

Utjecaj aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom na mikrostrukturu dupleks čelika

Ljušanin, Stipe

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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:235:228287>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Stipe Ljušanin

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Stipe Ljušanin

Zagreb, 2021.

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

Zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju i stručnom vođenju kroz izradu diplomskog rada. Posebno se zahvaljujem asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech., na velikoj pomoći, strpljenju i korisnim savjetima tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem se tehničkom osoblju Laboratorija za zavarivanje, Laboratorija za strojnu obradu, Laboratorija za materijalografiju, Laboratorija za nerazorna ispitivanja i Laboratorija za zaštitu materijala Fakulteta strojarstva i brodogradnje na pruženoj pomoći i strpljenju pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji i zaručnici na velikoj pomoći i bezuvjetnoj podršci tijekom cijelog mog studiranja.

Stipe Ljušanin



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **STIPE LJUŠANIN**

Mat. br.: 0035197539

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom na mikrostrukturu dupleks čelika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of wire and arc additive manufacturing on microstructure of duplex steel**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu potrebno je proučiti postupak aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom. Detaljno opisati MAG postupak zavarivanja. Razraditi konvencionalne i modificirane načine prijenosa metala te navesti specifičnosti i područja primjene istih. Opisati mikrostrukturne faze kod dupleks čelika te objasniti utjecaj konvencionalne toplinske obrade na promjenu svojstava i mikrostrukture.

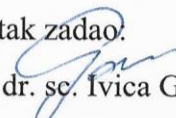
U eksperimentalnom dijelu rada na uzorcima od dupleks čelika izrađenim aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom provesti mjerenje tvrdoće metodom po Vickersu uz primjenu različitih opterećenja. Izraditi epruvete za statički vlačni pokus te ispitati čvrstoću materijala uzdužno i poprečno na smjer polaganja slojeva. Također, na toplinski obrađenim uzorcima izrađenim aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom ispitati mehanička svojstva i provesti detaljnu analizu mikrostrukturnih faza. Zaključno, utvrditi utjecaj aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom i provedene toplinske obrade na mikrostrukturu proizvoda od dupleks čelika te provesti komparativnu analizu u odnosu na proizvode bez toplinske obrade.

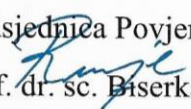
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. rujna 2021.

Rok predaje rada:
2. prosinca 2021.

Predviđeni datum obrane:
13. prosinca do 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS OZNAKA	VII
POPIS KRATICA	VIII
SAŽETAK.....	X
SUMMARY	XI
1. UVOD.....	1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA	2
2.1. Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom – WAAM	7
2.2. Materijali kod WAAM postupka	9
2.3. Prednosti i nedostaci WAAM postupka.....	12
2.4. Primjena WAAM postupka.....	13
3. DUPLEKS ČELICI	16
3.1. Mikrostruktura dupleks čelika	18
3.1.1. Kemijski sastav dupleks čelika	19
3.1.2. Režim toplinske obrade.....	20
3.2. Svojstva dupleks čelika	21
3.3. Zavarivanje dupleks čelika.....	23
4. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE TALJIVOM ELEKTRODOM U ZAŠTITNOJ ATMOSFERI AKTIVNOG PLINA (MAG ZAVARIVANJE)	26
4.1. Konvencionalni načini prijenosa metala	30
4.1.1. Prijenos metala štrcajućim lukom	30
4.1.2. Prijenos metala impulsnim strujama	31
4.1.3. Prijenos metala mješovitim lukom.....	32
4.1.4. Prijenos metala kratkim spojevima	32
4.1.5. Prijenos metala velikom gustoćom struje	33
4.2. Modificirani načini prijenosa metala	34
4.2.1. Surface Tension Transfer	35
4.2.2. FastROOT	36
4.2.3. Cold Metal Transfer	37

4.2.4. ForceArc	38
4.2.5. Rapid MAG Technology.....	39
4.2.6. Cold Arc.....	40
5. EKSPERIMENTALNI RAD.....	42
5.1. Priprema i izrada uzoraka	42
5.2. Kemijski sastav	44
5.3. Mikrostruktura	46
5.4. Mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom.....	55
5.5. Statičko vlačno ispitivanje	59
6. ANALIZA REZULTATA	68
6.1. Analiza kemijskoga sastava	68
6.2. Analiza mikrostrukture	71
6.3. Analiza tvrdoće	73
6.4. Analiza statičko vlačnog ispitivanja	76
7. ZAKLJUČAK.....	79
LITERATURA.....	81

POPIS SLIKA

Slika 1. Konkurentnost proizvodnih procesa za proizvodnju metalnih dijelova [1].....	2
Slika 2. Usporedba završne obrade površina i brzina taloženja između tehnologija aditivne proizvodnje [1]	5
Slika 3. Princip i faze aditivne proizvodnje [2].....	7
Slika 4. Shematski prikaz WAAM postupka [4].....	8
Slika 5. Zid izrađen WAAM postupkom [5].....	8
Slika 6. Struktura materijala kod Boeinga-a 787 [5].....	10
Slika 7. Prikaz pora u zavaru: a) CMT, b) CMT-PADV [4].....	11
Slika 8. Krilo izrađeno od visokočvrstog čelika [8].....	13
Slika 9. Potporna konstrukcija krila zrakoplova izrađena od Ti-6Al-4V [8].....	14
Slika 10. CAD model rebra krila [8].....	14
Slika 11. Schaefflerov strukturni dijagram [10].....	16
Slika 12. Mikrostruktura dupleks čelika s obzirom na smjer valjanja [10].....	18
Slika 13. Utjecaj nikla na mikrostrukturu čelika [11]	19
Slika 14. Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe [10].....	20
Slika 15. Shematski prikaz tipičnih precipitacija u dupleks čelicima [10]	21
Slika 16. Promjena mehaničkih svojstava dupleks čelika 2205 [10]	22
Slika 17. Makrostruktura zavarenog spoja dupleks čelika 2205 s povećanjem 18:1 [10]	25
Slika 18. Oprema za MAG postupak zavarivanja [12]	26
Slika 19. Presjek pištolja kod MAG zavarivanja [13].....	27
Slika 20. Slobodni kraj žice [12].....	28
Slika 21. Načini prijenosa metala u električnom luku [16].....	30
Slika 22. Prijenos metala štreajućim lukom [13]	31
Slika 23. Prijenos metala impulsnim strujama [13]	31
Slika 24. Prijenos metala mješovitim lukom [13].....	32
Slika 25. Prijenos metala kratkim spojevima [13]	33
Slika 26. Rotacijski prijenos metala velikom gustoćom struje [13].....	33
Slika 27. Dinamička karakteristika STT postupka [17]	35
Slika 28. Slijed odvajanja kapljice kod STT zavarivanja [17].....	35
Slika 29. Dinamička karakteristika FastROOT postupka [17].....	36
Slika 30. Slijed odvajanja kapljice pri FastROOT zavarivanju [17].....	36

Slika 31. Utjecaj sekundarnog strujnog impulsa na oblik provara kod FastROOT postupka [17]	37
.....	37
Slika 32. Shematski prikaz povratnog gibanja žice [20]	37
Slika 33. Slijed odvajanja kapljice kod CMT postupka [17]	38
Slika 34. Faze forceArc načina prijenos metala [22]	38
Slika 35. Dinamička karakteristika RMT postupka [17]	39
Slika 36. Priprema kutnog spoja kod RMT postupka [18]	40
Slika 37. Usporedba coldArc i prijenosa metala kratkim spojevima [24]	40
Slika 38. Električna snaga kod ponovne uspostave električnog luka [24]	41
Slika 39. Zid izrađen postupkom coldArc [25]	42
Slika 40. Plan rezanja uzoraka	43
Slika 41. Uzorci nakon rezanja tračnom pilom	43
Slika 42. XRF – Olympus	44
Slika 43. Početni uzorak zida	45
Slika 44. Ispitivanje kemijskog sastava po slojevima	45
Slika 45. Izgled uzoraka nakon rezanja	47
Slika 46. Uređaj Pneumat Press	47
Slika 47. Izgled uzoraka nakon oblaganja polimernom masom (N-nacr, B-bokocrt, T-tlocrt, B3-bokocrt nakon skidanja 3mm)	48
Slika 48. Odabrane orijentacije zida za promatranje mikrostrukture	48
Slika 49. Uređaj za brušenje uzoraka	49
Slika 50. Uređaj za poliranje uzoraka	49
Slika 51. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51	50
Slika 52. Mikrostruktura uzorka u pogledu N	50
Slika 53. Mikrostruktura uzorka u pogledu T	51
Slika 54. Mikrostruktura u pogledu B	51
Slika 55. Mikrostruktura u pogledu B3 s povećanjem od 50 puta	52
Slika 56. Mikrostruktura u pogledu B3 s povećanjem od 200 puta	52
Slika 57. Mikrostruktura u pogledu B3 s povećanjem od 1000 puta	53
Slika 58. Mikrostruktura u pogledu B3 (TO) s povećanjem od 50 puta	53
Slika 59. Mikrostruktura u pogledu B3 (TO) s povećanjem od 200 puta	54
Slika 60. Mikrostruktura u pogledu B3 (TO) s povećanjem od 1000 puta	54
Slika 61. Skica i otisak dijamantnog penetratora [27]	55

Slika 62. Tvrdomjer PMT-3	55
Slika 63. Otisak penetratora s ciljnikom na sredini.....	56
Slika 64. Tvrdomjer Reicherter	58
Slika 65. Izrezani uzorci za statičko vlačno ispitivanje	59
Slika 66. Uzorci sa pripadajućim pločicama	59
Slika 67. Zavarivanje uzoraka i pločice	60
Slika 68. Poravnavanje uzoraka	61
Slika 69. Uzorci spremni za izradu epruveta.....	61
Slika 70. Dimenzije epruveta za statičko vlačno ispitivanje	62
Slika 71. Izrađene epruvete pravokutnog poprečnog presjeka.....	62
Slika 72. Kidalica MESSPHYSIK BETA 50-5	63
Slika 73. Uzorci prije radiografskog snimanja.....	64
Slika 74. Radiogram epruveta	65
Slika 75. Epruvete nakon statičko vlačnog pokusa	66
Slika 76. Poprečni presjek epruvete V (lijevo) i VT (desno) nakon kidanja	67
Slika 77. Poprečni presjek epruvete H (lijevo) i HT (desno) nakon kidanja	67
Slika 78. Udio kroma u uzorku i žici	68
Slika 79. Udio nikla u uzorku i žici.....	69
Slika 80. Udio molibdena u uzorku i žici.....	69
Slika 81. Udio mangana u uzorku i žici	70
Slika 82. Određivanje postotnog udjela ferita i austenita pomoću programa ImageJ.....	71
Slika 83. Udio ferita u uzorcima	72
Slika 84. Udio austenita u uzorcima.....	73
Slika 85. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoća HV0,1	73
Slika 86. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoća HV0,2	74
Slika 87. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoća HV10	75
Slika 88. Tvrdoće uzorka B3 za različita opterećenja s pripadajućim rasipanjima.....	75
Slika 89. Tvrdoće uzorka B3 (TO) za različita opterećenja s pripadajućim rasipanjima.....	76
Slika 90. Vlačna čvrstoća i konvencionalna granica tečenja za sve epruvete	77
Slika 91. Istezljivost pri vlačnoj čvrstoći i prekidna istežljivost.....	78

POPIS TABLICA

Tablica 1. Klasifikacija i postupci aditivne proizvodnje [1]	3
Tablica 2. Osnovne značajke između postupaka dodavanja praha/sloja i žice [1]	4
Tablica 3. Usporedba načina izrade rebra krila [8]	15
Tablica 4. Oznake i kemijski sastav za dupleks čelike [9], [10]	17
Tablica 5. Fizikalna svojstva dupleks čelika [10]	23
Tablica 6. Parametri MAG zavarivanja [12]	27
Tablica 7. Kemijski sastav zida prema provedenim ispitivanjima	46
Tablica 8. Kemijski sastav žice za zavarivanje	46
Tablica 9. Izmjerene tvrdoće HV0,1 i HV0,2	56
Tablica 10. Izmjerene tvrdoće HV10	58
Tablica 11. Početne dimenzije epruveta za statičko vlačno ispitivanje	63
Tablica 12. Parametri snimanja radiografskog ispitivanja	64
Tablica 13. Parametri skeniranja radiografskog ispitivanja	65
Tablica 14. Rezultati statičko vlačnog pokusa	66
Tablica 15. Broj zrna u uzorcima	71
Tablica 16. Udio austenita i ferita u uzorcima	72

POPIS OZNAKA

Oznaka	Mjerna jedinica	Opis oznake
<i>A</i>	%	konačna istežljivost
<i>a</i>	mm	početna debljina poprečnog presjeka uzorka
<i>b</i>	mm	početna širina poprečnog presjeka uzorka
<i>d</i>	Mm	srednja vrijednost dijagonala piramide
<i>F</i>	N	primijenjena sila
<i>F_m</i>	N	maksimalna sila
<i>HV</i>	-	tvrdoća prema Vickersu
<i>KV</i>	J	udarna radnja loma (V-utor)
<i>L₀</i>	mm	početna duljina uzorka prije ispitivanja
<i>L_u</i>	Mm	konačna duljina uzorka nakon ispitivanja
<i>R_e</i>	MPa	granica razvlačenja
<i>R_m</i>	MPa	vlačna čvrstoća
<i>R_{p0,2}</i>	MPa	konvencionalna granica razvlačenja
<i>S₀</i>	mm ²	površina poprečnog presjeka uzorka
<i>ε_u</i>	mm/mm	istežanje
<i>A_{gt}</i>	%	istežljivost pri vlačnoj čvrstoći

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
3D	Trodimenzijsko
3DP	<i>Powder Bed and Inkjet 3D Printing</i> – Trodimenzijsko tiskanje
Al	Aluminij
AM	<i>Additive Manufacturing</i> – Aditivna proizvodnja
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i> – Američko društvo za ispitivanje i materijale
BCC	<i>Body Centered Cubic Lattice</i> – Prostorno centrirana kubična rešetka
BTF	<i>Buy-to-Fly</i> – Omjer mase sirovca i gotovog proizvoda
CAD	<i>Computer Aided Design</i> – Konstruiranje pomoću računala
CMT	<i>Cold Metal Transfer</i> – Hladni prijenos metala
CMT-PADV	<i>Cold Metal Transfer Pulse Advanced</i> – napredni impulsni hladni prijenos metala
CNC	<i>Computer Numerical Control</i> – Računalno numeričko upravljanje alatnim strojevima
Cr	Krom
Cu	Bakar
DLF	<i>Directed Light Fabrication</i> – Izravna proizvodnja snopom
DMLS	<i>Direct Metal Laser Sintering</i> – Izravno metalno lasersko srašćivanje
EBF	<i>Electron Beam Freeform Fabrication</i> – Oblikovanje pomoću elektronskog snopa
EBM	<i>Electron Beam Melting</i> – Taljenje pomoću snopa elektrona
FCAW	<i>Flux – Cored Arc Welding</i> – Elektrolučno zavarivanje taljivom praškom punjenom žicom
FCC	<i>Face Centered Cubic Lattice</i> – Plošno centrirana kubična rešetka
FGM	Functionally Graded Materials – Proizvodnja funkcionalno slaganih materijala
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i> – Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti plina
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i> – Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina

HCP	<i>Hexagonal Close Packed Lattice</i> – Heksagonska gusto slagana rešetka
LC	<i>Laser Consolidation</i> – Konsolidacija laserom
LENS	<i>Laser Engineered Net Shaping</i> – Izravno taloženje metala
LOM	<i>Laminated Object Manufacturing</i> – Izrada objekata laminiranjem
MAG	<i>Metal ActiveGas</i> – Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u z
Mn	Mangan
Mo	Molibden
N	Dušik
Nb	Niobij
Ni	Nikal
PRE	<i>Pitting Resistance Equivalent</i> – Postojanost na rupičastu koroziju
RMT	<i>Rapid MAG Technology</i> – Modificirani MAG postupak temeljen na prijenosu metala štrcajućim lukom
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i> – Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom pod zaštitom praška
Si	Silicij
SLM	<i>Selective Laser Melting</i> – Selektivno lasersko taljenje
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i> – Selektivno lasersko srašćivanje
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i> – Ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom
STL	<i>Standard Tessellation Language</i> – Triangulizacijska datoteka
STT	<i>Surface Tension Transfer</i> - Prijenos metala površinskom napetošću
Ti	Titan
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i> – Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom
UC	<i>Ultrasonic Consolidation</i> – Ultrazvučna konsolidacija
V	Vanadij
W	Wolfram
WAAM	<i>Wire and Laser Additive Manufacturing</i> – Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom
WLAM	<i>Wire and Laser Additive Manufacturing</i> – Aditivna proizvodnja žicom i laserom
ZUT	Zona utjecaja topline

SAŽETAK

U teorijskom dijelu rada opisana je aditivna proizvodnja te aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom. Opisani su razvoj i svojstva dupleks čelika te je objašnjen utjecaj toplinske obrade i pojedinih legirnih elemenata na mikrostrukturu i zavarljivost dupleks čelika. Detaljno je opisan MAG postupak zavarivanja s posebnim naglaskom na načinu prijenosa metala.

U eksperimentalnom dijelu rada na temelju prethodno izrađenog zida coldArc postupkom osmišljen je plan izrade uzoraka za ispitivanje. Kao dodatni materijal koristio se dupleks čelik. Za svako ispitivanje opisan je postupak i korištena oprema. Jedan dio uzoraka podvrgnut je toplinskoj obradi kako bi se pokazao utjecaj toplinske obrade na mikrostrukturu i svojstva zida. Analizom dobivenih rezultata utvrđen je utjecaj na svojstva i mikrostrukturu zida izrađenog coldArc postupkom.

Ključne riječi: WAAM, coldArc, dupleks čelik, mikrostruktura

SUMMARY

The theoretical part of the thesis describes additive manufacturing and wire and arc additive manufacturing. The development and properties of duplex steels are described, and the influence of heat treatment and individual alloying elements on the microstructure and weldability of duplex steels is explained. The MAG welding process is described in detail with special emphasis on the method of metal transfer.

In the experimental part of the thesis, based on the previously made wall by the coldArc modified procedure, a plan for making samples for testing was devised. Duplex steel was used as an additional material. For each test, the procedure and equipment used are described. One part of the samples was exposed to heat treatment to show the influence of heat treatment on the microstructure and properties of wall. The analysis of the obtained results determined the influence on the properties and microstructure of the wall made by the coldArc method.

Key words: WAAM, coldArc, duplex steel, microstructure

1. UVOD

Aditivna proizvodnja (eng. *Additive Manufacturing*) ima veoma široku primjenu u industriji, dok se kod nekih industrija nalazi u fazi istraživanja i razvoja. Podrazumijeva procese koji se primjenjuju u svrhu stvaranja trodimenzionalnih objekata sloj po sloj. Nadalje, kontrolira se računalnim programom i omogućuje se izrada vrlo složene geometrije proizvoda koje bi drugim klasičnim postupcima bilo teško izraditi. Samim time smanjuju se vremena izrade i troškovi materijala jer nije potrebna velika naknadna strojna obrada.

Postupci aditivne proizvodnje kao dodatni materijal mogu koristiti prah ili žicu. Postupci koji koriste žicu kao dodatni materijali imaju veću brzinu taloženja i velike komponente se mogu ekonomičnije proizvesti, ali se smanjuje razlučivost i složenost. Postupci koji koriste žicu kao dodatni materijal mogu se klasificirati s obzirom na izvor energije.

Postupak WAAM (eng. *Wire and Arc Additive Manufacturing*) se može smatrati kao kombinacija zavarivanja i aditivne proizvodnje. WAAM se sve više istražuje iz razloga niže cijene u odnosu na ostale postupke aditivne proizvodnje. Koristi postojeću zavarivačku opremu i za omogućavanje kretanja spaja se s robotskom rukom ili CNC strojevima. Najčešći materijali koji se koriste za WAAM su čelik, aluminij, titan i legure na bazi nikla.

Dupleks čelici se sve više primjenjuju za WAAM zbog posjedovanja odličnih mehaničkih i antikorozivnih svojstava. Mikrostruktura im se sastoji od podjednake količine austenitne i feritne baze. Legiranjem dupleks čelika osigurava se dovoljna količina austenita jer preveliki udio ferita može smanjiti korozivnu postojanost i uzrokovati pojavu krhkosti.

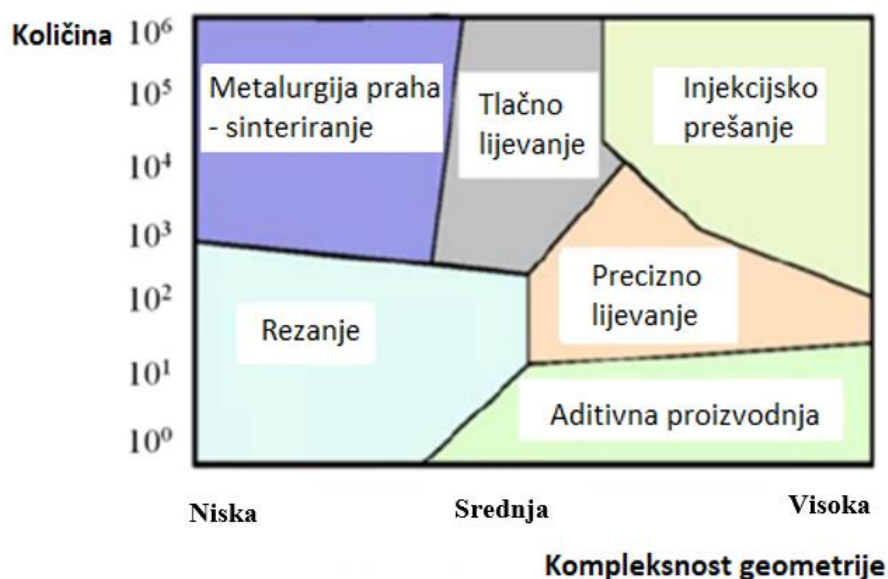
Prilikom zavarivanja, metal zavara mora imati količinu ferita između 25 i 60 % za postizanje zadovoljavajućih svojstava. Nadalje, vrlo je bitan i dodatni materijal jer pravilnim odabirom osiguravamo dovoljnu količinu austenita u metalu zavara. Postupak zavarivanja koji se koristi kod WAAM-a je MAG. Moguća je primjena i konvencionalnih i modificiranih postupaka MAG zavarivanja.

Razlika između upotrebe konvencionalnih i modificiranih postupaka je u upotrebi invertorskih uređaja za zavarivanje. Na taj način modificiranih postupcima se nastoji ukloniti nedostatke konvencionalnih postupaka te povećati produktivnost i stabilnost procesa zavarivanja. Nadalje, najveći nedostatak takvih postupaka su visoki troškovi invertorskih uređaja za zavarivanje.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Tijekom posljednjih 30 godina aditivna proizvodnja (eng. *Additive Manufacturing* - AM) dobiva sve više i više pozornosti u proizvodnji dijelova i prototipova. Izvorne tehnike aditivne proizvodnje uključuju stereolitografski aparat i 3D ispis. Ovakvi postupci aditivne proizvodnje u početku su se primjenjivali za proizvodnju polimera kao komunikacijskog ili inspeksijskog alata, a nedavno čak i u finalnoj proizvodnji. Sposobnost izrade prototipova u kratkom vremenskom razdoblju izravno iz CAD modela pomaže se u skraćivanju koraka razvoja proizvoda. Kako bi se udovoljilo zahtjevima zrakoplovne, automobilske i industrije brzih alata, nedavni fokus istraživanja aditivne proizvodnje preusmjerio se na proizvodnju metalnih komponenti složenog oblika, uključujući legure titana i nikla, koje se ne mogu ekonomski proizvesti konvencionalnim metodama.

Na slici 1. prikazana je funkcija geometrijske složenosti i volumena proizvodnje na kojoj se može vidjeti položaji proizvodnih procesa za proizvodnju metalnih dijelova. Slika 1. pokazala je da je aditivna proizvodnja (također poznata i kao proizvodnja u slojevima) pogodna za izradu dijelova srednje do visoke geometrijske složenosti u relativno malim količina [1].



Slika 1. Konkurentnost proizvodnih procesa za proizvodnju metalnih dijelova [1]

U usporedbi s konvencionalnom proizvodnjom (npr. CNC obrada), aditivna proizvodnja ima nekoliko prednosti. Prvo, moguće je automatizirati procese aditivne proizvodnje u potpunosti, se smanjuje vrijeme proizvodnje i količina ljudske intervencije potrebne za svaki novi dio. Iako se program za CNC obradu može automatski generirati i iz CAD modela, za složene geometrije

potrebno je višestruko ponovno učvršćivanje, što rezultira dugotrajnim i skupim postupcima ponovnog učvršćivanja i kalibracije. Drugo, aditivna proizvodnja ima troškovno konkurentan pristup za izradu komponenata izrađenih od skupog materijala kao što su legure titana i nikla u zrakoplovnoj industriji, gdje takve komponente često imaju nizak omjer BTF. Uz to, aditivnom proizvodnjom moguće je stvoriti jednodijelne strukture složenog oblika s kojima bi bilo nepraktično ili ih je nemoguće napraviti tradicionalnim pristupima [1].

Prema normi ASTM F2792 aditivna proizvodnja klasificira se u 4 kategorije [1]:

- spajanje praškastog materijala u slojevima
- taloženje/navarivanje materijala pod djelovanjem izvora energije
- spajanje vezivom
- laminiranje folija materijala.

U tablici 1. prikazane se klasifikacije i postupci aditivne proizvodnje, te vrsta materijala za određeni postupak aditivne proizvodnje.

Tablica 1. Klasifikacija i postupci aditivne proizvodnje [1]

KLASIFIKACIJA	POSTUPAK	MATERIJAL
Spajanje praškastog materijala u slojevima	Izravno metalno lasersko srašćivanje (DMLS)	Prah
	Taljenje pomoću snopa elektrona (EBM)	Prah
	Selektivno lasersko srašćivanje (SLS)	Prah
	Selektivno lasersko taljenje (SLM)	Prah
Taloženje/navarivanje materijala pod djelovanjem izvora energije	Oblikovanje pomoću elektronskog snopa (EBF)	Prah, žica
	Izravno taloženje metala (LENS)	Prah, žica
	Konsolidacija laserom (LC)	Prah, žica
	Izravna proizvodnja snopom (DLF)	Prah, žica
	Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom (WAAM)	Prah, žica

Spajanje vezivom	Trodimenzijsko tiskanje (3DP)	Prah
Laminiranje folija materijala	Izrada objekata laminiranjem (LOM)	Folija, laminat
	Ultrazvučna konsolidacija (UC)	Folija, laminat

S obzirom na način na koji se dobavlja aditivni materijal, trenutno tehnologije aditivne proizvodnje mogu se klasificirati ili kao postupak dodavanja praha/sloja ili kao postupak dodavanja žice.

U tablici 2. prikazani se osnovne značajke između postupaka dodavanja praha/sloja i dodavanja žice.

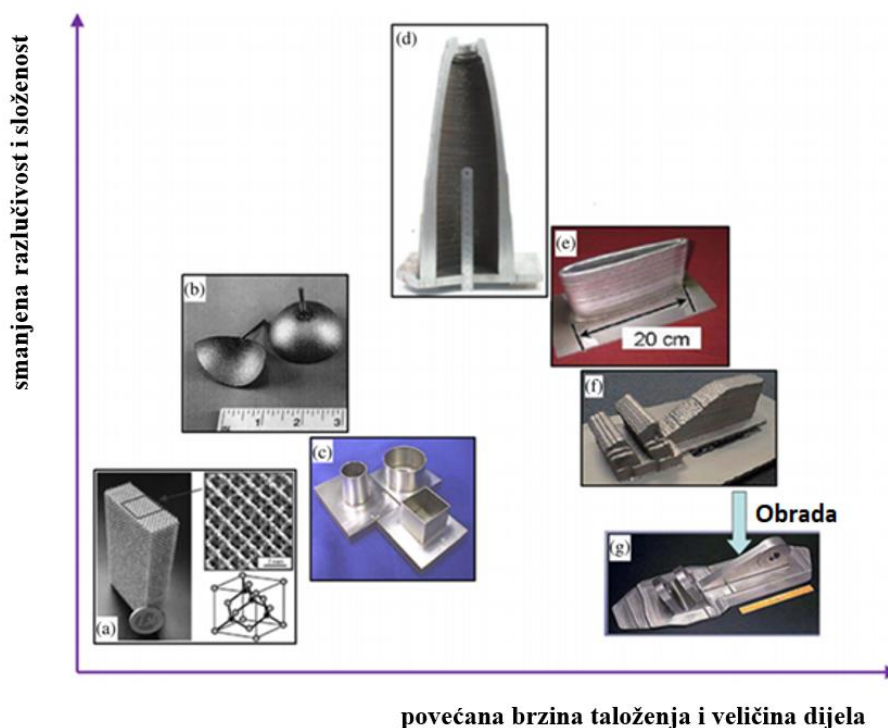
Tablica 2. Osnovne značajke između postupaka dodavanja praha/sloja i žice [1]

MATERIJAL	POSTUPAK	DEBLJINA SLOJA (μm)	BRZINA TALOŽENJA (g/min)	DIMENZIJSKA TOČNOST (mm)	HRPAVOST POVRŠINE (μm)
Prah	LC	n/a	1-30	±0.025 - ±0.069	1-2
Prah	SLM	20-100	n/a	±0.04	9-10
Prah	SLS	75	0.1	±0.05	14-16
Prah	DLF	200	10	±0.013	20
Žica	WAAM	1500	12	±0.2	200
Žica	EBF	n/a	>330	mala	velika

Aditivna proizvodnja koja se bazira na dodavanju žice ima veću učinkovitost korištenja materijala s čak 100 % iskorištenja materijala žice koja se taloži u komponentu. Ovisno o izvoru energije koji se koristi za taloženje metala, dodavanje žice za aditivnu proizvodnju može se svrstati u tri skupine, i to: na bazi lasera, elektrolučnog zavarivanja i elektronskih zraka. Ovakav postupak je prihvatljiviji za okoliš i operatere, jer ih ne izlaže opasnom okolišu kao što je to slučaj kod dodavanja praha jer prah uzrokuje štetnu okolinu. U usporedbi s postupkom dodavanja praha, ima znatno veću brzinu taloženja do 2500 cm³/h (330 g/min za nehrđajući čelik) [1].

Pristup dodavanja praha/sloja bolje je razvijen zbog njegove sposobnosti izrade dijelova s velikom geometrijskom preciznošću. Tipična debljina sloja u tehnologiji dodavanja praha/sloja iznosi 20-100 μm , a dovršeni dijelovi mogu postići dimenzijsku točnost od $\pm 0,05$ mm i hrapavost površine od 9-16 μm . Međutim, brzina taloženja tehnologije dodavanja praha/sloja izuzetno je niska, obično oko 10 g/min, što ograničava njezinu primjenu za izradu komponenti velikih veličina.

Na slici 2. prikazana je usporedba završne obrade površine i brzine taloženja između tehnologija dodavanja praha/sloja i dodavanja žice.



Slika 2. Usporedba završne obrade površina i brzina taloženja između tehnologija aditivne proizvodnje [1]

Na slici 2a. prikazana je dijamantna rešetka izrađena primjenom praha i taljenja elektronskog snopa (EBM). Slika 2b. prikazuje polusferne oblike izrađene od nehrđajućeg čelika korištenjem praha i postupka proizvodnje izravnim snopom (DLF). Slika 3c. prikazuje tri uzorka izrađena od materijala Inconel 625 korištenjem praha i postupka konsolidacije laserom (LC) s hrapavošću površine 1-2 μm . Slika 3d. prikazuje uzorak koji je izrađen korištenjem žice i postupka aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom (WAAM). Slika 3e. prikazuje aluminijski zračni profil izrađen korištenjem žice i postupka oblikovanja pomoću elektronskog snopa (EBF). Slika 3f. prikazuje uzorak izrađen pomoću žice i postupka aditivne proizvodnje

žicom i laserom (WLAM) sa stepeničastom površinom. Slika 3g. prikazuje uzorak nakon strojne obrade.

Kao što je prikazano na slici 2. upotrebom žice umjesto praškastih materijala, povećala se brzina taloženja i velike se komponente mogu ekonomičnije proizvesti, dok se razlučivost i složenost proizvedenih dijelova smanjuje. Uz to, metalne žice su jeftinije i lakše dostupne od metalnih prahova i imaju prikladnija svojstva aditivne proizvodnje, što tehnologiju dodavanja žice čini konkurentnijom. Usporedbom mikrostrukture uzoraka dobivenih pomoću ove dvije metode uočava se sličnost, ali se kod uzorka dobivenog pomoću dodavanja praha uočava određena poroznost. Istraživanjem se otkrilo da se učinkovitost taloženja može povećati ako se ove dvije dodavanja kombiniraju i razina poroznosti bude 20-30 % niža nego za uzorke koji se izrađuju samo s dodavanjem praha.

Aditivna proizvodnja s dodavanjem žice kao osnovnog materijala je obećavajuća tehnologija za proizvodnju većih komponenti jednostavne geometrijske složenosti, poput prirubnica ili krutih ploča. Međutim, postoji nekoliko izazova pri korištenju žice kao dodatnog materijala, uključujući zaostala naprezanja i deformacija uslijed prevelikog unosa topline, relativno loša točnost dijelova uzrokovana efektom „stepeništa“ i loša površinska obrada proizvedenih dijelova. Tijekom nanošenja složenih i velikih slojeva, parametri procesa koji se odnose na geometriju (poput širine nanošenja, debljine sloja, promjera žice, brzine uvlačenja žice i brzine zavarivanja) moraju se pažljivo kontrolirati kako bi se postigle potrebne dimenzije dijela i površine. Uz to, deformacije izazvane zaostalim naprezanjima glavni su uzrok gubitka tolerancija kod tehnologija s dodavanjem žice. Zbog toga, značajan naglasak treba posvetiti kvaliteti dijelova (zaostala naprezanja i mehanička svojstva) i točnosti dijelova (površinska obrada i geometrijska točnost).

Ovisno o izvoru energije koja se koristi za taloženje metala, aditivna proizvodnja s dodavanjem žice može se klasificirati u tri skupine: na bazi lasera, elektrolučnog zavarivanja i elektronskog snopa. Laser je bio najpopularniji zbog svoje preciznosti, ali imao je vrlo loše energetske učinkovitost (2-5%). Elektronska zraka ima malo veću energetske učinkovitost (15-20%), ali zahtijeva visoko radno okruženje u vakuumu što ga čini pogodnim za zrakoplovne radnje. U usporedbi s lošom energetske učinkovitošću laserskog i elektronskog snopa, energetska učinkovitost procesa elektrolučnog zavarivanja poput zavarivanja taljivom žicom u zaštiti neutralnog plina (GMAW) ili postupak zavarivanja netaljivom žicom u zaštiti inertnog plina (GTAW) mogu u nekim okolnostima doseći i 90%. Uz to, cijena tradicionalne opreme za

elektrolučno zavarivanje relativno je niska u usporedbi s laserskom ili elektronskom zrakom [1].

Na slici 3. prikazan je princip i faze aditivne proizvodnje koji je uvijek isti neovisno o postupku.

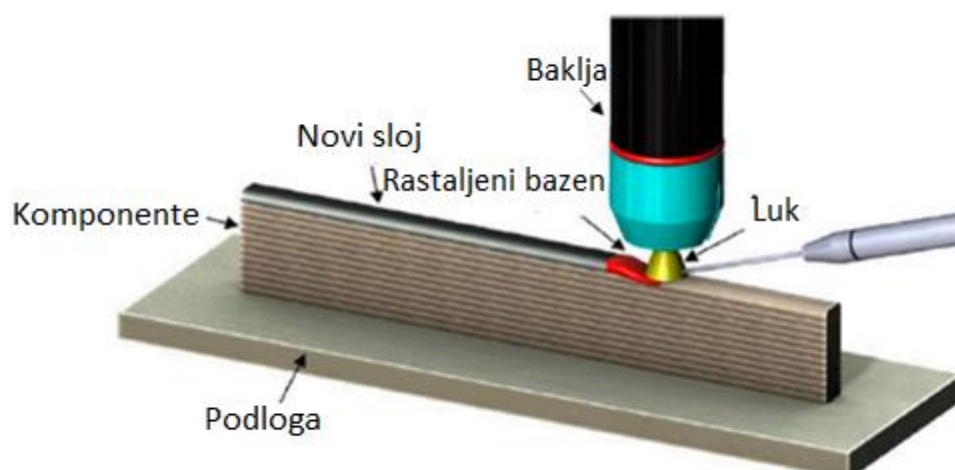


Slika 3. Princip i faze aditivne proizvodnje [2]

Prvi korak svakog postupka aditivne proizvodnje je izrada modela u CAD programu. Sljedeći korak sastoji se od spremanja modela u STL formatu koja se zatim prebacuje na stroj za aditivnu proizvodnju na kojem se podešavaju parametri. Nakon podešavanja parametara (debljina sloja, snaga, brzina, itd) slijedi izrada prototipa. Važna napomena prilikom vađenja prototipa jest dovoljno niska temperatura u radnom prostoru kako bi se na siguran način moglo rukovati istim. Kod ponekih postupaka potrebna je naknadna strojna obrada nakon koje slijedi uporaba [2].

2.1. Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom – WAAM

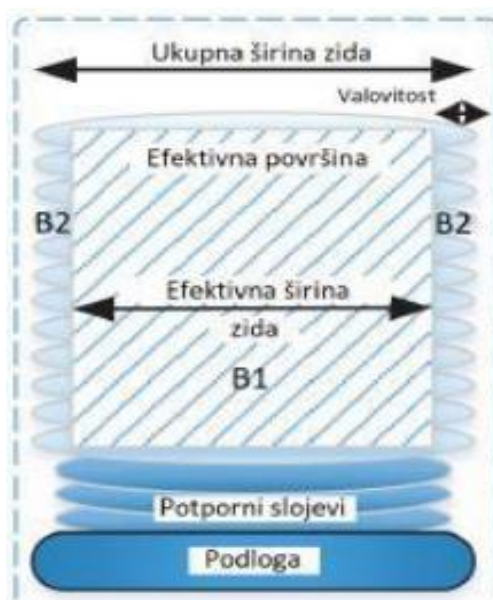
Iako prvi patent potječe iz 1925. zanimljiva za istraživanje postaje tek u posljednjim godinama 20. stoljeća. Nadalje, korištenjem električnog luka kao izvora topline i dodatnog materijala žice, WAAM tehnologija se može smatrati kombinacijom zavarivanja i aditivne tehnologije. Razlog za sve većim istraživanjem u području WAAM tehnologije je niža cijena u odnosu na ostale tehnologije aditivne proizvodnje [3]. Na slici 4. Prikazan je shematski prikaz procesa aditivne proizvodnje lukom i žicom.



Slika 4. Shematski prikaz WAAM postupka [4]

WAAM koristi već postojeću opremu za zavarivanje (izvor struje, pištolj, dodavač žice, zaštitni plin, itd), ali za omogućavanje kretanja potrebno ih je spojiti sa robotskom rukom ili CNC strojevima. WAAM predstavlja tehnologiju budućnosti za proizvodnju gotovih komada koji se mogu izraditi u različitim veličinama [3].

Prethodno navedene karakteristike WAAM postupka nam omogućuju izradu zida minimalne širine 1 mm do 2 mm. Na slici 5. prikazan je zid izrađen WAAM postupkom.



Slika 5. Zid izrađen WAAM postupkom [5]

Nakon izrade zida potrebna je naknadna strojna obrada radi uklanjanja valovitosti koja predstavlja višak materijala. Nadalje, strojna obrada uklanjanja površinske nepravilnosti, a

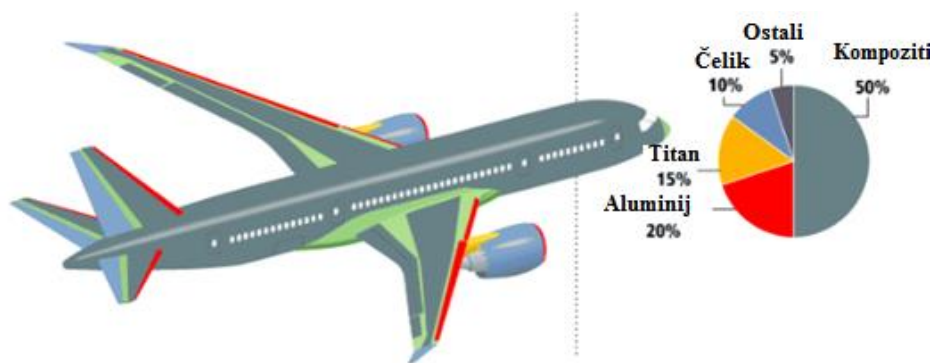
definirane su kao razlike između ukupne širine zida i efektivne širine zida kao što je prikazano na slici 5. Smanjenjem otpadnog materijala s 90 % na svega 10% WAAM tehnologija omogućava dobivanje gotovog oblika bez prevelike naknadne strojne obrade. Ako koristimo skupe materijale, kao što je titan, uvelike smanjujemo potrošnju materijala što dovodi do smanjenja troškova. Gledajući depozit materijala, npr. titana, on je u velikoj mjeri veći u odnosu na druge postupke aditivne proizvodnje. Depozit titana kod WAAM-a iznosi 1 kg/h dok kod aditivne proizvodnje metalnim prahom iznosi 0,2 kg/h. Također valja napomenuti i omjer BTF (eng. *Buy to Fly*) koji govori koliki je omjer mase sirovca i gotovog proizvoda. Što je vrijednost bliža vrijednosti 1, to je situacija bolja [5].

2.2. Materijali kod WAAM postupka

Tijekom izrade dijelova taloženi materijal prolazi kroz različite cikluse zagrijavanja i hlađenja koji mogu rezultirati različitim zrnatim strukturama duž njihove visine. Kontrola strukture zrna od velike je važnosti jer određuje mehanička svojstva materijala. Dijelovi izrađeni WAAM-om sastoje se od stubastih zrna, koje mogu rezultirati anizotropnim svojstvima i štetna su za višeosne uvjete opterećenja. Jednakoosna zrna su poželjna jer mogu smanjiti osjetljivost na pukotine, a istovremeno poboljšati duktilnost, što rezultira komponentama s izotropnim svojstvima. Stoga je upotreba dodataka koji mogu termičke obrade u procesu, kao i toplinske obrade nakon WAAM-a, od ključne je važnosti.

Općenito se za WAAM može koristiti bilo koji materijal dostupan u obliku žice za zavarivanje. Najčešće se koriste čelik, aluminij, titan i legure na bazi nikla. Legure na bazi nikla i titana se sve više proučavaju zbog sve veće upotrebe u zrakoplovnoj industriji.

Legure na bazi titana sve se više proučavaju u WAAM-u što omogućava smanjenje visokih troškova povezanih s obradom ovih materijala. Odlikuje ih visoka čvrstoća, žilavost, dobra otpornost na koroziju i mogu podnijeti ekstremne temperature bez značajnih gubitaka mehaničkih svojstava, što ih čini pogodnim za primjenu u zrakoplovnoj i biomedicinskoj industriji. Legure na bazi titana predstavljaju oko 15 % ukupne težine Boeing-a 787 zahvaljujući dobroj elektrokemijskoj kompatibilnosti s polimernim kompozitima od ugljičnih vlakana. Na slici 6. prikazana je struktura materijala kod Boeing-a 787.



Slika 6. Struktura materijala kod Boeinga-a 787 [5]

Među različitim procesima aditivne proizvodnje, WAAM omogućuje bolju kontrolu mikrostrukture polimorfnih legura. Najčešće korištena legura na bazi titana je Ti-6Al-4V, a samim tim i najviše proučavana u WAAM-u. Sastoji se od dvije alotropske modifikacije kristalne rešetke, heksagonske gusto slagane HCP rešetke i kubično prostorne centrirane BCC rešetke [4].

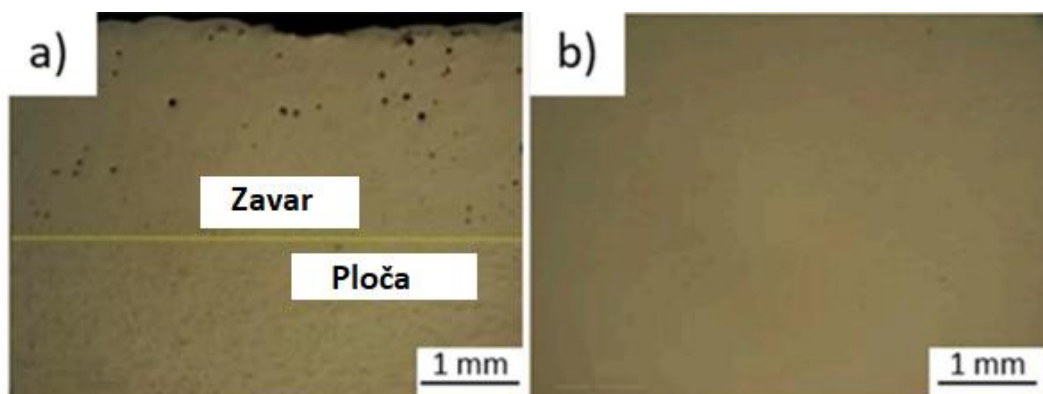
Primjena WAAM tehnologije kod zavarivanja legura na bazi titana iziskuje poduzimanje mjera zaštite i uvođenja modifikacija, a to sve u cilju izvođenja procesa bez greške i sa prihvatljivim mehaničkim svojstvima. Za zavarivanje se ne koristi tzv. hladni prijenos metala (eng. *Cold Metal Transfer*) zbog lutanja luka, nego se primjenjuju plazma i TIG izvori. Kako bi se prilikom zavarivanja izbjegle anizotropije β faze, koje mogu dovesti do lošijih mehaničkih svojstava i smanjenja vijeka trajanja, potrebno je preko promjena parametara zavarivanja ili promjena legura promijeniti skrućivanje taline. Od ta dva slučaja nijedan nije primjenjiv u WAAM postupku zbog toga što nije dopušteno stvaranje krhke faze TiB i što je potrebno dobiti dio sa zadanim tolerancijama.

Kako bi se dobila potrebna svojstva i smanjila zaostala naprezanja u materijalu primjenjuje se dodatna deformacija s valjkom. Deformacija s valjkom ugrađena je u sistem i izvodi se nakon svakog prolaza pištolja za zavarivanje. Ovakav način rješava problem β faze, ali onda ograničava postupak na izradu jednostavnih konstrukcija [6].

Zavarivanje aluminijevih legura uvijek je bilo problematično zbog stvaranja sloja aluminijevog oksida i ponašanja prilikom skrućivanja. Upotreba WAAM-a u aluminijevim legurama je ograničena zbog poroznosti. Kako bi se to izbjeglo preporučava se prilikom izrade dijelova koristiti izmjeničnu struju za uklanjanje oksidnog filma (aluminijev oksid) koji ima veće talište. Ako ne, onda se rastopljeni ostaci zarobljavaju unutar rastopljenog bazen, što

rezultira porama i unutarnjim oštećenjima, koje dovode do drastičnog smanjenja mehaničkih svojstava dijelova.

Hladni prijenos metala (CMT) široko je prihvaćen kao najpouzdanija varijanta za obradu Al legura. Međutim, dokazano je da napredni impulsni hladni prijenos metala (eng. *Cold Metal Transfer Pulse Advanced*), koji je razvio Fronius, u potpunosti eliminira plinske pore zbog učinka čišćenja oksida. Na slici 7. prikazana je makrostruktura s konvencionalnim CMT s naprednim CMT-PADV [4].



Slika 7. Prikaz pora u zavaru: a) CMT, b) CMT-PADV [4]

Na slici 7. jasno se vidi nestajanje pora upotrebom naprednog impulsnog CMT dok se kod konvencionalnog CMT vide pore.

Magnezijeve legure se sve više koriste kao alternativa aluminiju za smanjenje ukupne težine dijelova u automobilskoj i biomedicinskoj industriji. Magnezij karakterizira heksagonalna gusto složena HCP rešetka i ima malo kliznih sustava što rezultira lošom duktilnošću ali izvrsnom istezljivošću. Zahvaljujući svojoj strukturi, tijekom kovanja može se pojaviti nekoliko nedostataka (tj. pucanje ruba), stoga se većina proizvoda magnezija obrađuje lijevanjem. Kao i kod aluminija, potrebno je ukloniti oksidni sloj, ali se kod magnezija to vrlo jednostavno rješava [4].

Legure na bazi nikla uglavnom se koriste u zrakoplovnoj i nuklearnoj industriji, npr. u prijelaznim kanalima i plinskim turbinama. Te se legure odlikuju velikom čvrstoćom na povišenim temperaturama, niskim toplinskim širenjem i izvrsnom otpornošću na koroziju. Njihova zajednička austenitna matrica čini ih prikladnima za rad u širokom rasponu temperatura. Veliki troškovi, sposobnost prijanjanja na rezne rubove i prisutnost abraznih čestica karbida otežavaju obradu legura na bazi nikla, te samim time WAAM postaje tehnika koja se sve više primjenjuje za legure na bazi nikla [4].

Prilikom izrade komponenti od dupleks nehrđajućih čelika WAAM postupkom potrebno je obratiti pozornost na formiranje intermetalnih spojeva. Toplinski unosi s duljim izlaganjem temperaturama u rasponu od 650 °C do 950 °C mogu utjecati na precipitaciju krhkih intermetalnih faza, kao npr. σ , χ , Cr₂N ili γ_2 (sekundarni austenit). Na smanjenje duktilnosti i otpornosti na koroziju najutjecajnija je σ faza.

Kako bi se izbjeglo formiranje štetnih sekundarnih faza potrebno je obratiti pozornost na parametre zavarivanja, odabiru postupka i konstrukcije proizvoda. Također, potrebno je posvetiti pažnju pri unosu topline jer se svakim novim unosom topline povećava mogućnost stvaranja intermetalnih faza [7].

2.3. Prednosti i nedostatci WAAM postupka

Prednosti WAAM postupka [3]:

- mala početna ulaganja i troškovi proizvodnje
- smanjeni troškovi dodatnog materijala i izbor materijala je puno veći u odnosu na ostale AM tehnologije
- brzine taloženja su dosta velike (čak do 130 g/min)
- smanjena količina otpada, reducirani BTF omjer na 2
- kraće vrijeme izrade i mogućnost izrade bez prevelike strojne obrade
- veća sloboda dizajniranja i konstruiranja oblika proizvoda
- moguća automatizacija procesa,
- nudi rješenje i za proizvodnju funkcionalno slaganih materijala (eng. *Functionally Graded Materials* – FGM).

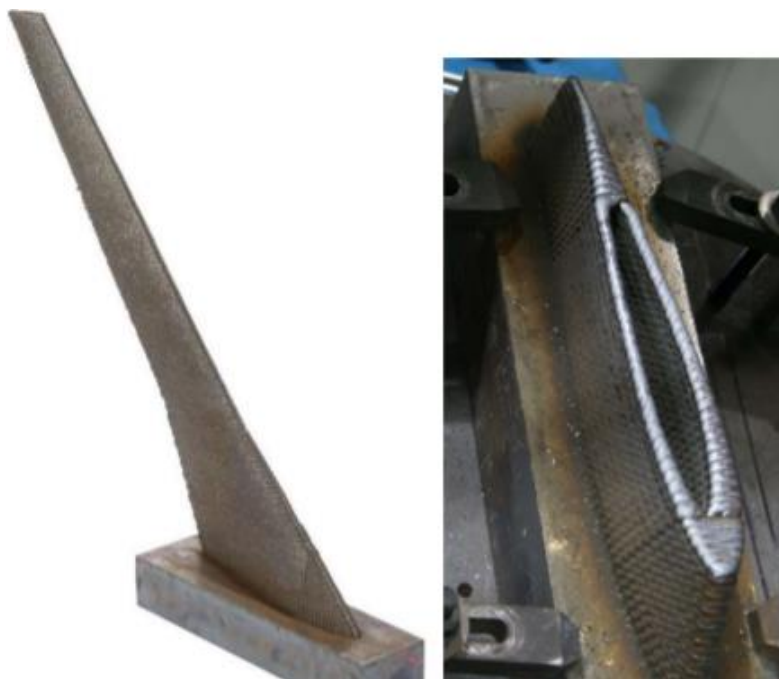
Nedostatci WAAM postupka [3]:

- nemogućnost postizanja zadanih tolerancija zbog deformacije dijelova
- pojava problema suvišnog preklapanja ili nedovoljnog stapanja i vezivanja slojeva uslijed lošeg modeliranja geometrije slojeva
- pojava poroznosti, šupljina, taloženja viška materijala ili nedovoljnog taloženja materijala
- nedovoljna primjena u praksi
- zbog zaostalih naprezanja smanjena mehanička svojstva materijala.

2.4. Primjena WAAM postupka

WAAM tehnologija pronašla je primjenu za izradu srednjih do velikih dijelova, te dijelova srednje složenosti. Jedna od glavnih prednosti primjene WAAM-a je reducirani BTF omjer. On se definira kao omjer mase sirovca i mase konačnog proizvoda. Najveću primjenu WAAM-a možemo pronaći u zrakoplovnoj industriji, ima široku primjenu i u automobilskoj te u izradi alata. Zrakoplovne komponente u većini slučajeva imaju složenu geometriju te su izrađene su od skupih materijala (legure titana i nikla) pa se zahtjeva što niži BTF omjer. U automobilskoj industriji primjena WAAM tehnologije koristi se izradu prototipova gdje se na taj način želi smanjiti vrijeme razvoja i proizvodni troškovi.

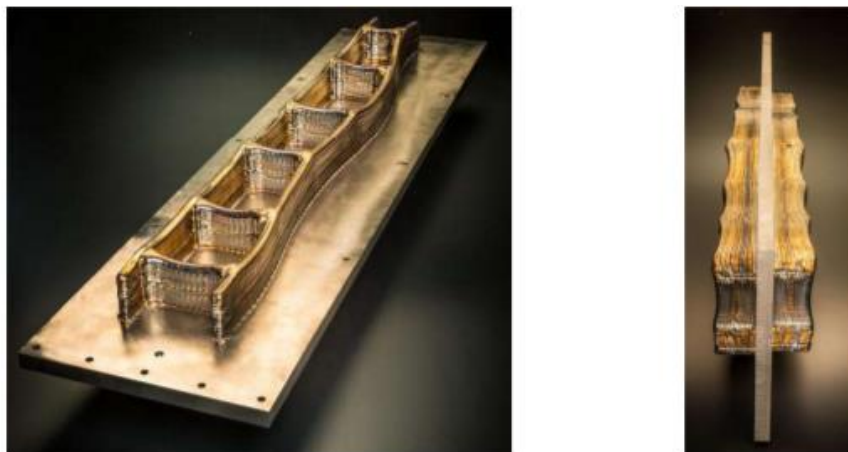
Model krila izrađen je WAAM tehnologijom od visokočvrstog čelika i korišten je postupak hladnog prijenosa metala (CMT) s prosječnom količinom depozita od 3kg/h. Na slici 8. prikazan je model krila visine 0.9 m [8].



Slika 8. Krilo izrađeno od visokočvrstog čelika [8]

Donja polovica krila kao što je prikazano na slici 8. izrađena je sa šupljinom u svrhu ugradnje uređaja za testiranje. Korišten je oscilirajući način izrade radi postizanja promjenjive debljine stijenke. Glavni problem prilikom izrade krila bila je akumulacija topline. Kako bi se to riješilo, nakon svakog sloja, ručno je se pomoću komprimiranog zraka osiguravao postupak hlađenja [8].

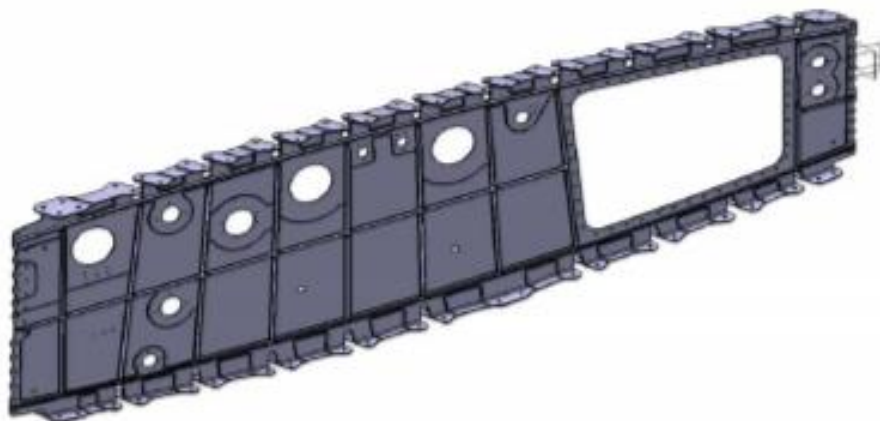
Jedan od glavnih izazova gradnje proizvoda velikih dimenzija je kontrola deformacija. U WAAM-u deformacije se mogu kontrolirati primjenom uravnotežene strategije izrade i odabirom smjera izrade s minimalnom površinom dodira s osnovnom pločom. Na slici 9. prikazana je potporna konstrukcija krila zrakoplova duljine 1,2 m izrađena od legure titan Ti-6Al-4V [8].



Slika 9. Potporna konstrukcija krila zrakoplova izrađena od Ti-6Al-4V [8]

Kontrola deformacija odvija se primjenom taloženja uzduž kraće putanje i izradom dva krila istovremeno. Prije nego što se dva dijela odvoje potrebna je naknadna toplinska obrada s ciljem oslobodjenja zaostalih naprezanja. Količina depozita iznosi 0,8 kg/h postižući BTF omjer od 2,2. Ovakav način izrade omogućuje uštedu u troškovima od 29 % u usporedbi s klasičnim načinom izrade iz bloka materijala [8].

Za WAAM postupak potrebno je odlučiti o strategiji izrade uzimajući u obzir različite aspekte, uključujući BTF omjer, složenost geometrije, rizike od oštećenja itd. Na slici 10. prikazana je struktura rebra krila dugačka 2,5 m [8].



Slika 10. CAD model rebra krila [8]

Radi se o dvostranoj konstrukciji s mrežnim strukturama u sredini i stopalima na rubovima. Debljina stijenke ploče iznosi 4 mm. Koristeći trenutnu proizvodnu metodu, ovu konstrukciju trebati će izraditi od aluminijskog bloka što rezultira BTF omjerom od 45. Kako bi se smanjio BTF omjer razmotrene su dvije različite strategije izrade.

Prva koristi tanku ploču od 4 mm na kojoj su upotrebom WAAM postupka izrađena rebra u obliku mreže i noge na obje strane rubova, dok druga koristi ploču od 22 mm i izrađuje samo noge. Usporedba ove dvije strategije može se vidjeti u tablici 3. [8].

Tablica 3. Usporedba načina izrade rebra krila [8]

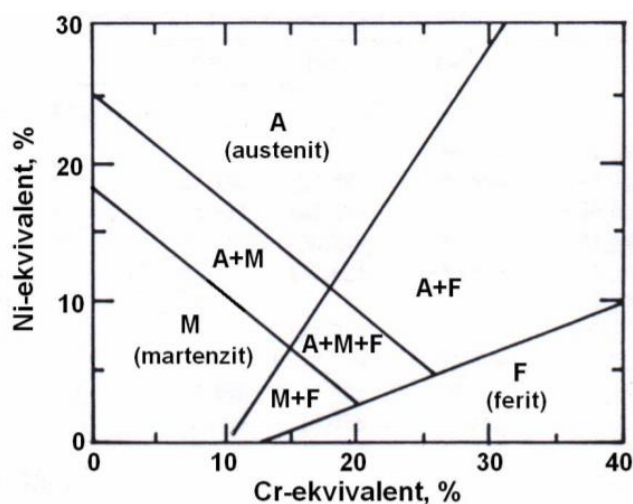
	Strojna obrada	WAAM (podloga 4 mm)	WAAM (podloga 12 mm)
BTF omjer	45	2,7	12,3
Deformacija podloge	-	1,4 mm	0,04 mm
Složenost taloženja	-	visoka	srednja
Rizik od grešaka	-	visoki	srednji

Zbog velike veličine korištena su dva robota koja su taložila materijal istovremeno i ukupna količina depozita je iznosila 2,2 kg/h. Ukupno vrijeme izrade je 6 h što uključuje vrijeme taloženja, vrijeme čekanja među slojevima i vrijeme prijenosa robota bez taloženja. Iako se koristila podloga od 12 mm koja ima BTF omjer 12, ušteda na materijalu iznosi oko 500 kg [8].

3. DUPLEKS ČELICI

Dupleks čelici su korozijski postojani čelici i posebni su po tome što imaju bifaznu strukturu sastavljenu od austenita (FCC) i ferita (BCC) u podjednakim količinama. Stručnoj javnosti poznati su od 1930. godine, ali nisu bili u primjeni zbog problema sa zavarivanjem, krhkošću i korozijskom postojanošću. Nagli razvoj i primjenu doživljavaju 80-ih godina prošlog stoljeća kada su se već spomenuti problemi riješili dodavanjem dušika.

Glavna svojstva dupleks čelika je dobra otpornost na napetosnu, rupičastu i interkristalnu koroziju, te visoka vlačna čvrstoća, granica tečenja i dobra žilavost. Upotrebljavaju se za konstrukcije kod kojih je potrebno postići svojstva korozijske otpornosti i dobrih mehaničkih svojstava, kao npr. naftovod i plinovod. Na slici 11. prikazan je smještaj dupleks čelika u Schaefflerovom strukturnom dijagramu [9], [10].



Slika 11. Schaefflerov strukturni dijagram [10]

Ekvivalentni udio nikla i kroma izračunava se prema sljedećim formulama:

$$\text{Ni - ekv.} = \% \text{Ni} + \% \text{Co} + 30(\% \text{C}) + 25(\% \text{N}) + 0,5(\% \text{Mn}) + 0,3(\% \text{Cu}) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Cr - ekv.} = \% \text{Cr} + 2(\% \text{Si}) + 1,5(\% \text{Mo}) + 5(\% \text{V}) + 5,5(\% \text{Al}) + 1,7(\% \text{Nb}) \\ + 1,5(\% \text{Ti}) + 0,75(\% \text{W}) \end{aligned} \quad (2)$$

Podjela dupleks čelika može se napraviti na osnovu postojanosti na rupičastu koroziju, tj. prema vrijednosti PRE (eng. **P**itting **R**esistance **E**quivalent) koja se izračunava prema izrazu:

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

Moderni dupleks čelici mogu se podijeliti u četiri grupe:

- 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 (PRE < 40)
- Fe-25Cr-7Ni-3,5Mo-0,25N-W-Cu ili super dupleks čelici s 25% Cr (PRE = 40 do 45)
- Fe-32Cr-7Ni-4Mo-0,5N-Cu ili hiper dupleks čelici (PRE > 45).

U tablici 4. prikazani su kemijski sastavi za dupleks čelike prve i druge generacije [9], [10].

Tablica 4. Oznake i kemijski sastav za dupleks čelike [9], [10]

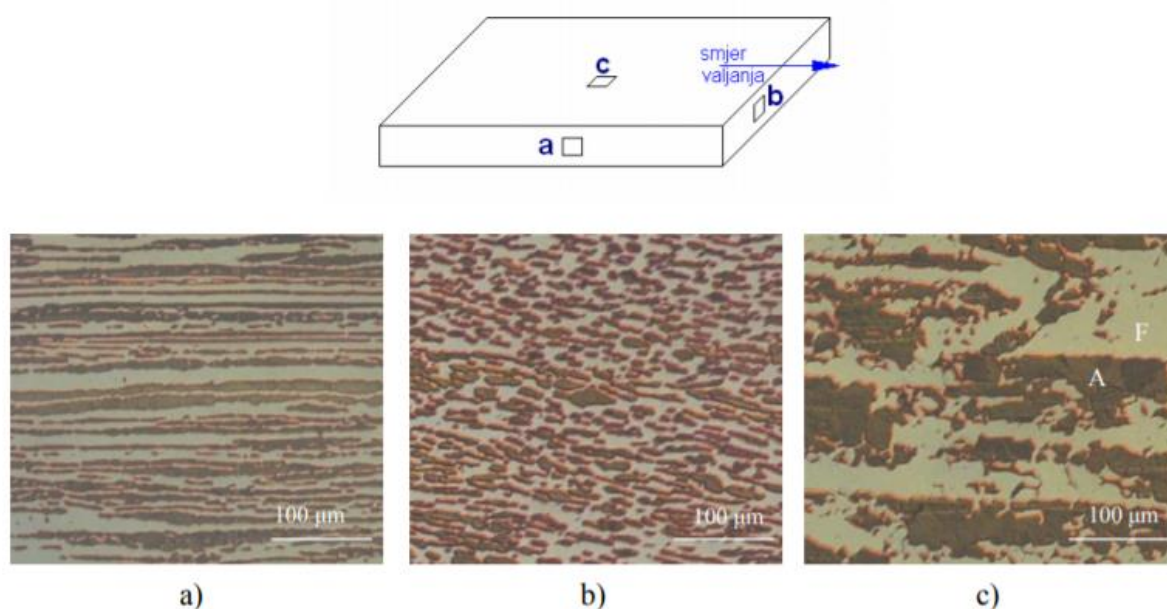
Legura	Uns Broj	EN	C	Cr	Ni	Mo	N	Cu	W
DUPLEKS ČELICI PRVE GENERACIJE									
329	S32900	1.4460	0,08	23,0-28,0	2,5-5,0	1,0-2,0	-	-	-
3RE60	S31500	1.4417	0,030	18,0-19,0	4,3-5,2	2,5-3,0	0,05-0,10	-	-
Uranus 50	S32404	-	0,04	20,5-22,5	5,5-85	2,0-3,0	-	1,0-2,0	-
DUPLEKS ČELICI DRUGE GENERACIJE									
Fe-23Cr-4Ni-0.1N									
2304	S32304	1.4362	0,030	21,5-24,5	3,0-5,5	0,05-0,6	0,05-0,20	-	-
Fe-22Cr-5.5Ni-3Mo-0.15N									
2205	S31803	1.4462	0,030	21,0-23,0	4,5-6,5	2,5-3,5	0,08-0,20	-	-
2205	S32205	1.4462	0,030	22,0-23,0	4,5-6,5	3,0-3,5	0,14-0,20	-	-
Fe-25Cr-5Ni-2.5Mo-0.17N-Cu									
DP-3	S31260	-	0,030	24,0-26,0	5,5-7,5	5,5-7,5	0,10-0,30	0,20-0,80	0,10-0,50
UR 52N+	S32520	1.4507	0,030	24,0-26,0	5,5-8,0	3,0-5,0	0,20-0,35	0,50-3,00	-
255	S32550	1.4507	0,04	24,0-27,0	4,5-6,5	2,9-3,9	0,10-0,25	1,50-2,50	-
Fe-25Cr-7Ni-3.5Mo-0.25N-Cu-W									
DP-3W	S39274	-	0,030	24,0-26,0	6,8-8,0	2,5-3,5	0,24-0,32	0,20-0,80	1,50-2,50
2507	S32750	1.4410	0,030	24,0-26,0	6,0-8,0	3,0-5,0	0,24-0,32	0,50	-
Zeron 100	S32760	1.4501	0,030	24,0-26,0	6,0-8,0	3,0-4,0	0,20-0,30	0,50-1,00	0,50-1,00
-	-	1.477	0,030	28,0-30,0	5,8-7,5	1,5-2,6	0,30-0,40	≤ 0,80	-

Fe-32Cr-7Ni-4Mo-0,5N-Cu

-	S32707	-	0,030	26,0-29,0	5,5-9,5	4,0-5,0	0,30-0,50	1,00	-
	S33207		0,030	29,0-33,0	6,0-9,0	3,0-5,0	0,40-0,60	1,00	-

3.1. Mikrostruktura dupleks čelika

Dupleks čelici oblikuju se na način da im mikrostruktura bude podjednake količine austenitne i feritne faze. Zadovoljavajuća svojstva pokazuju i dupleks čelici koji sadrže ferita između 30 i 70 %. Na slici 12. prikazan je mikrostruktura dupleks čelika s obzirom na smjer valjanja [10].



Slika 12. Mikrostruktura dupleks čelika s obzirom na smjer valjanja [10]

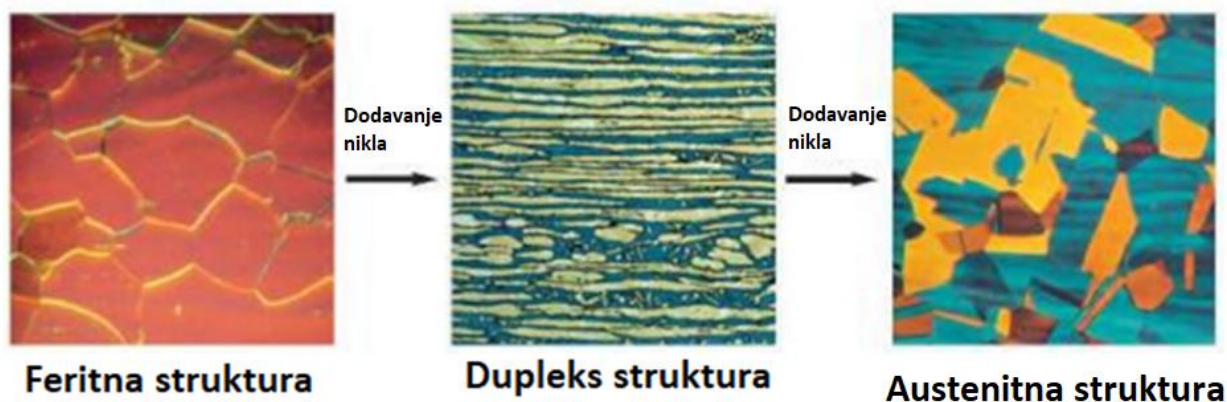
Na slici 12. a) prikazana je mikrostruktura dupleks čelika paralelno sa smjerom valjanja, te okomito na površinu. Slika 12. b) prikazuje mikrostrukturu dupleks čelika poprečno na smjer valjanja i slika 12. c) prikazuje mikrostrukturu dupleks čelika u smjeru valjanja, a paralelno s površinom. Gledajući po presjecima ove strukture mogu se vidjeti razlike ali je volumni udio feritne i austenitne faze podjednak. Na mikrostrukturu utječu kemijski sastav legure i režim toplinske obrade [10].

3.1.1. *Kemijski sastav dupleks čelika*

Legirni elementi dupleks čelika su krom, nikal, dušik, molibden, bakar, silicij i volfram. Osnovni legirni elementi su krom i nikal, a za postizanje izbalansiranog odnosa ferita i austenita koristi se dušik, molibden, bakar, silicij i volfram. Na količinu svakog elementa se treba paziti, tako npr. s visokim udjelom kroma i molibdena relativno brzo dolazi do izlučivanja sigma i chi faze, dok dodavanjem dušika smanjujemo mogućnost formiranja istih.

Krom – sadržaj kroma u dupleks čelicima kreće se u rasponu od 21 % do 33 %. Potrebna minimalna količina kroma za stvaranje pasivnog filma na površini iznosi 11 %. Zadaća pasivnog filma na površini je zaštita od atmosferske korozije. Dodavanjem kroma stabilizira feritne, prostorno centrirana kubična struktura, zbog toga što je krom alfageni element. Kod povećanih udjela kroma, radi formiranja željene dupleks strukture dodaje se više nikla. Povećanim udjelom kroma raste i sklonost nastajanja štetnih intermetalnih faza.

Nikal – gamageni element kojeg u dupleks čelicima ima između 4 i 7 %. Stabilizator je austenitne, plošno centrirane kubične kristalne strukture. Dodavanjem nikla usporava se formiranje nepoželjnih intermetalnih faza [10]. Na slici 13. prikazan je utjecaj nikla na mikrostrukturu čelika.



Slika 13. Utjecaj nikla na mikrostrukturu čelika [11]

Dušik – jaki gamageni element koji zajedno s niklom tvori dovoljnu količinu austenita u strukturi dupleks čelika. Dodavanjem dušika direktno se utječe na formiranje intermetalnih faza pri povišenim temperaturama. Dušik, kod visokog udjela kroma i molibdena sprječava stvaranje sigma faze, povećava čvrstoću, korozijsku postojanost prema rupičastoj i koroziju u procjepu [10].

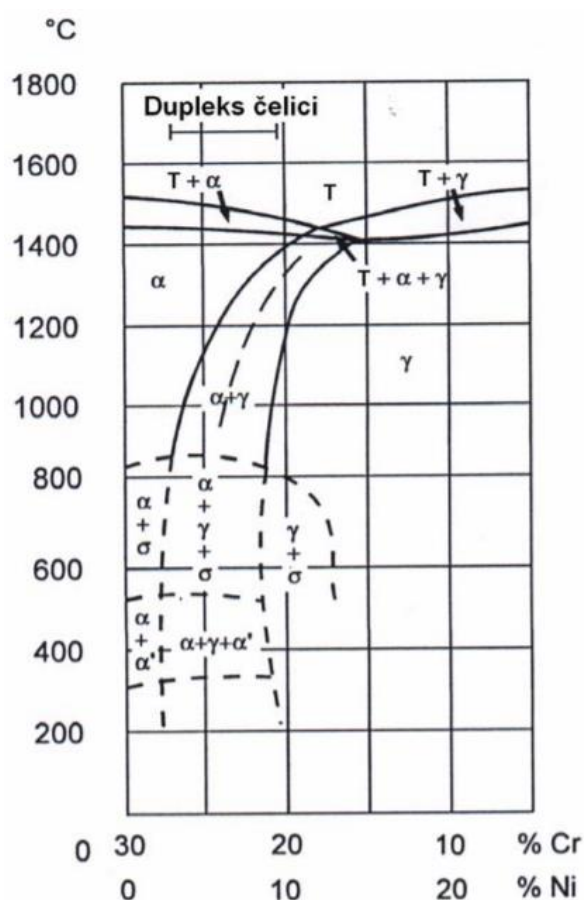
Molibden – alfageni element koji zajedno s kromom djeluje s ciljem poboljšanja korozijske postojanosti dupleks čelika na koroziju uzrokovanu kloridima. Sadržaj molibdena u

dupleks čelicima je do 4 % i povećavanjem udjela molibdena povećava se opasnost od formiranja intermetalnih faza.

Bakar, volfram i silicij – dodaju se dupleks čelicima zbog poboljšanja korozijske postojanosti prema rupičastu koroziju i koroziju u procjepu [10].

3.1.2. Režim toplinske obrade

Na postizanje uravnotežene mikrostrukture dupleks čelika, osim kemijskog sastava, utječe i režim toplinske obrade. Na slici 14. prikazan je pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe uz 70 % Fe [10].

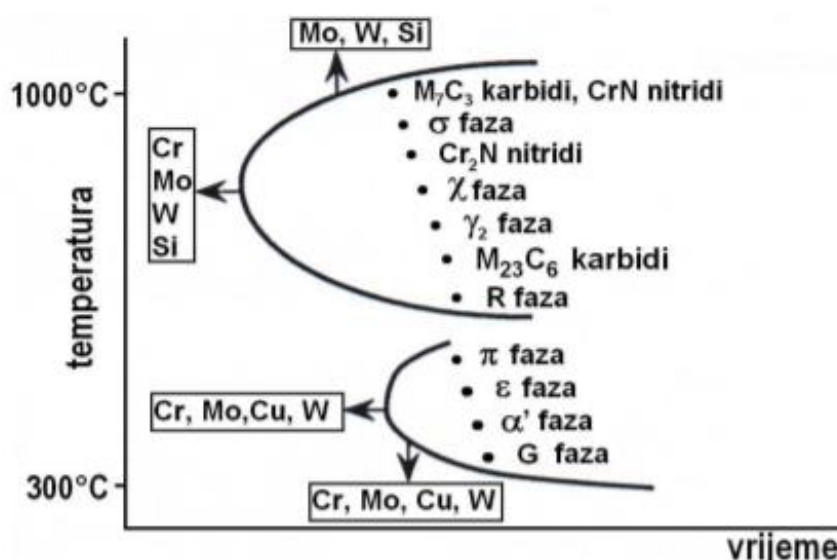


Slika 14. Pseudobinarni dijagram stanja Cr-Ni-Fe [10]

Svi dupleks čelici primarno kristaliziraju kao stopostotni ferit (slika 14.). Formiranje austenite faze ostvaruje se prvo hlađenjem po granicama zrna te nakon toga po kristalografskim ravninama unutar zrna ferita. Prilikom transformacije ferita u austenit dolazi do difundiranja legirnih elemenata ugljika, dušika, nikala i bakra u austenit, dok legirni elementi krom, molibden i volfram se otapaju u feritu. Udio austenita u mikrostrukturi ovisi o brzinama ohlađivanja ferita, vrsti i udjelu legirnih elemenata te o brzini difuzije svakog pojedinog

legirnog elementa. Pri ujednačenim udjelima austenita i ferita postiže se fazna ravnoteža dupleks čelika. Na temperaturi između 1050 °C i 1150 °C postiže se ujednačeni udio austenita i ferita u mikrostrukturi. Brzine ohlađivanja podešavaju se prema tom temperaturnom intervalu, dok se gašenjem u vodi želi osigurati postignuti fazni udio i na sobnoj temperaturi.

Prema slici 15. sve nepoželjne izlučevine i precipitate mogu se svrstati u dva temperaturna područja. U temperaturnom intervalu između 600 °C i 1300 °C nastaju karbidi ($M_{23}C_6$, M_7C_3), nitridi (CrN, Cr_2N), sigma-faza (σ), Chi-faza (χ), Lavesova faza (η), R-faza (Fe_2Mo) te sekundarni austenit (γ_2). U temperaturnom intervalu između 300 °C i 550 °C dolazi do izlučivanja π -faze, bakrom bogate ϵ -faze, G-faze te α' -faze. Strelice na slici 15. označavaju utjecaj pojedinih legirnih elemenata na razvijanje navedenih faza.

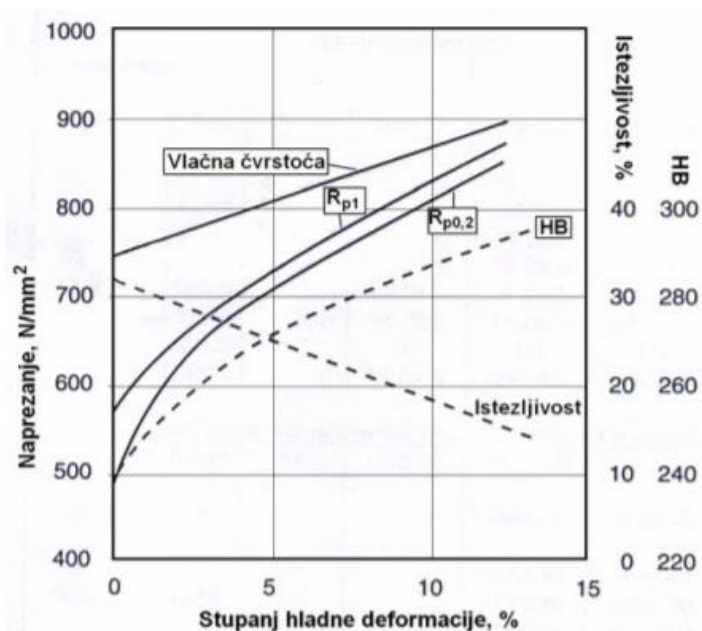


Slika 15. Shematski prikaz tipičnih precipitacija u dupleks čelicima [10]

U gornjem temperaturnom području najveću opasnost predstavljaju sigma-faza, chi-faza i kromovi nitridi. Karbidi tipa M_7C_3 i karbidi tipa $M_{23}C_6$ nisu realna opasnost zbog niskog udjela ugljika u sastavu današnjih dupleks čelika. U donjem temperaturnom području najveći značaj ima alfa-prim-faza koja izaziva pojavu krhkost 475 °C [10].

3.2. Svojstva dupleks čelika

Dupleks čelike karakterizira dobra istezljivost i žilavost, unatoč visokoj čvrstoći. Odlikuje ih postupan prijelaz iz žilavog u krhko područje. Mehanička svojstva dupleks čelika pokazuju osjetljivost na stupanj ugnječanja pri hladnoj deformaciji. Na slici 16. prikazana je ovisnost mehaničkih svojstava o iznosu hladne deformacije [10].



Slika 16. Promjena mehaničkih svojstava dupleks čelika 2205 [10]

Za mehanička svojstva dupleks čelika vrijedi sljedeće [10]:

- imaju tvrdoću između 250 i 350 HV
- mikrotvrdoća: austenita (300 HV_{0,02}) i ferita (300-500 HV_{0,02})
- vlačna čvrstoća, R_m , između 700 i 1100 MPa
- konvencionalna granica razvlačenja, $R_{p0,2}$, između 500 i 800 MPa
- udarni rad loma, KV , do 170 J.

Dupleks čelici imaju izvrsnu korozivsku postojanost. Otpornost prema rupičastoj koroziji ima na temelju visokog udjela kroma, molibdena i dušika. Povišene temperaturne promjene u mikrostrukturi imaju negativan utjecaj na korozivsku postojanost prema rupičastoj koroziji. Također, narušavanjem ujednačenog omjera ferita i austenita dolazi do smanjenja korozivske postojanosti prema rupičastoj koroziji.

Dupleks čelici imaju vrlo dobru korozivsku postojanost prema napetosnoj koroziji. Na smanjenje korozivske postojanosti prema napetosnoj koroziji utječe smanjenost ferita u metalu zavaru ispod 25 %.

Dupleks čelici imaju potpunu korozivsku postojanost prema interkristalnoj koroziji u svim okruženjima. Razlog tome je vrlo nizak udio ugljika prilikom čega je onemogućeno stvaranje karbida po granicama između feritnog i austenitnog zrna. Ako slučajno i nastanu, sniženi udio kroma u njihovoj okolini je toliko nizak da ne može izazvati interkristalnu koroziju. Ostale

izlučevine, kao što je sigma faza, χ -faza, sekundarni austenit, α' -faza i bakrom bogate faze, negativno utječu na korozijsku postojanost prema interkristalnoj koroziji [10].

Fizikalna svojstva dupleks čelika poprimaju vrijednosti koje se nalaze između austenitnih i feritnih čelika . U tablici 5. prikazana su fizikalna svojstva dupleks čelika [10].

Tablica 5. Fizikalna svojstva dupleks čelika [10]

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

3.3. Zavarivanje dupleks čelika

Za postizanje zadovoljavajućih svojstava metal zavara mora sadržavati udio ferita između 25 i 60 %. Dupleks čelici s niskim udjelom dušika, kao što su to bili dupleks čelici prve generacije, imali su u metalu zavara prevelik udio ferita. Na temelju toga zavareni spoj imao je smanjenu korozijsku postojanost i žilavost. Rješavanjem tih problem pronašlo se u povećanju udjela nikla u dodatnom materijalu. Prisustvo ferita u metalu zavara je neizbježno, pa se za smanjenje ferita i poboljšavanje korozijskih i mehaničkih svojstava uvodi dušik kao nužni legirni element [10].

Za zavarivanje dupleks čelika primjenjivi su različiti postupci zavarivanja [10]:

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

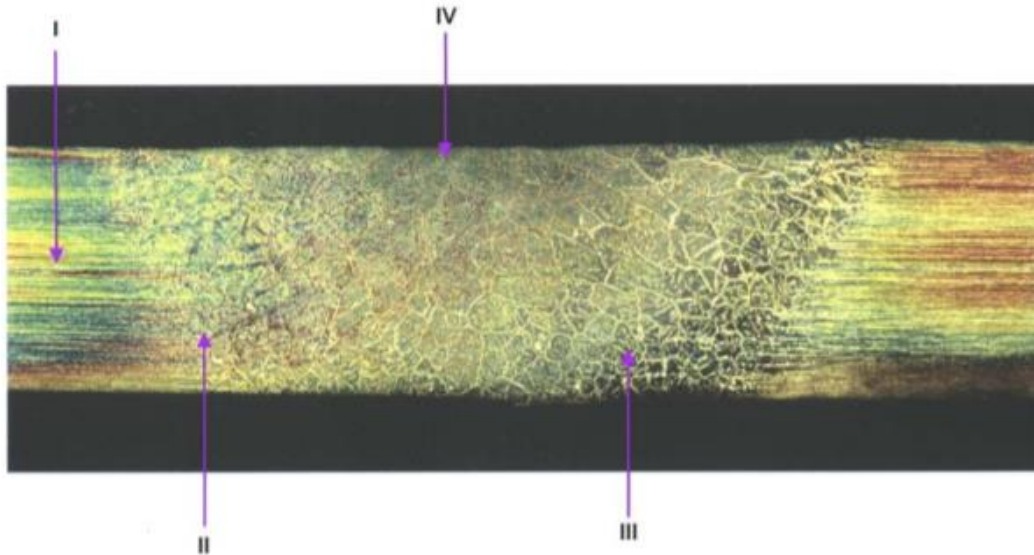
Kvaliteta zavarenog spoja dupleks čelika ovisi o odabiru dodatnog materijala. Za postizanje odgovarajućeg udjela austenita u metalu zavara tijekom hlađenja potrebno je pravilno odabrati dodatni materijal. Razlikujemo dva tipa dodatnog materijala:

- dodatni materijal oznake 22 % Cr 9 % Ni 3 % Mo 0,15 % N - koristi se za zavarivanje grupe dupleks čelika s 23 % Cr bez molibdena i grupe s 22 % Cr
- dodatni materijal oznake 25 % Cr 9 % Ni 4 % Mo 0,25 % N - koristi se za zavarivanje grupe dupleks čelika s 22 % Cr i ostalih grupa dupleks čelika s većim sadržajem legiranih elemenata.

Predgrijavanje dupleks čelika u većini slučajeva nije potrebno. Primjenjuje se jedino kod dupleks čelika koji imaju nizak udio nikla te kod zavarivanja tankih dijelova. Primjena predgrijavanja kod zavarivanja tankih dijelova je potrebna zbog malog unosa toplina jer može doći do brzog hlađenja i povećanog udjela ferita u ZUT-u. Također, kod visokolegiranog dupleks čelika nije poželjno predgrijavanje jer smanjuje mehanička svojstva i otpornost na koroziju.

Toplinska obrada primjenjuje se jedino kod plinskog zavarivanja te kod zavarivanja u kojem dodatni materijal ima nizak udio nikla. Zavarivanje s dodatnim materijalom koji ima odgovarajuću količinu nikla (~9 %), postiže se ujednačena količina ferita i austenita u metalu zavara i ZUT-u bez pojava nepoželjnih uključaka. Toplinska obrada dupleks čelika sastoji se od zagrijavanja na temperaturi iznad 1050 °C, držanja na toj temperaturi određen period te naglog hlađenja. Zagrijavanjem i brzim hlađenjem ostvaruje se ujednačeni udio austenita i ferita u mikrostrukturi zavarenog spoja i samim time onemogućuje stvaranje štetnih faza.

Zavareni spoj predstavlja mjesto velikih promjena u mikrostrukтури. Zavarivanje bitno mijenja strukturu osnovnog materijala koja se sastoji od ujednačenih udjela austenita i ferita. Na slici 17. prikazana je makrostruktura zavarenog spoja dupleks čelika 2205 [10].



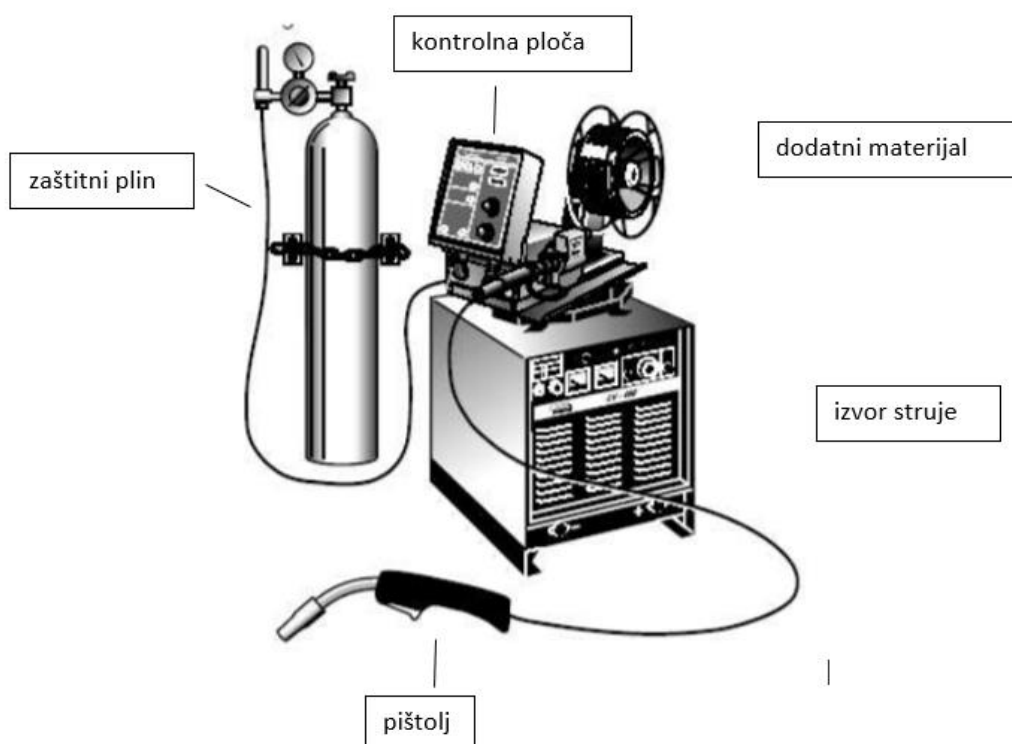
Slika 17. Makrostruktura zavarenog spoja dupleks čelika 2205 s povećanjem 18:1 [10]

Na slici 17. može se primijetiti makrostrukture za četiri različita područja [10]:

- I. osnovnog materijala
- II. niskotemperaturnog područja ZUT-a
- III. visokotemperaturnog područja ZUT-a
- IV. lice zavara.

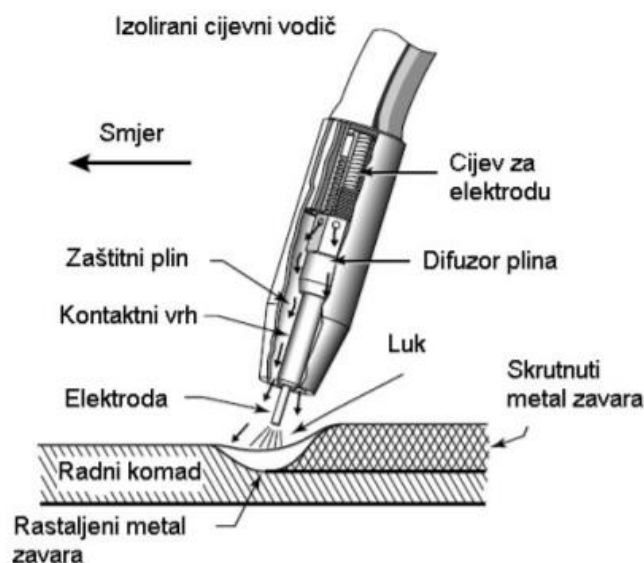
4. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE TALJIVOM ELEKTRODOM U ZAŠTITNOJ ATMOSFERI AKTIVNOG PLINA (MAG ZAVARIVANJE)

Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog zaštitnog plina je postupak kod kojeg u se električni luk uspostavlja i održava između konstantno dobavljanja žice kao dodatnog materijala i radnog komada. Prema normi HRN EN ISO 4063:2012 *Zavarivanje i srodni postupci – Nomenklatura postupka i referentni brojevi* označava se brojem 135. Na slici 18. prikazana je oprema za MAG zavarivanje [12].



Slika 18. Oprema za MAG postupak zavarivanja [12]

MAG (eng. *Metal Active Gas*) je postupak zavarivanja koji se ubraja u GMAW (eng. *Gas Metal Arc Welding*) postupke. Oprema za MAG postupak zavarivanja sadrži izvor struje, pištolj za zavarivanje, uređaj za dodavanje dodatnog materijala, boce i regulator protoka zaštitnog plina, polikabela i potrebnih električnih vodiča. Aktivni zaštitni plin koji se koristi je CO₂ ili plinska mješavina sa značajnim udjelom aktivnog plina. Glavna zadaća aktivnog plina je zaštita električnog luka i rastaljenog metala od negativnog utjecaja okoline i ionizacija vodljivog prostora za održavanje električnog luka. Na slici 19. prikazan je presjek pištolja u radu kod MAG postupka zavarivanja. [13].



Slika 19. Presjek pištolja kod MAG zavarivanja [13]

Parametri zavarivanja kod MAG postupka zavarivanja [12]:

- jakost struje
- napon električnog luka
- promjer žice
- brzina zavarivanja
- duljina slobodnog kraja žice
- vrsta i količina zaštitnog plina
- induktivitet.

Jakost struje određuje se prema promjeru žice, položaju zavarivanja, vrsti i debljini materijala te načinu prijenosa metala u električnom luku. Utječe na količinu rastaljenog metala, dubinu protaljivanja i na oblik zavora. U tablici 6. prikazani su parametri MAG zavarivanja [12], [14].

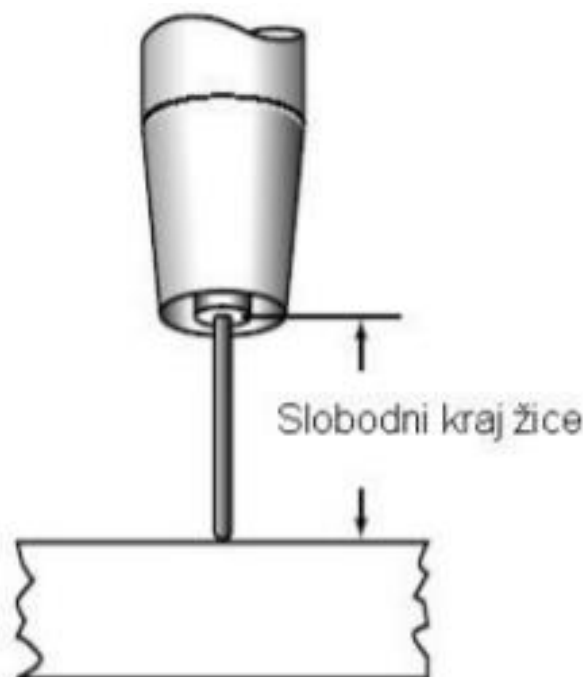
Tablica 6. Parametri MAG zavarivanja [12]

Promjer žice, mm	Jakost struje, A		Napon zavarivanja, V	
	min	max	min	max
0,8	50	180	16	25
1,0	80	230	17	27
1,2	100	360	18	35

Napon električnog luka utječe na stabilnost električnog luka, duljinu i širinu zavora. Iznos napona ovisi o načinu prijenosa metala [12].

Promjer žice utječe na veličinu električnog otpora. Kod iste jakosti struje manji promjer žice daje veći broj kratkih spojeva, veću gustoću struje i veću penetraciju [12].

Slobodni kraj žice smatra se dio koji je vidljiv zavarivaču. Promjenom duljine slobodnog kraja žice obrnuto se mijenja struja zavarivanja. To znači da sa povećanjem duljine slobodnog kraja žice smanjuje se struja zavarivanja i obrnuto. Na slici 20. prikazan je slobodni kraj žice [12].



Slika 20. Slobodni kraj žice [12]

Brzina zavarivanja je parametar kojeg je zbog produktivnosti postupka zavarivanja potrebno pažljivo i pravilno odrediti. Također, brzina zavarivanja određuje se i prema položaju zavarivanja. Izgled zavora direktno ovisi o brzini zavarivanja jer promjenom brzine zavarivanja direktno se utječe na penetraciju, širinu zavora i količinu topline u materijal [12], [14].

Protok zaštitnog plina regulira se na mjerачu protoka plina i određuje se prema jakosti struje zavarivanja, obliku spoja, mjestu i uvjetima zavarivanja. Najčešća količina plina koja se koristi je od 15 l/min do 20 l/min. Premala količina zaštitnog plina dovodi do poroznosti u zavaru zbog ne osiguravanja dovoljno dobre zaštite taline. Nadalje, prevelika količina stvara turbulentno strujanje i na taj način omogućuje prodor zraka u talinu, a to sve se dešava zbog stvaranja jake struje izlazećeg plina [12].

Induktivitet najveći utjecaj ima kod prijenosa metala kratkim spojevima jer dolazi do smanjenja štrcanja i stvaranja stabilnijeg procesa zavarivanja. [12]

Prednosti primjene MAG postupka zavarivanja [15]:

- mogućnost zavarivanja svih vrsta materijala
- širok raspon izbora parametara i načina prijenosa materijala
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- mogućnost zavarivanja na terenu i u radionici
- primjena različitih plinskih mješavina
- moćnost primjene praškom punjene žice
- širok raspon debljina osnovnog materijala
- visoka učinkovitost i proizvodnost
- pogodan za automatizaciju.

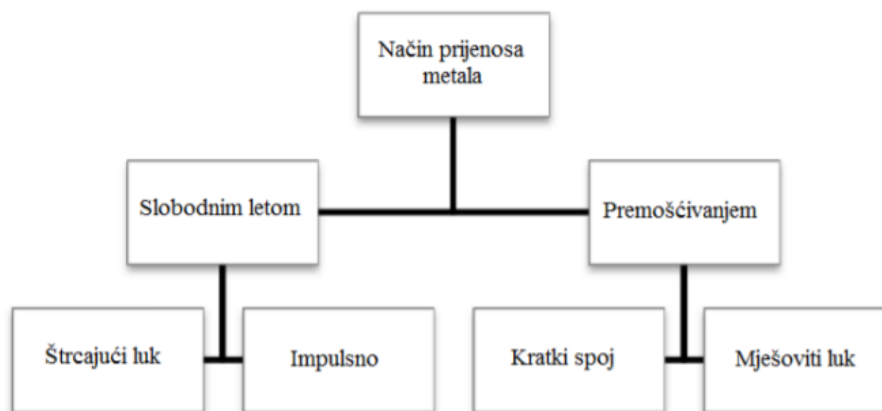
Nedostaci primjene MAG postupka zavarivanja [15]:

- Prilikom rada na terenu moguće su greške zbog vjetra koji može otpuhati zaštitni plin.
- Kod duljine polikabela veće od 3 m dolazi do problema kod dovođenja žice, naročito kod aluminijskih.
- Pojava grešaka kao što je naljepljivanje i poroznost uslijed korištenja krive tehnike rada i parametara zavarivanja.
- Kod zavarivanja kratkim spojevima dolazi do rasprskavanja gdje se pojavljuju gubici i potrebna je naknadna strojna obrada zavarenog uzorka.
- Složeniji uređaji (automatsko dovođenje žice, regulacija visine električnog luka, mikroprocesorsko upravljanje).

4.1. Konvencionalni načini prijenosa metala

Načini prijenosa metala ovise o parametrima zavarivanja kao što su jakost struje zavarivanja, napon električnog luka, promjeru i vrsti žice, te vrsti i protoku zaštitnog plina.

Postoje dva načina prijenosa metala od dodatnog materijala do radnog komada kod elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom [13], [14]. Na slici 21. prikazani su načini prijenosa metala u električnom luku [16].



Slika 21. Načini prijenosa metala u električnom luku [16]

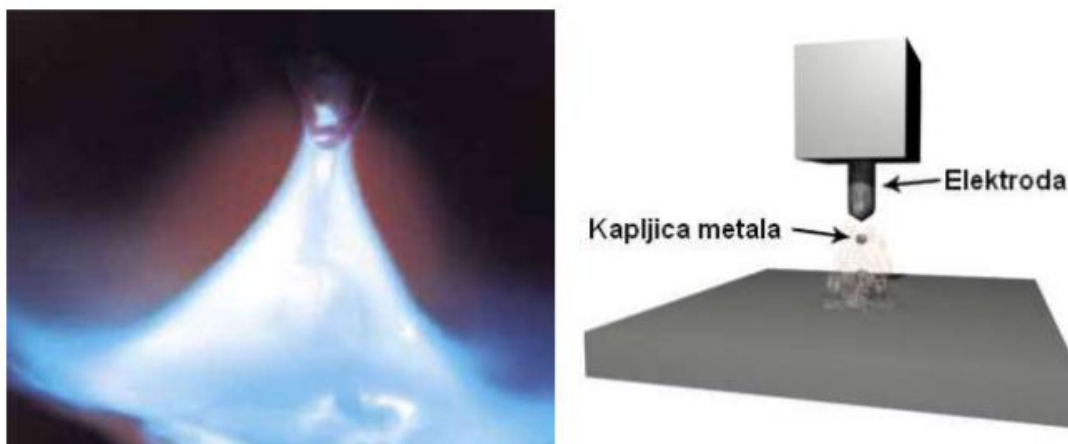
Prema slici 21. vidimo da postoje četiri načina prijenosa metala u električnom luku:

- prijenos štrcajućim lukom
- prijenos impulsnim strujama
- prijenos kratkim spojevima
- prijenos mješovitim lukom.

Postoji još i prijenos metala velikom gustoćom struje [13].

4.1.1. Prijenos metala štrcajućim lukom

Prijenos metala štrcajućim lukom karakterizira kontinuirano dovođenje žice. Žica se tali u područjima veće struje i napona zavarivanja. Na taj način stvara se mlaz malih kapljica taline. Kapljice taline putuju kroz električni luk gdje velikim brzinama i snagom prodiru u rastaljeni osnovni materijal. Na slici 22. prikazan je prijenos metala štrcajućim lukom, lijevo slika prikazuje realan prikaz dok desna slika prikazuje shematski prikaz [13].



Slika 22. Prijenos metala štrcajućim lukom [13]

Stvorena kapljica ima manji promjer u odnosu na žicu s kojom se zavaruje. Kako se kod prenosa metala štrcajućim lukom radi u području većih napona i struja zavarivanja primjenjuje se kod zavarivanja većih debljina. Plinske mješavine koje podržavaju ovaj način prenosa jesu s dominantnim udjelom argona [13].

4.1.2. Prijenos metala impulsnim strujama

Prijenos metala impulsnim strujama je varijanta koja koristi dvije jakosti struje. Dodatni uređaj u datom trenutku uključi maksimalnu jakost struje prilikom čega dolazi do kidanja kapljice, a zatim struja opadne na minimalnu vrijednost gdje se električni luk održava stabilnim. Na slici 23. lijevo je prikazan realan prikaz prenosa metala impulsnim strujama, dok slika 23. desno prikazuje shematski prikaz [13].

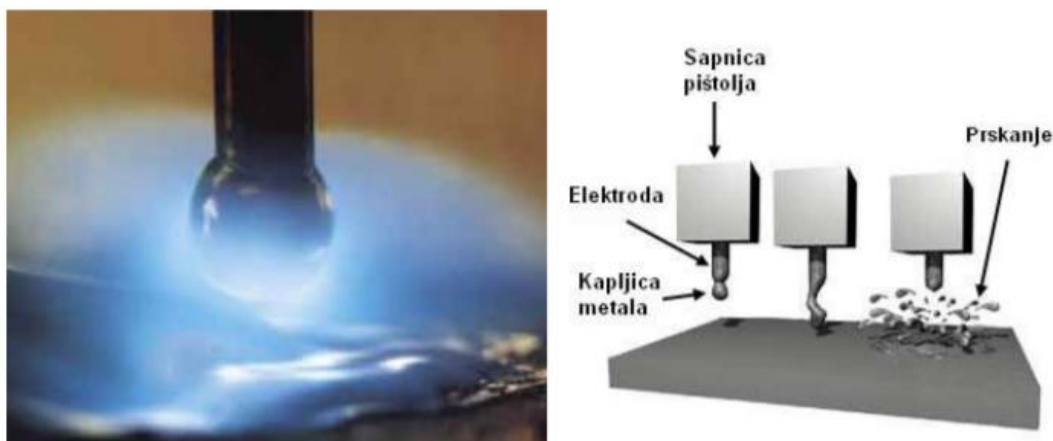


Slika 23. Prijenos metala impulsnim strujama [13]

Impulsna varijanta prenosa metala primjenjuje se za sve položaje zavarivanja, a plinske mješavine koje se koriste su većinom argonske.

4.1.3. Prijenos metala mješovitim lukom

Prijenos metala mješovitim lukom karakterizira odvajanje kapljice bez kratkog spoja. Stvorena kapljica, uslijed djelovanja sila u električnom luku, se odvaja i pada na talinu. Mješoviti luk se pojavljuje u području vrijednosti struje i napona između prijenosa kratkim spojevima i štrcajućim lukom. Na slici 24. lijevo prikazan je realan prikaz prijenosa metala mješovitim lukom, dok slika 24. desno prikazuje shematski prikaz [13].

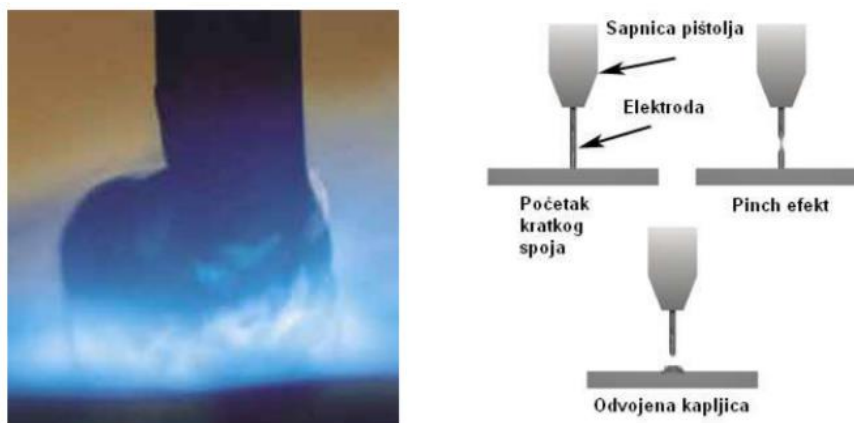


Slika 24. Prijenos metala mješovitim lukom [13]

Prijenos metala mješovitim lukom je postupak zavarivanja koji se teško kontrolira. Promjer oslobođene kapljice metala je veći u odnosu na promjer žice kojom se zavaruje. Najčešća plinska mješavina koja se koristi je ona u kojoj je dominantan ugljikov dioksid [13].

4.1.4. Prijenos metala kratkim spojevima

Prijenos metala kratkim spojevima karakterizira kontinuirana dobava žice. Žica se tali pomoću električnih spojeva koji se izmjenjuju u ciklusima. Jedna od glavnih karakteristika je mali unos topline, dok se prijenos metala odvija prilikom uspostavljanja kontakta osnovnog i dodatnog materijala. Odvajanje kapljice metala dijeli se u dvije faze, faza kratkog spajanja i faza električnog luka. Odvajanje kapljice se odvaja u fazi kratkog spajanja pri čemu se vrh elektrode nalazi u kontaktu s talinom. Na taj način dolazi do porasta jakosti struje i porasta magnetske sile. Magnetska sila se javlja na vrhu elektrode uslijed djelovanja elektromagnetskog polja i steže kapljicu taline s vrha elektrode (slika 25). Slika 24. lijevo prikazuje realan prikaz prijenosa metala kratkim spojevima, dok slika 25. desno prikazuje shematski prikaz [13].

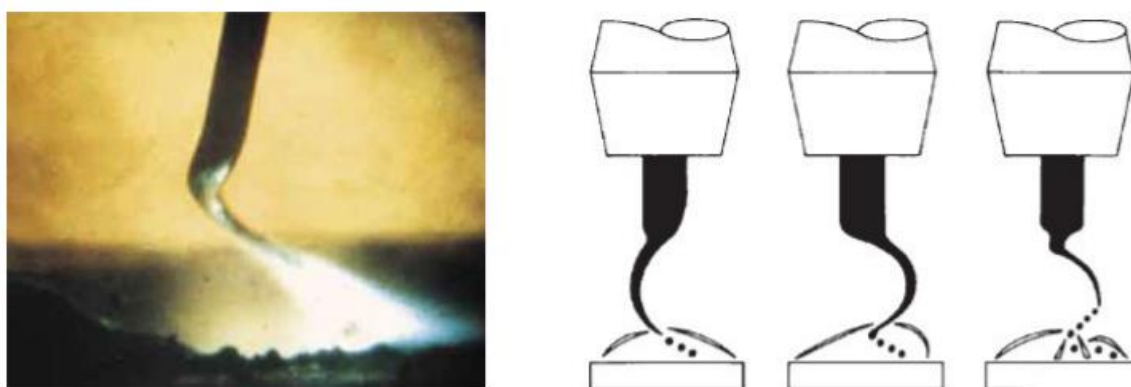


Slika 25. Prijenos metala kratkim spojevima [13]

Kapljica metala nastala kratkim spojevima ima veći promjer nego žica s kojom se zavarivalo. Prijenos metala kratkim spojevima pogodan je za zavarivanje tankih limova i korijena zavora kod debljih komada. Najčešće se koristi plinska mješavina u kojoj je dominantan ugljikov dioksid (CO_2) [13].

4.1.5. Prijenos metala velikom gustoćom struje

Prijenos metala velikom gustoćom struje postiže se posebnom kombinacijom jakosti struje, brzine dovođenja dodatnog materijala, napona luka, slobodnog kraja žice i sastava zaštitne plinske mješavine. Ovakvim prijenosom metala postiže se količine depozitnog metala u rasponu između 5 i 25 kg/h. Kod prijenosa metala velikom gustoćom struje razlikujemo rotacijski i nerotacijski prijenos. Rotacijski prijenos postiže se kombinacijom velike brzine dovođenja žice, dugog slobodnog kraja žice i zaštitne plinske mješavine koja sadrži argon, ugljikov dioksid i kisik. Na slici 25. lijevo prikazan je realan prikaz rotacijskog prijenosa metala velikom gustoćom struje, dok je na desnoj strani shematski prikaz [13].



Slika 26. Rotacijski prijenos metala velikom gustoćom struje [13]

Nerotacijski prijenos metala postiže se sprječavanjem vrtnje vrha elektrode pomoću plinskih mješavina koje omogućuju izraženiju površinsku napetost rastaljenog kraja žice, te je na taj način količina depozitnog materijala manja nego kod rotacijskog prijenosa i u rasponu je između 4,5 i 13,5 kg/h [13].

4.2. Modificirani načini prijenosa metala

Kod modificiranih načina prijenosa metala imamo mogućnost realizacije različitih opcija u pogledu ostvarivanja traženih parametara i energijskog nivoa, što se kod konvencionalnih postupaka i izvora struja za zavarivanje ne bi moglo ostvariti. Modificirani načini prijenosa metala postižu se [17]:

- upravljanjem i regulacijom struje i napona zavarivanja
- indirektnom kontrolom drugih sila koji sudjeluju u prijenosu metala
- kombinacijom impulsa i kratkih spojeva u istom radnom ciklusu
- promjenom balansa polariteta
- uvođenjem istosmjerne struje
- uvođenjem mehaničke upravljanja odvajanja kapljice
- primjenom digitalne tehnologije.

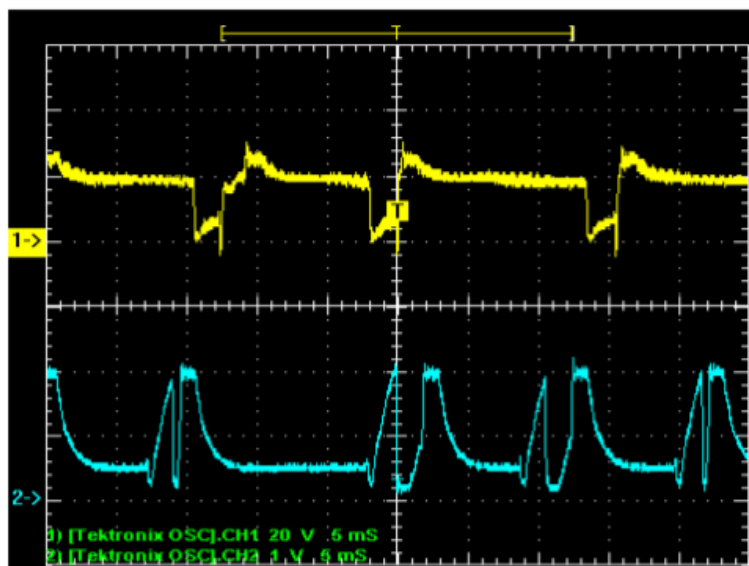
Danas, postoji dvadesetak varijanti modificiranog načina prijenosa metala. Neki od tih postupaka su:

- STT- Surface Tension Transfer®
- FastROOT®
- CMT-Cold Metal Transfer®
- Force Arc®
- RMT –Rapid MIG/MAG Technology®
- Cold Arc®.

Većina njih radi u području niskih unosa topline u kojem kombiniraju kratki spoj i strujni puls, te postoje varijante koje koriste modificirani štrcajući luk.

4.2.1. Surface Tension Transfer

STT (eng. *Surface Tension Transfer*) je modificirani MAG postupak zavarivanja koji je razvijen u tvrtki Lincoln Electric i koji koristi mehanizam površinske napetosti za finu regulaciju odvojene kapljice. Kada se ostvare uvjeti za prijenos rastaljenog metala uz djelovanje površinske napetosti, rast struje se zaustavlja gdje dolazi do sprječavanja rasprskavanja kapljice rastaljenog metala. Ponovno naglo povećanje struje počinje nakon što je kapljica odvojena gdje dolazi do zagrijavanja vrha elektrode i na taj način se priprema za novo odvajanje kapljice. Na slici 27. prikazana je dinamička karakteristika STT postupka gdje broj 1 označava napon, a broj 2 struju STT postupka. Na slici 28. prikazan je slijed odvajanja kapljice pri STT zavarivanju [17], [18].



Slika 27. Dinamička karakteristika STT postupka [17]



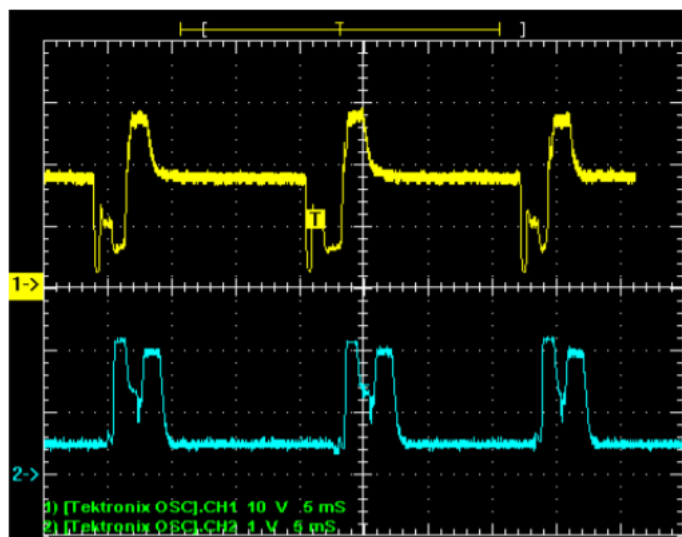
Slika 28. Slijed odvajanja kapljice kod STT zavarivanja [17]

Najčešće se koristi za zavarivanje korijena zavara u otvorenom žlijebu jer fino reguliranje odvojene kapljice olakšava rad. Pogodan je za zavarivanje čelika, visokočvrstih čelika i naročito nehrđajućih čelika jer zbog niska unosa difundiranog ugljika umanjuje rizik od nastanka

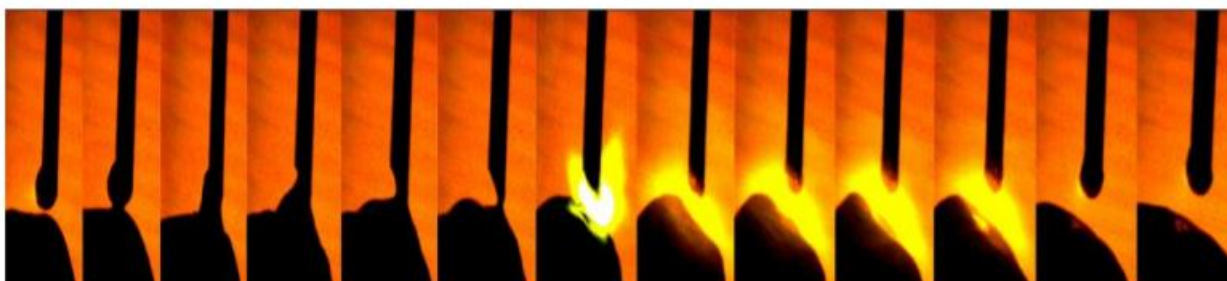
hladnih pukotina. Također, zbog niskog unosa topline pogodan je zavarivanje tankih materijala nelegiranog čelika, visokolegiranog čelika, legura na bazi nikla itd [17], [18].

4.2.2. FastROOT

FastROOT je modificirani postupak prijenosa metala koji je razvijen u tvrtki Kemppi. Postupak se zasniva na prijenosu metala kratkim spojevima uz digitalno upravljanje osnovnim parametrima zavarivanja (struja i napon). Kod FastROOT postupka razlikujemo dva oblika struje, u prvom dijelu procesa dolazi do prijenosa metala kratkim spojevima, dok u drugom dijelu dolazi do naglog povećanja unosa topline koja utječe na oblikovanje zavarenog spoja i zagrijavanje vrha žice. Na slici 29. prikazana je dinamička karakteristika FastROOT postupka gdje broj 1 označava napon, a broj 2 struju FastROOT postupka. Na slici 30. prikazan je slijed odvajanja kapljice pri FastROOT zavarivanju [17], [18].

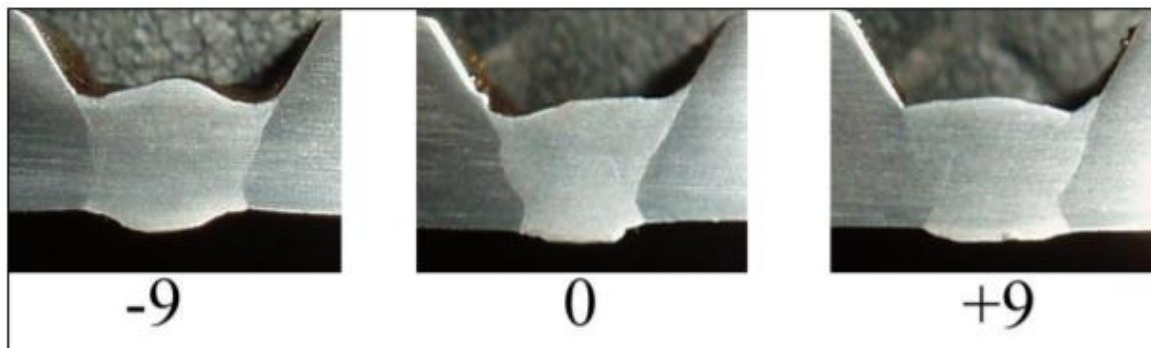


Slika 29. Dinamička karakteristika FastROOT postupka [17]



Slika 30. Slijed odvajanja kapljice pri FastROOT zavarivanju [17]

Najveću primjenu FastROOT postupak ima za zavarivanje korijenskog prolaza. Naime, regulacijom parametara sekundarnog impulsa može se precizno utjecati na oblik provara što se može vidjeti na slici 31 [17], [18].

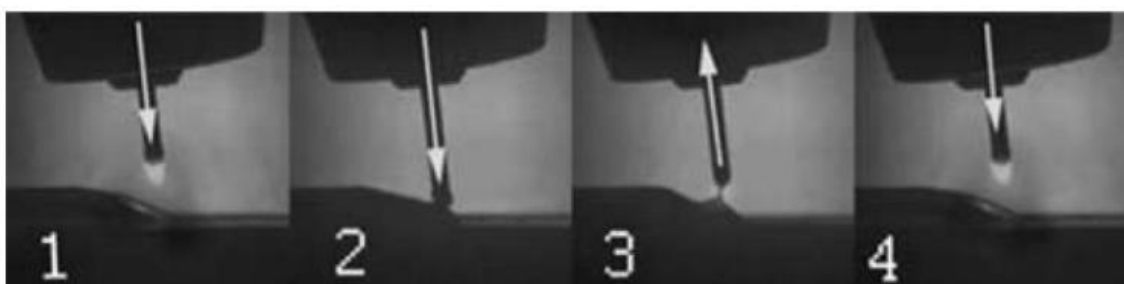


Slika 31. Utjecaj sekundarnog strujnog impulsa na oblik provara kod FastROOT postupka [17]

Primjenom digitalnog upravljanja na modifikaciju kratkih spojeva, gdje imamo niski unos energije, dobiva se postupak zavarivanja koji je pogodan za zavarivanje tankih limova konstrukcijskog i nehrđajućeg čelika, a posebno u slučajevima kad imamo veći razmak između komada [17], [18].

4.2.3. *Cold Metal Transfer*

CMT (eng. *Cold Metal Transfer*) je modificirani postupak prijenosa metala koji je razvijen u tvrtki Fronius. Kod CMT postupka primjenjuje se povratno gibanje žice gdje se žica giba prema radnom komadu sve dok ne dođe do pojave kratkog spoja i onda žica mijenja smjer i počinje se gibati unazad. Međutim, kada dođe do prekida kratkog spoja, žica opet mijenja smjer i giba se prema radnom komadu gdje započinje novi ciklus. Gibanje i smjer žice određeno je uspostavom i prekidom kratkog spoja, što znači ako se kratki spoj prije uspostavi povlačenje žice će također biti i ranije, a ako se uspostavi kasnije i povlačenje žice će ići nešto kasnije [17], [19]. Na slici 32. prikazan je shematski prikaz povratnog gibanja žice.



Slika 32. Shematski prikaz povratnog gibanja žice [20]

Kod CMT postupka prijenos metala ne ovisi o struji zavarivanja dok je kod konvencionalnog načina prijenosa metala kratkim spojevima struja jako bitna. Bitnu ulogu kod CMT ima i površinska napetost jer omogućava daljnji prijenos rastaljenog metala uslijed gibanja žice unazad. Samim time struje zavarivanja može biti mala za vrijeme kratkog spoja pa imamo mali unos topline u radni komad [19]. Na slici 33. prikazan je slijed odvajanja kapljice kod CMT postupka.

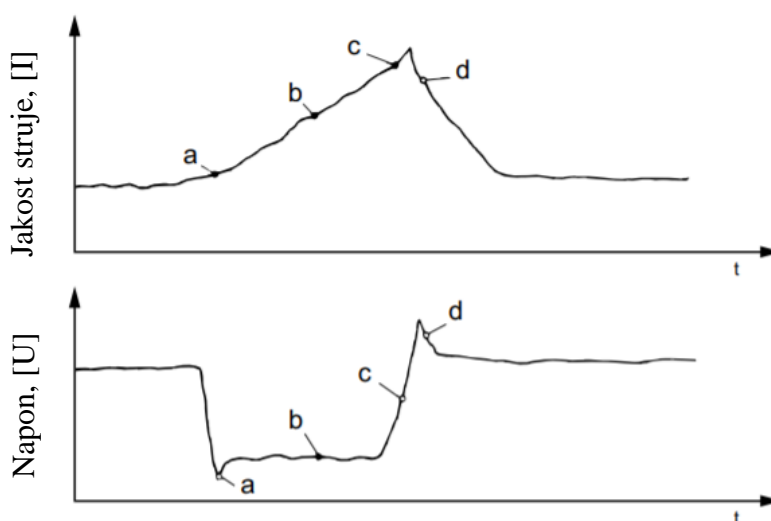


Slika 33. Slijed odvajanja kapljice kod CMT postupka [17]

CMT postupak primjenjuje se za zavarivanje tankih limova aluminijskog, nelegiranog i nehrđajućeg čelika, kao i za spajanje aluminijskog i pocinčanog lima [17].

4.2.4. ForceArc

ForceArc je modificirani postupak prijenosa metala koji se temelji na prijenosu metala štrcajućim lukom. Oslobođena rastaljena kapljica malih i srednje velikih dimenzija, kroz električni luk putuje velikim brzinama i zbog međusobnog dodira dolazi do pojave kratkog spoja. Na taj način ostvaren je direktan spoj s talinom i dolazi do pojave rasprskavanja koje se reducira pomoću digitalne kontrole parametara [21]. Na slici 34. prikazane su faze forceArce postupka zavarivanja.

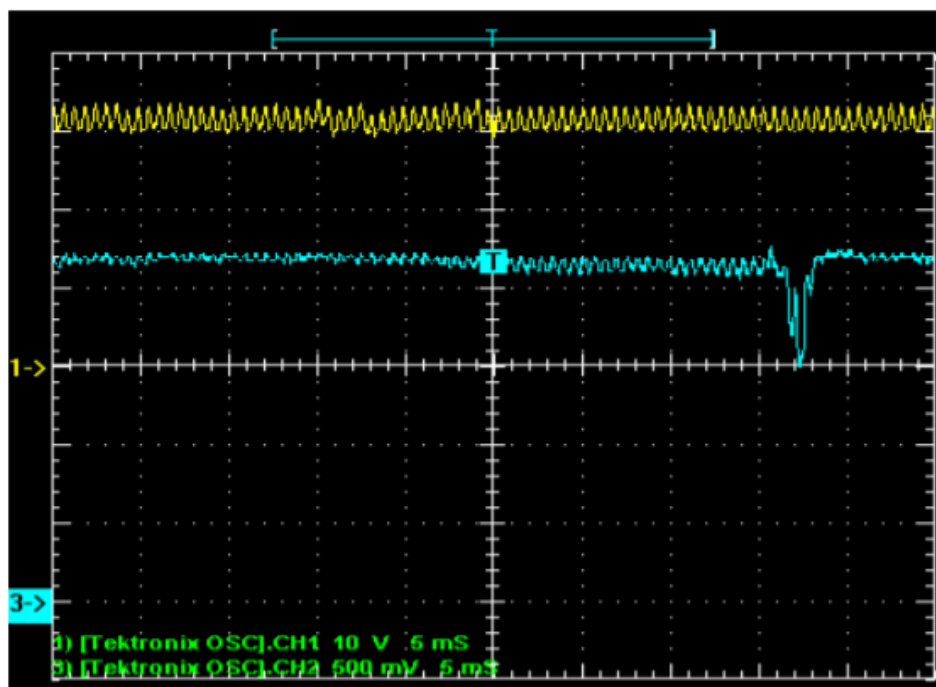


Slika 34. Faze forceArc načina prijenosa metala [22]

Točka a na slici 34. označava kratki spoj, dok točke b i c označavaju područje prijenosa materijala. U točki d dolazi do ponovne uspostave električnog luka i prema dijagramima je vidljivo da se struja zavarivanja smanjuje sve dok napon ne dostigne nominalnu vrijednost. ForceArc ima široku primjenu u proizvodnji čeličnih konstrukcija, energetici, brodogradnji, proizvodnji vozila i kontejnera, te opreme i offshore konstrukcija [21].

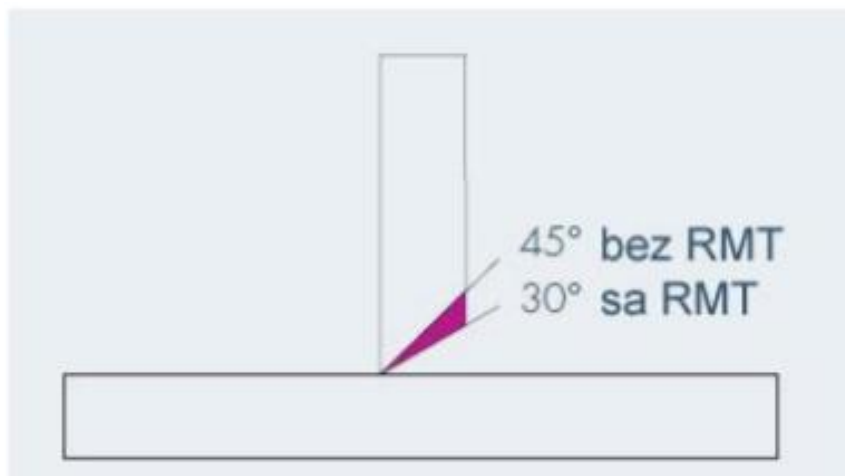
4.2.5. *Rapid MAG Technology*

RMT (eng. *Rapid MAG Technology*) je modificirani postupak prijenosa metala koji je razvijen u tvrtki ESS Schweisstechnik i koji se temelji na štrcajućem prijenosu metala. Kod konvencionalnog prijenosa metala štrcajućim lukom, prijenos metala odvija se u neprekinutom nizu kapljica malog promjera. Stabilnost štrcajućeg luka se ostvaruje kod prijelazne struje koja ovisi o vrsti i primjeru žice te zaštitnom plinu. RMT postupak temelji se na smanjenju električnog luka prilikom čega dolazi do pada napona i povećanja koncentracije unosa energije. Na slici 35. prikazana je dinamička karakteristika RMT postupka gdje je sa brojem 1 označen napon a sa brojem 3 struja RMT postupka. Prijenos metala odvija se u sitnim kapljicama prilikom čega frekvencija prijenosa iznosi 2 – 3 kHz. Na taj način se sužava jezgra luka, snižava napon i visina luka u odnosu na klasični štrcajući luk što rezultira većom koncentracijom energije i znatno intenzivnijom penetracijom. [17], [18].



Slika 35. Dinamička karakteristika RMT postupka [17]

Postupak je primjenjiv za zavarivanje debljih pozicija, dok se kutni spojevi do 8 mm mogu zavarivati bez posebne pripreme spoja. Na slici 36. prikazana je priprema kutnog spoja kod RMT postupka zavarivanja [18].

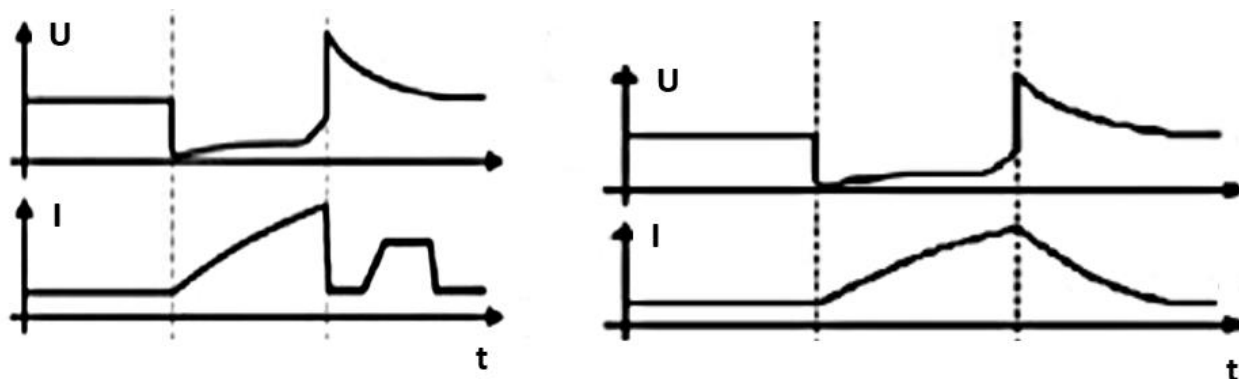


Slika 36. Priprema kutnog spoja kod RMT postupka [18]

Priprema kutnog spoja kod RMT postupka zavarivanja se smanjuje sa 45° na 30° gdje se na taj način smanjuje broj prolaza [18].

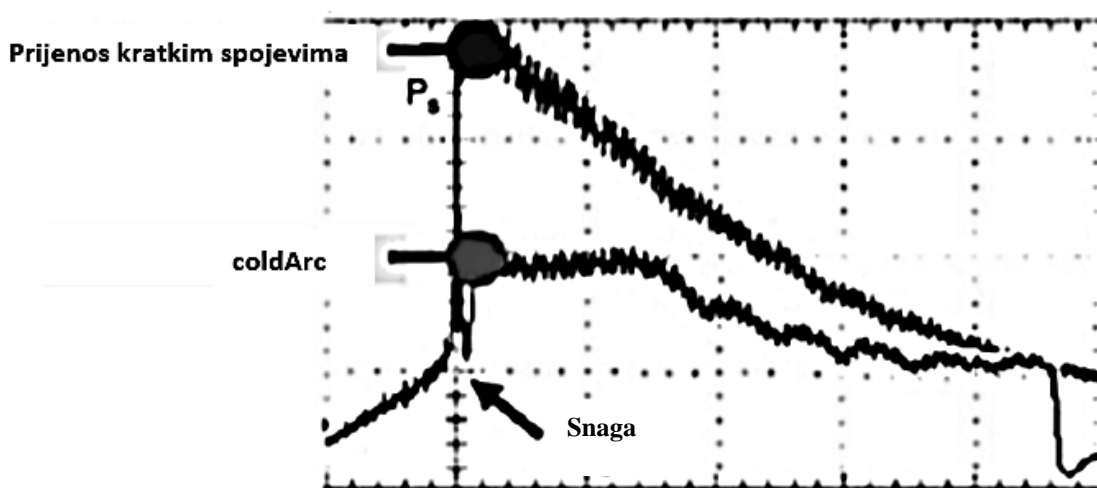
4.2.6. Cold Arc

ColdArc je modificirani postupak prijenosa metala koji se temelji na prijenosu metala kratkim spojem. Postupak je patentirala tvrtka EWM Hightec Welding GmbH 2014. godine i prednosti korištenja ovog postupka leži u kontroliranom prijenosu metala kratkim spojem. Razlika u odnosu na konvencionalni prijenos metala kratkim spojevima je pravovremeno smanjenje struje [23]. Na slici 37. prikazan je usporedba prijenos metala kratkim spojevima i coldArc sa pripadajućim promjenama struje i napona.



Slika 37. Usporedba coldArc i prijenosa metala kratkim spojevima [24]

Prilikom kontakta žice i radnog komada, napon drastično pada i dolazi do povećanja struje zavarivanja i raste sve do pojave kratkog spoja. Ključna razlika između prijenosa metala kratkim spojevima i coldArc je ta što kad struja dosegne maksimalnu vrijednost, odnosno vrijednost kratkog spoja, elektronika unutar izvora struje naglo smanjuje struju zavarivanja što se i vidi po slici 37. Nakon što se rastaljena kapljica odvoji ponovno se uspostavi električni luk, napon opet naglo raste ali elektronika drži nisku struju zavarivanja i smanjuje snagu kao što se vidi na slici 38. [23].



Slika 38. Električna snaga kod ponovne uspostave električnog luka [24]

Modifikacije konvencionalnog prijenosa metala kratkim spojevima omogućile su bolju kontrolu i podešavanje parametara, a samim time omogućeno je lakše i jednostavnije upravljanje postupkom zavarivanja.

5. EKSPERIMENTALNI RAD

U eksperimentalnom radu na temelju prethodno izrađenog zida potrebno je provesti mjerenja tvrdoće po Vickersu, statički vlačni pokus, analizu mikrostrukture i kemijskog sastava. Zid je izrađen u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje postupkom aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom, dok je za prijenos metala korišten modificiran postupak coldArc. Kao dodatni materijal koristila je se žica G22 9 3 NL prema EN ISO 14343-A promjera 1,2 mm. Cilj eksperimentalnog rada je pokazati utjecaj aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom na svojstva i mikrostrukturu dupleks čelika.

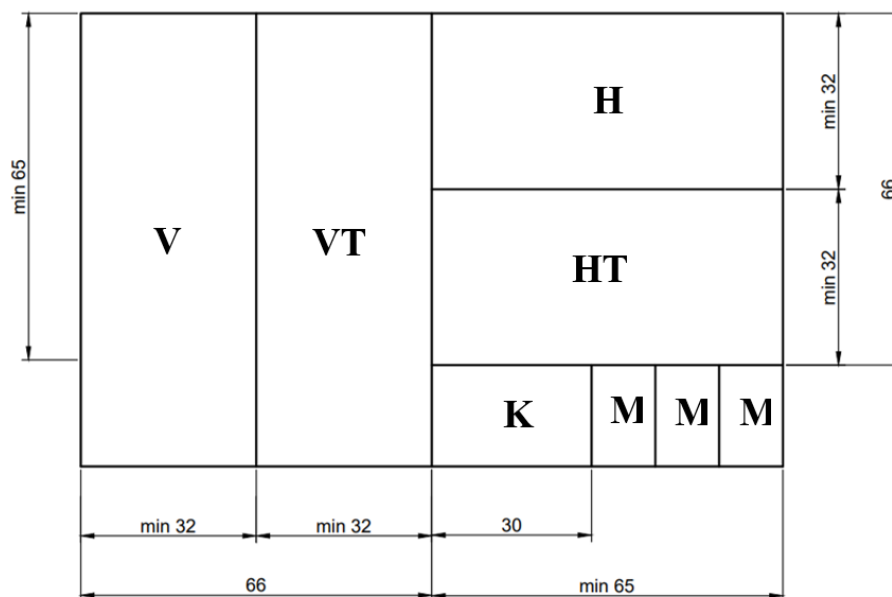
5.1. Priprema i izrada uzoraka

Na temelju izrađenog zida prikazanog na slici 39. potrebno je pripremiti i izraditi uzorke za ispitivanja.



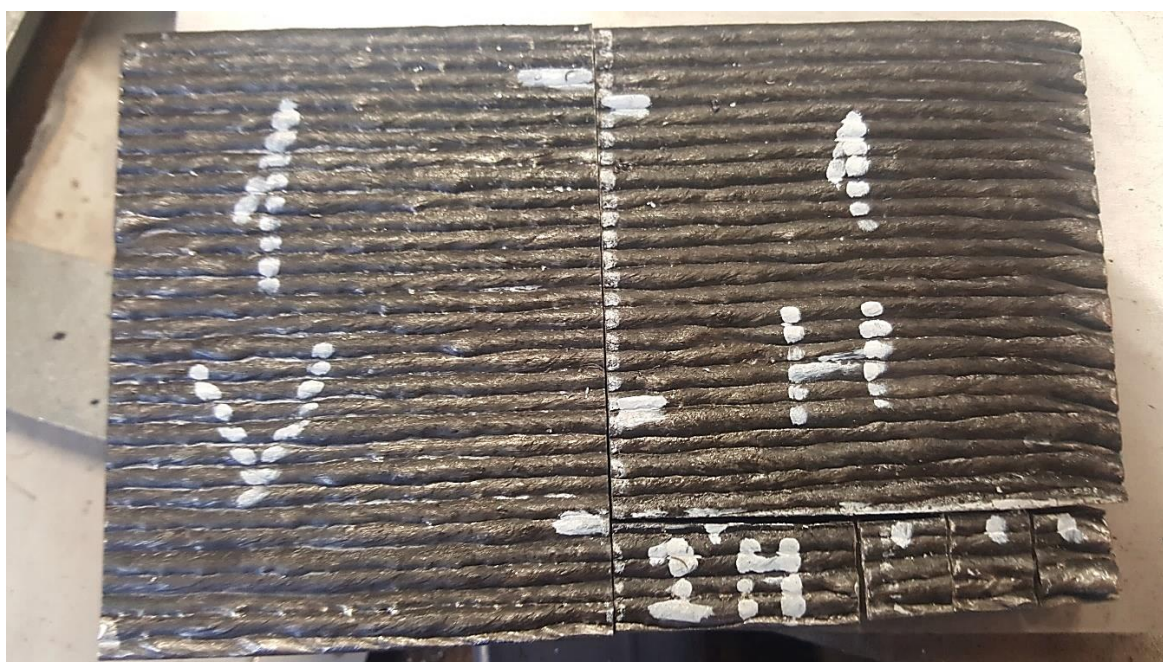
Slika 39. Zid izrađen postupkom coldArc [25]

Prvotno je potrebno napraviti plan rezanja koji je prikazan na slici 40. prema kojem će se poslije tračnom pilom iz zida izrezati uzorci. Za statički vlačni pokus potrebno je izrezati uzorke koji će biti horizontalno (H i HT) i vertikalno orijentirani (V i VT) s obzirom na smjer polaganja slojeva. Kao što se vidi na slici 40., za svako ispitivanje imamo dva uzorka od kojih će jedan za svako ispitivanje ići na toplinsku obradu (TO) kako bi se pokazao utjecaj konvencionalne toplinske obrade na promjenu svojstava i mikrostrukture. Uzorci koji idu na statički vlačni pokus strojno se obrađuju i prije nego odu na strojnu obradu, brusilicom se skidaju slojevi oksida.



Slika 40. Plan rezanja uzoraka

Na slici 41. prikazani su uzorci nakon rezanja tračnom pilom.



Slika 41. Uzorci nakon rezanja tračnom pilom

Ispitivanje kemijskog sastava (K) napraviti će se slojevito prema unutrašnjosti, to jest, skidanjem strojnom obradom s jedne strane po 1 mm. Nakon ispitivanja kemijskog sastava, uzorak će poslužiti za mjerenje tvrdoće i analizu mikrostrukture. Uzorci koji idu na mjerenje tvrdoće i analizu mikrostrukture zalijevaju se u polimernu smjesu i nakon toga idu na brušenje, poliranje i nagrivanje.

5.2. Kemijski sastav

Analiza kemijskog sastava provedena je u Laboratoriju za zaštitu materijala. Za utvrđivanje kemijskog sastava dupleks čelika, dobivenog pomoću WAAM-a, korištena je rendgenska fluorescentna spektrometrija (eng. *X-ray fluorescence analysis*). XRF je metoda koja svoja mjerenja bazira na pobuđivanju atoma ispitnog uzorka rendgenskim zračenjem, što ima za rezultat emisiju fluorescentnog zračenja iz materijala [26]. Nedostatak metode očituje se u nemogućnosti detekcije sadržaja lakših nemetala kao što je dušik, ugljik i bor. Na slici 42. prikazan je uređaj kojim se provodilo utvrđivanje kemijskog sastava. Uređaj je XRF Olympus, model DS 2000-C, proizvođača Innov-X System Inc.



Slika 42. XRF – Olympus

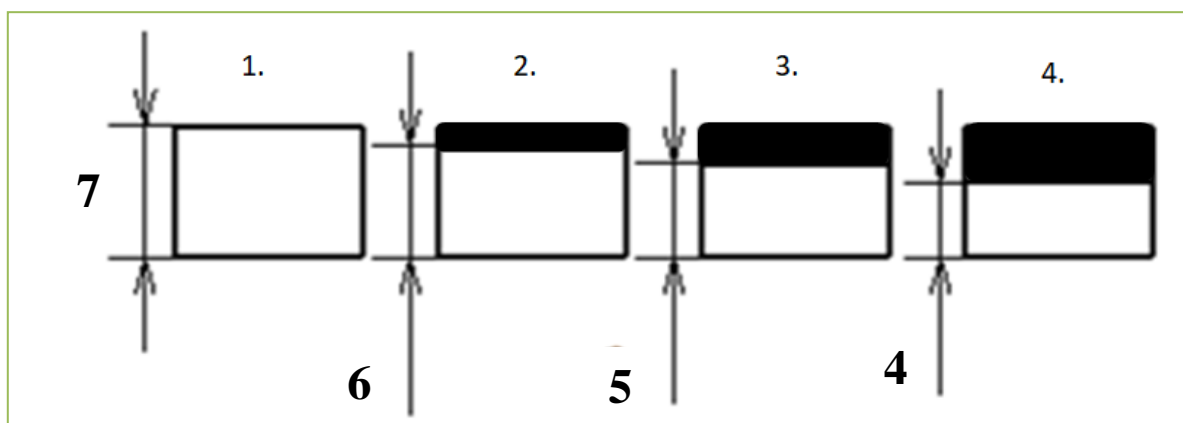
Od početnog uzorka zida (slika 43.) izrezan je uzorak (označeno crvenom bojom) koji je namijenjen za ispitivanje kemijskog sastava.



Slika 43. Početni uzorak zida

Na slici 43. crveno prikazan je dio zida koji je izrezan u svrhu mjerenja kemijskog sastava prema unutrašnjosti uzorka. Zid je debljine 7 mm i provedena su 4 ispitivanja prema slici 44. i 5. ispitivanje je provedeno nakon skidanja 3 mm materijala i nakon toplinske obrade (1050 °C, 60 min):

1. na površini uzorka
2. skidanjem 1 mm materijala glodanjem s površine uzorka
3. skidanjem 1 mm materijala glodanjem nakon drugog ispitivanja
4. skidanjem 1 mm materijala glodanjem nakon trećeg ispitivanja.



Slika 44. Ispitivanje kemijskog sastava po slojevima

U tablici 7. prikazani su rezultati ispitivanja kemijskog sastava za prethodna četiri slučaja.

Tablica 7. Kemijski sastav zida prema provedenim ispitivanjima

	Cr, %	Mn, %	Ni, %	Si, %	V, %	Mo, %
1. ispitivanje – 0 mm	25,39	3,70	7,79	1,97	0,16	-
2. ispitivanje – 1 mm	22,66	1,63	8,73	0,38	0,09	3,08
3. ispitivanje – 2 mm	23,08	1,46	8,59	0,30	0,14	3,14
4. ispitivanje – 3 mm	22,79	1,57	8,60	0,34	0,09	3,13
5. ispitivanje – 3 mm (TO)	22,79	1,59	8,60	0,30	-	3,17

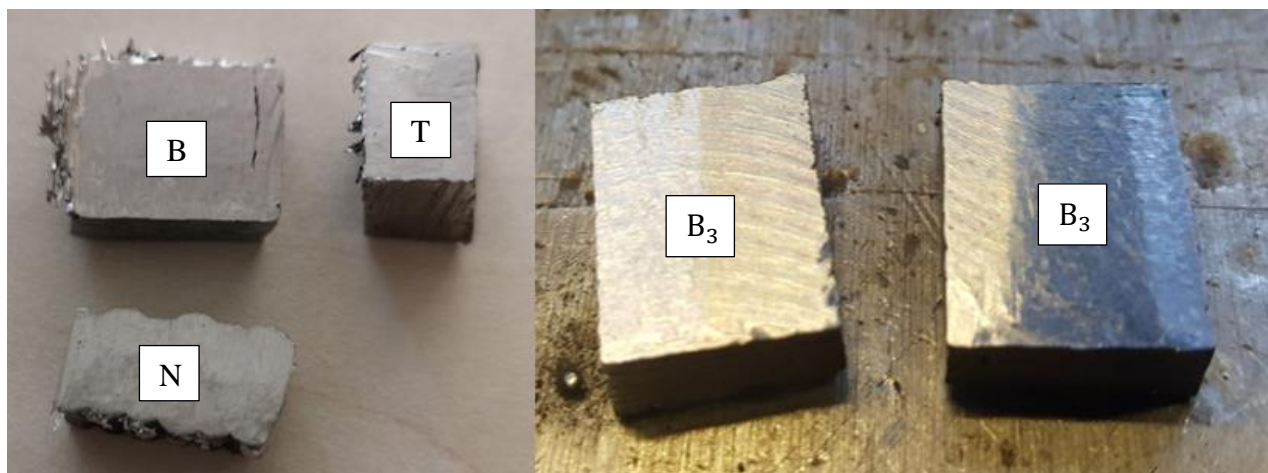
U tablici 8. prikazan je kemijski sastav žice koji se koristio za izradu zida.

Tablica 8. Kemijski sastav žice za zavarivanje

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

5.3. Mikrostruktura

Za promatranje mikrostrukture uzorci su izrezani iz zida tračnom pilom kao što je prikazano na slici 40. Nakon što su komadići izrezani (slika 45.), malo su pobrušeni radi uklanjanja srha te se stavljaju u uređaj Pneumat Press (slika 46.) kako bi se obložili polimernom masom.



Slika 45. Izgled uzoraka nakon rezanja

Prilikom stavljanja komadića u prešu potrebno je obratiti pozornost na orijentaciju kako bi se mogli promatrati iz različitih usmjerenja. Nakon toga, stavlja se polimerni prah i pritišće tlakom od 2,5 bar. Komadi se griju vanjskim grijačem na temperaturu 140 °C i drže se na ta toj temperaturi 15 min. Nakon toga se hlade 30 min.

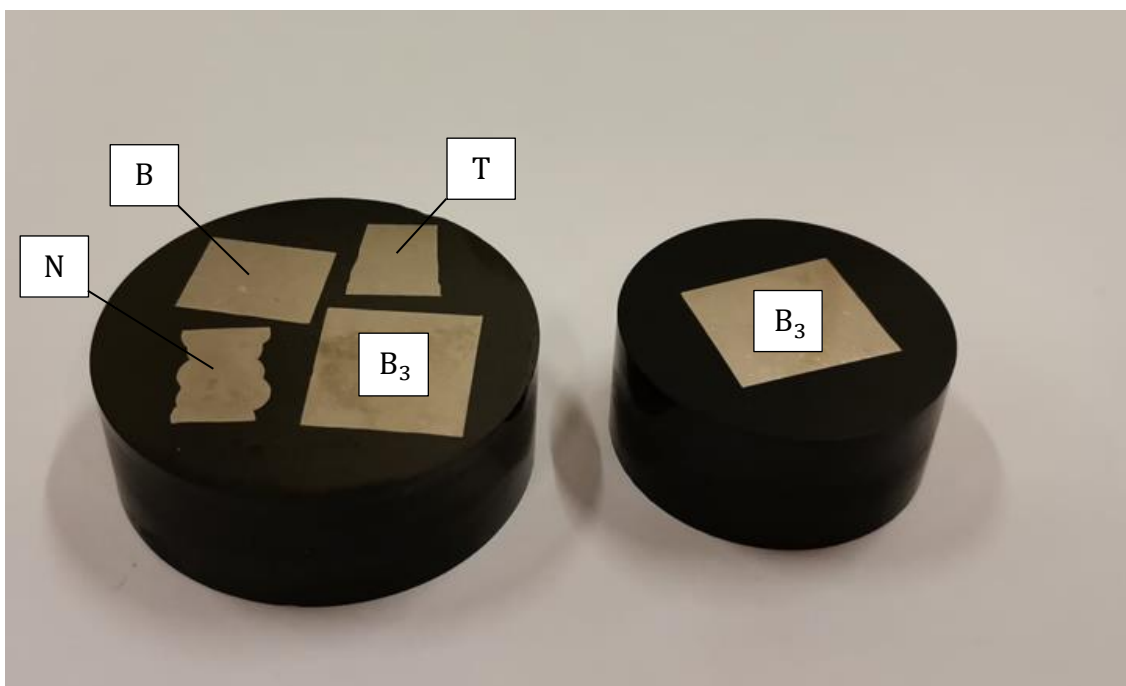
Na slici 45. lijevo prikazani su komadići koji predstavljaju različite orijentacije, koje su odabrane prema slici 48. (N – nacrt, B – bokocrt, T – tlocrt), zbog promatranja različitih usmjerenja zida, dok slika 45. desno prikazuje komadiće bokocrt (B₃) na kojem se prethodno ispitivao kemijski sastav. Treba napomenuti kako je komadiću B skinuto 1 mm materijala s površine kako bi dobili glatku površinu za promatranje mikrostrukture.



Slika 46. Uređaj Pneumat Press

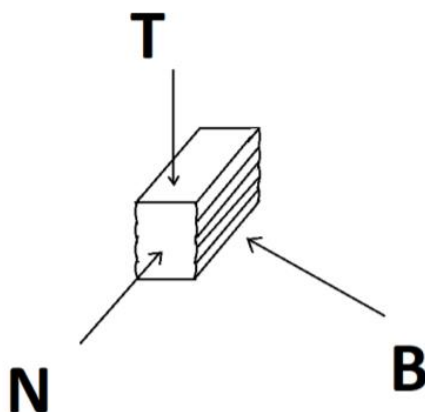
Na slici 45. desno vide se dva komadića od kojih će jedan biti obložen polimernom masom zajedno sa prethodna tri komadića (slika 47. lijevo) dok će drugi komadić biti podvrgnut

toplinskoj obradi (1050 °C, 60 min) i on će zasebno biti obložen polimernom masom (slika 47. desno).



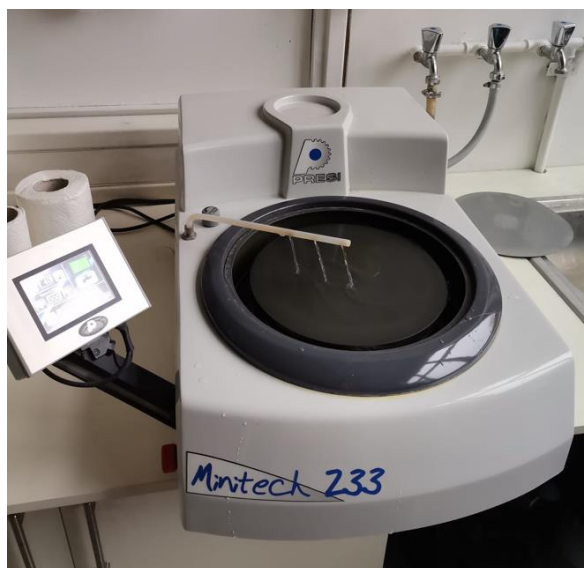
Slika 47. Izgled uzoraka nakon oblaganja polimernom masom (N-nacrt, B-bokocrt, T-tlocrt, B3-bokocrt nakon skidanja 3mm)

Na slici 47. prikazane se orijentacije uzetih komadića sa zida.



Slika 48. Odabrane orijentacije zida za promatranje mikrostrukture

Nakon što su uzorci izvađeni iz uređaja za oblaganje masom, daljnji korak je brušenje uzoraka na uređaju za brušenje (slika 49.) brusnim papirima. Korišteni brusni papiri: P320, P600, P1000, P2400 i P4000. Brzina brušenja je 300 min^{-1} uz ručnu silu pritiska dok je vrijeme brušenja odabrano prema potrebi. Kod svih koraka brušenja korišteno je vodeno hlađenje.



Slika 49. Uređaj za brušenje uzoraka

Nakon brušenja uzorci su polirani pomoću uređaja za poliranje prikazanog na slici 50. Poliranje je izvedeno u dva koraka, a vrijeme poliranja u oba koraka je 2 minute. Sila pritiska iznosi 30 N i broj okretaja iznosi 150 min^{-1} za oba koraka. Za hlađenje i podmazivanje koristio je se lubrikant. U prvom koraku koristila je se dijamantna pasta debljine $3 \mu\text{m}$, dok se za drugi korak koristila tekućina koja ima ulogu dijamantne paste i lubrikanta. Veličina zrna u tekućini iznosi $0,03 \mu\text{m}$.



Slika 50. Uređaj za poliranje uzoraka

Zadnja faza pripreme uzoraka za promatranje mikrostrukture je nagrivanje. Nagrivanje je izvedeno pomoću otopine koja sadrži 15 ml HCl i 85 ml vode. Vrijeme nagrivanja iznosi 20

min. Nakon nagrizanja prelazi se na promatranje mikrostrukture pomoću svjetlosnog mikroskopa. Na slici 51. prikazan je svjetlosni mikroskop.



Slika 51. Svjetlosni mikroskop Olympus GX51

Svaka orijentacija promatrana je s povećanjem 200 puta, dok su uzorci B₃ promatrani sa tri povećanja. Prvo na povećanju od 50 puta, druga na povećanju od 200 puta i treće na povećanju od 1000 puta.

Na slikama 52., 53. i 54. prikazana je mikrostruktura uzorka u različitim orijentacijama.



Slika 52. Mikrostruktura uzorka u pogledu N

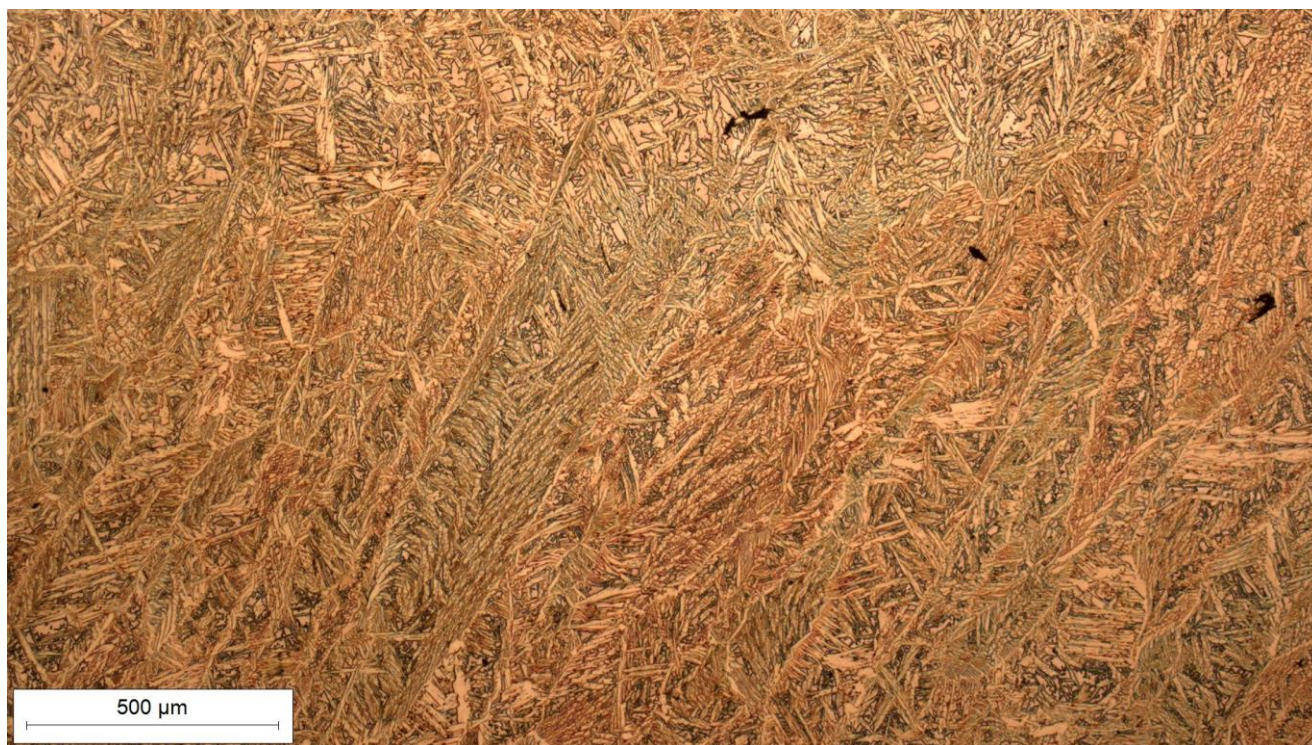


Slika 53. Mikrostruktura uzorka u pogledu T



Slika 54. Mikrostruktura u pogledu B

Na slici 55. prikazana je mikrostruktura u pogledu B₃ bez toplinske obrade s povećanjem od 50 puta.



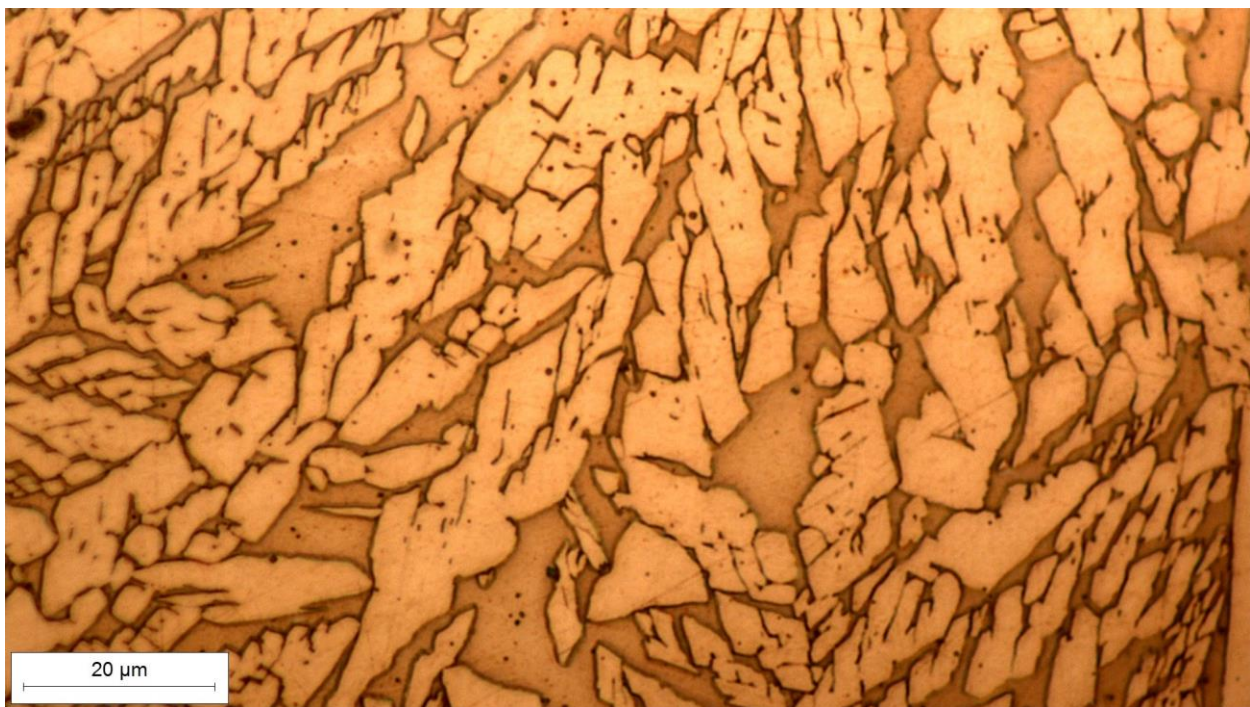
Slika 55. Mikrostruktura u pogledu B3 s povećanjem od 50 puta

Na slici 56. prikazana je mikrostruktura u pogledu B₃ bez toplinske obrade s povećanjem od 200 puta.



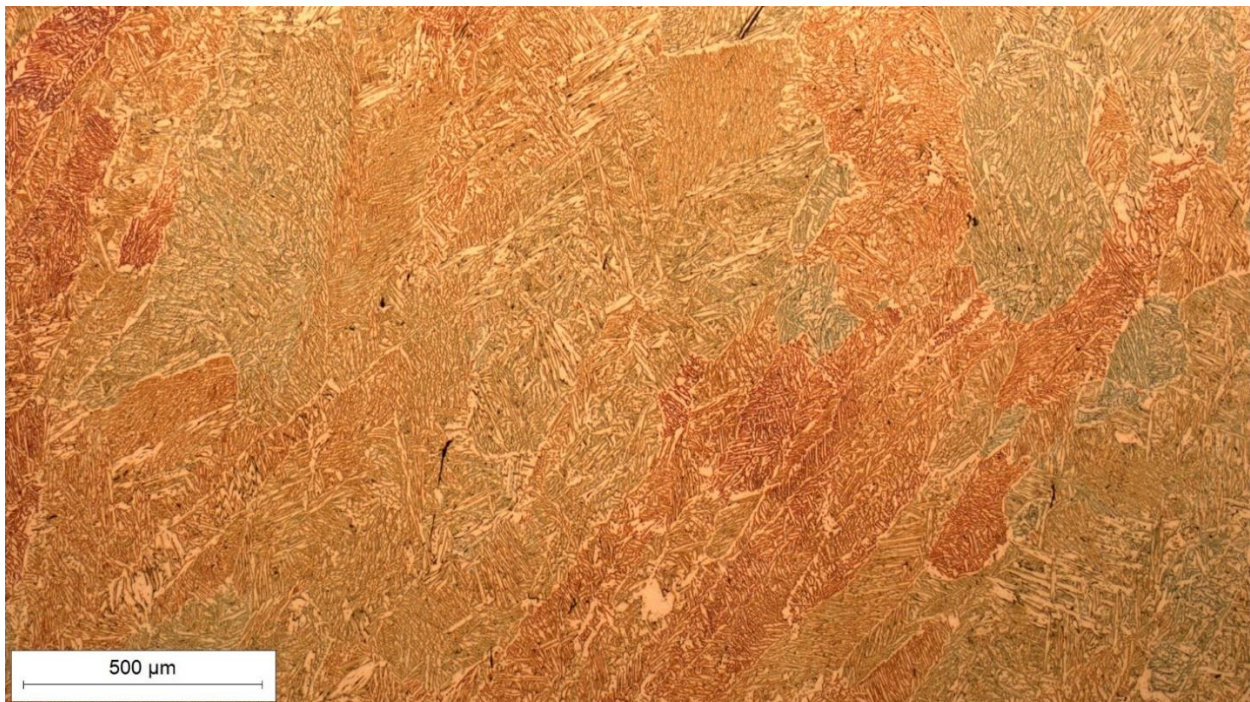
Slika 56. Mikrostruktura u pogledu B3 s povećanjem od 200 puta

Na slici 57. prikazana je mikrostruktura u pogledu B₃ bez toplinske obrade s povećanjem od 1000 puta.



Slika 57. Mikrostruktura u pogledu B₃ s povećanjem od 1000 puta

Na slici 58. prikazana je mikrostruktura u pogledu B₃ s toplinskom obradom (TO) s povećanjem od 50 puta.



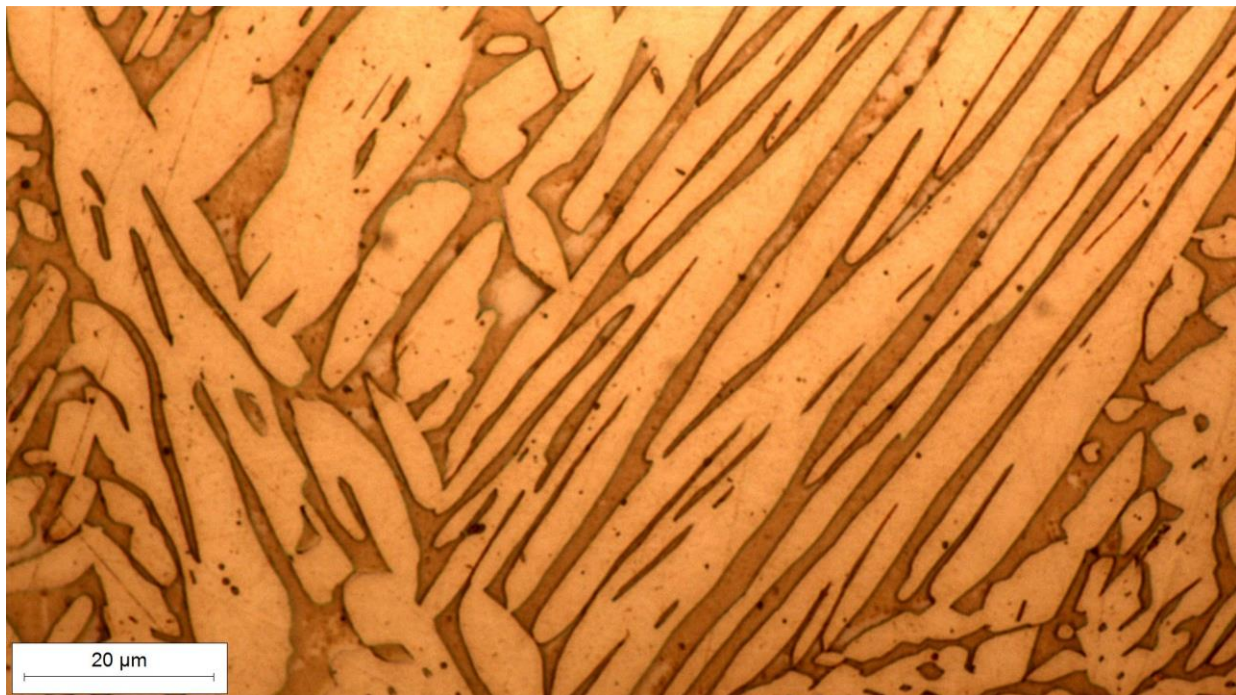
Slika 58. Mikrostruktura u pogledu B₃ (TO) s povećanjem od 50 puta

Na slici 59. prikazana je mikrostruktura u pogledu B₃ s toplinskom obradom (TO) s povećanjem od 200 puta.



Slika 59. Mikrostruktura u pogledu B₃ (TO) s povećanjem od 200 puta

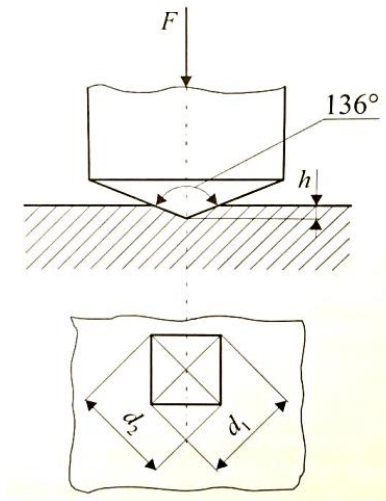
Na slici 60. prikazana je mikrostruktura u pogledu B₃ s toplinskom obradom (TO) s povećanjem od 1000 puta.



Slika 60. Mikrostruktura u pogledu B₃ (TO) s povećanjem od 1000 puta

5.4. Mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom

Vickersova metoda za mjerenje tvrdoće je uklonila glavne nedostatke prethodnih metoda. Glavni nedostatak koji je otklonjen je upotreba penetratora u obliku dijamantne piramide s kutem između stranica od 136° kao što je prikazano na slici 61. Na taj način moguće je mjeriti i najtvrdije materijale, dok je tvrdoća neovisna o primijenjenoj sili [27].



Slika 61. Skica i otisak dijamantnog penetratora [27]

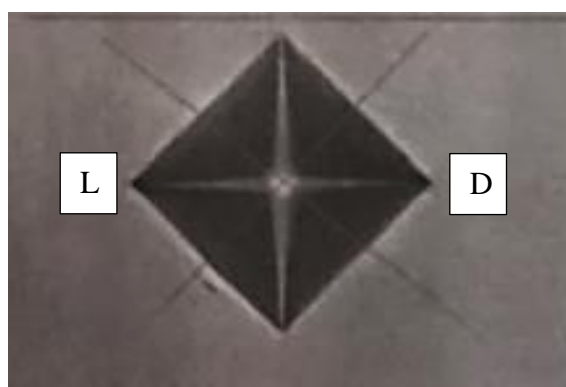
Mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom HV0,1 i HV0,2 provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju, dok je mjerenje HV 10 provedeno u Laboratoriju za zavarivanje. Tvrdoća HV0,1 i HV0,2 mjerena je na tvrdomjeru PMT-3 (slika 62.), a tvrdoća HV10 mjerena je na tvrdomjeru Reichert (slika 64.).



Slika 62. Tvrdomjer PMT-3

Tvrdomjer PMT-3 se sastoji od radnog stola, sustava za opterećivanje i mjernog sustava za iščitavanje veličine otiska. Radni stol omogućava zakretanje, postavljanje i pozicioniranje uzorka. Radi lakšeg mjerenja veličine dijagonala otiska, sustav za opterećivanje i mikroskop spojeni su u jednu cjelinu koja je vezana za stup. Cijeli sustav moguće je pomjerati gore-dolje te lijevo-desno. Cilindar, na kojem se postavljaju različiti utezi (HV0,1-uteg 100g; HV0,2-uteg 200g), povezan je sa ručicom za opterećivanje. Na taj način opterećenje se ostvaruje kombinacijom utega različitih masa.

Kako bi mjerenje tvrdoće HV0,1 i HV0,2 na tvrdomjeru PMT-3 bilo uspješno, otisak mora biti jasan i ciljnik mora biti u sredini otiska kao što je prikazano na slici 63.



Slika 63. Otpisak penetratora s ciljnikom na sredini

Nakon toga potrebno je očitati vrijednosti lijevog i desnog vrha otiska pomoću kotačića koji se nalazi desno od okulara. Vrijednost je pravilno očitana ako je ciljnik u samom vrhu ili paralelan s vrhom. Nadalje, očitane vrijednosti se oduzimaju na način da se desna vrijednost oduzme od lijeve i razlika se pomnoži s 0,302. Tako dobivena nova vrijednost se pronalazi u tablici i očitava vrijednost tvrdoće. Na uzorcima B₃ i B₃ (TO) koji su prikazani na slici 47. provedeno je po 20 mjerenja. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 9.

Tablica 9. Izmjerene tvrdoće HV0,1 i HV0,2

MJERENJE	HV0,1		HV0,2	
	B ₃	B ₃ (TO)	B ₃	B ₃ (TO)
1.	168	203	283	138
2.	225	146	213	121
3.	114	139	248	120
4.	196	133	220	127

5.	181	171	248	165
6.	230	165	172	131
7.	154	165	265	141
8.	188	128	240	141
9.	188	117	176	177
10.	240	168	265	124
11.	220	149	245	178
12.	225	142	252	188
13.	181	139	207	165
14.	230	146	216	165
15.	268	130	252	151
16.	212	130	220	135
17.	192	124	248	121
18.	225	175	260	138
19.	240	149	240	144
20.	171	175	213	139
SREDNJA VRIJEDNOST	205,95	143,3	234,35	151,25
STANDARDNA DEVIJACIJA	30,18	16,8	27,85	17,88

Postupak mjerenja tvrdoće HV10 na uređaju Reichert započinje stezanjem uzorka (slika 64.), nakon čega je potrebno podesiti visinu na kojoj se jasno vidi mikrostruktura uzorka. Podešavanje visine ostvaruje se pomoću finog i grubog fokusa. Pozicioniranje uzorka u horizontalnu ravninu omogućuje se pomoću dva mikrometra. Nakon odabira točke mjerenja, gornji dio uređaja se zakrene za 90° te se zakretanjem ručke indenter utisne u uzorak nekoliko sekundi. Nakon toga sve se vraća u početni položaj i pomoću mikroskopa određuju se vrijednosti dijagonala otiska indentora. Nadalje, prema izmjerenim dijagonalama izračunava se srednja vrijednost i iz tablica se očitava vrijednost tvrdoće po Vickersu.



Slika 64. Tvrdomjer Reichert

Na uzorcima B₃ i B₃ (TO) koji su prikazani na slici 47. provedeno je po 5 mjerenja. Rezultati mjerenja prikazani su u tablici 10.

Tablica 10. Izmjerene tvrdoće HV10

MJERENJE	HV10	
	B ₃	B ₃ (TO)
1.	245	240
2.	243	235
3.	245	240
4.	247	243
5.	247	236
SREDNJA VRIJEDNOST	245,4	238,8
STANDARDNA DEVIJACIJA	1,5	2,9

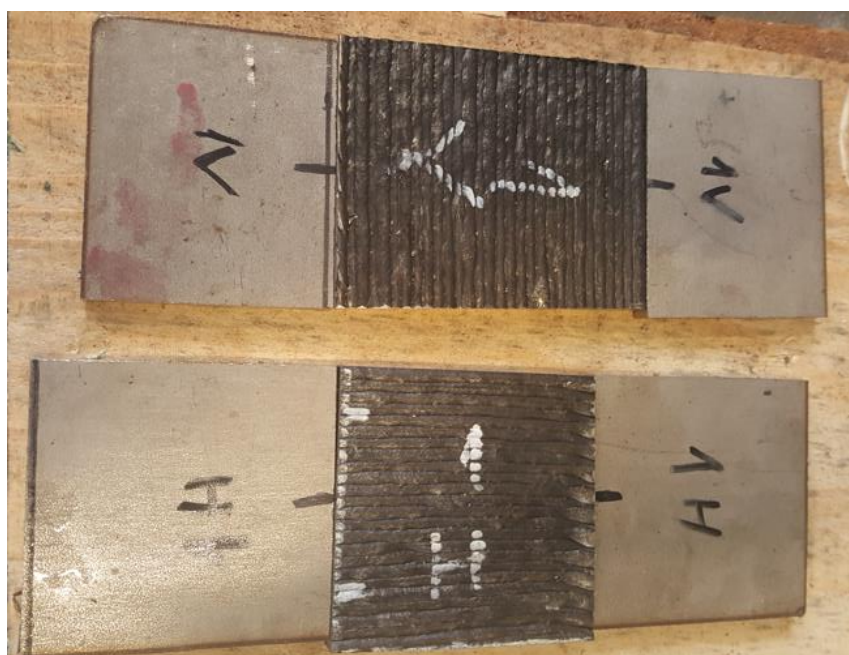
5.5. Statičko vlačno ispitivanje

Uzorci izrezani tračnom pilom iz zida prema planu rezanja, prikazanom na slici 40., za statičko vlačno ispitivanje prikazani su na slici 65.



Slika 65. Izrezani uzorci za statičko vlačno ispitivanje

Izrezani uzorci prikazani na slici 65. neće biti dovoljno velikih dimenzija za izradu epruveta te će isti biti navareni pločicama od običnog konstrukcijskog čelika S355. Na slici 66. prikazani su uzorci sa pripadajućim pločicama koje je potrebno zavariti.



Slika 66. Uzorci sa pripadajućim pločicama

Radi kvalitetne pripreme X zavarenog spoja, zbog brazdi koje se dobiju zidanjem pomoću WAAM tehnologije, uzorke je potrebno s jedne strane strojno obraditi. Strojna obrada glodanjem napravljena je u Laboratoriju za alatne strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Prije strojne obrade glodanjem potrebno je s brusilicom skinuti slojeve oksida kako ne bi došlo do uništenja glodala. Nakon što je se izvršila priprema površine prelazi se na postupak zavarivanja (slika 67.). Zavarivanje je izvedeno TIG postupkom zavarivanja. Korijen zavara je napravljen sa strujom jakosti 120 A i naponom raspona 10 – 11 V, dok su ostali prolazi napravljeni sa strujom jakosti 108 A i naponom raspona 9 – 10 V. Nakon svakog prolaza mjerena je međuprolazna temperatura koja nije smjela prelaziti 90 °C.



Slika 67. Zavarivanje uzoraka i pločice

Poslije zavarivanja zbog unosa topline dolazi do iskrivljavanja uzoraka i nakon toga slijedi poravnavanje pomoću stege i tri klina koje je prikazano na slici 68.



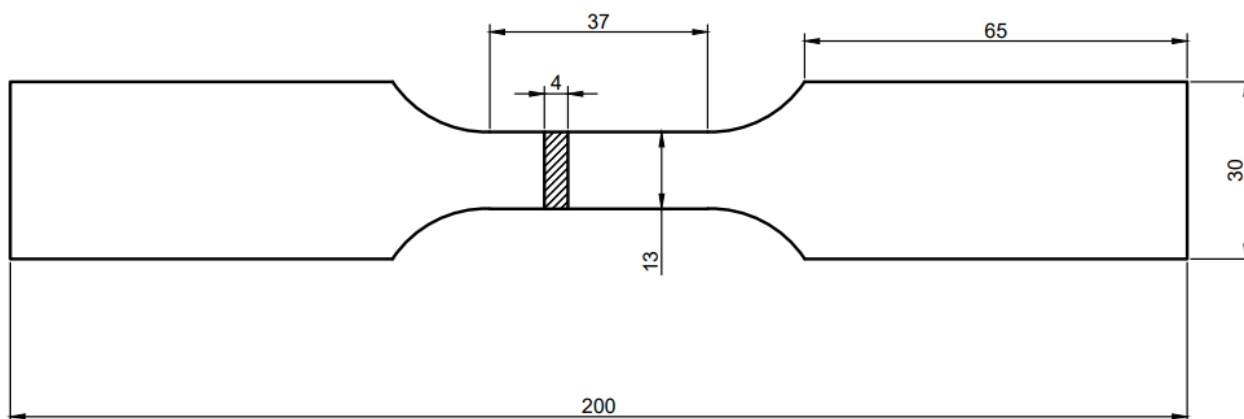
Slika 68. Poravnavanje uzoraka

Nakon poravnavanja, uzorci se strojno obrađuju i sa druge strane (slika 69.) te su onda spremni za izradu epruveta za statičko vlačno ispitivanje.



Slika 69. Uzorci spremni za izradu epruveta

Epruvete pravokutnog poprečnog presjeka izrađene su prema dimenzijama prikazanim na slici 70.



Slika 70. Dimenzije epruveta za statičko vlačno ispitivanje

Na slici 71. prikazane su izrađene epruvete pravokutnog poprečnog presjeka.



Slika 71. Izrađene epruvete pravokutnog poprečnog presjeka

Nakon izrade ispitnih epruveta za statičko vlačno ispitivanje, prelazi se na provedbu ispitivanja koje je napravljeno u Laboratoriju za eksperimentalnu mehaniku Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Ispitivanje je provedeno na kidalici MESSPHYSIK BETA 50-5 s optičkim ekstenziometrom koja je prikazana na slici 72.



Slika 72. Kidalica MESSPHYSIK BETA 50-5

U tablici 11. prikazane su potrebne početne dimenzije svih epruveta za statičko vlačno ispitivanje.

Tablica 11. Početne dimenzije epruveta za statičko vlačno ispitivanje

Ispitni uzorak	a , mm	b , mm	S_0 , mm ²
V	12,70	3,90	49,53
VT	12,85	3,94	50,69
H	12,99	3,92	50,92
HT	12,89	3,81	49,11

U tablici 11. dimenzija a označava debljinu poprečnog presjeka uzorka, dimenzija b označava širinu poprečnog presjeka uzorka, dimenzija S_0 označava površinu poprečnog presjeka uzorka.

Vrijednosti istezanja ε_u nakon kidanja određuju se prema izrazu:

$$\varepsilon_u = \frac{L_0 - L_u}{L_0}, \quad [\text{mm/mm}] \quad (4)$$

gdje je:

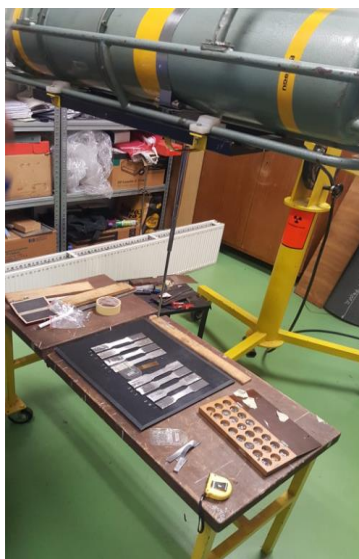
L_0 – početna mjerna duljina epruvete, [mm]

L_u – konačna mjerna duljina epruvete, [mm]

Nadalje, ukoliko se vrijednost ε_u izrazi u postocima, označava se slovom A i naziva se istezljivost i izračunava se prema izrazu:

$$A = \varepsilon_u \cdot 100, \quad [\%]$$

Ispitne epruvete prije statičko vlačnog ispitivanja podvrgnuti su radiografskom snimanju (slika 73.). Pomoću radiografskog snimanja otkriti će se nepravilnosti koje se ne vide s površine, a mogu utjecati na mehanička svojstva uzorka. Radiografsko snimanje provedeno je u Laboratoriju za nerazorna ispitivanja Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Za snimanje je korišten rendgenski uređaj Balteau 300 D.



Slika 73. Uzorci prije radiografskog snimanja

Otkrivene nepravilnosti mogu biti pukotine, poroznost, čvrsti uključci i neke druge pogreške koje utječu na mehanička svojstva. U tablici 12. prikazani su parametri snimanja radiografskog ispitivanja.

Tablica 12. Parametri snimanja radiografskog ispitivanja

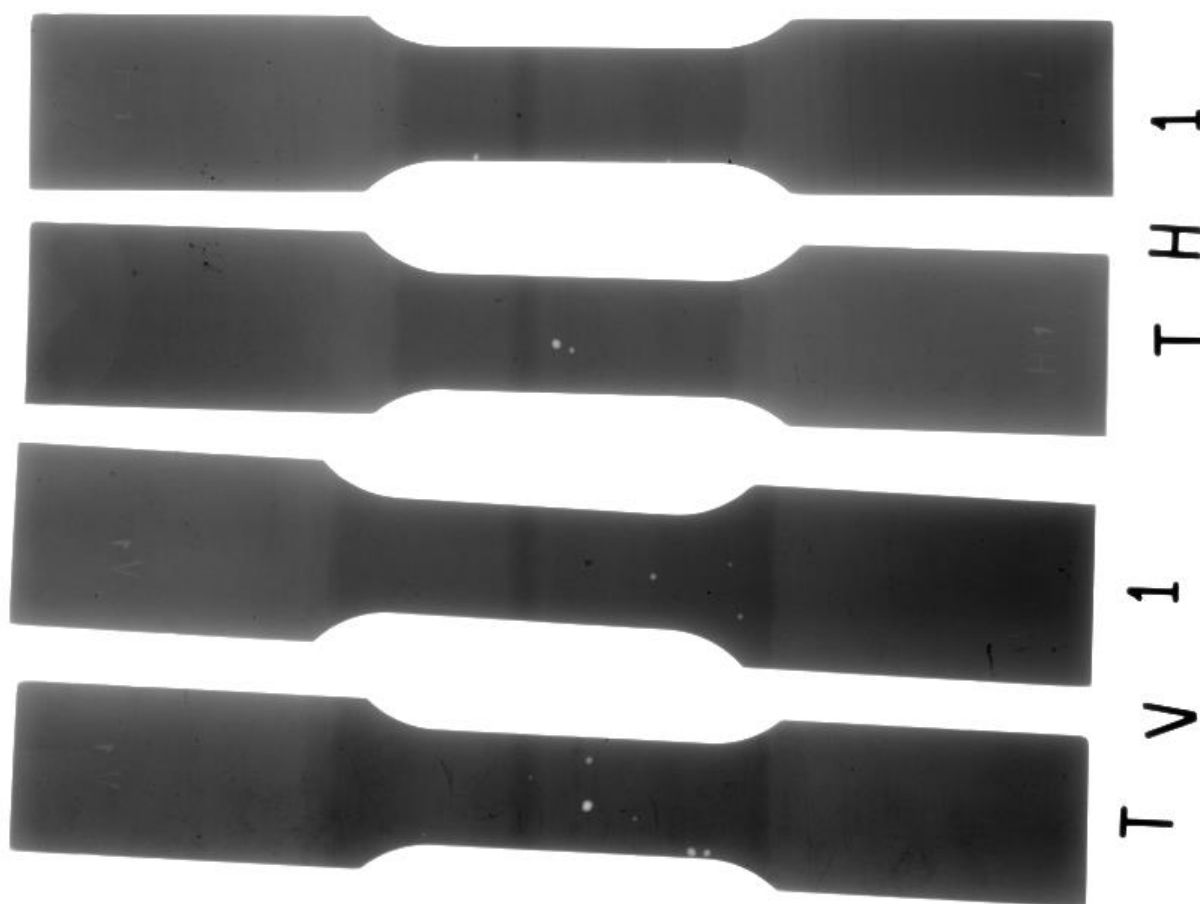
Napon, kV	125
Struja, mA	4
Film fokus udaljenost, mm	1000
Vrijeme ekspozicije, s	255

Nakon radiografskog snimanja, snimljena slikovna ploča Kodak industrex flex Blue se skenira pomoću skenera VMI 5100. Tako skenirani radiogram se pregleda i obrađuje na računalu pomoću programa ic-v1.11.1. U tablici 13. prikazani su parametri skeniranja.

Tablica 13. Parametri skeniranja radiografskog ispitivanja

Napon lasera, V	15
Napon fotomultiplikatora, V	5,25
Rezolucija skeniranja, μm	50

Na slici 74. prikazan je radiogram epruveta.



Slika 74. Radiogram epruveta

Na slici 74. prikazan je obrađeni radiogram u programu ISee! gdje se mogu se vidjeti zone u kojima se pojavljuju poroznosti u obliku točkica bijele boje.

U tablici 14. prikazani su rezultati nakon ispitivanja statičko vlačnog pokusa.

Tablica 14. Rezultati statičko vlačnog pokusa

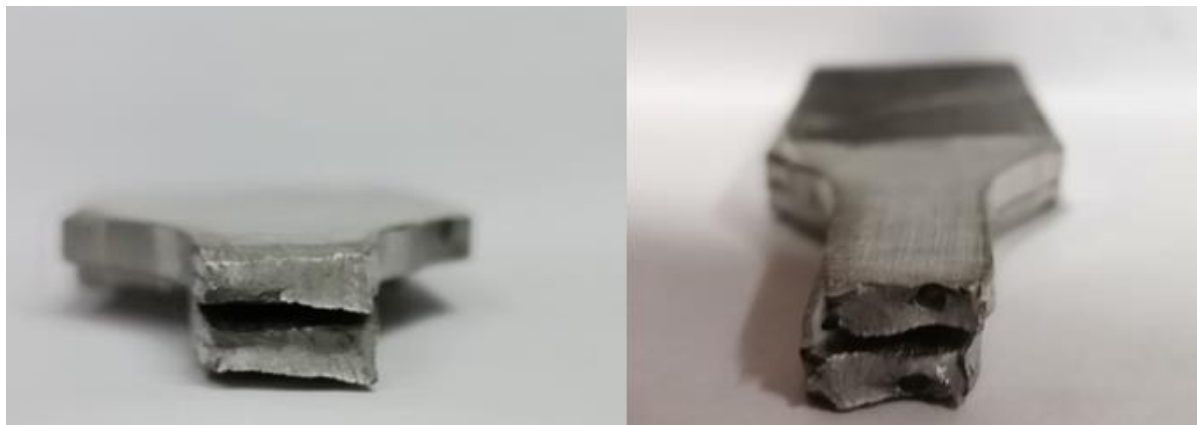
Ispitni uzorak	R_m , MPa	F_m , kN	A_{gt} , %	A , %	E , GPa	$R_{p0,2}$
V	777,7	38,518	23,37	34,63	205,1	517,5
VT	708,00	35,848	13,05	12,85	199,4	416,0
H	772,6	39,340	24,48	37,98	192,7	501,8
HT	739,3	36,307	17,80	23,36	202,3	429,2

Na slici 75. prikazane su epruvete nakon ispitivanja statičko vlačnog pokusa.



Slika 75. Epruvete nakon statičko vlačnog pokusa

Na slikama od 76. i 77. prikazani su izgledi presjeka nakon statičko vlačnog pokusa.



Slika 76. Poprečni presjek epruvete V (lijevo) i VT (desno) nakon kidanja



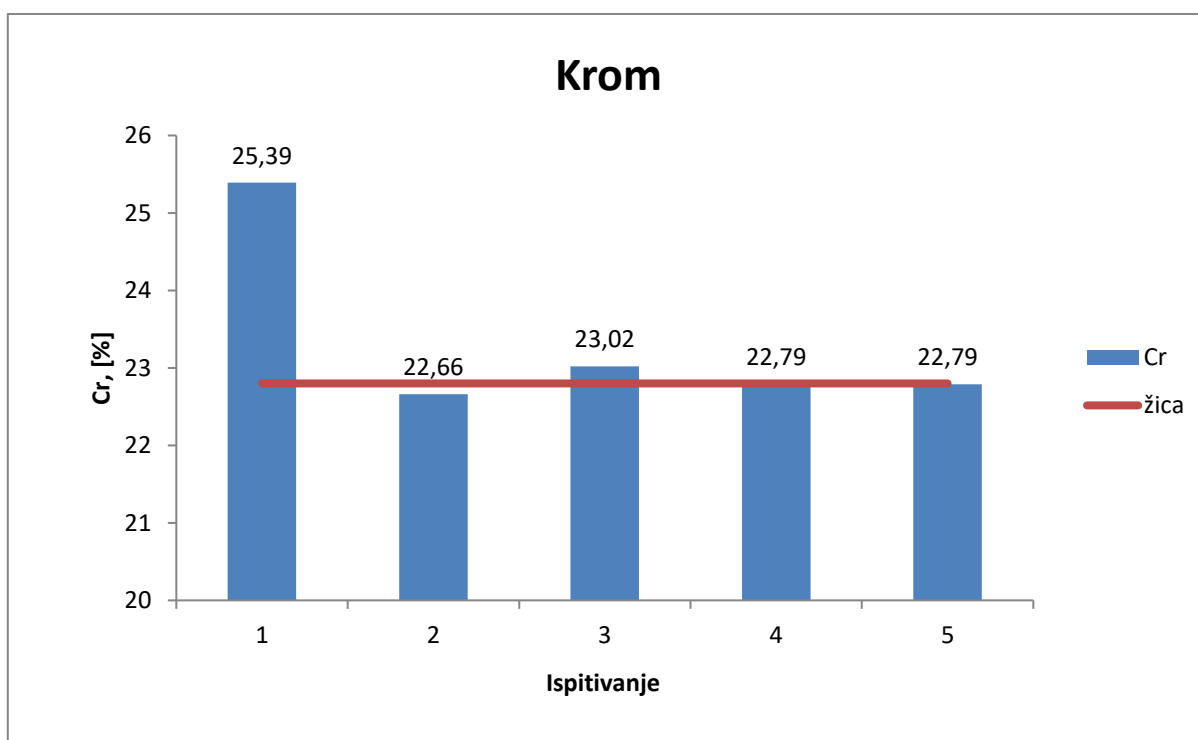
Slika 77. Poprečni presjek epruvete H (lijevo) i HT (desno) nakon kidanja

6. ANALIZA REZULTATA

6.1. Analiza kemijskoga sastava

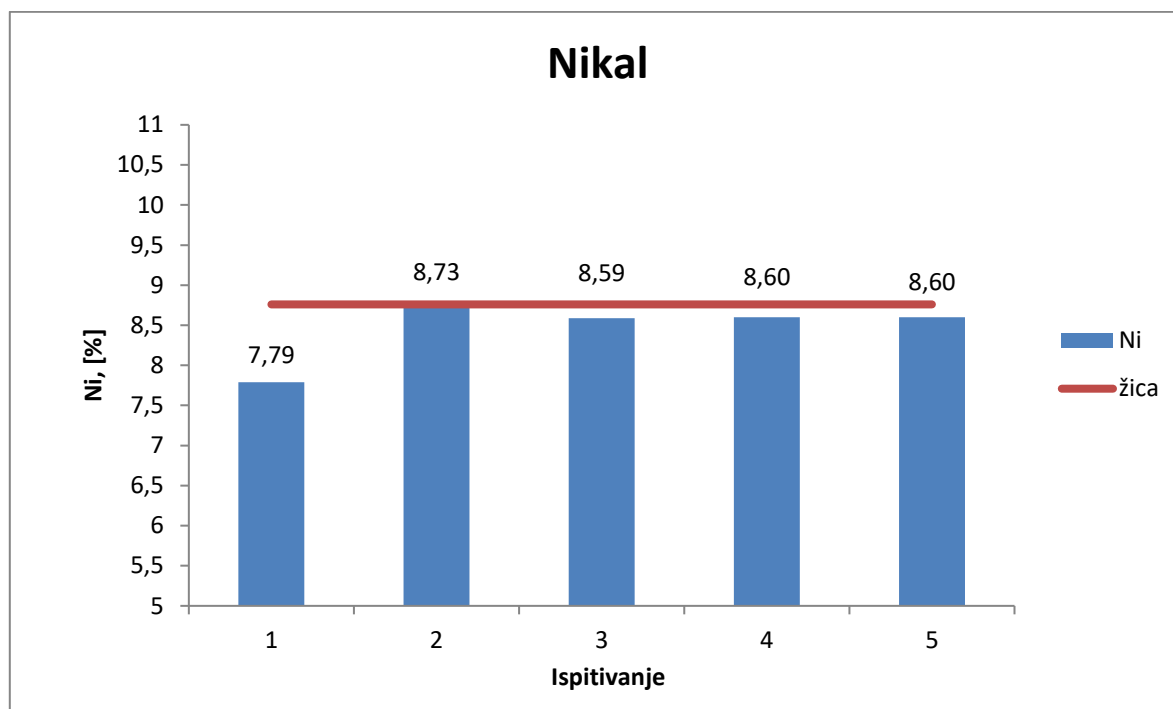
Analizom rezultata mjerenja, prema tablici 7. i 8., može se utvrditi da kemijski sastav glavnih legiranih elemenata nakon uklanjanja 1 mm materijala s površine poprima vrijednosti koje zadovoljavaju definirane granice za dupleks čelik.

Na slici 78. prikazan je udio kroma u uzorku i žici.



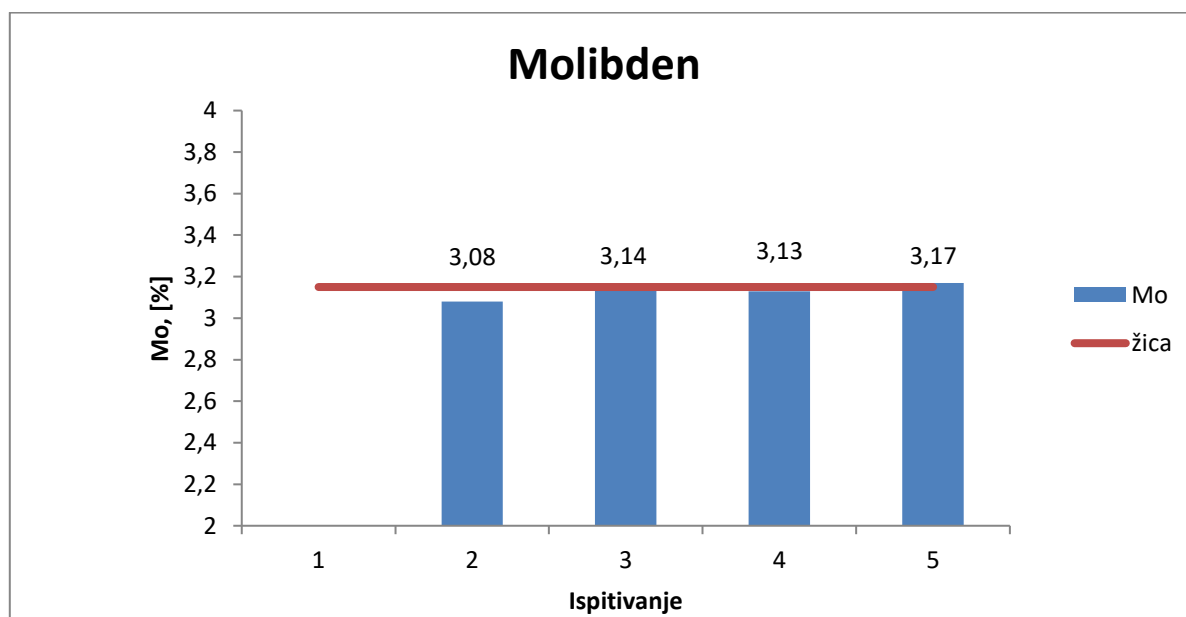
Slika 78. Udio kroma u uzorku i žici

Propisana vrijednost kroma kreće se u rasponu između 21 % i 23 %. Na dijagramu se vidi da samo vrijednost kroma izmjerena na površini uzorka ne zadovoljava propisane vrijednosti. Ostale vrijednosti su unutar raspona propisanih vrijednosti i vrijednosti variraju oko vrijednosti udjela kroma u žici. Također, može se zaključiti da toplinska obrada nema utjecaja na promjenu kroma u kemijskoj strukturi uzorka jer su vrijednosti prije i poslije toplinske obrade iste. Na slici 79. prikazan je udio nikla u uzorku i žici.



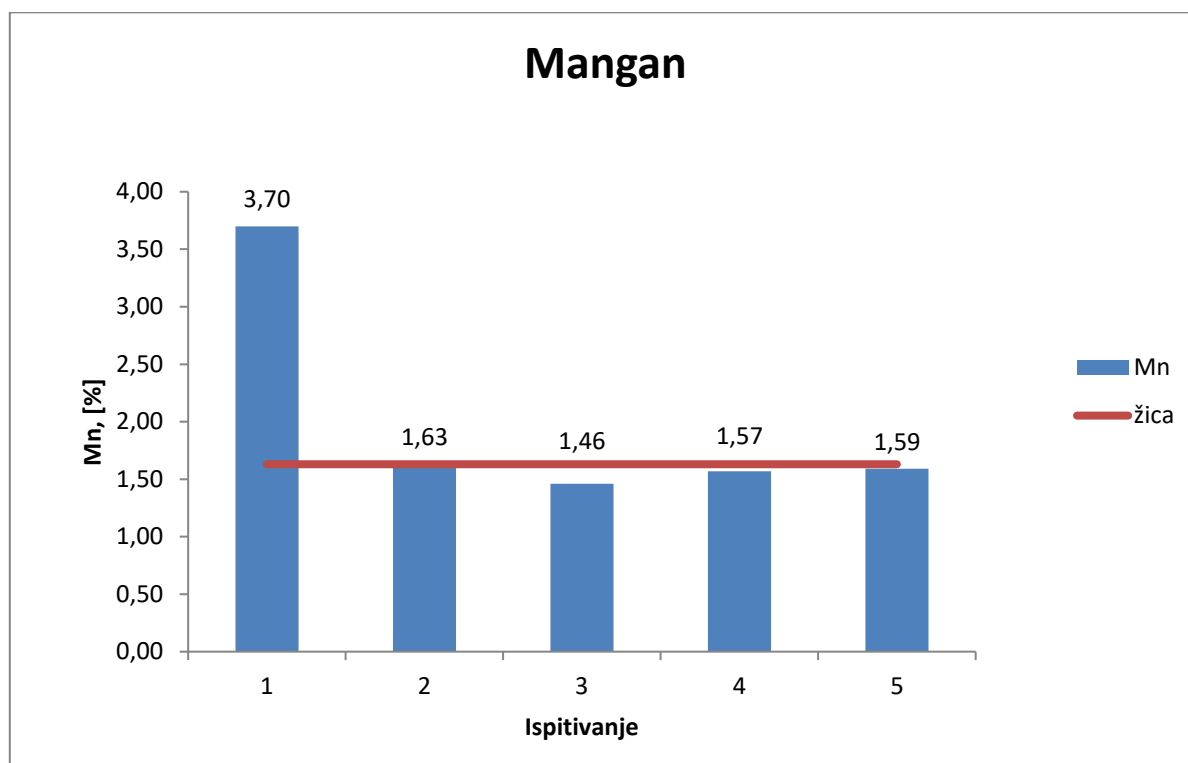
Slika 79. Udio nikla u uzorku i žici

Propisana vrijednost nikla kreće se u rasponu između 4,5 % i 6,5 %. Na dijagramu se uočava da sve izmjerene vrijednosti ne zadovoljavaju propisane vrijednosti. Također, žica ima visok udio nikla jer nikal tijekom izrade može ispariti i ako se ne ide sa većom količinom nikla može se desiti da u uzorku imamo smanjeni udio nikla. Vrijednosti nikla u kemijskoj strukturi uzorka su jednaki prije i poslije toplinske obrade. Na slici 80. prikazan je udio molibdena u uzorku i žici.



Slika 80. Udio molibdena u uzorku i žici

Propisana vrijednost molibdena kreće se u rasponu između 2,5 % i 3,5 %. Na dijagramu je vidljivo kako su vrijednosti, nakon skidanja 1 mm materijala, ujednačene i variraju oko udjela molibdena u žici. Također je vidljivo da uređaj nije detektirao molibden na površini gdje se više puta moglo ponoviti mjerenje kako bi se otkrilo da ga stvarno nema na površini, dok su ostale vrijednosti u propisanim granicama. Vrijednosti molibdena u kemijskoj strukturi uzorka su približno jednaki prije i poslije toplinske obrade. Na slici 81. prikazan je udio mangana u uzorku i žici.



Slika 81. Udio mangana u uzorku i žici

Propisana vrijednost mangana kreće se u raspon do maksimalnih 2,0 %. Izmjerene vrijednosti nakon skidanja 1 mm materijala su u propisanim granicama i variraju oko udjela mangana u žici. Vrijednosti mangana u kemijskoj strukturi uzorka su približno jednaki prije i poslije toplinske obrade.

6.2. Analiza mikrostrukture

Promatrajući slike dobivene pomoću svjetlosnog mikroskopa može se jasno vidjeti nepravilnost mikrostrukture na temelju izduženih i nepravilno orijentiranih zrna u odnosu na mikrostrukturu osnovnog materijala dupleks čelika. Na svim slikama mogu se uočiti crne točkice koje mogu predstavljati različite uključke ili intermetalne faze. Također, razlog pojave crnih točkica može biti i zbog lošeg nagrizanja i pripreme uzoraka.

Pomoću slika 56. i 59. pokušati će se procijeniti broj zrna, odnosno veličina zrna, unutar određenih površina. Na slikama 56. i 59. uzeti će se po dvije identične površine na oba uzorka na temelju kojih će se procijeniti veličina zrna. U tablici 15. prikazani su brojevi zrna u određenim površinama za oba uzorka.

Tablica 15. Broj zrna u uzorcima

UZORAK	B ₃		B ₃ (TO)	
POVRŠINA	1.	2.	1.	2.
BROJ ZRNA	45	34	30	25

Prema tablici 15. jasno se vidi kako je broj zrna na uzorku B₃ veći u odnosu na uzorak B₃ (TO), što znači da je došlo do povećanja zrna na uzorku koji je bio podvrgnut toplinskoj obradi.

Na slici 82. prikazana je slika koja je dobivena pomoću programa ImageJ. Program ImageJ se koristio za određivanje postotka ferita i austenita u mikrostrukтури.



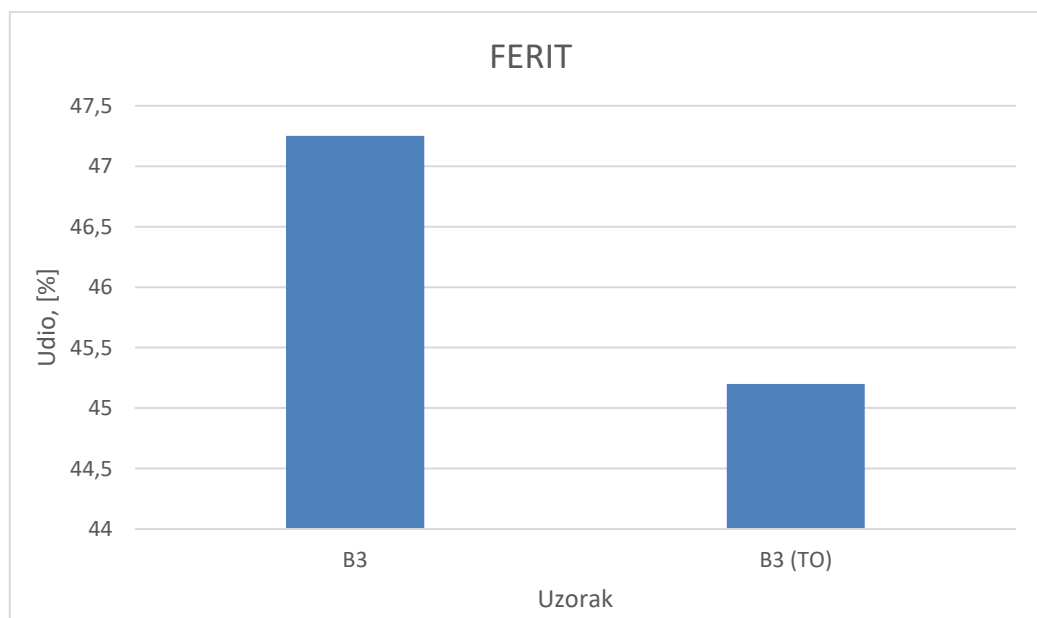
Slika 82. Određivanje postotnog udjela ferita i austenita pomoću programa ImageJ

Princip rada se sastoji od dodatnog zatamnjenja tamnijeg dijela slike i ta se faza, u ovom slučaju ferit, poboja drugom bojom (crvena). Program omogućava određivanje postotka crvene boje čime se određuje udio određene faze. Na točnost samih rezultata utječe razina zatamnjenja jer se ona određuje prema iskustvu. Također, na točnost rezultata može utjecati i nagrizanje koje ne može dobro napraviti podjelu između pojedinih faza. U tablici 16. prikazani su rezultati dobiveni pomoću programa ImageJ.

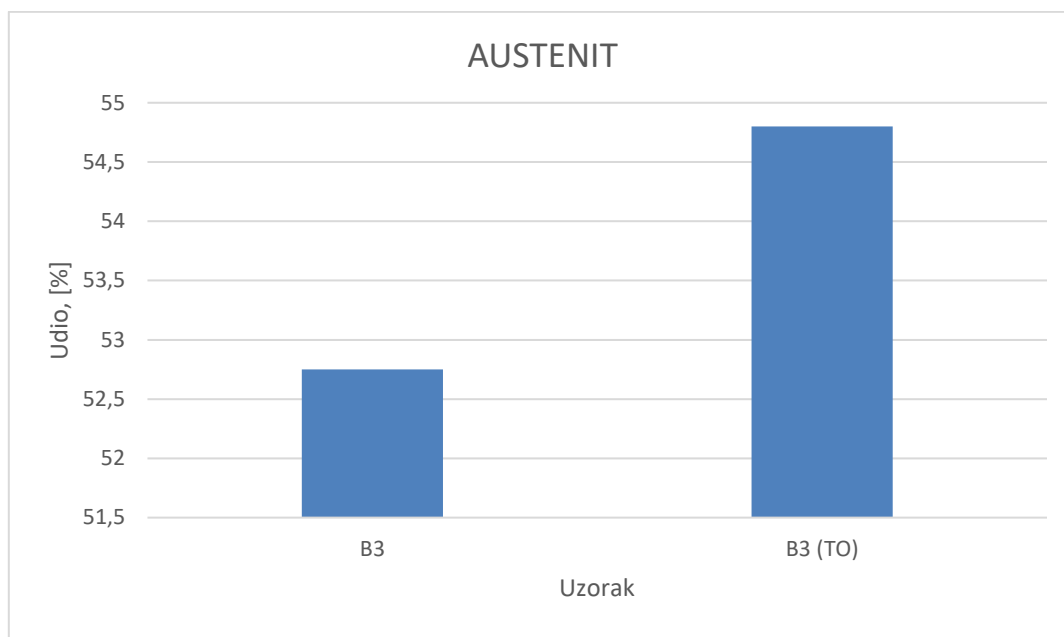
Tablica 16. Udio austenita i ferita u uzorcima

UZORAK	FAZA	UDIO, %
B₃	AUSTENIT	52,75
	FERIT	47,25
B₃ (TO)	AUSTENIT	54,80
	FERIT	45,20

Na slici 83. grafički je prikazan udio ferita u mikrostrukturi uzorka prije i poslije toplinske obrade, dok je na slici 84. prikazan udio austenita u mikrostrukturi prije i poslije toplinske obrade.



Slika 83. Udio ferita u uzorcima

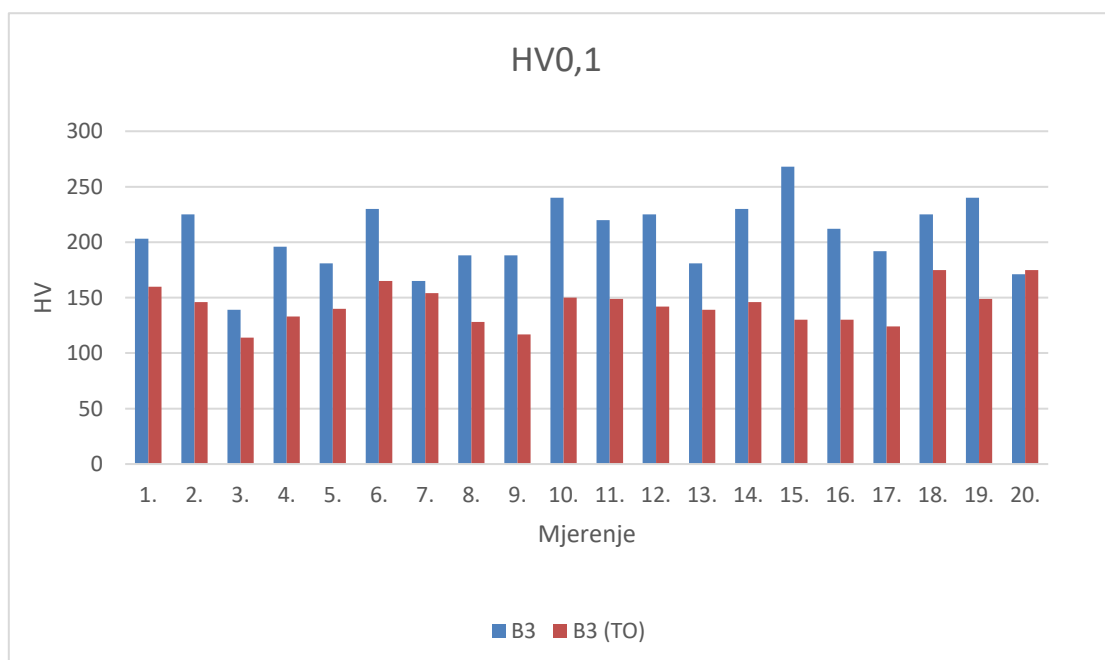


Slika 84. Udio austenita u uzorcima

Prema slikama 83. i 84. može se zaključiti kako je došlo do povećanja udjela austenita i smanjenja udjela ferita u mikrostrukturi uzoraka nakon toplinske obrade. Dobiveni rezultati za odnos austenita i ferita u mikrostrukturi su zadovoljavajući jer variraju unutar dozvoljenih granica (40 – 60 %).

6.3. Analiza tvrdoće

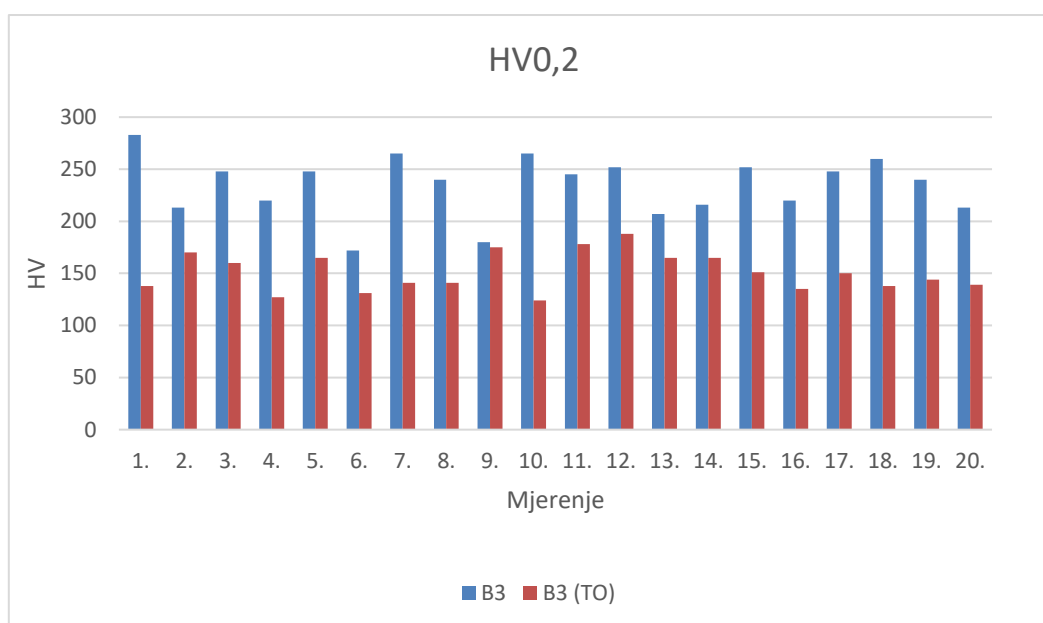
Na slici 85. grafički su prikazane vrijednosti izmjerenih tvrdoća HV_{0,1} za uzorke B₃ i B₃ (TO).



Slika 85. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoća HV_{0,1}

Srednja izmjerena vrijednost tvrdoće HV_{0,1} za uzorak B₃ je 205,95 a za uzorak B₃ (TO) iznosi 143,3. Iz grafičkog prikaza jasno se vidi da su tvrdoće uzorka nakon toplinske obrade manje. Veliki pad tvrdoće uzorka nakon toplinske obrade uzrokovan je povećanjem udjela austenita u mikrostrukturi, kojemu je tvrdoća manja nego kod ferita. Povećanje udjela austenita je malo u odnosu na smanjenje tvrdoće pa na pad tvrdoće mogu utjecati i sekundarne faze koje se prilikom nagrizanja nisu mogle otkriti. Prema grafičkom prikazu na slici 85. može se zaključiti da je rasipanje tvrdoće kod uzorka B₃ (TO) manje nego kod B₃.

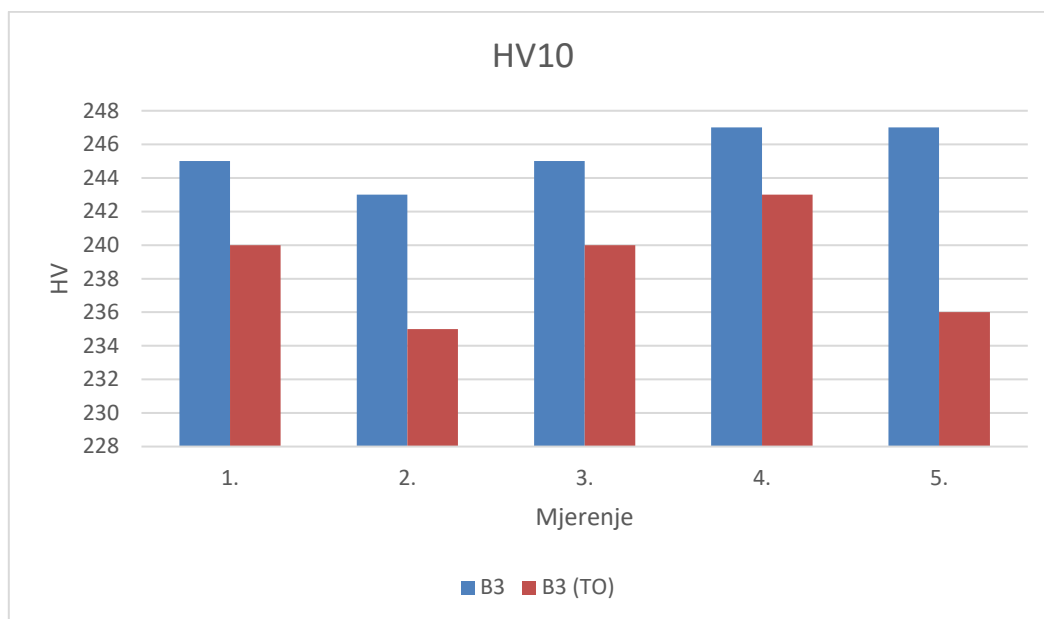
Na slici 86. grafički su prikazane vrijednosti izmjerenih tvrdoća HV_{0,2} za uzorke B₃ i B₃ (TO).



Slika 86. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoća HV_{0,2}

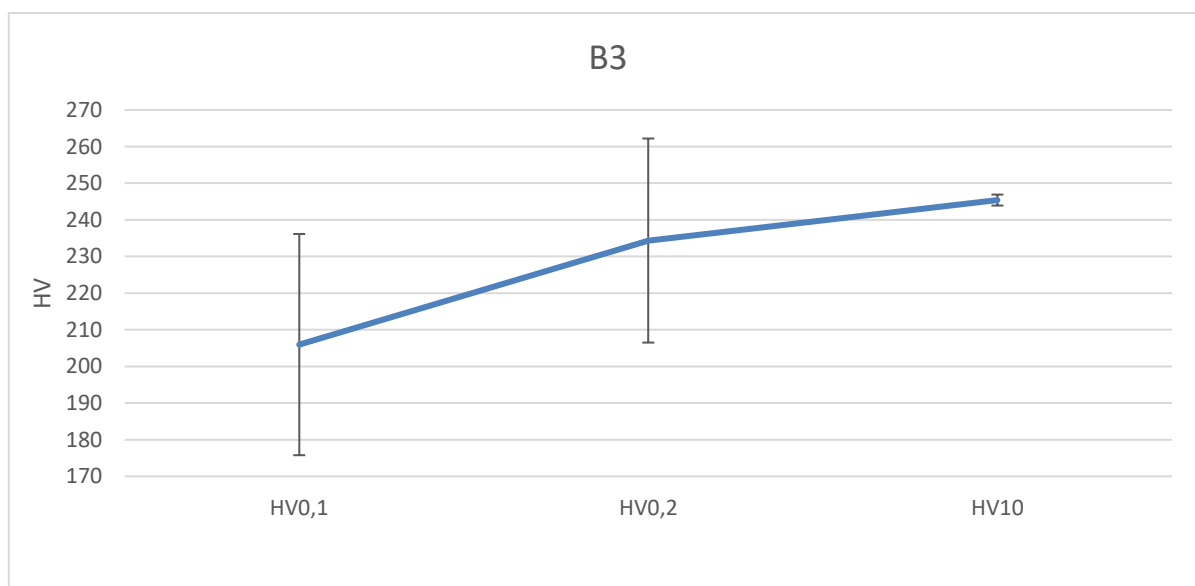
Srednja izmjerena vrijednost tvrdoće HV_{0,2} za uzorak B₃ je 234,35 a za uzorak B₃ (TO) iznosi 151,25. Iz grafičkog prikaza jasno se vidi da su tvrdoće uzorka nakon toplinske obrade manje. Veliki pad tvrdoće je vidljiv kao kod mjerenja tvrdoće HV_{0,1}. Razlog tome je povećanje udjela austenita u mikrostrukturi kao i neotkrivanje sekundarnih faza koje se povezuje s smanjenjem tvrdoće. Prema grafičkom prikazu na slici 86. može se zaključiti da je rasipanje tvrdoće kod uzorka B₃ (TO) manje nego kod B₃.

Na slici 87. grafički su prikazane vrijednosti izmjerenih tvrdoća HV 10 za uzorke B₃ i B₃ (TO).

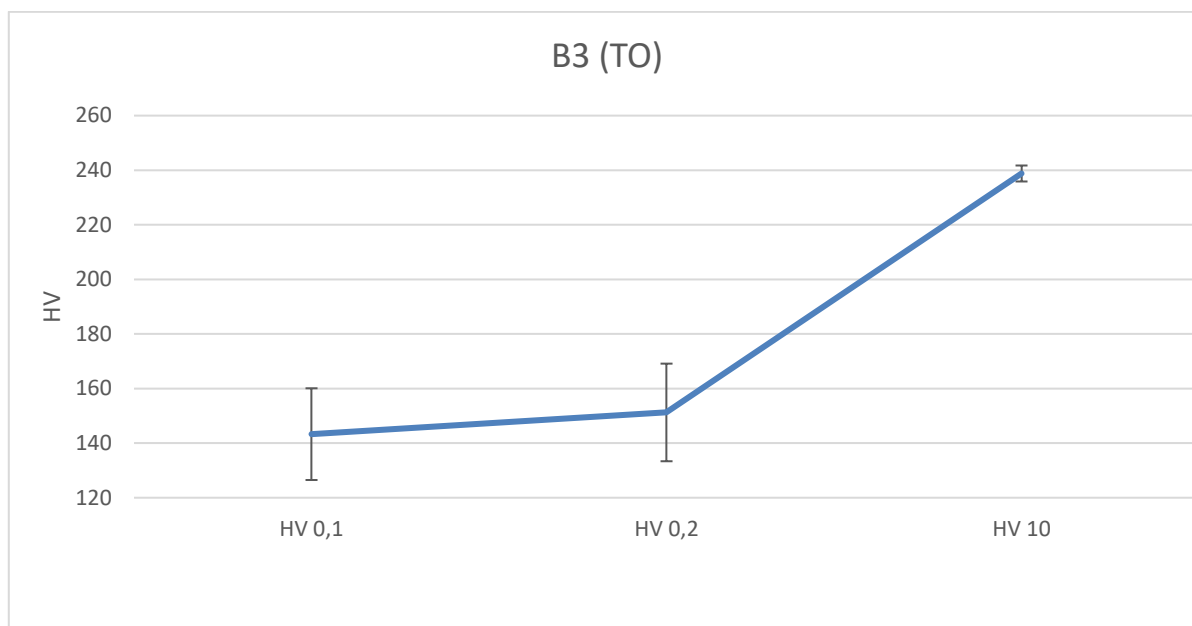


Slika 87. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti tvrdoća HV10

Srednja izmjerena vrijednost tvrdoće HV10 za uzorak B₃ je 245,4 a za uzorak B₃ (TO) iznosi 238,8. Iz grafičkog prikaza na slici 87. jasno se vidi da su tvrdoće uzorka B₃ (TO) manje te da je rasipanje tvrdoća veće u odnosu na B₃. Razlika u tvrdoćama je nešto manja nego što je to bio slučaj kod manjih opterećenja, što se može zaključiti da se sa povećanjem opterećenja rasipanje tvrdoće smanjuje. Na slici 88. prikazane su tvrdoće uzorka B₃ za različita opterećenja s pripadajućim rasipanjima, dok su na slici 89. prikazane tvrdoće uzorka B₃ (TO) za različita opterećenja s pripadajućim rasipanjima.



Slika 88. Tvrdoće uzorka B3 za različita opterećenja s pripadajućim rasipanjima



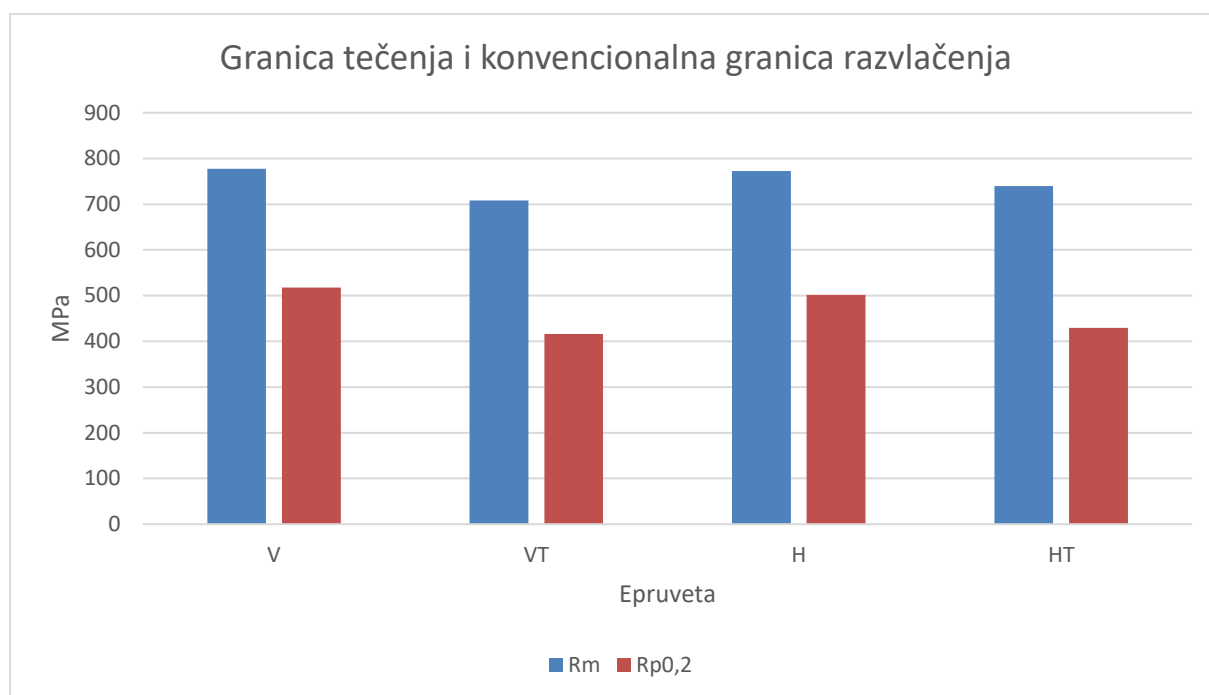
Slika 89. Tvrdoće uzorka B3 (TO) za različita opterećenja s pripadajućim rasipanjima

Na slikama 88. i 89. jasno se vidi da se sa povećanjem opterećenja povećavaju i vrijednosti tvrdoća. Rasipanje rezultata izmjerenih tvrdoća je manje što je primijenjeno opterećenje veće. Vrijednosti tvrdoće HV10 za dupleks čelik 2209 se kreću u rasponu između 230 i 250. Prema tome vrijednosti tvrdoća za uzorke B₃ i B₃ (TO) zadovoljavaju zadani kriterij.

6.4. Analiza statičko vlačnog ispitivanja

Analizom uzoraka nakon statičko vlačnog ispitivanja vidljivo je da na mjestu loma epruvete V i H imamo homogen sastav što se prema snimljenom radiogramu može i zaključiti. Kod epruvete VT i HT u poprečnom presjeku loma, vidljive su pore koje su prethodno uočene na snimljenom radiogramu i na tim mjestima je se očekivano dogodio lom. Sve epruvete nakon kidanja su izdužene i smanjenog poprečnog presjeka što upućuje na to da je riječ o duktilnom lomu. Zavarivanjem pločica za povećanje dimenzija epruvete nije imalo nikakav utjecaj na postignute rezultate jer su sve epruvete pukle na mjestima gdje se nalazio zid. Epruvete koje su bile podvrgnute toplinskoj obradi na mjestima koja idu u čeljust kidalice nisu bile dovoljno pobrušene, te su prilikom kidanja epruvete ispadale iz čeljusti zbog crnog sloja uslijed čega je dolazilo do prekida ispitivanja.

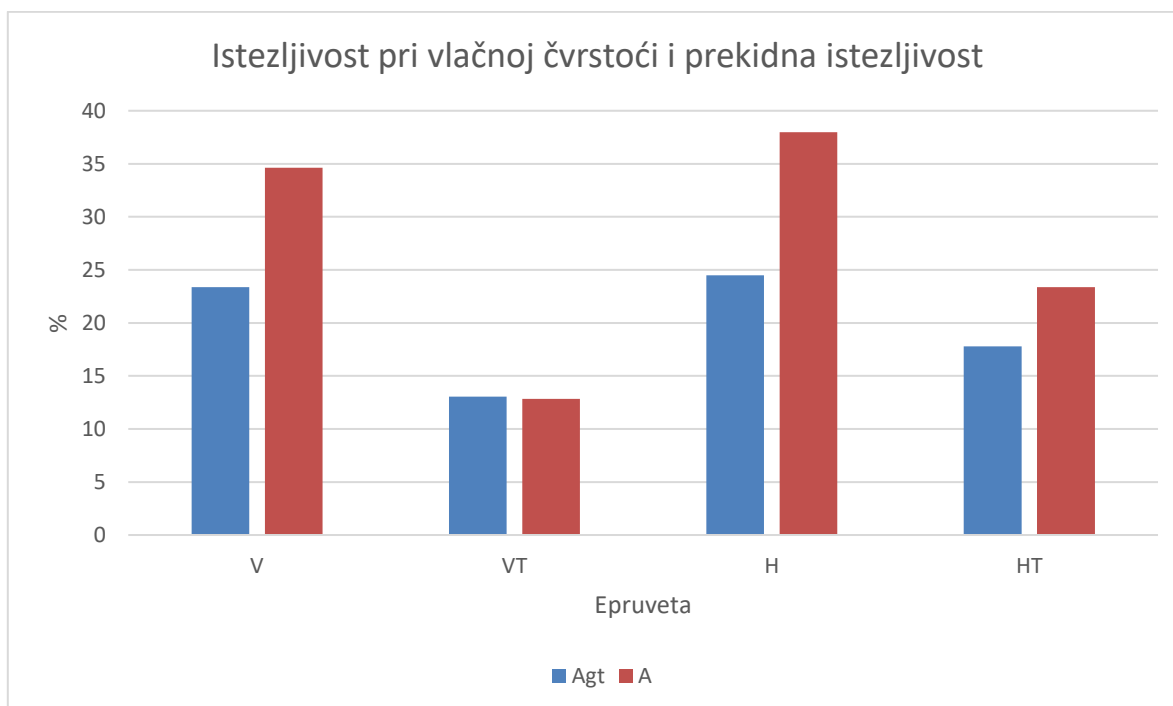
Na slici 90. grafički je prikazana vlačna čvrstoća i konvencionalna granica razvlačenja za sve epruvete.



Slika 90. Vlačna čvrstoća i konvencionalna granica tečenja za sve epruvete

Prema slici 90. vidljivo je smanjenje vlačne čvrstoće kod uzoraka nakon toplinske obrade. Vlačna čvrstoća kod vertikalno orijentiranih epruveta se smanjuje za 8,96 % dok kod horizontalno orijentiranih epruveta dolazi do smanjenja vlačne čvrstoće za 4,31 %. Također, dolazi do smanjenja konvencionalne granice razvlačenja nakon toplinske obrade, koja kod vertikalno orijentiranih epruveta iznosi 19,61 % a kod horizontalno orijentiranih uzoraka iznosi 14,46 %. Razlike vrijednosti vlačnih čvrstoća i konvencionalnih granica razvlačenja kod vertikalnih i horizontalnih epruveta su male. Pad vrijednosti vlačnih čvrstoća i konvencionalnih granica razvlačenja moguće da je povezan sa činjenicom da je kod tih epruveta dolazilo do prekida ispitivanja zbog ispadanja epruveta iz čeljusti kidalice. Vlačna čvrstoća za dupleks čelik 2209 iznosi minimalno 720 MPa. Na temelju toga može se zaključiti da skoro sve epruvete zadovoljavaju zadani kriterij. Jedino vrijednost vlačne čvrstoće epruvete VT je malo ispod granice, ali tako mala granica je zanemariva. Konvencionalna granica razvlačenja za dupleks čelik 2209 iznosi 560 MPa. Na temelju toga može se zaključiti da sve epruvete ne zadovoljavaju zadani kriterij.

Na slici 91. grafički je prikazana istezljivost pri vlačnoj čvrstoći i prekidna istezljivost.



Slika 91. Istezljivost pri vlačnoj čvrstoći i prekidna istezljivost

Prema slici 91. vidljivo je smanjenje istezljivosti pri vlačnoj čvrstoći i prekidnoj istezljivosti kod epruveta koje su toplinski obrađene. Razlog tome što je je taj što je došlo do prekida ispitivanja zbog ispadanja epruveta iz čeljusti kidalice. Za epruvete koje su toplinski obrađene može se zaključiti da mogu podnijeti minimalnu istezljivost koja je prikazana u tablici 14. Uspoređujući vrijednosti istezljivost za epruvete koje nisu bile podvrgnute toplinskoj obradi, vidljive su malo veće vrijednosti istezljivosti kod horizontalno orijentiranog uzorka. Vrijednost konačne istezljivosti za duplkes čelik iznosi 26 %. Prema vrijednostima dobivenim za epruvete, vidljivo je da epruvete nakon toplinske obrade ne bi zadovoljili ovaj kriterij. Utjecaj na takav rezultat sigurno ima prekid ispitivanja prilikom ispadanja epruvete iz čeljusti kidalice.

7. ZAKLJUČAK

Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom predstavlja novu tehnologiju u proizvodnji metalnih proizvoda. Zbog svojih prednosti primjene, kao što je mogućnost automatizacije i izrade komponenti kompleksne geometrije, postaje jako zanimljiva na tržištu. Ekonomičnost procesa u pogledu iskoristivosti (veće brzine izrade, manje količine otpada i niži troškovi proizvodnje) čini je konkurentnom na tržištu za izradu dijelova od skupih materijala kao što su titan i nikal. Međutim, tehnologiju nedostaci kao što su pojava poroznosti, šupljina i zaostalih naprezanja ograničavaju na veću komercijalnu upotrebu.

Dupleks čelici zbog dobrih mehaničkih i korozivskih svojstava imaju široku primjenu u industriji. Zbog visoke cijene dupleks čelici se sve više koriste kao dodatni materijal za WAAM postupak.

Cilj rada bio je utvrditi utjecaj aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom i toplinske obrade na mikrostrukturu dupleks čelika. U eksperimentalnom dijelu, na temelju prethodno izrađenog zida coldArc postupkom, potrebno je pripremiti uzorke za ispitivanja. Nakon provedenih ispitivanja može se zaključiti sljedeće:

- Kemijski sastav glavnih legirnih elemenata dupleks čelika na površini zida ima velika rasipanja u odnosu na propisane vrijednosti. Skidanjem strojnom obradom 1 mm materijala s površine, legirni elementi poprimaju vrijednosti unutar definiranih granica za dupleks čelik. Toplinska obrada nema utjecaja na kemijski sastav dupleks čelika.
- Prilikom analize mikrostrukture uzoraka prije i poslije toplinske obrade može se vidjeti povećanje udjela austenita u mikrostrukturi uzorka koji je bio podvrgnut toplinskoj obradi. Također, nakon toplinske obrade vidljivo je povećanje zrna.
- Tvrdća uzorka prije i poslije toplinske se bitno razlikuju. Tvrdće uzorka koji je podvrgnut toplinskoj obradi ima manju tvrdoću zbog povećanja udjela austenita u mikrostrukturi. Austenit ima manju tvrdoću od ferita. Prilikom mjerenja tvrdoće, s povećanjem opterećenja dolazi do manjeg rasipanja vrijednosti.
- Povećano rasipanje izmjerenih vrijednosti tvrdoće pri malim opterećenjima ukazuju na heterogenosti mikrostrukture i moguću prisutnost sekundarnih mikrostrukturnih faza (σ , Cr_2N , Chi-faza,..). Manje rasipanje rezultata tvrdoće nakon toplinske obrade ukazuje na odsutnosti istih faza.

- Vrijednosti vlačne čvrstoće i konvencionalne granice razvlačenja opadaju nakon toplinske obrade. Također, istezljivosti pri vlačnoj čvrstoći i prekidne istezljivosti opadaju nakon toplinske obrade.
- Orijehtacija epruveta nema prevelikog utjecaja na vrijednost vlačne čvrstoće i konvencionalne granice razvlačenja, dok su istezljivosti veće za horizontalno orijentirane epruvete.

Prema provedenim ispitivanjima može se zaključiti da toplinska obrada nema utjecaja na kemijski sastav dupleks čelika. Nadalje, toplinskom obradom postiže se homogenost mikrostrukture te smanjenje tvrdoće. Također, toplinska obrada utječe na smanjenje vlačne čvrstoće, konvencionalne granice tečenja te istezljivosti. Za daljnja istraživanja bilo bi poželjno primijeniti drugu toplinsku obradu kako bi se poboljšala mehanička svojstva. Sa stajališta tvrdoće, bilo bi dobro primijeniti drugu otopinu za nagrivanje kako bi se vidjele štetne faze u mikrostrukтури dupleks čelika.

LITERATURA

- [1] Ding, D.; Pan, Z.; Cuiuri, D.; Li, H.; Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 81(1-4), 2015.
- [2] Pilipović, A.: Aditivna proizvodnja, *Polimeri* 33(2012)3-4, 134 – 135.
- [3] Knezović N., Topić A.: Kombinacija aditivne tehnologije i zavarivanja u izradi metalnih proizvoda, 17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA, 2018.
- [4] Rodrigues A.T., Duarte V., Miranda R.M., Santos T.G., Oliveira J.P.: Current status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), Universidade NOVA de Lisboa, 2019.
- [5] Busachi A., Erkoyuncu A., J., Martina F., Ding J.: Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications, Elsevier, 2015.
- [5] <https://modernairliners.com/boeing-787-dreamliner/boeing-787-dreamliner-specs/>, pristupljeno dana 21.06.2021.
- [6] J. Donoghue, A.A. Antony, F. Martina, P.A. Colegrove, S.W. Williams, P.B. Prangnell; “The effectiveness of combining rolling deformation with Wire–Arc Additive Manufacture on β -grain refinement and texture modification in Ti–6Al–4V”; ELSEVIER; 2016.
- [7] Erikson M., Lervag M., Sorensen C., Robertstad A., Bronstad B.M., Nyhus B., Aune R., Ren X., Akselsen O.M.: Additive manufacture of superduplex stainless steel using WAAM, Trondheim, Norveška, 2018.
- [8] Ding J., Martina F., Williams S.: Production of large metallic components by additive manufacture – issues and achievements, Welding Engineering And Laser Processing Centre, Cranfield University, 2015
- [9] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1357631301-0-ssnc_9i10_pred_tekst.pdf, pristupljeno dana 24.06.2021.
- [10] Rede V.: Utjecaj mikrostrukture zavara dupleks čelika na otpornost prema trošenju, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2004.
- [11] Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels, Revised edition, International Molybdenum Association, 2001.
- [12] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1584523006-0-podlogezakolegijosnovetehnologijeb_zavarivanje.pdf, pristupljeno dana 07.10.2021.

- [13] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1584355546-0-temamag-postupcizavarivanja.pdf, pristupljeno dana 07.10.2021.
- [14] Kralj, S., Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.
- [15] Brumec, G.: Zavarivanje cjevovoda MAG postupcima, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [16] Horvat, M., Kondić, V., Brezovečki, D.: Opravdanost primjene MAG forceArc postupka zavarivanja u izradi čeličnih konstrukcija, Tehnički glasnik, Vol. 8 (2014), pp. 288 – 294
- [17] Kralj S., Radošević B., Kožuh Z., Garašić I.: Strojevi i oprema za zavarivanje, Podloge, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [18] Horvat, M., Kondić, V.: Primjeri modificiranih postupaka MIG/MAG zavarivanja, Tehnički glasnik 6, 2(2012.), pp. 137-140
- [19] Himmelbauer, K.: CMT postupak – revolucija u tehnologiji zavarivanja, Zavarivanje, 51 (2008), pp. 115 – 121
- [20] Grzybicki, M., Jakubowski, J.: Comparative tests of steel car body sheet welds made using CMT and MIG/MAG methods, Welding international, Volume 27 (2013), pp. 610 – 615
- [21] Budig, B.: EWM – forceArc: Novi koncept prijenosa za MIG/MAG zavarivanje, Zavarivanje, 55 (2012), pp. 21 – 25
- [22] <https://www.ewm-sales.com/upload/wm030100.pdf>, pristupljeno dana 12.10.2021.
- [23] Kah, P.; Raimo, S.: Advanced gas metal arc welding processes, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Lipanj, 2013
- [24] de Dompablo, M.: New solutions in coldArc and forceArc welding technology, Welding International, 27:1, 24-29, 2013.
- [25] Kostel L.: Primjena coldArc postupka zavarivanja za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2019.
- [26] <https://hrcak.srce.hr/file/137626>, pristupljeno dana 18.10.2021.
- [27] V. Ivušić, M. Franz, Đ. Španiček, L. Čurković: Materijali I, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.