Primjena dupleks čelika za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom

Uđbinac, Domagoj

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:460700

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-05-14**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Domagoj Uđbinac

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić Domagoj Uđbinac

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivicu Garašiću na savjetima i primjedbama tijekom izrade ovog rada.

Posebno hvala asistentu Ivanu Juriću, mag. Ing. Mech., na svim savjetima, kritikama i pruženoj pomoći tijekom izrade rada.

Zahvaljujem svim djelatnicima Laboratorija za zavarivanje, Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava, Laboratorija za strojnu obradu i Laboratoriju za nerazorna ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje na pomoći i strpljenju pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Također, zahvaljujem svim kolegama i prijateljima koji su mi na bilo koji način pomogli tijekom studija.

Domagoj Uđbinac

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: **Domagoj Uđbinac** Mat. br.: 0035188517

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena dupleks čelika za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of Duplex Steel for Wire Arc Additive Manufacturing**

Opis zadatka:

Opisati osnovna načela proizvodnje električnim lukom i žicom te posebno analizirati primjenu postupaka TIG i MAG. Proučiti zavarljivost dupleks čelika i kritički razmotriti mogućnost primjene za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom. Pretpostaviti kritične elemente tehnologije zavarivanja sa stanovišta postizanja ujednačene austenitno-feritne mikrostrukture. Dodatno naznačiti utjecaj zaštitnog plina na stupanj feritizacije navarenog sloja.

U eksperimentalnom dijelu za dodatni materijal kvalitete 1.4462 promjera 1,2 mm odrediti operativno područje parametara u području kratkih spojeva za više zaštitnih plinskih mješavina. Primjenom MAG postupka načiniti uzorke odgovarajućih dimenzija te provesti prikladna nerazorna i razorna ispitivanja. Zaključno definirati optimalnu kombinaciju parametara i zaštitnog plina za dobivanje ujednačene austenitno-feritne mikrostrukture u navarenom metalu.

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

Zadatak zadan:	Rok predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
11. svibnja 2017.	13. srpnja 2017.	19., 20. i 21. srpnja 2017.

Zadatak zadao: Predsjednica Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić Prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ I
POPIS SLIKA III
POPIS TABLICA VI
POPIS KRATICA VII
POPIS OZNAKA IX
SAŽETAK X
SUMMARY XI
1. UVOD 1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA 2
2.1. Aditivna proizvodnja materijala 6
2.2. WAAM 8
2.2.1. Materijali kod WAAM-a 11
2.3. Problematika WAAM postupka 12
2.3.1. Zaostala naprezanja i deformacije 12
2.3.2. Točnost i kvaliteta površine 13
2.3.3. Greške 14
3. POSTUPCI ZAVARIVANJA 15
3.1. MIG/MAG 15
3.1.1. Način prijenosa metala kod MIG/MAG postupka 17
3.1.1.1. Prijenos metala kratkim spojevima 17
3.1.1.2. Prijenos materijala prijelaznim lukom 18
3.1.1.3. Prijenos materijala štrcajućim lukom 20
3.1.1.4. Prijenos materijala impulsnim lukom 21
3.2. TIG 22
3.2.1. Oprema za TIG 23
3.2.1.1. Izvor struje 23
3.2.1.2. Pištolj za zavarivanje 24
3.2.1.3. Sapnica za zaštitni plin 24
3.2.1.4. Netaljiva volframova elektroda 25
3.3. Primjena MIG/MAG i TIG postupaka kod WAAM-a 26
4. DUPLEKS ČELICI 27
4.1. Mikrostruktura 28
4.2. Podjela i svojstva dupleks čelika 30
4.2.1. Legirni elementi 32
4.2.1.1. Krom 32
4.2.1.2. Nikal 32
4.2.1.3. Dušik 32
4.2.1.4. Molidben 32
4.3. Mehanička svojstva 35

4.4. Korozijska postojanost ... 36
4.4.1. Napetosna korozija ... 37
4.4.2. Rupičasta korozija ... 38
4.5. Primjena ... 38
4.5.1. Nafta i plin ... 39
4.5.2. Celuloza i papir ... 39
4.5.3. Desalinizacija ... 40
5. METALURŠKI ASPEKTI ZAVARIVANJA ... 41
5.1. Solidifikacija ... 41
5.2. Uloga dušika ... 42
5.3. Sekundarni austenit ... 43
5.4. Zona utjecaja topline ... 44
6. ZAVARLJIVOST ... 46
6.1. Solidifikacijske pukotine metala zavara ... 46
6.2. Vodikove pukotine ... 46
6.3. Srednje temperaturno očvrsnuće ... 47
6.3.1. Očvrsnuće α'-fazom ... 47
6.3.2. Očvršćivanje sigma-fazom ... 48
7. EKSPERIMENTALNI RAD ... 49
7.1. Opis eksperimenta ... 49
7.2. Oprema za zavarivanje ... 49
7.3. Podloga i dodatni materijal ... 51
7.3.1. Dodatni materijal ... 52
7.4. Zaštitni plinovi ... 53
7.5. Trajektorije putanja alata ... 54
7.6. Parametri zavarivanja ... 54
7.7. Priprema i izrada ispitnih uzoraka ... 64
7.8. Provedba ispitivanja ... 70
7.8.1. Radiografija ... 70
7.8.2. Mjerenje tvrdoće ... 74
7.8.3. Makrostruktura i mikrostruktura ... 75
7.8.4. Statički vlačni pokus ... 82
7.8.5. Ispitivanje udarnog rada loma ... 85
7.9. Analiza rezultata ... 87
8. ZAKLJUČAK ... 94
LITERATURA ... 96
PRILOZI ... 99

POPIS SLIKA

Slika 1. Ilustracija slaganja slojeva u aditivnoj proizvodnji [3] 2
Slika 2. Područja primjene aditivne proizvodnje [6] 3
Slika 3. Koraci u aditivnoj proizvodnji kod većine postupaka [5] 5
Slika 4. Podjela aditivnih postupaka [8] 6
Slika 5. Položaj aditivne proizvodnje metalnih materijala u odnosu na ostale tehnologije [9] 7
Slika 6. Prikaz aditivnih tehnologija za metale [10] 7
Slika 7. Proizvodi dobiveni taloženjem rastaljenog materijala sloj na sloj [11] 8
Slika 8. Oprema za WAAM [12] 9
Slika 9. a) uređaj za lokalnu zaštitu; b) zaštitni šator [14] 9
Slika 10. Prednosti i nedostaci različitih aditivnih postupaka [11] 10
Slika 11. Shema valjanja slojeva [16] 12
Slika 12. Rezanje modela na slojeve: a) originalni model, b) model s konstantnom debljinom slojeva, c) model s varijabilnom debljinom slojeva prilagođenoj veličini modela [9] 13
Slika 13. Presjek WAAM zida [16] 14
Slika 14. Oprema za zavarivanje [17] 16
Slika 15. Prikaz faza prijenosa kapljica metala električnim lukom kratkog spoja [19] 17
Slika 16. Prikaz faza prijenosa materijala prijelaznim lukom [20] 19
Slika 17. Prijenos metala štrcajućim lukom [20] 20
Slika 18. Prijenos kapljica metala impulsnim lukom [19] 21
Slika 19. Oprema za ručno TIG zavarivanje [22] 23
Slika 20. Presjek pištolja za TIG zavarivanje sa sustavom hlađenja s rashladnom tekućinom [21] 24
Slika 21. Izvedbe sapnica: a) konusni oblik, b) cilindrični oblik, c) profilni oblik [22] 25
Slika 22. a) shematski prikaz slaganja slojeva, b) oprema za zavarivanje MAG postupkom [25] 26
Slika 23. a) prikaz robotiziranog sustava za TIG, b) shematski prikaz pištolja za zavarivanje i dodatnog materijala [26] 26
Slika 24. Dvofazna mikrostruktura dupleks čelika [29] 28
Slika 25. Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70 % Fe=konst. [30] 29
Slika 26. Promjene udjela ferita za nekoliko dupleks čelika ovisno o temperaturi [27] 29
Slika 27. Shematski prikaz tipičnih precipitacija u dupleks čelicima [30] 30
Slika 28. Ovisnost udjelnog koeficijenta o temperaturi [27] 31
Slika 29. Smještaj dupleks čelika u Schaefflerovom dijagramu [30] 33
Slika 30. Utjecaj hladne deformacije na mehanička svojstva dupleks čelika 1.4462 [27] ... 36
Slika 31. Otpornost prema napetosnoj koroziji u ovisnosti o temperaturi i koncentraciji kloridnih iona [28] 37
Slika 32. Offshore konstrukcija s dijelovima izrađenima od dupleks čelika [35] 39
Slika 33. Mikrostruktua metala zavara: a) Visoki udio ferita b) Srednji udio ferita [36] 42
Slika 34. Ovisnost topljvosti dušika o temperaturi [36] 42
Slika 35. Ciklus promjene mikrostrukture u ZUT-u [36] 44
Slika 36. Utjecaj unosa topline na rast zrna ferita [36] 45

Slika 37. Model nastanka i rasta sigma faze (a) Sigma faza po granicama ferit/austenit (b) [28] ... 48
Slika 38. Robotska stanica Almega OTC AX V6 [7] ... 50
Slika 39. Generirani program ... 51
Slika 40. Pričvršćivanje ploče prije zavarivanja ... 51
Slika 41. Boce sa zaštitnim plinovima ... 53
Slika 42. Trajektorije putanja alata ... 54
Slika 43. Uzorak 1 – 2. prolaz ... 59
Slika 44. Uzorak 1 – 5. prolaz ... 60
Slika 45. Uzorak 1 – 30. prolaz ... 60
Slika 46. Uzorak 1 – detaljniji prikaz površine ... 61
Slika 47. Uzorak 2 – 1. prolaz ... 62
Slika 48. Uzorak 2 – 30. prolaz ... 62
Slika 49. Uzorak 3 – 5. prolaz ... 63
Slika 50. Uzorak 3 – 30. prolaz ... 63
Slika 51. Uzorak 4 – 4. prolaz ... 64
Slika 52. Uzorak 4 – 30. prolaz ... 64
Slika 53. Shema za izrezivanje uzorka za mikrostrukturu ... 65
Slika 54. Uzorak pričvršćen u nosaču uređaja za nagrizanje ... 66
Slika 55. Uzorci nakon nagrizanja ... 66
Slika 56. Shema rezanja zida ... 67
Slika 57. Odrezani zid s podloge za navarivanje ... 67
Slika 58. Uzorak nakon poravnavanja površine i izrezivanja segmenata za daljnju obradu 67
Slika 59. Dimenzije ispitnih epruveta: a) prije ispitivanja; b) nakon ispitivanja [41] ... 68
Slika 60. Skica epruveta za ispitivanje udarnog rada loma s označenim ključnim veličinama [42] ... 69
Slika 61. Ispitne epruvete za statički vlačni pokus i udarni rad loma ... 70
Slika 62. Postav uzoraka za radiografsko ispitivanje ... 71
Slika 63. Detalj radiografske snimke uzorka C2 ... 72
Slika 64. Detalj radiografske snimke uzorka N2 ... 72
Slika 65. Detalj radiografske snimke uzorka X3 ... 73
Slika 66. Detalj radiografske snimke uzorka C6X1 ... 73
Slika 67. Raspored točaka mjerenja tvrdoće ... 74
Slika 68. Makroizbrusak uzorka C2 i područja slikanja mikrostrukture ... 76
Slika 69. Makroizbrusak uzorka C6X1 ... 76
Slika 70. Makroizbrusak uzorka N2 ... 76
Slika 71. Makroizbrusak uzorka X3 ... 76
Slika 72. Epruvete nakon ispitivanja ... 82
Slika 73. Dijagram sila-produljenje uzorka C6X1 ... 83
Slika 74. Dijagram sila-produljenje uzorka C2 ... 84
Slika 75. Dijagram sila-produljenje uzorka X3 ... 84
Slika 76. Dijagram sila-produljenje uzorka N2 ... 85
Slika 77. Usporedba prirasta visine ... 87
Slika 78. Usporedba kretanja jakosti struje ... 88
Slika 79. Usporedba vrijednosti napona tijekom zavarivanja ... 89
Slika 80. Usporedba unosa topline za svaki prolaz ... 90
Slika 81. Usporedba tvrdoća svih uzoraka ... 91
Slika 82. Usporedba $R_{p0,2}$ i R_m za sve uzorke ... 91
Slika 83. Usporedba maksimalnih i prekidnih sila ... 92

Slika 84. Usporedba duljina epruveta nakon ispitivanja 92
Slika 85. Usporedba udarnog rada loma..... 93

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prednosti i nedostaci AM-a s tehnološkog i ekonomskog gledišta [7] 4
Tablica 2. Materijali kod WAAM-a [7] 11
Tablica 3. Greške WAAM postupka [7] 14
Tablica 4. Oznake i kemijski sastav dupleks čelika po grupama [28] 34
Tablica 5. Mehanička svojstva nehrđajućih dupleks čelika [28] 35
Tablica 6. Karakteristike izvora struje [37] 50
Tablica 7. Kemijski sastav dodatnog materijala [40] 52
Tablica 8. Mehanička svojstva dodatnog materijala [40] 52
Tablica 9. Mješavine zaštitnih plinova 53
Tablica 10. Paramatri zavarivanja za mješavinu C6X1 55
Tablica 11. Paramatri zavarivanja za mješavinu X3 56
Tablica 12. Paramatri zavarivanja za mješavinu N2 57
Tablica 13. Paramatri zavarivanja za mješavinu C2 58
Tablica 14. Podaci o opremi i parametri snimanja i skeniranja 71
Tablica 15. Rezultati mjerenja tvrdoće 75
Tablica 16. Slike mikrostruktura slikanih u osam karakterističnih točaka za uzorak C2 77
Tablica 17. Slike mikrostruktura slikanih u osam karakterističnih točaka za uzorak C6X1 ... 78
Tablica 18. Slike mikrostruktura slikanih u osam karakterističnih točaka za uzorak N2 79
Tablica 19. Slike mikrostruktura slikanih u osam karakterističnih točaka za uzorak X3 81
Tablica 20. Mehanička svojstva dobivena statičkim vlačnim pokusom 83
Tablica 21. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma 85
Tablica 22. Slike prijelomnih površina 86
Tablica 23. Statistički podaci za jakosti struje 88
Tablica 24. Statistički podaci za jakosti struje 89
Tablica 25. Statistički podaci za tvrdoće 90

POPIS KRATICA

3D	Tri dimenzije (od eng. Three-dimensional)
A	Austenit
AM	Aditivna proizvodnja (od eng. Additive Manufacturing)
Ar	Argon
ASTM	Američko društvo za ispitivanja i materijale (od eng. American Society for Testing and Materials)
BCC	Prostorno centrirana kubična rešetka (od eng. Body Centered Cubic)
BTF	Omjer mase sirovca i gotovog proizvoda (od eng. Buy-to-Fly)
CAD	Konstruiranje pomoću računala (od eng. Computer Aided Design)
CNC	Računalom numerički upravljani strojevi (od eng. Computer Numerical Control)
CO_2	Ugljični dioksid
Cr	Krom
Cu	Bakar
DC	Istosmjerna struja (od eng. Direct Current)
EPP	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom
F	Ferit
FCC	Plošno centrirana kubična rešetka
FDM	Taložno očvršćivanje (od eng. Fused Deposition Modeling)
GTAW	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (od eng. Gas Tungsten Arc Welding)
H_2S	Sumporovodik
He	Helij
HRC	Tvrdoća po Rockwellu
HV	Tvrdoća po Vickersu
KU	Ispitni uzorak s U zarezom kod mjerenja udarnog rada loma

KV	Ispitni uzorak s V zarezom kod mjerenja udarnog rada loma
L	Talina
LOM	Proizvodnja laminarnih tvorevina (od eng. Laminated Object Manufacturing)
MAG	Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina (od eng. Metal Active Gas)
MIG	Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina (od eng. Metal Inert Gas)
Mn	Mangan
Mo	Molidben
N	Dušik
O_2	Kisik
ppm	Parts per milion
PREN	Pitting Resistance Equivalent Number
PVC	Poli(vinil-klorid)
REL	Ručno elektrolučno zavarivanje
RP	Brza izrada prototipova (od eng. Rapid Prototyping)
SAD	Sjedinjene Američke Države
Si	Silicij
SLS	Selektivno lasersko sraščivanje (od eng. Selective Laser Sintering)
Ti	Titan
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (od eng. Tungsten Inert Gas)
W	Volfram
ZUT	Zona utjecaja topline

POPIS OZNAKA

Oznaka	**Jedinica**	**Opis**
HB	-	Tvrdoća prema Brinellu
HV 10	-	Tvrdoća prema Vickersu
I	A	Jakost struje zavarivanja
k	-	Stupanj iskorištenja postupka zavarivanja
KV	J	Udarni rad loma
L_0	mm	Početna duljina
Q	kJ/mm	Unesena toplina
R_e	Mpa	Granica razvlačenja
R_m	Mpa	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	Mpa	Konvencionalna granica razvlačenja
S_0	mm^2	Površina poprečnog presjeka
U	V	Napon zavarivanja
v_z	cm/min	Brzina zavarivanja

SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada ukratko su opisane aditivne tehnologije i dana je njihova podjela. Obrađena je tema aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom (eng. WAAM – Wire Arc Additive Manufacturing) te su navedeni materijali i postupci koji se koriste. Također, u teorijskom dijelu su obrađeni dupleks čelici. Prikazana je njihova podjela, mehanička svojstva, zavarljivost i primjena. Opisani su TIG i MIG/MAG postupci zavarivanja koji se koriste u aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom.

Cilj eksperimentalnog dijela bilo je utvrđivanje optimalnih parametara za materijal kvalitete 1.4462 za više zaštitnih plinskih mješavina. Opisana je oprema za zavarivanje i korišteni materijal pri izradi uzoraka. Prikazan je tijek eksperimenta i korišteni parametri. Za izradu uzoraka korištene su četiri vrste zaštitnih plinskih mješavina i za svaku je izrađen jedan uzorak na kojemu su izvršena nerazorna i razorna ispitivanja. Na kraju rada dana je analiza dobivenih rezultata.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja, WAAM, dupleks, MAG zavarivanje

SUMMARY

The theoretical part of the thesis contains a brief explanation of the additive technologies and a list of their divisions. The subject of Wire Arc Additive Manufacturing is elaborated and the materials and procedures that were used are listed as well. Likewise, more elaboration was given on the subject of duplex steel in the theoretical part. Their division, mechanical properties, weldability and use are also shown. TIG and MIG/MAG welding processes which are used in Wire Arc Additive Manufacturing are described.

The goal of the experimental part was to determine the optimal parameters for material quality 1.4462 for more protective gas mixtures. The welding equipment and the material used in the manufacture of the samples are described. The course of the experiment and used parameters are shown. Four types of shielding gas mixtures were used for the preparation of the samples, and for each of those samples, a new sample was prepared on which non-destructive and destructive tests were performed. The end of the thesis contains the analysis of the results that were obtained.

Key words: additive production, WAAM, duplex, MAG welding

1. UVOD

U današnjem vremenu globalizacije gdje je velika dostupnost informacija, znanja, roba i usluga, ali i gdje je izuzetno velika konkurencija; povećanje kvalitete proizvoda, fleksibilnost pri razvoju i proizvodnji i racionalizacija troškova nužni su uvjeti za opstanak na globalnom tržištu. Uz sve navedeno, važno je spomenuti konstantno povećanje potrošnje kvalitetnih materijala čija proizvodnja zahtjeva velike količine energije, što zahtijeva značajna financijska sredstva. Navedene činjenice dovode do zaključka da je razvoj novih proizvodnih tehnologija neophodan. Kao jedan od rezultata tog razvoja pojavljuje se aditivna proizvodnja čije će faze i svrha biti detaljno pojašnjene u ovome radu.

Aditivna proizvodnja je proizvodni postupak koji se bazira na nanošenju čestica materijala sloj po sloj. Postupak omogućuje pretvorbu ideje u gotov proizvod u kratkom vremenu uz uštedu materijala i eliminaciju međukoraka poput izrade posebnih alata ili kalupa, zamjene alata itd.

Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom (engl. Wire Arc Additive Manufacturing), nova je tehnologija u aditivnoj proizvodnji koja omogućava proizvodnju metalnih proizvoda navarivanjem slojeva.

Feritno-austenitni dupleks nehrđajući čelici ime su dobili po svojoj mikrostrukturi koja se sastoji od ferita i austenita u podjednakim volumnim udjelima (50:50). Iako su otkriveni početkom dvadesetog stoljeća, njihova primjena je bila rijetka sve do 80-ih godina prošlog stoljeća. Razlozi tome bili su problemi sa zavarivanjem, korozijskom postojanošću i krhkošću.

Danas se dupleks čelici primjenjuju na mnogim mjestima zbog svojih superiornih korozijskih i vrlo dobrih mehaničkih svojstva. Zbog visokog udjela ferita oni su feromagnetični, imaju višu toplinsku vodljivost i nižu toplinsku rastezljivost od austenitnih čelika. Na mjestima gdje se traži visoka otpornost na napetosnu i rupičastu koroziju, bolji su izbor od austenitnih čelika.

Zbog relativno visoke čvrstoće dupleks čelici su optimalan izbor za konstrukcije izložene koroziji, gdje dolazi do izražaja njihova izvanredna kombinacija korozijske postojanosti i mehaničkih svojstava. Navedena svojstva omogućuju smanjenje nosivih presjeka i smanjenje ukupne mase proizvoda.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Prema hrvatskoj enciklopediji aditivna proizvodnja (engl. Additive Manufacturing) dio je proizvodnoga strojarstva koji se bavi izradom predmeta nanošenjem čestica u tankim slojevima. Proizvodni proces započinje konstruiranjem trodimenzionalnoga modela računalnim CAD programima za modeliranje, ili digitaliziranjem prostornoga oblika već postojećega objekta trodimenzionalnim skenerima. Zatim se model pretvara u niz horizontalnih poprečnih presjeka koji se strojem za proizvodnju tvorevina otiskuju sloj po sloj do konačnog proizvoda [1].

Vrlo sličnu definiciju aditivne proizvodnje daje i ASTM (engl. American Society for Testing and Materials), koji definira aditivnu proizvodnju kao „Proces povezivanja materijala pri izradi objekata izravno iz 3D računalnih modela, najčešće sloj na sloj, što je suprotno postupcima obrade odvajanjem čestica“ [2]. Slika 1. prikazuje ilustraciju slaganja slojeva u aditivnoj proizvodnji.

Slika 1. Ilustracija slaganja slojeva u aditivnoj proizvodnji [3]

Povijesno gledajući, suvremeni postupci aditivne proizvodnje prošli su nekoliko faza s obzirom na njihovu primjenu. U početku primjene ti su se postupci uglavnom koristili za brzu izradu prototipova RP (engl. Rapid Prototyping). Pojam brzo treba shvatiti uvjetno, jer je za proizvodnju potrebno od nekoliko minuta do nekoliko dana. Međutim, uspoređujući s klasičnom proizvodnjom, aditivna proizvodnja je brža. Proizvodi načinjeni tim postupcima uglavnom su se rabili za unapređivanje procesa razvoja proizvoda. [4]

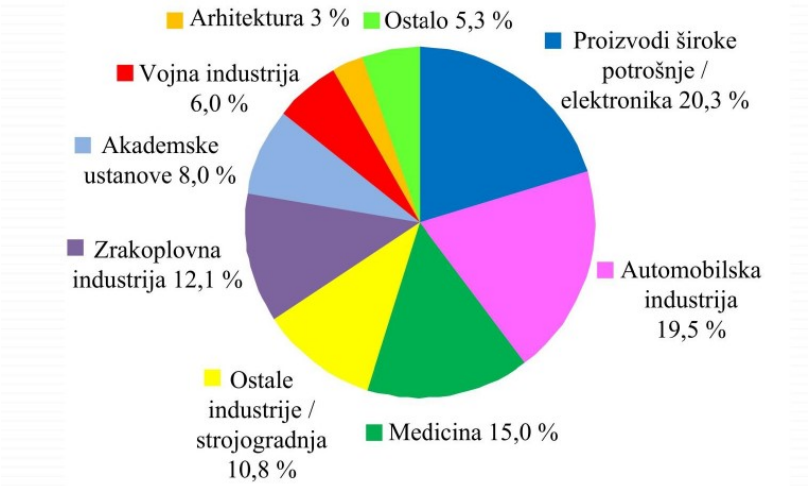
Kako je vrijeme ključ uspjeha na tržištu, iznimno je važno što ranije plasirati proizvod na tržište. Ranijim izlaskom na tržište ostvaruje se prednost nad konkurencijom u smislu definiranja cijene proizvoda. Također, raniji izlazak na tržište nudi bolje marketinške prilike i

brži povrat sredstava uloženih u razvoj. Budući da aditivna proizvodnja skraćuje vrijeme od ideje do plasiranja gotovog proizvoda na tržište, nameće se kao vrlo perspektivan proizvodni postupak u budućnosti. Činjenica da u moderno doba, uz smanjenje vremena izrade, opada i životni vijek proizvoda zaključuje se da je potrebno dodatno razvijati fleksibilne proizvodne sustave.

Povijesni razvoj aditivnih postupaka [5]:

- **1987.** – prva industrijska primjena stereolitografije; tvrtka 3D Systems predstavila novi stroj koji očvršćuje tanki sloj polimera pomoću UV lasera
- **1988.** – počinje razvoj fotoosjetljivih smola za primjenu u aditivnim postupcima
- **1991.** – postupak FDM tvrtke Stratasys i LOM tvrtke Helisys
- **1992.** – tvrtka DTM predstavlja stroj koji srašćuje polimerni prah pomoću lasera
- **1995.** – Zcorp predstavlja stroj za 3D tiskanje koji se temelji na inkjet pisačima (tvorevina nastaje od škroba, gipsa u obliku praha i veziva)
- **2007.** – počinje postupak normizacije postupaka i ostalih pojmova vezanih za aditivne postupke
- **2009.** – uvodi se pojam „aditivna proizvodnja“ (engl. Additive Manufacturing – AM *)*

Područje primjene aditivne proizvodnje je vrlo široko, od proizvoda široke primjene preko automobilske i zrakoplovne industrije do arhitekture. Slika 2. prikazuje područja primjene aditivne proizvodnje.



Slika 2. Područja primjene aditivne proizvodnje [6]

U automobilskoj i zrakoplovnoj industriji aditivni postupci omogućuju izradu metalnih dijelova složene geometrije. Ti dijelovi su često lakši i boljih karakteristika nego dijelovi

proizvedeni klasičnim proizvodnim postupcima. Sa stajališta uštede energije i smanjenja emisije štetnih plinova svako olakšanje konstrukcije je poželjno s obzirom da broj automobila i zrakoplova neprestano raste.

Aditivna proizvodnja je efikasan način izrade dijelova od skupih materijala poput titana i nikla i njihovih legura koji se primjenjuju u zrakoplovnoj industriji. Mogućnost potpune automatizacije procesa aditivne proizvodnje iz modela što omogućuju CAD/CAM sustavi, čime se smanjuje vrijeme proizvodnje i ljudski rad, još je jedna od prednosti AM pred klasičnim postupcima. Iako program za CNC stroj može biti automatski generiran iz CAD modela, za dijelove složene geometrije potrebno je nekoliko prihvata obratka čime se povećava vrijeme rukovanja, broj stezanja obratka i proces umjeravanja nakon prihvata [7].

Uz prednosti, aditivna proizvodnja ima i neke nedostatke. Glavni nedostatak je kvaliteta površine koja je hrapava i većinom zahtjeva dodatnu obradu. Tablica 1. prikazuje prednosti i nedostke aditivnih postupaka.

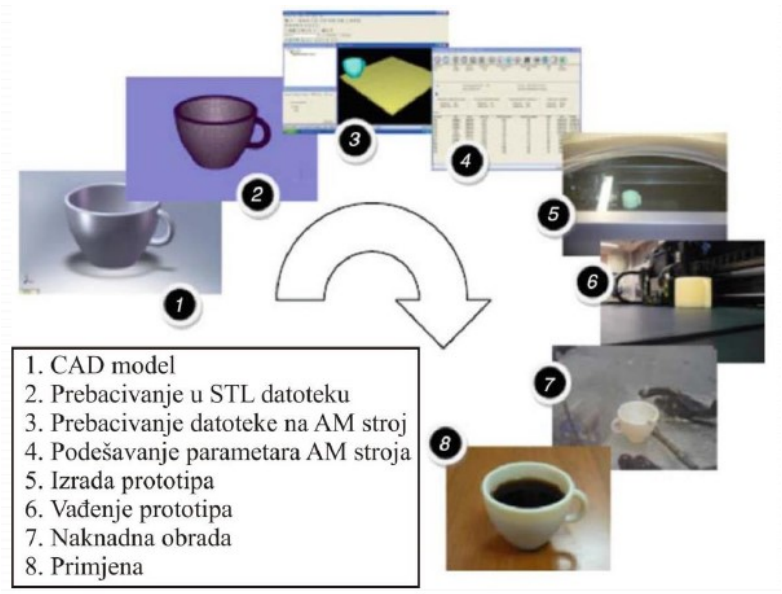
Tablica 1. Prednosti i nedostaci AM-a s tehnološkog i ekonomskog gledišta [7]

	Prednosti	**Nedostaci**
Tehnološke karakteristike	Direktna izrada 3D proizvoda bez upotrebe alata i kalupa	Nemogućnost kombinacije materijala i problem s izradom velikih dijelova
	Primjena dizajna proizvoda ne uzrokuje dodatne troškove proizvodnje	Potrebna naknadna obrada površine
	Izrada dijelova složene geometrije	Mala brzina izrade
	Velika fleksibilnost proizvodnje: dijelovi se mogu izraditi bilo kojim redom	Potrebno je veliko iskustvo i kvalificirana radna snaga
	Manji gubitak materijala	Nedovoljno iskorištene mogućnosti zbog nedostataka u dizajnu alata i smjernicama
Ekonomske karakteristike	Brza i jednostavna izrada novih proizvoda	Visoki troškovi sirovine i energije
	Postizanje veće cijene proizvoda kroz prilagođavanje i funkcionalna poboljšanja	Nepostojanje ekonomije razmjera (smanjenje troškova izrade ne uzrokuje povećanje obujma proizvodnje)
	Kupac nema troškove zbog redizajna proizvoda	Nedostatak kvalitetnih standarda
	Manji troškovi montaže zbog mogućnosti izrade složenih proizvoda iz jednog dijela	Ponuda proizvoda ograničena je tehnološkom izvedivošću (kvaliteta, brzina)
	Manje prepreka prilikom izlaska na tržište	Potrebna je obuka
	Nema povećanja troškova pri izradi različitih proizvoda	Potrebno je radno iskustvo i kvalificirana radna snaga

Faze izrade tvorevina kod većine aditivnih postupaka su iste i sastoje se od [5]:

- CAD model
- prebacivanje u STL datoteku
- prebacivanje datoteke na AM stroj
- podešavanje parametara AM stroja
- izrada prototipa
- vađenje prototipa
- naknadna obrada
- primjena.

Slika 3. ilustrirano prikazuje redoslijed koraka u aditivnoj proizvodnji.

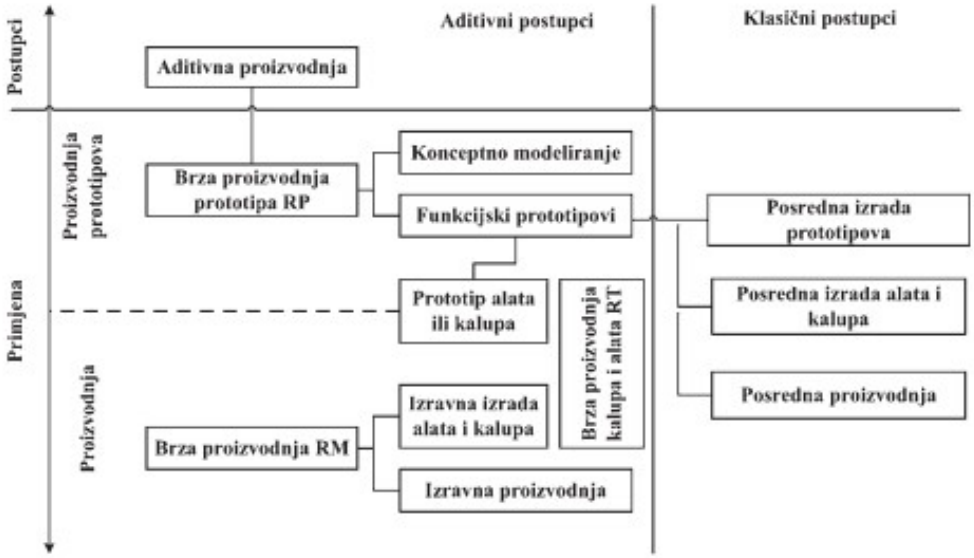


Slika 3. Koraci u aditivnoj proizvodnji kod većine postupaka [5]

AM dijelovi nisu jeftini Na njihovu cijenu utječe: vrijeme izrade, cijena potrebne opreme i održavanja, rad operatera tijekom izrade, naknadne obrade i čišćenja, cijena osnovnog materijala i cijena materijala za potpornu strukturu. Katkad je teško odlučiti koliko tvorevina treba načiniti da se dobije maksimalna korist od njih [8].

AM postupci izrade tvorevina mogu se općenito podijeliti na postupke koji upotrebljavaju materijal u čvrstom stanju (npr. žica, papir, folija, laminat), kapljevinu i prah. Neki od važnijih postupaka kod kojih se rabi čvrsti materijal su taložno očvršćivanje (engl. Fused Deposition Modeling, FDM) i proizvodnja laminiranih objekata (engl. Laminated Object Manufacturing, LOM), postupci koji upotrebljavaju kapljevite materijale su stereolitografija

(engl. Stereolithography, SLA), očvršćivanje digitalno obrađenim svjetlosnim signalom (engl. Digital Light Pro cessing) i PolyJet, dok su postupci koji rabe prah npr. selektivno lasersko srašćivanje (engl. Selective Laser Sintering, SLS) i 3D tiskanje (engl. 3D Printing, 3DP) [8]. Slika 4. prikazuje podjelu aditivnih postupaka.



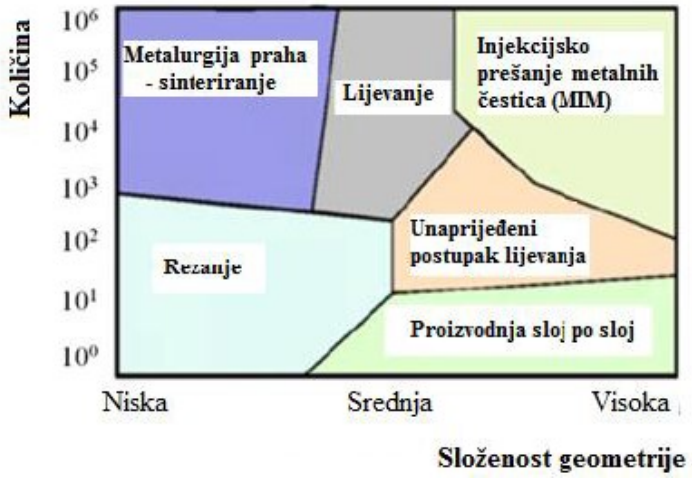
Slika 4. Podjela aditivnih postupaka [8]

2.1. Aditivna proizvodnja materijala

Danas su mnoga istraživanja usmjerena na proizvodnju metalnih komponenti kompleksne geometrije i to s materijalima poput titana i nikla kod kojih se klasičnim metodama ne može ekonomično proizvesti geometrijski zahtijevan proizvod. Aditivna proizvodnja metalnih komponenti u odnosu na alternativne načine proizvodnje je funkcija složenosti geometrije i volumena komponente [7].

U usporedbi s klasičnim postupcima obrade odvajanjem čestica, aditivni postupci imaju nekoliko značajnih prednosti. Prvo, moguće je potpuno automatizirati AM postupak od konstrukcije dijela do njegove proizvodnje. Navedeno omogućuje skraćenje vremena proizvodnje i smanjenje ljudskog rada. Drugo, AM postupak proizvodnje je cjenovno konkurentan postupak pri proizvodnji dijelova načinjenih od skupih materijala poput titana i nikla. Naposljetku, aditivni postupci omogućavaju proizvodnju komponenti vrlo kompleksne geometrije koju bi bilo jako teško ili nemoguće postići klasičnim tehnologijama obrade [9].

Slika 5. prikazuje položaj aditivne proizvodnje metalnih materijala u odnosu na ostale tehnologije.

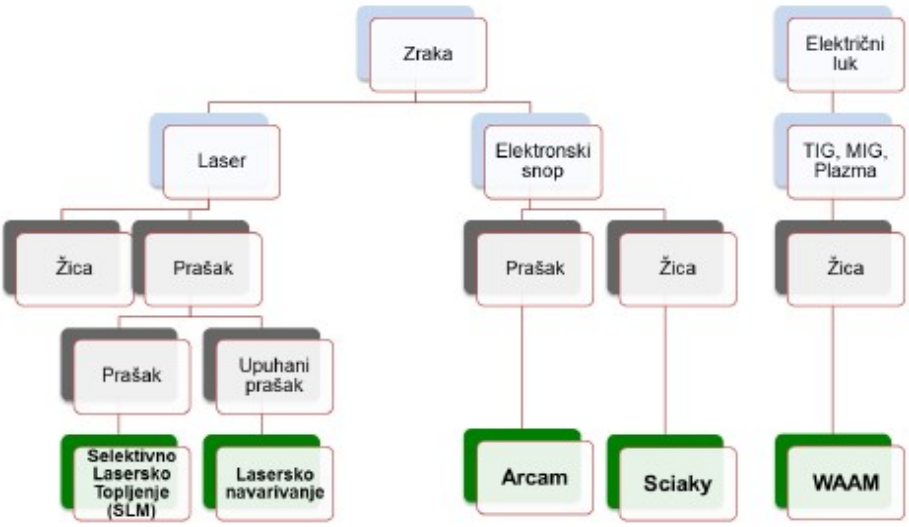


Slika 5. Položaj aditivne proizvodnje metalnih materijala u odnosu na ostale tehnologije [9]

Kao izvori energije za aditivnu proizvodnju metalnih materijala koriste se električni luk (TIG, MIG/MAG i plazma) i zraka (laserska i elektronska), a dodatni materijal mogu biti žica i prašak.

Postupci koji koriste prašak kao dodatni materijal bolje su razvijeniji nego postupci koji koriste žicu za dodatni materijal. Razlog tome je taj što prašak omogućava proizvodnju dijelova s vrlo visokom geometrijskom točnošću. Debljina slojeva kreće se između 20 µm i 100 µm, a tolerancije dijelova proizvedenih ovim postupkom iznose ± 0,05 mm, dok se kvaliteta površine kreće između 9 µm i 16 µm. Glavna mana postupaka koji koriste prašak za dodatni materijal je iznimno niska proizvodnost, tj. prosječni depozit materijala iznosi 10 g/min, što ograničava proizvodnju za male dijelove [9].

Slika 6. prikazuje raščlambu aditivnih postupaka za metalne materijale.

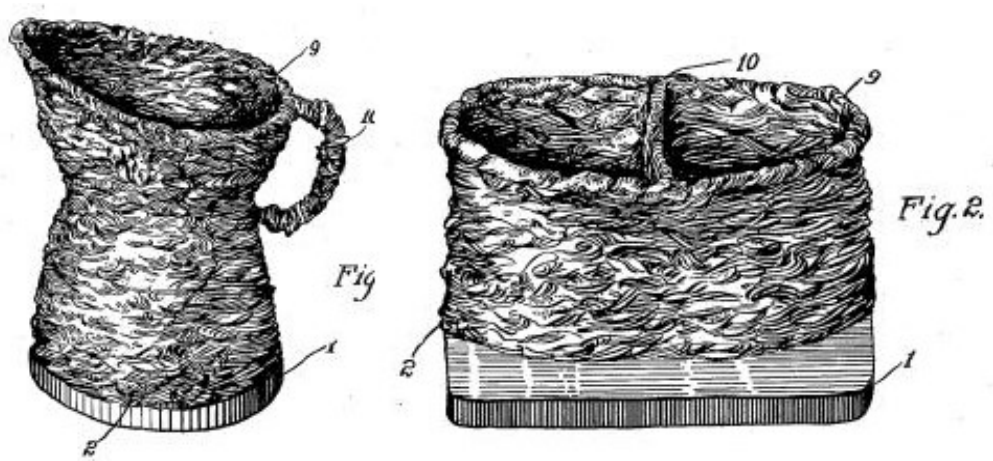


Slika 6. Prikaz aditivnih tehnologija za metale [10]

Ovisno o izvoru energije za zavarivanje, postupak aditivne proizvodnje žicom može se podijeliti u tri grupe: zavarivanje laserom, elektronskim snopom i električnim lukom. Proizvodnost aditivnog postupka sa žicom puno je veća od proizvodnosti postupaka koji koriste prašak kao dodatni materijal. Također, korištenje žice kao dodatnog materijala je ekološki prihvatljivije i operateri nisu izloženi prašku koji ima potencijalno negativan utjecaj na zdravlje. Količina depozita kreće se do 2500 cm^3/h (330 g/min za nehrđajuće čelike) što ovaj postupak čini pogodnim za proizvodnju dijelova većih dimenzija. Žica kao dodatni materijal je višestruko jeftinija i dostupnija od praška što je značajni plus u odnosu na postupke koji koriste prašak kao dodatni materijal [9].

2.2. WAAM

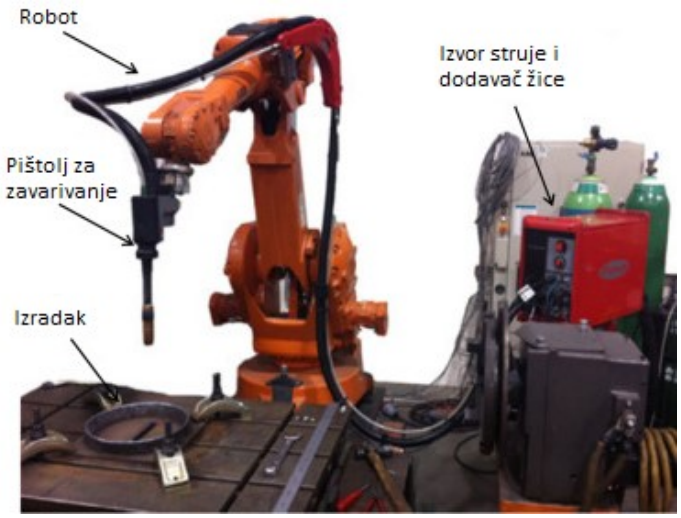
Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom (engl. Wire Arc Additive Manufacturing*)* nova je tehnologija u aditivnoj proizvodnji koja omogućava proizvodnju metalnih proizvoda navarivanjem slojeva. Postupak se prvi puta spominje 1926. godine kada Baker počinje koristiti elektrolučno zavarivanje za izradu 3D modela taloženjem rastaljenog materijala sloj na sloj [11]. Slika 7. prikazuje proizvode dobivene ovom proizvodnom metodom.



Slika 7. Proizvodi dobiveni taloženjem rastaljenog materijala sloj na sloj [11]

Postupak omogućuje proizvodnju proizvoda blizu konačne dimenzije (engl. near net shape) i BTF (engl. Buy-to-Fly) omjer od 1,2, što rezultira uštedom materijala [7]. BTF je omjer mase sirovca i gotovog proizvoda. Poželjno je da on bude što bliži jedinici. Navedene karakteristike čine postupak pogodnim za proizvodnju komponenti većih dimenzija načinjenih od skupih materijala.

WAAM postupak koristi standardnu opremu za zavarivanje, izvore struje, dodavače žice, pištolje za zavarivanje, robote, kontrolnu jedinicu za upravljanje robotom itd. Slika 8. prikazuje opremu koja se koristi u WAAM postupku.

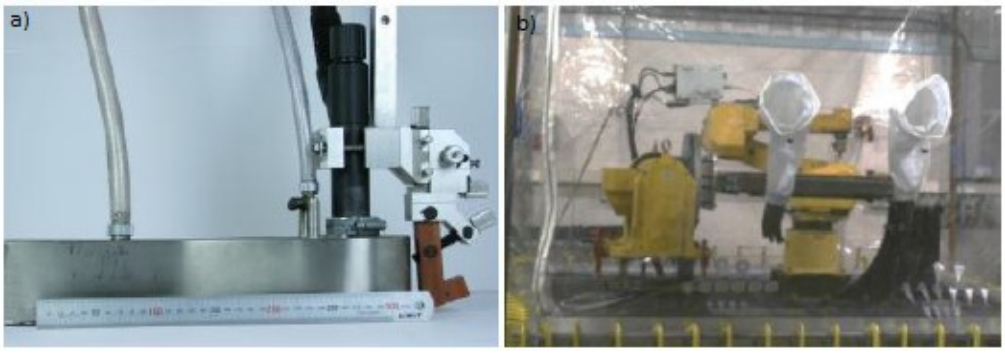


Slika 8. Oprema za WAAM [12]

Pojedini materijali zahtijevaju dodatnu zaštitu u vidu korištenja zaštitne inertne atmosfere. U tom slučaju potrebno je posegnuti za dodatnom opremom poput zavarivačkog šatora ili opreme za lokalnu zaštitu zavara.

Šator zahtjeva tri ciklusa pumpanja kako bi razina kisika bila ispod 200 ppm, a taj postupak je mnogo kraći i troši se manje zaštitnog plina nego kod komore. Zavarivački šator mora biti zatvoren i ispunjen zaštitnim plinom. Prednosti šatora su cijena, lako je prilagodljiv raznim veličinama i omogućuje jednostavno ispumpavanje zraka i upumpavanje zaštitnog plina [14]. Lokalni uređaji omogućuju manju potrošnju plina i autonomiju sustava, ali postoji opasnost od ulaska zraka, koji može prouzročiti lošu zaštitu. Također, lokalni uređaji za zaštitu moraju biti na malim udaljenostima od područja zavarivanja [14].

Slika 9. prikazuje zaštitni šator i uređaj za lokalnu zaštitu zavara.



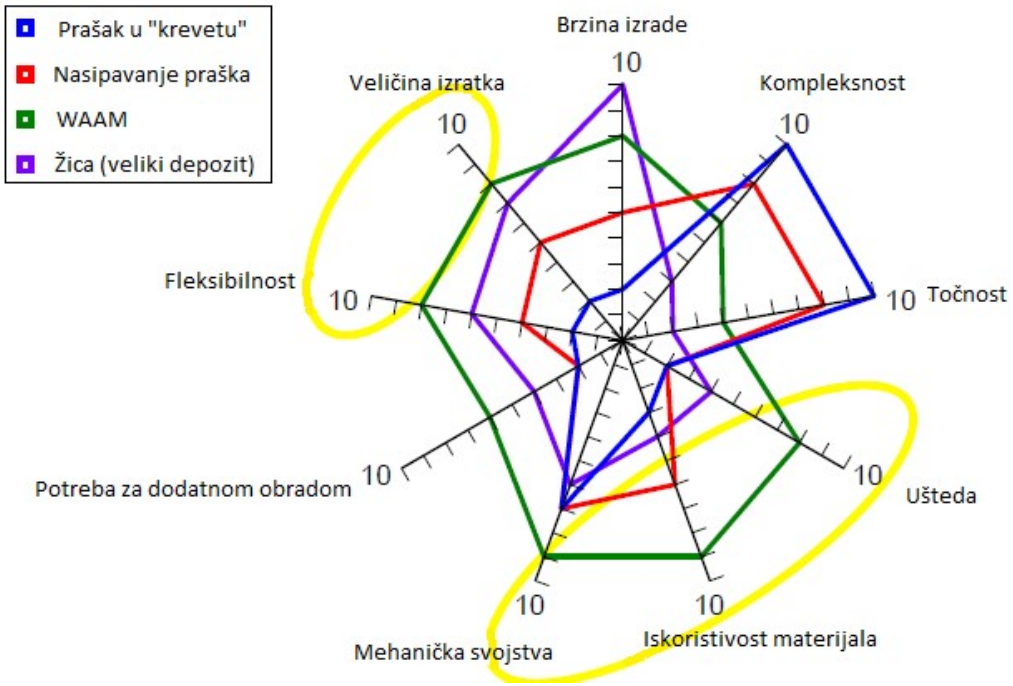
Slika 9. a) uređaj za lokalnu zaštitu; b) zaštitni šator [14]

Kao i svaki postupak, tako i WAAM postupak ima svoje prednosti i nedostatke.

Prednosti [7]:

- izrada komponenti od skupih materijala (titan, nikal i njihove legure)
- mogućnost automatizacije
- proizvodnja komponenti složene geometrije
- smanjen utrošak materijala
- velika količina depozita
- mnogo niži troškovi proizvodnje nego kod procesa baziranih na prašku
- potencijalno nema ograničenja u veličini izradaka
- mogućnost strojne obrade tijekom procesa
- mogućnost stvaranja funkcionalno profiliranog materijala
- otvorena struktura sustava omogućuje primjenu bilo kojeg proizvođača izvora struje i manipulatora.

Slika 10. prikazuje grafičku usporedbu prednosti i nedostataka različitih aditivnih postupaka.



Slika 10. Prednosti i nedostaci različitih aditivnih postupaka [11]

Nedostaci [7, 13]:

- pojava zaostalih naprezanja i deformacija zbog visokog unosa topline
- neujednačena geometrija zavara uzduž sloja
- poroznost

- potrebna naknadna obrada odvajanjem čestica
- nedostatak iskustva u primjeni tehnologije
- teško praćenje parametara zavarivanja
- potreba za visokoobrazovanom radnom snagom (programiranje robota, CNC strojeva)
- pojedini materijali zahtijevaju zaštitnu inertnu atmosferu pa je potrebno koristiti zaštitni šator ili lokalni uređaj za zaštitu.

2.2.1. Materijali kod WAAM-a

Postoji veći broj materijala koji se koriste kod WAAM postupka. Prvenstveno, to su materijali na bazi željeza, titana i aluminija. Također, ovim postupkom moguće je kombiniranje različitih metalurški kompatibilnih materijala. Tablica 2. prikazuje najčešće korištene materijale kod WAAM postupka.

Tablica 2. Materijali kod WAAM-a [7]

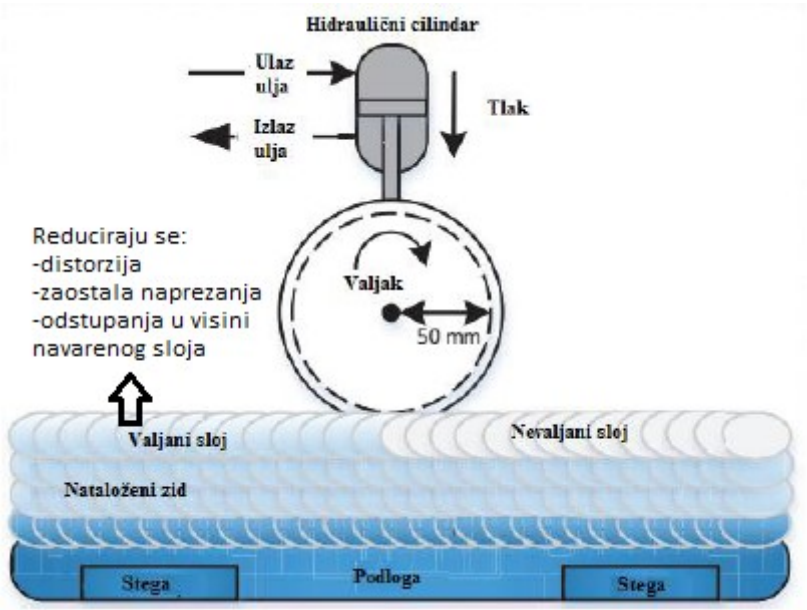
Titan	Ti-6Al-4V
Aluminij	2024, 2319, 4043, 5087
Vatrootporni materijali	Volfram, molidben, tantal
Čelik	ER60, ER80, ER90, ER120, maraging (250 i 350), nehrđajući (17-4 PH, 316L)
Inconel	625, 718
Bronca	-
Bakar	-

Titan i njegove legre, posebice Ti-6Al-4V, predstavljaju jednu od najčešće korištenih skupina materijala kod WAAM postupka. Zbog značajnih ušteda materijala i vremena prilikom izrade, navedeni postupak najzastupljeniji je u zrakoplovnoj industriji gdje se koristi za izradu dijelova trupa i motora.

Da bi se dobila potrebna svojstva i smanjila zaostala naprezanja u materijalu, uvodi se dodatna deformacija u tijeku izrade odmah nakon svakog prolaska pištolja za zavarivanje. Deformacija se izvodi s valjkom koji je integriran u sustav da bi se svaki novi sloj mogao deformirati. Ovakav pristup limitira izradu na relativno jednostavne konstrukcije, ali rješava problem β faze kod koje može doći do anizotropije, što može dovesti do smanjenja vijeka trajanja i lošijih mehaničkih svojstava [15].

Kod WAAM postupka za aluminij postoji opasnost pojavljivanja pora i pukotina u materijalu. Da bi se izbjegli mogući problemi koristi se kontrola mikrostrukture, žica mora biti kvalitetna i dobro skladištena, potrebna je naknadna toplinska obrada, te se koristi kao i kod titanovih legura valjanje između slojeva da bi se dobila odgovarajuća mikrostruktura, odnosno bolja mehanička svojstva.

Slika 11. prikazuje shemu valjanja navarenih slojeva.



Slika 11. Shema valjanja slojeva [16]

2.3. Problematika WAAM postupka

2.3.1. Zaostala naprezanja i deformacije

Zaostala naprezanja i deformacije podloge razultat su velikih unosa topline i najveća su u smjeru nanošenja materijala. One utječu na tolerancije izratka i uzrokuju greške.

Ukoliko struktura ne može podnijeti deformiranje, doći će do loma ili će nastati zaostala naprezanja. Kako ne bi došlo do deformiranja komponente tijekom nanošenja slojeva, podlogu je potrebno pričvrstiti, a tijekom procesa zavarivanja provoditi kontrolu.

Postoji nekoliko metoda kojima se reduciraju utjecaji zaostalih naprezanja i pojava deformacija.

Prva metoda je simetrično slaganje. Kod ove metode se postavlja ravnina simetrije u skladu s volumenom izratka. Taloženje materijal treba biti ravnomjerno i odvija se naizmjenično sa svake strane u odnosu na ravninu simetrije, tako da dok se na jedan dio nanosi novi sloj, drugi dio se hladi. Nedostatak ove metode je potreba za dodatnom obradom. [13]

Druga metoda je „back to back″ slaganje. Ova metoda omogućava dobro upravljanje unosima topline. Koristi se kod izrade simetričnih dijelova. Prije razdvajanja dijelova cijeli izradak toplinski se obrađuje radi smanjenja zaostalih naprezanja. [13]

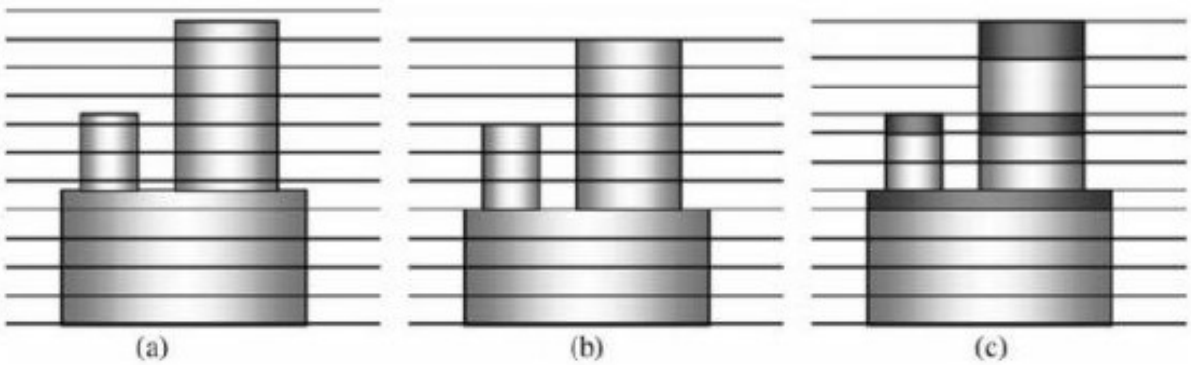
Sljedeća se metoda temelji na optimiranju orijentacije dijelova. Dijelovi se pozicioniraju na način da se dobiju što kraći slojevi taloženja, jer su manje deformacije i zaostala naprezanja kod kraćih prolaza. [13]

Naposljetku, jedna od metoda koja se često koristi kod titana i njegovih legura za rješavanje problema s β fazom, a to je metoda visokotlačnog valjanja. Ona se koristi za postizanje optimalne mikrostrukture i uklanjanje zaostalih naprezanja, ali ima nedostatak što je primjenjiva samo na jednostavnijim izratcima. [13]

2.3.2. Točnost i kvaliteta površine

Dva čimbenika utječu na točnost oblika proizvoda: deformacije uzrokovane zaostalim naprezanjima i rezanje na slojeve, što rezultira stepeničastim efektom površine. Rezanjem na slojeve konstantne debljine može doći do problema s viškom materijala, a ta problematika riješava se rezanjem modela na slojeve različitih debljina. Spomenuto rezanje na različite debljine dopušta prilagođavanje debljina pojedinih slojeva do određene granice, a tim podešavanjima omogućava se postizanje predviđenih gabarita proizvoda. Također, povećavanjem debljine slojeva smanjuje se dimenzijska točnost i kvaliteta površine, dok se smanjivanjem debljine slojeva postiže veća točnost i bolja kvaliteta površine. [9]

Slika 12. prikazuje različite načine rezanja modela i dimenzionalne greške koje proizlaze iz toga.



Slika 12. Rezanje modela na slojeve: a) originalni model, b) model s konstantnom debljinom slojeva, c) model s varijabilnom debljinom slojeva prilagođenoj veličini modela [9]

Površina izratka sastoji se od velikog broja prolaza jedan do drugoga s ili bez preklapanja. Oblik prijelaza je nepravilan, tj. valovit. Ta valovitost se mora ukloniti naknadnim procesima obrade kako bi se eliminirale površinske nepravilnosti. Slika 13. prikazuje presjek zida napravljenog WAAM postupkom.

Slika 13. Presjek WAAM zida [16]

2.3.3. Greške

Najčešće greške koje se pojavljuju kod WAAM postupka prikzane su u tablici 3.

Tablica 3. Greške WAAM postupka [7]

Greške	Uzroci
Poroznost	nedovoljan protok zaštitnog plina, niska čistoća zaštitnog plina, pogrešni parametri, prevelika brzina zavarivanja, nečistoće u materijalu
Ugorine	prevelika struja zavarivanja, prevelika brzina zavarivanja, pogrešan kut zavarivanja, kemijski sastav materijala, nedovoljno dodavanje žice
Geometrijske nepravilnosti	prevelika brzina zavarivanja

3. POSTUPCI ZAVARIVANJA

3.1. MIG/MAG

MIG/MAG, odnosno elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog/aktivnog plina, je elektrolučni postupak zavarivanja kod kojeg se električni luk uspostavlja između kontinuirane elektrode i radnog komada. Električni luk generira toplinu za taljenje dodatnog i osnovnog materijala. Zaštitne atmosfere mogu biti inertne (Ar, He) i aktivne (CO_2 i mješavine). Postupak može biti poluautomatiziran (dodavanje žice je automatizirano, a vođenje pištolja ručno) ili u potpunosti automatiziran, odnosno robotiziran [17].

Zavarivanje MAG postupkom (engl. *Metal Active Gas*) kao zaštitu primjenjuje aktivan zaštitni plin (CO_2) ili smjese plinova (Ar + CO_2, Ar + CO_2 + O_2).

Zavarivanje MIG postupkom (engl. *Metal Inert Gas*) kao zaštitu primjenjuje inertne zaštitne plinove (Ar, He).

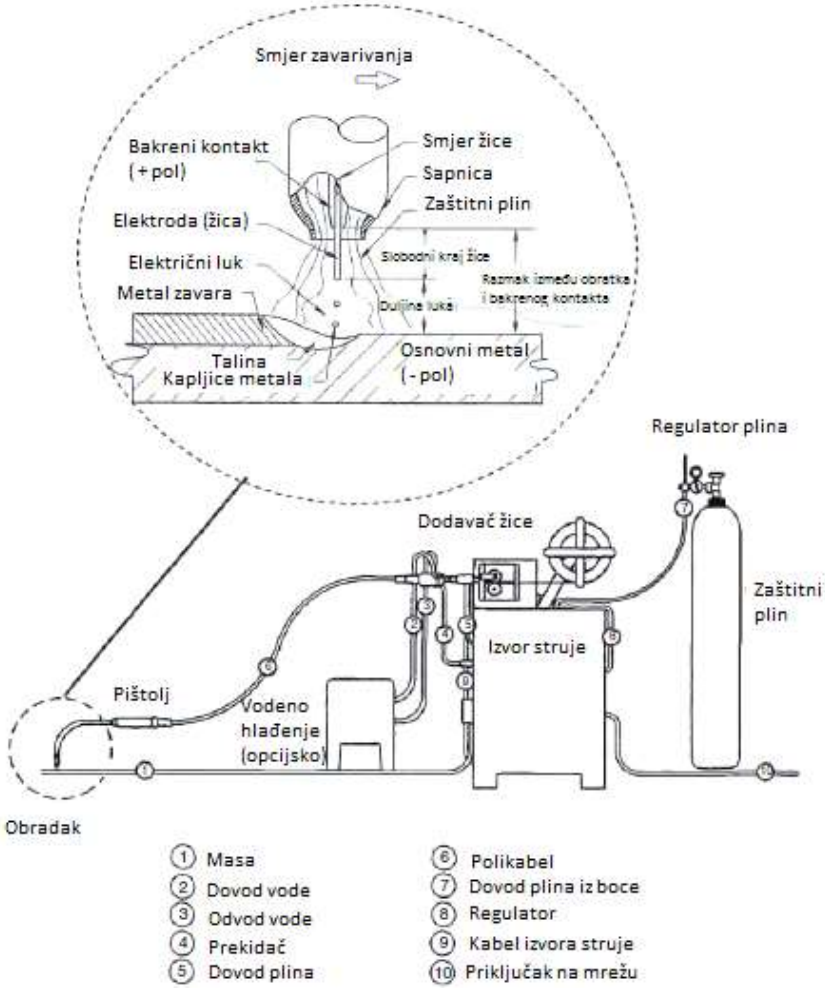
Prednosti postupka [17, 18] su sljedeće:

- kontinuirano dovođenje žice omogućava formiranje dugih zavara bez prekida električnog luka – velika proizvodnost
- postupak se može koristiti kao poluautomatski, automatski i robotiziran
- može se koristiti u svim položajima zavarivanja
- nema troske
- ne proizvodi puno dima i para
- postoji puno podvrsta postupka koje omogućavaju široku uporabu
- zavarivanje je moguće u adionici i na terenu
- velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa metala
- primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina
- mogućnost primjene praškom punjene žice
- širok raspon debljina
- moguća primjena i za lemljenje.

Nedostaci [17, 18]:

- kontinuiran dovod žice i zaštitnog plina čine opremu kompleksnom, otežavaju njen transport i zahtijevaju češće održavanje
- pri zavarivanju na otvorenom potrebna je zaštita od vjetra
- ograničena dostupnost zbog veličine pištolja za zavarivanje
- mogućnost pojavljivanja prskanja, što zahtjeva naknadnu obradu
- problemi kod dovođenja žice (posebno aluminij)
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost).

Osnovna oprema sastoji se od izvora struje, koluta sa žicom, sustava za dobavu žice, sustava za dovod plina, pištolja za zavarivanje i električnih vodiča. Elektroda u obliku žice kontinuirano se dovodi kroz polikabel do pištolja za zavarivanje. Na slici 14. prikazana je oprema za zavarivanje.



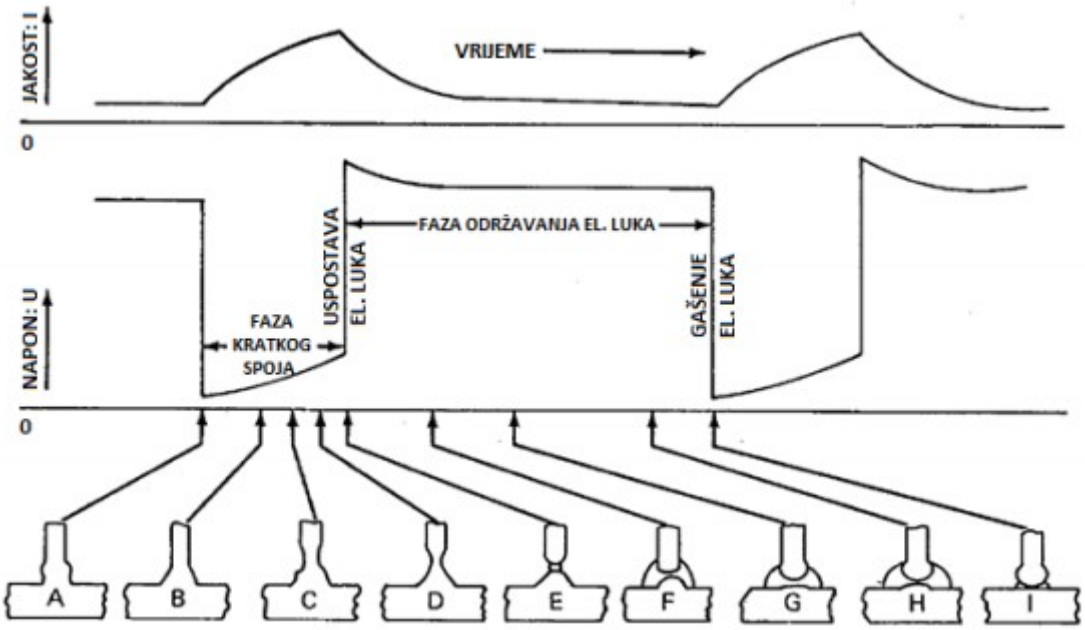
Slika 14. Oprema za zavarivanje [17]

3.1.1. Način prijenosa metala kod MIG/MAG postupka

Način prijenosa metala određuje se odabirom parametara zavarivanja. Parametri koji utječu na promjenu u načinu prijenosa metala su: kemijski sastav i promjer dodatnog materijala, sastav zaštitnog plina, jakost struje i njen polaritet te duljina električnog luka. Kod elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom postoji nekoliko načina prijenosa materijala: kratkim spojevima, prijelaznim lukom, štrcajućim lukom i impulsno zavarivanje – kontrolirani prijenos štrcajućim lukom.

3.1.1.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Prijenos metala kratkim spojevima karakterizira mali unos topline, male struje zavarivanja (50 – 175 A), i nizak napon (13 – 21 V), što ga čini povoljnim za zavarivanje metala osjetljivih na unos topline i za zavarivanje korijena. Do taljenja dodatnog materijala dolazi pri periodičkim dodirima žice i taline. Period pri kojem se odvaja jedna kapljica metala dijeli se na fazu kratkih spojeva i fazu električnog luka. Slika 15. je ilustrirani prikaz navedenoga.



Slika 15. Prikaz faza prijenosa kapljica metala električnim lukom kratkog spoja [19]

Objašnjenje faza prijenosa kapljica metala električnim lukom kratkog spoja [19]:

1) Tijekom trenutaka od A do D vršak elektrode je u kratkom spoju s radnim komadom te se u toj fazi jakost struje povećava.

2) Povećanjem jakosti struje se pojačava i elektromagnetno polje koje stvara efekt uklještenja (engl. pinch effect), na mjestu gdje je formirana kapljica prešla iz krutog u tekuće stanje, ali se samostalno nemože odvojiti od žice dodatnog materijala.
3) U trenutcima E i F se električni luk nanovo uspostavlja pomoću naglog izboja napona te smanjivanjem jakosti električne struje.
4) U ovim trenucima se javlja ključan problem naglog prskanja kapljice metala jer se teži uspostavi električnog luka te zagrijavanju vrška žice kako bi se ostvarila sljedeća sekvenca prijenosa metala.
5) Promjenom iduktiviteta te delikatne modifikacije dinamičke karakteristike se može prskanje u određenoj mjeri smanjiti ili u moderno vrijeme gotovo i eliminirati.
6) Do trenutaka G i H, generirana toplina od električnog luka formira rastaljenu kapljicu koja mora biti dovoljno velika, ali takva da samostalno ne padne i „sudari“ sa talinom.
7) Naglim smanjenjem napona struje se smanjuje i visina električnog luka - što uz dovođenje žice uzrokuje dodirivanje vrška žice sa talinom i kontroliranog odvajanja kapljice metala.

Karakteristike prijenosa metala kratkim spojevima [17, 19]:

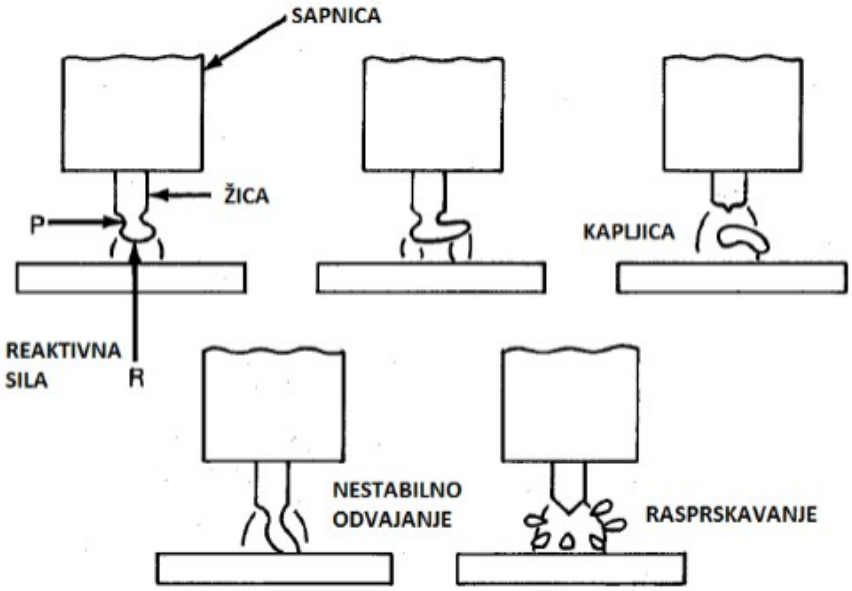
- jakost struje: 50 - 175 A ; napon struje: 12 - 21 V
- mali unos topline i brzo hlađenje i stvrdnjavanje taline
- male deformacije radnog komada
- promjeri žica: 0,8 mm do 1,2 mm
- rasprskavanje kao posljedica naglog gašenja električnog luka i utjecaja zaštitnog plina
- spajanje malih debljina radnih komada: 1,0 mm – 5,0 mm
- prikladan za sve položaje zavarivanja
- premošćivanje zračnog mosta između radnih komada
- izrada korijenskog prolaza
- metali osjetljivi na unos topline.

3.1.1.2. Prijenos materijala prijelaznim lukom

Ovaj način prijenosa kombinira slučajne kratke spojeve i štrcajući luk, odnosno prijenos velikim i malim kapljicama metala. Na vrhu elektrode oblikuje se krupna kapljica, veća od promjera elektrode, koja uslijed sila u električnom luku biva odbačena u talinu bez kratkog spoja. Ponekad se kapljica ne odvoji od elektrode prije nego dotakne talinu i u tom trenutku dolazi do kratkog spoja. [20]

Preporuča se korištenje prijelaznog luka u kombinaciji sa što inertnijim zaštitnim plinom kako kapljice koje prelijeću kroz luk ne bi reagirale sa plinom i donijele neželjene elemente u metal zavara. Često se događa da se kapljica prilikom dodira sa rastaljenom talinom rasprsne. Iako se ovom vrstom luka može zavarivati velikim brzinama uz jeftinu opremu, u novije vrijeme zamijenjen je novim, naprednijim postupcima zbog skupe naknadne obrade koja je često potrebna zbog rasprskavanja kapljica materijala. [20]

Na slici 16. prikazane su faze procesa.



Slika 16. Prikaz faza prijenosa materijala prijelaznim lukom [20]

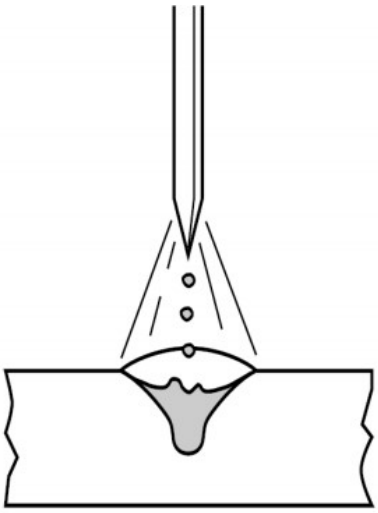
Tijekom prijelaznog električnog luka se preporuča koristiti inertni plin (Ar + He) zbog nasilnog odvajanja kapljica koje nepravilnim preletom do rastaljene kupke metala mogu navući neželjene elemente u sam metal zavara. Zavarivanje pomoću prijelaznog električnog luka je obilježeno mješovito stabilnim radom u kratkom spoju te nestabilnim radom štrcajućim lukom gdje se kapljice nepravilno formiraju te prilikom dodira sa rastaljenom talinom često nasilno rasprskuju. [19]

Prilikom zavarivanja uz niske vrijednosti napona struje električni luk je vrlo kratak te se veći dio žice elektrootporno zagrijava i sudara s radnim komadom, a zbog visokog unosa topline kapljica vrlo intenzivno rasprskava. Zavarivanje provedeno uz više vrijednosti napona struje manifestira visok električni luk koji ne zagrije radni komad i kraj žice dovoljno, čime se događa naljepljivanje ili nedovoljno protaljivanje te nagomilavanje zavara. [19]

Posebni problemi javljaju se prilikom korištenja CO_2 zaštitnog plina, koji ipak ostaje dominantan u području zavarivanja konstrukcijskih čelika zbog komercijalnih i praktičnih razloga. Zbog disocijacije plina CO_2 se stvara vrlo reaktivna smjesa koja je nepravilnom tehnikom rada sklona „usisavanju“ nečistoća iz okolnog zraka, sagorijevanja legirnih elemenata te mjestimična oksidiranja taline zavara. Također se može primjetiti da se električni luk ne prekriva u potpunosti sa stupom plazme električnog luka te su zbog toga prilike za ulazak nečistoća i oksidiranje zavara povećane. Kako bi se ublažio efekt prskanja, preporučeno je smanjiti visinu električnog luka – čime smanjujemo i napon struje. Time dobivamo „ukopani električni luk“ čiji je vrh elekrode ispod razine vrha taline. Unatoč ograničenjima, pronalaženje pravog seta parametara u kombinaciji sa vještinom zavarivača ovaj proces mogu učitniti vrlo industrijski prikladnim [19].

3.1.1.3. Prijenos materijala štrcajućim lukom

U ovom načinu prijenosa koriste se povećane vrijednosti napona i jakosti struje što rezultira stabilnijim prijelazom sitnih kapljica materijala, jer se kratki spojevi u potpunosti eliminiraju. Kapljice su sitne (promjer im je manji od promjera žice za zavarivanje) i mnogobrojne pa se zbog toga može reći da teku poput niti do taline zavara. Uz veliku visinu električnog luka i njegovu veliku stabilnost u potpunosti su eliminirani kratki spojevi [20]. Prijenos materijala štrcajućim lukom prikazan je na slici 17.



Slika 17. Prijenos metala štrcajućim lukom [20]

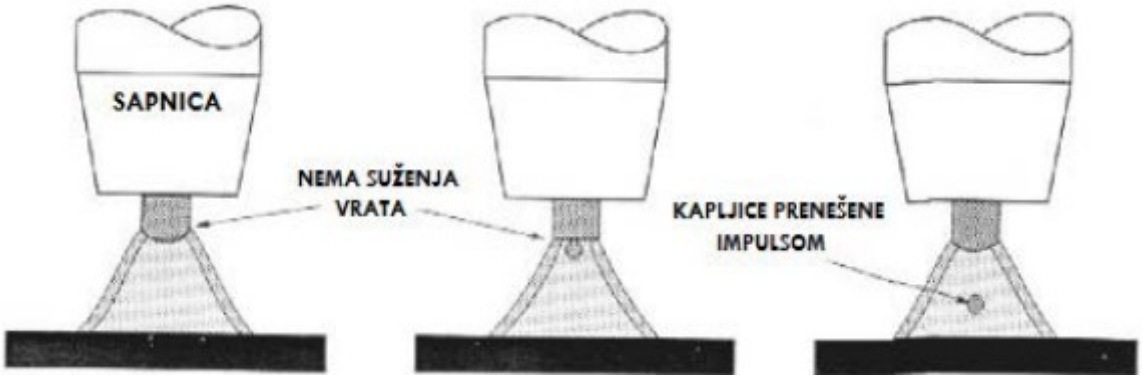
S obzirom da kapljice padaju pod utjecajem gravitacije, nije moguće koristiti ovaj način u svim položajima zavarivanja. Kao nedostatak navodi se i velika količina unesene topline. Time se dobiva veća količina taline koja se sporo hladi i podložna je vanjskim utjecajima.

Velikom količinom topline povećava se i protaljivost, što kod tanjih materijala nije poželjno. Zato se koristi za zavarivanje radnih predmeta debljine veće od 7 mm. Također je pogodan za završna zavarivanja i zavarivanja većim brzinama. Dobre strane ovog načina su velika iskoristivost elektrode, velika vrijednost depozita i veliki izbor dodatnih materijala različitih promjera. [20]

3.1.1.4. Prijenos materijala impulsnim lukom

Ovaj prijenos naziva se još i visoko kontrolirana varijanta prijenosa materijala štrcajućim lukom. Proces stvaranja kapljice i održavanja električnog luka isti je kao i kod štrcajućeg luka. No u trenutku kada se kapljica treba odvojiti od žice, dodatni uređaj pojačava jakost struje zavarivanja. Djelovanjem veće struje, kapljica prije dolazi u talinu zavara nakon čega vrijednost struje pada na početnu i osigurava stabilnost električnog luka . Proces se ponavlja u određenim vremenskim razmacima koji se prilagođavaju po potrebi. [20]

Slika 18. prikazuje prijenos materijala impulsnim lukom.



Slika 18. Prijenos kapljica metala impulsnim lukom [19]

Kao zaštitni plin u ovom načinu koristi se argon ili mješavine bogate argonom. Stabilnost, manje kapljice i kontrolirani unos topline pružaju velike mogućnosti u zavarivanju aluminija i njegovih legura, bakra i njegovih legura, te krom-nikal čelika. Prednosti ovog načina su: nema prskanja materijala, odlična svojstva zavara, mogućnost zavarivanja u svim položajima, konstantna visina električnog luka, širok spektar debljina materijala koje se mogu zavarivati, dobra podloga za automatizaciju procesa. Nedostatci impulsnog prijenosa: prevelikom impulsnom strujom dolazi do prevelikog protaljivanja, skupa oprema, visoka cijena zaštitnog plina. [20]

3.2. TIG

TIG (engl. Tungsten Inert Gas), odnosno GTAW (engl. Gas Tungsten Arc Welding) je elektrolučni postupak zavarivanja pri kojem se električni luk uspostavlja i održava između netaljive elektrode izrađene od volframa ili volframovih legura i osnovnog materijala. Za zaštitu metala zavara koriste se inertni plinovi, najčešće argon (Ar), helij (He) ili rijeđe njihove mješavine.

TIG postupak zavarivanja je najčešće ručni postupak zavarivanja iako se u zadnje vrijeme teži ka poluautomatizaciji i potpunoj automatizaciji (robotizaciji) samog procesa. Kod ručnog postupka zavarivač pomiče pištolj i u prednji rub taline u pravilnim vremenskim razmacima dodaje dodatni materijal. Poluautomatizirani postupak je vrlo sličan ručnom postupku osim što se u ovom slučaju dodatni materijal dodaje iz dodavača žice uz pomoć elektromotora. Automatizirani TIG postupak se primjenjuje u serijskoj proizvodnji. [21]

Prednosti TIG postupka [21]:

- koncentriranost električnog luka i time smanjena zona utjecaja topline (ZUT)
- nema rasprskavanja kapljica, nema troske
- minimalna količina štetnih plinova
- zavarivanje širokog spektra metala i njihovih legura
- mogućnost zavarivanja raznorodnih materijala
- mogućnost izvođenja zavarivanja u svim položajima
- mogućnost zavarivanja materijala malih debljina
- pogodno za izvođenje reparaturnih radova
- pravilno izveden zavareni spoj spada u najkvalitetnije zavarene spojeve izvedene elektrolučnim postupkom
- brzina dodavanja dodatnog materijala je nezavisna o energiji električnog luka
- zavarivanje u radionici i na terenu
- mogućnost automatizacije
- odličan izgled zavarenog spoja.

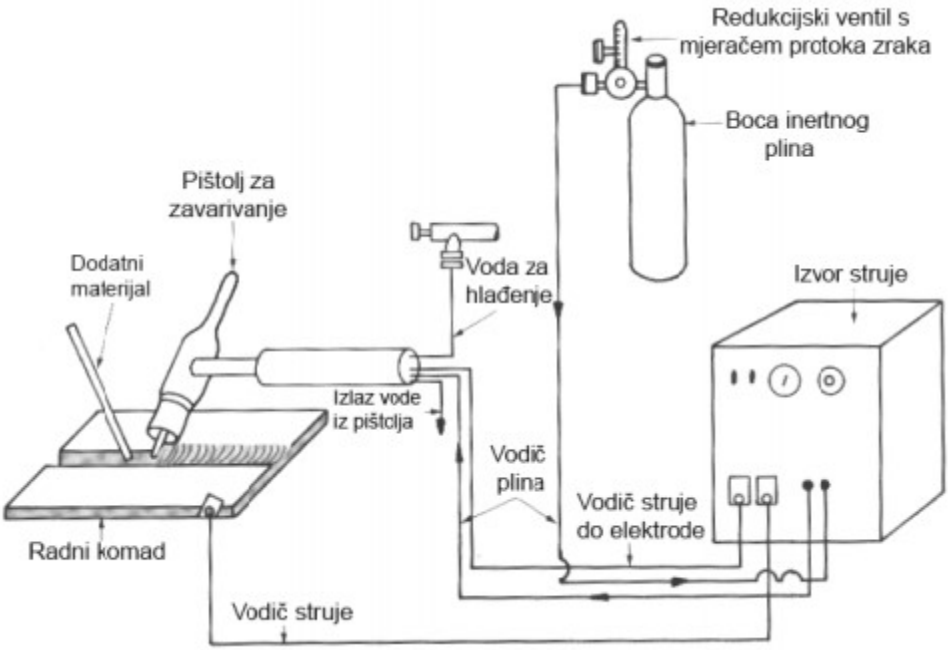
Nedostaci TIG postupka [21]:

- mala brzina zavarivanja i mali depozit dodatnog materijala,
- neekonomičnost u zavarivanju debljih materijala (iznad 6 mm)
- zahtjeva se precizna priprema zavarenog spoja
- visoka cijena opreme za zavarivanje i zaštitnih plinova

- zahtjevnost izvođenja ručnog TIG zavarivanja, duga i skupa izobrazba zavarivača
- otežanost izvođenja zavarivanja na otvorenim prostorima
- zahtjeva se visoka čistoća površina koje se zavaruju
- potreba za prisilnom ventilacijom zraka kod izvođenja zavarivanja u skučenim prostorima.

3.2.1. Oprema za TIG

Na slici 19. prikazana je oprema za ručno TIG zavarivanje.



Slika 19. Oprema za ručno TIG zavarivanje [22]

3.2.1.1. Izvor struje

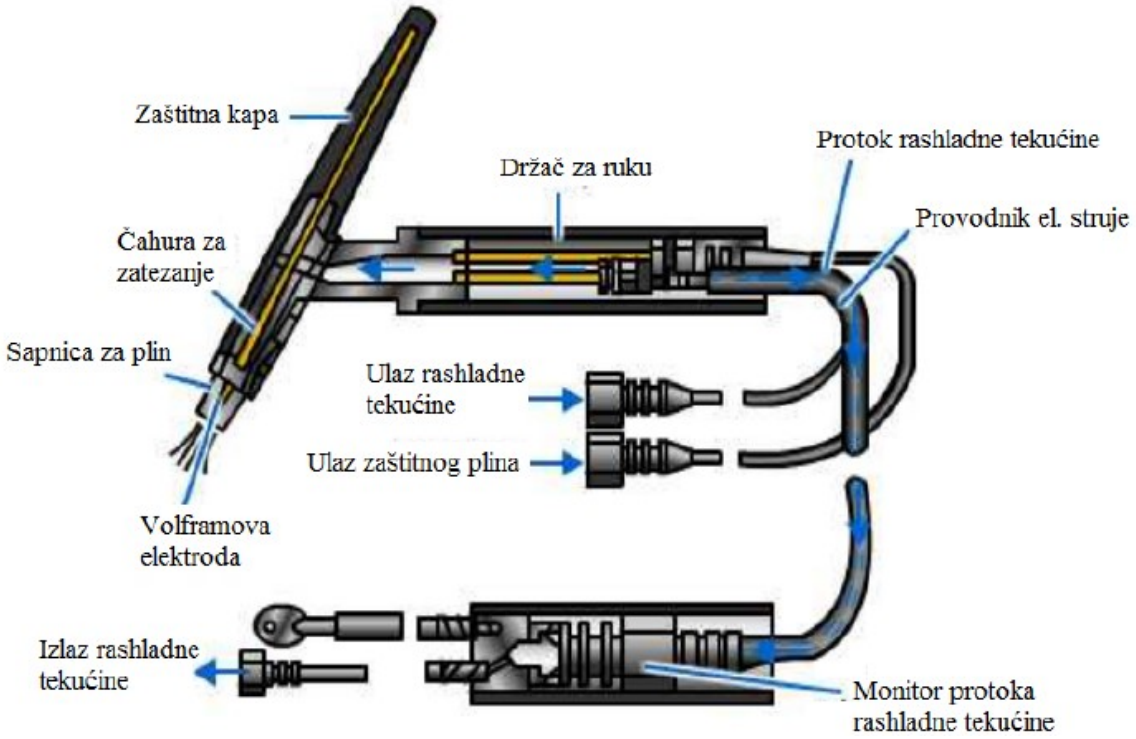
Za TIG zavarivanje primjenjuju se istosmjerni, izmjenični i kombinirani izvori struje, to jest ispravljači, motorgeneratori i transformatori. Izvori struje za zavarivanje nehrđajućih čelika su istosmjerni. Izvori struje za ručno zavarivanje trebaju imati strmopadajuću karakteristiku da se osigura približno konstantna struja zavarivanja neovisno o promjenama dužine luka uslijed pomicanja ruke zavarivača. Kod mehaniziranog zavarivanja gdje je osigurana konstantna dužina luka mogu se primjeniti i izvori s ravnom karakteristikom. [23]

Današnji izvori struje su pretežito izvori čija je jakost struje elektronički kontrolirana i u koje su ugrađeni inverteri. Izvor struje tijekom zavarivanja stalno provjerava izlaz struje na električnom luku sa strujom koja je tražena prilikom zavarivanja, a definirana samim izvorom struje. [22]

3.2.1.2. Pištolj za zavarivanje

Pištolj za zavarivanje sadrži volfram elektrodu koja dovodi električnu struju za uspostavljanje električnog luka te usmjerava zaštitni plin. Pištolji su podijeljeni po jakosti struje zbog opasnosti od pregrijavanja. Većina pištolja za ručno zavarivanje ima kut nagiba glave pištolja 120°, međutim mogu biti i s drugačijim nagibima (90°, 180°). [23]

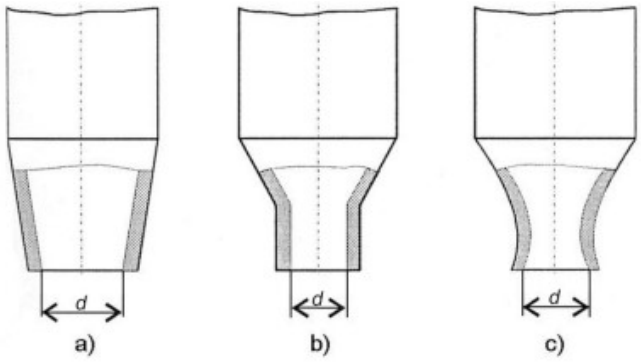
Plinski hlađene pištolje se hladi prolaskom relativno hladnog zaštitnog plina kroz pištolj, ali su ograničeni na jakosti struja do 200 A. Vodeno hlađeni pištolji se hlade prolaskom vode kroz kanaliće u držaču pištolja. Voda ulazi kroz ulaznu cijev, struji kroz pištolj te izlazi kroz izlaznu cijev. Vodeno hlađeni pištolji se koriste kod većih raspona struja npr. 300 – 500 A, ali proizvedeni su i pištolji koji mogu podnositi jakosti struje do 1000 A. Ovakvi pištolji se pretežno koriste u automatiziranoj proizvodnji [23]. Navedeno prikazuje slika 20.



Slika 20. Presjek pištolja za TIG zavarivanje sa sustavom hlađenja s rashladnom tekućinom [21]

3.2.1.3. Sapnica za zaštitni plin

Sapnica za zaštitni plin služi za usmjeravanje plina tokom zavarivanja, a može biti različitih oblika i veličina, ovisno o jakosti struje na mjestu zavarivanja, kao što je prikazano na slici 21.



Slika 21. Izvedbe sapnica: a) konusni oblik, b) cilindrični oblik, c) profilni oblik [22]

Mogu biti izrađene od keramike, metala i kvarcnog stakla. Keramička sapnica je najjeftinija i najčešće korištena, ali je vrlo krhka te lako može puknuti. Keramička sapnica je najbolja za korištenje pri visokofrekventnim strujama. Općenito pravilo za veličinu sapnice je da unutarnji promjer sapnice bude tri puta veći od promjera volframove elektrode. O samom obliku i veličini sapnice ovisit će količina i kvaliteta protoka zaštinog plina. [21]

3.2.1.4. Netaljiva volframova elektroda

Volframova elektroda je provodnik električne struje s pištolja na radni komad, prilikom čega se uspostavlja električni luk između radnog komada i volframove elektrode koji tali metal osnovnog i dodatnog materijala, a da se pri tome volframova elektroda ne tali. Temperatura tališta čistog volframa je 3683 K. [22]

Elektroda za TIG zavarivanje izrađuje se iz čistog volframa, ili iz volframa s dodacima [22]:

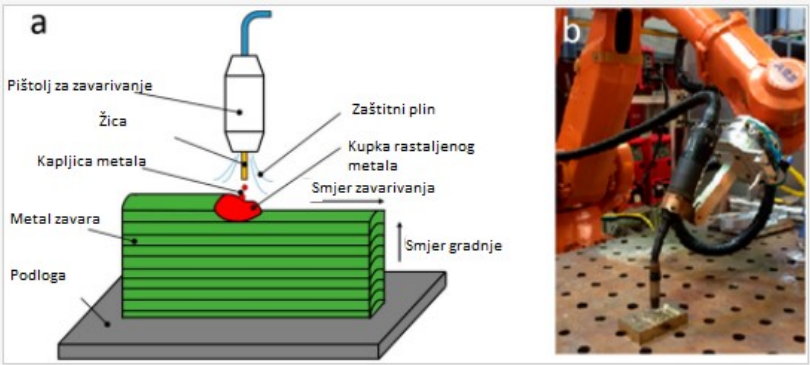
- čista volframova elektroda – uglavnom se koristi za zavarivanje izmjeničnom električnom strujom (zelene boje)
- volframova elektroda legirana s torijem – može se opterećivati većim jakostima struje zavarivanja, ima nižu granicu minimalnog opterećivanja i trajnija je (žute, crvene, ljubičaste i narančaste boje)
- volframova elektroda legirana cirkonijem – posebno se primjenjuje tamo gdje je ograničeno prisustvo volframa i torija u zavaru (smeđe i bijele boje)
- volframova elektroda legirana s lantanom – odlična je za rezanje plazmom (crne boje).

3.3. Primjena MIG/MAG i TIG postupaka kod WAAM-a

Tipični WAAM sustav sastoji se od [24]:

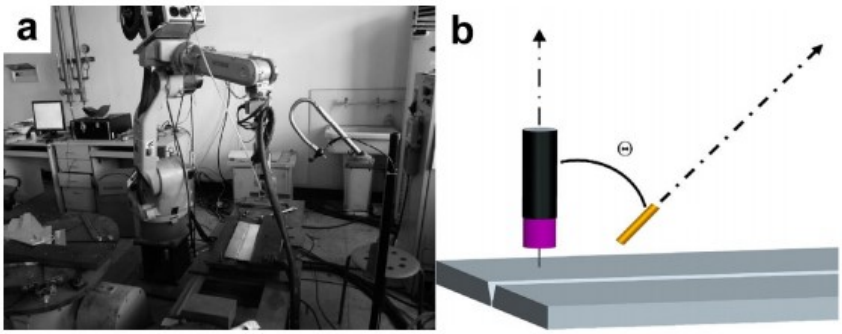
- računalno sučelje – služi za kontrolu opreme i prikupljanje rezultata eksperimenta
- kontroler robota – koristi se za koordinaciju gibanja robota i procesa zavarivanja
- programabilni izvor struje – služi za kontrolu parametara zavarivanja
- industrijski robot – služi za pomicaje pištolja za zavarivanje
- oprema za praćenje procesa – služi za mjerenje profila zavara.

Problemi koji se javljaju pri zavarivanju ovim postupcima u WAAM sustavima su nejednolika geometrija zavara po duljini, posebice na početku i na kraju prolaza. To dovodi do neujednačene geometrije, loše kvalitete površine i dimenzijske netočnosti komponente.
Slika 22. prikazuje WAAM sustav za MAG, a slika 23. prikazuje WAAM sustav za TIG postupak.



Slika 22. a) shematski prikaz slaganja slojeva, b) oprema za zavarivanje MAG postupkom [25]

Najčešće primjenjivan postupak kod WAAM-a je MIG/MAG. Prilikom zavarivanja elektroda je okomita na podlogu na koju se zavaruje. Općenito, širina zavara kreće se u rasponu od 4 do 10 mm. [7]



Slika 23. a) prikaz robotiziranog sustava za TIG, b) shematski prikaz pištolja za zavarivanje i dodatnog materijala [26]

4. DUPLEKS ČELICI

Nehrđajući čelici razvijeni su u prvim desetljećima dvadesetog stoljeća u Velikoj Britaniji i Njemačkoj. Prvi od njih bili su martenzitni i feritni Fe-Cr čelici, ali ubrzo su austenitni Fe-Cr-Ni postali najzastupljenija skupina. Bain i Griffith (1927) objavljuju podatke o nehrđajučim čelicima dvofazne austenitno-feritne mikrostrukture. U sljedećim godinama nekoliko ljevaonica u Francuskoj, Njemačkoj, Švedskoj i SAD-u otkrivaju nehrđajuće čelike takve mikrostrukture. [27]

Feritno-austenitni dupleks nehrđajući čelici ime su dobili po svojoj mikrostrukturi koja se sastoji od ferita i austenita u podjednakim volumnim udjelima (50:50). Iako su otkriveni početkom dvatesetog stoljeća, njihova primjena je bila rijetka sve do 80-ih godina prošlog stoljeća. Razlozi tome bili su problemi sa zavarivanjem, korozijskom postojanošću i krhkošću.

Danas se dupleks čelici primjenjuju na mnogim mjestima zbog svojih superiornih korozijskih i vrlo dobrih mehaničkih svojstava. Zbog visokog udjela ferita oni su feromagnetični, imaju višu toplinsku vodljivost i nižu toplinsku rastezljivost od austenitnih čelika. Na mjestima gdje se traži visoka otpornost na napetosnu i rupičastu koroziju, bolji su izbor od austenitnih čelika. [28]

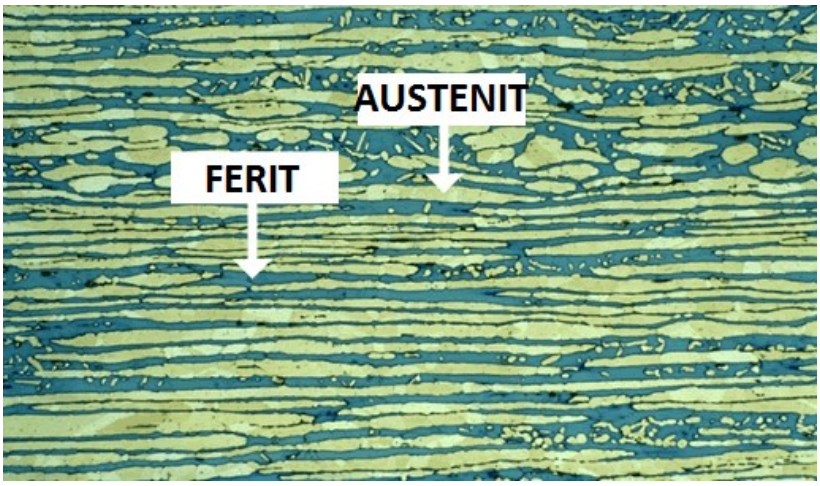
Zbog relativno visoke čvrstoće dupleks čelici su optimalan izbor za konstrukcije izložene koroziji, pri čemu dolazi do izražaja njihova karakteristika izvanredne kombinacije korozijske postojanosti i mehaničkih svojstava. Navedena svojstva omogućuju smanjenje nosivih presjeka i smanjenje ukupne mase proizvoda. Stoga, ovi se čelici često koriste za izradu plinovoda i naftovoda. U blažem korozivnom okruženju mogu biti dovoljno dobra zamjena za puno skuplje niklove legure. U odnosu na austenitne čelike, dupleks čelici imaju puno višu granicu razvlačenja. Također, viša im je i tvrdoća, a samim time i otpornost na abrazijsko trošenje. [28]

Većina novijih dupleks čelika ima dobru žilavost i duktilnost. Zbog velikog udjela feritne faze, pri sniženju temperature naglo prelaze iz žilavog u krhko područje, slično kao feritni nehrđajući čelici. Donja temperatura primjene je ograničena na -40 °C. Gornja temperatura primjene dupleks čelika je oko 315 °C, zbog brojnih mikrostrukturnih precipitata koji se mogu izlučiti na relativno niskoj temperaturi, a koji loše utječu na korozijsku postojanost i mehanička svojstva. Toplinska rastezljivost dupleks čelika slična je toplinskoj rastezljivosti ugljičnih i niskolegiranih čelika. Ova podudarnost omogućava njihovo međusobno spajanje u

nekim proizvodima (npr. tlačne posude) bez opasnosti od pojave prevelikih naprezanja pri kasnijem zagrijavanju tijekom eksploatacije [28].

4.1. Mikrostruktura

Mikrostrukturu dupleks čelika (prikazana na slici 24.) je dvofazna i sastoji se od približno 50 % volumnih udjela ferita (BCC kristalna rešetka) i isto toliko austenita (FCC kristalna rešetka). Dvofazna struktura se zove dupleks struktura te je upravo po njoj ova grupa nehrđajućih čelika dobila ime. Optimalna kombinacija austenita i ferita varira ovisno o proizvođačima i kreće se između 45 % i 60 % austenita u mikrostrukturi.

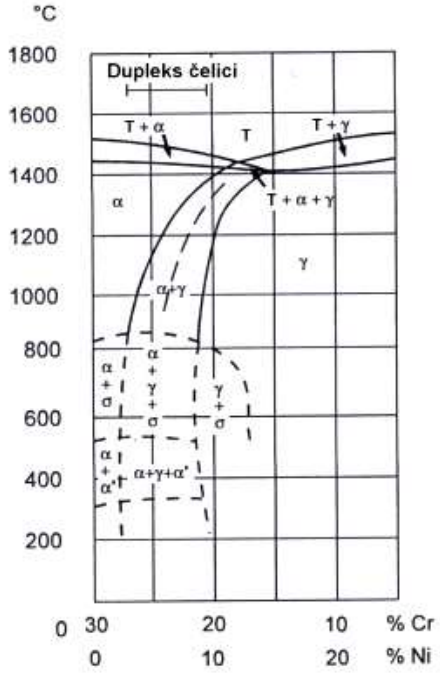


Slika 24. Dvofazna mikrostruktura dupleks čelika [29]

Ovako izbalansirana mikrostruktura određuje i njihova glavna svojstva - izvanredno dobru otpornost prema interkristalnoj, napetosnoj (SCC) i rupičastoj koroziji, u kombinaciji s visokom vlačnom čvrstoćom, visokom granicom tečenja i dobrom žilavošću.

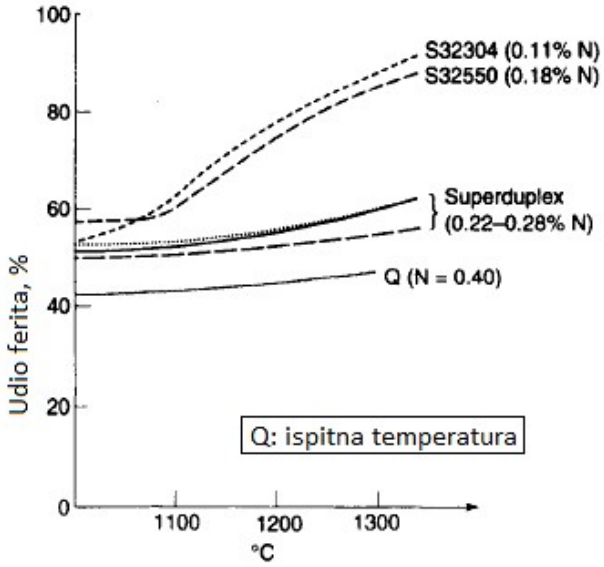
Sve dvofazne mikrostrukture mogu se svrstati u jedan od tri osnovna tipa: dispergirana, dupleks i umrežena mikrostruktura. Odlučujući utjecaj na mikrostrukturu dupleks čelika ima kemijski sastav legure i režim toplinske obradbe. Osnovni legirni elementi dupleks čelika su krom i nikal, a vrlo važnu ulogu u formiranju mikrostrukture 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 [30].

Formiranje feritno-austenitne mikrostrukture u dupleks čelicima može se pratiti u pseudobinarnom dijagramu stanja na slici 25.



Slika 25. Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70 % Fe=konst. [30]

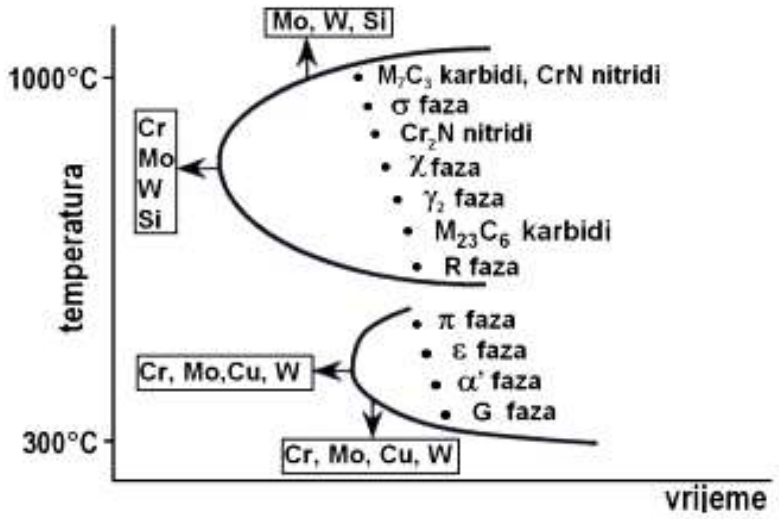
Dupleks čelici primarno kristaliziraju u 100 %-tni ferit. Odvođenjem topline i hlađenjem ferita stvara se po granicama feritnih zrna austenit. Slika 26. prikazuje promjene udjela ferita u strukturi za nekoliko vrsta dupleks čelika ovisno o temperaturi.



Slika 26. Promjene udjela ferita za nekoliko dupleks čelika ovisno o temperaturi [27]

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 mikrostrukturi ima 50 % ferita i 50 % austenita. Dalje se hlađenje nastavlja gašenjem u vodi što osigurava zadržavanje postignutog faznog omjera i na sobnoj temperaturi. Osim postizanja uravnoteženog faznog omjera gašenjem se sprečava stvaranje štetnih precipitata: karbida, nitrida, sigma-faze, Chi-faze, Lavesove faze, α'-faze i još nekih. Izlučivanjem ovih faza narušavaju se mehanička i korozijska svojstva dupleks čelika [30]. Kinetika nastanka nepoželjnih mikrostrukturnih faza u dupleks čelicima predočena je slikom 27.



Slika 27. Shematski prikaz tipičnih precipitacija u dupleks čelicima [30]

4.2. Podjela i svojstva dupleks čelika

Prvi dupleks čelici (dupleks čelici prve generacije) nemaju dobro izbalansiran kemijski sastav i uglavnom ne sadrže dušik. Takvi čelici se teško zavaruju i imaju lošija mehanička svojstva i korozijsku 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 žilavosti 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 [30].

Podjela dupleks čelika druge generacije napravljena je na osnovi postojanosti dupleks čelika na rupičastu koroziju tj. prema vrijednosti djelotvorne sume - DS (Pitting Resistance Equivalent Number - PREN), što se izračunava prema izrazu [30]:

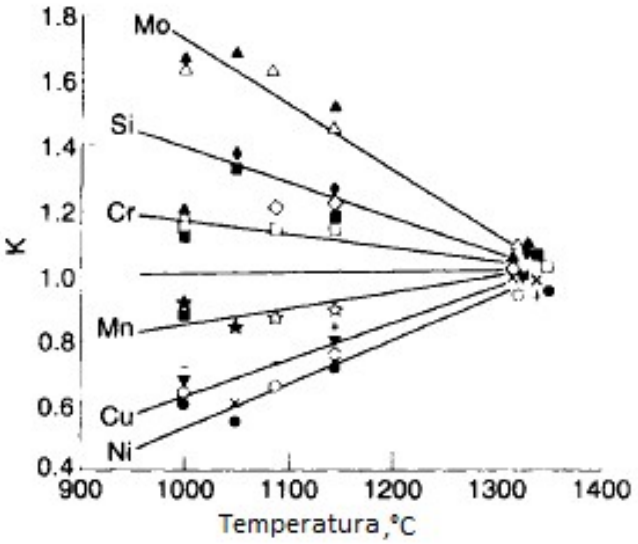
$$DS\ (PREN) = \%Cr + 3{,}3\ (\%Mo + 0{,}5\%W) + 16 \times \%N \tag{1}$$

Svi današnji, moderni dupleks čelici mogu se podijeliti u pet grupa:

- Fe-23Cr-4Ni-0,1N ili dupleks čelici bez Mo
- Fe-22Cr-5,5Ni-3Mo-0,15N ili dupleks čelici s 22% Cr
- Fe-25Cr-5Ni-2,5Mo-0,17N-Cu ili dupleks čelici s 25% Cr *(DS <40)*
- Fe-25Cr-7Ni-3,5Mo-0,25N-W-Cu ili super dupleks čelici (DS = 40 do 45)
- Fe-32Cr-7Ni-4Mo-0,5N-Cu ili hiper dupleks čelici (DS >45).

Super i hiper dupleks čelici sadrže više legirnih elemenata što im osigurava vrijednost djelotvorne sume višu od 40.

Osnovni legirni elementi u dupleks čelicima su krom i nikal, a vrlo važnu ulogu u formiranju mikrostrukture imaju još i dušik, molibden, bakar, mangan, silicij i volfram. Međusobni utjecaj legirnih elemenata je vrlo složen pa se, zbog postizanja izbalansiranog odnosa ferita i austenita mora paziti na količinu svakog elementa. Slika 28. prikazuje temperaturnu ovisnost udjelnog koeficijenta (K = ferit/austenit). [30]



Slika 28. Ovisnost udjelnog koeficijenta o temperaturi [27]

4.2.1. Legirni elementi

4.2.1.1. Krom

Glavna prednost kroma kao legirnog elementa u čeliku je povećanje korozijske postojanosti stvaranjem pasivnog filma na površini. Sadržaj kroma u dupleks čelicima iznosi između 21 % i 33 %. Minimalna količina kroma dovoljna da spriječi atmosfersku koroziju čelika stvaranjem stabilnog pasivnog filma na površini iznosi oko 11 %. Krom je alfageni legirni element, što znači da se dodavanjem kroma stabilizira feritna, prostorno centrirana kubična struktura. Porastom sadržaja kroma raste otpornost na koroziju. Krom također povisuje 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 nastajanju štetnih intermetalnih faza. [28]

4.2.1.2. Nikal

Dupleks čelici sadrže između 4 % i 9 % nikla. Nikal stabilizira austenitnu, plošno centriranu kubičnu kristalnu strukturu koja je zaslužna za vrlo dobru žilavost dupleks čelika. Dodavanjem nikla smanjuje se izlučivanje nepoželjnih intermetalnih faza [28].

4.2.1.3. Dušik

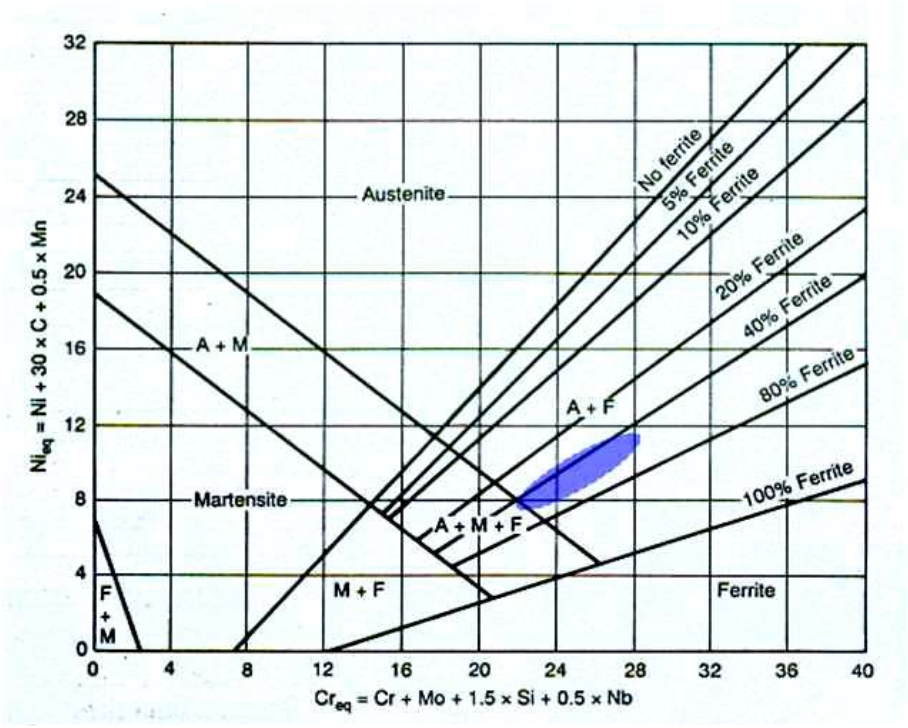
Dušik je jaki gamageni element i zajedno s niklom osigurava dovoljnu količinu austenita u strukturi dupleks čelika, što je posebno važno kod zavarivanja. Kod dupleks čelika s visokim sadržajem kroma i molibdena dušik sprječava nastanak nepoželjne sigma-faze. Također, značajno povisuje čvrstoću, otpornost na rupičastu koroziju i koroziju u procijepu. Dodavanjem dušika smanjuje se formiranje intermetalnih faza na povišenim temperaturama. [28]

4.2.1.4. Molidben

Dupleks čelici sadrže do 4 % molibdena. Molibden je alfageni legirni element i skupa s kromom djeluje u smislu poboljšanja otpornosti dupleks čelika na koroziju u medijima koji sadrže kloride. Povećanjem sadržaja molibdena raste opasnost od izlučivanja nepoželjnih intermetalnih faza. [28]

Bakar, volfram i silicij dodaju se dupleks čelicima zbog poboljšanja otpornosti na rupičastu koroziju te koroziju u procijepu [28].

Dobar uvid u postizivu mikrostrukturu na osnivi poznatog kemijskog sastava daju strukturni dijagrami. Schaefflerov dijagram za gašeno stanje pomaže u definiranju strukturnog stanja čelika na osnovi poznavanja Cr-ekvivalenta (Cr_e) i Ni-ekvivalenta (Ni_e) [31].
Smještaj dupleks čelika u Schaefflerovom dijagramu prikazan je na slici 29.



Slika 29. Smještaj dupleks čelika u Schaefflerovom dijagramu [30]

$$Ni_e = \%Ni + \%Co + 30(\%C) + 25(\%N) + 0{,}5(\%Mn) + 0{,}3(\%Cu) \quad (2)$$

$$Cr_e = \%Cr + 2(\%Si) + 1{,}5(\%Mo) + 5(\%V) + 5{,}5(\%Al) + 1{,}7(\%Nb) + 1{,}5(\%Ti) + 0{,}75(\%W) \quad (3)$$

U tablici 4. dane su oznake i kemijski sastav dupleks čelika po grupama.

Tablica 4. Oznake i kemijski sastav dupleks čelika po grupama [28]

Oznake - HRN EN		Tip	UNS No	C_{maks}	Cr	Ni	Mo	N	Mn	Cu	W
Dupleks čelici prve generacije											
X3CrNiMoN27-5-2	1.4460	329	S32900	0,08	23,0-28,0	2,5-5,0	1,0-2,0	-	1,00	-	-
X2CrNiMoSi18-5-3	1.4424		S31500	0,03	18,0-19,0	4,3-5,2	2,5-3,0	0,05-0,1		-	-
Dupleks čelici druge generacije											
X2CrNiN23-4	1.4362	2304	S32304	0,03	21,5-24,5	3,0-5,5	0,05-0,60	0,05-0,20	2,5	0,05-0,60	-
X2CrNiCuN23-4	1.4655			0,03	22,0-24,0	3,5-5,5	0,1-0,6	0,05-0,20	2,0	1,0-3,0	-
Dupleks čelici s 22% Cr											
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	2205	S31803	0,03	21,0-23,0	4,5-6,5	2,5-3,5	0,08-0,20	2,0		-
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	2205	S32205	0,03	22,0-23,0	4,5-6,5	3,0-3,5	0,14-0,20	2,0		-
Dupleks čelici s 25 % Cr											
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507		S32520	0,03	24,0-26,0	5,5-8,0	3,0-4,0	0,20-0,35	1,5	0,5-2,0	-
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	255	S32550	0,04	24,0-27,0	4,5-6,5	2,9-3,9	0,10-0,25	1,5	1,5-2,5	-
Super-dupleks čelici											
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	2507	S32750	0,03	24,0-26,0	6,0-8,0	3,0-5,0	0,24-0,32	1,20	0,5	-
X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501		S32760	0,03	24,0-26,0	6,0-8,0	3,0-4,0	0,20-0,30	1,00	0,5-1,0	0,5-1,0
X2CrNiMoN29-7-4	1.4477			0,03	28,0-30,0	5,8-7,5	1,5-2,6	0,3-0,40	0,80-1,50	≤0,8	-
Hiper-dupleks čelici											
X2CrNiMoCoN28-8-5-1			S32707	0,03	26,0-29,0	5,5-9,5	4,0-5,0	0,30-0,50	1,5	1,00	
			S33207	0,03	29,0-33,0	6,0-9,0	3,0-5,0	0,40-0,60	1,5	1,00	-

4.3. Mehanička svojstva

Dupleks čelici posjeduju visoku čvrstoću i, unatoč tomu, dobru istezljivost i udarnu radnju loma. Prijelaz iz žilavog u krhko područje je vrlo postupan, a dobru udarnu radnju loma zadržavaju do -40° C. Mehanička svojstva dupleks čelika su anizotropna, tj. ovisna o orjentaciji mikrostrukture. R_m je viša u smjeru okomitom na smjer valjanja nego u smjeru valjanja, a udarni rad loma (*KV* odnosno *KU*) je viši ako epruveta pri ispitivanju puca u smjeru okomitom na smjer valjanja nego u smjeru valjanja. Udarna radnja loma dupleks čelika kreće se za KV do 170 J. Značajan utjecaj na mehanička svojstva ima i završna toplinska obrada, tj. temperatura gašenja dupleks čelika, prvenstveno zbog promjene omjera ferit/austenit, ali i zbog moguće nazočnosti zaostalih (neotopljenih) izlučevina. Dupleks čelici ne mogu se toplinski očvrsnuti, ali mogu se očvrsnuti hladnom deformacijom. Tvrdoća dupleks čelika kreće se u rasponu od 250 do 350 HV, a mikrotvrdoća austenita je otprilike 300 HV 0,02, a ferita od 300 do 550 HV 0,02. [28]

U tablici 5. prikazane su minimalne vrijednosti vlačne čvrstoće, granice razvlačenja i istezljivosti za neke dupleks čelike.

Tablica 5. Mehanička svojstva nehrđajućih dupleks čelika [28]

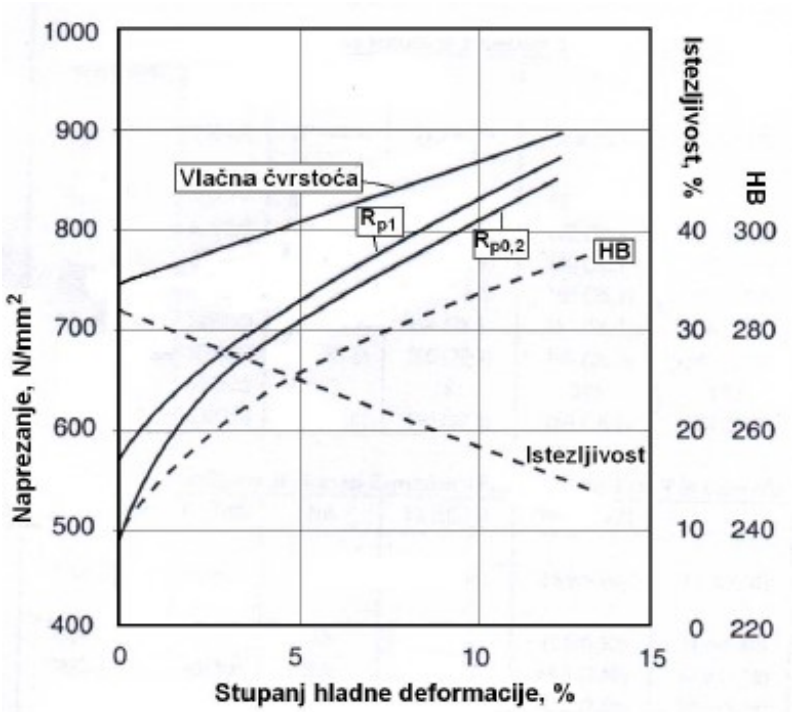
Oznake materijala		R_m, MPa	R_e, MPa	A, %
X3CrNiMoN27-5-2	1.4460	620	485	15,0
X2CrNiN23-4	1.4362	600	400	25,0
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	620	450	25,0
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	620	450	25,0
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	770	550	25,0
X2CrNiMoCuN25-6-3	1.4507	760	550	15,0
X2CrNiMoN25-7-4	1.4410	795	550	15,0
X2CrNiMoCuWN25-7-4	1.4501	750	550	25,0

Pri obradi odvajanjem čestica za obradu dupleks nehrđajućih čelika mogu se primijeniti slični postupci kao kod austenitnih ili ugljičnih čelika, ali zbog specifičnih mehaničkih i toplinskih svojstava dupleks čelika, obrada je kompliciranija i teža. Smična čvrstoća dupleks čelika

iznosi oko 58 % vrijednosti vlačne čvrstoće pa je uz istu smičnu silu maksimalna debljina smicanja za ove čelike oko 65 % debljine za austenitne čelike. [28]

Dupleks čelici moguu se hladno oblikovati, ali teže od austenitnih nehrđajućih čelika. Minimalna istezljivost im je od 15 % do 30 % i imaju relativno visoku granicu razvlačenja [32].

Slika 30. prikazuje utjecaj hladne deformacije na mehanička svojstva dupleks čelika 1.4462.



Slika 30. Utjecaj hladne deformacije na mehanička svojstva dupleks čelika 1.4462 [27]

Za mehanička svojstva dupleks čelika općenito vrijedi sljedeće [28]:

- tvrdoća dupleks čelika kreće se u rasponu od 250 HV do 350 HV
- mikrotvrdoća: austenita ~300 HV0,02, ferita od 300 HV0,002 do 550 HV0,002
- vlačna čvrstoća, R_m: 700-1100 MPa
- konvencionalna granica razvlačenja, $R_{p0,2}$: 500-800 MPa
- udarna radnja loma, *KV*: do 170 J

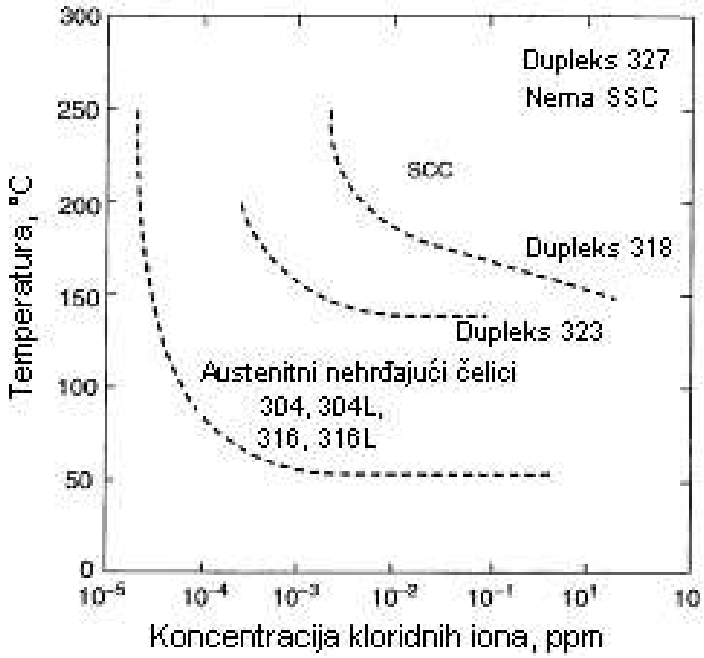
4.4. Korozijska postojanost

Dupleks čelici posjeduju izvanrednu korozijsku postojanost što u kombinaciji s dobrim mehaničkim svojstvima predstavlja njihovu glavnu komparativnu prednosti pred drugim nehrđajućim čelicima. Kao što je već spomenuto, dupleks čelici iskazuju veliku otpornost u svim korozivnim okolinama u kojima se primjenjuju i drugi nehrđajući čelici, no u nekima od

njih dupleksi su se pokazali značajno superiorniji u odnosu na druge nehrđajuće čelike. Ta superiornost proizlazi iz strukture koja sadrži velik udio kroma koji daje otpornost na oksidirajuće kiseline, te dovoljan postotak molibdena i kroma za otpornost u umjereno reducirajućim kiselinama. Takva mikrostruktura pruža relativno dobru otpornost na rupičastu koroziju i na koroziju u procjepu. Njihova dvofazna struktura, s najmanje 40% ferita, razlog je otpornosti na napetosnu koroziju izazvanu kloridima, koja je daleko veća od otpornosti austenitnih nehrđajućih čelika. Feritna faza je međutim osjetljiva na vodikovu krhkost. Zato dupleks čelici nemaju dobru otpornost u okolinama gdje može doći do reakcije s vodikom.

4.4.1. Napetosna korozija

Dupleks nehrđajući čelici imaju puno bolju korozijsku postojanost prema napetosnoj koroziji od austenitnih nehrđajućih čelika. Zbog visokog masenog udjela kroma i nižeg udjela nikla osobito su otporni prema napetosnoj koroziji u kloridnom okruženju. Veliki postotak dupleks čelika u kemijskoj industriji zamijenio je austenitnu skupinu u primjeni gdje je velik rizik od pojave ove vrste korozije. Na slici 31. prikazana je otpornost prema napetosnoj koroziji u ovisnosti o temperaturi i koncentraciji kloridnih iona austenitnih i dupleks nehrđajućih čelika. Jasno je vidljivo da su austenitni čelici puno osjetljiviji na napetosnu koroziju od dupleks čelika [28].



Slika 31. Otpornost prema napetosnoj koroziji u ovisnosti o temperaturi i koncentraciji kloridnih iona [28]

4.4.2. Rupičasta korozija

Dupleks čelici su odlično postojani prema rupičastoj koroziji zbog toga što su legirani visokim udjelom kroma, volframa, molidbena i dušika. Otpornost na ovaj tip korozije može se odrediti prema kemijskom sastavu, preko vrijednosti djelotvorne sume. Najveći utjecaj na vrijednost djelotvorne sume ima dušik, a nešto manji utjecaj imaju molidben, volfram i krom. Mikrostrutura također ima određeni utjecaj na otpornost na rupičastu koroziju. Povećan volumni udio feritne faze i precipitati nitrida u krupnim feritnim zrnima, koji u određenim uvjetima mogu nastati pri zavarivanju dupleks čelika, nepovoljno utječu na otpornost prema rupičastoj koroziji. [28]

4.5. Primjena

Primjenjuju se u industriji nafte i plina za izradu crpki, destilatora, desalinizatora 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 i cijevi regeneracijskih peći. Primjenu nalaze i u prehrambenoj industriji u transportu i pohrani jestivih ulja, vina, voćnih sokova, mlijeka itd. Dupleks čelik zbog poželjnih svojstava ima važnu ulogu i u gradnji mostova i metalnih konstrukcija [33].

Glavni razlozi korištenja dupleks čelika [34]:

- smanjenje težine konstrukcija
- dobro otpornost na površinsku i pitting koroziju
- otpornost na napetosnu koroziju
- otpornost na interkristalnu koroziju
- kombinacija dobrih mehaničkih i antikorozivnih svojstava
- otpornost na umor
- otpornost na trošenje
- fizikalna svojstva, poput toplinske istezljivosti
- deformabilna svojstva.

4.5.1. Nafta i plin

Naftna industrija je prva koja je značajnije počela koristiti dupleks čelike. Iako nafta sama po sebi nije jako korozivna, prirodno okruženje crpilišta i sama eksploatacija mogu uzrokovati korozivan okoliš. Nerafinirani nafta i plin sadrže različite razine CO_2 i H_2S koji značajno utječu na korozivnost. S druge strane, *offshore* industrija zahtjeva rad sa slanom vodom koja je jako korozivna i zahtjeva rad s korozijski otpornim materijalima. Najkorozivniji okoliš u ovoj industriji je u dubokim kiselim bušotinama pri visokoj temperaturi, a na takvim mjestima su se dupleks čelici pokazali kao odlično rješenje. [34]

Vrlo važna primjena dupleks čelika je u izradi cjevovoda za naftu i plin. Najčešća vrsta dupleks nehrđajućih čelika koja se koristi za izradu cjevovoda je 2205, a ponekad se koriste i super-dupleks čelici kod naftovoda s većim udjelom H_2S. Većina cjevovoda je na *offshore* konstrukcijama. Cjevovodi od ovih materijala koriste se za spajanje primorskih bušotina s kopnenim cjevovodima. [34]

Slika 32. prikazuje *offshore* konstrukciju i neke njene dijelove koji su izrađeni od dupleks nehrđajućih čelika.

Slika 32. Offshore konstrukcija s dijelovima izrađenima od dupleks čelika [35]

4.5.2. Celuloza i papir

Ova industrija je među prvima počela upotrebljavati dupleks čelike, a i dalje ih koristi u velikom broju. Dupleks čelici prisutni su kroz cijelu proizvodnju u raznim alatima i strojevima. Dupleks čelici pokazali su se kao odlično rješenje u procesima proizvodnje pri alkalnim uvjetima s povišenom temperaturom, koji su izrazito korozivni. Uz antikorozivna svojstva, bitni razlozi za njihovo korištenje su cjenovna komponenta i dobra mehanička

svojstva. Još neke od primjena ovih čelika u ovoj industriji su za izradu ventila, cjevovoda, spremnika, izmjenjivača topline, pumpi itd. [34]

4.5.3. Desalinizacija

Zahtjevi za pitkom vodom sve su veći tako da se na mjestima siromašnima njima, a bogatima morskom vodom poseže za postupcima desalinizacije. Procesi desalinizacije vrlo su korozivni, pogotovo u procesima isparivanja morske vode. Zbog korozivnog okoliša zahtjeva se antikorozivni materijal koji može raditi pod uvjetima povišene temperature. Najčešće korišteni materijal koji zadovoljava te kriterije pri izradi isparivača desalinizatora je 2205. [34]

5. METALURŠKI ASPEKTI ZAVARIVANJA

Metalurški aspekti zavarivanja odigrali su ključnu ulogu u razvoju legure dupleks čelika. Ranije vrste dupleks čelika imale su viši udio ugljika i samim time tendenciju stvaranja zone utjecaja topline bogate feritom. Također, reformacijom manjeg broja austenita u mikrostrukturi s većim udjelom ugljika može doći do pojave precipitata karbida, a time i do smanjene otpornosti na interkristalnu koroziju.

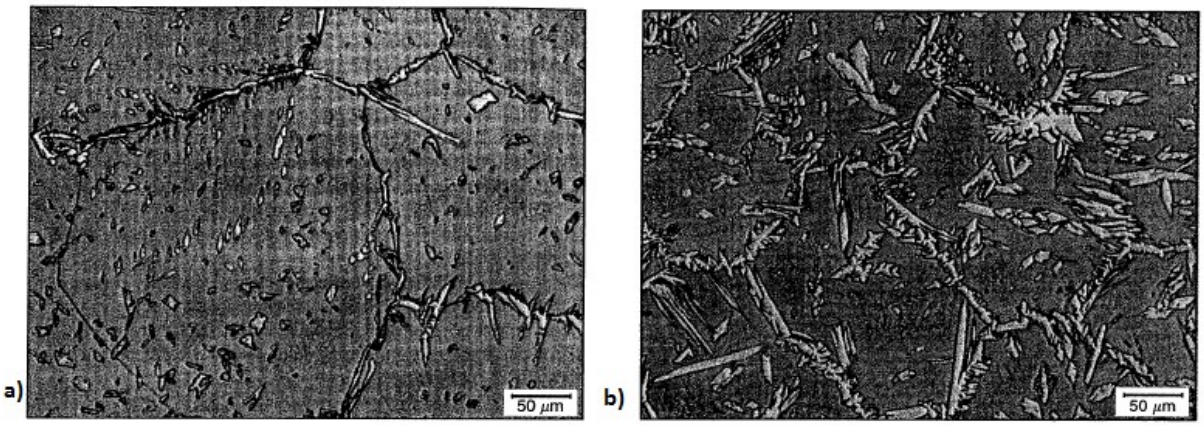
Noviji dupleks čelici imaju sniženi udio ugljika pa je izlučivanje karbida i pojava senzibilizacije kod njih svedeno na najmanju moguću mjeru. Ako se ipak dogodi, izlučeni karbidi su tipa $M_{23}C_6$, M_7C_3, M_6C, i M_3C kao i monokarbidi tipa MC te karbonitridi tipa M(C,N). Karbidi nastaju sporim ohlađivanjem ili zadržavanjem na temperaturi između 820 °C 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. Kako je difuzija kroma u feritu oko 100 puta brža nego u austenitu, karbid puno brže raste u feritnom zrnu. Obratnom difuzijom kroma brzo se eliminira osiromašenje uskog područja u austenitu. Iako je maseni udio kroma u feritu nastankom karbida smanjen, 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. Karbidi tipa M7C3 rijetko se izlučuju zbog niskog udjela ugljika u suvremenim dupleks čelicima. [28]

5.1. Solidifikacija

Svi dupleks čelici primarno kristaliziraju kao 100 %-tni ferit. Daljnjim hlađenjem formira se austenitna faza, 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. Redoslijed kristalizacije dupleks čelika[36]:

$$L \rightarrow L + F \rightarrow F \rightarrow F + A$$

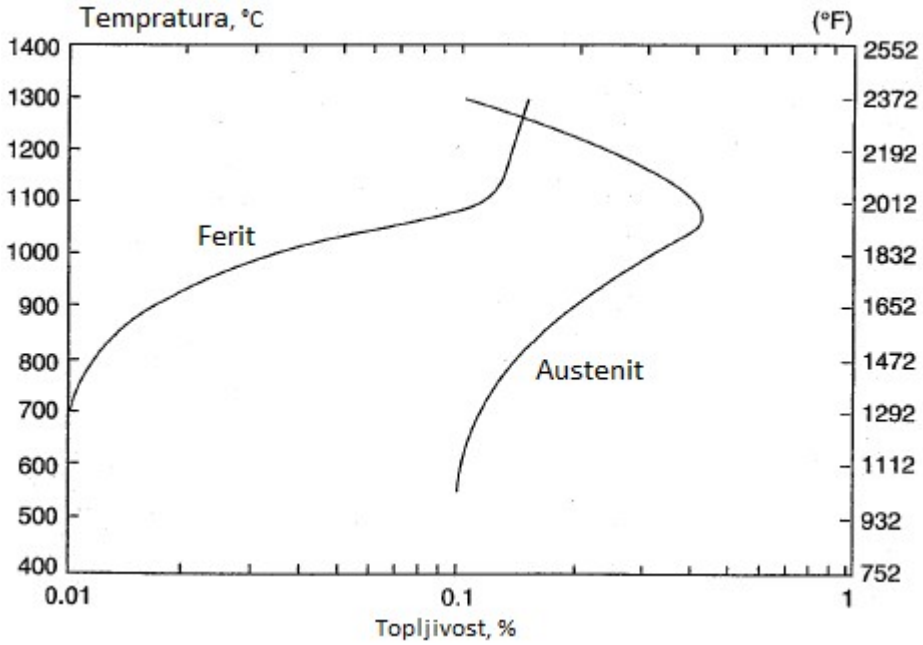
Metal zavara dupleks nehrčajućih čelika sastoji se od mješavine austenita i ferita. Slika 33. prikazuje mikrostrukturu metala zavara dupleks čelika s visokim i srednjim udjelom ferita.



Slika 33. Mikrostruktua metala zavara: a) Visoki udio ferita b) Srednji udio ferita [36]

5.2. Uloga dušika

Svim modernim dupleks čelicima dodaje se dušik kako bi se poboljšala čvrstoća i otpornost na rupičastu koroziju. Udio ugljika je između 0,08 % i 0,35 %. Na slici 34. može se vidjeti ovisnost topljivosti dušika o temperaturi u austenitu i feritu. Topljivost dušika u feritu na temperaturi od oko 1000 °C je poprilično manja od nevedenih udjela dušika u dupleks čelicima, ali je topljivost dušika u austeniti značajno veća. Te razlike u topljivosti dušika imaju važnu ulogu u precipitaciji nitrida u leguri. Kada je mikrostruktura balansirana (približno 50 % austenita i 50 % ferita) dušik dijeli austent i ferit i ostaje većinom u krutoj otopini. [36]



Slika 34. Ovisnost topljvosti dušika o temperaturi [36]

Ako je udio ferita visok, kao što je to slučaj u metalu zavara i zoni utjecaja topline pri većim režimima ohlađivanja, precipitacija nitrida postaje izražena pri hlađenju nakon što se prođe granica topljivosti dušika u feritu jer dušik zbog brzine reakcije nema vremena prijeći u austenit. U većini slučajeva ti nitridi su bogati kromom i primarno govori se o Cr_2N. Posljedice ove precipitacije su gubitak duktilnosti, čvrstoće i korozijske otpornosti. [36]

Zavari i njihova zona utjecaja topline brzo se hlade i zbog toga postoji tendencija za stvaranje više ferita u matalu zavara i zoni utjecaja topline nego u osnovnom metalu dupleks čelika. Zbog balansa faza kod dupleks čelika kakvoća zavara jako je ovisna o difuziji dušika. Dušik je ključni element pri snižavanju temperature gašenja tako da materijal u zoni utjecaja topline može postići balans mikrostrukture približan osnovnom metalu. Razlog tome je što su svi legirajući elementi u dupleks čelicima supstitucijski elementi, osim ugljika i dušika koji su intersticijski, a njihova brzina difuzije je mala. S druge strane, ugljik i dušik imaju male intersticijske atome i zbog toga im je razina brzine difuzije velika i na temperaturama višim od temperature žarenja (1040 °C). Ugljik nije poželjan legirni element zbog raznih efekata na korozijsku otpornost i njegova se koncentraciji drži što je moguće manjom [36].

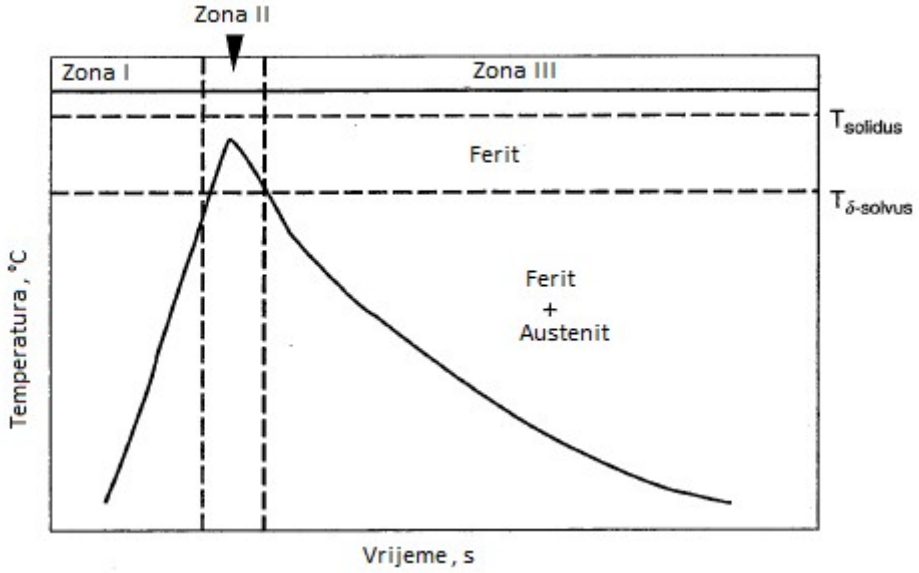
Dušik je puno bolje topiv u austenitu nego u feritu na temperaturama iznad 1040 °C. Kada je legura na temperaturama ispod temperature solidusa za ferit dušik difundira iz ferita u austenit. Ako je hlađenje prebrzo da bi se ostvarila difuzija dušik iz ferita u austenit, dušik ostaje zarobljen u feritu, a zatim precipitira u obliku kromovih nitrida.

5.3. Sekundarni austenit

Sekundarni austenit ($\gamma 2$) formira se 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. [28]

5.4. Zona utjecaja topline

Zona utjecaja topline može se podijeliti na tri različite zone s obzirom na promjenu temperature tijekom vremena kako je prikazano na slici 35.



Slika 35. Ciklus promjene mikrostrukture u ZUT-u [36]

Slika 34 predstavlja dupleks čelik koji na povišenim temperaturama poprima feritnu strukturu, kao npr. 2205 s 0,1 % dušika. U vremenskoj zoni 1 čelik se grije na temperaturu solidusa ferita. U toj temperaturnoj zoni austenit se počinje transformirati u ferit. Ta transformacija odvija se pomoću kontrolirane difuzije, sve dok cijela struktura ne postane feritna. U ovom ciklusu će se, također, otapati i precipitati, prije svega karbidi i nitridi. [36]

U drugoj regiji, iznad temperature solidusa, dolazi do porasta feritnih zrna zbog nepostojanja sekundarne faze (austenita) i precipitata koje bi spriječile rast. Što je temperatura solidusa niža to će biti izraženiji rast zrna. Vrijeme provedeno iznad solidusa ferita, gdje je mikrostruktura kompletno feritna, je proporcionalno razini rasta zrna.

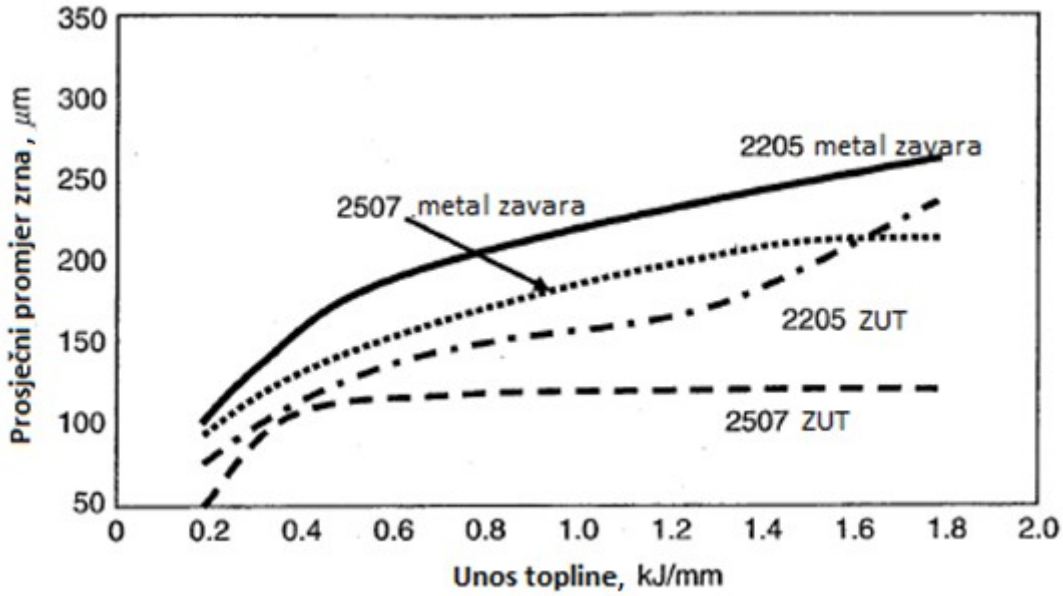
Na temperaturi ispod solidusa ferita, tj. u fazi ohlađivanja, nalazi se zona 3. U toj zoni nastaju nukleusi austenita i odvija se njihov rast. Brzinom ohlađivanja regulira se omjer austenita i ferita. S većim brzinama ohlađivanja u strukturi će biti i veći udio ferita. Također, režimima ohlađivanja regulira se i precipitacija, prvenstveno karbida i nitrida. S većim brzinama ohlađivanja i precipitacija će biti izraženija.

Kao što je ranije i spomenuto, vrijeme provedeno iznad temperature solidusa ferita značajno utječe na rast zrna. S obzirom da s porastom zrna opadaju čvrstoća i duktilnost materijala

nastoji se vrijeme prevedeno u zoni monofaznog austenita što više skratiti. To skraćenje vremena može se kod zavarivanja skratiti redukcijom unosa topline. Također, i kemijski sastav utječe na to vrijeme.

Temperatura solidusa ferita varira između 1250 °C i 1350 °C ovisno o kemijskom sastavu legure dupleks čelika. S obzirom na takav raspon temperatura udio ferita u zoni utjecaja topline može značajno varirati [36].

Veličina zrna metala zavara i metala u zoni utjecaja topline ovisni su o unosu topline kako je prikazano na slici 36. Također, vidljivo je da je zrno većeg promjera u metalu zavara nego u zoni utjecaja topline. Primjećuje se i granična razina unešene topline nakon koje rast zrna postaje blaži.



Slika 36. Utjecaj unosa topline na rast zrna ferita [36]

6. ZAVARLJIVOST

Kvaliteta zavarivanja dupleks čelika dosegnula je razinu koja zadovoljava vrlo visoke konstrukcijske kriterije. No, traženu kvalitetu moguće je postići jedino optimalnim postupkom zavarivanja. Odabir postupka zasniva se na kriterijima poput debljine materijala, vrste spoja i ostalih konstrukcijskih zahtjeva i ekonomičnosti proizvodnje.

6.1. Solidifikacijske pukotine metala zavara

Solidifikacijske pukotine se javljaju pred kraj procesa hlađenja. Mogu se pojaviti u unutrašnjosti ili na površini zavarenog spoja. Solidifikacijske pukotine nastaju pri pothlađivanju taline, stezanju kristala dendrita i potrebi da se šupljine popune talinom niske viskoznosti. Zbog niskotaljivih faza - eutektika koje popunjavaju navedene šupljine i vlačnih naprezanja izazvanih stezanjem taline u procesu hlađenja dolazi do odvajanja, to jest pukotine, u zadnjoj fazi kristalizacije. [36]

U suštini svi dupleks čelici solidificiraju kao ferit i samim time su osjetljiviji na solidifikacijske pukotine nego austenitne legure koje solidificiraju kao mješavna austenita i ferita. No, općenito, dupleks čelici imaju sasvim dobru otpornost na solidifikacijske pukotine. To je vjerojatno tako zbog činjenice da imaju relativno nisku razinu onečišćenosti. [36]

Korištenjem austenitnih dodatnih materijala može se smanjiti osjetljivost na solidifikacijske pukotine, ali uz smanjenje korozijske otpornosti metala zavara u odnosu na osnovni metal.

6.2. Vodikove pukotine

Dupleks nehrđajući čelici smatraju se otpornima na vodikove pukotine. No, do pojave vodikovih pukotina može doći pri velikim količinama vodika i povećanom naprezanju.

Preporučuje se pri zavarivanju REL i EPP postupcima u vlažnim atmosferama pripaziti na samu tehnologiju zavarivanja kako ne bi došlo do mogućih pukotina nastalih većim unosom vodika u metal zavara. [36]

Kod MIG i TIG postupaka dopušteno je korištenje između 2 % i 5 % vodika u mješavini zaštitnih plinova. Dodavanjem vodika argonu postiže se reducirajući efekt, bolji izgled zavara, nepostojanje površinske oksidacije. Električni luk je uži i ima veću energiju te

omogućava veće brzine zavarivanja, ali treba biti pažljiv s većim postotcima vodika da ne bi došlo do opasnosti od vodikovih pukotina. [36]

Najbolje osiguranje od vodikovih pukotina je kontrola udjela ferita u mikrostrukturi. S većim udjelom austenita sprječava se difuzija vodika u mikrostrukturu i eventualno širenje pukotina.

6.3. Srednje temperaturno očvrsnuće

Formiranje intermetalnih faza loše utječe na duktilnost, čvrstoću i korozijsku otpornost. Uslijed visokih udjela kroma i molidbena, njihova precipitacija je moguća u odgovarajućim temperaturnim rasponima. Radna temperatura ovih čelika ograničena je na 280 °C ulijed navedenih razloga. Postupci zavarianja ne bi smjeli utjecati na očvrsnuče osnovnog metala, ali su metal zavara i zona utjecaja topline izloženi stvaranju intermetalnih spojeva. [36]

6.3.1. Očvrsnuće α'-fazom

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. α'-faza ima istu kristalnu strukturu (BCC rešetka) kao α-faza uz neznatno veći parametar rešetke [28]:

α'-faza: a = 0,289 nm

α -faza: a = 0,286 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 [28].

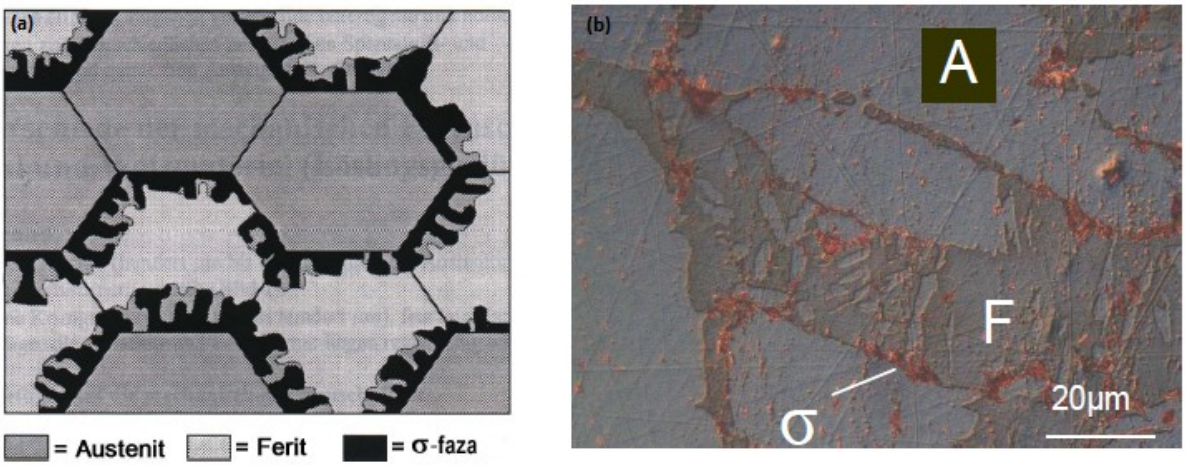
Pojava ove faze izaziva povećanje tvrdoće feritne faze koje se može registrirati mjerenjem mikrotvrdoće i nanotvrdoće. Također se povisuje vlačna čvrstoća, a drastično padaju žilavost, istezljivost i korozijska postojanost. Pad žilavosti i istezljivosti najjače je izražen grijanjem na oko 475°C pa se ova pojava naziva "krhkost 475°C". [28]

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 masenog udjela ugljika te dušika [28].

6.3.2. Očvršćivanje sigma-fazom

Sigma-faza je kromom bogata, tvrda i krhka, nemagnetična intermetalna faza koja nastaje zadržavanjem dupleks čelika na temperaturi između 560 °C i 980 ºC. Sklonost nastanku sigma 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 prekristalizira u sigma-fazu i austenit. Sigma-faza primarno se formira na faznim granicama ferit/austenit i odatle se dalje širi u ferit [28].

Model nastanka i rasta sigma-faze prikazan je na slici 37. (a), a na slici 37. (b) vidi se fotografija mikrostrukture dupleks čelika 1.4462 žarenog na 800 °C u trajanju od 60 min. U mikrostrukturi se izlučila sigma faza, smanjio se udio ferita i povećao udio austenita u odnosu na osnovno stanje.



Slika 37. Model nastanka i rasta sigma faze (a)
Sigma faza po granicama ferit/austenit (b) [28]

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. Prisutnost sigma faze može povisiti makrotvrdoću dupleks čelika do 450 HV50. Korozijska postojanost dupleks čelika značajno se smanjuje nastankom sigma faze.

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 [28]:

$$(FeNi)_x(CrMo)_yFeCr \text{ ili } (FeNi)_x(CrMo)_y \quad (4)$$

7. EKSPERIMENTALNI RAD

7.1. Opis eksperimenta

Eksperimentalni rad proveden je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Provođenje eksperimenta provedeno je u nekoliko faza.

U eksperimentalnom dijelu za dodatni materijal kvalitete 1.4462 promjera 1,2 mm bilo je potrebno odrediti optimalno područje parametara u području kratkih spojeva za više zaštitnih plinskih mješavina.

U prvoj fazi potrebno je odrediti područje parametara za navarivanje i načiniti nekoliko probnih uzoraka. U sljedećoj fazi slijedi navarivanje većeg broja slojeva jedan na drugi kako bi se postigle potrebne dimenzije uzorka iz kojih je moguće napraviti ispitne uzorke prema predviđenim normama. U trećem dijelu eksperimentalnog rada provedena su nerazorna i razorna ispitivanja na dobivenim uzorcima. Nakon provedenih ispitivanja izvršena je analiza dobivenih rezultata.

Zavarivanje uzoraka izvedeno je robotiziranim MAG postupkom. Postupak robotiziranog zavarivanja izabran je iz razloga što karakteristika ponovljivosti robota pruža jednake uvjete zavarivanja za svaki pojedini prolaz. Budući da su svi zavari izvedeni u identičnim uvjetima, razlike u izvedbi su minimalne te je tako izbjegnut utjecaj ljudskog čimbenika na rezultate ispitivanja.

U eksperimentu su korištene četiri vrste zaštitnih plinskih mješavina trgovačkih naziva: Inoxline X3, Inoxline C6X1, Inoxline C2 i Inoxline N2. Parametri zavarivanja nisu mijenjani kako bi se utjecaji navedenih plinskih mješavina na omjer austenita i ferita u metalu zavara mogli promatrati neovisno u unosu topline.

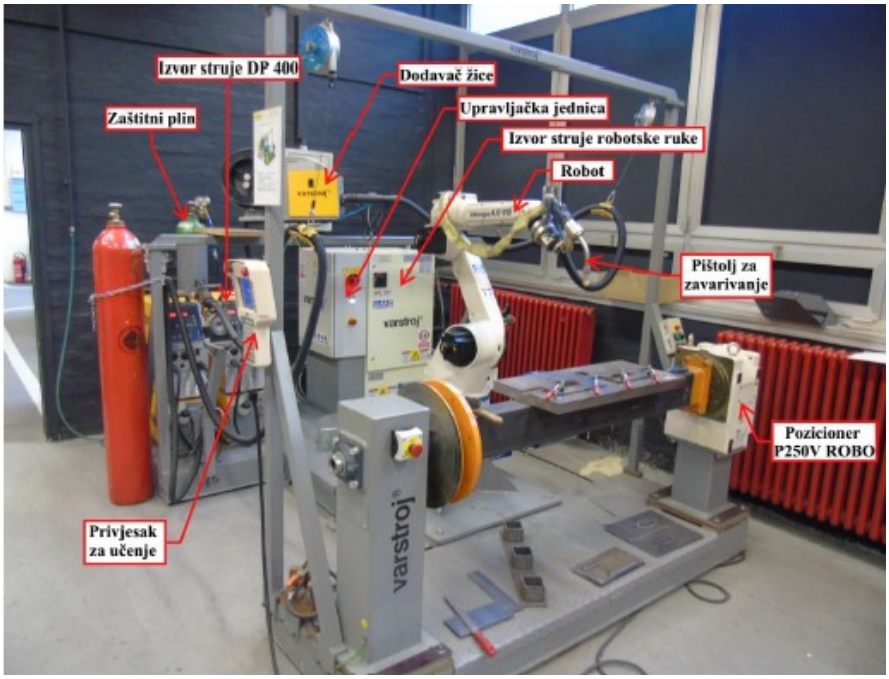
Na ispitnim uzorcima provedena su nerazorna ispitivanja (vizualna metoda i radiografija) i razorna ispitivanja (statičko vlačno ispitivanje, ispitivanje udarnog rada loma i mjerenje tvrdoće Vickers metodom).

7.2. Oprema za zavarivanje

Zavarivanje zidova provedeno je robotskom stanicom Almega OTC AX V6. Robot ima šest rotacijskih stupnjeva slobode gibanja na osnovi kojih je u pripadajućem radnom prostoru moguće postići precizno pozicioniranje i orijentiranje pištolja za zavarivanje. Opremljen je i privjeskom za učenje pomoću kojeg se izvršava *on-line* programiranje, što se odnosi na

snimanje putanje i definiranje tehnoloških parametara za zavarivanje. Na slici 38. prikazana je robotska stanica Almega OTC AX V6.

Uz prikazane dijelove, robotska stanica ima i "shock" senzor koji reagira u slučaju kolizije robota s objektima iz okoline, uređaj za čišćenje sapnice, rezanje žice i nanošenje sredstva protiv naljepljivanja kapljica, elektrolučni senzor AX-AR, te izvor struje za TIG zavarivanje.



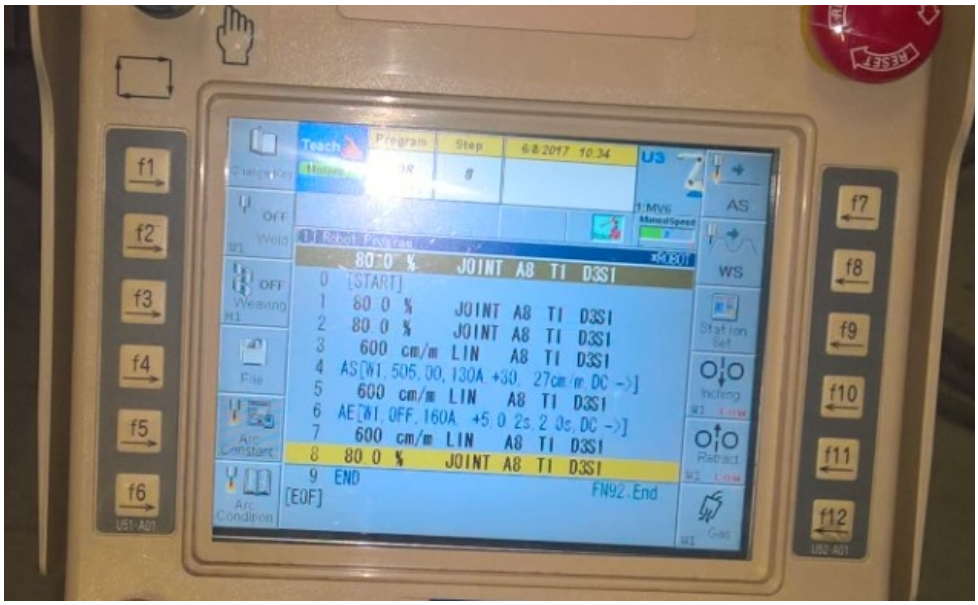
Slika 38. Robotska stanica Almega OTC AX V6 [7]

U sastavu robotske stanice nalazi se izvor struje Varstroj VPS 4000 čije karakteristike je moguće vidjeti u tablici 6. Izvor struje VPS 4000 omogućuje zavarivanje s tri različita postupka zavarivanja: MIG/MAG konvencionalno, MIG/MAG impulsno i REL zavarivanje obloženim elektrodama.

Tablica 6. Karakteristike izvora struje [37]

Izor struje		**Varstroj VPS 4000**
Priključni napon, V/Hz		3 ~ 400 / 50
Područje struje zavarivanja, A		30 – 400
Područje napona zavarivanja, V		15,5 – 34
Intermitencija, A	**100 %**	400
	50 %	283
Promjer žice za zavarivanje, mm		0,8 - 1,2 (1,6)
Masa, kg		45
Dimenzije (D × Š × V), mm		653 × 300 × 595

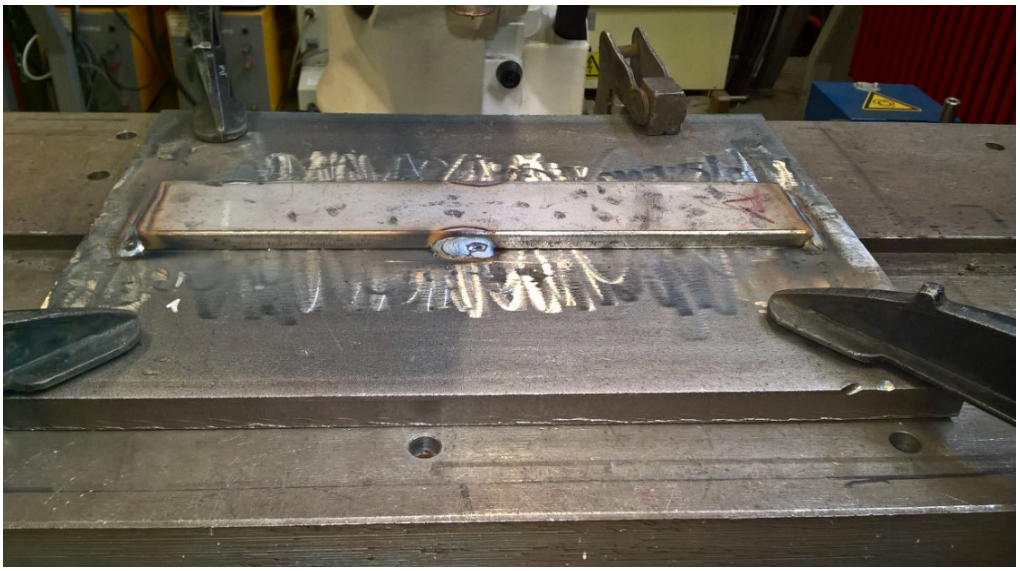
Slika 39. prikazuje generirani program za zavarivanje jednog prolaza.



Slika 39. Generirani program

7.3. Podloga i dodatni materijal

Za podlogu za navarivanje korištena je ploča od nehrđajućeg čelika AISI 304 debljine 8 mm, dimenzija 300 mm × 40 mm. Podloga je zavarena na veću ploču od konstrukcijskog čelika kako bi se olakšalo pričvršćivanje ploče na radni stol i kako bi se smanjio utjecaj deformacija uzrokovan unosom topline. Prije početka zavarivanja površina podloge je obrušena i iščetkana. Slika 40. prikazuje način pričvršćivanja i pozicioniranja podloge na radni stol.



Slika 40. Pričvršćivanje ploče prije zavarivanja

7.3.1. Dodatni materijal

Za zavarivanje korištena je puna žica promjera 1,2 mm (prema DIN EN ISO 14343-A oznaka G 22 9 3 NL). Navedena žica koristi se za zavarivanje u procesnoj industriji i industriji nafte zbog svojih antikorozijskih svojstava. U tablici 7. dan je kemijski sastav žice određen za šaržu prema normi EN 10204 – 3.1.

Tablica 7. Kemijski sastav dodatnog materijala [40]

Legirni element	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Co	S	P	N
Maseni udio, %	0,009	0,370	1,630	8,76	22,8	3,150	0,050	0,028	0,001	0,013	0,1405

Tablica 8. prikazuje mehanička svojstva dodatnog mateijala.

Tablica 8. Mehanička svojstva dodatnog materijala [40]

Mehanička svojstva na 20 °C	
$R_{p0,2}$, MPa	600 (20 °C); 420 (300 °C)
R_m, MPa	750 (20 °C); 600 (300 °C)
A, %	130 (20 °C); 50 (-196 °C)
Udarni rad loma, J	130 (20 °C); 50 (-196 °C)
Tvrdoća, Vickers	240
Feritni broj, DeLong	11
Toplinska vodljivost, W/mK	16
Toplinsko širenje, od 20 °C – 400 °C	$14,5 \times 10^{-6}$
Gustoća, g/cm^3	7,9

7.4. Zaštitni plinovi

U eksperimentu su korištene četiri mješavine zaštitnih plinova (proizvođač: Messer) s ciljem otkrivanja njihovih utjecaja na kvalitetu zavara, mehanička svojstva i mikrostrukturu. U tablici 9. navedene su korištene mješavine zaštitnih plinova i njihov sastav.

Tablica 9. Mješavine zaštitnih plinova

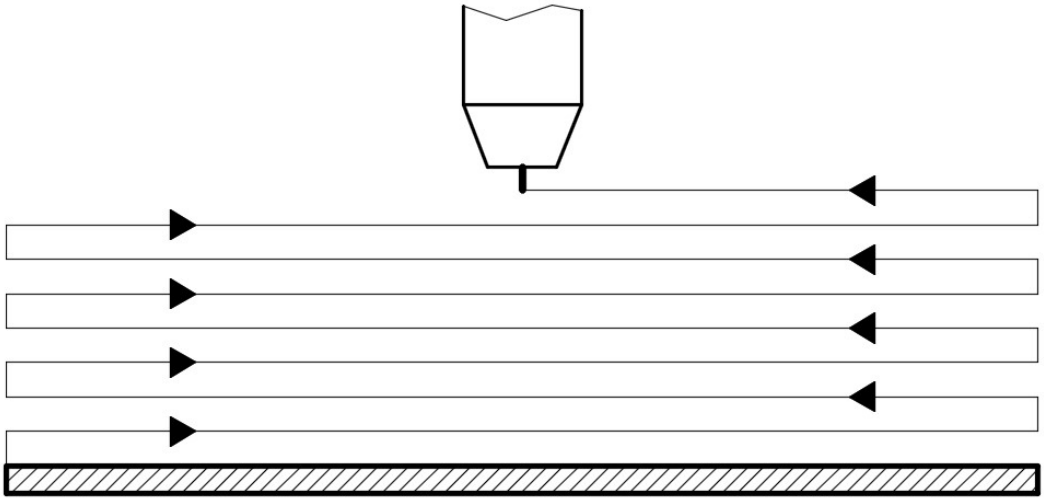
Naziv proizvoda	Grupa po ISO 14175	Volumni sastav, %			
		Ar	O_2	CO_2	N_2
Inoxline N2	N2	97,5			2,5
Inoxline X3	M13	97	3		
Inoxline C2	M12	97,5		2,5	
Ferroline C6X1	M24	93	1	6	

Slika 41. prikazuje boce s korištenim zaštitnim plinovima.

Slika 41. Boce sa zaštitnim plinovima

7.5. Trajektorije putanja alata

Putanje pištolja za zavarivanje bile su naizmjenične, tj. jedan prolaz s lijeva na desno, sljedeći s desna na lijevo kako je i prikazano na slici 42. Razlog tome je da uspostavljanje električnog luka ne bude samo s jedne strane, a s druge strane da bude samo prekidanje električnog luka. Takav način navarivanja zida bi mogao dovesti do različitih visina krajeva zida, što nije poželjno.



Slika 42. Trajektorije putanja alata

7.6. Parametri zavarivanja

Tijekom izrade zidova očitavani su parametri zavarivanja i mjerena je visina pomičnim mjerilom nakon svakog prolaza. Prije svakog prolaza mjerena je temperatura beskontaktnom metodom uređajem Fluke IR Thermometer. Temperatura međuprolaza držana je ispod 100°C. Unesena toplina računa se prema sljedećem izrazu [39]:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v_z} \times \frac{60}{1000} \tag{5}$$

Gdje je:

Q – unos topline u zavar, kJ/cm

k – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja (kod MAG postupka iznosi 0,8)

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v_z – brzina zavarivanja, cm/min.

Tablice 10, 11, 12. i 13. prikazuju očitane parametre zavarivanja, izmjerene visine nakon svakog prolaza i unose topline za svaki prolaz za izvedena četiri stanja pokusa. Prijenos metala u sva četiri stanja pokusa bio je kratkim spojevima, a nagib pištolja bio je neutralan.

Tablica 10. Paramatri zavarivanja za mješavinu C6X1

Plin: Ferroline C6X1					**Protok plina:** 19 l/min		
Slobodni kraj žice: 10 mm					**Brzina zavarivanja:** 27 cm/min		
Prolaz	**Visina, mm**	**Temperatura, °C** Mjerena u tri točke: na krajevima i u sredini zida			**Očitana jakost struje, A**	**Očitani napon, V**	**Unesena toplina, kJ/cm**
1.	2,7	26,0	26,5	27,1	149	16,9	4,83
2.	4,6	39	90	87,1	150	17,2	4,76
3.	6,6	39,1	80,7	57,5	150	17,0	4,53
4.	8,6	45,4	87,7	74,3	151	17,0	4,56
5.	10,4	50,5	96,4	73,8	149	16,9	4,47
6.	12,5	41,3	87,5	71,2	152	17,2	4,64
7.	14,5	51,2	94,0	71,6	151	17,1	4,59
8.	16,4	55,2	86,7	80,4	150	17,2	4,58
9.	18,4	56,4	86,7	81,4	149	17,3	4,58
10.	20,5	54,2	88,6	72,2	151	17,3	4,64
11.	22,5	60,1	90,2	88,1	150	17,2	4,58
12.	24,6	58,8	94,7	86,2	148	17,2	4,52
13.	26,6	88,2	91,2	73,4	150	17,2	4,58
14.	28,5	60,1	90,2	82,2	151	17,3	4,64
15.	30,4	62,4	87,7	80,3	150	17,1	4,56
16.	32,5	60,6	84,2	74,1	150	17,1	4,56
17.	34,4	62,5	76,8	77,1	150	17,1	4,56
18.	36,5	87,4	87,3	76,2	150	17,1	4,56
19.	38,6	57,2	86,1	75,2	150	17,1	4,56
20.	40,7	65,1	97,4	85,2	150	17,1	4,56
21.	42,5	70,8	95,3	77,5	149	17,3	4,58
22.	44,6	68,8	91,6	81,7	149	17,4	4,60
23.	46,6	71,5	96,2	82,7	148	17,2	4,52
24.	48,7	69,9	92	86,1	150	17,3	4,61
25.	50,5	76,2	83,2	66,2	150	17,0	4,53
26.	52,5	62,9	82,9	81,5	150	17,2	4,58
27.	54,6	77,5	91,4	84,3	150	17,1	4,56
28.	56,5	80,5	88,6	90,1	151	17,2	4,61
29.	57,4	75,4	92,2	79,2	151	17,1	4,59
30.	60,6	63,2	86,9	85,4	149	17,1	4,53

Tablica 11. Paramatri zavarivanja za mješavinu X3

Plin: Inoxline X3					**Protok plina:** 19 l/min		
Slobodni kraj žice: 10 mm					**Brzina zavarivanja:** 27 cm/min		
Prolaz	**Visina, mm**	**Temperatura, °C** Mjerena u tri točke: na krajevima i u sredini zida			**Očitana jakost struje, A**	**Očitani napon, V**	**Unesena toplina, kJ/cm**
1.	3,0	24,8	25,0	25,0	142	17,5	4,77
2.	5,5	44,6	71,2	72,6	150	17,1	4,73
3.	7,5	56,6	82,2	52,0	149	17,2	4,55
4.	9,5	56,2	95,1	88,2	150	17,2	4,58
5.	11,4	57,7	81,6	80,2	149	17,3	4,58
6.	13,4	61,0	95,4	92,5	150	17,2	4,58
7.	15,5	60,5	77,4	87,4	149	17,3	4,58
8.	17,5	60,9	94,4	70,1	150	17,3	4,61
9.	19,6	65,3	92,2	65,6	151	17,2	4,61
10.	21,7	61,2	83,5	91,1	149	17,4	4,60
11.	23,7	69,9	96,5	85,5	148	17,3	4,55
12.	25,8	61,4	83,2	90,1	150	17,3	4,61
13.	27,7	71,0	93,3	94,7	150	17,2	4,58
14.	29,9	76,5	88,0	93,2	151	17,3	4,64
15.	32,0	88,6	89,2	89,5	151	17,3	4,64
16.	34,4	72,2	95,6	98,2	149	17,3	4,58
17.	36,4	78,5	89,3	84,1	150	17,3	4,61
18.	38,5	76,8	94,7	95,2	150	17,3	4,61
19.	40,4	81,0	88,3	89,5	151	17,3	4,64
20.	42,6	75,6	88,5	85,5	150	17,2	4,58
21.	44,5	83,3	91,8	87,3	149	17,3	4,58
22.	46,5	72,2	82,6	85,2	149	17,3	4,58
23.	48,6	72,4	89,4	90,3	149	17,4	4,60
24.	50,7	81,4	91,9	93,9	150	17,3	4,61
25.	52,7	86,4	98,6	95,7	151	17,3	4,64
26.	54,7	79,4	91,7	96,6	150	17,2	4,58
27.	56,7	75,0	82,0	77,2	151	17,4	4,67
28.	58,8	78,5	82,7	83,6	150	17,4	4,67
29.	60,7	80,1	88,2	80,3	150	17,1	4,56
30.	62,9	84,2	86,3	79,9	151	17,2	4,61

Tablica 12. Paramatri zavarivanja za mješavinu N2

Plin: Inoxline N2					**Protok plina:** 19 l/min		
Slobodni kraj žice: 10 mm					**Brzina zavarivanja:** 27 cm/min		
Prolaz	**Visina, mm**	**Temperatura, °C** Mjerena u tri točke: na krajevima i u sredini zida			**Očitana jakost struje, A**	**Očitani napon, V**	**Unesena toplina, kJ/cm**
1.	3,0	23,0	29,8	23,0	128	17,9	4,39
2.	5,2	36,0	55,0	82,6	135	16,8	4,18
3.	7,6	63,4	88,2	54,2	135	16,7	4,00
4.	9,5	47,9	58,2	62,8	131	17,0	3,95
5.	11,7	64,7	75,6	85,8	134	16,8	4,00
6.	13,6	64,2	83,4	93,1	132	17,1	4,01
7.	15,8	67,2	83,2	86,5	136	16,7	4,03
8.	17,9	69,8	85,4	93,2	132	17,1	4,01
9.	20,5	74,5	89,4	88,3	134	16,9	4,02
10.	22,2	76,6	90,6	96,8	134	17,1	4,07
11.	24,6	81,6	81,9	79,4	133	16,9	3,99
12.	26,5	81,2	95,3	92,9	134	16,9	4,02
13.	28,7	87,3	90,6	87,7	133	17,0	4,01
14.	30,6	83,0	81,6	96,2	134	17,0	4,05
15.	33,1	91,2	89,4	85,1	134	17,0	4,05
16.	35,0	73,3	79,4	75,9	131	17,2	4,00
17.	37,1	96,2	89,7	82,0	134	17,1	4,07
18.	39,5	74,8	81,1	83,5	133	17,1	4,04
19.	42,0	92,1	95,5	90,6	133	17,0	4,01
20.	43,3	75,1	78,3	87,0	132	17,1	4,01
21.	46,2	75,3	71,0	74,3	134	17,0	4,05
22.	48,3	81,2	82,7	87,3	133	17,0	4,01
23.	50,5	89,4	89,2	91,9	134	17,1	4,07
24.	52,2	92,5	96,5	98,6	131	17,2	4,00
25.	54,5	84,0	85,5	77,1	134	16,9	4,02
26.	56,5	89,3	88,1	95,4	133	17,0	4,01
27.	58,8	84,4	84,8	78,7	133	17,0	4,01
28.	61,0	74,6	76,1	82,6	132	16,9	3,96
29.	63,2	94,8	86,4	90,3	133	17,0	4,01
30.	65,1	87,1	87,5	97,8	131	17,0	3,95

Tablica 13. Paramatri zavarivanja za mješavinu C2

Plin: Inoxline C2	**Protok plina:** 19 l/min
Slobodni kraj žice: 10 mm	**Brzina zavarivanja:** 27 cm/min

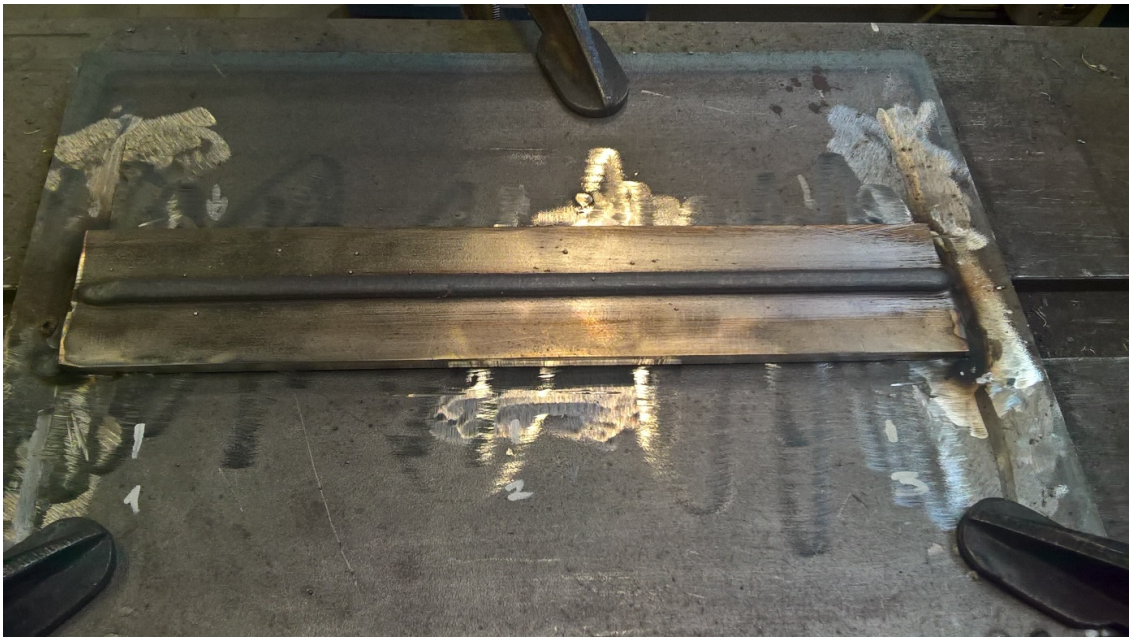
Prolaz	**Visina, mm**	**Vremena ohlađivanja do temperature manje od maksimalne dozvoljene međuprolazne (100 °C), min**	**Očitana jakost struje, A**	**Očitani napon, V**	**Unesena toplina, kJ/cm**
1.	2,1	0:21	145	17,0	4,73
2.	4,7	0:26	143	17,3	4,56
3.	6,8	0:28	146	17,0	4,41
4.	9,2	0:29	147	17,3	4,52
5.	11,1	0:39	148	17,4	4,57
6.	13,2	0:52	146	17,2	4,46
7.	15,0	1:18	150	17,1	4,56
8.	17,3	2:55	148	17,3	4,55
9.	19,2	3:40	150	17,2	4,58
10.	21,3	4:37	153	17,0	4,62
11.	23,7	5:14	150	16,9	4,50
12.	25,8	5:50	148	17,2	4,52
13.	27,9	5:45	149	17,3	4,58
14.	29,8	5:53	146	17,3	4,49
15.	31,7	6:00	151	17,2	4,61
16.	33,8	5:52	149	17,2	4,55
17.	35,9	6:10	149	17,3	4,58
18.	37,9	6:24	150	17,2	4,58
19.	39,9	6:19	148	17,3	4,55
20.	41,8	6:28	147	17,4	4,54
21.	43,9	6:30	149	17,2	4,55
22.	46,0	6:32	144	17,4	4,45
23.	47,9	6:42	152	16,9	4,56
24.	50,0	6:58	151	17,1	4,59
25.	51,9	7:08	149	17,0	4,50
26.	53,9	7:02	153	17,3	4,70
27.	56,0	7:10	147	17,2	4,49
28.	58,0	7:19	151	17,3	4,64
29.	60,0	7:26	148	17,1	4,49
30.	62,0	7:40	151	17,2	4,61

Brzina zavarivanja za prvi prolaz iznosila je 25 cm/min, za drugi 26 cm/min, a za sve ostale 27 cm/min. Na početku su brzine zavarivanja bile manje kako bi se dobila veća širina zavara i bolja podloga za daljnje navarivanje.

Nakon svakog prolaza površina zavara je čišćena četkanjem, kako bi se izbjeglo nastajanje eventualnih nemetalnih uključaka. Također, sapnica je čišćena nekoliko puta tijekom navarivanja svakog pojedinog uzorka kako bi se osiguralo konstantno lamelarno protjecanje zaštitnog plina.

Na sljedećim slikama prikazane su pojedine faze (prolazi) navarivanja uzoraka sa zaštitnim plinom Ferroline C6X1.

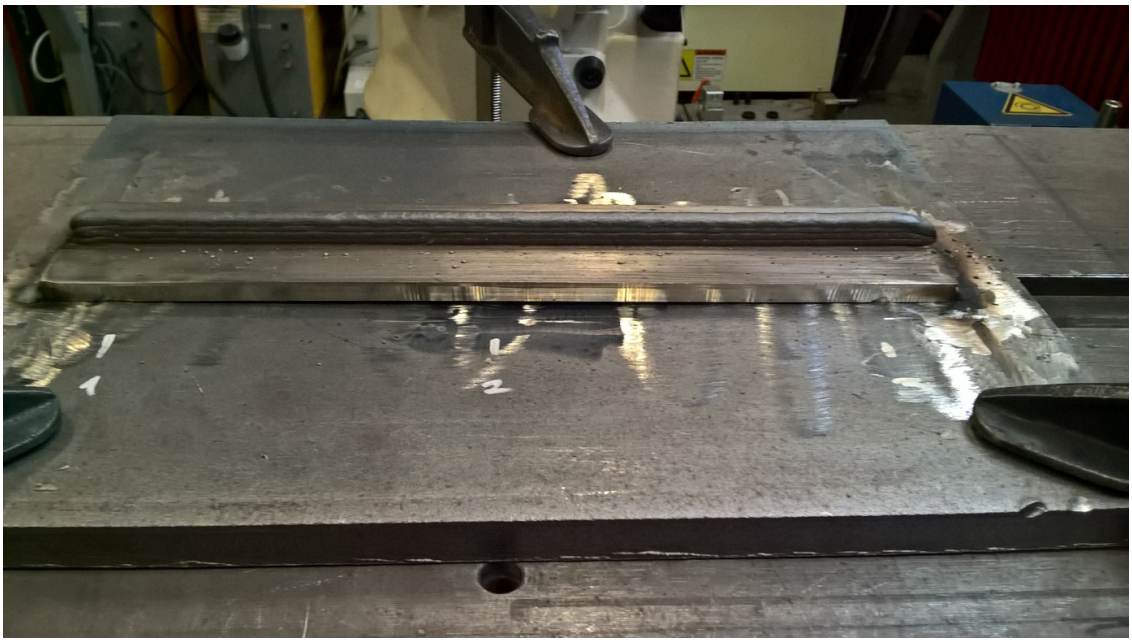
Slika 43. prikazuje drugi prolaz. Vidljivo je da je zavar jednolične geometrije na cijeloj dužini. Površina zavara prekrivena je tankim slojem čađe zbog prisutnosti kisika u zaštitnom plinu. Na površini osnovnog materijala primjećuju se kapljice koje su nastale zbog prskanja tijekom postupka navarivanja, prvenstveno nakon prvog prolaza kod kojeg je prskanje bilo izraženije. Primjetno je da su krajevi zida različite visine, tj. mjesta uspostave i završetka električnog luka. Taj problem je uspješno riješen naizmjeničnim smjerovima zavarivanja, s lijeva na desno i obratno. Također, na slici su vidljive označene točke u kojima je kontrolirana visina nakon svakog prolaza i u kojima je mjerena međuprolazna temperatura.



Slika 43. Uzorak 1 – 2. prolaz

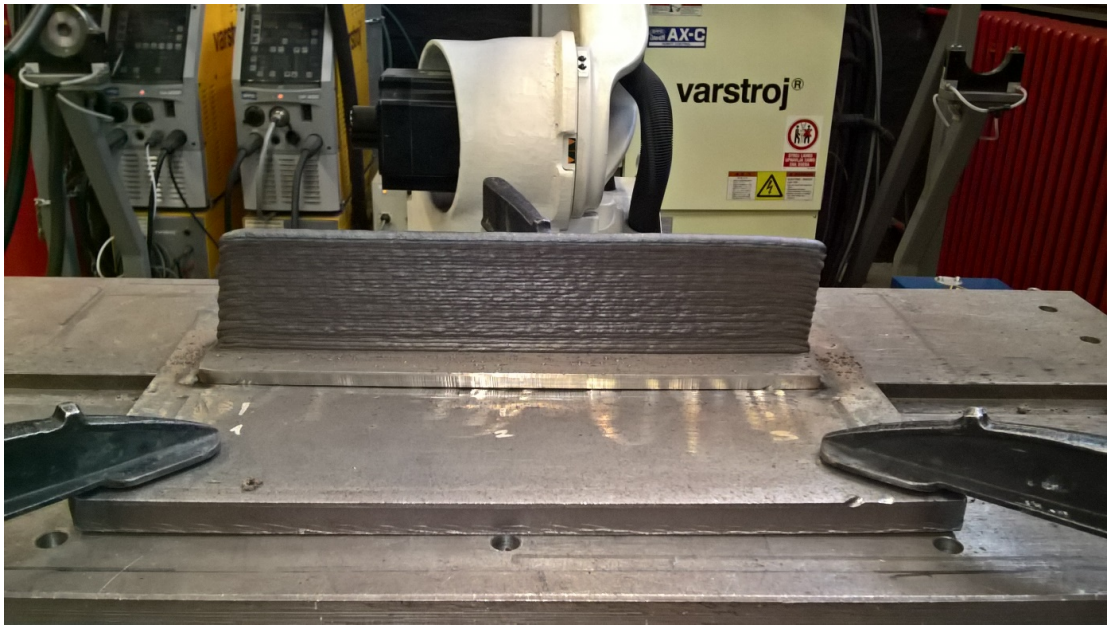
Na slici 44. prikazan je peti prolaz na kojem se uočavaju značajnije deformacije na osnovnom materijalu koji se izdigao u sredini (točka 2). Uzrok deformacijama su mnogobrojni unosi

topline, a kao posljedica deformacije javlja se manje odvođenje topline preko osnovnog materijala na dodatnu ploču zbog postojanja zračnog džepa između navedenih ploča. Smanjeno odvođenje topline rezultiralo je manjim brzinama ohlađivanja u sredini međuprolaza.



Slika 44. Uzorak 1 – 5. prolaz

Na slici 45. prikazan je gotovi uzorak s navarenih 30 slojeva. Primjećuje se da je prskanje bilo izraženije na krajevima uzorka, tj. na mjestima uspostave i završetka električnog luka.



Slika 45. Uzorak 1 – 30. prolaz

Slika 46. prikazuje detaljniji izgled površine zida. Na slici se vide mnogobrojne kapljice metala na osnovnom materijalu, a ponegdje i na samome zidu. Na površini su vidljivi pojedini prolazi i uočava se razlika u preklapanju slojeva na kraju uzorka gdje su se odvijale uspostave i prekidi električnog luka. Također, na površini se mogu uočiti i pore.

Slika 46. Uzorak 1 – detaljniji prikaz površine

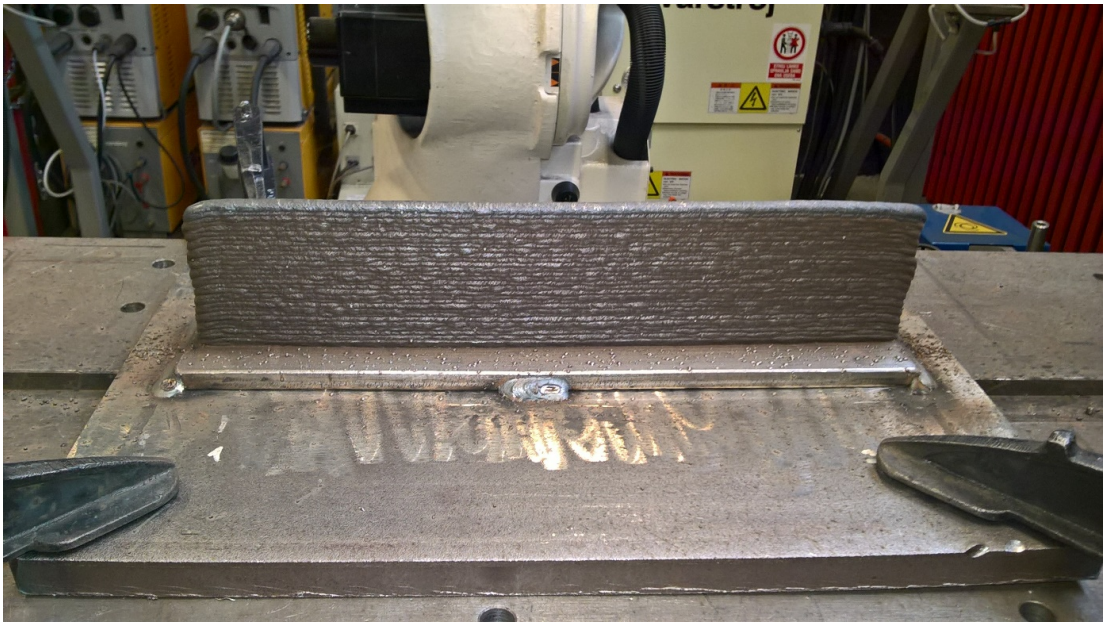
Sljedeće fotografije prikazuje pojedine prolaza kod navarivanja uzorka pod zaštitnom mješavinom Inoxline X3.

Slika 47. prikazuje prvi prolaz. Vidljivo je da je geometrija zavara blago nepravilnija, a razlog tome je miješanje materijala osnovnog metala i dodatnog metala. No, već nakon trećeg prolaza geometrija je pravilnija. Također, na slici je vidljivo da je došlo do prskanja.

Zbog problema s deformacijama koji je uočen na prvom uzorku, na sljedećim uzorcima dodana su dva dodatna zavara na sredini, koji se smanjili deformacije, a samim time i odvođenje topline duž uzorka bilo je jednoličnije.

Slika 47. Uzorak 2 – 1. prolaz

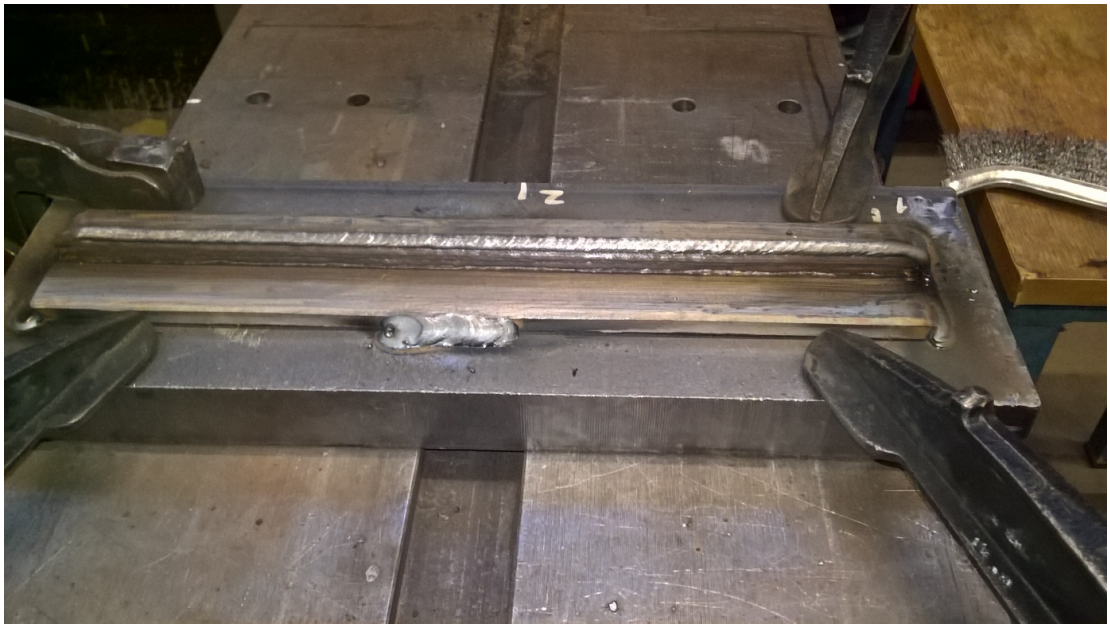
Slika 48. prikazuje gotovi uzorak. Na slici se vide kapljice koje su nastale prskanjem tijekom postupka navarivanja, kao i sloj čađe koja je rezultat većeg udjela kisika u zaštitnom plinu. Također, uočljivo je da je zid jednake visine na cijeloj duljini.



Slika 48. Uzorak 2 – 30. prolaz

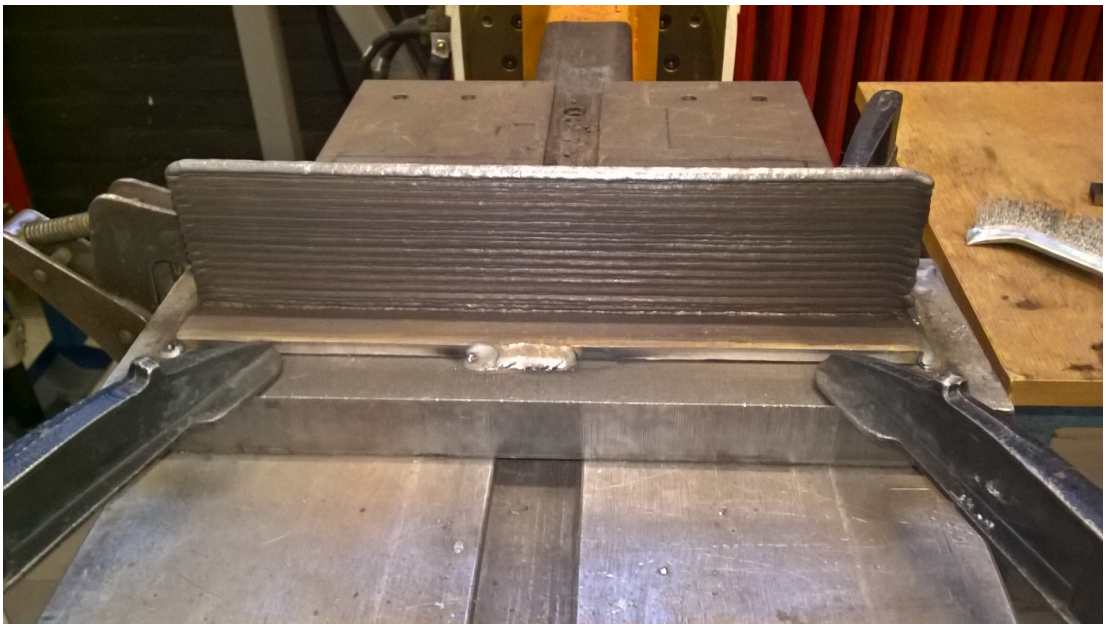
Sljedeće slike prikazuju nekoliko prolaza kod navarivanja slojeva pod zaštitnom atmosferom Inoxline N2.

Slika 49. prikazuje peti prolaz. Na slici se vidi da nema prskanja i da je površina uzorka čista. Na samom zavaru nastajalo je malo troske koja se lagano odstranjivala četkanjem.



Slika 49. Uzorak 3 – 5. prolaz

Slika 50. prikazuje gotovi uzorak. Vidljivo je da nema prskanja, površine zida su čiste kao i površina osnovnog materijala. Visina je konstantna duž uzorka, izuzevši blaga odstupanja u visini na samim krajevima uzorka.



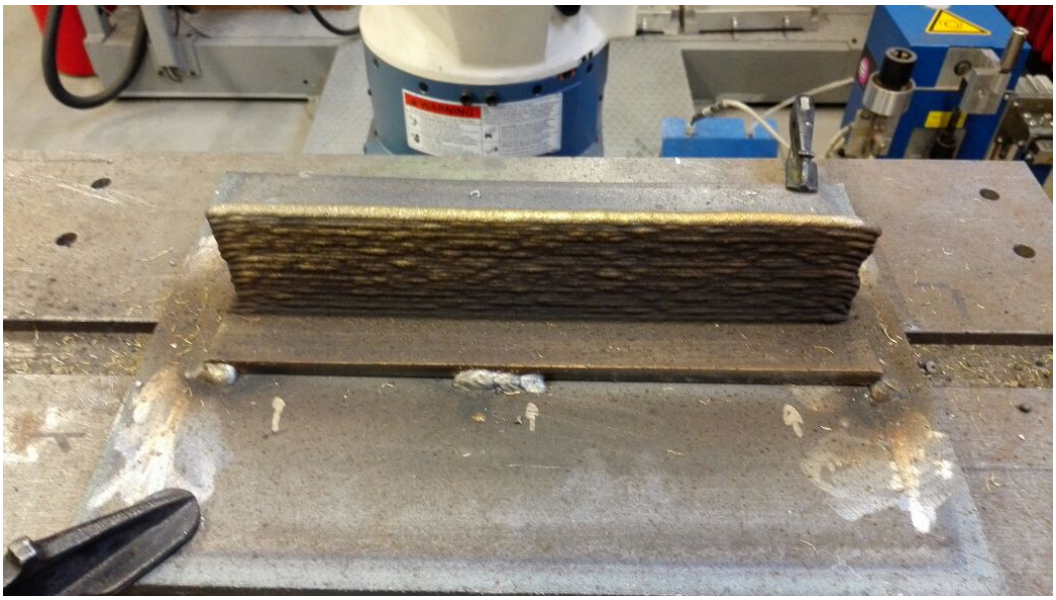
Slika 50. Uzorak 3 – 30. prolaz

Slike 51. i 52. prikazuju prolaze kod navarivanja zida pod zaštitnom atmosferom mješavine Inoxline C2.

Na slici 51. prikazan je četvrti prolaz. Vide se mnogobrojne kapljice na osnovnom materijalu, koje su nastale kao rezultat nestabilnosti procesa.

Slika 51. Uzorak 4 – 4. prolaz

Slika 52. prikazuje gotovi uzorak. Na površini zida vidljive su pore, koje su se počele pojavljivati nakon šestog prolaza. Površina zida je izrazito reljefna.

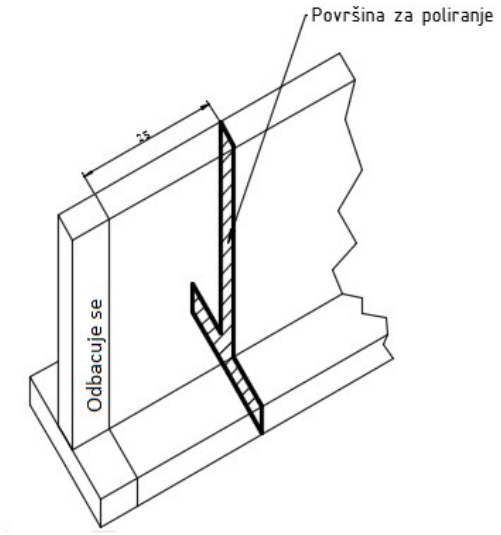


Slika 52. Uzorak 4 – 30. prolaz

7.7. Priprema i izrada ispitnih uzoraka

Nakon provedenog zavarivanja zidova potrebno je bilo pristupiti izradi ispitnih uzoraka za sva stanja pokusa. Prvo su na tračnoj pili bili izrezani segmenti duljine 25 mm za određivanje mikrostrukture i mjerenje tvrdoće. Segmenti su izrezani tako da je prvo bilo odrezano

nekoliko milimetara na kraju zida kako bi se dobila ravna ploha bez neravnina nastalih uspostavom i prekidom električnog luka. Zatim se odrezalo dodatnih 25 mm za potrebe ispitivanja mikrostrukture i mjerenja tvrdoće (prikazano na slici 53.).

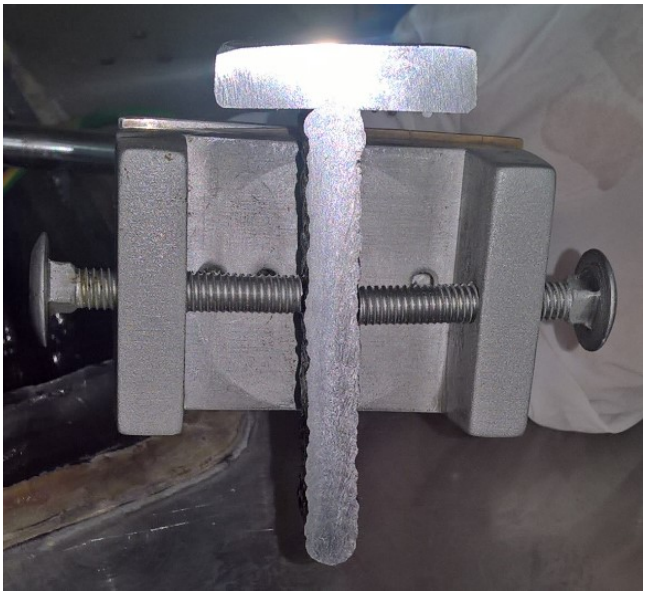


Slika 53. Shema za izrezivanje uzorka za mikrostrukturu

Nakon rezanja slijedilo je ručno grubo brušenje brusnim papirom smanjujući veličinu zrnatosti i to redom: P120, P320 i P600. Rezanje i grubo brušenje izvedeno je u Laboratoriju za zavarivanje. Daljnje fino brušenje uzoraka provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju na uređaju Phoenix Alpha Grinder Polisher. Fino brušenje je provedeno brusnim papirom, a brzina brušenja je bila 300 min^{-1} za sve hrapavosti brusnog papira. Tijekom svih faza finog brušenja korištena je voda kao rashladno sredstvo. Primijenjeni su brusni papiri od najveće hrapavosti do najmanje i to sljedećim redom: P320, P500, P1000, P2000, P4000. Nakon završenog brušenja uzorci su isprani vodom (kako bi se uklonile nečistoće) te su prebačeni na uređaj DAP-V koji služi za poliranje uzoraka. Poliranje je izvršeno brzinom od 150 okr/min pomoću tkanine i dijamantne paste Diamond Polishing Compound 1 μm. Tijekom poliranja uzorci su hlađeni tekućinom DP - Lubricant Blue kako ne bi došlo do strukturnih promjena u uzorcima.

Za daljnju analizu mikrostrukture uzorci su nagriženi u 10 %-tnoj oksalnoj kiselini pri naponu od 8 V i struji od 6 A u trajanju od 60 sekundi. Nakon toga, uzorci su snimljeni mikroskopom Leica MZ6. Mikroskop je povezan na računalo, a program Leica Application Suit omogućuje izradu i obradu slika.

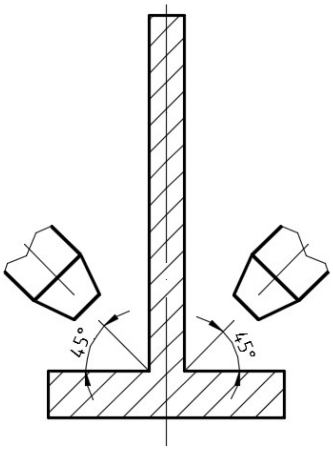
Na slici 54. prikazan je uzorak za nagrizanje smješten u nosaču, a na slici 55. prikazani su uzorci nakon nagrizanja.



Slika 54. Uzorak pričvršćen u nosaču uređaja za nagrizanje

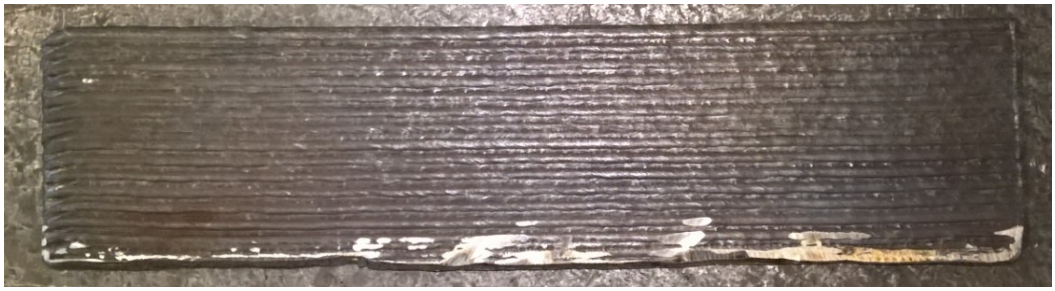
Slika 55. Uzorci nakon nagrizanja

Za daljnju izradu epruveta bilo je potrebno odrezati pločicu osnovnog materijala na koju se je navarivao zid. Ploča je odrezana ručnom plazmom Hypertherm Powermax 45. U korijenu zida povučena su dva reza sa svake strane pod kutem od približno 45° (slika 56.). Nakon rezanja površina korijena zida pobrušena je ručnom brusilicom.



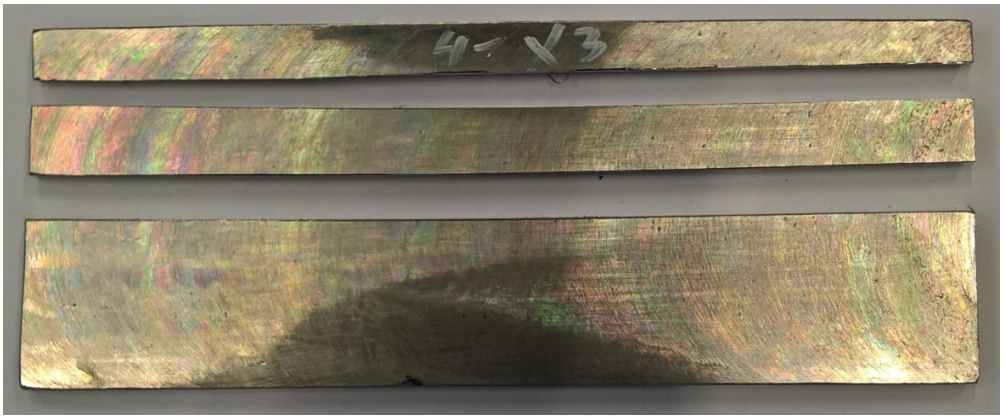
Slika 56. Shema rezanja zida

Na slici 57. prikazan je odrezani i pobrušeni uzorak spreman za strojnu obradu.



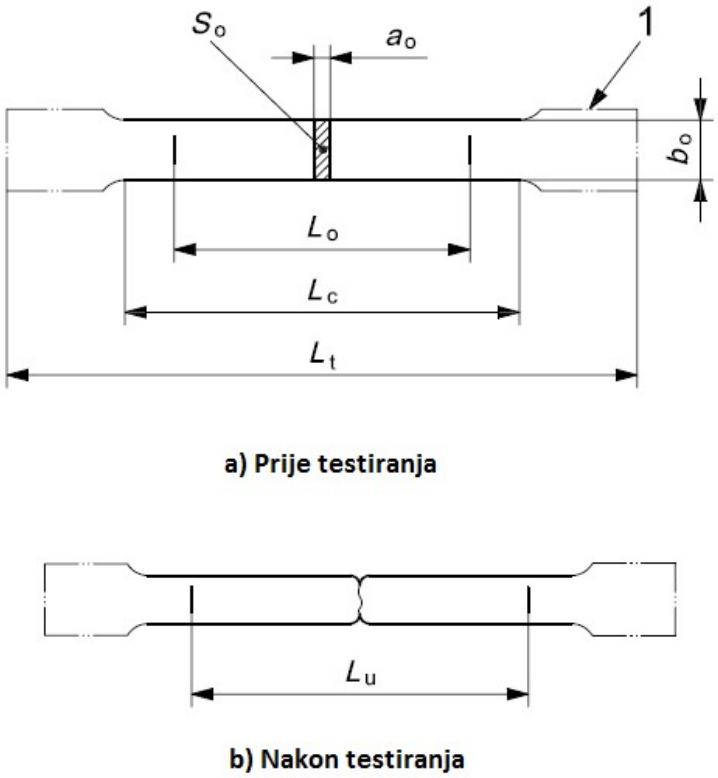
Slika 57. Odrezani zid s podloge za navarivanje

Sljedeći korak u izradi ispitnih epruveta je strojna obrada koja je obavljena u Laboratoriju za strojnu obradu. Na strojnoj obradi površine uzoraka obrađene su glodanjem kako bi se dobila ravna površina potrebna za daljnju obradu. Zatim su obrađeni uzorci odrezani na tračnoj pili na dimenzije za izradu epruveta za mjerenje vlačne čvrstoće i udarnog rada loma. Slika 58. prikazuje uzorke nakon poravnavanja površine i nakon rezanja segmenata za daljnju izradu ispitnih epruveta.



Slika 58. Uzorak nakon poravnavanja površine i izrezivanja segmenata za daljnju obradu

Dimenzije epruveta za statički vlačni pokus određene su prema normi ISO 6892-1:2009. Na slici 59. prikazani su crteži epruveta prije i nakon testiranja s kotiranim ključnim dimenzijama.



Slika 59. Dimenzije ispitnih epruveta: a) prije ispitivanja; b) nakon ispitivanja [41]

a_0 – početna debljina epruvete, mm

b_0 – početna širina ispitnog područja epruvete, mm

L_c – duljina suženog dijela epruvete, mm

L_0 – duljina ispitnog područja epruvete, mm

L_t – ukupna duljina epruvete, mm

L_u – duljina ispitnog područja epruvete nakon testiranja, mm

S_0 – površina ispitnog područja epruvete, mm2

1 – krajevi za prihvat.

Na temelju norme određene su sljedeće dimenzije epruveta:

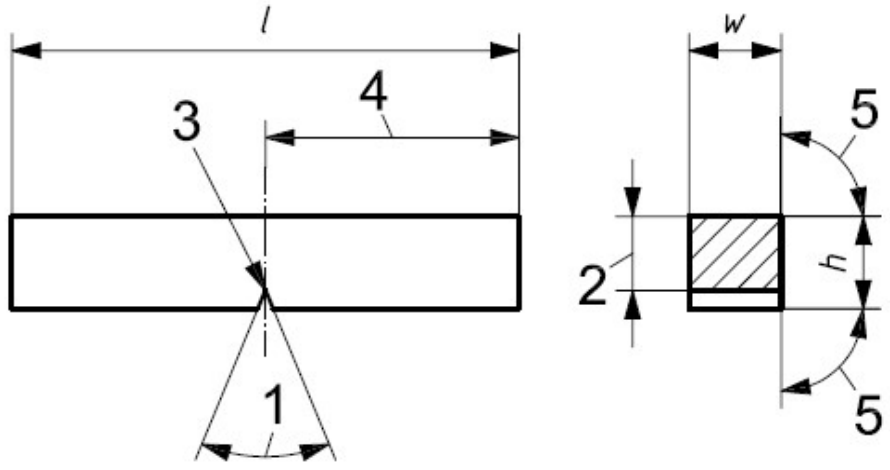
a_0 = 5 mm

b_0 = 20 mm

L_0 = 60 mm

L_c = 90 mm

Prema normi ISO 148-1:2009 određene su dimenzije epruveta za ispitivanje udarnog rada loma. Na slici 60. prikazana je skica epruvete s označenim ključnim veličinama.



Slika 60. Skica epruveta za ispitivanje udarnog rada loma s označenim ključnim veličinama [42]

l – duljina epruvete, mm

w – širina epruvete, mm

h – visina epruvete, mm

1 – kut zareza

2 – visina epruvete ispod zareza

3 – radius utora

4 – udaljenost plohe simetrije od kraja epruvete

5 – kut između susjednih ploha epruvete

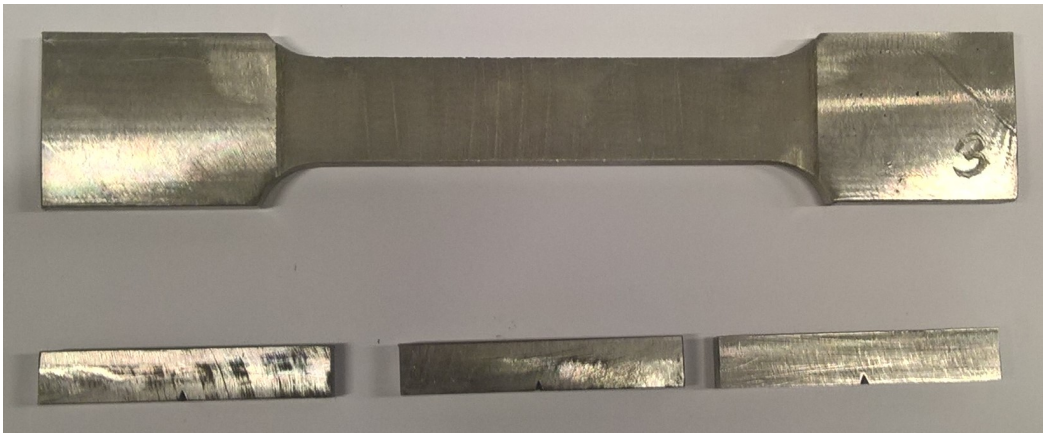
Na temelju norme određene su sljedeće dimenzije epruveta:

l – 55 mm

w – 10 mm

h – 5 mm

Na slici 61. prikazane su izrađene epruvete epruvete za statički vlačni pokus i za ispitivanje udarnog rada loma. Epruvete za statički vlačni pokus izrađene su iz donje polovice zida, a iz gornje polovice izrađene su epruvete za ispitivanje udarnog rada loma.



Slika 61. Ispitne epruvete za statički vlačni pokus i udarni rad loma

7.8. Provedba ispitivanja

U svrhu određivanja optimalne kombinacije parametara i zaštitnog plina provedena su sljedeća ispitivanja:

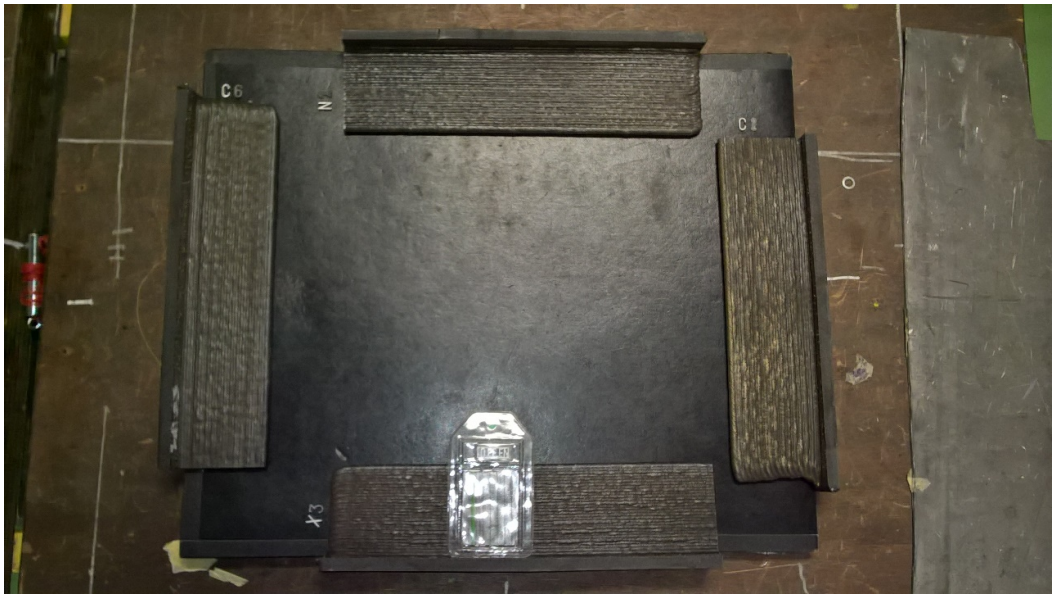
- radiografija navarenih uzoraka
- analiza mikrostrukture
- mjerenje tvrdoće HV 10 duž cijelog presjeka uzorka
- statički vlačni pokus
- mjerenje udarnog rada loma.

Sva navedena ispitivanja izvršena su na Fakultetu strojarstva i brodogradnje.

7.8.1. Radiografija

S ciljem detekcije geometrijskih nepravilnosti, pora i uključaka (metalnih odnosno nemetalnih) u metalu zavara provedeno je radiografsko ispitivanje. Radiografsko snimanje izvedeno je izvorima zračenja (RTG izotopi) na slikovne ploče s kojih se skeniranjem slika prebacuje na računalo u obliku digitalnog zapisa kojeg je moguće analizirati pomoću raznih računalnih alata.

Slika 62. prikazuje postav uzoraka za radiografsko snimanje. Na slici se vidi i penetrometar. Napravljen je tako da se između folija od plastične mase nalaze pravilno raspoređenih sedam kalibriranih žica različitih dimenzija od materijala koji približno odgovara materijalu koji se prozračuje.



Slika 62. Postav uzoraka za radiografsko ispitivanje

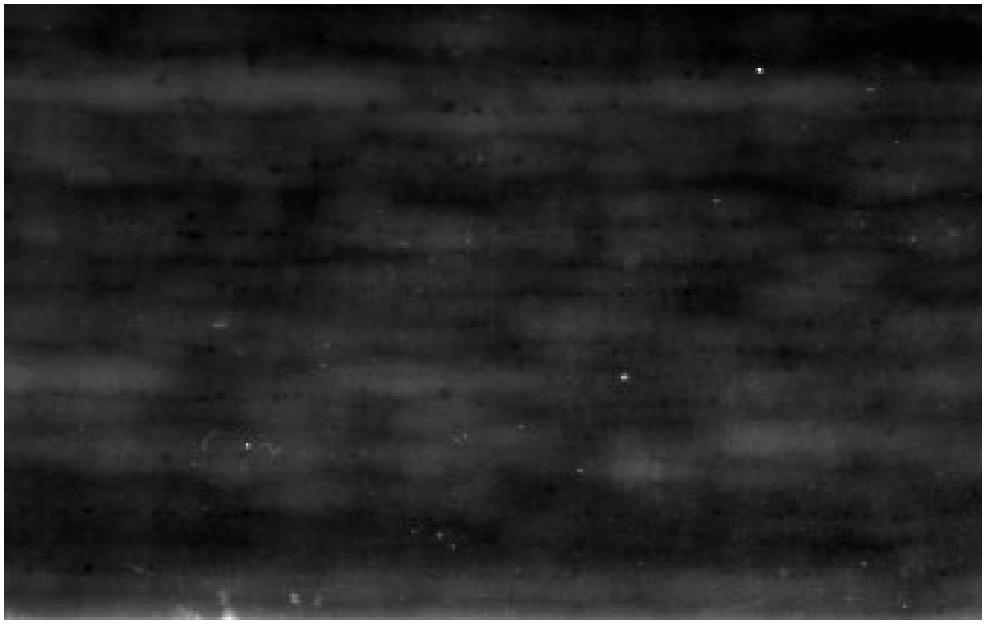
U tablici 14. prikazani su podaci o opremi i parametri snimanja i skeniranja.

Tablica 14. Podaci o opremi i parametri snimanja i skeniranja

Podaci o rendgenu, skeneru i slikovnoj ploči	
Rendgen	BALTEAU GM 300D
Skener	VMI 3600SF
Slikovna ploča	Industrex XL blue 10" x 12"
Parametri snimanja	
Napon	150 kV
Struja	4 mA
FF udaljenost	1000 mm
Vrijeme ekspozicije	5 min
Parametri skeniranja	
Napon lasera	15 V
Napon fotomultiplikatora	5,25 V
Rezolucija skeniranja	50 µm

Na sljedećim slikama prikazani su detalji uzoraka dobiveni obradom slike u ISee programskom paketu.

Na slici 63. prikazan je detalj s uzorka C2. Jasno su vidljivi nizovi crnih točaka koji predstavljaju pore. Na slici vidljive pore su površinske, koje su se jasno mogle vidjeti na površini uzorka nakon zavarivanja. Bijele točke na slici predstavljaju kapljice dodatnog materijala na površini.

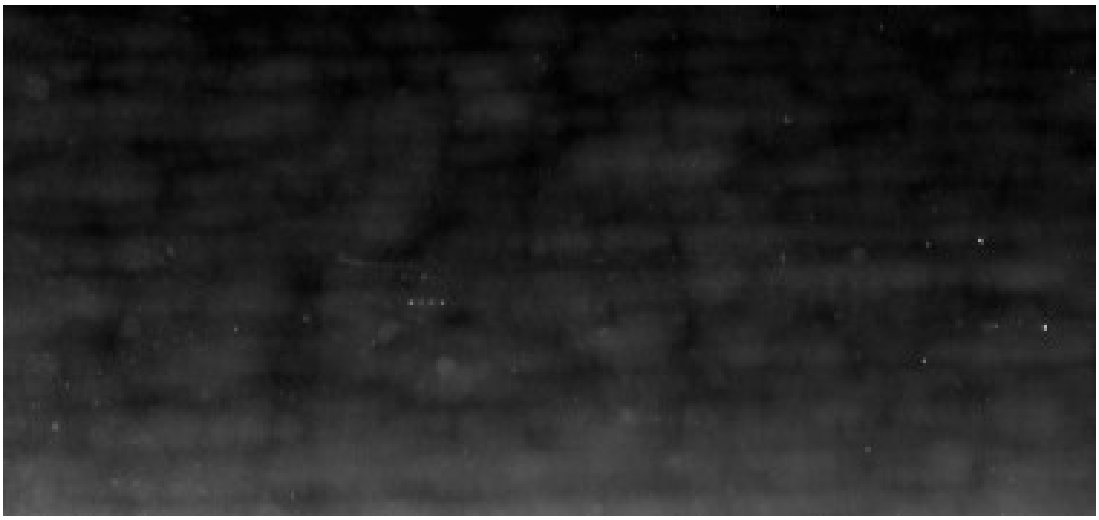


Slika 63. Detalj radiografske snimke uzorka C2

Slika 64. prikazuje detalj s uzorka N2. Na detalju je vidljivo da je došlo do naljepljivanja (crna mrlja). Proučavanjem cijele snimke uzorka pronađene su samo dvije pore što sugerira da je ova plinska mješavina omogućila stabilan postupak zavarivanja i kvalitetnu zaštitu metala zavara.

Slika 64. Detalj radiografske snimke uzorka N2

Slika 65. prikazuje detalj s uzorka X3. Krupnije bijele točke predstavljaju nalijepljene kapljice na površini zida, a sitnije bijele točke su prašina ili troska nastale tijekom zavarivanja. Tamnije mrlje na slici predstavljaju lošije preklapanje slojeva u vidu tečenja materijala koje je rezultiralo mjestimično tanjim zidom.



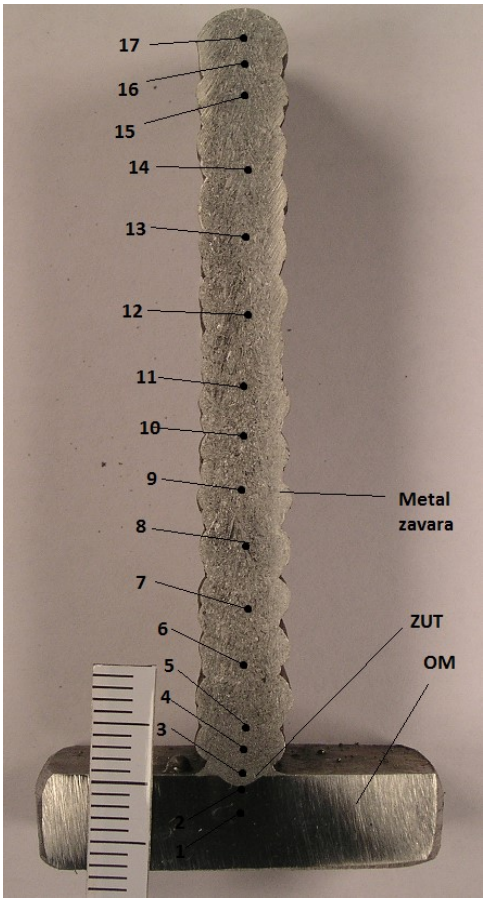
Slika 65. Detalj radiografske snimke uzorka X3

Slika 66. prikazuje detalj s uzorka C6X1. Na slici se primjećuju nalijepljene kapljice na površini zida. Također, primjećuje se da je debljina zida jednolična i da prolazi nisu izraženi što znači da je došlo do kvalitetnog slaganja slojeva.

Slika 66. Detalj radiografske snimke uzorka C6X1

7.8.2. Mjerenje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće metodom HV 10 izvršeno je u osnovnom metalu, metalu zavara i u zoni utjecaja topline. Razmaci između mjernih točaka na vrhu uzorka i u zoni utjecaja topline iznosili su 2 mm, a po vertikalnoj liniji uzorka u razmacima od 4 mm. Manji razmaci između mjernih točaka primjenjivani su na područjima u kojima je došlo do miješanja materijala (korijen zavara) i na zadnjim prolazim iz razloga različitih unosa topline i različitih režima ohlađivanja. Na svakom uzorku izvršeno je 17 mjerenja izvedenih od osnovnog materijala prema gore, a raspored mjerenja prikazan je na slici 67.



Slika 67. Raspored točaka mjerenja tvrdoće

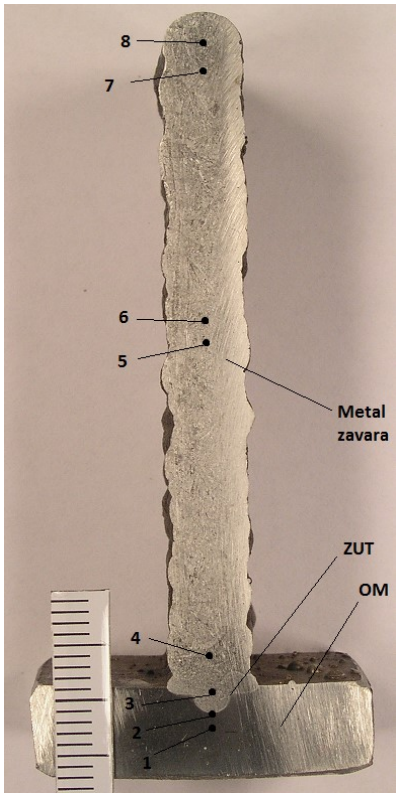
U tablici 15. prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće za sva četiri uzorka.

Tablica 15. Rezultati mjerenja tvrdoće

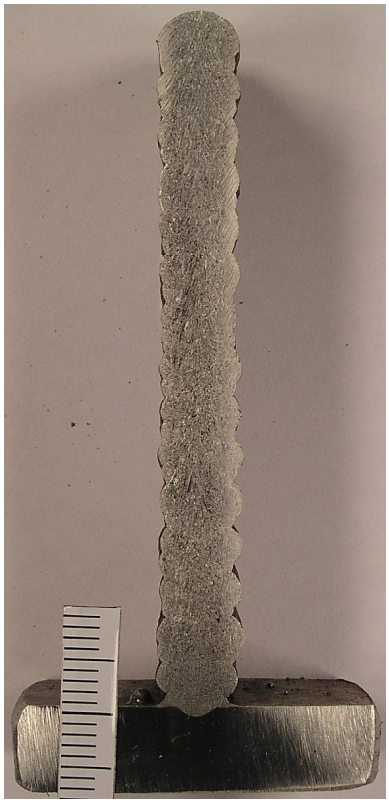
Broj mjerenja	Oznake uzoraka			
	X3, HV 10	C2, HV 10	C6X1, HV 10	N2, HV 10
1, OM	206	199	206	206
2, ZUT	240	256	254	258
3	243	260	243	254
4	240	268	238	256
5	238	268	236	251
6	251	249	254	253
7	242	258	270	253
8	260	260	238	258
9	243	256	247	254
10	243	249	243	242
11	240	256	238	254
12	260	249	247	240
13	254	253	249	258
14	245	247	251	270
15	258	251	251	260
16	258	258	254	264
17	247	256	268	272

7.8.3. Makrostruktura i mikrostruktura

Slikanje makroizbrusaka provedeno je u Laboratoriju za metalografiju. Na uzorcima je vidljiva zona utjecaja topline i razlike u penetraciji ovisno o korištenoj zaštitnoj mješavini. Makroizbrusci prikazani su na slikama od 68. do 71. Na slici 68. označena su mjesta na kojima je slikana mikrostruktura. Točka 1 nalazi se na osnovnom materijalu, točka 2 na liniji staljivanja, točka 3 u visini osnovnog materijala, dok je točka 4 slikana 5 mm iznad osnovnog materijala. U sredini zida slikane su točke 5 i 6, a na samom vrhu zida točke 7 i 8. U središnjem dijelu zida očekuje se jednolika mikrostruktura zbog sličnih uvjeta zavarivanja i odvođenja i unošenja topline. U točkama 7 i 8 očekuju se razlike u mikrostrukturi zbog drugačije toplinske obrade zato što na njih nije navareno više slojeva kao što je to slučaj u nižim dijelovima zida.

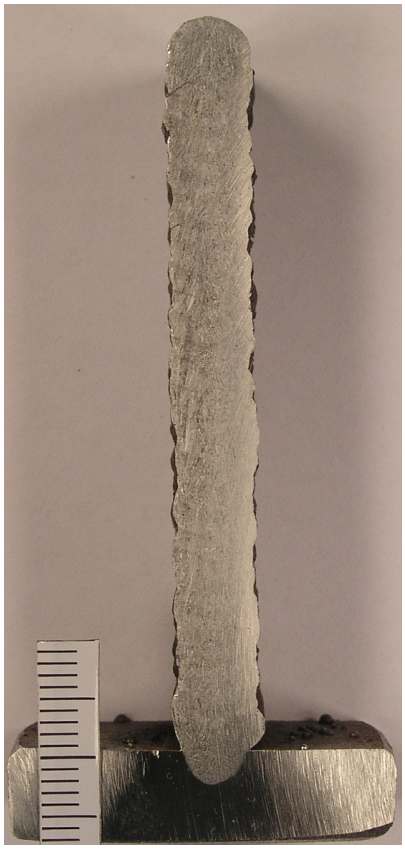


Slika 68. Makroizbrusak uzorka C2 i područja slikanja mikrostrukture



Slika 70. Makroizbrusak uzorka N2

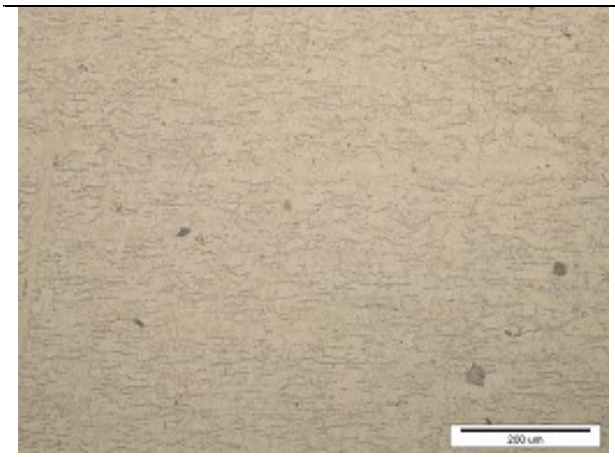
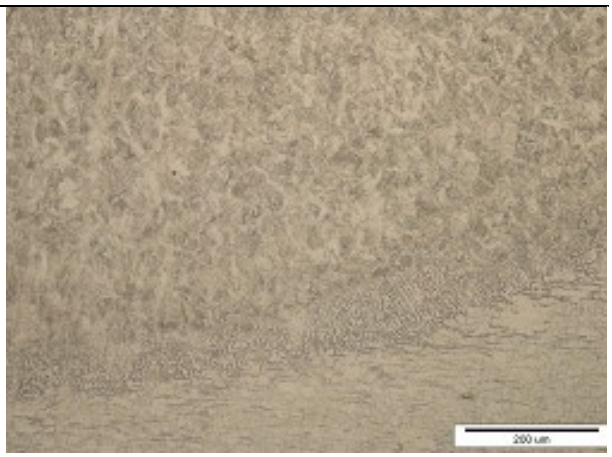
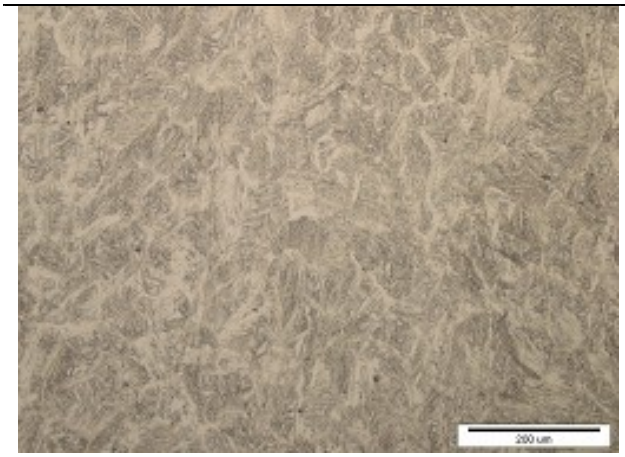
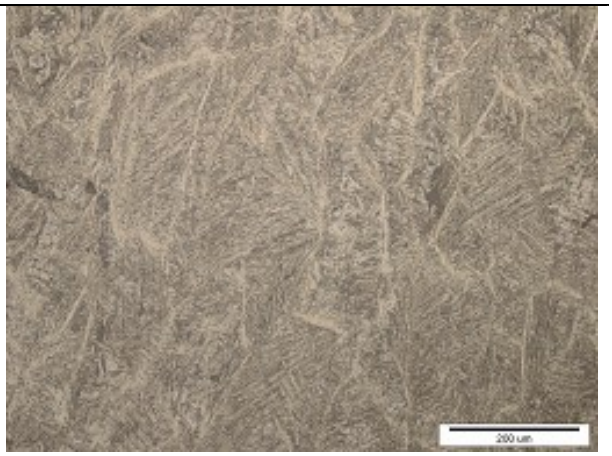
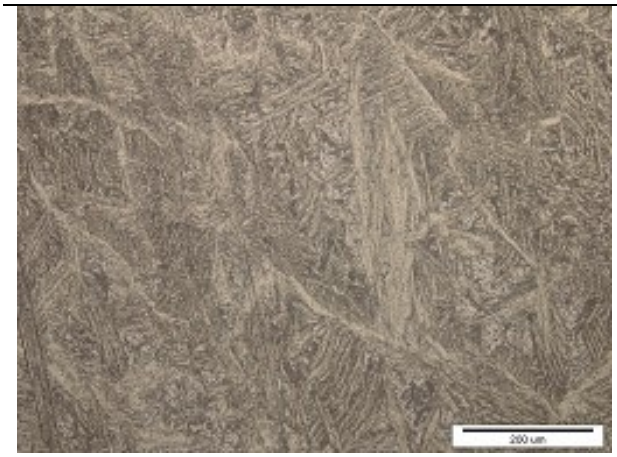
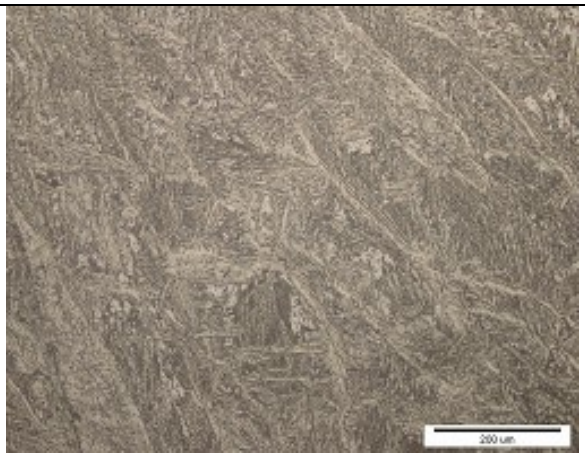
Slika 69. Makroizbrusak uzorka C6X1

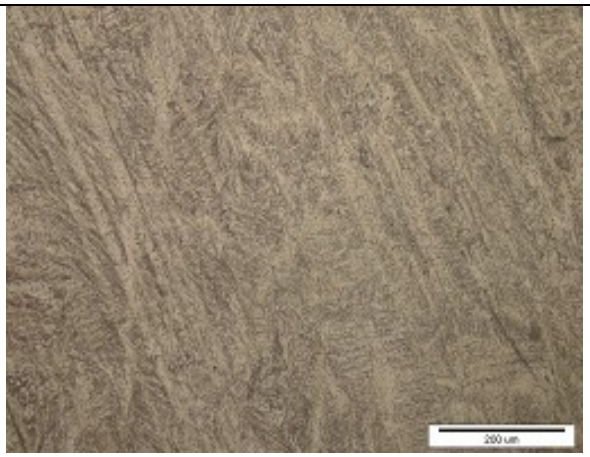
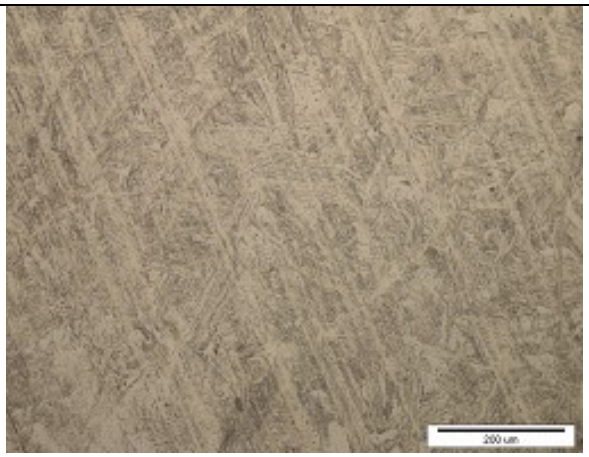


Slika 71. Makroizbrusak uzorka X3

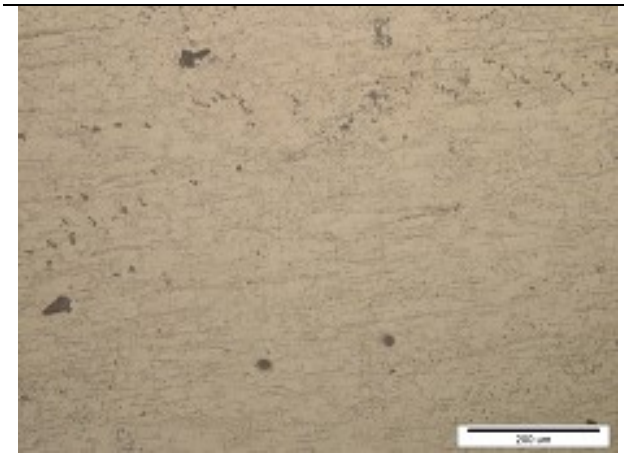
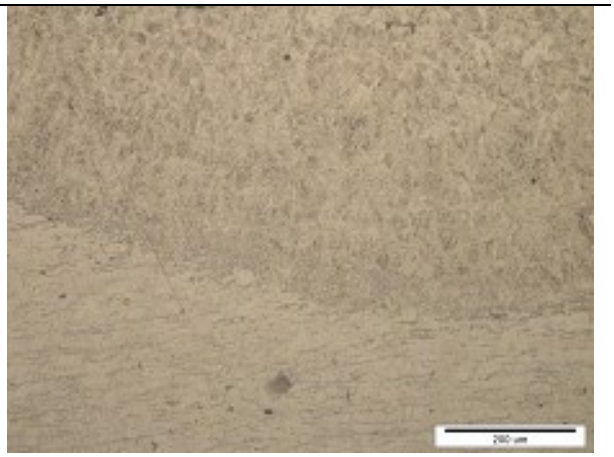
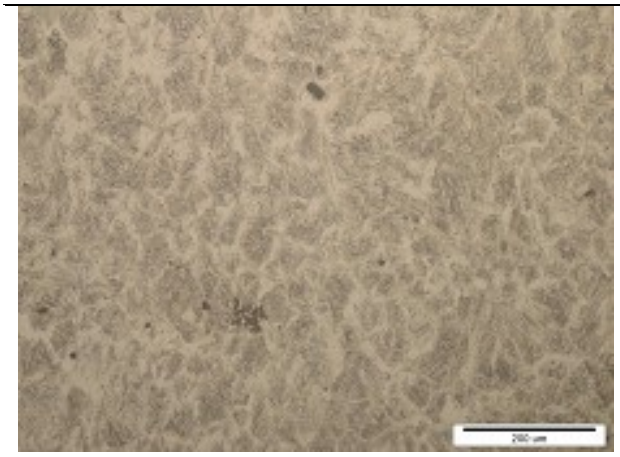
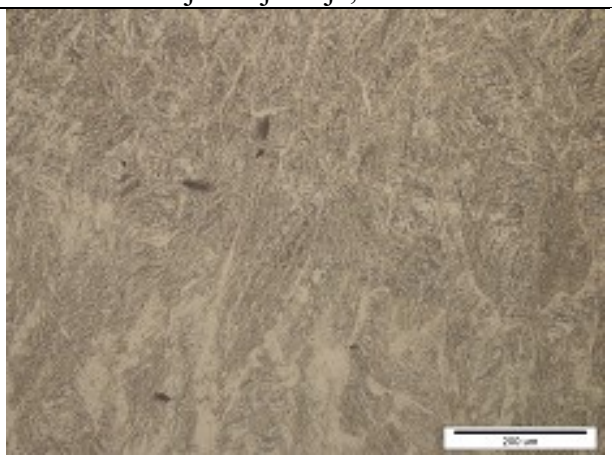
Uzorci su snimljeni mikroskopom Leica MZ6 na osam mjesta (slika 68.) pod povećanjem kako bi se prikazale promijene u mikrostrukturi duž presjeka uzorka. Sve slike su slikane pod povećanjem od 200 puta.

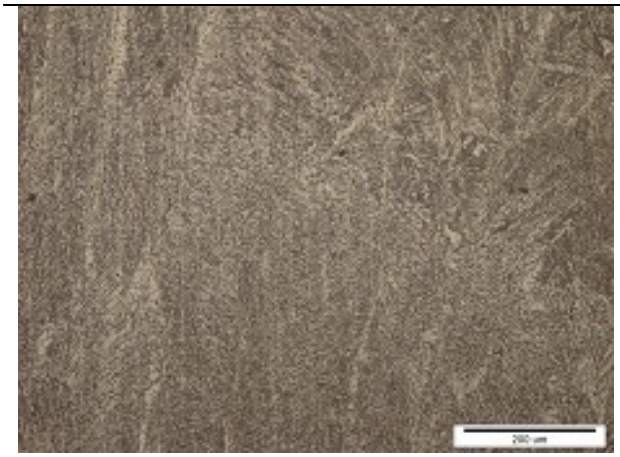
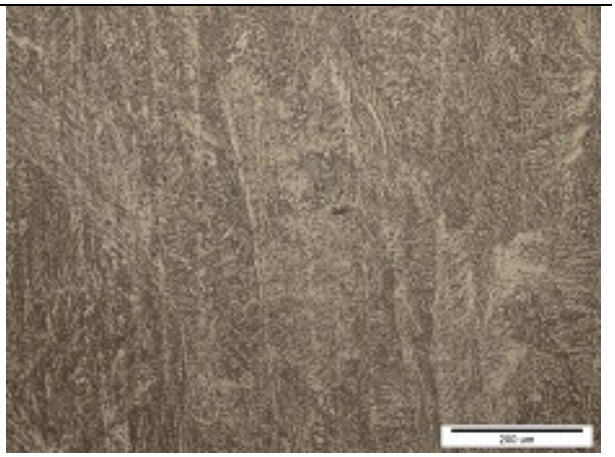
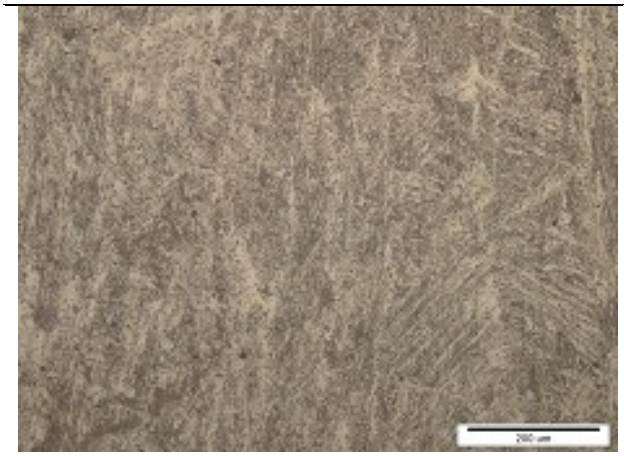
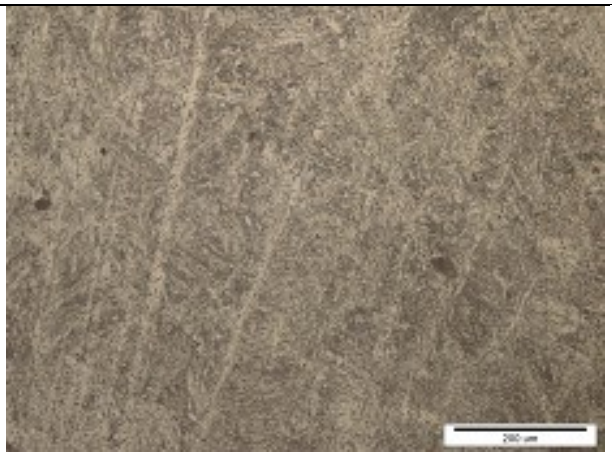
Tablica 16. Slike mikrostruktura slikanih u osam karakterističnih točaka za uzorak C2

	
OM, Točka 1	Linija staljivanja, Točka 2
	
Točka 3	Točka 4
	
Točka 5	Točka 6

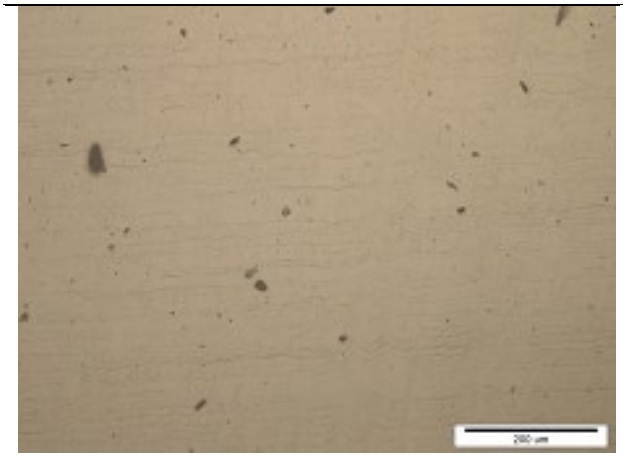
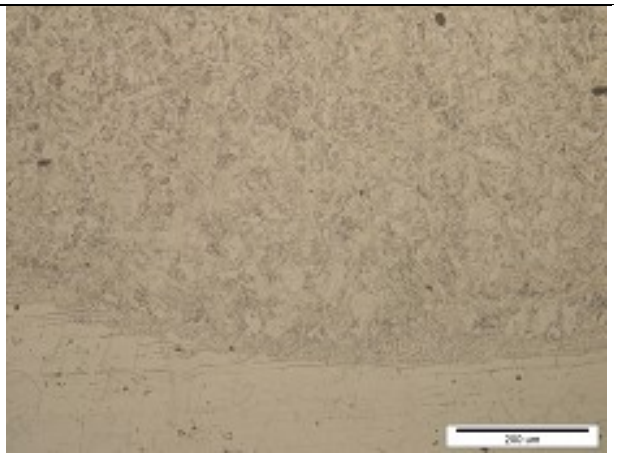
	
Točka 7	Točka 8

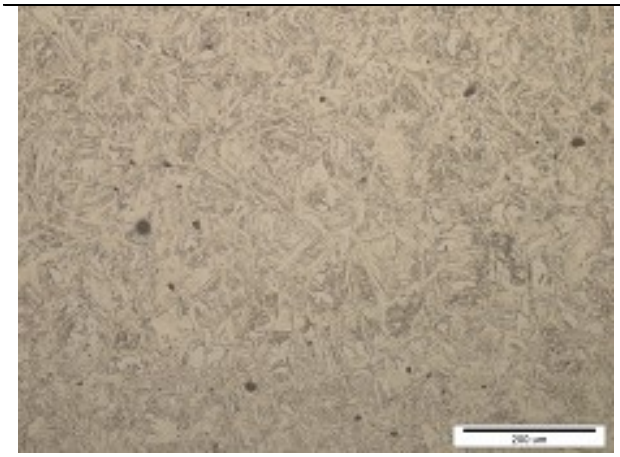
Tablica 17. Slike mikrostruktura slikanih u osam karakterističnih točaka za uzorak C6X1

	
OM, Točka 1	Linija staljivanja, Točka 2
	
Točka 3	Točka 4

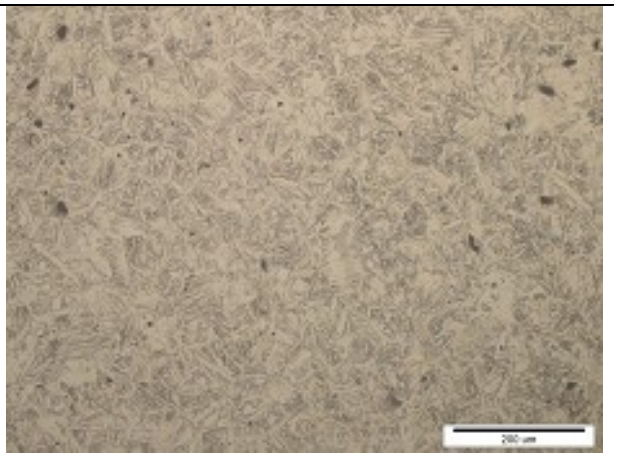
	
Točka 5	Točka 6
	
Točka 7	Točka 8

Tablica 18. Slike mikrostruktura slikanih u osam karakterističnih točaka za uzorak N2

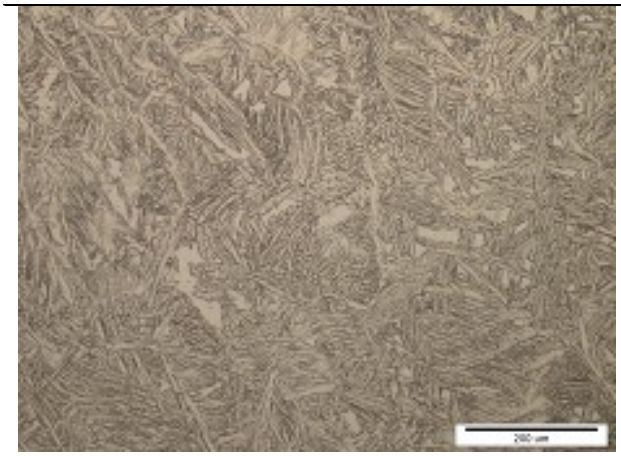
	
OM, Točka 1	Linija staljivanja, Točka 2



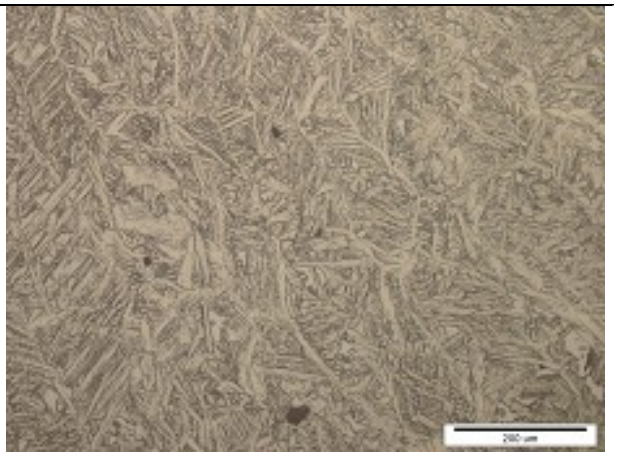
Točka 3



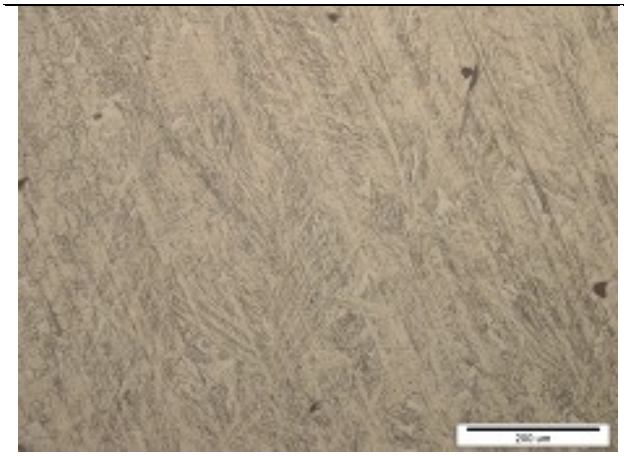
Točka 4



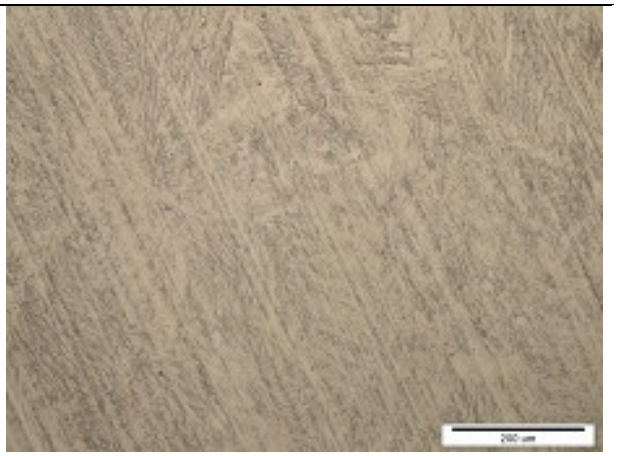
Točka 5



Točka 6

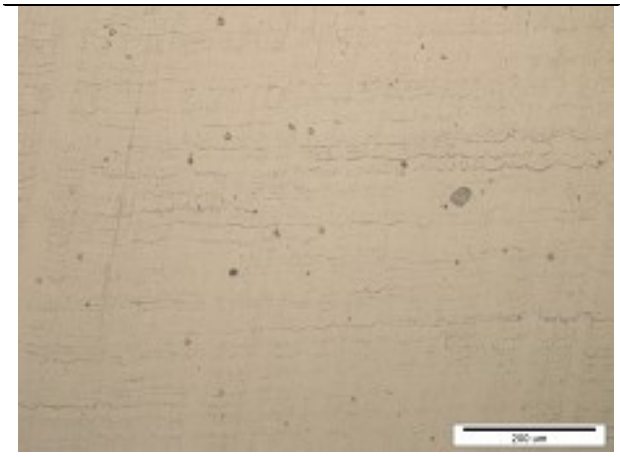
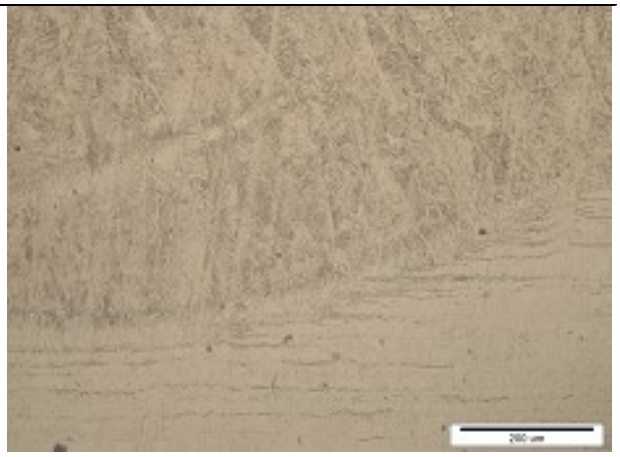
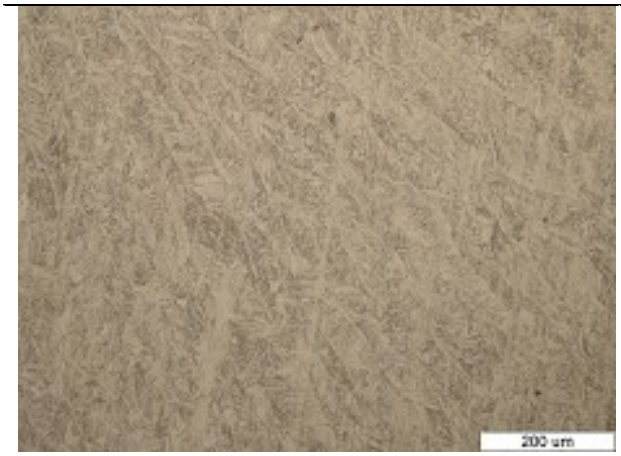
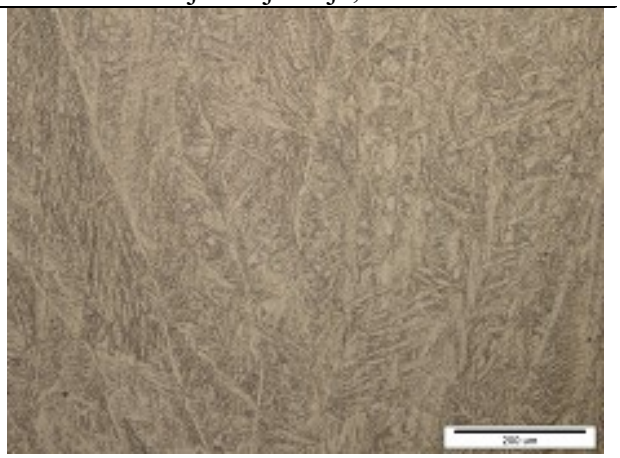
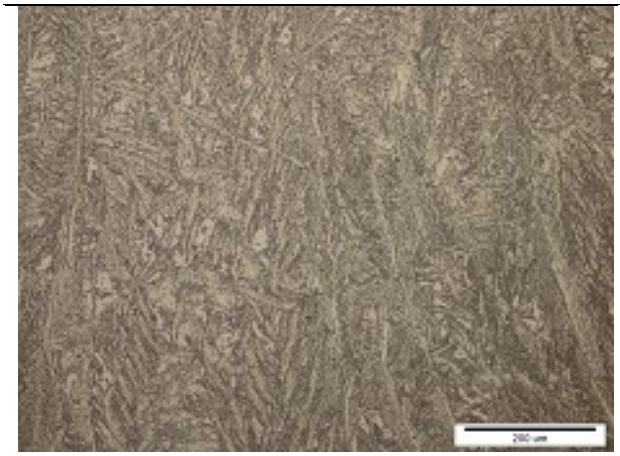
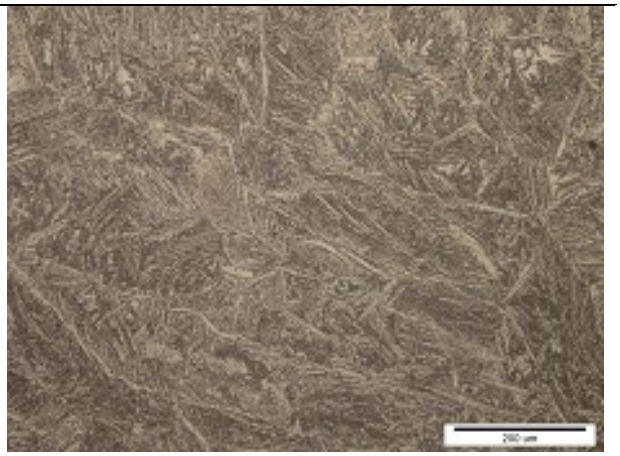


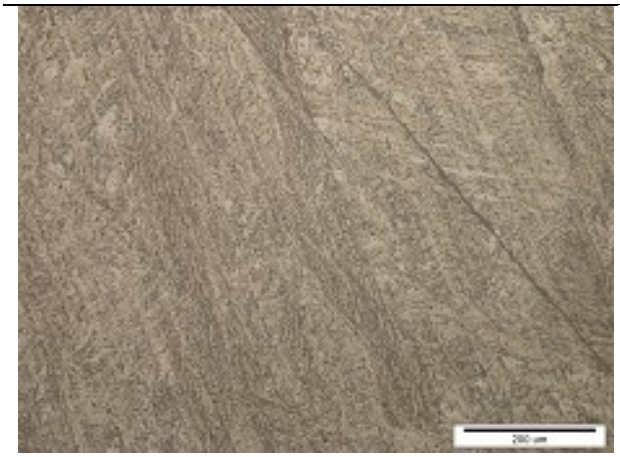
Točka 7



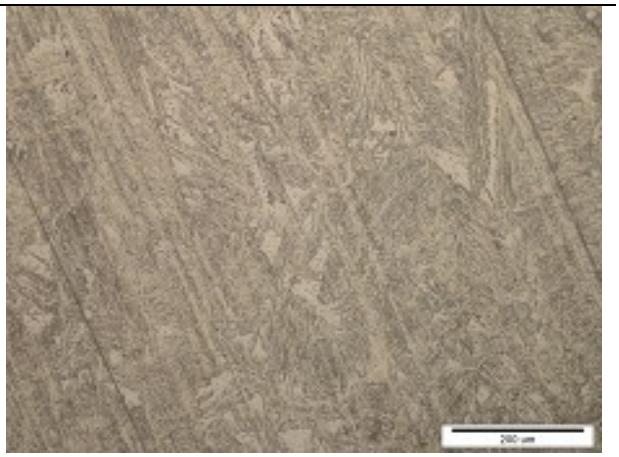
Točka 8

Tablica 19. Slike mikrostruktura slikanih u osam karakterističnih točaka za uzorak X3

	
OM, Točka 1	Linija staljivanja, Točka 2
	
Točka 3	Točka 4
	
Točka 5	Točka 6



Točka 7



Točka 8

Ferit predstavljaju kristali bijele boje, a sive boje je austenit. Na svim uzorcima na sredini zida prevladava perlit (točke 5 i 6) dok u korijenu zida i na vrhu zida ima manje perlita u odnosu na sredinu uzorka.

7.8.4. Statički vlačni pokus

Statičko vlačnim pokusom ispitane su epruvete za sva četiri uzorka. Ispitivanje je provedeno na sobnoj temperaturi iznosa 25 °C. Na slici 72. prikazane su epruvete nakon ispitivanja.

Slika 72. Epruvete nakon ispitivanja

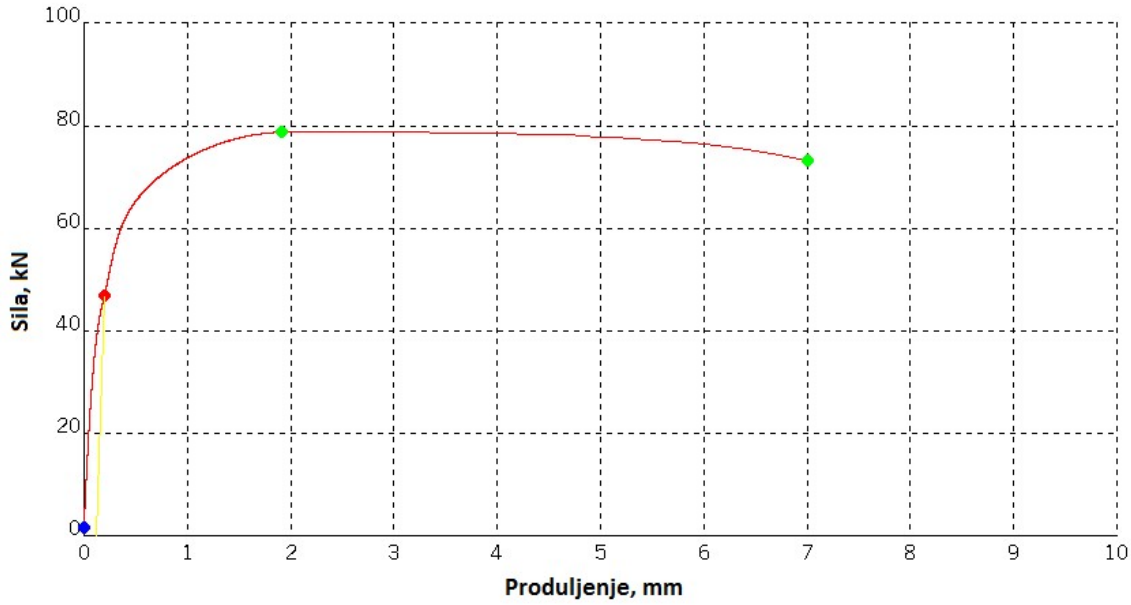
Iz slike je vidljivo da je na uzorku N2 došlo do značajnijeg istezanja u odnosu na ostale epruvete. Također, na istom uzorku primjećuje se raslojavanje navara.

U tablici 20. prikazana su mehanička svojstva uzoraka utvrđena ispitivanjem.

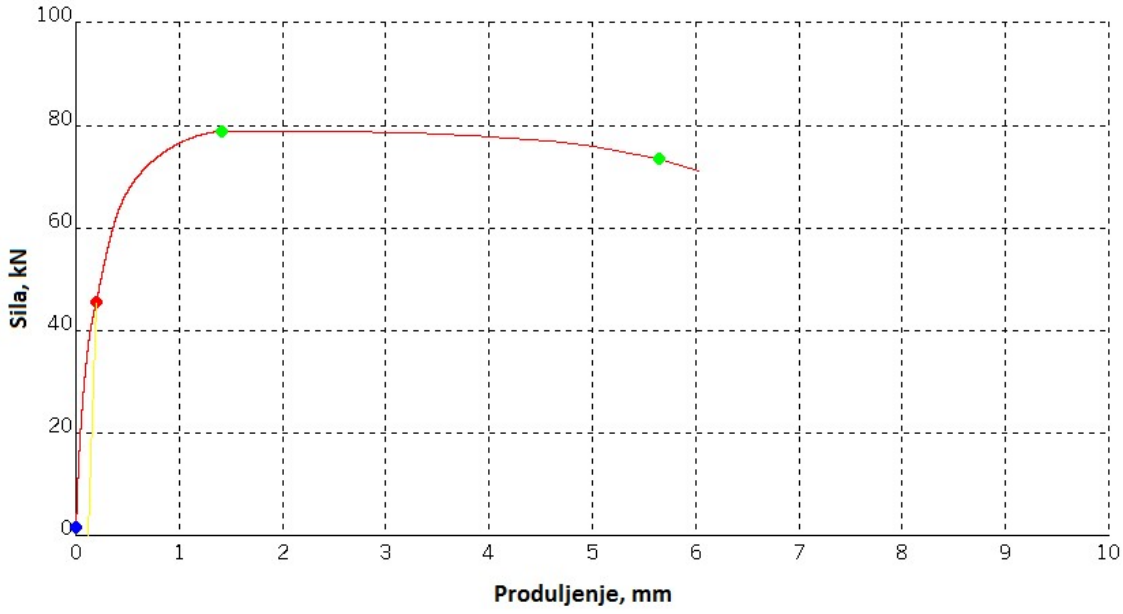
Tablica 20. Mehanička svojstva dobivena statičkim vlačnim pokusom

Uzorak	$R_{p0,2}$, MPa	R_m, MPa	F_m, kN	F_b, kN	S_0, mm^2	L_u, mm
C6X1	457,90	770,56	78,70	73,01	102,13	78,81
C2	448,58	775,22	78,75	73,31	101,59	77,56
X3	463,08	760,33	79,68	73,97	104,79	77,54
N2	525,78	809,16	82,98	72,12	102,54	80,83

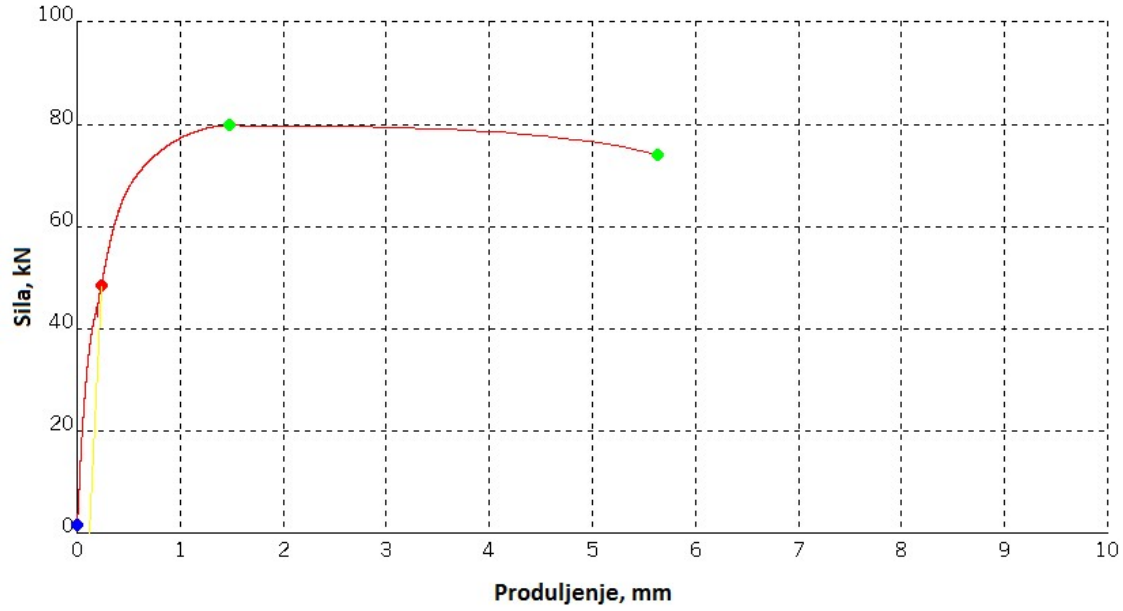
Na slikama 73., 74., 75., i 76. prikazani su dijagrami sila-produljenje uzoraka dobiveni tijekom ispitivanja. Sa slika je vidljivo da dijagrami za uzorke C6X1, C2 i X3 imaju približno jednake oblike dijagrama.



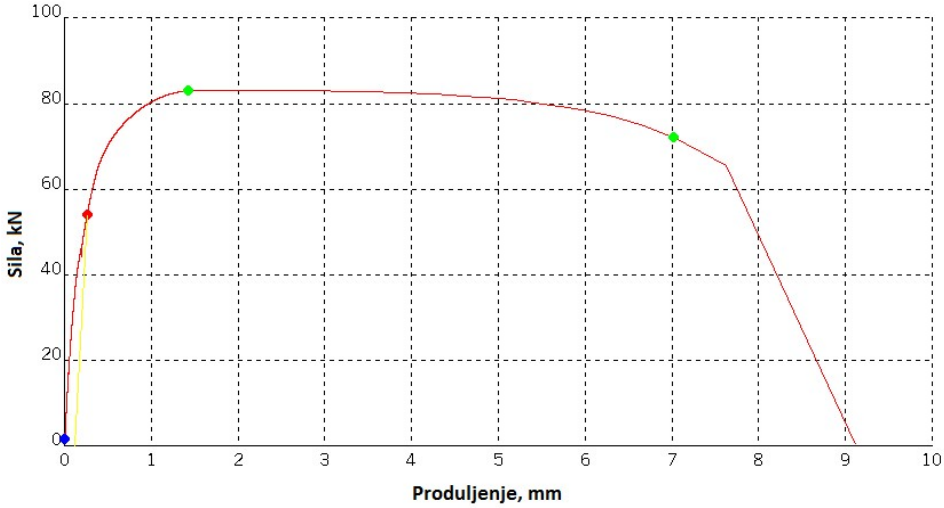
Slika 73. Dijagram sila-produljenje uzorka C6X1



Slika 74. Dijagram sila-produljenje uzorka C2



Slika 75. Dijagram sila-produljenje uzorka X3



Slika 76. Dijagram sila-produljenje uzorka N2

7.8.5. Ispitivanje udarnog rada loma

Ispitivanje udarnog rada loma provedeno je na Charpyjevom batu, na sobnoj temperaturi, maksimalne energije udara 350 J u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Ispitivanje je provedeno prema normi ISO 148-1:2009 – Ispitivanje udarnog rada loma Charpyjevim batom – Ispitne metode.

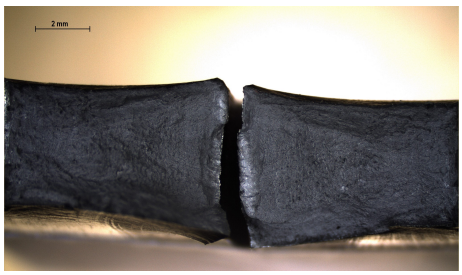
U tablici 21. prikazani su rezultati ispitivanja udarnog rada loma. Za svaki uzorak, tj. za svako stanje pokusa provedena su tri ispitivanja.

Tablica 21. Rezultati ispitivanja udarnog rada loma

Uzorak	KV, J	Srednja vrijednost KV, J
C6X1	36	36
	37	
	35	
C2	47	38
	48	
	48	
X3	39	38
	36	
	38	
N2	99	100
	99	
	103	

U tablici 22. dane su slike prijelomnih površina uzoraka.

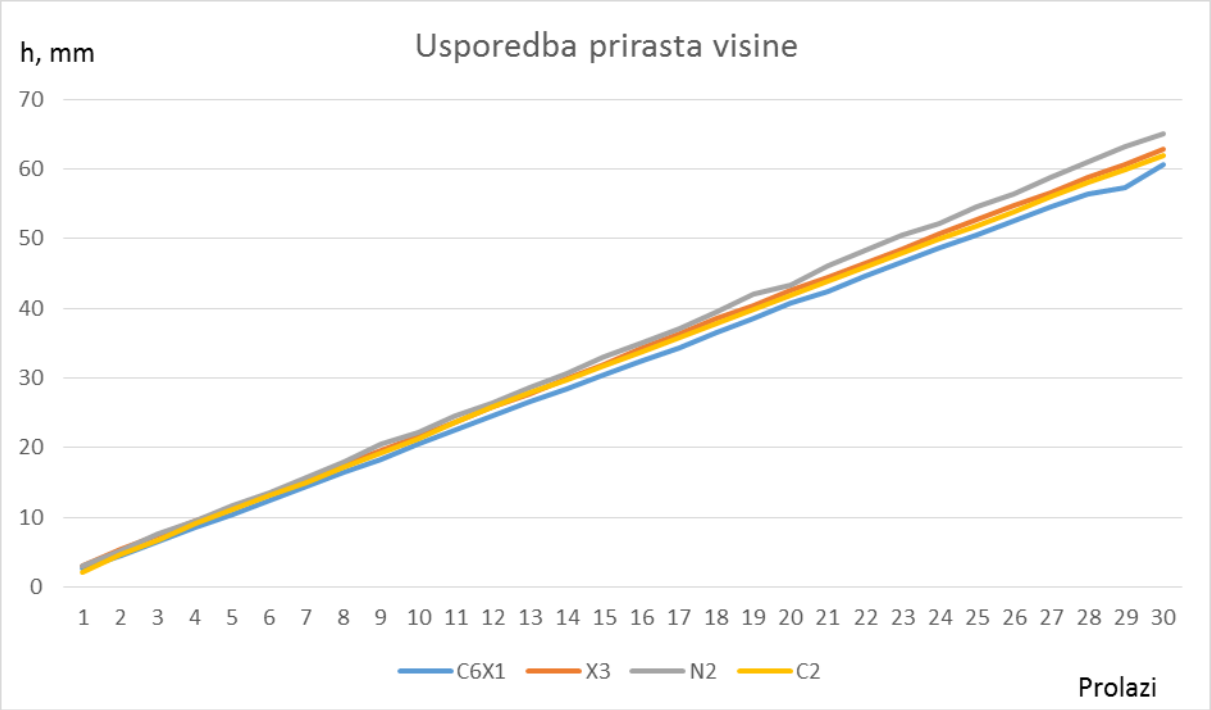
Tablica 22. Slike prijelomnih površina

Uzorak	Slika prijelomne površine
C6X1	
C2	
X3	
N2	

Prijelomne površine uzoraka C6X1, C2 i X3 su zrnate strukture što je karakteristika krhkog loma. Također, na navedenim uzorcima vidljivi su tragovi žilavog loma na rubovima. Na uzorku N2 došlo je do žilavog loma i dobivene su značajno više vrijednosti udarnog rada loma.

7.9. Analiza rezultata

Slika 77. prikazuje međusobnu usporedbu prirasta visine. Iz grafa je vidljivo da su uzorci približno jednake visine i da je promjena visine linearnog karaktera. Razlika između najvišeg uzorka (N2) i najnižeg (C2) iznosi 4,5 mm. Iz navedenog se zaključuje da mješavina zaštitnog plina N2 daje najveći prirast, odnosno najveći depozit materijala, a mješavina C2 najmanji. Uzorci C6X1 i X3 su praktično jednake visine (razlika 0,9 mm) i na temelju toga se zaključuje da ove dvije mješavine daju jednake rezultate što se tiče prirasta visine.



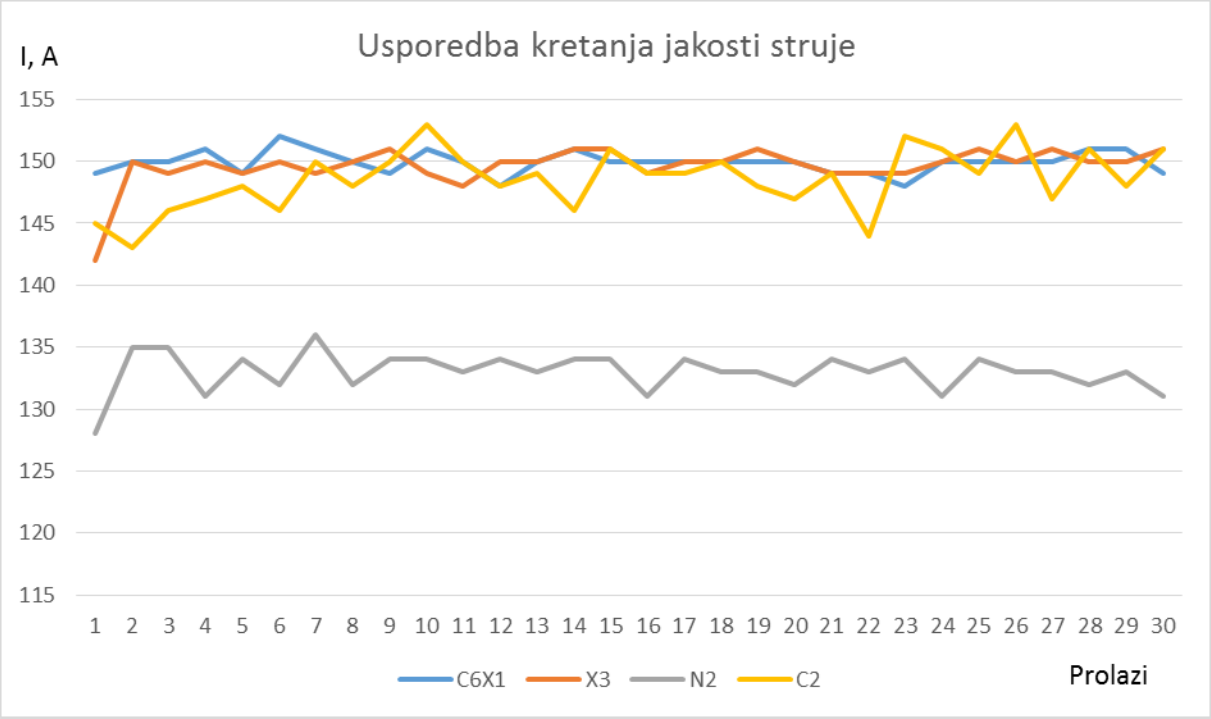
Slika 77. Usporedba prirasta visine

Na slici 78. prikazana je usporedba kretanja jakosti struje tijekom navarivanja slojeva za sva četiri uzorka. Jakosti struja variraju oko svojih vrijednosti bez značajnijih odstupanja izuzevši prvi prolaz kod kojeg je došlo do značajne promijene u odnosu na prosječnu vrijednost. Razlozi većeg odstupanja tijekom prvog prolaza su miješanje raznorodnih materijala i razlike u temperaturama (ploča na koju se navarivalo bila ja ne sobnoj temperaturi za razliku od sljedećih prolaza gdje je temperatura bila viša). Najveća odstupanja, tj. varijacije u jakosti struje tijekom procesa zavarivanja zabilježena su na uzorku N2 kod kojeg je najveća standardna devijacija.

U tablici 23. prikazane su maksimalne i minimalne vrijednosti, srednja vrijednost i standardna devijacija za svaki od uzoraka kako bi se detaljnije prikazalo raspon i karakter ponašanja struje tijekom zavarivanja.

Tablica 23. Statistički podaci za jakosti struje

Uzorak	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Maksimum	Minimum
C6X1	149,9	0,631	152	148
X3	149,6	0,956	151	142
N2	133	1,133	136	128
C2	148,6	1,960	153	143



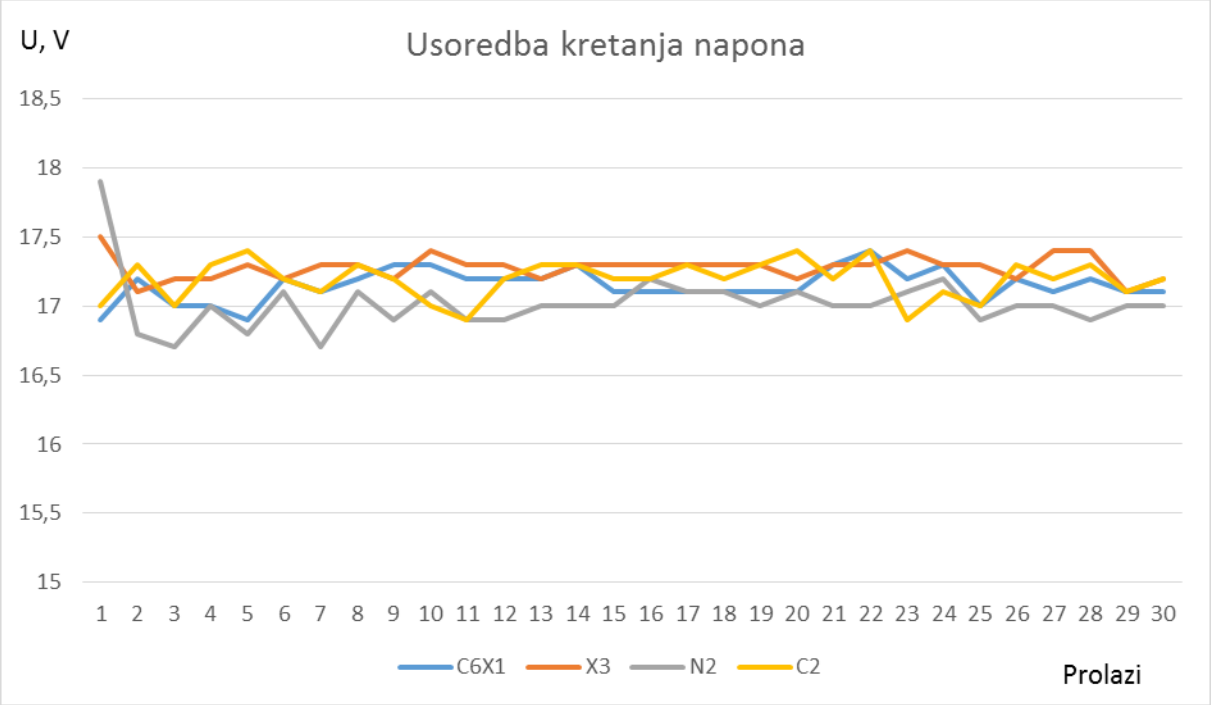
Slika 78. Usporedba kretanja jakosti struje

Na slici 79. prikazana je usporedba očitanih vrijednosti napona tijekom zavarivanja za sva četiri uzorka. Najveća odstupanja zabilježena su tijekom prvog prolaza, dok je u sljedećim prolazima došlo do stabilizacije visine napona. Zabilježene promjene napona bile su male i kretale su se unutar 1 V za što je zaslužna ravna statička karakteristika izvora struje. Najveća standardna devijacija zabilježena je kod uzorka N2. Također, i standardna devijacija jakosti struje kod uzorka N2 je bila najveća, pa se s obzirom na to može zaključiti da mješavina zaštitnih plinova (97,5 % Ar + 2,5 % N_2) korištena kod navedenog uzorka pruža najnestabilnije parametre zavarivanja u usporedbi s ostalim korištenim mješavinama.

Statistički podaci o kretanju napona dani su u tablici 21.

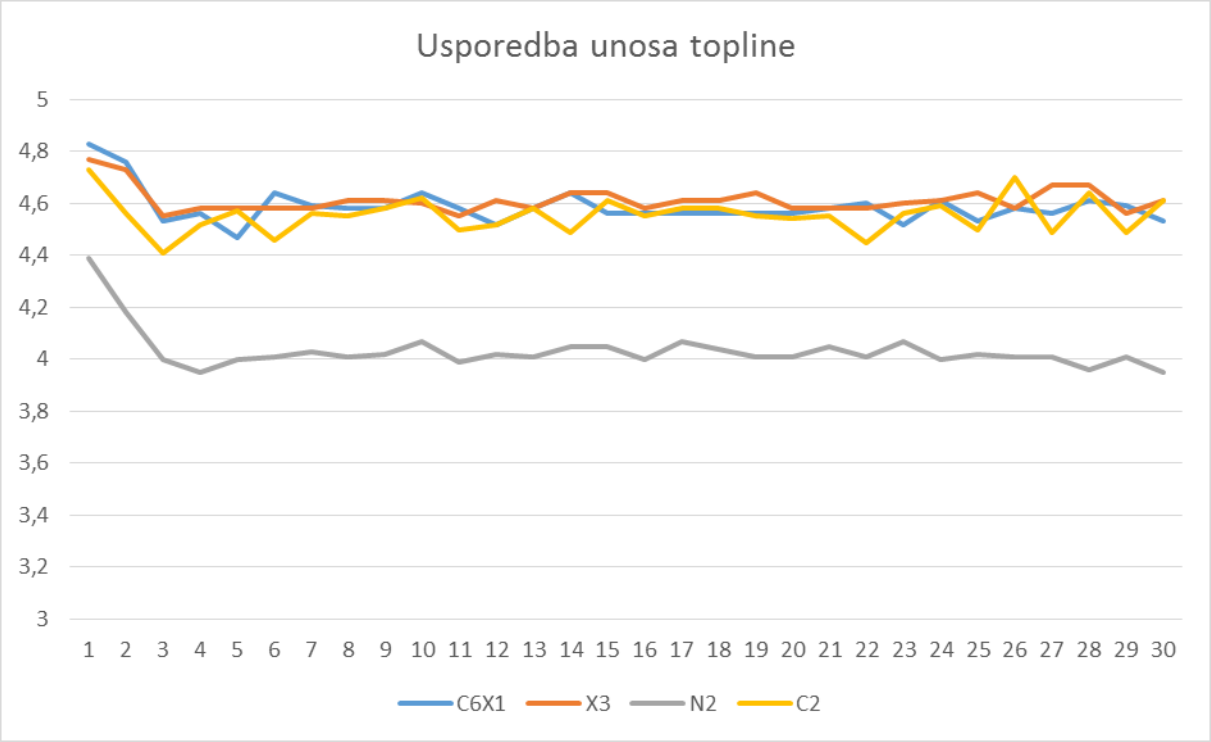
Tablica 24. Statistički podaci za jakosti struje

Uzorak	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Maksimum	Minimum
C6X1	17,15	0,097	17,4	16,9
X3	17,28	0,067	17,5	17,1
N2	17,02	0,122	17,9	16,7
C2	17,2	0,109	17,4	16,9



Slika 79. Usporedba vrijednosti napona tijekom zavarivanja

Na slici 80. prikazan je graf s usporedbom unosa topline za svaki pojedini prolaz. Uočava se da su na prva dva prolaza unosi topline za sva četiri uzorka bili nešto veći. Razlog povećanog unosa topline je korištena manja brzina zavarivanja (prvi prolaz 25 cm/min i drugi prolaz 26 cm/min, brzina na svim ostalim prolazima iznosila je 27 cm/min) i nešto nestabilniji parametri tijekom prvog i drugog prolaza. Također, na grafu je vidljivo da su unosi topline kod uzorka N2 manji za oko 0,6 kJ/cm. Unos topline kod uzorka N2 manji je prvenstveno zbog manjih struja zavarivanja, dok su brzina zavarivanja i napon ostali nepromjenjeni.



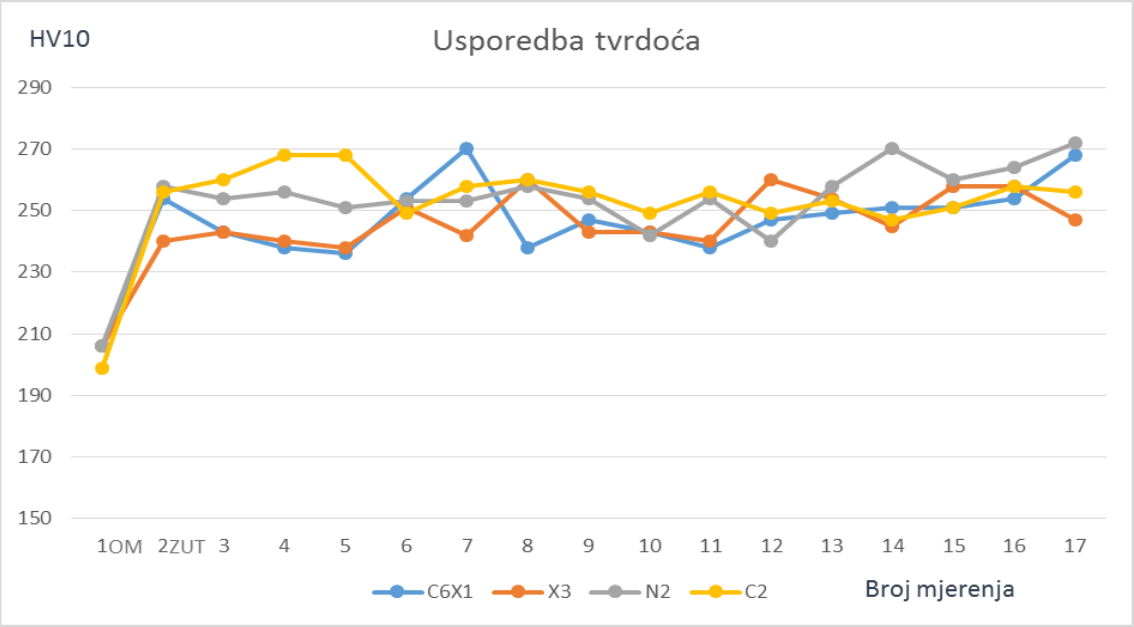
Slika 80. Usporedba unosa topline za svaki prolaz

Slika 81. prikazuje graf sa svim izmjerenim tvrdoćama. U točki 1 je vidljivo da su tvrdoće značajno manje od ostalih, a tome je tako jer je to točka mjerenja u osnovnom materijalu koji je mekši od metala zavara.

U tablici 25. prikazane su maksimalna i minimalna vrijednost, standardna devijacija i srednje vrijednosti tvrdoća za sve uzorke. Vidljivo je da su srednje vrijednosti uzoraka C6X1 i X3 identične i iznose 248 HV10, dok su vrijednosti tvrdoće uzoraka N2 i C2 također jednake i iznose 256 HV10. Pomoću podataka za standardnu devijaciju uočava se da je najveće odstupanje u tvrdoćama prisutno kod uzorka C6X1, a najmanje kod uzorka C2. Prosječne vrijednosti tvrdoća nešto si više od tvrdoće korištenog dodatnog materijala (240 HV10). Maksimalne vrijednosti su približno jednake za sva četiri uzorka, dok se kod minimalnih vrijednosti uočava blaga razlika.

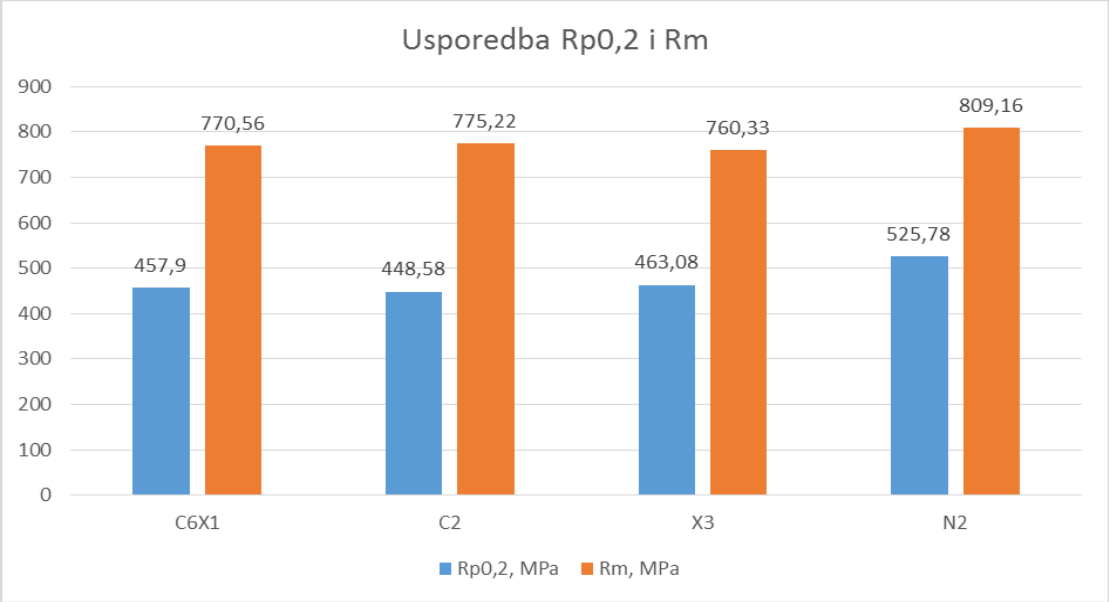
Tablica 25. Statistički podaci za tvrdoće

Uzorak	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Maksimum	Minimum
C6X1	248,5	9,892	270	236
X3	248,1	7,667	260	238
N2	255,9	8,354	272	240
C2	255,9	6,270	268	247



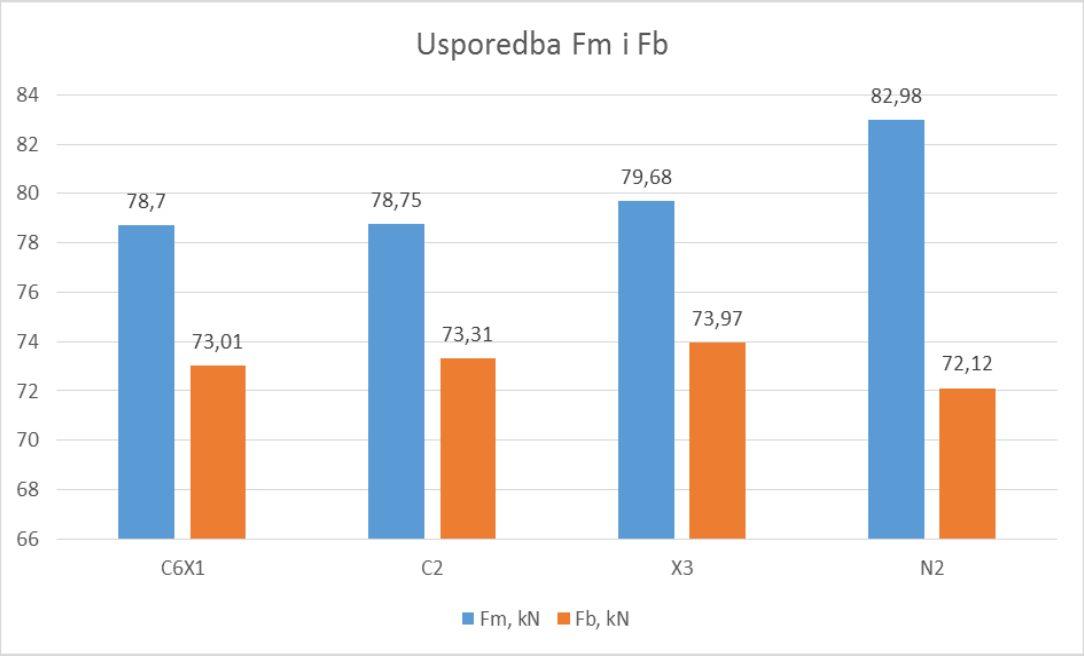
Slika 81. Usporedba tvrdoća svih uzoraka

Na slici 82. prikazana je usporedba $R_{p0,2}$ i R_m za sve ispitne uzorke. Podaci za uzorke C6X1, C2 i X3 su približno jednaki, dok su kod uzorka N2 zabilježene veće vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja od približno 65 MPa i vlačne čvrstoće za približno 40 MPa. Na temelju dobivenih rezultata zaključuje se da kombinacija parametara i mješavine zaštitnih plinova kod uzorka N2 daju bolja mehanička svojstva.



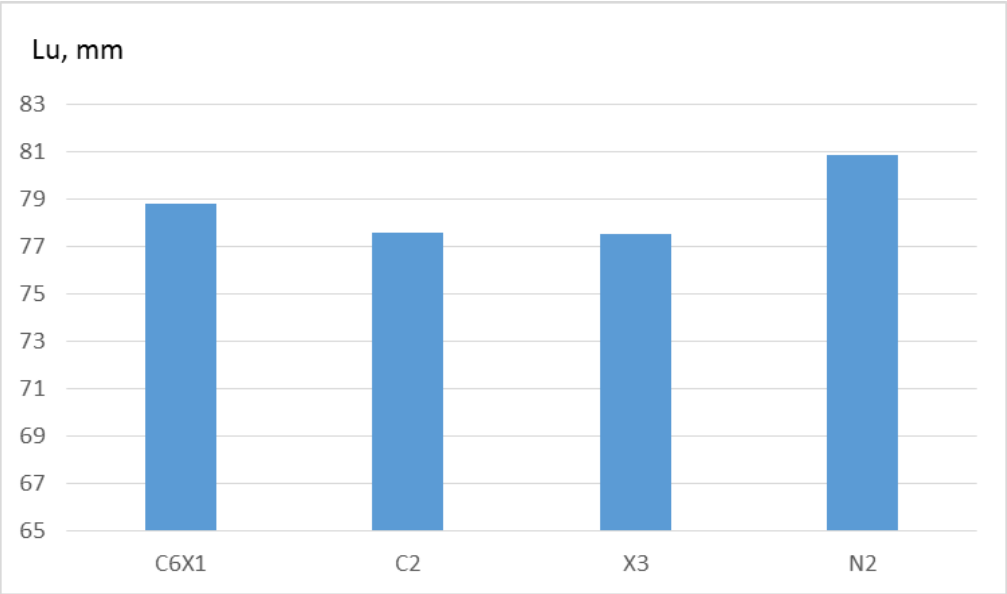
Slika 82. Usporedba $R_{p0,2}$ i R_m za sve uzorke

Na slici 83. prikazana je usporedba maksimalne i prekidne sile. Uočava se da su prekidne sile za sve uzorke približno jednake. Maksimalne sile za uzorke C6X1, C2 i X3 sličnog su iznosa, dok je maksimalna sila za uzorak N2 viša.



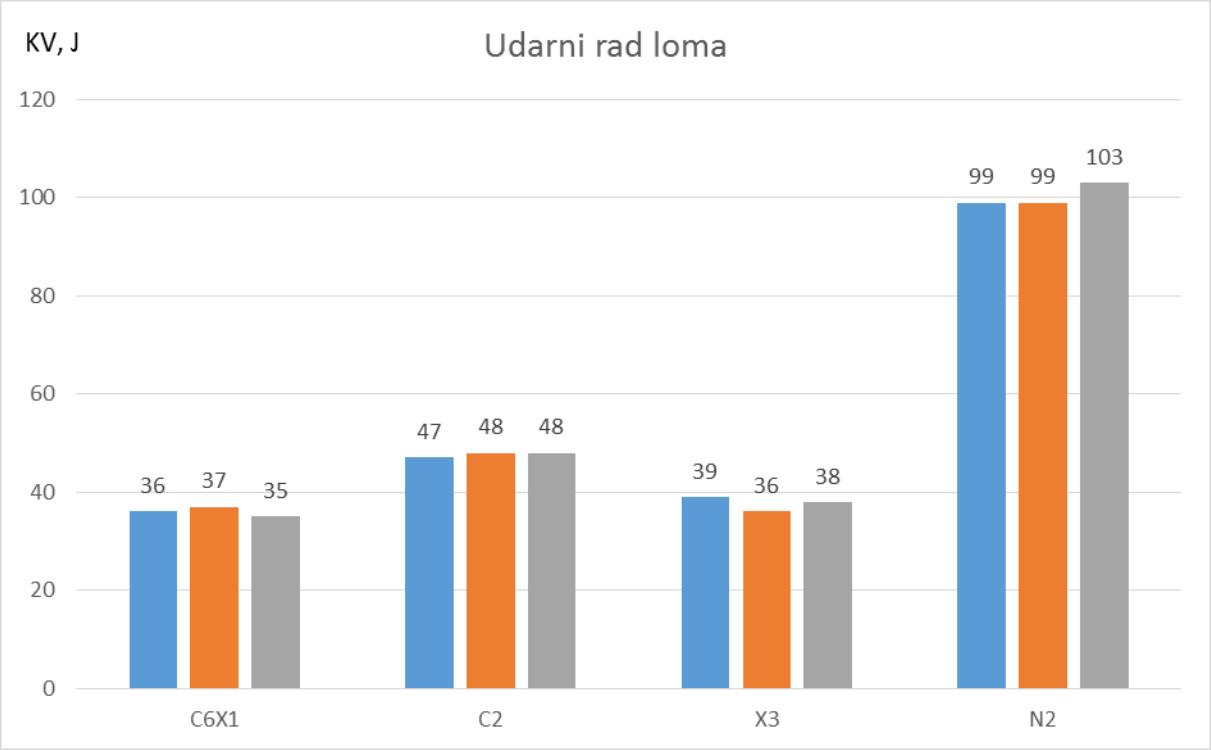
Slika 83. Usporedba maksimalnih i prekidnih sila

Slika 84. daje usporedbu duljina epruveta nakon ispitivanja. Kod uzorka N2 zabilježeno je veće produljenje u odnosu na ostale uzorke.



Slika 84. Usporedba duljina epruveta nakon ispitivanja

Slika 85. prikazuje graf s usporedbama udarnog rada loma za ispitane uzorke.



Slika 85. Usporedba udarnog rada loma

Na grafu je vidljivo da uzorak N2 ima značajno veće vrijednosti udarnog rada loma u odnosu na ostale uzorke. Zaključuje se da kombinacija mješavine zaštitnih plinova i parametara korištenih za izradu navedenog uzorka daju značajno bolje rezultate. Međutim, udarni rad loma za korišteni dodatni materijal iznosi 130 J i na temelju te činjenice uočava se da je u svim stanjima pokusa došlo do smanjenja vrijednosti udarnog rada loma u odnosu na vrijednost dodatnog materijala.

8. ZAKLJUČAK

Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom (engl. Wire Arc Additive Manufacturing) nova je tehnologija u aditivnoj proizvodnji koja omogućava proizvodnju metalnih proizvoda navarivanjem slojeva. WAAM postupak koristi standardnu opremu za zavarivanje, izvore struje, dodavače žice, pištolje za zavarivanje, robote, kontrolnu jedinicu za upravljanje robotom itd. Aditivni postupci omogućuju potpunu automatizaciju od konstrukcije dijela do njegove proizvodnje. Također, AM postupak proizvodnje je cjenovno konkurentan postupak pri proizvodnji dijelova načinjenih od skupih materijala poput titana i nikla. Naposljetku, aditivni postupci omogućavaju proizvodnju komponenti vrlo kompleksne geometrije, koje bi bilo teško ili nemoguće postići klasičnim tehnologijama obrade.

Dupleks čelici primjenjuju se na mnogim mjestima zbog svojih superiornih korozijskih i vrlo dobrih mehaničkih svojstva. Zbog visokog udjela ferita su feromagnetični, imaju višu toplinsku vodljivost i nižu toplinsku rastezljivost od austenitnih čelika. Na mjestima gdje se traži visoka otpornost na napetosnu i rupičastu koroziju, bolji su izbor od austenitnih čelika.

Cilj rada bio je utvrditi operativno područje parametara u području kratkih spojeva za dupleks nehrđajući čelik kvalitete 1.4462 za više zaštitnih plinskih mješavina. U svrhu eksperimenta bila su izrađena četiri uzorka robotiziranim MAG postupkom zavarivanja i na uzorcima su provedena odgovarajuća nerazorna i razorna ispitivanja.

Za izradu uzoraka korištene su četiri vrste zaštitnih plinskih mješavina: 97,5 % Ar + 2,5 % N_2, 97 % Ar + 3 % O_2, 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2 i 93 % Ar + 1 % O_2 + 6 % CO_2.

Na temelju provedenih ispitivanja moguće je zaključiti sljedeće:

- Parametri zavarivanja za sve korištene plinske mješavine bili su stabilni tijekom cijelog procesa navarivanja uzoraka. Prirast visine bio je ujednačen kod svih uzoraka i postignuta je približno jednaka visina uzoraka nakon 30 navarenih slojeva.
- Ispitivanjem radiografijom nisu uočene veće nepravilnosti u metalu zavara.
- Na snimkama makrostrukture nisu vidljivi uključci unutar strukture.
- Analizom mikrostrukture vidljivo je povećanje udjela austenita u mikrostrukturi u središnjim dijelovima uzorka (između četvrtog i 27. prolaza).
- Mjerenje tvrdoće na poprečnom presjeku uzorka pokazalo je da nema većih odstupanja u tvrdoći duž presjeka.

- Ispitivanje udarnog rada loma pokazalo je da su tri plinske mješavine (97 % Ar + 3 % O_2, 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2 i 93 % Ar + 1 % O_2 + 6 % CO_2) značajno utjecale na smanjenje vrijednosti udarnog rada loma u odnosu na minimalno garantirane vrijednosti proizvođača dodatnog materijala, dok je kod mješavine 97,5 % Ar + 2,5 % N_2 zabilježeno blago smanjenje udarne radnje loma u odnosu na vrijednosti dodatnog materijala.
- Statičkim vlačnim pokusom dobivene su približno jednake vrijednosti za uzorke kod kojih su korištene mješavine 97 % Ar + 3 % O_2, 97,5 % Ar + 2,5 % CO_2 i 93 % Ar + 1 % O_2 + 6 % CO_2, dok su kod mješavine 97,5 % Ar + 2,5 % N_2 dobiveni nešto veći iznosi konvencionalne granice razvlačenja i vlačne čvrstoće.

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da je mješavina zaštitnih plinova 97,5 % Ar + 2,5 % N_2 dala najbolje rezultate, dok su kod ostalih korištenih plinskih mješavina zabilježeni lošiji rezultati prvenstveno kod mehaničkih svojstava. Razlog boljih mehaničkih svojstava uzorka N2 veći je udio austenita u mikrostrukturi.

LITERATURA

[1] http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=69979 ; dostupno: 15.5.2017.

[2] ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies ASTM International, 2012.

[3] Sigler D.: Additive Manufacturing for Electric Motors, UTRC, SAD, 2013.

[4] Godec D., Šercer M.: Aditivna proizvodnja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[5] Pilipović A.: Osnovni pojmovi, definicije i podjela postupaka aditivne proizvodnje i prototipova, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.

[6] Godec D., Šercer M.: Značaj aditivnih postupaka proizvodnje tvorevina u suvremenom razvoju i proizvodnji, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.

[7] Ilić D.: Optimizacija prijenosa metala za aditivnu proizvodnju elektrčinim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

[8] Pilipović A.: Aditivna proizvodnja; Polimeri, Volumen 33, Svezak 3, 2012.

[9] Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H.: Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, International Journal Advanced Manufacturing Technology, 465-481, 2015.

[10] Dominković F.: Primjena MIG postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

[11] Wiliams S., WAAMMat team; prezentacija: Large Scale Metal Wire + Arc Additive Manufacturing of Structural Engineering Parts, Cranfield University, Engleska, 2016.

[12] Ding J., Colegrove P., Martina F., Williams S., Wiktorowicz R., Palt M. R.; Development of a laminar flow local shielding device for wire + arc additive manufacture, Journal of Materials Processing Technology, Volumen 226, 2015.

[13] Williams S. W., Martina F., Addison A. C., Ding J., Pardal G., Colegrove P.: Wire + Arc Additive Manufacturing; Materials Science and Technology, 2016.

[14] Martina F., Williams S.: Wire + arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparation, Welding Engineering and Laser Processing Centre, Cranfield University, 2015.

[15] Donoghue J., A. A. Antonysamy, Martina F. Colegrove P. A., Williams, Prangnell P. B.: The effectivness of combining rolling deformation with Wire – Arc Additive Manufacturing on β-grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V, ELSEVIER, 2016.

[16] Busachi A., Erkoyuncu A. J., Martina F., Ding J.: Designing a WAAM Based manufacturing System for Defence Applications, Elsevier, 48-53, 2015.

[17] Lienert T. J., Sudersanam S. B., Siewert T. A., Acoff V. L.: ASM Handbook, Welding Fundamentals and Processes, Volume 06A, Ohio, 2011.

[18] Garašić I., prezentacija: MIG/MAG postupak zavarivanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[19] Kožuh Z., Garašić I.: Priručnik iz kolegija strojevi i oprema za zavarivanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

[20] Mikulić I.: Visokoučinski postupci MAG zavarivanja, Završni rad, Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu Slavonski Brod, 2016.

[21] Babić N.: A-TIG zavarivanje duplex čelika, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

[22] Branilović D.: Utjecaj zaštitnog plina pri TIG zavarivanju Cr-Ni čelika na geometrijske značajke zavara, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.

[23] Vlahov M.: TIG zavarivanje nehrđajućih čelika, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.

[24] http://www.insidemetaladditivemanufacturing.com/blog/wire-feed-additive-manufacturing Dostupno: 7.6.2017.

[25] Ding D., Pan Z., Stephen van Duin, Li H., Dhen C.: Fabrication Superior NiAl Bronze Components through Wire Arc Additive Manufacturing; Materials, Volumen 9, Svezak 8, 2016.

[26] S. Chen: Application of wire-arc additive manufacturing (WAAM) process in in-situ fabrication of iron aluminide structures, University of Wollongong, Australia, 2016.

[27] Robert N Gunn: Duplex stainless steels, Microstructure, properties and applications, Abington Publishing, Cambridge England, 2003.

[28] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1357631301-0-ssnc_9i10_pred_tekst.pdf Dostupno: 9.6.2017.

[29] http://www.imoa.info/molybdenum-uses/molybdenum-grade-stainless-steels/duplex-stainless-steel.php Dostupno: 9.6.2017.

[30] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1371036144-0-rede-12thinternationalfoundrymenconference-2012..pdf Dostupno: 9.6.2017.

[31] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2009.

[32] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1357630467-0-ssnc_9i10_pred_prez.pdf Dostupno: 24.4.2017.

[33] Savić L.: Utjecaj opterećenja na tvrdoću dupleks čelika, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2011.

[34] Alvarez-Armas I., Degallaix-Moreuil S.: Duplex Stainless Ateels, London, UK, 2009.

[35] http://www.spmetal.net/superduplex-steel-uns-s32750/super-duplex-steel-uns-s32750-fitting-type-fittings/super-duplex-steel-unsnos32750-fitting-type-astm-a182-buttwelding-pipe-cap.html Dostupno: 24.5.2017.

[36] John C. Lipplod, Damian J. Kotecki: Welding Metallurgy and Weldability of Stainless Steels, New Jersey, USA, 2005.

[37] http://www.varstroj.si/welding-machines_ang/mig-mag-welding_ang/vs_eng/vps-4000-digit-eng.html Dostupno: 26.6.2017.

[38] http://www.migweld.de/english/products/stainless-steel-welding-wire/4462-ml-2293-nl/ Dostupno 1.7.2017.

[39] HRN EN 1011-1: 2009: Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 1. dio: Opće smjernice za elektrolučno zavarivanje, 2009.

[40] http://www.migweld.de/english/products/stainless-steel-welding-wire/4462-ml-2293-nl/ Dostupno: 1.7.2017.

[41] Norma ISO 6892-1:2009: Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature

[42] Norma ISO 148-1:2009: Metallic materials – Charpy pendulum impact test – Part 1: Test method

PRILOZI

I. CD-R disc