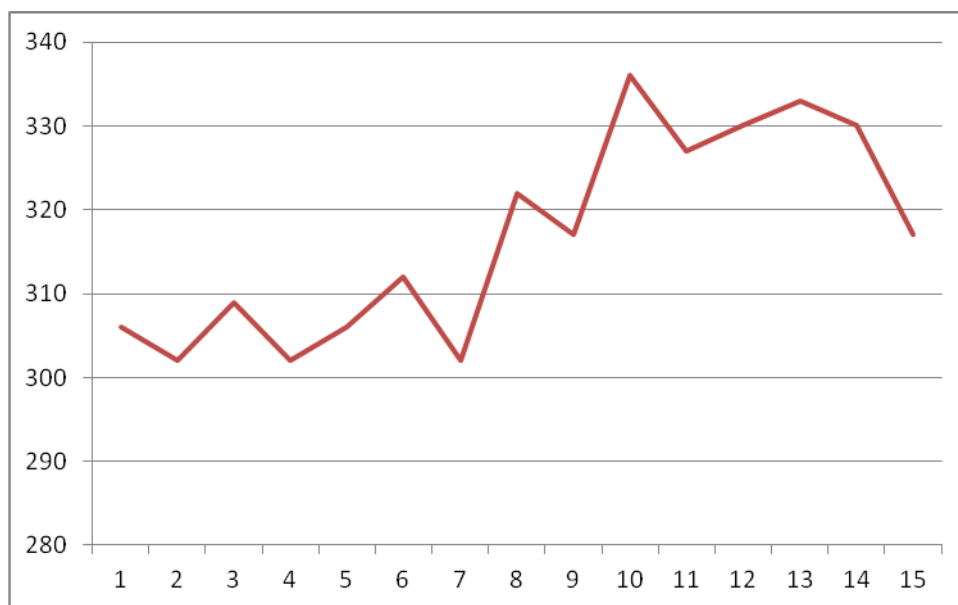
Točka	Srednja vrijednost dijagonale, mm	Vrijednost HV10	Područje mjerenja
1	0,246	306	Osnovni materijal
2	0,243	314	
3	0,245	309	
4	0,243	314	ZUT
5	0,237	330	
6	0,236	333	
7	0,242	317	Metal zavara
8	0,243	314	
9	0,244	312	
10	0,233	342	ZUT
11	0,236	333	
12	0,234	339	
13	0,236	333	Osnovni materijal
14	0,240	322	
15	0,238	327	

6.13. Analiza tvrdoće

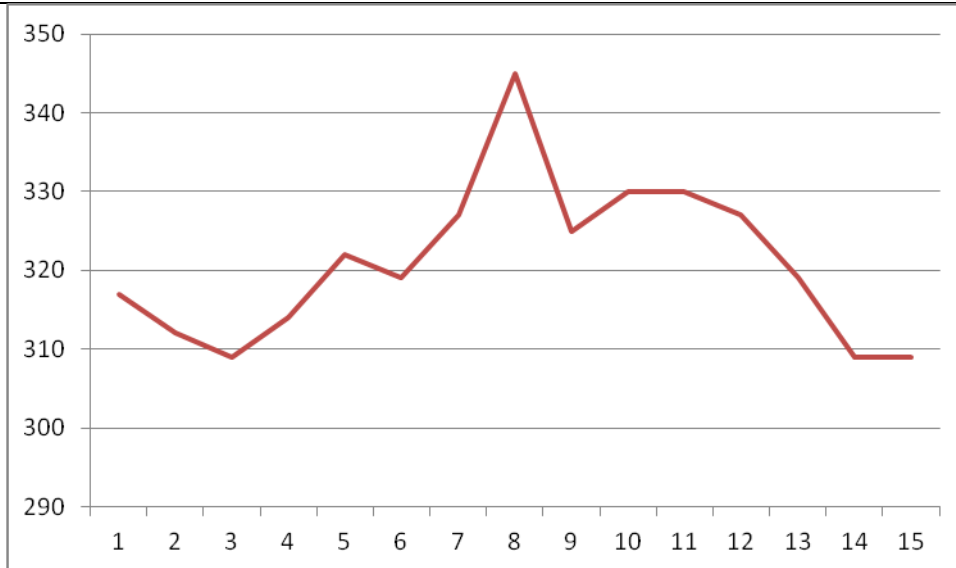
Slikama 55. - 58. grafički su prikazane vrijednosti tvrdoće iz tablica 16. - 19.



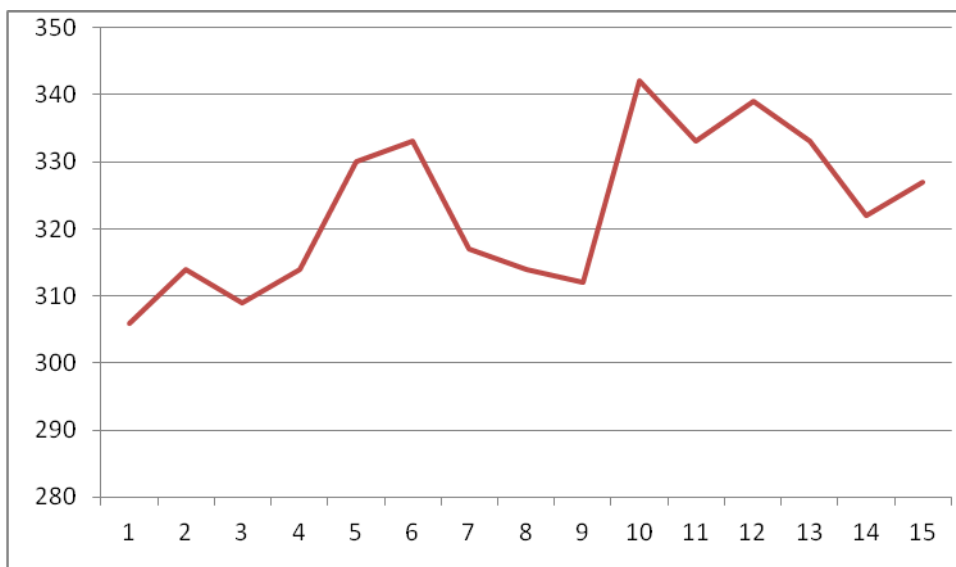
Slika 55. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoće na uzorku broj 1



Slika 56. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoće na uzorku broj 2



Slika 57. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoće na uzorku broj 3



Slika 58. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoće na uzorku broj 4

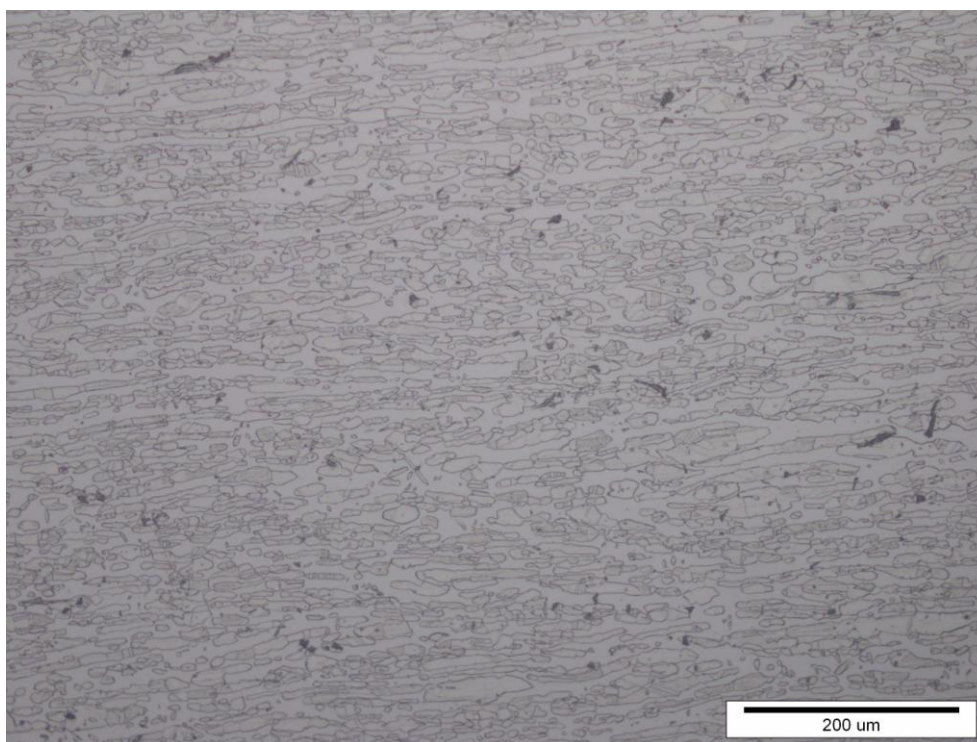
Prema slikama grafova vidi se da su tvrdoće osnovnog materijala 310 HV - 320 HV što je i karakteristično za dupleks čelik 2205. Usporedba grafova pokazuje da postoji povećanje tvrdoće u metalu zavara i zoni utjecaja topline u odnosu na osnovni materijal zbog nastale feritizacije, tj. povećanog udjela ferita u mikrostrukturi koji ima veću tvrdoću od austenita.

Pri ispitivanju tvrdoće nije bilo većih rasipanja rezultata ni izražajne razlike između pojedinih uzoraka.

6.14. Analiza mikrostrukture

Analiza mikrostrukture izrađena je pomoću svjetlosnog mikroskopa Olympus GX51 u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

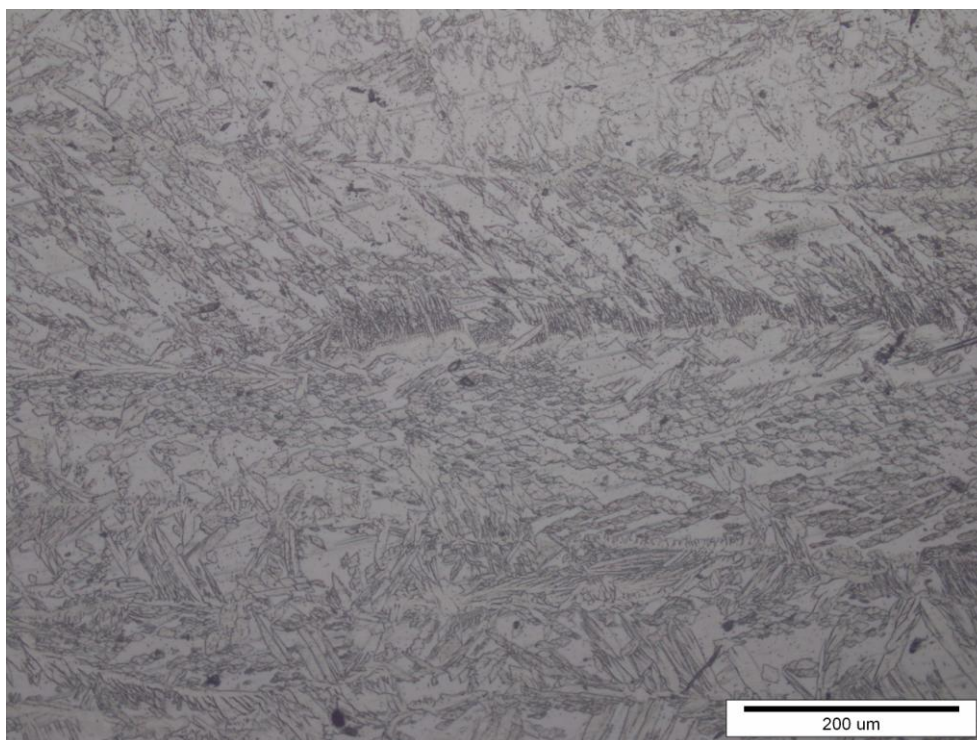
Na slici 59. prikazana je mikrostruktura osnovnog materijala. Slika je dobivena svjetlosnim mikroskopom s povećanjem od 200 puta. Struktura se sastoji od izduženih bazena ferita u austenitu. Pomoću programa ImageJ dobiveni je volumni odnos pojedinih faza koji pokazuje da se mikrostruktura korištenog dupleks čelika oznake 2205 sastoji od 60% ferita i 40% austenita.



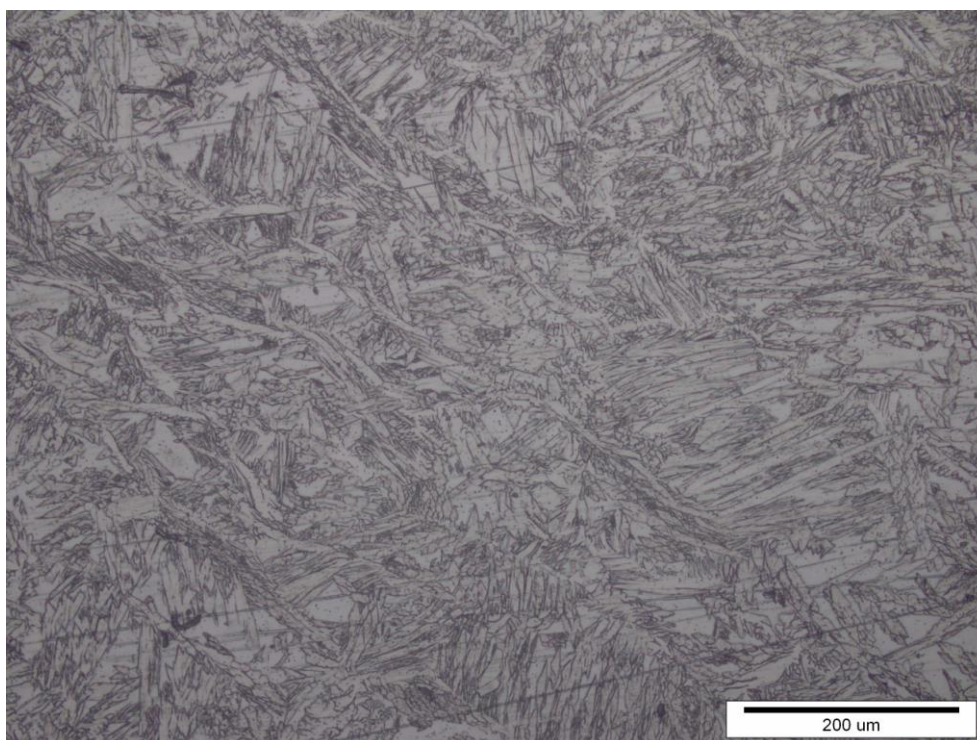
Slika 59. Mikrostruktura osnovnog materijala, povećanje 200 puta

Daljnjom analizom utvrđeni su odnosi udjela faza ferit - austenit metala zavara na svakom uzorku.

Na uzorku broj 1 (Slika 60) izmjereni volumni udio ferita iznosi 57%, a austenita preostalih 43%.

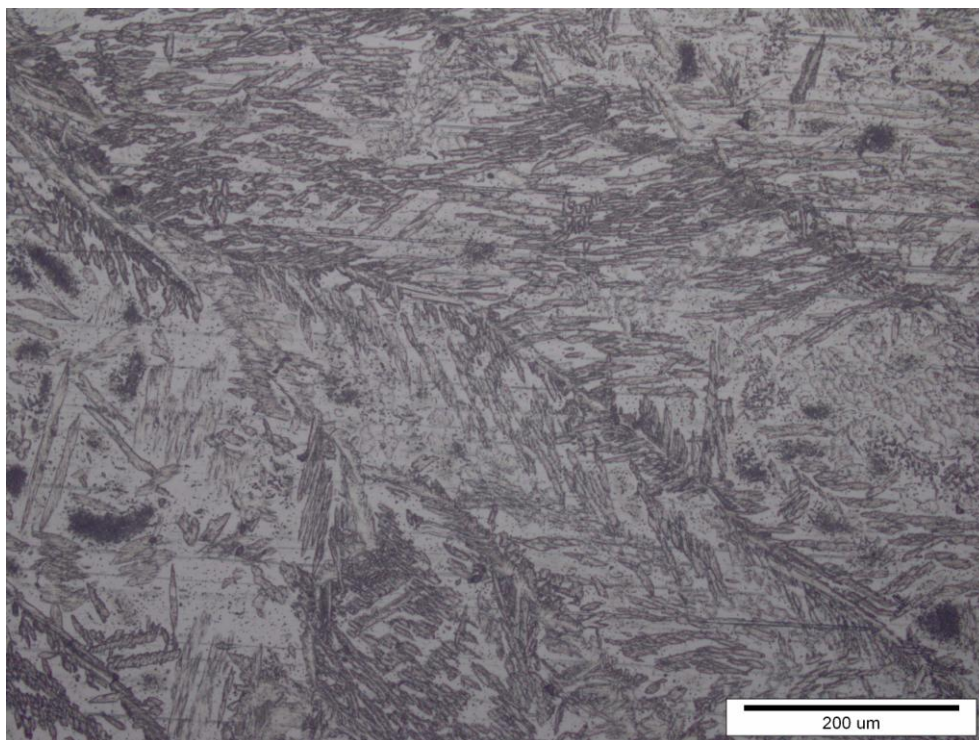


Slika 60. Mikrostruktura metala zavara na uzorku broj 1, povećanje 200 puta
Mikrostruktura drugog uzorka (Slika 61) sastoji se od 52% austenita i 48% ferita.



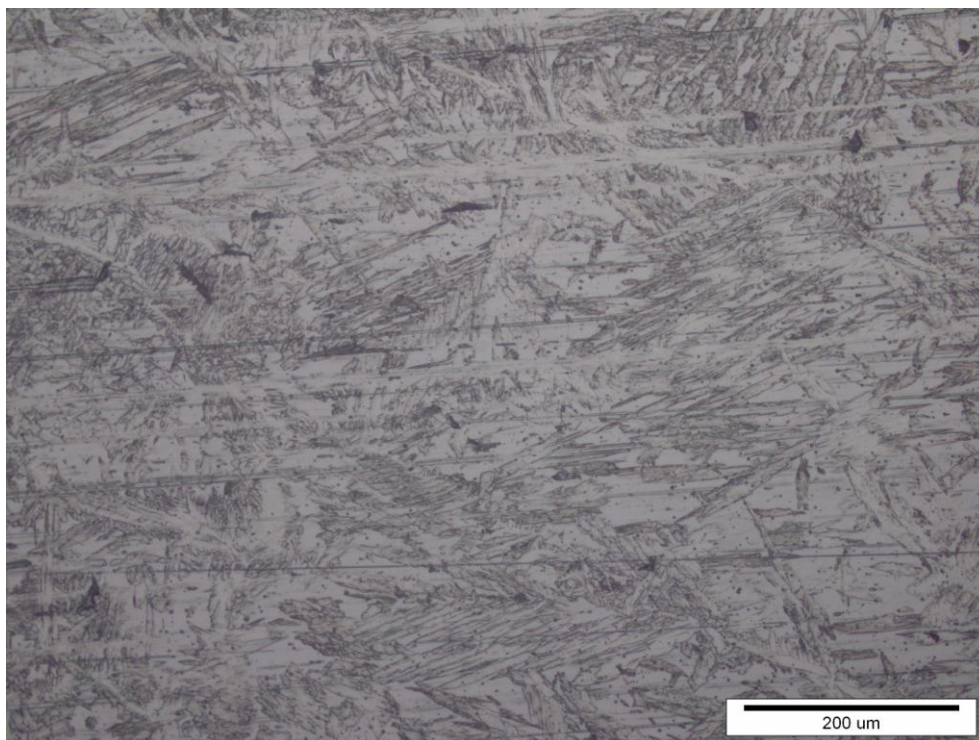
Slika 61. Mikrostruktura metala zavara na uzorku broj 2, povećanje 200 puta

Na slici 62 prikazana je mikrostruktura metala zavara uzorka broj 3. Izmjereni volumni udjeli faza iznose 45% austenita i 55% ferita.



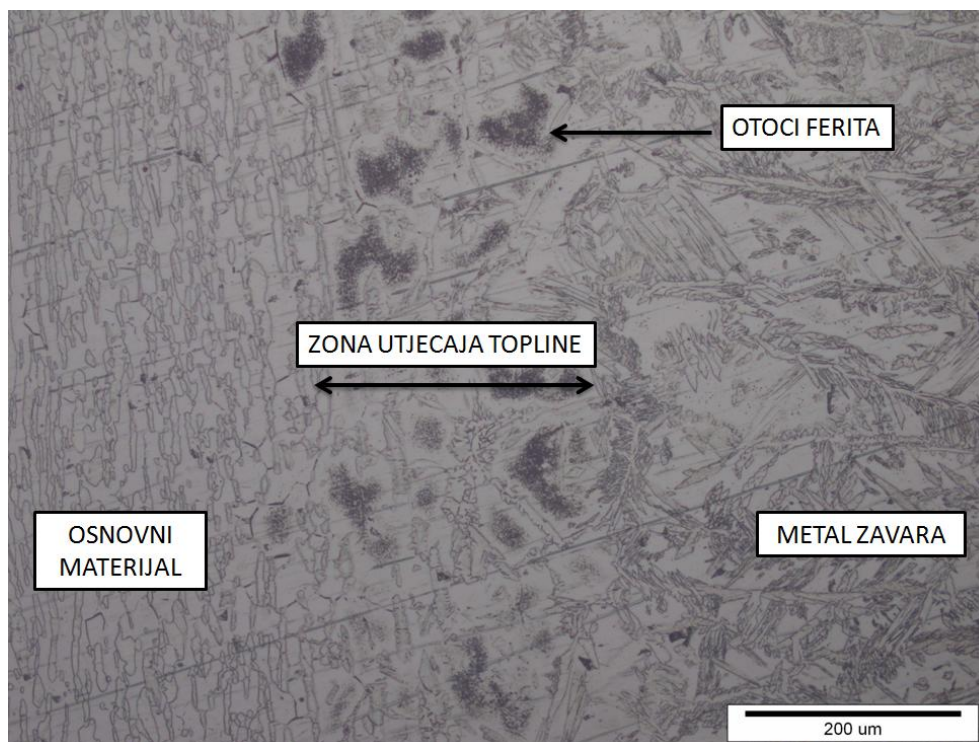
Slika 62. Mikrostruktura metala zavara na uzorku broj 3, povećanje 200 puta

Mikrostruktura metala zavara 4. uzorka (Slika 63) sastoji se od 53% ferita i 47% austenita.

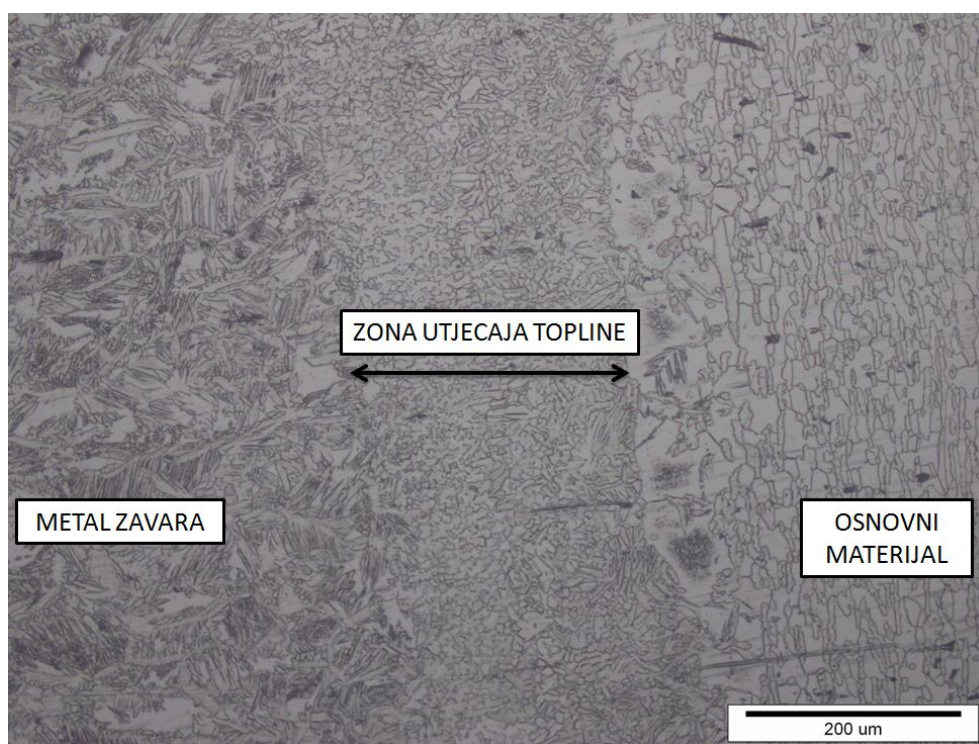


Slika 63. Mikrostruktura metala zavara na uzorku broj 4, povećanje 200 puta

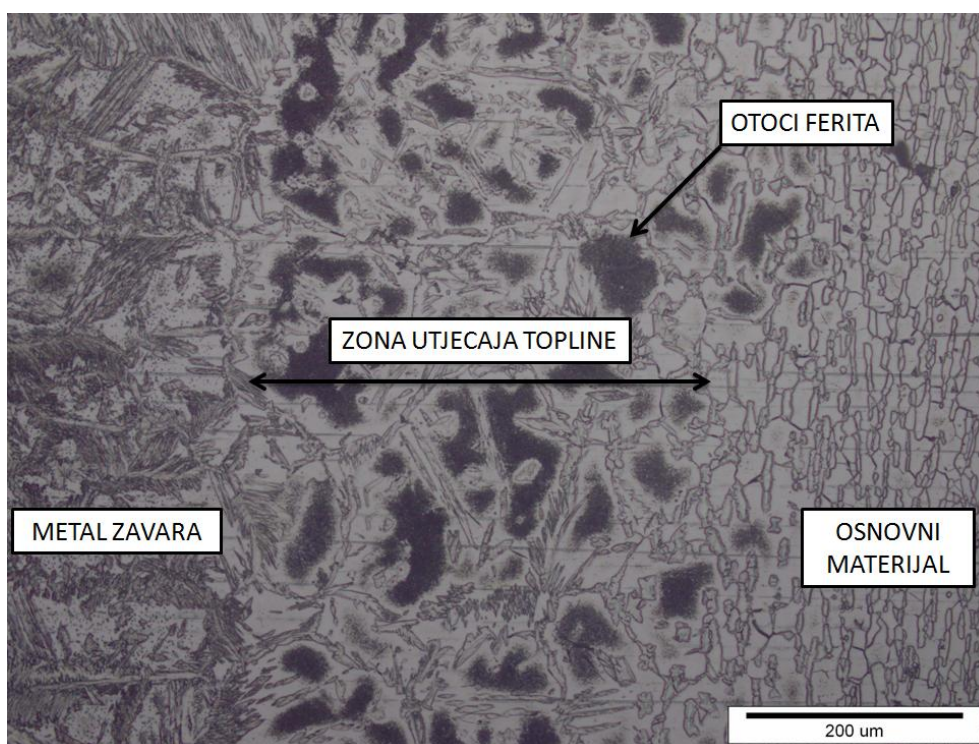
Uzorci 1 i 2 zavareni su u plinskoj zaštiti plina argona sa 2,5 % dušika, dok su uzorci 3 i 4 zavareni mješavinom argona sa 2,5 % ugljičnog dioksida. Kod svih uzoraka volumni udjeli faza nalaze se unutar graničnih 60 - 40 % austenita, odnosno 60 - 40 % ferita. Uspoređujući uzroke, može se uočiti da kod upotrebe plinske mješavine s dušikom dolazi do sitnijeg zrna. Slikama 64. - 67. prikazane su mikrostrukture zone utjecaja topline uzoraka 1, 2, 3 i 4 pri povećanju od 200 puta.



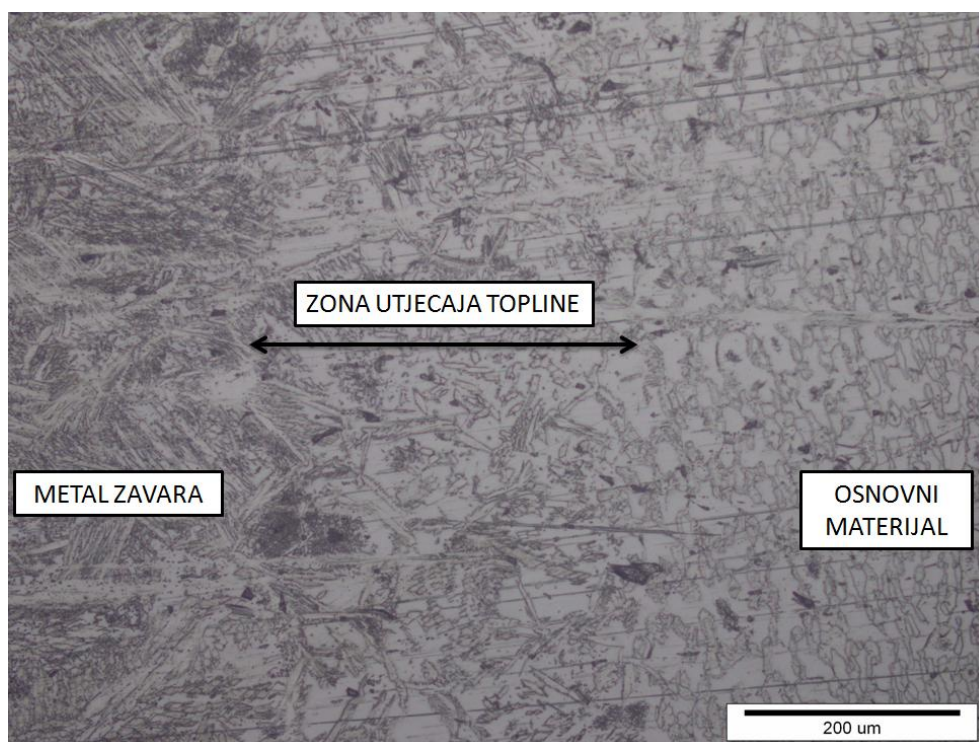
Slika 64. Mikrostruktura ZUT-a uzorka 1, povećanje 200 puta



Slika 65. Mikrostruktura ZUT-a uzorka 2, povećanje 200 puta



Slika 66. Mikrostruktura ZUT-a uzorka 3, povećanje 200 puta



Slika 67. Mikrostruktura ZUT-a uzorka 4, povećanje 200 puta

Nakon zavarivanja dolazi do promjene mikrostrukture osnovnog materijala u dendritnu strukturu grubljeg zrna metala zavora.

Uslijed brzog hlađenja kod jednoproložnog zavarivanja u zoni utjecaja topline (Slike 60 i 62) dolazi do pojave otoka ferita u matrici austenita. Ta pojava uzrokuje povećanje zrna što je loše po mehanička svojstva materijala.

Kod zavarivanja u 2 prolaza (Slike 60 i 63) ne dolazi do spomenute pojave povećanja zrna ferita, nego, naprotiv, dolazi do usitnjenja zrna što je izrazito dobro u pogledu mehaničkih svojstava zrna.

Širina zone utjecaja topline nešto je uža kod višeproložnog nego kod jednoproložnog zavarivanja.

7. ZAKLJUČAK

Broj robota u svijetu svaki dan se značajno povećava. U svrhu postizanja željene kvalitete, smanjenja troškova i povećanja konkurentnosti na tržištu, potrebno je dobro razumijevanje tehnologije zavarivanja. Proces zavarivanja je dio proizvodnje koji je vremenski najiscrpniji, pa je i time potreba za robotizacijom neizostavna u svakoj većoj proizvodnoj sredini. Postupak uvođenja automatizirane ili robotizirane proizvodnje je još uvijek skupa početna investicija, ali u tvornicama velikih serija je uvelike isplativa. Uz elektrootporno zavarivanje, MAG postupak spada u najpogodnije postupke zavarivanja koji se mogu robotizirati.

Uvođenje dušika u smjesu zaštitnog plina bila je prekretnica za početak primjene MAG zavarivanja dupleks čelika. Nakon toga, zbog odličnih svojstava, ovaj materijal postao je često korišteno rješenje za izradu konstrukcija gdje su zahtjevi za otpornosti na koroziju vrlo visoki, te su potrebna i dobra mehanička svojstva.

U eksperimentalnom dijelu provedeno je robotizirano MAG zavarivanje dupleks čelika oznake 2205 u dvije različite zaštitne plinske mješavine pri različitim unosima topline. Kod analize mikrostrukture vidljiva je razlika u materijalu kod višeprolaznog i jednoprolaznog zavarivanja. Jedna od glavnih nedostataka kod zavarivanja dupleks čelika je pojava feritizacije u zoni utjecaja topline. Prilikom analize mikrostrukture (Slike 64 i 66) vidljiva je pojava otoka ferita u matrici austenita. Kod jednoprolaznog zavarivanja nema te pojave. Naprotiv, uslijed manjeg unosa topline dolazi do usitnjenja zrna u zoni utjecaja topline.

Kod usporedbe djelovanja zaštitnih plinskih mješavina, može se vidjeti da kod korištenja mješavine argona s 2,5 % dušika dolazi do sitnijeg zrna metala zavara u odnosu na metal zavara dobiven u zaštiti plinske mješavine argona sa 2,5 % ugljičnog dioksida.

Operativne karakteristike procesa zavarivanja bolja su kod korištenja plinske mješavine argona sa dušikom iz razloga što se sami proces vodi uz stabilniji luk. Rasprskavanje metala tijekom zavarivanja u manjoj je mjeri izraženije kod mješavina sa CO₂.

Pošto je poželjnije da u metalu zavara, a posebno u zoni utjecaja topline mikrostruktura bude sitnijeg zrna, zaključujem da zaštitna plinska mješavina argona sa 2,5 % dušika daje bolje rezultate zavarivanja i nalazi veću primjenu.

LITERATURA

- [1] Kralj, S.; Kožuh, Z.; Andrić, Š.: "Zavarivački i srodni postupci", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2015.
- [2] Juraga, I.; Šimunović, V.; Stojanović, I.: „Zavarivanje Cr-Ni čelika, korozijska postojanost, rukovanje“, Seminar: „Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici)“, Pula 2007., s interneta, <http://www.dtzi.hr/upload/pdf/4.%20SEMINAR/1.%20RAD.pdf> dostupno 02.11.2017.
- [3] Rede, V.: "Utjecaj mikrostrukture zavora dupleks čelika na otpornost prema trošenju", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2004.
- [4] Filetin, T.; Kovačiček, F.; Indof, J.: "Svojstva i primjena materijala", Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [5] Stainless steels; <http://www.acroni.si/assets/Uploads/Stainless-steels-Acroni.pdf> ; dostupno 02.11.2016.
- [6] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1357631301-0-ssnc_9i10_pred_tekst.pdf ; dostupno 03.11.2017.
- [7] Novosel M., Juraga I.; "Austenitno-feritni čelici otporni na djelovanje korozije (čelici duplex), Časopis Zavarivanje 35 (1992) 18-36.str. i 85-97str.
- [8] Juraga I.; "Zavarivanje visokolegiranih čelika", Zbornik radova 1993. 143-167str.
- [9] Smojver A.; "Podvodno zavarivanje u otežanim uvjetima", Zbornik radova 1998.; 116-127.str.
- [10] Kordatos J.D., Fournalis G., Papadimitriou G.; "The effect of cooling rate on the mechanical and corrosion properties of SAF 2205 (UNS 3183) duplex stainless steel welds", Duplex Stainless Steels 97-5th World Conference, 401-406str.
- [11] Ptičar, M.: "MAG CBT zavarivanje visokolegiranih Cr-Ni čelika", Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2016.
- [12] Juraga, I., Ljubić, K., Živčić, M.; Pogreške u zavarenim spojevima, treće izdanje, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2007.
- [13] M. Suban, J. Tušek: Osnovne značilnosti zaščitnih plinov in njihovih mašanic za MIG/MAG varjenje, 1. del, Varilna tehnika, (1997) 1, pp 11-17
- [14] Garašić, Ivica: Zavarivanje u plinskoj zaštiti, tema 1.6, predavanje za specijalizaciju koordinatora zavarivanja, Zagreb, 2010.

-
- [15] Gojić M., Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sveučilište u Zagrebu metalurški fakultet, Sisak, 2003.
- [16] <http://www.messer.hr/products/index.html>, dostupno: 12.11.2017.
- [17] Ciglar I., Botak Z., Upravljanje i primjena robota "REIS ROBOTICS RV6L", Sveučilište u Varaždinu, Varaždin
- [18] M. Olsson; Simulation and execution of autonomous robot systems; Phd Thesis, Department of Mechanical Engineering, Lund University, Lund, Sweden, 2002.
- [19] http://www.varstroj.si/varstroj_files/pdf/VarstrojKatalogHR.pdf ; dostupno 20.11.2017.
- [20] <http://www.otc-daihen.de/index.php?id=2518> ; dostupno 20.11.2017.
- [21] Juraga, I.; Stojanović, I.; Ljubenković, B.: "Experimental research of the duplex stainless steel welds in shipbuilding", Review paper, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2014.
- [22] http://www.tachen.com/catalog/pdf/stainless/product_overview.pdf ; dostupno 21.11.2017.
- [23] <http://www.messer.hr/products/plinoviubocama/tabzavrez.pdf> ; dostupno 21.11.2017.
- [24] Vitez, Ivan: Ispitivanje mehaničkih svojstava metalnih materijala. Slavonski Brod; Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2006.

PRILOZI

I. CD-R disc