Mikrostruktura i mehanička svojstva legure Inconel 625 pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom

Sinković, Martin

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:265764

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-25**

Repository / Repozitorij:

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

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Martin Sinković

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Student:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić Martin Sinković

Zagreb, 2017.

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

Zahvaljujem mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću na podršci i korisnim savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

Posebno hvala asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech., na suradnji, svim savjetima, pruženoj pomoći te stručnom vođenju tijekom izrade diplomskog rada.

Također se zahvaljujem djelatnicima Laboratorija za zavarivanje, na pomoći i strpljenju pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Posebnu zahvalnost iskazujem svojoj obitelji i djevojci na beskrajnoj podršci i razumijevanju tijekom studiranja.

Naposljetku, svoj diplomski rad posvećujem dedi Joži.

Martin Sinković

_____

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Martin Sinković** Mat. br.: 0035190613

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Mikrostruktura i mehanička svojstva legure Inconel 625 pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Inconel 625 Alloy**

Opis zadatka:

Opisati postupak aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom te objasniti MAG zavarivanje i prikladne modalitete prijenosa metala u električnom luku. Navesti osnovne karakteristike legure Inconel 625 i primjenu u industrijskoj praksi. Posebno naglasiti problematiku zavarljivosti i promjena mikrostrukture u području zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu odrediti optimalno područje parametara s ciljem postizanja maksimalne produktivnosti pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom legure Inconel 625. Na odgovarajućim uzorcima provesti potrebna nerazorna ispitivanja, a potom ispitati mikrostrukturu i osnovna mehanička svojstva. Na temelju dobivenih podataka odrediti optimalno područje parametara s obzirom na produktivnost i analizirati postignutu mikrostrukturu nanesenog zida.

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

Zadatak zadan:	Datum predaje rada:	Predviđeni datum obrane:
28. rujna 2017.	30. studenog 2017.	6., 7. i 8. prosinca 2017.

Zadatak zadao:

Izv. 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 metalnih materijala 5
2.2. Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom 7
2.2.1. Oprema za WAAM postupak 9
2.2.2. Dodatna zaštitna oprema za WAAM postupak 9
2.2.3. Problemi kod WAAM postupka 10
2.2.4. Planiranje procesa kod WAAM postupka 12
2.2.5. Izazovi WAAM postupka 13
2.2.6. Prednosti i nedostaci WAAM postupka 16
2.2.7. Materijali kod WAAM postupka 17
2.2.8. Primjena WAAM postupka 18
3. MAG ZAVARIVANJE 23
3.1. Općenito o MAG postupku zavarivanja 23
3.2. Parametri MAG postupka zavarivanja 25
3.3. Prijenos metala u električnom luku 28
3.3.1. Prijenos metala kratkim spojevima 28
3.3.2. Prijenos metala prijelaznim lukom 30
3.3.3. Prijenos metala štrcajućim lukom 31
3.3.4. Prijenos metala impulsnim lukom 32
3.4. Primjena MAG postupka kod WAAM-a 33
4. LEGURA INCONEL 625 36
4.1. Kemijski sastav 36
4.2. Mikrostruktura 37
4.3. Mehanička svojstva 38
4.4. Područje primjene i karakteristike 43
4.5. Korozijska postojanost 44
4.6. Zavarljivost 44
4.7. Primjena u industrijskoj praksi 45
4.8. Zavarivanje Inconela 625 MIG/MAG postupkom 48
5. EKSPERIMENTALNI DIO 50
5.1. Oprema za zavarivanje 50
5.2. Podloga i dodatni materijal 52

5.3. Zaštitni plinovi ... 53
5.4. Putanje pištolja za zavarivanje ... 54
5.5. Parametri zavarivanja ... 54
5.6. Priprema uzoraka ... 59
5.7. Provedena ispitivanja ... 62
5.7.1. Radiografsko ispitivanje ... 63
5.7.2. Analiza makrostrukture ... 65
5.7.3. Analiza mikrostrukture ... 67
5.7.4. Mjerenje tvrdoće ... 72
5.7.5. Statički vlačni pokus ... 73
6. ANALIZA REZULTATA ... 78
7. ZAKLJUČAK ... 84
LITERATURA ... 86
PRILOZI ... 89

POPIS SLIKA

Slika 1. Područja primjene aditivne proizvodnje [4] ... 3
Slika 2. Koraci u aditivnoj proizvodnji [3] ... 5
Slika 3. Kvalitativno stanje proizvodnje metalnih dijelova aditivnim postupcima u odnosu na uobičajene postupke [6] ... 6
Slika 4. Podjela postupaka aditivne proizvodnje za izradu metalnih komponenti [5] ... 7
Slika 5. Proizvodi dobiveni ručnim taloženjem rastaljenog materijala sloj na sloj [7] ... 7
Slika 6. Presjek zida izrađenog WAAM postupkom [8] ... 8
Slika 7. a) robot za zavarivanje sa šest SSG; b) CNC portalni stroj za zavarivanje [10] ... 9
Slika 8. a) uređaj za lokalnu zaštitu; b) zaštitni šator [10] ... 10
Slika 9. ″Online″ valjanje [5] ... 11
Slika 10. Shematski dijagram automatiziranog planiranja procesa kod WAAM postupka [11] ... 12
Slika 11. Rezanje modela u slojeve: a) originalni model; b) model s konstantnom debljinom slojeva; c) model s varijabilnom debljinom slojeva prilagođenoj veličini modela [6] ... 14
Slika 12. ″Efekt stepenica″ prilikom izrade zida [6] ... 15
Slika 13. Usporedba prednosti i nedostataka različitih aditivnih postupaka [12] ... 16
Slika 14. Čelični stožac izrađen WAAM postupkom [9] ... 19
Slika 15. Rotor izrađen WAAM postupkom [11] ... 19
Slika 16. Model krila izrađen WAAM postupkom [13] ... 20
Slika 17. Konstrukcija krila zrakoplova od Ti6Al4V izrađena WAAM postupkom [13] ... 20
Slika 18. Postolje za slijetanje aviona izrađeno WAAM postupkom [10] ... 21
Slika 19. Detalj MAG procesa zavarivanja [15] ... 23
Slika 20. Oprema za MAG zavarivanje [15] ... 24
Slika 21. Ovisnost jakosti struje o promjeru žice i brzini dodavanja žice [17] ... 25
Slika 22. Slobodni kraj žice [17] ... 26
Slika 23. Karakteristika izvora struje za MAG zavarivanje [19] ... 27
Slika 24. Prijenos metala kratkim spojem [21] ... 29
Slika 25. Načelo prijenosa metala kratkim spojevima po fazama [22] ... 29
Slika 26. Prijenos metala prijelaznim lukom [21] ... 31
Slika 27. Prijenos metala štrcajućim lukom [21] ... 32
Slika 28. Grafički prikaz impulsnog postupka i načina otkidanja kapljice [23] ... 33
Slika 29. Robotski sustav za WAAM baziran na MAG postupku [6] ... 34
Slika 30. Razlika u geometriji zavara na početku i na kraju prolaza [6] ... 35
Slika 31. Navarena prevlaka Inconela 625 na ventil od ugljičnog čelika [25] ... 36
Slika 32. TTT dijagram legure Inconel 625 [29] ... 37
Slika 33. a) shematski prikaz procesa; b) i c) primjeri zidova od legure Inconel 625 [31] ... 38
Slika 34. Površina loma; a) gornja regija; b) srednja regija; c) donja regija; d) gornja regija s kvantitativnom analizom kemijskog sastava [31] ... 40
Slika 35. Vrijednosti mikrotvrdoće u poprečnoj (X-Z) i uzdužnoj (Y-Z) ravnini [31] ... 41

Slika 36. Presjek uzorka u X-Z ravnini; a) gornja regija; b) srednja regija; c) donja regija [31] ... 41
Slika 37. Slika rastaljenog metala na različitim slojevima; a) deseti sloj; b) peti sloj; c) prvi sloj [31] ... 42
Slika 38. Mjerenje temperature; a) shematski prikaz sistema za mjerenje temperature; b) dijagram temperature u različitim regijama [31] ... 43
Slika 39. Kotlovske cijevi obložene Inconelom 625 [33] ... 47
Slika 40. Ispušni sustav bolida Formule 1 [34] ... 47
Slika 41. Izmjenjivač topline [35] ... 48
Slika 42. Aksijalni kompenzatori [36] ... 48
Slika 43. Robotska stanica Almega OTC AX V6 [5] ... 51
Slika 44. Program za jedan prolaz ... 52
Slika 45. Pričvršćivanje ploče (podloge) prije zavarivanja ... 52
Slika 46. Putanje pištolja za zavarivanje [12] ... 54
Slika 47. a) mjerenje temperature zida; b) mjerenje visine zida ... 55
Slika 48. Prvi zid (Argon 5.0) ... 59
Slika 49. Drugi zid (Inoxline H5) ... 59
Slika 50. Uklanjanje podložne ploče ... 59
Slika 51. Uzorci nakon poliranja ... 60
Slika 52. Zid odrezan od podloge ... 61
Slika 53. Dimenzije ispitnih epruveta; a) prije ispitivanja; b) nakon ispitivanja [44] ... 61
Slika 54. Epruveta za statički vlačni pokus ... 62
Slika 55. Uzorci prije radiografskog snimanja ... 64
Slika 56. Radiogram prvog zida ... 64
Slika 57. Radiogram drugog zida ... 64
Slika 58. Detalj radiograma prvog uzorka ... 65
Slika 59. Makroizbrusak uzorka 1 ... 66
Slika 60. Makroizbrusak uzorka 2 ... 66
Slika 61. Makroizbrusak uzorka 3 ... 66
Slika 62. Makroizbrusak uzorka 4 ... 66
Slika 63. Pozicije na kojima je analizirana mikrostruktura ... 67
Slika 64. Mikrostruktura u području ZUT-a s označenim dijelovima ... 68
Slika 65. Raspored točaka mjerenja tvrdoće ... 72
Slika 66. Kidalica i uzorak tijekom ispitivanja ... 74
Slika 67. Epruveta uzorka 1 nakon ispitivanja ... 74
Slika 68. Epruveta uzorka 2 nakon ispitivanja ... 74
Slika 69. Dijagram sila-produljenje za uzorak 1 ... 75
Slika 70. Dijagram sila-produljenje za uzorak 2 ... 76
Slika 71. Dijagram sila-produljenje za uzorak 3 [39] ... 76
Slika 72. Dijagram sila-produljenje za uzorak 4 [39] ... 77
Slika 73. Usporedba porasta visine po sloju ... 78
Slika 74. Usporedba kretanja jakosti struja zavarivanja ... 80
Slika 75. Usporedba kretanja napona električnog luka ... 81

Slika 76. Usporedba unesenih toplina 81
Slika 77. Usporedba tvrdoća HV 10 82
Slika 78. Usporedba vlačnih čvrstoća i konvencionalnih granica razvlačenja 83
Slika 79. Usporedba duljina epruveta nakon ispitivanja 83

POPIS TABLICA

Tablica 1. Prednosti i nedostaci AM-a s tehnološkog i ekonomskog gledišta [5] 4
Tablica 2. Greške WAAM postupka [8] 15
Tablica 3. Materijali kod WAAM postupka [5] 17
Tablica 4. Cijena dodatnog materijala kod WAAM postupka [9] 18
Tablica 5. Usporedba OOČ i WAAM-a za konstrukciju krila zrakoplova [10] 21
Tablica 6. Usporedba OOČ i WAAM-a kod izrade postolja za slijetanje zrakoplova izrađenih od legure Ti6Al4V [10] 21
Tablica 7. Usporedba OOČ i WAAM-a kod izrade postolja za slijetanje zrakoplova izrađenih od čelika [10] 22
Tablica 8. Karakteristične vrijednosti slobodnog kraja žice [18] 26
Tablica 9. Kemijski sastav legure Inconel 625 [26] 36
Tablica 10. Mehanička svojstva legure Inconel 625 pri sobnoj temperaturi [26] 38
Tablica 11. Usporedba mehaničkih svojstava u uzdužnom smjeru (Y) i smjeru gradnje (Z) [31] 39
Tablica 12. Stupanj segregacije legirnih elemenata [31] 39
Tablica 13. Karakteristika izvora struje DP 400 [40] 51
Tablica 14. Približni kemijski sastav žice ERNiCrMo-3 [41] 53
Tablica 15. Mehanička svojstva žice ERNiCrMo-3 [41] 53
Tablica 16. Zaštitni plinovi [42] 53
Tablica 17. Parametri zavarivanja prvog zida (Argon 5.0) 56
Tablica 18. Parametri zavarivanja drugog zida (Inoxline H5) 57
Tablica 19. Određene dimenzije epruveta za ispitivanje statičkog vlačnog pokusa 62
Tablica 20. Podaci o opremi te parametri snimanja i skeniranja 63
Tablica 21. Označavanje uzoraka 65
Tablica 22. Slike mikrostrukture uzorka 1 68
Tablica 23. Slike mikrostrukture uzorka 2 69
Tablica 24. Slike mikrostrukture uzorka 3 70
Tablica 25. Slike mikrostrukture uzorka 4 70
Tablica 26. Udio karbida u mikrostrukturi u pojedinim dijelovima zida 71
Tablica 27. Izmjerene vrijednosti tvrdoće HV 10 73
Tablica 28. Rezultati statičkog vlačnog pokusa za sve uzorke 74
Tablica 29. Prosječna visina sloja i prosječan unos topline za sva četiri uzorka 78
Tablica 30. Statistički podaci za vrijednosti jakosti struje zavarivanja 79
Tablica 31. Statistički podaci za vrijednosti napona električnog luka 80
Tablica 32. Statistički podaci za vrijednosti tvrdoće 82

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
a_0	mm	Početna debljina epruvete
A_5	%	Istezanje
b_0	mm	Početna širina ispitnog područja epruvete
F_k	kN	Prekidna sila
F_m	kN	Sila razvlačenja
HB	-	Tvrdoća po Brinellu
HV	-	Tvrdoća po Vickersu
I	A	Jakost struje zavarivanja
k	-	Stupanj iskorištenja postupka zavarivanja
L_0	mm	Duljina ispitnog područja epruvete
L_c	mm	Duljina suženog dijela epruvete
L_t	mm	Ukupna duljina epruvete
L_u	mm	Duljina ispitnog područja epruvete nakon testiranja
Q	kJ/cm	Unos topline
R	Ω	Električni otpor
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja
S_0	mm^2	Površina ispitnog područja epruvete
t	s	Vrijeme
U	V	Napon zavarivanja
v_z	cm/min	Brzina zavarivanja

POPIS KRATICA

Kratica	**Opis**
Al	Aluminij
AM	Aditivna proizvodnja (engl. Additive Manufacturing)
Ar	Argon
ASTM	Američko društvo za ispitivanje i materijale (engl. American Society for Testing and Materials)
B1	Efektivna površina
B2	Neiskoristiva površina
BTF	Omjer mase sirovca i gotovog proizvoda (engl. Buy-to-Fly)
C	Ugljik
CAD	Konstruiranje pomoću računala (engl. Computer Aided Design)
CAM	Proizvodnja pomoću računala (engl. Computer Aided Manufacturing)
CMT	Hladni prijenos metala (engl. Cold Metal Transfer)
CBT	Kontrolirani prijenos metala (engl. Controlled Bridge Transfer)
Cr	Krom
Co	Kobalt
CO_2	Ugljični dioksid
CV	Konstantni napon (engl. Constant Voltage)
Fe	Željezo
MAG	Elektrolučno zavarivanje u zaštiti aktivnog plina (engl. Metal Active Gas)
MIG	Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog plina (engl. Metal Inert Gas)
Mn	Mangan
Mo	Molibden
Nb	Niobij
Ni	Nikal
O_2	Kisik
P	Fosfor
RM	Brza proizvodnja (engl. Rapid Manufacturing)
RP	Brza izrada prototipova (engl. Rapid Prototyping)
RT	Brza izrada alata (engl. Rapid Tooling)
S	Sumpor
Si	Silicij

SSG	Stupnjevi slobode gibanja
SST	Prijenos preko površinske napetosti (engl. Surface Tension Transfer)
STL	STL datoteka (engl. Standard Tessellation Language)
Ta	Tantal
Ti	Titan
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (engl. Tungsten Inert Gas)
WAAM	Aditivna proizvodnja žicom i električnim lukom (engl. Wire and Arc Additive Manufacturing)

SAŽETAK

U ovome je radu opisan postupak aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom te je detaljnije obrađeno MAG zavarivanje i prikladni modaliteti prijenosa metala u električnom luku. Navedene su osnovne karakteristike legure Inconel 625 te primjene iste u industrijskoj praksi. Dan je poseban naglasak na problematiku zavarljivosti i promjenu mikrostrukture u području zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu rada određeno je optimalno područje parametara s ciljem postizanja maksimalne produktivnosti pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom legure Inconel 625. Područje parametara određeno je za dva zaštitna plina, Argon 5.0 i Inoxline H5. Na izrađenim uzorcima provedeno je radiografsko ispitivanje, ispitana je i analizirana mikrostruktura te su provedena mehanička ispitivanja, mjerenje tvrdoće i statički vlačni pokus. Dobiveni podaci su analizirani te je donesen zaključak o utjecaju parametara zavarivanja na mikrostrukturu i mehanička svojstva zidova izrađenih WAAM postupkom.

Ključne riječi: Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom, WAAM, Inconel 625, MAG

SUMMARY

In this thesis is described the procedure for Wire and Arc Additive Manufacture, MAG welding and appropriate transmission modes of the metal in the electric arc. The basic characteristics of the Inconel 625 alloy are listed and application of this material in industrial practice. A special focus on the weldability of this material is given, and also the change of the microstructure in the welded joint.

In the experimental part of this thesis, the optimal range of parameters was determined with the aim of achieving maximum productivity of Wire and Arc Additive Manufacture of the Inconel 625 alloy. The range of parameters was determined for two shielding gases, Argon 5.0 and Inoxline H5. On the welded specimens radiography was performed, microstructure is analyzed and mechanical tests, hardness measurement and static tensile test were also performed. The obtained data were analyzed and conclusions on the influence of welding parameters on the microstructure and the mechanical properties of the welded walls are given.

Key words: Wire and Arc Additive Manufacture, WAAM, Inconel 625, MAG welding

1. UVOD

Suvremeno tržište postavlja sve strože zahtjeve pred procese razvoja i proizvodnje. Povišenje kvalitete proizvoda, razine fleksibilnosti, skraćenje vremena razvoja i proizvodnje, a posebno smanjenje troškova proizvodnje samo su neki od tih zahtjeva. Dodatni trend koji je sve uočljiviji u pojedinim segmentima tržišta je napuštanje masovne proizvodnje, te primjena sve zastupljenije maloserijske i pojedinačne proizvodnje. Kako bi se udovoljilo takvim zahtjevima tržišta, od druge polovine 1980-ih godina razvijaju se i primjenjuju suvremeni postupci aditivne proizvodnje. Glavna karakteristika takve proizvodnje je da se do gotove komponente dolazi taloženjem materijala sloj po sloj. Takav način proizvodnje omogućuje izradu komponenti vrlo složenih geometrija uz minimalan gubitak materijala, što kod klasičnih postupaka proizvodnje nije slučaj.

WAAM postupak, odnosno aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom, nova je tehnologija u aditivnoj proizvodnji koja omogućava proizvodnju metalnih komponenti navarivanjem slojeva. Ovaj postupak koristi električni luk kao izvor energije (MIG/MAG, TIG, plazma) te robota ili CNC stroj koji osiguravaju automatsko i precizno gibanje pištolja za zavarivanje. Karakterizira ga visoki depozit, niski troškovi proizvodnje te mogućnost izrade komponenti od skupih materijala kao što su nikal, titan, aluminij i njihove legure.

MAG (engl. *Metal Active Gas*) postupak zavarivanja je postupak elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom u zaštiti aktivnog plina. Postupak se razvio poslije 2. svjetskog rata u SAD-u za potrebe avioindustrije, a kasnije i u SSSR-u gdje je prvi put upotrijebljen CO_2 kao zaštitni plin umjesto argona. Razvijen je zbog potrebe za produktivnijom i kvalitetnijom izradom zavarenih spojeva, a brzo se proširio zbog pogodnosti za automatizacijom i robotizacijom procesa. Unatoč šezdesetogodišnjoj povijesti, MAG postupak se i danas stalno unapređuje, u potrazi za što ekonomičnijim i kvalitetnijim izvođenjem samog postupka.

Razvoj legure Inconel 625 započeo je 1950-ih kako bi se zadovoljili zahtjevi parnih postrojenja za visoko čvrstim materijalima. Nakon nekoliko godina istraživanja utjecaja raznih elemenata na svojstva i obradivost legura, kao rezultat 1962. godine nastala je legura Inconel 625. Legura se u današnje vrijeme ponajviše koristi zbog visoke čvrstoće, obradivosti te otpornosti na koroziju. Legura ima visoku čvrstoću zbog kombinacije legirnih elemenata molibdena i niobija s bazom od nikla i kroma. Takva kombinacija legirnih elemenata ujedno je zaslužna za izrazitu korozijsku postojanost legure.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Prema ASTM-u (engl. *American Society for Testing and Materials*) aditivna proizvodnja je „proces povezivanja materijala pri izradi objekata izravno iz 3D računalnih modela, najčešće sloj na sloj, što je suprotno postupcima obrade odvajanjem čestica“ [1].

Vrlo sličnu definiciju aditivne proizvodnje daje i hrvatska enciklopedija, koja definira aditivnu proizvodnju kao: „dio proizvodnoga strojarstva koji se bavi izradom predmeta nanošenjem čestica u tankim slojevima. Proizvodni proces započinje konstruiranjem trodimenzionalnoga modela računalnim CAD programima za modeliranje, ili digitaliziranjem prostornoga oblika već postojećega objekta trodimenzionalnim skenerima. Zatim se model pretvara u niz horizontalnih poprečnih presjeka koji se strojem za proizvodnju tvorevina otiskuju sloj po sloj do konačnog proizvoda“ [2].

Brza proizvodnja prototipova (engl. *Rapid Prototyping, RP*) počela se razvijati 1980-ih godina i tada se upotrebljavala samo za izradu prototipova. Usporedno se razvijala i brza proizvodnja kalupa/alata (engl. *Rapid Tooling, RT*), koja je zajedno s RP činila brzu proizvodnju (engl. *Rapid Manufacturing, RM*). Prema normi ASTM F42, od 2009. godine rabi se izraz aditivna proizvodnja (engl. *Additive Manufacturing, AM*) [3].

Postupcima aditivne proizvodnje mogu se izraditi dijelovi relativno komplicirane geometrije na temelju računalnog 3D modela tvorevine u relativno kratkom vremenu. No svojstva tvorevina (mehanička svojstva, dimenzijska stabilnost, izgled površine, postojanost na atmosferilije itd.) još se dosta razlikuju od tvorevina načinjenih nekim klasičnim postupcima. Visoki zahtjevi tržišta koji se orijentiraju na izradu komplicirane komponente u što kraćem vremenu postavili su pred aditivne postupke nove ciljeve u pogledu svojstava materijala, strojeva i računalne podrške. Postoje različiti načini proizvodnje aditivnim postupcima, ali svi izrađuju komponente dodavanjem materijala sloj po sloj. Glavna je prednost aditivnih postupaka to što izrađuju tvorevinu u jednom koraku, izravno iz modela. Aditivni postupci ne zahtijevaju planiranje toka procesa, izradu kalupa, specifičnu opremu za rad s materijalima, transport između radnih mjesta itd. Trenutno je glavni nedostatak ograničenje samo na određene materijale. Međutim, kako se sami aditivni postupci sve više nastoje poboljšati, današnji se prototipovi mogu upotrijebiti kao funkcionalne gotove tvorevine [3].

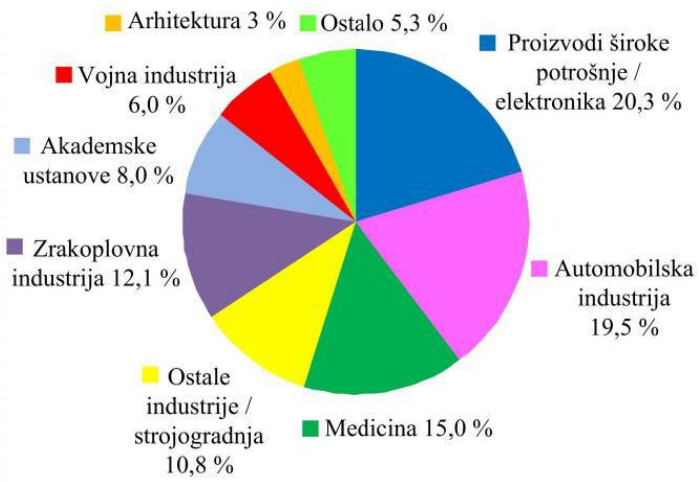
Postupci aditivne proizvodnje mogu se podijeliti prema četiri glavna čimbenika: vrsti materijala komponente, izvoru energije, postupku oblikovanja sloja i obliku gotove komponente. Ti čimbenici utječu na kvalitetu završne površine, dimenzijsku preciznost, mehanička svojstva, vrijeme i cijenu proizvodnje [3].

U aditivnim postupcima razlikuju se tri koraka [3]:

- rezanje modela u slojeve
- slaganje
- kombiniranje slojeva.

Aditivna proizvodnja može skratiti vrijeme i sniziti trošak potreban za izradu nove komponente od početnoga koncepta do proizvodnje. Aditivni postupci mogu pomoći u prepoznavanju osnovnih pogrešaka na komponentama koje su u kasnijim fazama njihove proizvodnje skupe za ispravljanje. Međutim, AM dijelovi nisu jeftini (na njihovu cijenu utječe: vrijeme izrade, cijena potrebne opreme i održavanje iste, rad operatera – tijekom izrade, naknadne obrade i čišćenja, cijena osnovnog materijala i cijena materijala za potpornu strukturu). Katkad je teško odlučiti koliko komponenti treba načiniti da se dobije maksimalna iskoristivost od njih [3].

Područje primjene aditivne proizvodnje je vrlo široko, od proizvoda široke primjene preko automobilske i zrakoplovne industrije do arhitekture. Slika 1 prikazuje područja primjene aditivne proizvodnje.



Slika 1. Područja primjene aditivne proizvodnje [4]

Aditivni postupci kod izrade metalnih dijelova složene geometrije imaju zavidnu poziciju u odnosu na klasične procese izrade. U automobilskoj i zrakoplovnoj industriji omogućuju

izradu lakših dijelova i dobivanje boljih karakteristika što direktno utječe na manju potrošnju goriva i manje troškove. Također omogućuju izradu sklopova iz jednog dijela što je klasičnim postupcima nemoguće te se time smanjuje broj pojedinačnih dijelova. Aditivna proizvodnja je efikasan način izrade dijelova od skupih materijala poput titana i nikla te njihovih legura koji se većinom primjenjuju u zrakoplovnoj industriji. Još jedna od prednosti AM pred klasičnim postupcima je mogućnost potpune automatizacije procesa aditivne proizvodnje iz modela, što omogućuju CAD/CAM sustavi te se time smanjuje vrijeme proizvodnje i ljudski rad. Iako program za CNC stroj može biti automatski generiran iz CAD modela, za dijelove složene geometrije potrebno je nekoliko prihvata obratka čime se povećava vrijeme rukovanja, broj stezanja obratka i proces umjeravanja nakon prihvata. Kao i svaki postupak proizvodnje, aditivna proizvodnja ima ograničenja u svojoj primjeni. Jedan od nedostataka je kvaliteta površine koja utječe na dimenzije i kvalitetu proizvedene komponente [5]. Tablica 1 prikazuje prednosti i nedostatke AM-a s tehnološkog i ekonomskog gledišta.

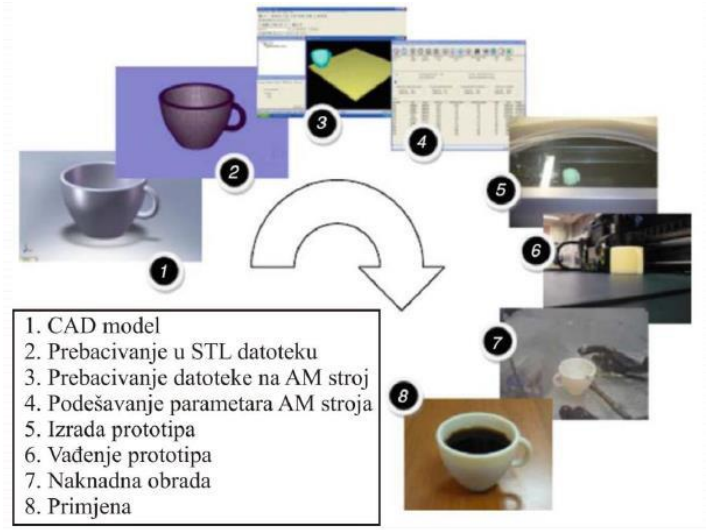
Tablica 1. Prednosti i nedostaci AM-a s tehnološkog i ekonomskog gledišta [5]

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

U svim postupcima aditivne proizvodnje faze izrade do gotovog proizvoda su iste, i to su [3]:

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

Slikom 2 prikazan je raspored koraka u aditivnoj proizvodnji.

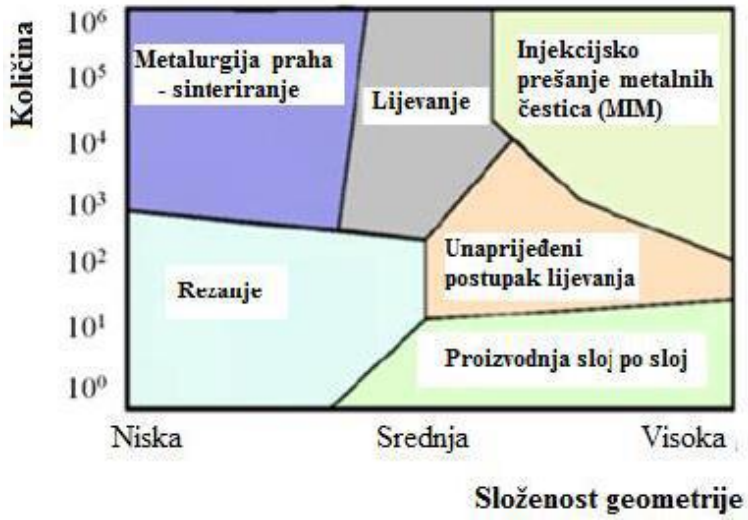


Slika 2. Koraci u aditivnoj proizvodnji [3]

2.1. Aditivna proizvodnja metalnih materijala

U zadnjih 30 godina, aditivna proizvodnja metalnih komponenti je doživjela veliku primjenu i privukla veliku pažnju u mnogim granama industrije, posebice za izradu dijelova i prototipova. U početku se AM koristila za proizvodnju dijelova od polimera u istraživačke svrhe, a danas se koriste za izradu gotovih komponenti. Mogućnosti izrade prototipova u kratkom vremenu iz CAD modela omogućila je primjenu AM u zrakoplovnoj industriji, autoindustriji i industriji za brzu izradu alata. Danas su mnoga istraživanja usmjerena proizvodnji metalnih komponenti kompleksne geometrije, s materijalima poput titana i nikla s kojima se klasičnim metodama teško može ekonomično proizvoditi [6].

Slika 3 prikazuje položaj aditivne proizvodnje metalnih materijala u odnosu na ostale tehnologije. Iz nje se može zaključiti da je AM pogodna za izradu dijelova srednje do visoke složenosti geometrije i relativno malih količina proizvoda.



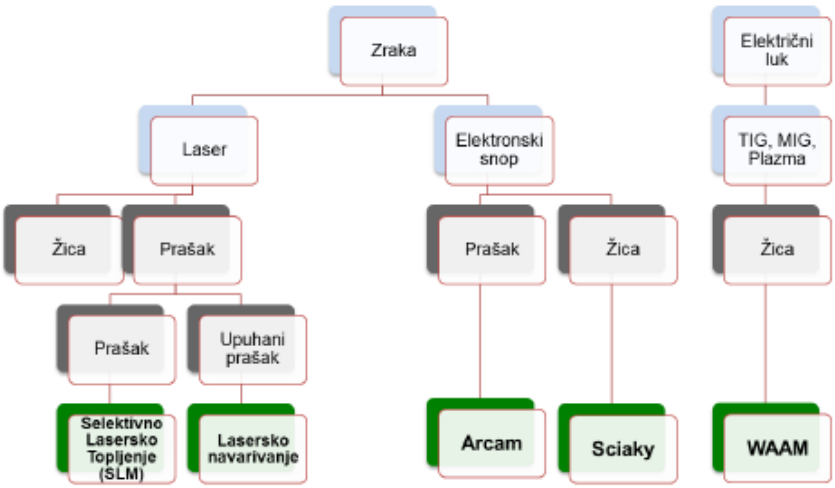
Slika 3. Kvalitativno stanje proizvodnje metalnih dijelova aditivnim postupcima u odnosu na uobičajene postupke [6]

Postupci koji koriste prašak kao dodatni materijal bolje su razvijeni od postupaka koji za dodatni materijal koriste žicu. Razlog tome je to što prašak omogućava proizvodnju dijelova s vrlo visokom geometrijskom točnošću. Tipična debljina slojeva proizvedenih ovim postupkom kreće se između 20 μm i 100 μm, tolerancije proizvedenih dijelova iznose ± 0,05 mm, dok se kvaliteta površine kreće između 9 μm i 16 μm. Glavna mana postupaka koji koriste prašak za dodatni materijal je iznimno niska proizvodnost, tj. prosječni depozit materijala iznosi 10 g/min, što uvelike ograničava proizvodnju pa se koristi samo za izradu dijelova malih dimenzija [6].

Ovisno o izvoru energije za zavarivanje, postupak aditivne proizvodnje žicom može se podijeliti u tri grupe: zavarivanje laserom, elektronskim snopom i električnim lukom. Proizvodnost aditivnog postupka sa žicom puno je veća od proizvodnosti postupaka koji koriste prašak kao dodatni materijal. Također, korištenje žice kao dodatnog materijala je ekološki prihvatljiviji postupak i operateri nisu izloženi prašku koji ima potencijalno negativan utjecaj na zdravlje. Količina depozita kreće se do 2500 cm^3/h (330 g/min za nehrđajuće čelike). Postoji velika razlika između količine depozita i rezolucije između ove dvije vrste postupaka pa treba odabrati onoga koji je pogodniji za izradu određene komponente. Tako je postupak sa žicom ekonomski isplativiji kod izrade velikih komponenti zbog veće količine depozita, ali posljedica toga su smanjena rezolucija i geometrijska točnost

proizvedenih komponenti. Žica kao dodatni materijal je višestruko jeftinija i dostupnija od praška što je značajna prednost u odnosu na postupke koji koriste prašak [6].

Slikom 4 su prikazani najčešće korišteni postupci aditivne proizvodnje za proizvodnju metalnih komponenti.

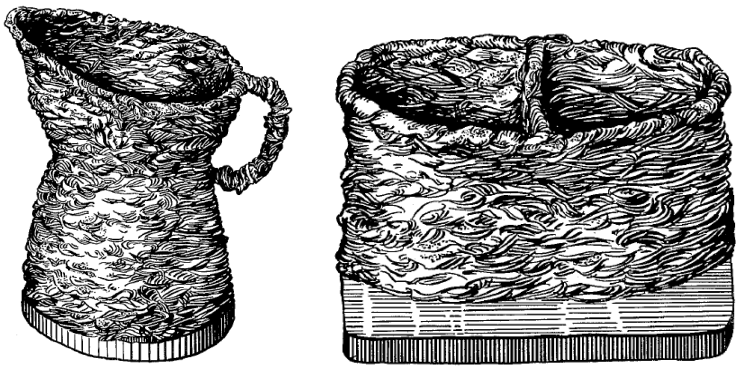


Slika 4. Podjela postupaka aditivne proizvodnje za izradu metalnih komponenti [5]

2.2. Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom

Postupak aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom, ili skraćeno WAAM, je tehnologija koja omogućava aditivnu proizvodnju metalnih komponenti navarivanjem sloj po sloj koristeći električni luk kao izvor topline.

WAAM postupak prvi puta se spominje 1925. godine kada Baker počinje koristiti ručno elektrolučno zavarivanje za izradu 3D modela taloženjem rastaljenog materijala sloj na sloj [7]. Slikom 5 prikazani su primjeri posuda dobivenih ovom proizvodnom metodom.

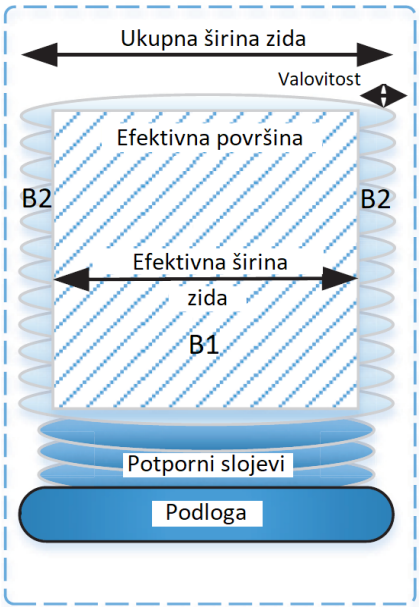


Slika 5. Proizvodi dobiveni ručnim taloženjem rastaljenog materijala sloj na sloj [7]

Ova tehnologija kombinacijom elektrolučnog zavarivanja i dodavanja žice omogućuje slobodu u dizajnu komponente, BTF omjer od 1,2, izradu proizvoda različitih veličina i kraće vrijeme izrade. BTF je omjer mase sirovca i gotovog proizvoda te je poželjno da on bude što bliži jedinici. Usporedbom WAAM postupaka s klasičnim postupcima izrade komponenti, smanjenje otpada je drastično, od 90 % do 10 %. Sve navedene karakteristike čine postupak pogodnim za fleksibilnu izradu funkcionalnih dijelova po narudžbi od vrlo skupih materijala [8].

Kod WAAM postupka kapljice metala se talože jedna do druge u slojevima. Rezultat takvog taloženja kapljica je ravan metalni zid minimalne širine 1 mm do 2 mm, uključujući ″valovitost″. Ta ″valovitost″, koja nastaje tijekom zavarivanja na svakom sloju, mora se ukloniti naknadnim postupcima obrade kako bi se eliminirale površinske nepravilnosti [8]. Količina nataloženog materijala kreće se od 50 g/min do 130 g/min, a kod lasera ili elektronske zrake iznosi od 2 g/min do 10 g/min [5].

Na slici 6 prikazan je presjek zida napravljenog WAAM postupkom. Potrebno je uočiti razliku između ukupne širine zida i efektivne širine zida.



Slika 6. Presjek zida izrađenog WAAM postupkom [8]

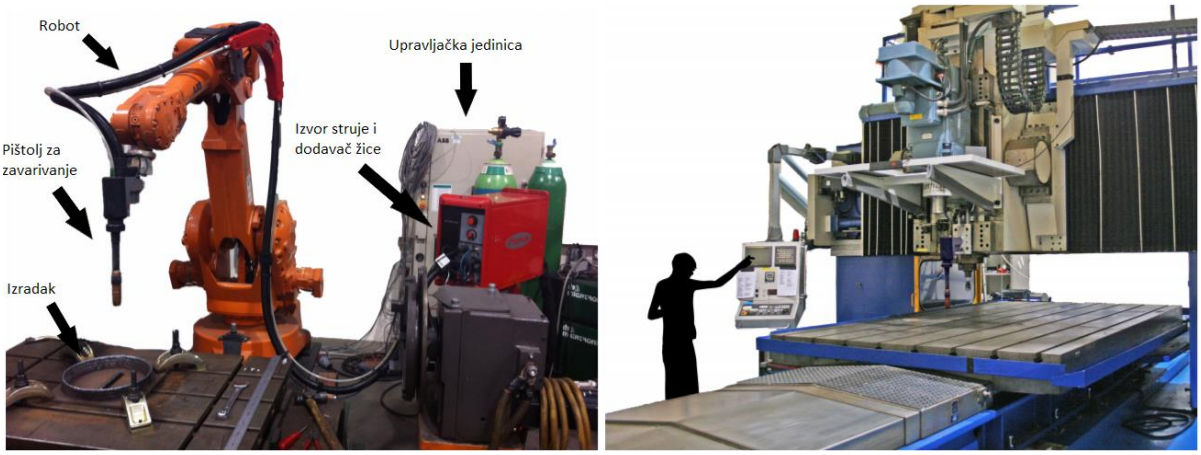
Iz prikazanih površina presjeka zida može se odrediti efikasnost nanošenja depozita. Potrebno je izračunati efektivnu površinu (B1) i površinu koja se uklanja naknadnom obradnom (B2). Iz efikasnosti nanošenja depozita može se procijeniti je li postupak optimalan ili je potrebno

promijeniti parametre zavarivanja za dobivanje manjih količina materijala koji mora biti uklonjen [7].

$$Efikasnonst\ nanošenja\ depozita = \frac{B1}{B1 + B2}\ ,\quad \% \tag{1}$$

2.2.1. Oprema za WAAM postupak

WAAM sustav uglavnom koristi standardnu opremu za zavarivanje: izvor struje (osigurava električni luk koji tali žicu), uređaj za dodavanje žice (upravlja količinom depozita), pištolj za zavarivanje, robot ili CNC stroj (omogućava gibanje po zadanoj putanji), upravljačku jedinicu (upravlja robotom ili CNC strojem). Budući da se za taljenje materijala koristi električni luk, primjenjuju se MIG/MAG, TIG te plazma postupci zavarivanja [9]. Slikom 7 prikazana je osnovna oprema koja se koristi za WAAM postupak.



(a) (b)

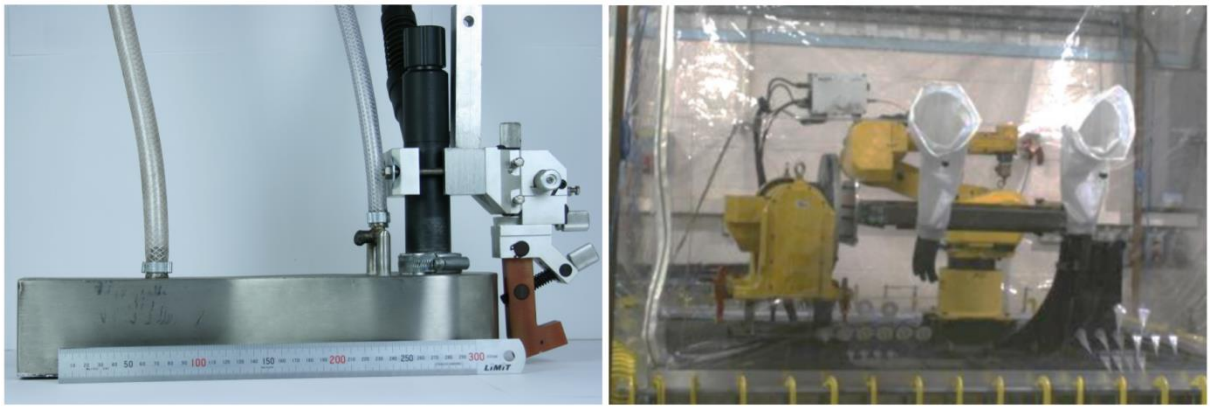
Slika 7. a) robot za zavarivanje sa šest SSG; b) CNC portalni stroj za zavarivanje [10]

2.2.2. Dodatna zaštitna oprema za WAAM postupak

Ovisno o vrsti materijala koji se taloži, ponekad postoji potreba za stvaranjem dodatne zaštitne inertne atmosfere. Za materijale kao što su aluminij i čelik, zaštitni plin koji dolazi kroz sapnicu pištolja za zavarivanje tijekom taloženja je dovoljan. Međutim, kod materijala otpornih na visoke temperature i titana, izrazito je bitna dodatna zaštita prilikom taloženja slojeva. Pa tako postoji dodatna zaštitna oprema u obliku lokalnog uređaja ili, ono češće korišteno, komora ili šator ispunjeni zaštitnim plinom.

Lokalni uređaji (slika 8a) omogućuju manju potrošnju plina i produžuje autonomiju sustava, ali im je nedostatak taj da postoji opasnost od ulaska zraka, koji može prouzročiti lošu zaštitu. Također, lokalni uređaji za zaštitu moraju biti na malim udaljenostima od područja zavarivanja [10].

Drugo rješenje je komora ili šator (slika 8b). Gledano s praktičnog i ekonomskog stajališta, šator je bolji od komore. Šator je jeftiniji i lako prilagodljiv raznim veličinama, omogućuje lakše ispumpavanje zraka i naknadno upumpavanje zaštitnog plina. Šator zahtjeva tri ciklusa pumpanja kako bi razina kisika bila ispod 200 ppm, a taj postupak je mnogo kraći i troši se manje zaštitnog plina nego kod komore [10].



(a) (b)

Slika 8. a) uređaj za lokalnu zaštitu; b) zaštitni šator [10]

2.2.3. Problemi kod WAAM postupka

Problemi koji nastaju WAAM postupkom zbog visokog unosa topline su [5]:

- zaostala naprezanja koja uzrokuju lošija mehanička svojstva komponenti
- deformacije koje dovode do poteškoća u postizanju zahtijevanih tolerancija.

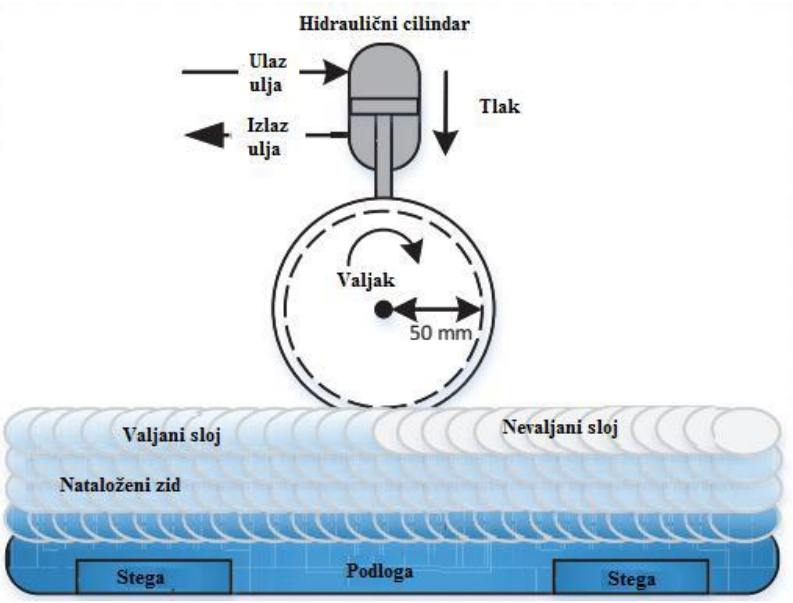
Kako bi se što više reducirali navedeni problemi postoje različite radnje kroz proces taloženja. Prilikom izrade dijelova WAAM postupkom razlikujemo [5]:

- radnje prije taloženja
- radnje za vrijeme taloženja
- radnje nakon taloženja.

U radnje prije taloženja se ubrajaju optimiranje parametara, učvršćivanje podloge i optimizacija taloženja metala sloj po sloj. Najveći utjecaj na smanjenje deformacije imaju učvršćivanje i način taloženja, dok izbor parametara ima mali utjecaj.

Radnje za vrijeme taloženja su najučinkovitije za smanjenje deformacija i naprezanja. Kako bi se spriječilo deformiranje podloge prilikom izrade zida, potrebno je ostvariti taloženje materijala s obje strane podloge. Najpovoljnije je kada se s obje strane podloge nalaze komponente jednake geometrije. Tako dobivena uravnotežena komponenta ima snažan utjecaj na smanjenje deformacije, ali nema utjecaja na zaostala naprezanja. Jedan od načina

uklanjanja zaostalih naprezanja je optimizacija vremena hlađenja. Optimizacija vremena hlađenja podrazumijeva pravilan odabir vremena tijekom kojeg će se postojeća toplina koristiti za predgrijavanje prije nanošenja sljedećeg sloja. Kako bi se poboljšala učinkovitost procesa i nadoknadilo vrijeme za hlađenje zida, moguće je koristiti paralelno nanošenje slojeva. Drugi način uklanjanja zaostalih naprezanja koji se sve više koristi je tzv. ″online″ valjanje prikazano slikom 9. ″Online″ valjanje se koristi kao valjanje nakon nanesenog sloja, a oprema za valjanje sastoji se od hidrauličkog cilindra koji osigurava pritisak valjka (određenog profila i veličine) na naneseni sloj. Istraživanja su pokazala da primjena ″online″ valjanja ima značajan pozitivan utjecaj na mikrostrukturu i smanjenje zaostalih naprezanja [5].



Slika 9. ″Online″ valjanje [5]

Ovakvim načinom valjanja dobiva se [5]:

- smanjenje zaostalih naprezanja
- smanjenje valovitosti i ujednačena visina nanesenog sloja
- dobivanje povoljnije mikrostrukture (smanjenje veličine zrna).

Istraživanja su pokazala da valjanje utječe na: smanjenje zaostalih naprezanja, manje pukotina nastalih uslijed zamora materijala, poboljšanje mehaničkih svojstava (povećanje vlačne čvrstoće za 19 % i granice razvlačenja za 26 %) [5].

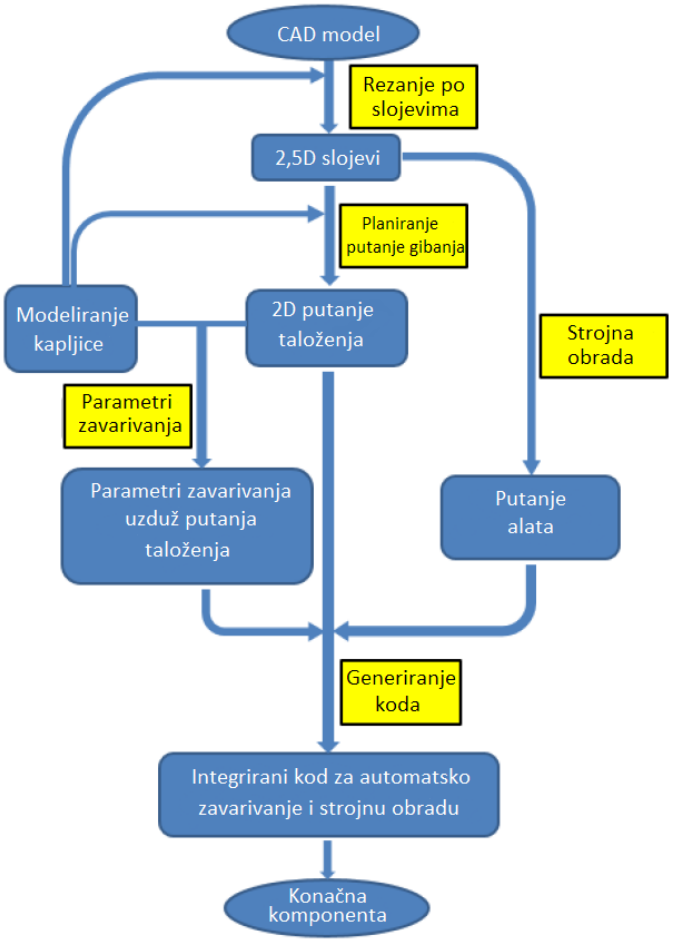
Radnje nakon taloženja su klasični postupci toplinske obrade nakon nanesenog posljednjeg sloja [5].

2.2.4. Planiranje procesa kod WAAM postupka

U aditivnoj proizvodnji, pa tako i kod WAAM postupka, princip rada zasniva se na generiranju 3D CAD modela. Planiranje procesa je potpuno automatizirano, odnosno od CAD modula do gotovog proizvoda. Cijeli taj proces sastoji se od sljedećih modula [11]:

- modul za rezanje modela
- modul za planiranje putanje gibanja
- modul za parametre zavarivanja
- modul za strojnu obradu
- modul za generiranja koda za robot ili CNC stroj.

Slikom 10 prikazan je shematski dijagram automatiziranog planiranja procesa kod WAAM postupka.



Slika 10. Shematski dijagram automatiziranog planiranja procesa kod WAAM postupka [11]

3D CAD model proizvoda prvo se prebacuje u STL (engl. *Standard Tessellation Language*) format te se kroz modul za rezanje presijeca u skup 2,5D slojeva. Tada modul za planiranje

putanje gibanja generira putanje taloženja za svaki sloj. Sukladno tim generiranim putanjama, određena je i geometrija svake pojedine kapljice na toj putanji [11].

Geometrija kapljica kontrolira dvije ključne varijable za rezanje slojeva i planiranje putanja, tj. definira debljinu slojeva i udaljenost između središta zavara. Nadalje, određuje automatski optimalne parametre zavarivanja kojima se postiže ta tražena geometrija. Ti parametri zavarivanja su brzina dodavanja žice, brzina zavarivanja i slobodni kraj žice [11].

Modul za strojnu obradu generira putanje alata za obradu nakon zavarivanja. Putanje alata mogu se generirati pomicanjem (*offset*-om) granica svakog presječenog sloja za polovicu promjera obradnog alata [11].

Zatim se putanje taloženja depozita, automatski odabrani parametri zavarivanja i putanje alata za obradu generiraju u integrirani kod kroz modul za generiranja koda [11].

Naposljetku, prvo se pomoću automatskog robotskog ili CNC sustava zavarivanja proizvodi komponenta blizu konačne dimenzije (engl. *near-net shape*), a nakon toga završna komponenta s konačnim dimenzijama (engl. *net shape*) koja se dobiva robotskom ili CNC strojnom obradom [11].

2.2.5. Izazovi WAAM postupka

2.2.5.1. Zaostala naprezanja i deformacije

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

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

Postoji nekoliko metoda kojima se reduciraju utjecaji zaostalih naprezanja i pojava deformacija [9]:

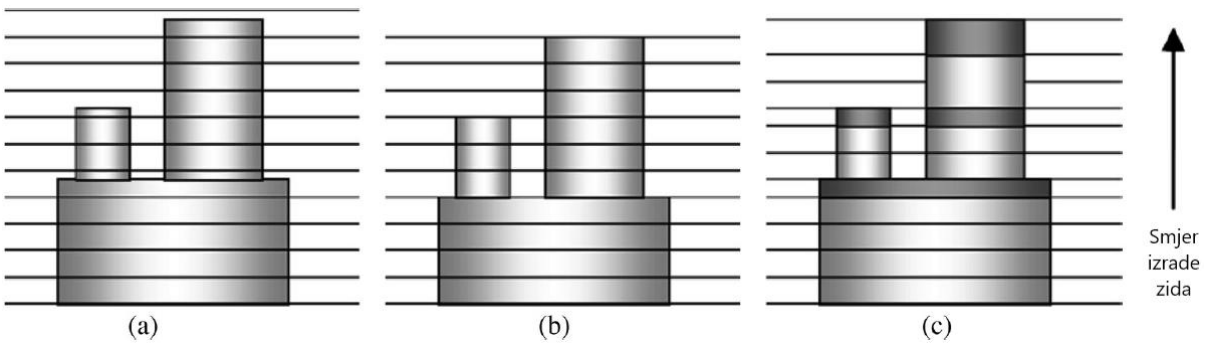
- Simetrično slaganje – kod ove metode se postavlja ravnina simetrije u skladu s volumenom komponente. Taloženje materijala treba biti ravnomjerno i odvija se naizmjenično sa svake strane u odnosu na ravninu simetrije. Time nataloženi sloj na jednoj strani stvara naprezanje koje se uravnotežuje s naprezanjem na suprotnoj strani. Još jedna prednost ove metode je učinkovitije upravljanje unosom topline,

odnosno, dok se na jedan dio nanosi novi sloj depozita, drugi dio se hladi. Nedostatak ove metode je potreba za dodatnom obradom.

- ″Back to back″ slaganje – ova metoda omogućava dobro upravljanje unosima topline. Uvijek se izrađuju dvije komponente. Koristi se kod izrade simetričnih dijelova, kao npr. kod izrade krila zrakoplova. Prije razdvajanja dijelova cijeli obradak se toplinski obrađuje zbog smanjenja zaostalih naprezanja.
- Optimiranje orijentacije dijelova – dijelovi se pozicioniraju na način da se postignu što kraći slojevi taloženja jer su kod kraćih prolaza manje deformacije i zaostala naprezanja.
- Visokotlačno valjanje – metoda koja se često koristi kod titana i njegovih legura za rješavanje problema s β fazom. Ona se koristi za postizanje optimalne mikrostrukture i uklanjanje zaostalih naprezanja, ali ima nedostatak što je primjenjiva samo na jednostavnijim komponentama.

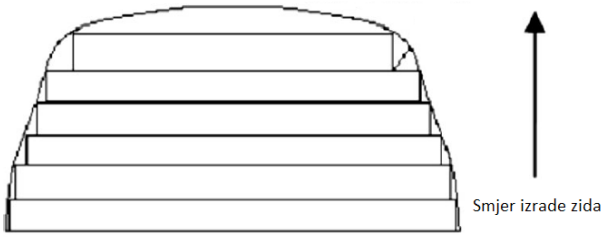
2.2.5.2. Točnost i kvaliteta površine

Dva su važna čimbenika koja utječu na točnost oblika komponente. Prvi čimbenik su već spomenute deformacije izazvane zaostalim naprezanjima, dok je drugi važan čimbenik rezanje modela na slojeve koji uzrokuje stepeničasti efekt i višak materijala. Slikom 11a prikazan je primjer modela neke komponente. Do viška materijala dolazi kada se model izreže na slojeve konstantne debljine (slika 11b). Rješenje ovog problema je prilagodljiva strategija rezanja koja uključuje rezanje modela u slojeve različite debljine. Takva strategija omogućuje automatsko podešavanje debljine sloja u određenom rasponu kako bi se dobio točan oblik modela (slika 11c) [6].



Slika 11. Rezanje modela u slojeve: a) originalni model; b) model s konstantnom debljinom slojeva; c) model s varijabilnom debljinom slojeva prilagođenoj veličini modela [6]

Prilikom taloženja slojeva jednake debljine pojavljuje se ″efekt stepenica″ čime se ne može dobiti zakrivljeni oblik profila zida. Dimenzionalne greške koje su normalna pojava kod taloženja prikazane su slikom 12. Što je veća debljina nanesenog sloja, veća će biti greška proizvedene komponente. Iz toga proizlazi da je točnost komponenti proizvedenih s WAAM postupkom oko 10 puta lošija od onih napravljenih s postupkom kod kojeg se koristi prašak. WAAM postupak je efikasan za jednostavnije geometrije jer ima veću količinu depozita. Kada je potrebna visoka točnost, dijelovi napravljeni WAAM postupkom zahtijevaju naknadnu strojnu obradu [6].



Slika 12. ″Efekt stepenica″ prilikom izrade zida [6]

Kod WAAM postupka površina izrađene komponente sastoji se od velikog broja prolaza koji su jedan do drugoga, sa ili bez preklapanja. Oblik svakog prolaza više sliči paraboli nego pravokutniku. Dobiva se završna površina koja se često naziva hrapavost površine ili tzv. ″valovitost″ (slika 6). Stoga, točni modeli za opis geometrije za jedan metal zavara, kao i za preklapanje više metala zavara, imaju važnu ulogu u određivanju kvalitete površine proizvedenih komponenti.

2.2.5.3. Greške kod WAAM postupka

Greške koje se pojavljuju kod WAAM postupka su poroznost, ugorine i nadvišenje zavara te su prikazane u tablici 2.

Tablica 2. Greške WAAM postupka [8]

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

2.2.6. Prednosti i nedostaci WAAM postupka

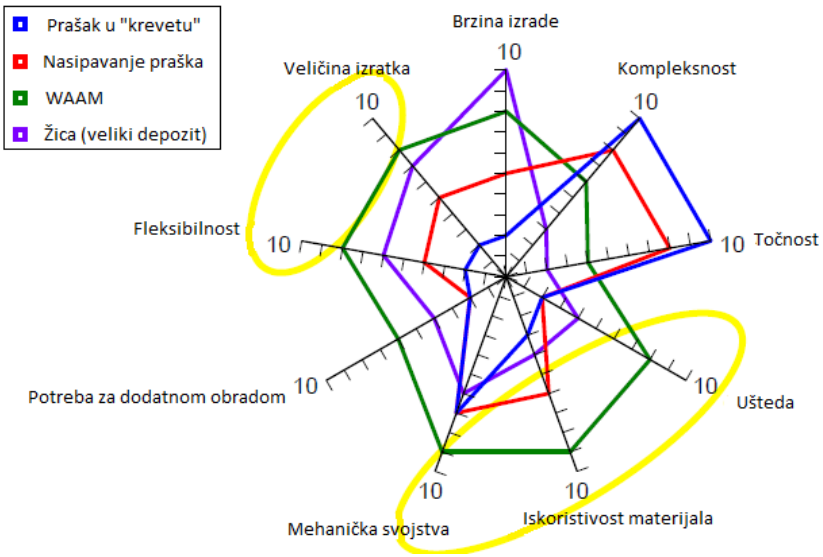
Prednosti WAAM postupka [10]:

- mogućnost izrade komponenti od skupih materijala kao što su nikal, titan i njihove legure (primjena u zrakoplovnoj industriji)
- automatizacija proizvodnog procesa koja rezultira smanjenim vremenom proizvodnje i ljudskog rada
- upotreba kod proizvodnje komponenati sa složenom geometrijom
- smanjenje gubitka materijala
- velika količina depozita
- niži troškovi proizvodnje
- mogućnost strojne obrade tijekom procesa
- nema ograničenja u veličini
- mogućnost primjene izvora struje i manipulatora bilo kojeg proizvođača.

Nedostaci WAAM postupka [10]:

- pojava zaostalih naprezanja i deformacija radi visokog unosa topline
- pojava poroznosti
- neujednačena geometrija zavara (vidljivo kod velikih podloga jer se unos topline razlikuje na početku i završetku zavarivanja)
- potrebna naknadna obrada odvajanjem čestica.

Slika 13 prikazuje grafičku usporedbu prednosti i nedostataka različitih aditivnih postupaka.



Slika 13. Usporedba prednosti i nedostataka različitih aditivnih postupaka [12]

2.2.7. Materijali kod WAAM postupka

Postoji veći broj materijala koji se koriste kod WAAM postupka, ali prvenstveno se koriste materijali na bazi željeza, titana i aluminija. Prilikom primjene pojedinog materijala za izradu komponente WAAM postupkom cilj je postići zadovoljavajuća mehanička svojstva i spriječiti nastanak grešaka. Također, ovim postupkom je moguće kombiniranje različitih metalurški kompatibilnih materijala [9]. Tablicom 3 su prikazani materijali koji se najčešće primjenjuju kod WAAM postupka.

Tablica 3. Materijali kod WAAM postupka [5]

Titan	Ti-6Al-4V
Aluminij	AlCu (2024, 2319), AlSi (4043), AlMg (5087)
Vatrootporni materijali	Volfram, molibden, tantal
Čelik	Nelegirani i niskolegirani (ER60, ER80, ER90, ER120), martenzitni (250 i 350), nehrđajući (17-4 PH, 316L)
Inconel	625, 718

Titan, i najčešće primjenjiva titanova legura Ti6Al4V spadaju u α-β leguru. Koristi se kod aditivne proizvodnje dijelova trupa i motora aviona, u kemijskoj industriji, za implantate i proteze u medicinskoj industriji te kod izrade turbina. Ovu leguru karakteriziraju različite vrijednosti vlačne čvrstoće i produljenja u različitim smjerovima, izdužena zrna i vrlo dobra tekstura, što rezultira visokom čvrstoćom u smjeru paralelnom na slojeve. Problem koji se javlja kod ove legure je izdužena grubozrnata struktura [9]. Najprikladniji način za rješavanje tog problema je već spomenuto ″online″ valjanje tijekom postupka taloženja. Na taj način usitnjavaju se zrna čime se postižu bolja mehanička svojstva, poboljšava se dimenzijska točnost zida te se eliminiraju naprezanja u uzdužnom i poprečnom smjeru. Za zavarivanje titana najčešće se koriste TIG ili plazma postupci zavarivanja. Prilikom zavarivanja potrebno je osigurati potpuno inertnu atmosferu, a to se postiže uporabom komore, šatora ili lokalnog uređaja.

Kod WAAM postupka s aluminijem i njegovim legurama treba obratiti pozornost na stvaranje pora i moguće pukotine u materijalu. Da bi se izbjegli mogući problemi radi se kontrola mikrostrukture, žica mora biti kvalitetna i dobro skladištena, potrebna je naknadna toplinska

obrada, te se kao i kod titanovih legura primjenjuje valjanje između slojeva kako bi se dobila odgovarajuća mikrostruktura, a time i povoljnija mehanička svojstva [12].

Tablicom 4 prikazana je usporedba cijena dodatnih materijala koji se najčešće koriste kod WAAM postupka. Cijena pojedinog materijala ovisi o promjeru žice te kemijskom sastavu legure.

Tablica 4. Cijena dodatnog materijala kod WAAM postupka [9]

Materijal	Cijena, kn / kg
Čelik	20 – 150
Aluminij	60 – 1000
Titan	1000 – 2500

2.2.8. Primjena WAAM postupka

WAAM postupak koristi se u proizvodnji dijelova od raznih vrsta materijala kao što su titan, aluminij, čelik, bakar, nikal, njihove legure itd. Koristi se za izradu srednjih do velikih dijelova te dijelova srednje složenosti.

Primjenjuje se u raznim industrijama, uključujući zrakoplovnu i automobilsku industriju, brzu izradu alata, itd. Automobilska industrija koristi WAAM kao uspješan alat u konstrukciji i izradi prototipa automobilskih komponenti jer se time znatno skraćuje vrijeme razvoja i smanjuju troškovi proizvodnje, kao i troškovi samog proizvoda. Industrija alata primjenjuje WAAM za izradu funkcionalnih komponenti alata [6].

Zrakoplovne komponente često imaju složene geometrije koje se izrađuju od skupih materijala kao što su legure titana i nikla. Zrakoplovna industrija zahtijeva mali BTF omjer, a upravo je to jedna od prednosti WAAM postupka. Toj grani industrije najzanimljiviji materijal je titan i njegove legure iz razloga što proizvođači sve više koriste ugljična vlakna koja nisu kompatibilna s aluminijem. Titan je kompatibilan s ugljičnim vlaknima i zamjenjuje aluminij u mnogim primjenama te se predviđa njegova sve veća primjena u budućnosti [10].

Sljedećim primjerima dan je pregled nekih dijelova koji su napravljeni WAAM tehnologijom.

Slikom 14 prikazan je čelični stožac izrađen MAG CMT postupkom s količinom depozita 2,6 kg/h. Debljina zida je 2,5 mm (nakon obrade 2 mm) te BTF omjer 1,25 [9].

Slika 14. Čelični stožac izrađen WAAM postupkom [9]

Slikom 15 prikazan je jednostavan rotor izrađen WAAM postupkom. Odabrana je brzina dodavanja žice 5 m/min, a brzina zavarivanja iznosila je 80 cm/min. Svaki sloj ima prosječnu debljinu 1,8 mm. Tijekom procesa zavarivanja između prolaza provodilo se odgovarajuće vrijeme hlađenja podloge. Rotor je napravljen u 40 prolaza u vertikalnom smjeru te je dobivena debljina rotora od 70 mm. Na slici je vidljivo da je nakon WAAM postupka provedena naknadna strojna obrada polovice rotora [11].

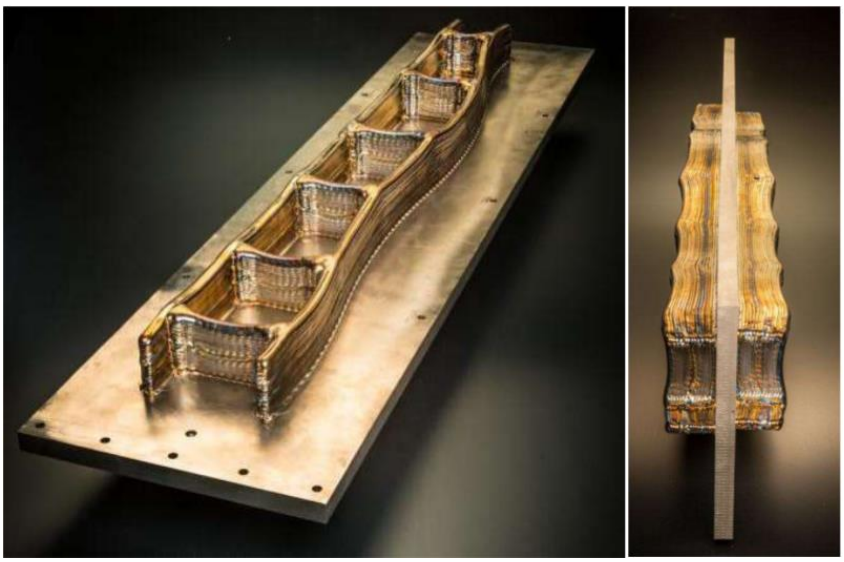
Slika 15. Rotor izrađen WAAM postupkom [11]

Slika 16 prikazuje 0,9 m visok model krila izrađenog od visokočvrstog čelika u svrhu testiranja u zračnom tunelu. Model je izrađen MAG CMT postupkom (*Fronius*) zavarivanja s količinom depozita od 3 kg/h. Zbog promjenjive debljine stijenke korišteno je njihanje. Jedan od glavnih problema kod izrade krila je akumulacija topline. Nakon taloženja svakog sloja

proveden je proces hlađenja komprimiranim zrakom u trajanju od dvije minute. Izrada krila trajala je 28 h, od čega 20 h taloženja, a 8 h hlađenja između prolaza [13].

Slika 16. Model krila izrađen WAAM postupkom [13]

Na slici 17 prikazana je 1,2 m dugačka potporna konstrukcija krila zrakoplova izrađena od titanove legure Ti6Al4V. Kako bi se smanjile deformacije koje se mogu pojaviti duž uzdužnog pravca, primjenjuje se ″Back to back″ metoda, odnosno dva krila izrađuju se istovremeno, i to naizmjenično s jedne pa nakon toga s druge strane podloge. Ova metoda omogućava dobro upravljanje unosima topline. Prije odvajanja dijelova od podloge potrebna je naknadna toplinska obrada za eliminaciju zaostalih naprezanja. Količina nataloženog materijala iznosi 0,75 kg/h, a BTF omjer 2,2. U usporedbi s klasičnim načinom izrade iz bloka materijala, ušteda u troškovima je 29 % [13].



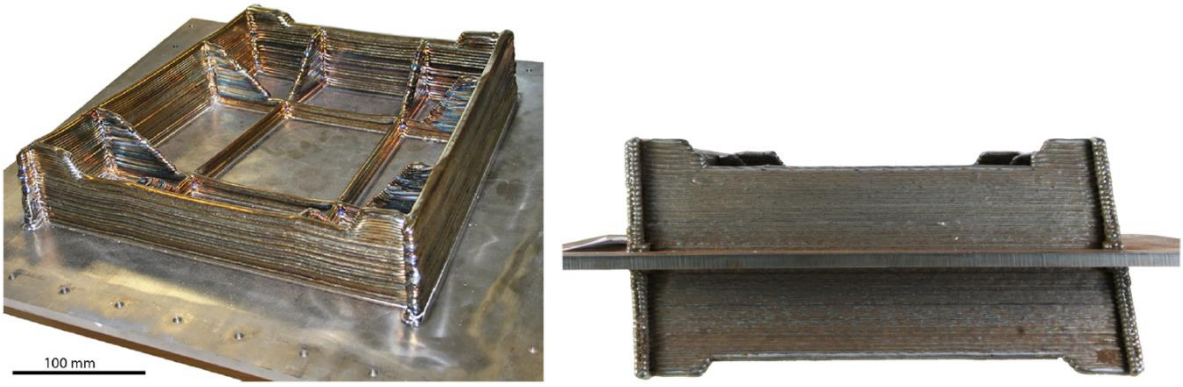
Slika 17. Konstrukcija krila zrakoplova od Ti6Al4V izrađena WAAM postupkom [13]

U tablici 5 prikazana je usporedba obrade odvajanjem čestica i WAAM postupka za prethodni primjer na temelju troškova izrade i BTF omjera.

Tablica 5. Usporedba OOČ i WAAM-a za konstrukciju krila zrakoplova [10]

Tip obrade	BTF	Troškovi, kn	Smanjenje troškova
Obrada odvajanjem čestica	6,5	72 000	-
WAAM	2,15	51 000	29 %

Slika 18 prikazuje postolje za slijetanje aviona izrađeno od titanove legure Ti6Al4V. Količina nataloženog materijala iznosi 0,8 kg/h, a masa ukupno nataložene komponente 24 kg. Rađena su dva dijela, svaki s jedne strane podloge kako bi se osigurala simetričnost. Dio se sastoji od T spojeva, spojeva pod različitim kutom i preklopnih spojeva. BTF omjer je 1,14, a ušteda materijala WAAM postupkom iznosi 220 kg [9].



Slika 18. Postolje za slijetanje aviona izrađeno WAAM postupkom [10]

Tablicom 6 dan je prikaz troškova izrade postolja za slijetanje zrakoplova napravljenih od titanove legure.

Tablica 6. Usporedba OOČ i WAAM-a kod izrade postolja za slijetanje zrakoplova izrađenih od legure Ti6Al4V [10]

Tip obrade	BTF	Troškovi, kn	Smanjenje troškova
Obrada odvajanjem čestica	12	162 000	-
WAAM	2,3	50 000	69 %

Isto takvo postolje izrađeno je od čelika. Konačni proizvod ima masu 36 kg. U tablici 7 dan je prikaz cijena izrade postolja za slijetanje zrakoplova napravljenih od čelika.

Tablica 7. Usporedba OOČ i WAAM-a kod izrade postolja za slijetanje zrakoplova izrađenih od čelika [10]

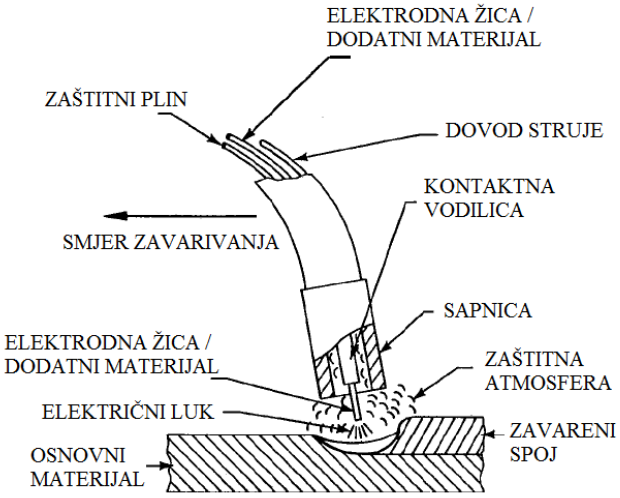
Tip obrade	BTF	Troškovi, kn	Smanjenje troškova
Obrada odvajanjem čestica	12	16 000	-
WAAM	2,3	7 000	55 %

Dijelovi izrađeni WAAM postupkom u velikoj većini slučajeva imaju manju cijenu od onih izrađenih obradom odvajanjem čestica. Ova razlika posebice postaje uočljiva kada se usporede dijelovi izrađeni od skupljih materijala.

3. MAG ZAVARIVANJE

3.1. Općenito o MAG postupku zavarivanja

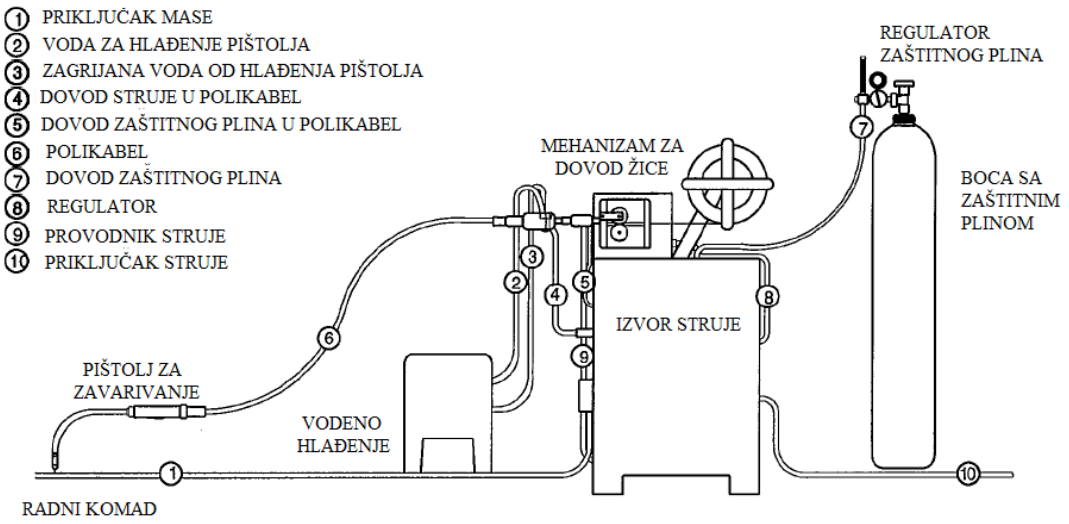
MAG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja koji kao izvor topline za taljenje osnovnog i dodatnog materijala koristi električni luk uspostavljen između metalne elektrodne žice i radnog komada. Cjelokupni proces se odvija u zaštiti aktivnog plina (CO_2 i mješavine). Električni luk se održava između taljive, kontinuirane elektrode u obliku žice u pravilu spojene na pozitivni (+) pol istosmjernog izvora i radnog komada u zaštitnoj atmosferi plinova [14]. Pogonski sustav dodaje žicu konstantnom brzinom kroz polikabel i pištolj u električni luk, sve u zaštitnoj atmosferi odgovarajućeg zaštitnog plina koji je pohranjen u vanjskom spremniku (boci), pod tlakom. Postupak MAG zavarivanja može biti poluautomatiziran (dodavanje žice je automatizirano, a vođenje pištolja ručno) ili u potpunosti automatiziran/robotiziran. Slika 19 prikazuje detalj MAG procesa zavarivanja.



Slika 19. Detalj MAG procesa zavarivanja [15]

Osnovnu opremu za MAG zavarivanje čine: izvor istosmjerne ili izmjenične struje s ravnom statičkom karakteristikom (CV – engl. *Constant Voltage*), polikabel, uređaj za hlađenje, mehanizam za dovod žice, boca sa zaštitnim plinom, pištolj za zavarivanje, te regulator protoka zaštitnog plina (slika 20). Električna struja dolazi iz izvora struje za zavarivanje, koji je priključen na električnu mrežu, putem vodiča od kojih je jedan priključen na radni komad, a drugi na pištolj za zavarivanje. S kontaktne vodilice električna struja prolazi žicom koja se kontinuirano i automatski odmata s koluta pomoću pogonskog elektromotora. Zaštitni plin dolazi na mjesto zavarivanja iz čelične boce putem polikabela kroz sapnicu pištolja. Kontaktna vodilica pištolja, koja služi za vođenje elektrode i za dovođenje struje zavarivanja

na žicu, te sapnica za plin koja služi za dovod zaštitnog plina, potrošni su dijelovi pištolja te ih se lako može mijenjati. Pištolji za zavarivanje mogu biti hlađeni zrakom (za zavarivanje tankih limova žicama promjera do oko 1,2 mm) ili vodom (zatvoreni vodeni sustav hlađenja za veće jakosti struje ili kod korištenja žica veće toplinske provodljivosti) [15].



Slika 20. Oprema za MAG zavarivanje [15]

MAG postupak zavarivanja ima široku primjenu koja je omogućena brojnim prednostima od kojih su najvažnije [15]:

- postupak je primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala
- zavarivanje se može izvoditi u svim položajima
- velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala
- zbog kontinuiranog dovođenja elektrode, moguće je proizvesti zavare većih duljina bez prekida
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina
- širok raspon debljina materijala koji se zavaruje
- velika učinkovitost i proizvodnost
- automatska regulacija visine električnog luka.

Zbog navedenih prednosti, MAG zavarivanje predstavlja dobar izbor kada je riječ o automatiziranim i robotiziranim proizvodnim procesima. Kao i svaki drugi proces zavarivanja, MAG postupak ima određene nedostatke [15]:

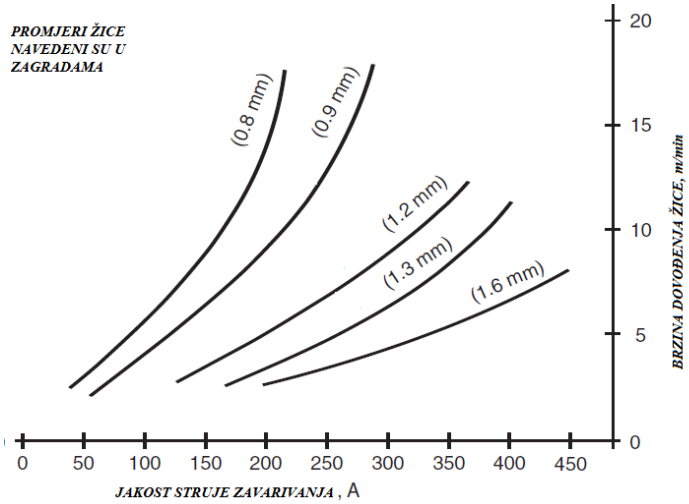
- zbog oblika pištolja za zavarivanje, postoji određene poteškoće pri zavarivanju teško dostupnih zavarenih spojeva

- kod rada na terenu moguće su greške zbog loše zaštite mjesta zavarivanja (vjetar otpuhuje zaštitni plin)
- mogući problemi kod dovođenja žice (zastoj žice u polikabelu)
- štrcanje kod nekih vrsta prijenosa metala (kratki spojevi, prijelazni luk)
- složeniji uređaji.

3.2. Parametri MAG postupka zavarivanja

Kako bi zavareni spojevi izvedeni MAG postupkom bili zadovoljavajuće kvalitete potrebno je podesiti parametre zavarivanja na odgovarajući način. Postoji dosta parametara zavarivanja, a oni koji u najvećoj mjeri utječu na kvalitetu zavarenog spoja su:

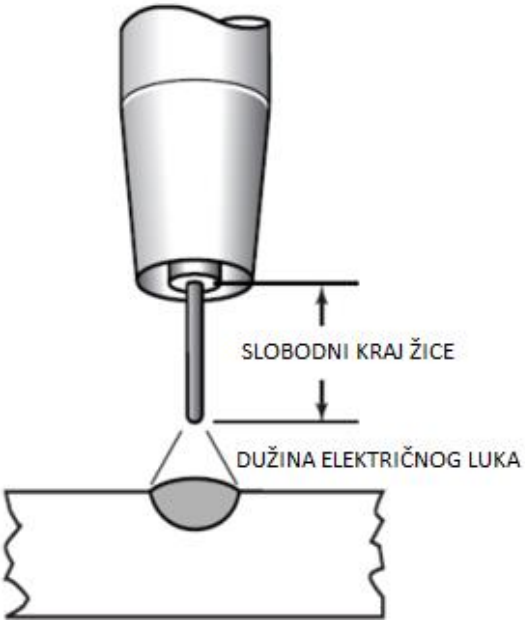
Jakost struje - jedan od najvažnijih parametara o kojem ovisi način na koji će se prenositi rastaljeni metal u električnom luku te stabilnost luka, penetracija, količina taline i brzina zavarivanja. Jakost struje direktno ovisi o promjeru žice, položaju zavarivanja i materijalu (debljini i vrsti). Različita je za različite načine prijenosa metala u električnom luku. Ovisnost jakosti struje o promjeru žice i brzini dodavanja žice prikazana je slikom 21.



Slika 21. Ovisnost jakosti struje o promjeru žice i brzini dodavanja žice [17]

Brzina zavarivanja - još jedan bitan faktor jer o njemu ovisi produktivnost postupka zavarivanja. Odabir brzine zavarivanja vrši se u korelaciji s položajem i strujom zavarivanja. Na slici 21 vidljiva je ovisnost brzine dodavanja žice o struji zavarivanja. Promjenom brzine zavarivanja utječe se na izgled profila zavara kao i na mehanička svojstva istog. Povećanjem brzine zavarivanja zavar postaje uži i penetracija manja, dok smanjenjem brzine zavar postaje širi i penetracija bolja [18].

Slobodni kraj žice - dio žice od kraja kontaktne vodilice do početka električnog luka (slika 22), odnosno dio žice koji je vidljiv zavarivaču. Promjena slobodnog kraja žice utječe na jakost struje u električnom luku. Povećanje slobodnog kraja žice dovodi do povećanja otpora struji te pada jakosti struje dok smanjenje slobodnog kraja žice dovodi do pada otpora protoku struje i do porasta jakosti struje. Zbog te promjenjivosti jakosti struje s povećanjem ili smanjenjem slobodnog kraja žice vrlo je važno slobodan kraj žice održati konstantnim da bi se održala konstantna vrijednost penetracije [17]. Neke karakteristične vrijednosti slobodnog kraja žice prikazane su u tablici 8.



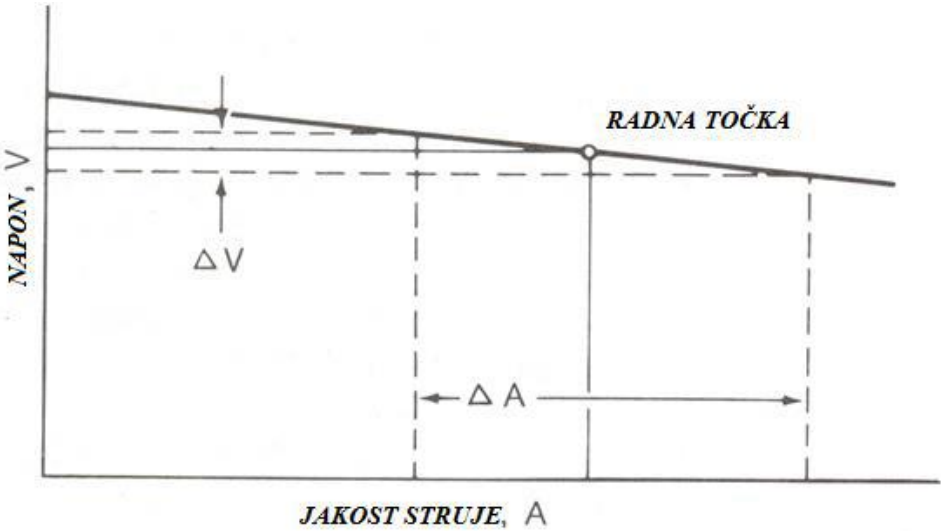
Slika 22. Slobodni kraj žice [17]

Tablica 8. Karakteristične vrijednosti slobodnog kraja žice [18]

Promjer žice, mm	Jakost struje, A	Slobodni kraj žice, mm
0,6 – 0,8	≤ 100	≤ 10
0,9 – 1,2	100 – 200	10 – 15
1,2 – 1,4	200 – 350	15 – 20
1,4 – 1,6	≥ 350	20 – 25

Napon - uz jakost struje najvažniji parametar MAG zavarivanja. O njemu ovisi stabilnost električnog luka kao i njegova duljina i širina. Veza između napona i duljine električnog luka je proporcionalna. Za dulji električni luk potreban je veći napon što dovodi do šireg zavara uz

manju penetraciju. Iznos napona utječe na način prijenosa metala u električnom luka pa je za određene načine prijenosa on drugačiji [19]. Današnji uređaji za MAG zavarivanje su sinergijski izvori struje za zavarivanje koji prema definiranoj krivulji odabiru optimalnu kombinaciju jakosti struje i napona. Izvor koristi ravnu karakteristiku (slika 23) za odabir optimalnih kombinacija parametara.



Slika 23. Karakteristika izvora struje za MAG zavarivanje [19]

Veličina induktiviteta (uspona struje) - kontrola induktiviteta karakteristična je većini modernih izvora struje za MAG zavarivanje. Može biti fiksno podešen ili se može mijenjati. Ako je fiksno podešen, znači da je optimalan nivo induktiviteta ugrađen u izvor struje za zavarivanje, a ukoliko ako ga je moguće mijenjati znači da se količina induktiviteta primijenjenog na električni luk može podesiti. Induktivitet ima utjecaj samo za neke načine prijenosa metala u električnom luku (posebno kod prijenosa metala kratkim spojevima). Povećanjem induktiviteta smanjuje se frekvencija kapljica u prijenosu kratkim spojevima i obratno [17].

Protok i vrsta zaštitnog plina - zaštitni plin osigurava područje zavara od reakcije s plinovima iz atmosfere te ima velik utjecaj na oblik profila zavara, tj. širinu i penetraciju, brzinu zavarivanja i stabilnost električnog luka. Protok plina namješta se u odnosu na jakost struje zavarivanja, uvjete zavarivanja i karakteristike spoja koji želimo zavariti. Veća jakost struje zavarivanja zahtijeva i veći protok zaštitnog plina jer ako protok nije dovoljno velik mogu se javiti greške u zavarenom spoju.

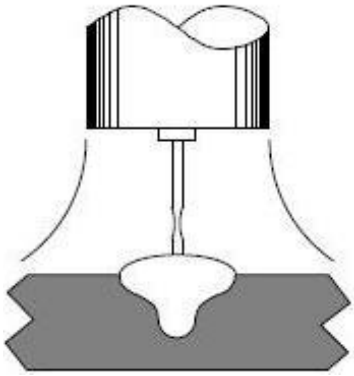
3.3. Prijenos metala u električnom luku

Prijenos metala predstavlja proces leta rastaljene kapljice od vrha elektrode kroz električni luk do taline metala zavara. Kod elektrolučnog zavarivanja taljivom elektrodom rastaljeni se metal s elektrodne žice prenosi u obliku kapljica koje se mogu prenositi premošćivanjem ili slobodnim letom. Prijenos metala premošćivanjem obuhvaća prijenos metala kratkim spojevima i prijenos metala mješovitim lukom, dok se slobodnim letom kapljice mogu prenositi štrcajućim ili impulsnim lukom [14]. Prijenos metala kratkim spojevima, mješovitim i štrcajućim lukom spadaju u prirodne prijenose, dok impulsni prijenos kapljica spada u kontrolirani prijenos metala. Osim impulsnog, kao trenutno najraširenijeg kontroliranog načina prijenosa metala, postoje još i razne vrste modificiranih načina prijenosa metala: CBT (engl. *Controlled Bridge Transfer*), STT (engl. *Surface Tension Transfer*), CMT (engl. *Cold Metal Transfer*), itd. Zbog sve većeg broja i primjene novorazvijenih kontroliranih načina prijenosa metala, sve se više pažnje posvećuje modificiranju postojećih klasifikacija koje uključuju samo prirodne načine prijenosa metala [15].

Kod MAG zavarivanja prijenos metala igra veliku ulogu jer je odabirom parametara zavarivanja moguće definirati odgovarajuću vrstu prijenosa metala koja za odabranu primjenu predstavlja optimalan odabir. Dobro poznavanje procesa prijenosa metala vrlo je bitno kako bi se postigla visoka kvaliteta i produktivnost procesa zavarivanja. Prijenos metala kod MAG zavarivanja ovisi o tipu dodatnog materijala, naponu, jakosti struje, polaritetu elektrode, slobodnom kraju žice te o zaštitnom plinu [15].

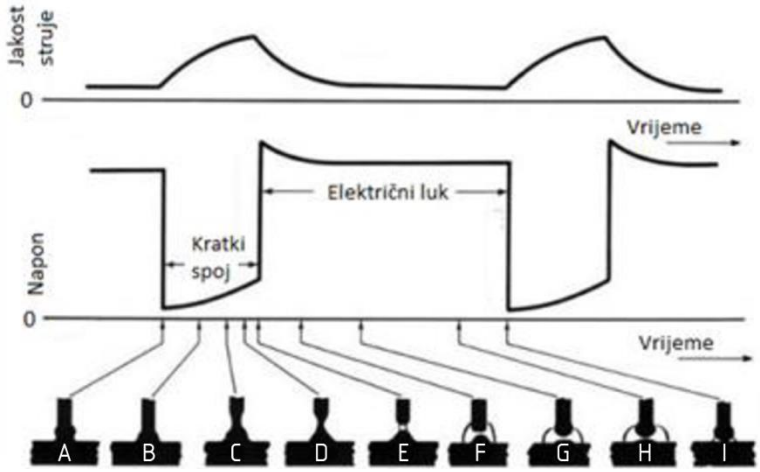
3.3.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Prijenos metala kratkim spojevima (engl. *short arc*) je način prijenosa metala kada žica za vrijeme kratkog spoja dodiruje talinu zavara i to se ponavlja periodički. Kod prijenosa kratkim spojevima koriste se male struje zavarivanja (od 50 A do 170 A), niski naponi (od 13 V do 21 V) i elektrodne žice malih promjera (od 0,6 mm do 1,2 mm), zaštitni plin CO_2 ili mješavine (CO_2 + Ar, CO_2 + Ar + O_2) [20]. Na slici 24 prikazan je prijenos metala koji se javlja kad se uspostavi kratki spoj između žice i taline, odnosno radnog komada.



Slika 24. Prijenos metala kratkim spojem [21]

Do odvajanja kapljice dolazi u prvoj fazi u kojoj se vrh elektrode nalazi u fizičkom kontaktu s rastaljenim metalom pri čemu raste jakost struje što dovodi do povećanja magnetske sile koja stišće kapljicu taline i vrška žice, a javlja se na kraju elektrode zbog djelovanja elektromagnetskog polja (slika 25) [15].



Slika 25. Načelo prijenosa metala kratkim spojevima po fazama [22]

Slika 25 prikazuje načelo prijenosa metala kratkim spojevima u ovisnosti o jakosti struje zavarivanja i naponu po fazama (A – I). Opis faza je sljedeći:

A – stanje kada žičana elektroda dotakne radni komad, u električnom krugu nastane kratki spoj. U tom trenutku napon pada na nulu, struja počinje eksponencijalno rasti (brzina rasta je ograničena induktivnim otporima kruga).

B, C, D – napon polako raste zbog povećanja otpora do kojeg dolazi jer povećanjem struje dolazi do pojačanog zagrijavanja vrha žice (efekt $Q = I^2 \cdot R$ sve do taljenja) i povećava se ″pinch-efekt″ koji dovodi do smanjenja presjeka žice (povećani otpor) i otkidanja zagrijanog vrha žice.

E – prekida se kratki spoj i uspostavlja se opet električni luk, a struja počinje eksponencionalno padati na nominalnu vrijednost.

F, G, H – skok napona je opet nešto veći od nominalnog zbog induktiviteta krugova i s vremenom se smanjuje na nominalnu vrijednost (G, H).

I – trenutak neposredno prije nego žica dotakne radni komad i ponovno dođe do kratkog spoja, nakon čega se cijeli proces opet ponavlja.

Sve ove faze se zbivaju dok se žičana elektroda jednolikom brzinom giba prema radnom komadu. Kada žica premosti razmak nastao otkidanjem vrha, ponavlja se ciklus od faze A. Broj ciklusa po sekundi varira u ovisnosti o promjeru žice i pri stabilnim parametrima ima 100 ÷ 200 kratkih spojeva u sekundi. Mali unos topline omogućuje kratkim spojevima svestranu primjenu, od tankih do debelih materijala te zavarivanja u svim položajima. Izrazito je pogodan za zavarivanje korijena kod zavarivanja cjevovoda te kod zavarivanja tankih limova u svim položajima. Kratki spojevi se primjenjuju kod zavarivanja gdje je zahtijevana minimalna deformacija radnog komada. Prijenos kratkim spojevima se lako zvučno prepozna po karakterističnom pucketanju, ako se radi s pravilnim parametrima. Glavni nedostaci prijenosa metala kratkim spojevima su veća količina štrcanja i mali učinak taljenja, ali i velika vjerojatnost pojave naljepljivanja [15].

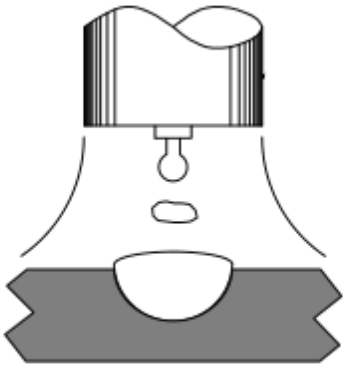
3.3.2. Prijenos metala prijelaznim lukom

Prijenos metala prijelaznim lukom (engl. m*ixed arc*) je kombinacija štrcajućeg luka i u manjoj mjeri dolazi do pojave kratkih spojeva. Odvija se stvaranjem krupne kapljice metala na vrhu elektrodne žice koja se pod djelovanjem sila u električnom luku odvaja i pada u talinu bez kratkog spoja.

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

nedostataka, prijenos metala prijelaznim lukom se izbjegava te se pokušava minimalizirati u praksi [15].

Na slici 26 prikazan je pojednostavljeni prikaz prijenosa metala prijelaznim lukom gdje je vidljivo da je promjer kapljice veći od promjera žice.



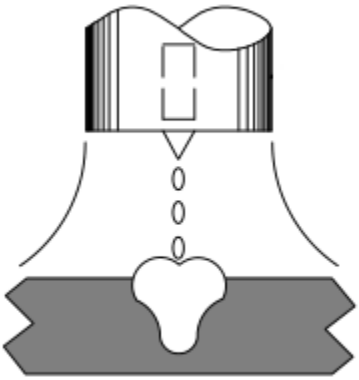
Slika 26. Prijenos metala prijelaznim lukom [21]

3.3.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

Prijenos metala štrcajućim lukom (engl. *spray arc*) karakterizira prijenos puno malih kapljica koji se vrši slobodnim letom kroz atmosferu luka od elektrode prema radnom komadu. Niti u jednom trenutku, u vremenu održavanja luka, elektroda ne dolazi u dodir s osnovnim materijalom. Sile koje djeluju u električnom luku otkidaju kapi i usmjeruju ih (radijalno u odnosu na elektrodu) prema radnom komadu prije nego vrh elektrode može dodirnuti radni komad. Koristi se relativno visok napon od 24 V do 40 V, te struja od 200 A do 600 A [19]. Broj kapljica metala otkinutih u sekundi može biti i više od nekoliko stotina. Promjer kapljice je manji od promjera žice kojom se zavaruje. Veliki unos topline i velika količina nataljenog materijala svojstveni su ovom prijenosu, pa se primjenjuje kod zavarivanja debljih dijelova u vodoravnom položaju. Nije pogodan za zavarivanje u prisilnim položajima. Zaštitne plinske mješavine koje posebno podržavaju ovaj način prijenosa jesu one s pretežnim udjelom argona.

Prednosti prijenosa metala štrcajućim lukom su veliki depozit, velika penetracija, lijep izgled, mogućnost korištenja većih promjera žice te malo nepoželjnog prskanja. Nedostatci ovakvog prijenosa su opasnost od protaljivanja kod tanjih materijala (koristi se kod materijala debljih od 3 mm) i opasnost od slijevanja velike količine rastaljenog materijala u prisilnim položajima zbog djelovanja gravitacijske sile [15].

Slikom 27 prikazan je pojednostavljeni prikaz prijenosa metala štrcajućim lukom gdje je promjer kapljice manji od promjera žice.



Slika 27. Prijenos metala štrcajućim lukom [21]

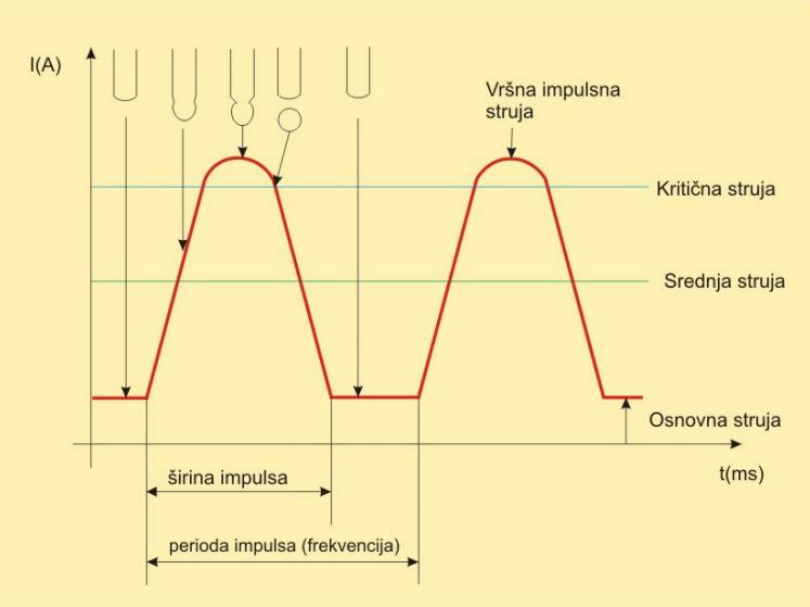
3.3.4. Prijenos metala impulsnim lukom

Prijenos metala impulsnim lukom (engl. *pulsed arc*) je po mehanizmu prijenosa kapljica u talinu sličan prijenosu štrcajućim lukom. Kod oba prijenosa metal se prenosi slobodnim letom kapljica, bez kratkih spojeva. Kod prijenosa metala impulsnim lukom izvor struje generira promjenjiv oblik struje (impuls), koji omogućava otkidanje samo jedne kapljice tijekom impulsa, a količina prijenosa materijala se regulira promjerom žice i brojem impulsa (frekvencijom od 20 Hz do 300 Hz) [23].

Impulsnim načinom se osigurava stabilan i miran električni luk, praktički bez rasprskavanja kapljica. Daljnje mogućnosti razvoja postupka omogućili su digitalno upravljani tranzistorski izvori, kojima je moguće stvarati impulse proizvoljnog oblika što znači utjecati na način odvajanja i veličinu kapljice [23]. U praksi se kod zavarivanja uobičajeno koriste sinusoidni oblik, pravokutni oblik te drugi oblici impulsa poput trapeznog ili trokutastog. Kod prijenosa impulsnim lukom metal se prenosi bez kratkih spojeva, a najvažnije sile koje utječu na prijenos su elektromagnetska i sila površinske napetosti. Upravo je mogućnost upravljanja elektromagnetskom silom omogućila razvoj impulsnih struja.

Prosječna struja zavarivanja kod impulsnog zavarivanja manja je od kritične struje koja uzrokuje nepravilan i neprihvatljiv prijenos metala u grubim kapima. Jakost struje zavarivanja određuje se tako da varira između minimalne (osnovna struja impulsa) i maksimalne struje (vršna struja impulsa). Osnovna struja održava električni luk, dok je duljina trajanja i visina impulsa vršne struje prilagođena da premaši kritičnu struju i osigura odvajanje jedne kapi po

svakom impulsu [15]. Slika 28 prikazuje promjenu jakosti struje o vremenu i način otkidanja kapljice.



Slika 28. Grafički prikaz impulsnog postupka i načina otkidanja kapljice [23]

Postoji pet osnovnih parametara koji utječu na način i stabilnost prijenosa metala kroz električni luk kod impulsnog zavarivanja [23]:

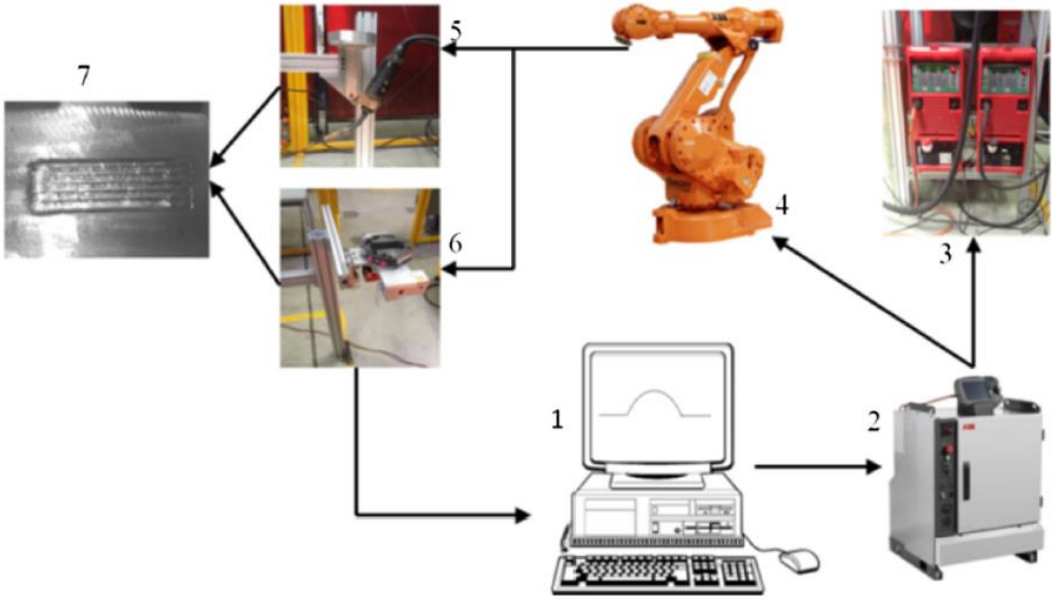
- vršna impulsna struja koja se kreće u granicama 250 A – 650 A
- osnovna struja omogućava gašenje luka nakon prestanka impulsa, a kreće se u granicama 20 A – 50 A
- širina impulsa koja se kreće u granicama 1 ms – 3 ms
- frekvencija je parametar koji određuje broj kapljica u sekundi
- brzina dodavanja žice.

Zavarivanje impulsnim načinom prijenosa metala zadržava prednosti, a ujedno i otklanja poteškoće koje se javljaju kod štrcajućeg luka tako da se može primijeniti u svim položajima, te za materijale koji su osjetljivi na količinu unosa topline. Također je primjenjiv u cjelokupnom rasponu od niskih do visokih struja zavarivanja.

3.4. Primjena MAG postupka kod WAAM-a

MAG je najčešće primjenjivan postupak kod WAAM-a. Prilikom zavarivanja elektroda je okomita na podlogu na koju se zavaruje. Općenito, širina zavara kreće se u rasponu od 4 mm do 10 mm. Slika 29 prikazuje tipični robotski sustav kod WAAM postupka koji koristi MAG kao postupak zavarivanja. Računalo (1) se koristi za programiranje procesa i prikupljanje

eksperimentalnih rezultata. Upravljačka jedinica robota (2) koristi se za koordiniranje gibanja robota i zavarivačkog procesa. Izvor struje za MAG postupak (3) služi za kontrolu procesa zavarivanja. Industrijski robot (4) provodi gibanje pištolja za zavarivanje (5) i laserski (6) mjeri dobiveni profil zavara na radnom komadu (7) [6].



Slika 29. Robotski sustav za WAAM baziran na MAG postupku [6]

CMT (engl. *Cold Metal Transfer*) je modificirana varijanta MAG postupka razvijena od strane tvrtke *Fronius* koja omogućuje kontrolirani prijenos kapljice metala. To uključuje veću preciznost, manji unos topline i zavarivanje bez rasprskavanja. Navedene prednosti odnose se na aluminij i čelik, dok za titan to ne vrijedi jer dolazi do bježanja luka što rezultira povećanjem površinske hrapavosti. CMT je našao široku primjenu u aditivnoj proizvodnji zbog svojih dobrih karakteristika, a to su velika količina depozita i niski unos topline [6].

Problem koji se javlja kod zavarivanja MAG postupkom koji je dio WAAM postupka je taj da geometrija zavara nije jednolika po cijeloj duljini, naročito na početku i na kraju prolaza. To dovodi do nejednolične geometrije, loše kvalitete površine i dimenzijske netočnosti komponente. Slikom 21 prikazan je primjer tankog zida dobivenog taloženjem gdje se vidi značajna razlika u geometriji na početku i na kraju prolaza. Taj problem pokušao se riješiti mijenjanjem parametara zavarivanja na početku i na kraju prolaza. Prilikom uspostave luka na početnom dijelu putanje zavarivanja, jakost struje i brzina zavarivanja su značajno smanjene, dok se na kraju putanje smanjuju postepeno. Iako se ovom metodom geometrija zavara može fleksibilno kontrolirati, postupak namještanja parametra je dugotrajan i dobiven je empirijski. Druga metoda je optimiziranje putanje gibanja pištolja za zavarivanje primjenom kontinuirane

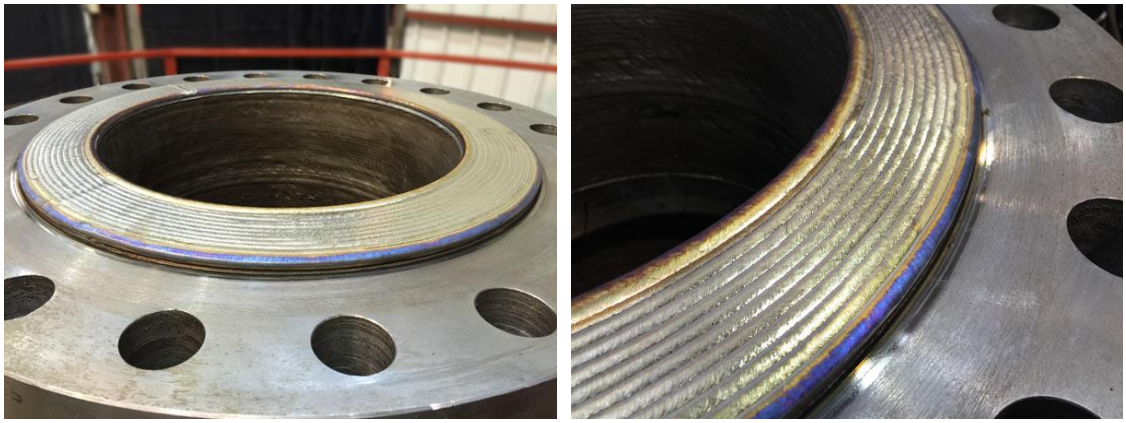
putanje koja će minimizirati broj prolaza za svaki sloj. Dokazano je da je taj način bolji. Međutim, kontinuirana putanja zanemaruje glavni problem kod WAAM-a, a to su zaostala naprezanja i deformacije. Prema tome, daljnja istraživanja bi trebala biti usmjerena u pronalaženju kompromisa između zaostalih naprezanja i deformacija te poboljšanja geometrije zavara [6].

Slika 30. Razlika u geometriji zavara na početku i na kraju prolaza [6]

4. LEGURA INCONEL 625

Legure nikla, u koje spada i Inconel 625, ističu se izvrsnim svojstvima otpornosti prema puzanju uz visoku korozijsku postojanost te se stoga vrlo često primjenjuju u raznim područjima industrije. Legura Inconel 625 se zbog poprilično visoke cijene, gdje je to moguće, nanosi u obliku prevlake na osnovni materijal od ugljičnog čelika. Legure nikla mogu se nanositi različitim metodama kao što su valjanjem, eksplozivno oblaganje ili navarivanje. Budući da je postupak navarivanja relativno jednostavan i jeftin široko se upotrebljava za poboljšanje korozivnih svojstava različitih dijelova opreme u naftno-petrokemijskoj, procesnoj i sličnim industrijama. Prilikom navarivanja treba obratiti pažnju na kontrolu kemijskog sastava. Željezo ima najveći utjecaj na svojstva navarenog sloja, tj. otpornost prema koroziji, te udio željeza u kemijskom sastavu ne smije prelaziti 5 % [24].

Slikom 31 prikazan je primjer navarivanja prevlake (TIG postupkom) legure Inconel 625 na ventil izrađen od ugljičnog čelika.



Slika 31. Navarena prevlaka Inconela 625 na ventil od ugljičnog čelika [25]

4.1. Kemijski sastav

Kemijski sastav legure Inconel 625 prikazan je tablicom 9.

Tablica 9. Kemijski sastav legure Inconel 625 [26]

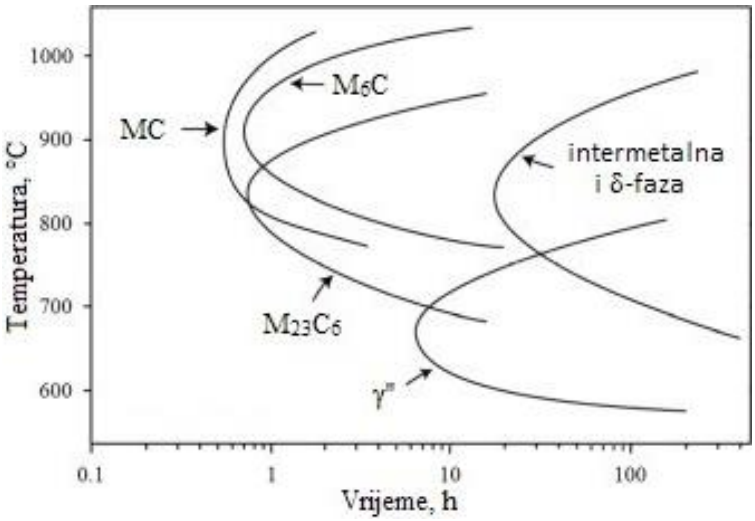
	Ni	Cr	Fe	Mo	Nb + Ta	C	Mn	Si	P	S	Al	Ti	Co
Min, %	58,0	20,0	-	8,0	3,15	-	-	-	-	-	-	-	-
Maks, %	-	23,0	5,0	11,0	4,15	0,1	0,5	0,5	0,015	0,015	0,4	0,4	1,0

Molibden i niobij su dva najvažnija legirna elementa legure Inconel 625 koji s nikal-krom matricom čine leguru vrlo čvrstom, pa samim time postupci precipitacijskog očvršćivanja nisu potrebni. Takva kombinacija elemenata je također odgovorna i za odličnu otpornost na širok raspon jakih korozijskih sredina, a uz to čini leguru otpornom na oksidaciju i pougljeničenje pri visokim temperaturama [26].

4.2. Mikrostruktura

Legura Inconel 625, razvijena za temperature do 700 °C, je kombinacija visoke čvrstoće i izvrsnih karakteristika izrade. Sastoji se od kristala plošno centrirane kubične rešetke (FCC). Iako je legura prvobitno bila oblikovana kao čvrsta otopina, opaženo je da precipitacija intermetalnih faza i karbida nastaje prilikom podvrgavanja legure tretmanu starenja (precipitacijskom otvrdnjavanju) u području od 550 °C do 750 °C. Precipitacija $M_{23}C_6$ (M označava Cr), M_6C (M označava Si, Ni, Cr) i MC (M označava Nb, Ti) karbida pojavljuje se u rasponu od 760 °C do 980 °C. Primarni MC karbidi koji su prisutni u neotopljenom stanju prilikom žarenja otopine se pri produljenoj izloženosti povišenim temperaturama raspadaju u $M_{23}C_6$ i M_6C karbide [27].

Spomenute promjene i različite faze mogu se vidjeti na TTT dijagramu za leguru Inconel 625 na slici 32.



Slika 32. TTT dijagram legure Inconel 625 [29]

Pri povišenim temperaturama po granicama zrna izlučuju se $Cr_{23}C_6$ karbidi te smanjuju otpornost prema interkristalnoj koroziji. Ovi karbidi nastali po granicama zrna vraćaju se u unutar kristalnih zrna naknadnim zagrijavanjem do 980 °C te sporim hlađenjem ili mekim žarenjem [29].

4.3. Mehanička svojstva

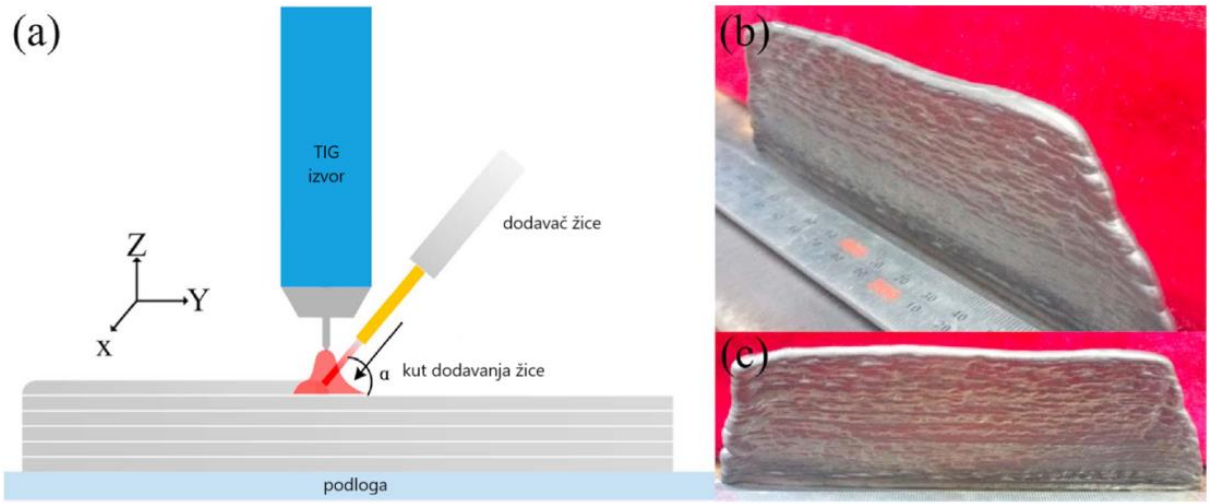
Tablicom 10 prikazana su mehanička svojstva legure Inconel 625.

Tablica 10. Mehanička svojstva legure Inconel 625 pri sobnoj temperaturi [26]

Vlačna čvrstoća R_m, MPa	Konvencionalna granica razvlačenja $R_{p0,2}$, MPa	Istezljivost A_5, %	Tvrdoća po Brinellu, HB
827 – 1034	414 – 621	55 – 30	145 – 240

Vrijednosti navedene u tablici 10 podložne su određenim promjenama, ovisno o obliku proizvoda (tanki lim, ploča, cijev, šipka) i o vrsti toplinske obrade proizvoda.

Ispitivanje mehaničkih svojstava dano je primjerom gdje se WAAM tehnologijom izrađuje zid od legure Inconel 625 primjenom TIG postupka. Korištena je žica ERNiCrMo-3, promjera 1,2 mm. Smjer puta (smjer Y) svakog sloja identičan je onom prethodno nataloženog sloja (s lijeva na desno). Međuprolazna temperatura je 50 °C ili manje. Kut pištolja za zavarivanje je 45° u odnosu na ravninu obratka. Od ostalih parametara, struja zavarivanja je 130 A, brzine dodavanja žice 1,2 m/min, protoka plina 15 l/min i brzina zavarivanja 300 mm/min. Zid je napravljen od 30 nataloženih slojeva, svakog dužine oko 160 mm i širine 9 mm. Slikom 33 prikazana je shema eksperimentalnog TIG postupka s primjerima zidova napravljenih WAAM tehnologijom od legure Inconel 625 [31].



Slika 33. a) shematski prikaz procesa; b) i c) primjeri zidova od legure Inconel 625 [31]

Vlačna svojstva nataloženog metala u uzdužnom smjeru (Y) i okomitom smjeru gradnje (Z) navedena su u tablici 11.

Tablica 11. Usporedba mehaničkih svojstava u uzdužnom smjeru (Y) i smjeru gradnje (Z) [31]

Smjer	Vlačna čvrstoća, MPa	Istezanje, %
Uzdužni smjer (Y)	722 ± 17	42,27 ± 2,4
Smjer gradnje (Z)	684 ± 23	40,13 ± 3,7

Rezultati, uključujući i prosječnu vrijednost iz tri uzorka, korišteni su za svaku orijentaciju. Vlačna čvrstoća, ispitana u Y smjeru, relativno je veća od one izmjerene u Z smjeru. Međutim, nema ni vidljive razlike u istezanju koje je u rasponu od 40 % do 42 %. Značajne razlike u čvrstoći i istezanju nisu zabilježene zbog slične mikrostrukture unutar slojeva. Stupanj segregacije legirnih elemenata Mo i Ni raste s rastućim smjerom gradnje (Z), kao što je prikazano u tablici 12 [31].

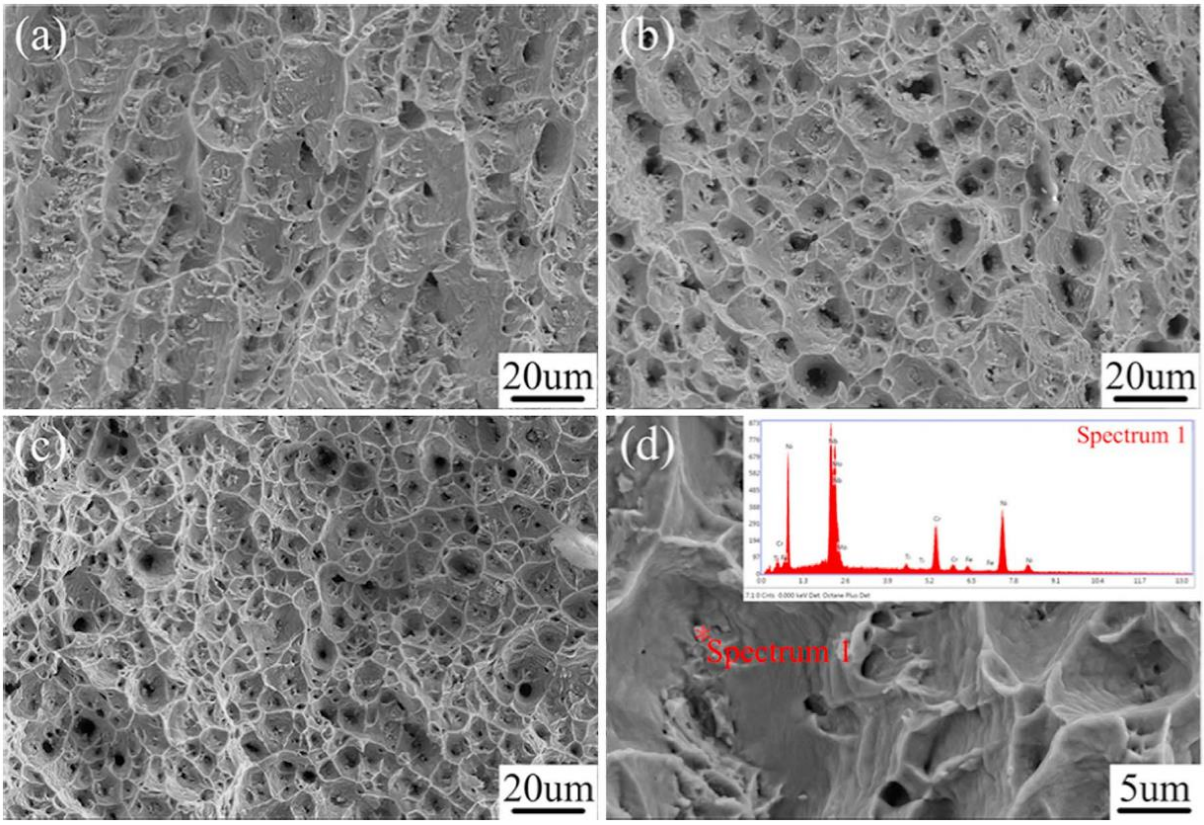
Tablica 12. Stupanj segregacije legirnih elemenata [31]

Element	Donja regija	Srednja regija	Gornja regija
Mo, %	15,89	18,19	20,12
Nb, %	10,53	14,49	16,21

U ovom slučaju, osiromašene zone niobija i molibdena pojavile su se u γ matrici koja je suzdržavala precipitaciju faze i kasnije pogoršala mehanička svojstva nataloženog metala. Stoga se vrijednost vlačne čvrstoće postupno smanjuje od najnižeg sloja prema vrhu nataloženog zida. Područje najnižeg sloja ima najveću vlačnu čvrstoću i istezanje, a prosječna ukupna vrijednost vlačne čvrstoće u pet pozicija tog sloja iznosi 725,19 MPa [31].

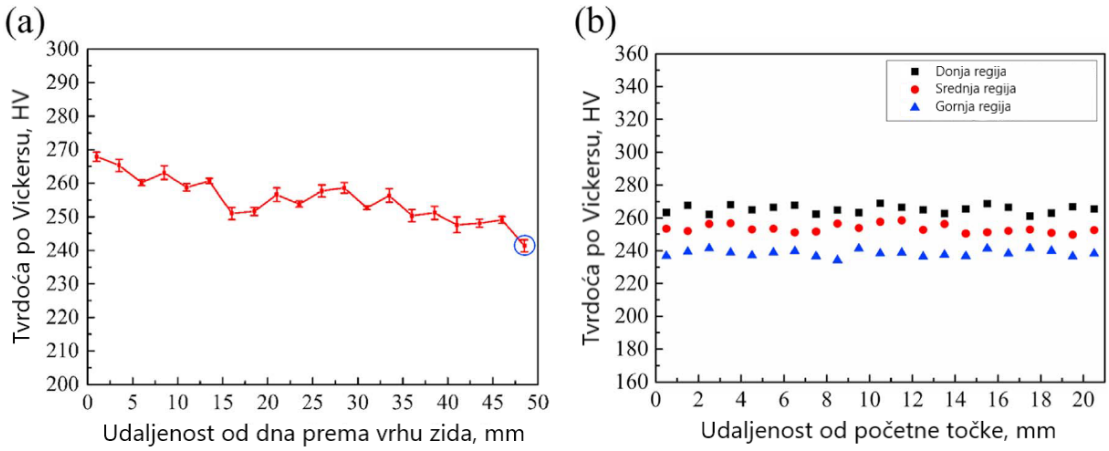
Reprezentativna površina loma nakon vlačnih ispitivanja unutar različitih područja prikazana je na slici 34. Prijelomnim površinama svih uzoraka dominira prijelom po rubovima kristalne rešetke, što je tipično svojstvo duktilnosti. Površina prijeloma sastoji se od rupica različitih veličina kroz cijeli presjek. Osim toga, postoje i neke diskontinuirane čestice druge faze koje se uočavaju na površini loma. Kvantitativna analiza kemijskog sastava u gornjoj regiji prikazana je na slici 34d. Postotak atoma čestice druge faze blizu je intermetalne faze, što upućuje na to da pukotine najprije nastaju i zatim propagiraju kroz staze prijeloma niske energije. Jednom kada se pukotina dogodi, brzo se širi stazom intermetalnih čestica. Dakle, prisutnost intermetalne faze u nataloženom metalu prvenstveno je štetna za istezljivost zbog jednostavnih staza propagacije pukotina. Usporedbom površina loma gornje regije (slika 34a) i donje regije (slika 34c) vidljivo je da su rupice i čestice kod donje regije ujednačenije i

manje, te je to ujedno i dokaz da su u donjoj regiji veća vlačna čvrstoća i istezljivost nego u gornjoj regiji [31].



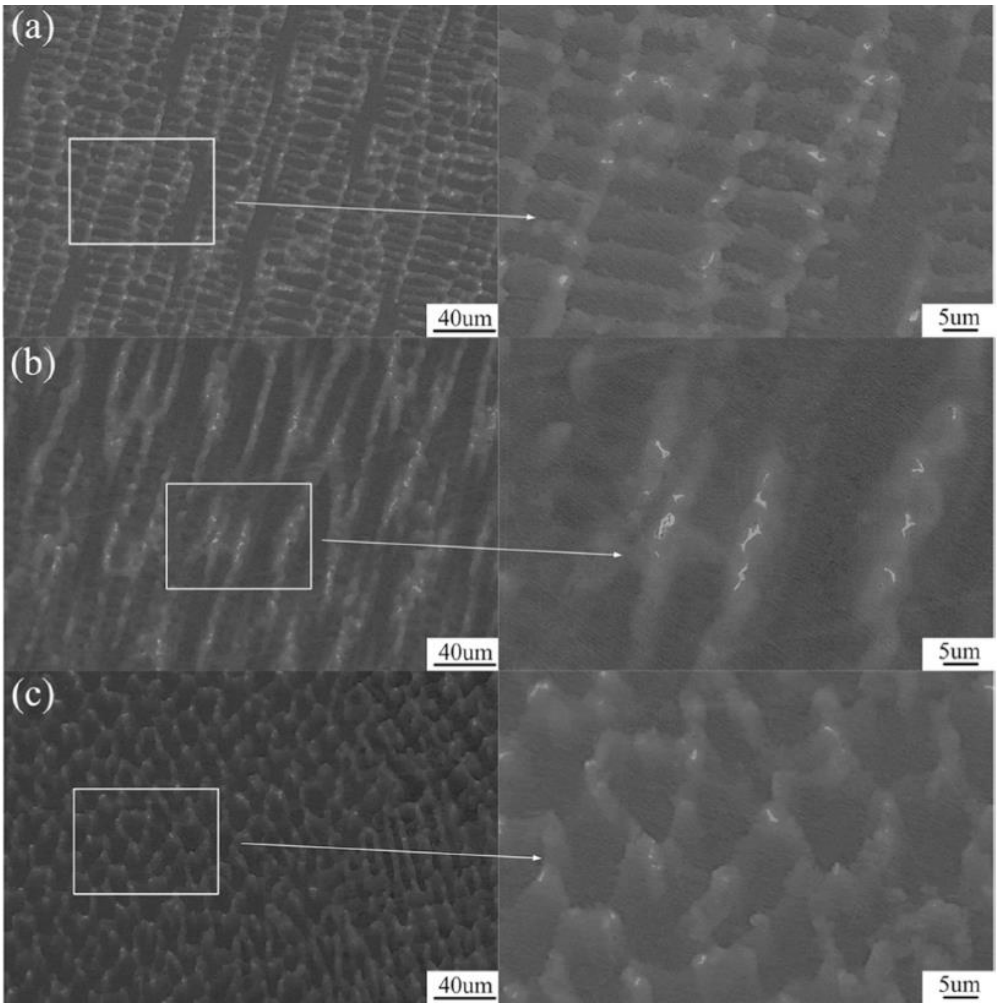
Slika 34. Površina loma; a) gornja regija; b) srednja regija; c) donja regija; d) gornja regija s kvantitativnom analizom kemijskog sastava [31]

Vrijednosti mikrotvrdoće u poprečnoj (X-Z) i uzdužnoj (Y-Z) ravnini prikazane su slikom 35. Slika 35a prikazuje profil mikrotvrdoće X-Z ravnine od dna do vrha nataloženog metala. Vrijednosti mikrotvrdoće, za koju se može reći da je heterogena s obzirom na regije, kreću se u rasponu od 240 HV do 270 HV. Ta vrijednost postepeno pada spuštajući se od vrha prema dnu nataloženog metala. Najveća mikrotvrdoća pojavljuje se u donjoj regiji, odnosno blizu osnovnog materijala, te iznosi oko 268 HV, što je povećanje za gotovo 10,1 % u usporedbi s vrhom zida. Heterogene vrijednosti mikrotvrdoće dobivene su kao rezultat heterogene mikrostrukture unutar proizvedene komponente [31].



Slika 35. Vrijednosti mikrotvrdoće u poprečnoj (X-Z) i uzdužnoj (Y-Z) ravnini [31]

Prema slici 36 vidljivo je da je sadržaj intermetalne faze u nataloženom metalu najveći u gornjoj regiji, smanjuje se u srednjoj regiji, te u donjoj regiji ima najnižu vrijednost. Dakle, gornja regija pokazuje najnižu vrijednost tvrdoće upravo zbog gušće intermetalne faze [31].

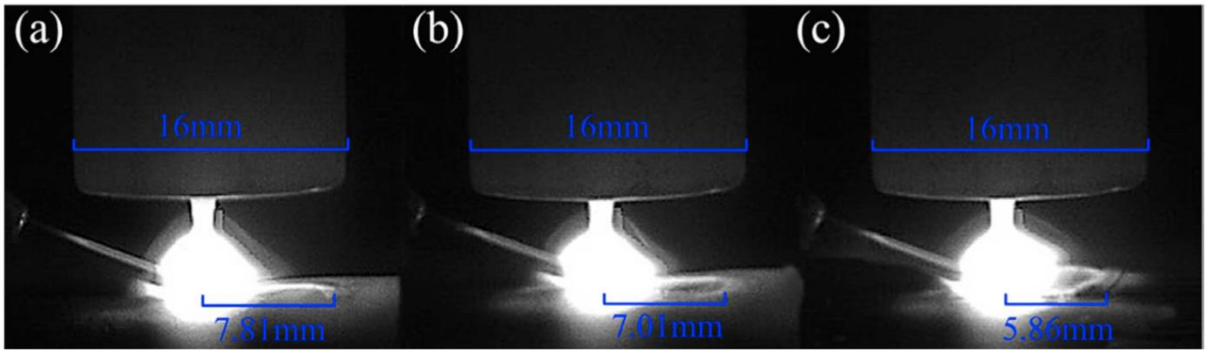


Slika 36. Presjek uzorka u X-Z ravnini; a) gornja regija; b) srednja regija; c) donja regija [31]

Slika 35b prikazuje vrijednosti mikrotvrdoće nataloženog metala po regijama u smjeru gibanja pištolja za zavarivanje, odnosno u uzdužnoj Y-Z ravnini. Mikrotvrdoća ima tendenciju relativne homogenosti u smjeru gibanja pištolja (uzdužna ravnina) na istoj visini, tj. ne postoji vidljiva razlika u mikrotvrdoći u smjeru gibanja na istoj visini. Zbog homogene mikrostrukture uzdužnog presjeka na istoj visini, vrijednosti mikrotvrdoće su slične duž cijele dužine zida. Isto tako i homogena vrijednost mikrotvrdoće potvrđuje homogenu mikrostrukturu. Srednja vrijednost tvrdoće gornje, srednje i donje regije u Y-Z ravnini iznosi 265 HV, 253 HV i 238 HV, što je zapravo vrlo slično vrijednosti tvrdoće izmjerene u X-Z ravnini [31].

Mikrostruktura i fazne transformacije metalnih dijelova mogu uglavnom utjecati na uvjete skrućivanja. Nedovoljno hlađenje kod procesa solidifikacije nastaje jer je stvarni gradijent temperature manji od linije likvidusa. Zapravo, gradijent temperature G i brzina hlađenja V dominiraju načinom skrutnjavanja metala. Uz varijacije gradijenta temperature i brzine hlađenja mogu se stvoriti različite mikrostrukture i fazne transformacije, poput određene druge faze, tj. intermetalne faze [31].

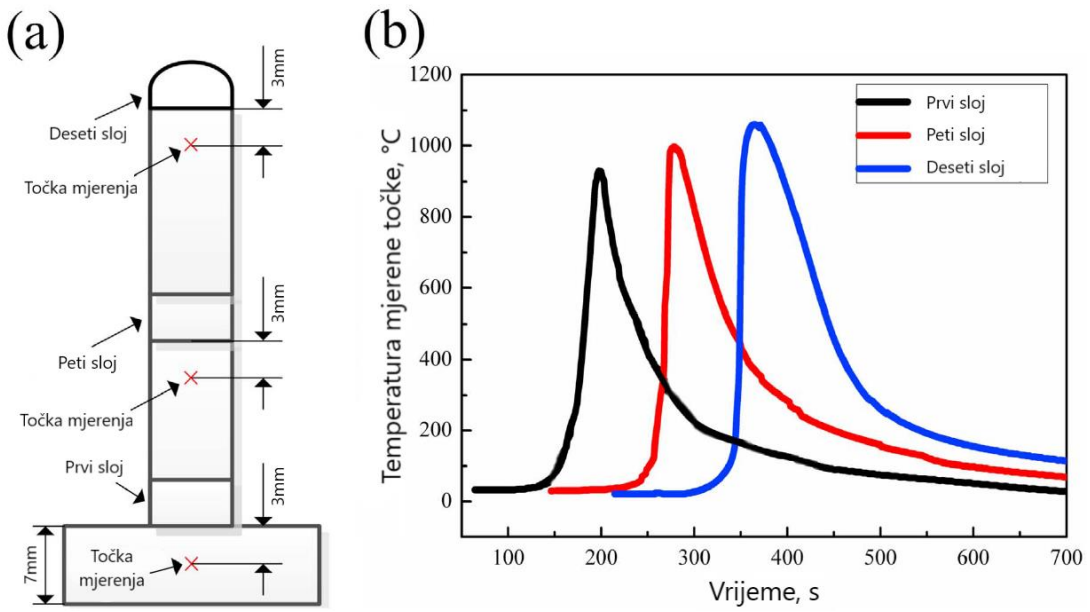
Slika 37 prikazuje ponašanje rastaljenog nataloženog metala u vertikalnom smjeru gradnje (Z). S rastom visine zida udaljenost između ruba i središta rastaljenog metala povećava se od 5,86 mm (prvi sloj) do 7,81 mm (deseti sloj). Nema dovoljno vremena za prijenos topline te dolazi do većeg nakupljanja topline u gornjem sloju. To smanjuje temperaturni gradijent i dovodi do pojave heterogene mikrostrukture [31].



Slika 37. Slika rastaljenog metala na različitim slojevima; a) deseti sloj; b) peti sloj; c) prvi sloj [31]

Provodi se i mjerenje temperature kako bi se definirala brzina hlađenja različitih slojeva. Kako bi se izmjerila temperatura rastaljenog metala, u provrte, 3 mm ispod prvog, petog i desetog sloja, ugrađuju se termoelementi sa štitom (slika 38a). Kao što je prikazano na slici

38b, kada poraste visina zida, vršna temperatura se bitno poveća. Porastom visine zida dozvoljeno je više vremena za odvajanje legirnih elemenata Nb i Mo, zbog čega je neizbježna intermetalna faza u gornjoj regiji u većem omjeru nego u srednjoj i donjoj regiji [31].



Slika 38. Mjerenje temperature; a) shematski prikaz sistema za mjerenje temperature; b) dijagram temperature u različitim regijama [31]

4.4. Područje primjene i karakteristike

Legura Inconel 625 izvrsne je čvrstoće od sobne temperature do približno 800 °C. Posjeduje dobru otpornost na oksidaciju sve do 980 °C. U nisko temperaturno žarenom stanju primjenjuje se u vlažnim korozivnim atmosferama na temperaturama od -196 °C do 450 °C. Za primjenu na temperaturama iznad 600 °C koristi se u visoko temperaturno žarenom stanju. Dodatnom toplinskom obradom može se povećati čvrstoća legure [30].

Karakteristike legure Inconel 625 u nisko temperaturno žarenom stanju [30]:

- izuzetna otpornost prema rupičastoj koroziji, koroziji u procijepu, eroziji i interkristalnoj koroziji
- otpornost prema kloridima induciranoj napetosnoj koroziji
- dobra otpornost prema mineralnim kiselinama kao što su dušična, fosforna, sumporna i klorovodična kiselina
- dobra otpornost na lužine i organske kiseline
- dobra mehanička svojstva.

Karakteristike legure Inconela 625 u visoko temperaturno žarenom stanju [30]:

- izvrsna otpornost prema puzanju na temperaturama iznad 600 °C
- dobra korozijska otpornost prema vrućim korozivnim plinovima.

4.5. Korozijska postojanost

Visoki legirni sadržaj leguri Inconel 625 omogućuje veliku postojanost u različitim korozijskim sredinama. U blagim okolišnim uvjetima (atmosferski uvjeti, voda, neutralne soli i dr.) nema gotovo nikakve opasnosti od korozivnog djelovanja na leguru. U ozbiljnijim korozijskim uvjetima (visoka temperatura, visok tlak, agresivni dimni plinovi), kombinacija nikla i kroma pruža otpornost na oksidirajuće kemijske spojeve, a s druge strane nikal i molibden pružaju otpornost u neoksidirajućim sredinama. Visok udio molibdena leguru čini vrlo otpornom na rupičastu koroziju i koroziju u procijepu. Niobij je element koji služi za stabilizaciju legure, da ne bi došlo do senzibilizacije materijala tijekom zavarivanja, a samim time štiti leguru od pucanja po granicama zrna. Također, visok udio nikla štiti od pojave napetosne korozije kojoj su uzrok kloridni ioni [26].

Ova kombinacija karakteristika čini leguru Inconel 625 pogodnom za primjenu u širokom spektru korozivnih uvjeta. Primjer koji jasno pokazuje stvarnu korozijsku otpornost legure je taj da se za izradu spremnika za skladištenje kemijskog otpada, uključujući klorovodičnu i dušičnu kiselinu, preporuča baš legura Inconel 625. Poznato je da dvije navedene kiseline obično uzrokuju potpuno suprotne tipove korozijskih problema, tako da su materijali koji su otporni na djelovanje jedne od njih, obično osjetljivi na djelovanje druge. Legura Inconel 625 otporna je na djelovanje i jedne i druge kiseline [26].

4.6. Zavarljivost

Komercijalno važne visokolegirane legure nikla, pa tako i Inconel 625, sadrže jedan ili više od sljedećih elemenata: bakar, krom, željezo, molibden i kobalt. Ovi glavni legirni elementi, izuzev molibdena, tvore jednofazne spojeve s niklom unutar zadanih granica koncentracije te imaju relativno mali utjecaj na zavarljivost. Molibden kada je dodan u količini većoj od 20 % tvori sekundarnu fazu s nikom. Unatoč tome komercijalne legure nikla s udjelom jedne i druge faze su lako zavarljive. Elementi kao što su magnezij, ugljik, silicij, aluminij, mangan, titan i niobij dodaju se u vrlo malim količinama te ne utječu na zavarljivost ako je njihov udio u propisanim granicama. Ostali elementi kao što su sumpor i olovo praktički su netopivi u niklu te tvore eutektičke faze koje uzrokuju nastajanje toplih pukotina zavara. Spomenute

elemente treba izbjegavati ili drugim sredstvima osigurati nemogućnost pojave u metalu zavara ili zoni utjecaja topline. Ukoliko nije korištena odgovarajuća tehnologija zavarivanja i odgovarajući dodatni materijal, utjecaj plinova visokolegiranih legura nikla bez sadržaja kroma može dovesti do pojave poroziteta. Dodatni materijali sadrže elemente kao što je titan koji eliminiraju utjecaj plinova i nastajanje poroznosti. Visokolegirane legure nikla koriste se prvenstveno zbog već spomenute izrazite otpornosti prema koroziji i visokim temperaturama [32].

Prethodne studije pokazale su da upotreba žice legure Inconel 625, koja se obično koristi u suvremenoj industriji za zavarivanje visokotlačnih ili nehrđajućih čelika, može značajno poboljšati mehanička svojstva i otpornost na koroziju zavarenih konstrukcija pri visokim temperaturama. Međutim, udarni rad loma, otpornost na zamor materijala i otpornost na puzanje mogu se značajno smanjiti uslijed precipitacije intermetalne faze (faza A_2B: A označava Ni, Cr, Fe, dok B označava Nb, Mo, Ti) i δ faze (Ni_3Nb) kada se zavarena konstrukcija izlaže visokim temperaturama tijekom dužeg razdoblja. Stoga su provedena mnoga istraživanja za kontrolu formiranja intermetalne i δ faze. Rezultati su pokazali da su morfologija, distribucija i sadržaj intermetalne faze vrlo ovisni o segregaciji vatrootpornih elemenata, kao što su Nb i Cr, te je teško kontrolirati segregaciju Nb i formiranje intermetalne faze. Mehanička svojstva, kao što su granica razvlačenja i otpornost na zamor materijala, u zoni utjecaja topline znatno se smanjuju. Razlog tome je ponovno zagrijavanje koje nastaje prilikom zavarivanja čelika visoke čvrstoće ili nehrđajućih čelika žicom za zavarivanje legure Inconel 625. U tim slučajevima, kako bi se dobio bolji udarni rad loma, otpornost na zamor materijala i otpornost na puzanje, kao i mehanička svojstva u zoni utjecaja topline, komponente moraju biti podvrgnute naknadnoj toplinskoj obradi [28].

4.7. Primjena u industrijskoj praksi

Svojstva legure Inconel 625, koja ju čine izvrsnim izborom za primjenu u pomorskoj industriji, su otpornost na lokalnu koroziju (rupičasta korozija i korozija u procijepu), visoka otpornost na zamor materijala, velika vlačna čvrstoća i otpornost na koroziju potenciranu kloridnim ionima. Koristi se u kablovima za sidrenje brodova, za lopatice propelera topovnjača, za pomoćne pogonske motore i brzo odvojive elemente na podmornicama, za ispušne cijevi brodova, za obloge podvodnih kabela, za parne mjehove. Legura Inconel 625 dodatno bi se mogla primjenjivati za opruge, brtve, mjehove za podvodnu kontrolu, priključke za kablove, komponente oceanografskih instrumenata [26].

Visoka vlačna čvrstoća, otpornost na oksidaciju te izvrsna zavarljivost su svojstva legure Inconel 625 koja ju čine veoma zanimljivom za primjenu u području zrakoplovne i svemirske industrije. Primjenjuje se za komponente kao što su sustavi cijevi zrakoplova, sustavi ispušnih plinova motora, otporne rešetkaste zavarene konstrukcije za kućišta motora, cijevi za gorivo i hidrauliku, metalni mjehovi, prsteni kućišta turbine, cijevi izmjenjivača topline u sustavima za kontrolu ispušnih plinova. Legura je također pogodna za izradu brtvi na turbinama, lopatice kompresora i cijev za potisnu komoru na raketama [26].

Glavni razlog široke primjene legure Inconel 625 u području kemijske industrije je njezina izvanredna otpornost na koroziju u širokom rasponu temperatura i tlakova. Visoka čvrstoća omogućava da se, na primjer, koristi za izradu posuda ili cijevi s tankim stijenkama (što kod nekih drugim materijala nije moguće) čime se poboljšava prijenos topline i postiže manja masa. Neki primjeri proizvoda koji zahtijevaju kombinaciju čvrstoće i otpornosti na koroziju legure Inconel 625 su cjevčice, reakcijske i destilacijske posude, izmjenjivači topline, prijenosne cijevi, ventili itd [26].

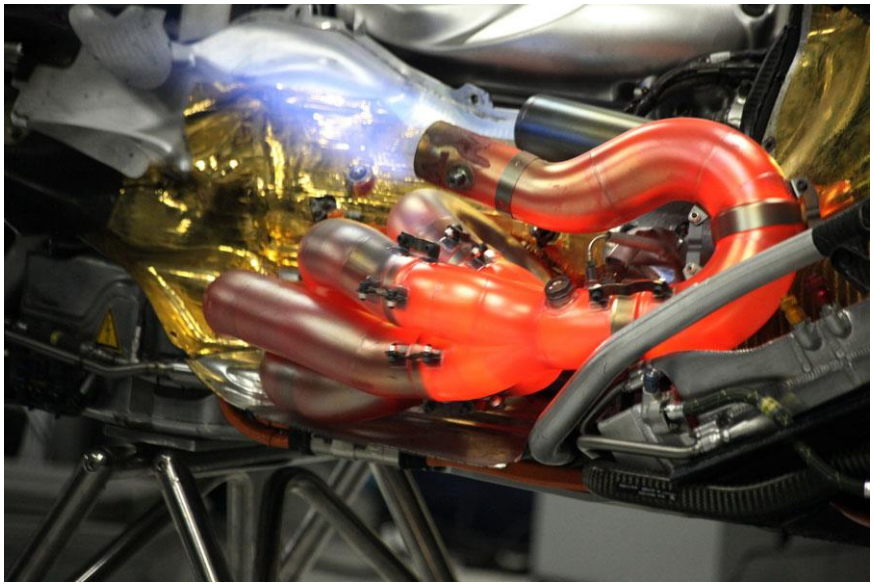
Također, legura Inconel 625 se može koristiti u nuklearnoj industriji za izradu reaktorskih jezgri i komponente kontrolnih šipki u nuklearnim reaktorima. Taj materijal je pogodan zbog svoje velike čvrstoće te odlične otpornosti na koroziju (napetosnu koroziju i koroziju u procijepu) u vodi od 260 °C do 316 °C. Legura 625 također se uzima u obzir za primjenu u naprednim reaktorskim konceptima zbog visoke čvrstoće pri povišenoj temperaturi, osobito između 650 °C i 760 °C [26].

Sljedećim primjerima dan je pregled nekih dijelova napravljenih od legure Inconel 625.

Slikom 39 prikazan je primjer kotlovskih cijevi obloženih Inconelom 625.

Slika 39. Kotlovske cijevi obložene Inconelom 625 [33]

Slikom 40 prikazan je ispušni sustav kojeg koriste bolidi Formule 1. Sa same slike je vidljivo da se razvijaju izrazito visoke temperature pa je bitno da legura zadržava čvrstoću na širokom rasponu temperature. Tu se ističe i bitna karakteristika legure Inconela 625, a to je da kada se grije, Inconel stvara debeli, stabilni, pasivizirani oksidni sloj koji štiti površinu od daljnjeg napada [34].

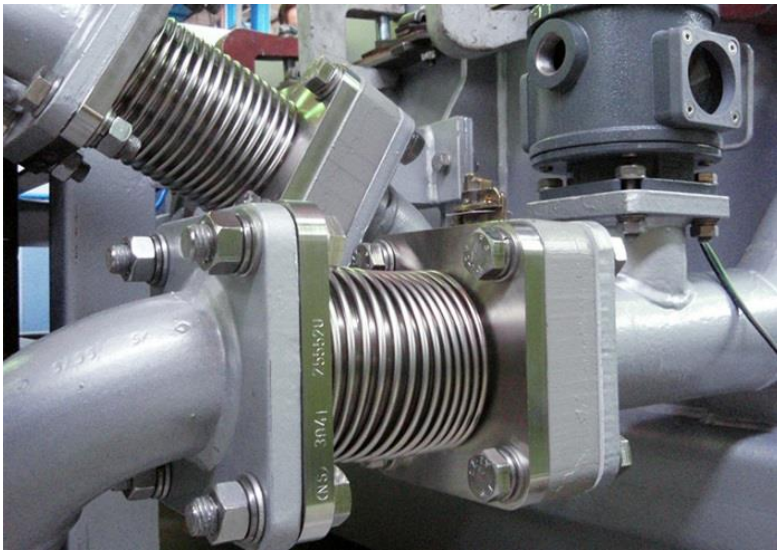


Slika 40. Ispušni sustav bolida Formule 1 [34]

Slika 41 prikazuje izmjenjivač topline tvrtke *Tinita Engineering (P) Ltd* izrađen od legure Inconel 625.

Slika 41. Izmjenjivač topline [35]

Slikom 42 prikazana su dva aksijalna kompenzatora. Projektirani su za prihvaćanje pomaka produljenja i stiskanja u smjeru osi. Koriste se u petrokemijskim postrojenjima i rafinerijama, izmjenjivačima topline, ispušnim sustavima, kao brtve na ventilima itd [36].



Slika 42. Aksijalni kompenzatori [36]

4.8. Zavarivanje Inconela 625 MIG/MAG postupkom

MIG/MAG postupak zavarivanja pogodan je za navarivanje, a ujedno je i cijena samog uređaja niža u usporedbi s plazma uređajem. Količina nataljenog materijala višestruko je veća u odnosu na TIG i plazma postupke zavarivanja te je zavarivaču mnogo lakše upravljanje

pištoljem. Međutim u odnosu na TIG postupak zavarivanja mnogo je veće miješanje osnovnog i dodatnog materijala što povisuje postotak željeza u navarenom sloju. Prilikom zavarivanja ovisno o debljini osnovnog materijala moguća je uporaba prijenosa materijala kratkim spojevima (I = 170 A, U = 22 V) ili zavarivanje štrcajućim lukom (I = 240 A, U = 26 V, v = 230 mm/min, duljina slobodnog kraja žice 15 mm). Navarivanje MIG/MAG postupkom preporučljivo je provoditi u zaštiti mješavine plinova argona i helija te Inconel 625 elektrode u vidu dodatnog materijala, promjera oko 1,2 mm. Nadalje, preporučljivo je držati međuprolaznu temperaturu nižom od 300 °C kako bi se smanjila zaostala naprezanja. Na kvalitetu zavara direktno utječu parametri zavarivanja kao što su napon, struja, visina slobodnog kraja žice, brzina zavarivanja [37].

CMT omogućuje zavarivanje u jednom sloju s malim udjelom rastaljenog osnovnog materijala u navarenoj prevlaci Inconela 625. To daje jednoličniji sloj i znatno manja naprezanja. Ne dolazi do deformacija pa se navari mogu lako međusobno povezati. Nakon zavarivanja ovim postupkom, ako je sve pravilno izvedeno, sadržaj željeza u prevlaci je manji od 3 % (mora biti manje od 5 %) [38].

5. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni rad je proveden s ciljem određivanja optimalnog područja parametara kako bi se postigla maksimalna produktivnost pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom na leguri Inconel 625. Eksperimentalni rad je proveden u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

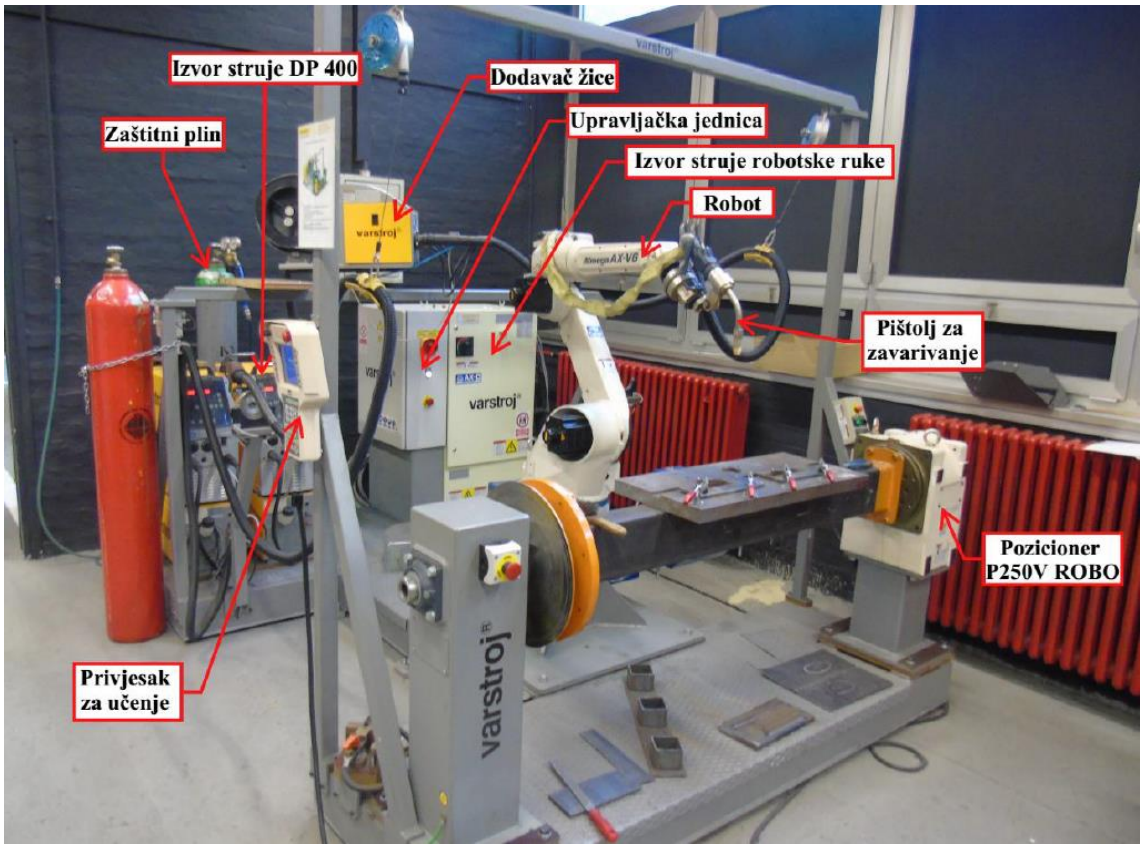
U prvom dijelu je određeno područje parametara za dva odabrana plina (Argon 5.0 i Inoxline H5) kojima će se navarivati zid. Zatim je provedena sama izrada zidova WAAM postupkom na robotskoj stanici Almega OTC AX V6 u Laboratoriju za zavarivanje.

Nakon izrade zida pripremljeni su uzorci i provedena su daljnja ispitivanja, odnosno nerazorna ispitivanja (radiografija), te ispitivanje mikrostrukture (makro i mikro analiza) i mehaničkih svojstava (mjerenje tvrdoće i statički vlačni pokus).

Na kraju rada provedena je analiza rezultata. Kako bi se mogla usporediti provedena ispitivanja pri normalnim parametrima i parametrima za maksimalnu produktivnost, korištena su dva uzorka iz [39]. Kod prvog uzorka koristi se zaštitni plin Argon 5.0, a kod drugog Inoxline H5, odnosno jednaki plinovi kao i u ostalim uzorcima u eksperimentu.

5.1. Oprema za zavarivanje

Postupak izrade zidova proveden je na robotskoj stanici Almega OTC AX V6 (slika 43). Glavni dio robotske stanice je robot OTC Almega AX V6 koji ima 6 rotacijskih stupnjeva slobode gibanja pomoću kojih u pripadajućem radnom prostoru može postići precizno pozicioniranje i orijentiranje pištolja za zavarivanje. Opremljen je i privjeskom za učenje pomoću kojeg se izvršava *on-line* programiranje, odnosno njime se definiraju putanje i tehnoloških parametri potrebni za zavarivanje. Uz prikazane dijelove, robotska stanica ima i "shock" senzor koji reagira u slučaju kolizije robota s objektima iz okoline, uređaj za čišćenje sapnice, rezanje žice i nanošenje sredstva protiv naljepljivanja kapljica, elektrolučni senzor AX-AR te izvor struje za TIG zavarivanje.



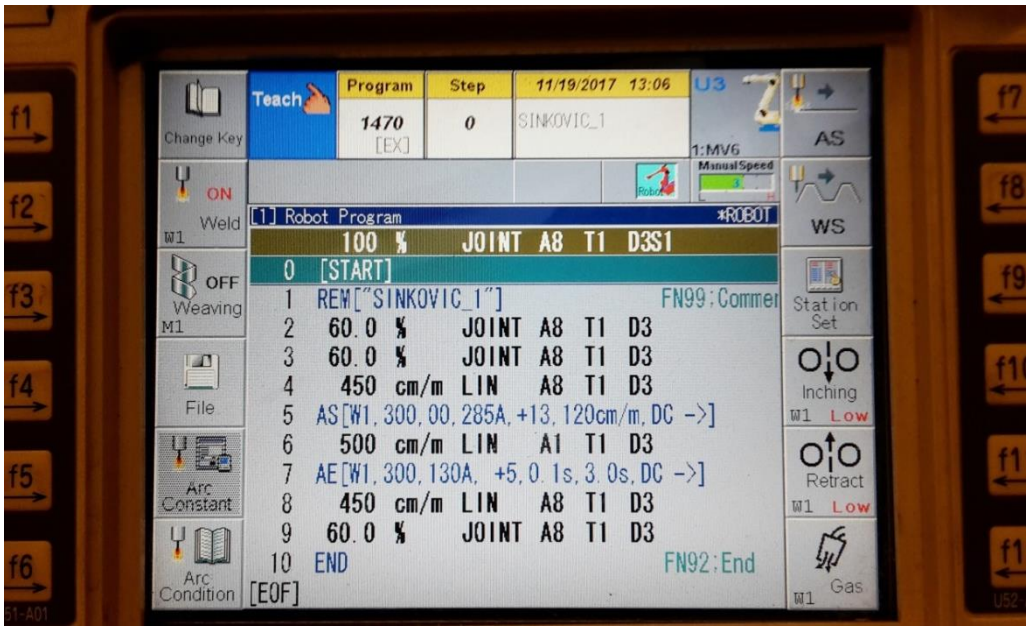
Slika 43. Robotska stanica Almega OTC AX V6 [5]

Robotska stanica također sadrži i izvor struje OTC Daihen DP 400 čije su karakteristike prikazane u tablici 13.

Tablica 13. Karakteristika izvora struje DP 400 [40]

Izvor struje		DP 400
Priključeni napon, V / Hz		400 / 50
Područje struje zavarivanja, A		30 – 400
Područje napona zavarivanja, V		15,5 – 34
Intermitencija, A	100 %	283
	50 %	400
Promjer žice za zavarivanje, mm		0,8 – 1,2
Masa, kg		46
Dimenzije (D × Š × V), mm		653 × 300 × 595

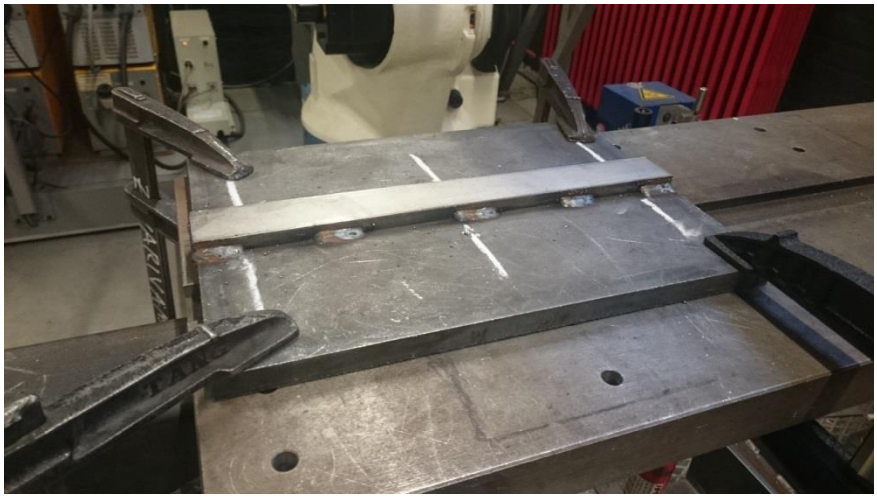
Slikom 44 prikazan je primjer programa za navarivanje jednog sloja zida napisan na privjesku za učenje.



Slika 44. Program za jedan prolaz

5.2. Podloga i dodatni materijal

Za podlogu na koju je navaren zid korištena je ploča od nehrđajućeg čelika AISI 304 debljine 10 mm, dimenzija 350 mm × 40 mm. Podloga je zavarena na veću ploču od konstrukcijskog čelika (12 mm) prvenstveno kako bi se smanjio utjecaj deformacija uzrokovan unosom topline, a i kako bi se olakšalo pričvršćivanje ploče na radni stol. Prije početka zavarivanja površina podloge je iščetkana i očišćena. Slikom 45 prikazan je način pričvršćivanja i pozicioniranja podloge na radni stol.



Slika 45. Pričvršćivanje ploče (podloge) prije zavarivanja

Za navarivanje slojeva zida kao dodatni materijal korištena je puna žica ERNiCrMo-3 (prema AWS A5.14 normi) proizvođača *Special Metals*, promjera 1,2 mm. Ova žica može se koristiti kod MAG i TIG postupka zavarivanja legura Inconel 625, Incoloy 825, Incoloy 25-6MO i niz visokočvrstih austenitnih nehrđajućih čelika. Također se koristi i za prevlačenje čelika. Zadržava visoku čvrstoću u širokom rasponu temperatura, te zadržava otpornost na lokalnu koroziju kao što je rupičasta ili korozija u procijepu [41].

U tablici 14 prikazan je približni kemijski sastav žice ERNiCrMo-3, dok su osnovna mehanička svojstva iste prikazane u tablici 15.

Tablica 14. Približni kemijski sastav žice ERNiCrMo-3 [41]

	Ni + Co	C	Mn	Fe	S	Cu	Si	Al	Ti	Cr	Nb + Ta	Mo	P	Ostalo
Min, %	58,0	-	-	-	-	-	-	-	-	20,0	3,15	8,0	-	-
Maks, %	-	0,1	0,5	1,0	0,015	0,5	0,5	0,4	0,4	23,0	4,15	10,0	0,02	0,5

Tablica 15. Mehanička svojstva žice ERNiCrMo-3 [41]

Vlačna čvrstoća, MPa	Granica razvlačenja, MPa	Istezanje, %
724	448	30

5.3. Zaštitni plinovi

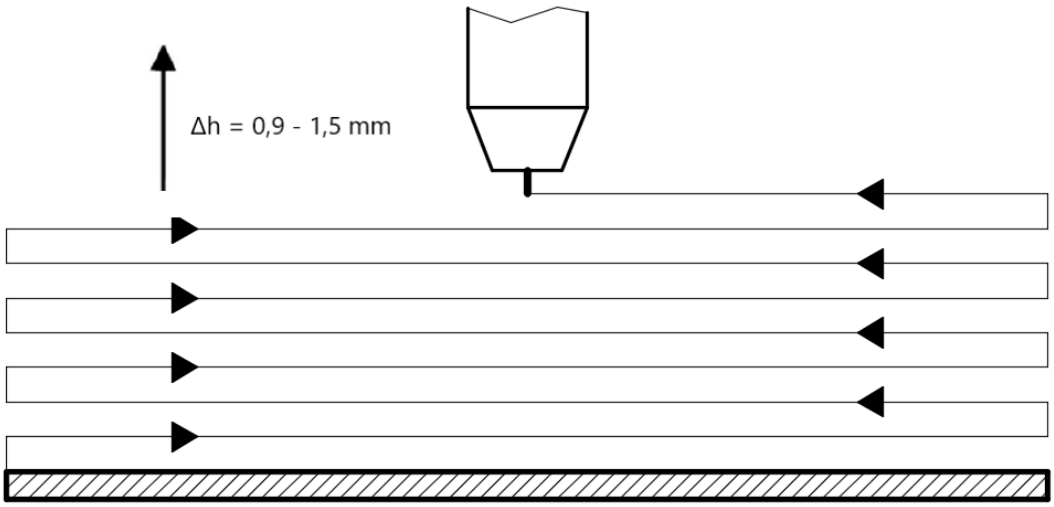
U eksperimentu su korištena dva zaštitna plina s ciljem da se utvrdi kod kojeg se postiže veća produktivnost aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom, legure Inconel 625. Također, uspoređuje se njihov utjecaj na kvalitetu zavara, mehanička svojstva i mikrostrukturu. Korišteni plinovi prikazani su u tablici 16.

Tablica 16. Zaštitni plinovi [42]

Naziv plina	Grupa po HRN EN ISO 14175	Volumni sastav, %	
		Ar	H_2
Argon 5.0	I1	100	-
Inoxline H5	R1	95	5

5.4. Putanje pištolja za zavarivanje

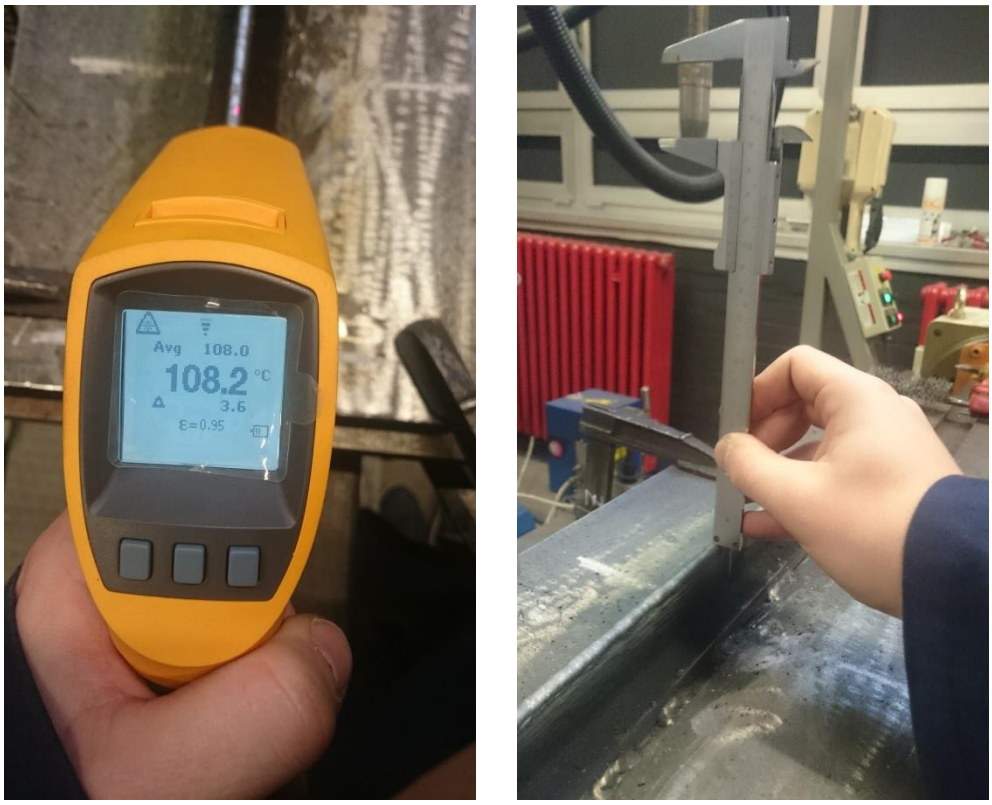
Putanje pištolja za zavarivanje bile su naizmjenične, tj. prvi prolaz s lijeva u desno, sljedeći s desna u lijevo, i tako naizmjenično, kako je i prikazano slikom 46. To se prakticira iz razloga kako se ne bi na jednoj strani samo uspostavljao električni luk, a na drugoj samo prekidao, jer bi to dovelo do neujednačene visine zida. Naizmjeničnim putanjama zavarivanja postiže se ujednačenost i jednaka visina zida s jedne i druge strane.



Slika 46. Putanje pištolja za zavarivanje [12]

5.5. Parametri zavarivanja

Tijekom izrade zidova, odnosno prilikom navarivanja svakog sloja očitavani su parametri zavarivanja (jakost struje i napon). Nakon navarivanja svakog prolaza pomičnim mjerilom izmjerena je visina zida (slika 47b), očetkana je gornja površina te je u tri točke (na krajevima i u sredini) izmjerena međuprolazna temperatura infracrvenim termometrom Fluke 568 IR Thermometer (slika 47a). Kredom su na većoj ploči označena tri mjesta (slika 45) na kojima se mjeri međuprolazna temperatura kako bi se osigurala ponovljivost rezultata mjerenja. Cilj je bio održati temperaturu međuprolaza nižom od 150 °C.



a) b)

Slika 47. a) mjerenje temperature zida; b) mjerenje visine zida

Unesena toplina računa se prema sljedećem izrazu [43]:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v_z} \times \frac{60}{1000} \ , \quad \mathrm{kJ/cm} \tag{2}$$

Gdje je:

Q – unos topline u zavar, kJ/cm

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

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v_z – brzina zavarivanja, cm/min.

Kod izrade prvog zida (uzorak 1) korišten je plin Argon 5.0. Brzina zavarivanja je konstantna i iznosi 120 cm/min. Slobodni kraj žice je 12 mm, a protok plina 21 l/min. Ostali parametri zavarivanja, kao što su: jakost struje, napon, međuprolazna temperatura, visina svakog prolaza i unesena toplina, prikazani su u tablici 17.

Tablica 17. Parametri zavarivanja prvog zida (Argon 5.0)

Prolaz	Visina, mm	Jakost struje, A	Napon, V	Međuprolazna temperatura, °C (u tri točke)			Unesena toplina, kJ/cm
1.	1,1	244	24,7	23	23	22	2,41
2.	2,3	245	26,0	30	30	31	2,55
3.	3,5	255	24,0	36	38	36	2,45
4.	4,6	240	24,8	40	44	42	2,38
5.	5,8	250	23,8	46	48	45	2,38
6.	7,2	240	25,0	48	53	48	2,40
7.	8,4	250	23,7	52	57	52	2,37
8.	9,7	245	25,0	55	63	56	2,45
9.	10,9	250	24,4	63	67	59	2,44
10.	12,0	240	25,4	62	73	67	2,44
11.	13,3	250	24,8	70	74	66	2,48
12.	14,3	240	25,3	75	82	75	2,43
13.	15,4	250	24,3	71	83	75	2,43
14.	16,6	245	24,9	67	75	70	2,44
15.	17,8	255	24,5	78	87	78	2,50
16.	19,0	248	24,8	72	78	72	2,46
17.	20,2	260	23,5	74	84	73	2,44
18.	21,1	243	25,0	87	95	87	2,43
19.	22,0	252	24,6	89	94	85	2,48
20.	23,2	247	25,2	78	87	80	2,49
21.	24,4	255	24,3	90	97	89	2,48
22.	25,7	249	24,8	90	99	94	2,47
23.	26,6	261	23,5	93	97	87	2,45
24.	27,8	250	24,7	97	107	102	2,47
25.	29,0	260	23,8	99	106	97	2,48
26.	30,3	250	24,7	103	113	105	2,47
27.	31,4	260	23,7	107	113	104	2,46
28.	32,4	252	24,5	103	114	104	2,47
29.	33,6	270	23,0	106	115	106	2,48
30.	34,7	256	24,2	97	109	100	2,48
31.	35,9	260	23,7	106	110	101	2,46
32.	37,0	258	23,8	100	111	107	2,46
33.	38,2	263	23,2	110	113	106	2,44
34.	39,4	245	24,8	100	109	106	2,43
35.	40,6	255	24,1	120	133	119	2,46
36.	41,6	257	23,9	119	125	120	2,46
37.	42,8	260	23,6	114	116	115	2,45
38.	43,7	255	24,2	117	124	121	2,47
39.	44,9	255	24,3	125	132	130	2,48

40.	45,8	250	24,6	123	137	125	2,46
41.	46,9	254	24,0	123	135	121	2,44
42.	48,2	240	25,0	124	142	140	2,40
43.	49,3	259	23,4	126	136	129	2,42
44.	50,2	251	24,1	122	130	127	2,42
45.	51,3	259	23,6	135	144	129	2,44
46.	52,3	253	23,9	129	138	134	2,42
47.	53,5	262	23,5	128	130	134	2,46
48.	54,6	254	24,0	137	149	140	2,44
49.	55,5	263	23,3	136	137	129	2,45
50.	56,6	250	24,2	117	126	116	2,42
51.	57,8	260	23,4	101	111	106	2,43
52.	59,0	253	23,8	122	137	133	2,41
53.	60,0	258	23,7	144	148	136	2,45
54.	61,1	261	23,6	149	156	151	2,46
55.	62,3	270	23,1	-	-	-	2,49

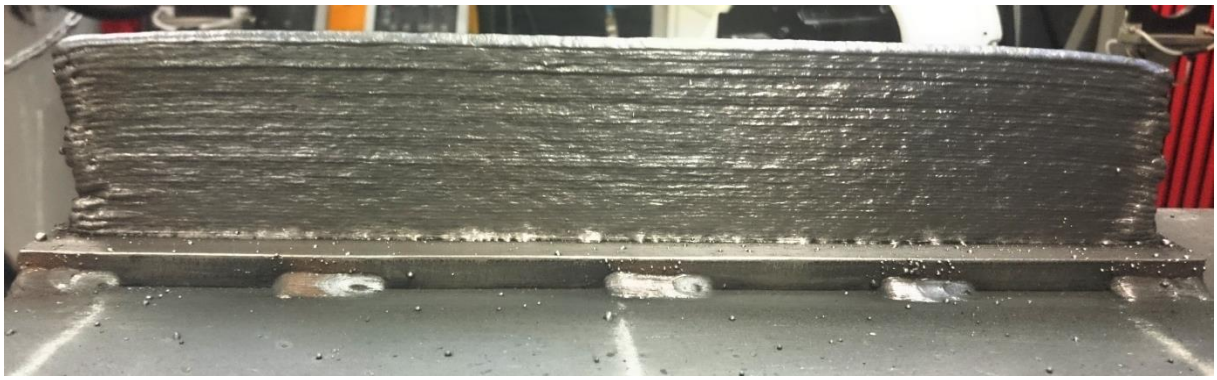
Kod izrade drugog zida (uzorak 2) korišten je plin Inoxline H5. Brzina zavarivanja je konstantna i iznosi 120 cm/min. Slobodni kraj žice je 12 mm, a protok plina 21 l/min. Ostali parametri zavarivanja, kao što su: jakost struje, napon, međuprolazna temperatura, visina svakog prolaza i unesena toplina, prikazani su u tablici 18.

Tablica 18. Parametri zavarivanja drugog zida (Inoxline H5)

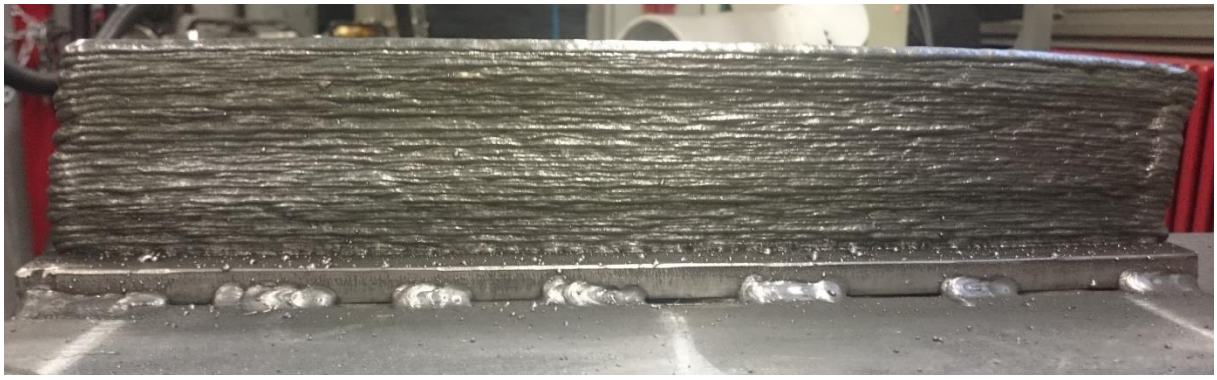
Prolaz	Visina, mm	Jakost struje, A	Napon, V	Međuprolazna temperatura, °C (u tri točke)			Unesena toplina, kJ/cm
1.	1,5	235	25,0	27	26	25	2,35
2.	2,8	240	25,5	32	34	33	2,45
3.	4,1	243	25,2	40	43	41	2,45
4.	5,3	235	25,9	47	52	51	2,43
5.	6,5	250	25,2	47	51	52	2,52
6.	7,7	238	26,0	53	59	60	2,48
7.	8,9	247	24,7	60	62	63	2,44
8.	10,1	240	25,8	63	70	72	2,48
9.	11,4	240	25,3	61	67	66	2,43
10.	12,6	236	25,8	66	79	78	2,44
11.	14,0	245	25,3	69	74	75	2,48
12.	15,3	237	25,8	69	74	76	2,45
13.	16,5	250	25,1	78	82	79	2,51
14.	17,5	242	25,6	78	85	84	2,48
15.	18,6	253	25,0	80	88	83	2,53
16.	19,7	240	25,8	77	80	82	2,48
17.	21,0	255	24,7	87	92	88	2,52
18.	22,3	240	25,7	92	99	96	2,47

19.	23,5	255	24,7	93	96	93	2,52
20.	24,6	242	25,5	97	109	104	2,47
21.	25,9	260	24,2	100	101	100	2,52
22.	27,3	240	25,4	92	98	99	2,44
23.	28,5	255	24,5	103	105	102	2,50
24.	29,7	241	25,6	97	109	105	2,47
25.	31,0	254	24,9	101	103	100	2,53
26.	32,2	245	25,4	111	120	117	2,49
27.	33,3	250	24,9	119	117	110	2,49
28.	34,4	240	25,6	109	123	120	2,46
29.	35,6	250	25,0	113	123	116	2,50
30.	36,7	242	25,4	114	130	136	2,46
31.	38,0	252	24,7	125	128	124	2,49
32.	39,4	246	25,6	108	131	129	2,52
33.	40,6	260	24,2	115	135	125	2,52
34.	41,9	244	25,6	110	124	136	2,50
35.	43,1	250	24,8	115	120	120	2,48
36.	44,2	241	25,5	112	134	138	2,46
37.	45,4	260	24,4	124	132	122	2,54
38.	46,4	240	25,0	135	150	148	2,40
39.	47,6	260	23,7	126	125	119	2,46
40.	48,9	243	25,2	121	133	149	2,45
41.	50,0	250	24,5	134	135	137	2,45
42.	51,2	235	25,3	120	142	143	2,38
43.	52,4	255	23,7	140	144	143	2,42
44.	53,5	245	25,0	136	145	150	2,45
45.	54,6	250	24,2	145	143	147	2,42
46.	55,8	243	24,8	140	143	148	2,41
47.	57,2	248	24,7	118	123	127	2,45
48.	58,4	240	24,9	136	147	149	2,39
49.	59,5	259	24,0	131	140	141	2,49
50.	60,5	244	24,8	128	143	149	2,42
51.	61,6	250	24,3	133	136	139	2,43
52.	62,9	247	24,9	115	137	144	2,46
53.	64,2	250	24,8	-	-	-	2,48

Slikama 48 i 49 prikazani su dobiveni zidovi. Vidljivo je da drugi zid ima znatno grublju, odnosno ″reljefniju″, površinu od prvog zida. Također, kod drugog uzorka rasprskavanje kapljica je mnogo izraženije nego kod prvog uzorka.



Slika 48. Prvi zid (Argon 5.0)



Slika 49. Drugi zid (Inoxline H5)

5.6. Priprema uzoraka

Već pri odrezivanju zida i podloge s ploče od konstrukcijskog čelika uočeno je značajno naprezanje u materijalu. Prilikom uklanjanja zavara i oslabljivanja spoja došlo je do pucanja ostalih zavara te naglog iskakanja zida (slika 50) uzrokovanog akumuliranim naprezanjima u pripojima.

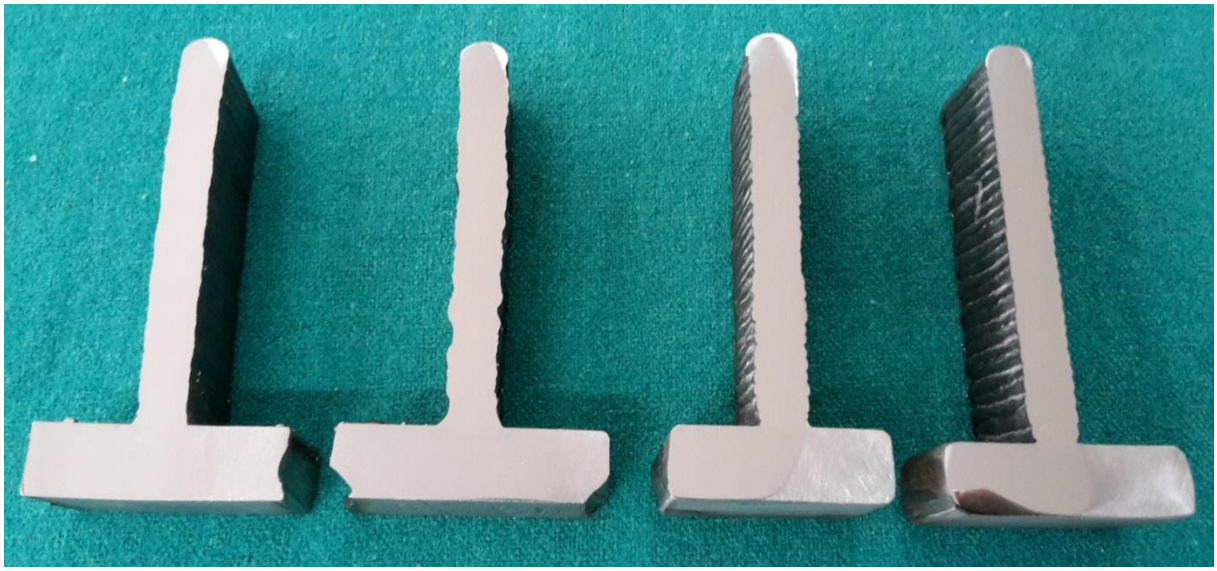
Slika 50. Uklanjanje podložne ploče

Nakon uklanjanja podložne ploče slijedila je izrada uzoraka za daljnja ispitivanja. Prvo je na tračnoj pili na kraju zida odrezan segment od nekoliko milimetara kako bi se dobila ravna ploha bez neravnina nastalih uspostavom i prekidom električnog luka. Zatim je odrezan uzorak duljine 20 mm koji služi za određivanje mikrostrukture i mjerenje tvrdoće. Nakon rezanja, uzorci s oba zida su ručno brušeni brusnim papirom smanjujući veličinu zrnatosti, i to redom: P80, P100, P240, P320 i P500.

U daljnji proces (poliranje i nagrizanje) dodaju se dva uzorka iz [39]. Njih je potrebno polirati i nagristi te slikati pod mikroskopom, kako bi se mogli koristi za daljnju usporedbu i analizu mikrostrukture.

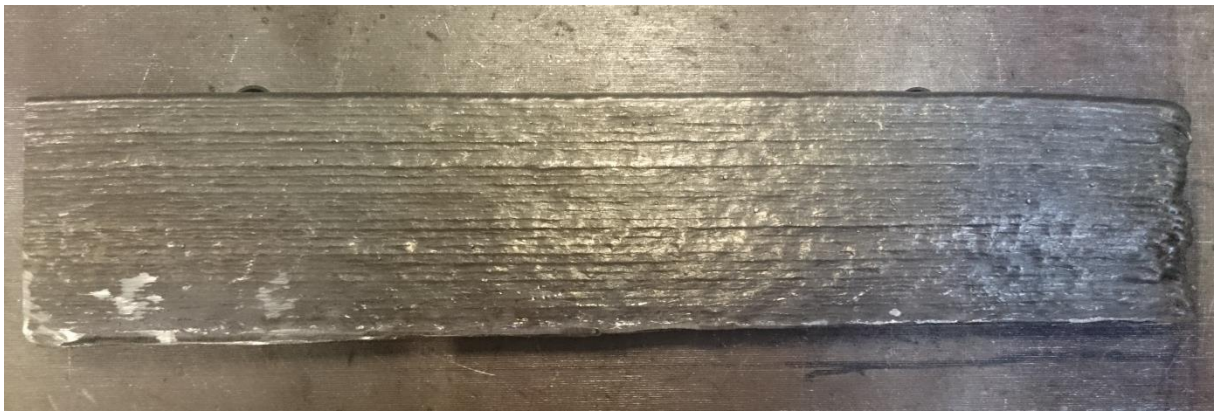
Fino brušenje uzoraka provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju na uređaju Phoenix Alpha Grinder Polisher. Nakon završenog brušenja, uzorci su isprani vodom (kako bi se uklonile nečistoće) te su prebačeni na uređaj DAP-V gdje su dalje polirani.

Za makrostrukturnu i mikrostrukturnu analizu uzorci su nagriženi (u Laboratoriju za zaštitu materijala) elektrokemijski u 10 %-tnoj oksalnoj kiselini uz napon od 8 V i u trajanju od 60 sekundi. Analiza mikrostrukture provedena je na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51. Slikom 51 prikazani su uzorci nakon poliranja.



Slika 51. Uzorci nakon poliranja

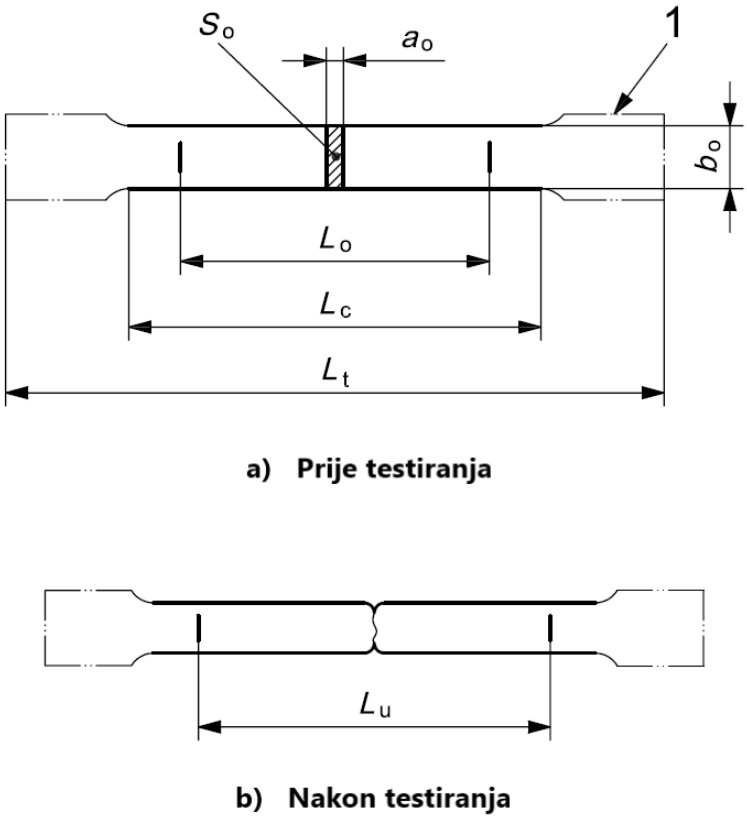
Za izradu epruveta za daljnja ispitivanja bilo je potrebno odrezati pločicu osnovnog materijala (AISI 304) na koju se je navarivao zid. Ploča je odrezana ručnom plazmom Hypertherm Powermax 45. Odrezana površina zida pobrušena je ručnom brusilicom. Slikom 52 prikazan je odrezani i pobrušeni uzorak spreman za strojnu obradu.



Slika 52. Zid odrezan od podloge

Sljedeći korak u izradi ispitnih epruveta je strojna obrada koja je obavljena u Laboratoriju za strojnu obradu. U tom koraku površine uzoraka su obrađene glodanjem kako bi se dobila ravna površina potrebna za daljnju obradu. Zatim su obrađeni uzorci odrezani na tračnoj pili na potrebne dimenzije za izradu epruveta za mjerenje statičkog vlačnog pokusa.

Dimenzije epruveta za statički vlačni pokus određene su prema normi ISO 6892-1:2009. Slikom 53 prikazani su crteži epruveta prije i nakon testiranja s kotiranim dimenzijama.



Slika 53. Dimenzije ispitnih epruveta; a) prije ispitivanja; b) nakon ispitivanja [44]

Kotirane dimenzije na slici 53 su:

- a_0 – početna debljina epruvete, mm
- b_0 – početna širina ispitnog područja epruvete, mm
- L_c – duljina suženog dijela epruvete, mm
- L_0 – duljina ispitnog područja epruvete, mm
- L_t – ukupna duljina epruvete, mm
- L_u – duljina ispitnog područja epruvete nakon testiranja, mm
- S_0 – površina ispitnog područja epruvete, mm^2
- 1 – krajevi za prihvat.

Tablicom 19 prikazane su dimenzije epruveta za ispitivanje statičkog vlačnog pokusa određene na temelju norme ISO 6892-1:2009.

Tablica 19. Određene dimenzije epruveta za ispitivanje statičkog vlačnog pokusa

a_0, mm	b_0, mm	L_0, mm	L_c, mm
5	20	60	90

Slikom 54 prikazana je ispitna epruveta za statički vlačni pokus.

Slika 54. Epruveta za statički vlačni pokus

5.7. Provedena ispitivanja

Kako bi se odredilo optimalno područje parametara s obzirom na produktivnost, te utjecaj zaštitnih plinova provedena su sljedeća ispitivanja:

- radiografija navarenih uzoraka
- analiza makrostrukture i mikrostrukture
- mjerenje tvrdoće po Vickersu (HV 10) duž cijelog presjeka uzorka
- ispitivanje statičkog vlačnog pokusa

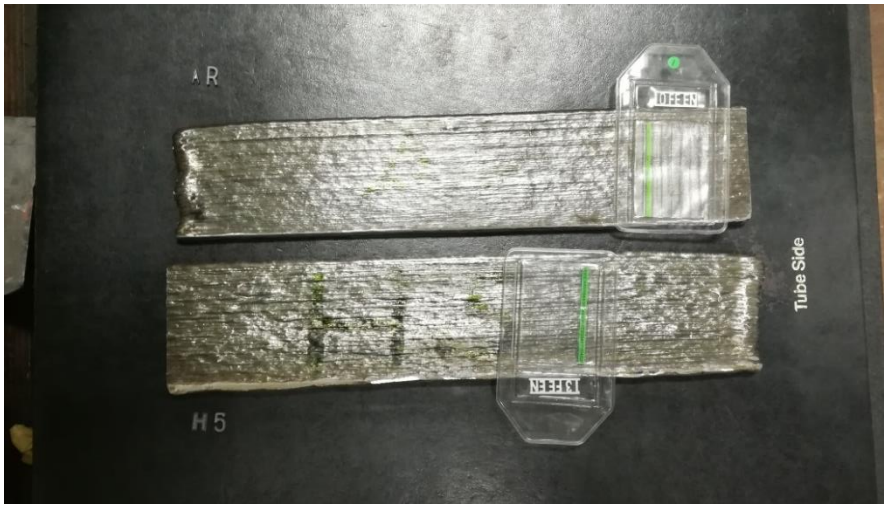
5.7.1. Radiografsko ispitivanje

Radiografsko ispitivanje provedeno je kako bi se detektirale geometrijske nepravilnosti (poroznosti, pore, uključci, pukotine) u metalu zavara. Radiografsko snimanje izvedeno je izvorima zračenja (RTG izotopi) na slikovne ploče s kojih se skeniranjem slika prebacuje na računalo u obliku digitalnog zapisa kojeg je moguće analizirati pomoću raznih računalnih alata (u ovom slučaju *iSee*).

Slikom 55 prikazani su uzorci prije radiografskog snimanja. Na slici se vide i žični indikatori kvalitete slike. Napravljeni su tako da se između folija od plastične mase nalazi pravilno raspoređenih sedam kalibriranih žica različitih dimenzija od materijala koji približno odgovara materijalu koji se prozračuje. Indikatori služe za određivanje kvalitete radiograma. Tablicom 20 prikazani su podaci o opremi zajedno s parametrima snimanja i skeniranja.

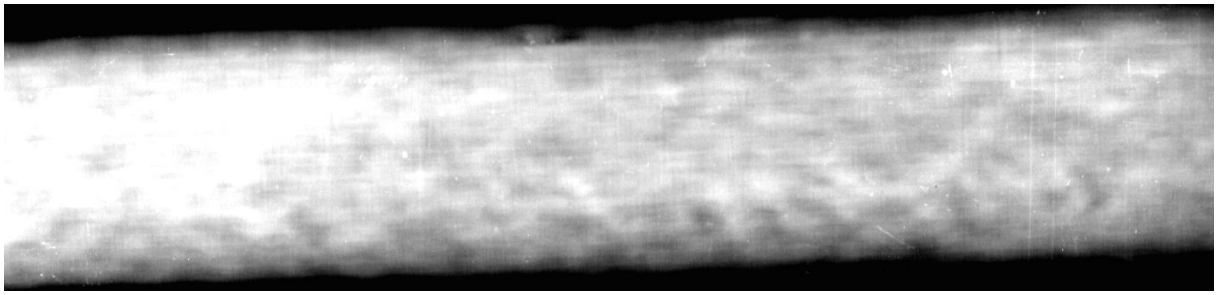
Tablica 20. Podaci o opremi te parametri snimanja i skeniranja

Podaci o rendgenu, skeneru i slikovnoj ploči	
Rendgen	BALTEAU GM 300D
Skener	VMI 3600SF
Slikovna ploča	Industrex XL blue 14" × 17"
Parametri snimanja	
Napon	150 kV
Struja	4 mA
Vrijeme ekspozicije	4 min
FF udaljenost	700 mm
Parametri skeniranja	
Napon lasera	15 V
Napon fotomultiplikatora	5,25 V
Rezolucija snimanja	50 µm

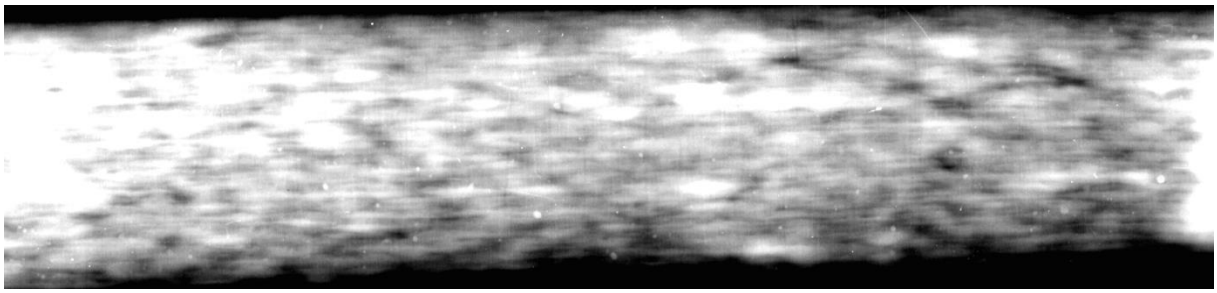


Slika 55. Uzorci prije radiografskog snimanja

Na slikama 56 i 57 prikazane su slike radiograma za oba zida. Kao i kod vizualne analize (slike 48 i 49), i ovdje je vidljivo da donji uzorak (Inoxline H5) ima znatno grublju, ″reljefniju″, površinu od gornjeg uzorka (Argon 5.0). To se vidi iz kontrasta, odnosno intenzivne izmjene crnih i bijelih površina. Na mjestima bijelih površina došlo je do slabijeg prodiranja zraka iz razloga što je na tom mjestu materijal deblji, dok je kod tamnijih površina tanji materijal te je prodiranje zraka jače. Bijele točkice koje se uočavaju na radiogramu su prskotine po površini uzoraka nastale prilikom zavarivanja što se podudara s nalazom vizualne kontrole. Vidljivo je da je broj točkica veći kod drugog uzorka, odnosno da je rasprskavanje kapljica mnogo izraženije nego kod prvog uzorka.

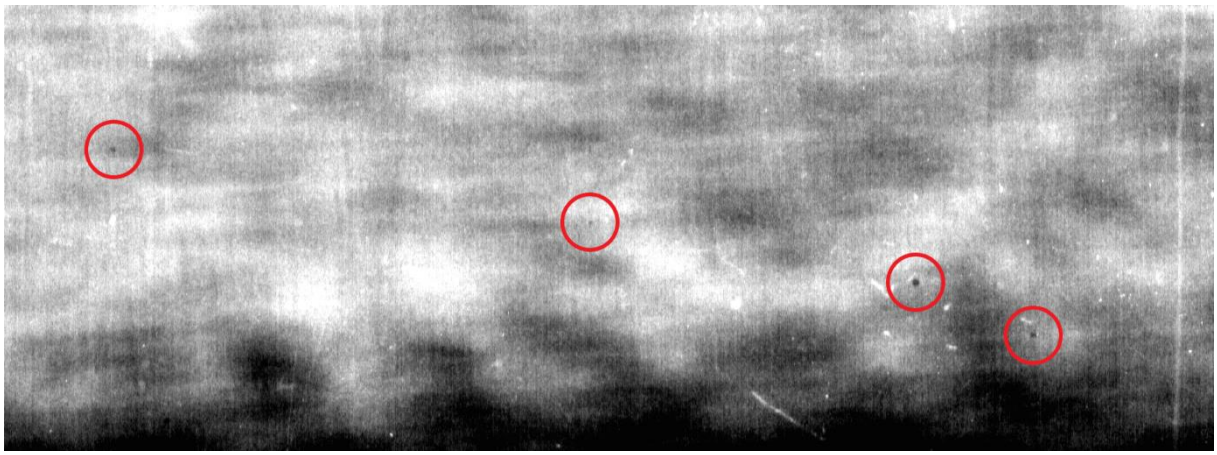


Slika 56. Radiogram prvog zida



Slika 57. Radiogram drugog zida

Na slici 58 uočavaju se na četiri mjesta crne točkice na prvom uzorku. To su uključci troske nastali zbog velikih brzina zavarivanja zbog toga što. Pri velikim brzinama zavarivanja dolazi do brzog skrućivanja taline te nema dovoljno vremena da troska ispliva na površinu.



Slika 58. Detalj radiograma prvog uzorka

U ostalim dijelovima uzoraka nisu uočene geometrijske nepravilnosti poput poroznosti, pora ili pukotina.

5.7.2. Analiza makrostrukture

Analiza makrostrukture, kao i sva daljnja ispitivanja, prevedena je za četiri uzorka (dva dodatna iz [39]). U tablici 21 prikazano je daljnje označavanje uzoraka.

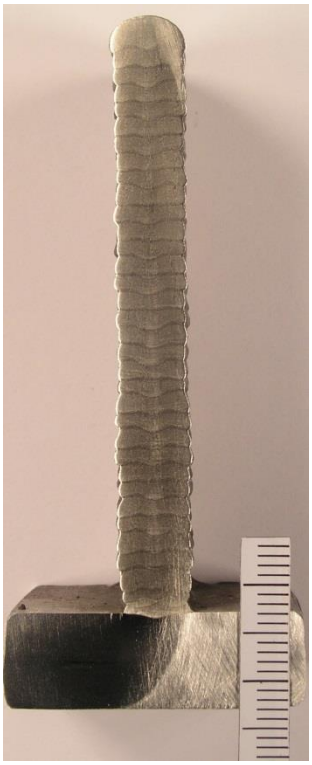
Tablica 21. Označavanje uzoraka

Oznaka	Plin	Brzina zavarivanja, cm/min
Uzorak 1	Argon 5.0	120
Uzorak 2	Inoxline H5	120
Uzorak 3	Argon 5.0	38
Uzorak 4	Inoxline H5	36

Pregledom makrostrukture uočena je nagnutost svih uzoraka (zidova), a ona se posebno ističe kod uzoraka 1 i 2. Kod uzoraka 2 i 3 ravnomjerno je slaganje slojeva materijala u prolazima te su oni jasno vidljivi, dok to baš i nije slučaj kod ostalih uzoraka. Penetracija prvog sloja u osnovni materijal izraženija je kod uzoraka 1 i 2. Najveća iskoristivost zida, odnosno najveća efektivna površina, je kod uzorka 3, dok je najmanje iskoristiv uzorak 1. Slikama 59, 60, 61 i 62 prikazani su makroizbrusci za sva četiri uzorka.

Slika 59. Makroizbrusak uzorka 1

Slika 60. Makroizbrusak uzorka 2

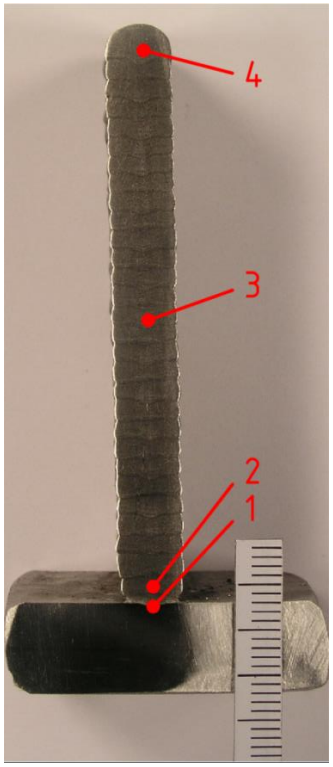


Slika 61. Makroizbrusak uzorka 3

Slika 62. Makroizbrusak uzorka 4

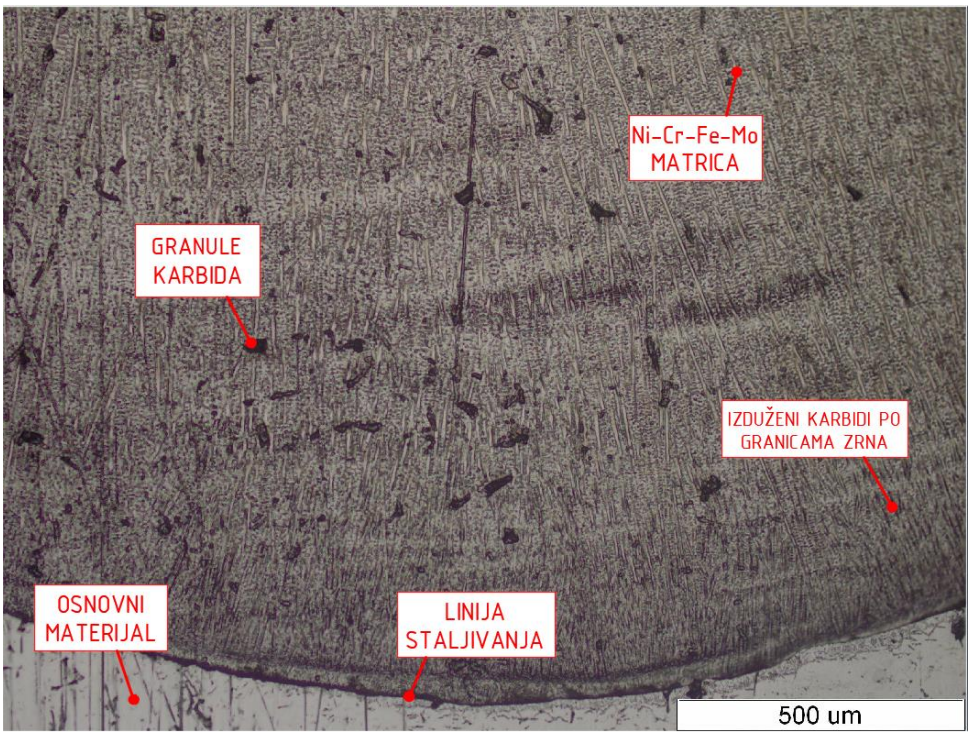
5.7.3. Analiza mikrostrukture

Na uzorcima je analizirana mikrostruktura na četiri mjesta (slika 63), odnosno analizirana je struktura u području gdje se miješaju osnovni i dodatni materijal te donjoj, srednjoj i gornjoj regiji zida.



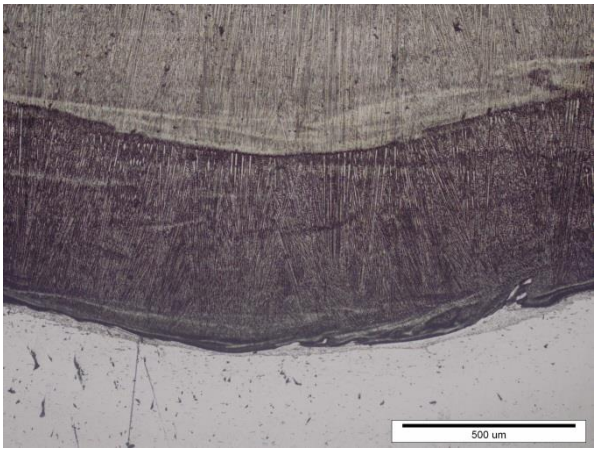
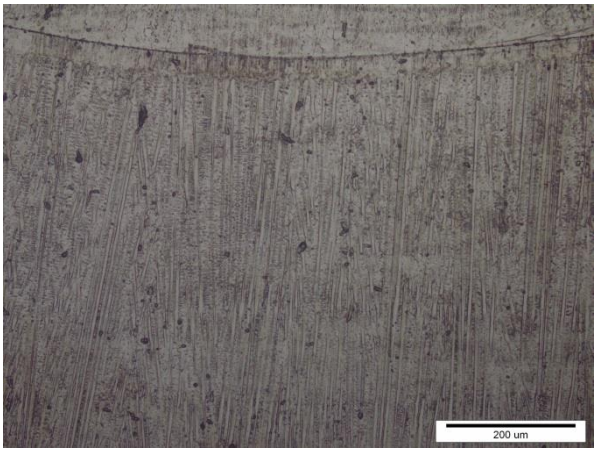
Slika 63. Pozicije na kojima je analizirana mikrostruktura

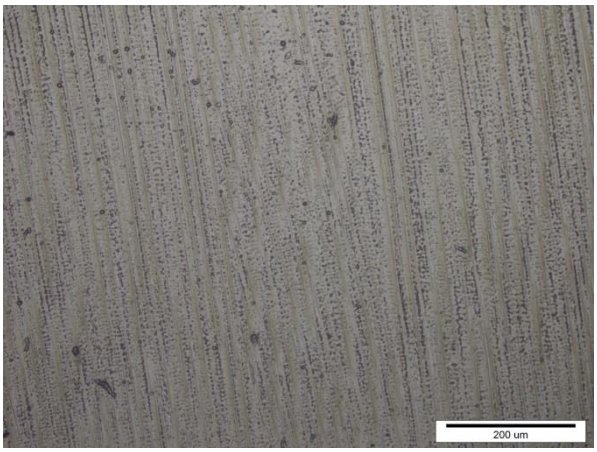
U tablicama 22, 23, 24 i 25 prikazane su slike mikrostruktura uzoraka. Kao što je opisano u teorijskom dijelu rada, mikrostruktura se sastoji od čvrste otopine matrice Ni-Cr-Fe-Mo. Ona se na slikama vidi kao bijela podloga. Crne točke koje se vide na slikama su karbidi. Najčešće se pojavljuju kromovi karbidi ($M_{23}C_6$). Također, vjerojatno su prisutni i M_6C i MC karbidi. Izdužene crne linije su također karbidi, izlučeni po granicama zrna, koji su nastali zbog usmjerenog hlađenja. Uslijed brzog hlađenja dobivena je izduženu dendritnu strukturu. Iz ovih slika metalografije ne može se točno znati koji su to karbidi. Kada bi se to željelo odrediti trebalo bi provesti detaljne metode karaktrizacije metala (npr. EDS analizu). Slikom 64 prikazana je mikrostruktura na uzorku 3 u području ZUT-a s označenim dijelovima.



Slika 64. Mikrostruktura u području ZUT-a s označenim dijelovima

Tablica 22. Slike mikrostrukture uzorka 1

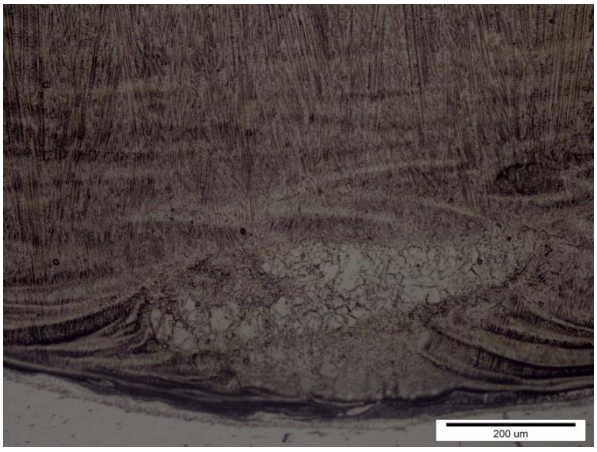
	
Pozicija 1 – linija staljivanja, povećanje 100x	Pozicija 2 – donji dio zida, povećanje 200x



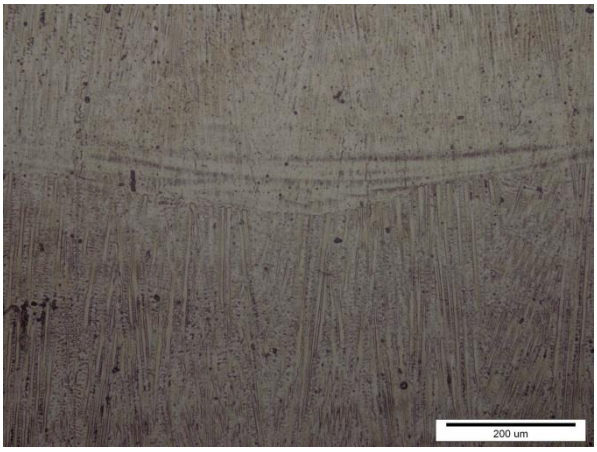
Pozicija 3 – srednji dio zida, povećanje 200x

Pozicija 4 – gornji dio zida, povećanje 200x

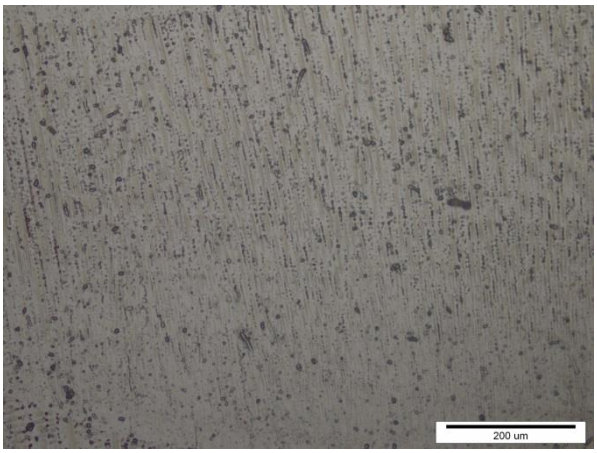
Tablica 23. Slike mikrostrukture uzorka 2



Pozicija 1 – linija staljivanja, povećanje 200x



Pozicija 2 – donji dio zida, povećanje 200x

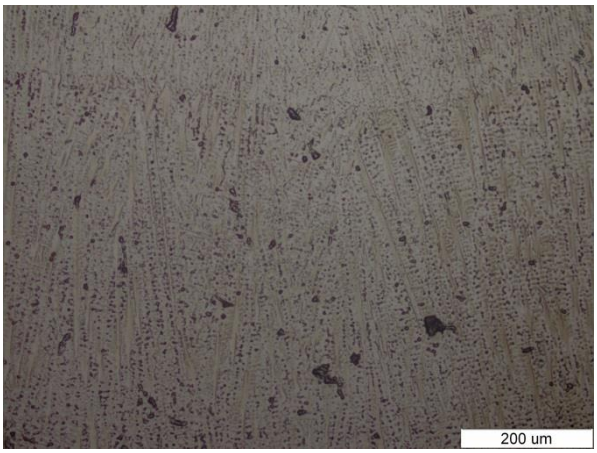


Pozicija 3 – srednji dio zida, povećanje 200x

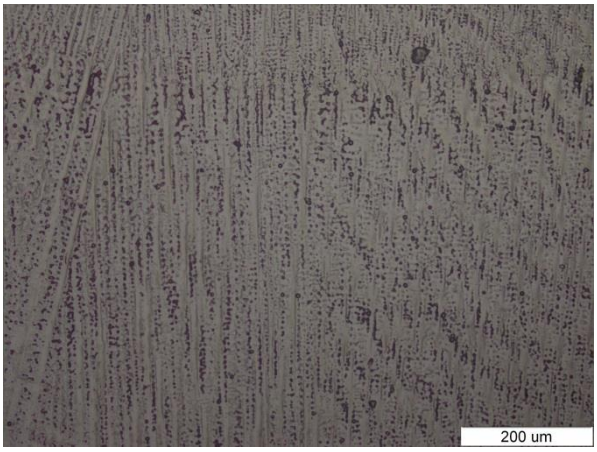
Pozicija 4 – gornji dio zida, povećanje 200x

Tablica 24. Slike mikrostrukture uzorka 3

Pozicija 1 – linija staljivanja, povećanje 200x



Pozicija 2 – donji dio zida, povećanje 200x

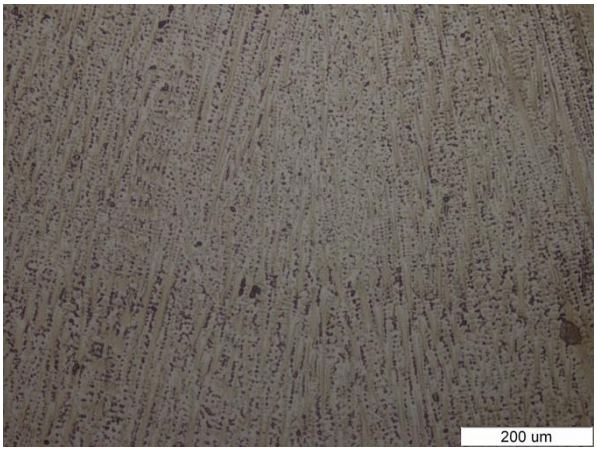


Pozicija 3 – srednji dio zida, povećanje 200x

Pozicija 4 – gornji dio zida, povećanje 200x

Tablica 25. Slike mikrostrukture uzorka 4

Pozicija 1 – linija staljivanja, povećanje 200x



Pozicija 2 – donji dio zida, povećanje 200x

Pozicija 3 – srednji dio zida, povećanje 200x

Pozicija 4 – gornji dio zida, povećanje 200x

Iz slika je vidljivo da postoji razlika u mikrostrukturi između donjeg i gornjeg (vrh) dijela zida. To je posljedica toplinske obrade koja je nastala tijekom navarivanja sljedećih slojeva na one u donjem dijelu zida. Tako se u gornjem dijelu zida može uočiti grublje zrnata mikrostruktura (veći udio karbida). Spuštajući se prema dnu zida uočavaju se sve manja zrna u strukturi.

Uporabom programa *ImageJ* uspoređen je udio karbida u mikrostrukturi između uzoraka u pojedinim dijelovima zida (donji dio, srednji dio, gornji dio). Rezultati su prikazani tablicom 26.

Tablica 26. Udio karbida u mikrostrukturi u pojedinim dijelovima zida

Uzorak	**Udio karbida, %**		
	Donji dio	**Srednji dio**	**Gornji dio**
Uzorak 1	36	25	36
Uzorak 2	34	18	35
Uzorak 3	25	20	28
Uzorak 4	24	24	27

Iz rezultata je vidljivo da je kod uzoraka 1 i 2 (veća brzina zavarivanja) udio karbida veći nego kod uzoraka 2 i 3 (manja brzina zavarivanja). Također, u rezultatima bi najmanji udio karbida trebao biti u donjem dijelu, a to ovdje nije slučaj. Razlog tome je taj što su slike donjeg dijela slikane u samom korijenu zida, a u tom području dolazi do miješanja osnovnog i dodatnog materijala. Primjena različitih zaštitnih plinova nema utjecaj na udio karbida.

5.7.4. Mjerenje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom (HV 10) izvršeno je u metalu zavara (zidu), zoni utjecaja topline i osnovnom materijalu. Ispitivanje je provedeno na tvrdomjeru Reichter. Provedeno je 18 mjerenja vertikalno od vrha zida prema osnovnom materijalu, kao što je prikazano slikom 65. Razmaci između točaka pri samom vrhu zida i u zoni utjecaja topline iznose 1 mm, dok su razmaci u središnjem dijelu zida 5 mm. Tablicom 27 prikazani su rezultati mjerenja tvrdoće za uzorak 1 i 2.

Slika 65. Raspored točaka mjerenja tvrdoće

Tablica 27. Izmjerene vrijednosti tvrdoće HV 10

Broj mjerenja	Tvrdoća, HV 10	
	Argon 5.0 (uzorak 1)	Inoxline H5 (uzorak 2)
1.	213	192
2.	223	203
3.	222	209
4.	224	218
5.	218	207
6.	215	210
7.	212	218
8.	218	212
9.	225	212
10.	232	202
11.	225	212
12.	235	218
13.	233	227
14.	230	227
15.	235	230
16.	228	230
17.	206	212
18.	189	181

5.7.5. Statički vlačni pokus

Ispitivanje je provedeno na kidalici tvrtke Heckert u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava materijala. Kidalica je povezana s računalom koje mjeri vlačnu čvrstoću (R_m), konvencionalnu granicu razvlačenja ($R_{p0,2}$), maksimalnu (F_m) te prekidnu silu (F_k). Slikom 66 prikazani su kidalica i uzorak tijekom ispitivanja.

Slika 66. Kidalica i uzorak tijekom ispitivanja

Slikama 67 i 68 prikazane su epruvete uzoraka 1 i 2 nakon ispitivanja.

Slika 67. Epruveta uzorka 1 nakon ispitivanja

Slika 68. Epruveta uzorka 2 nakon ispitivanja

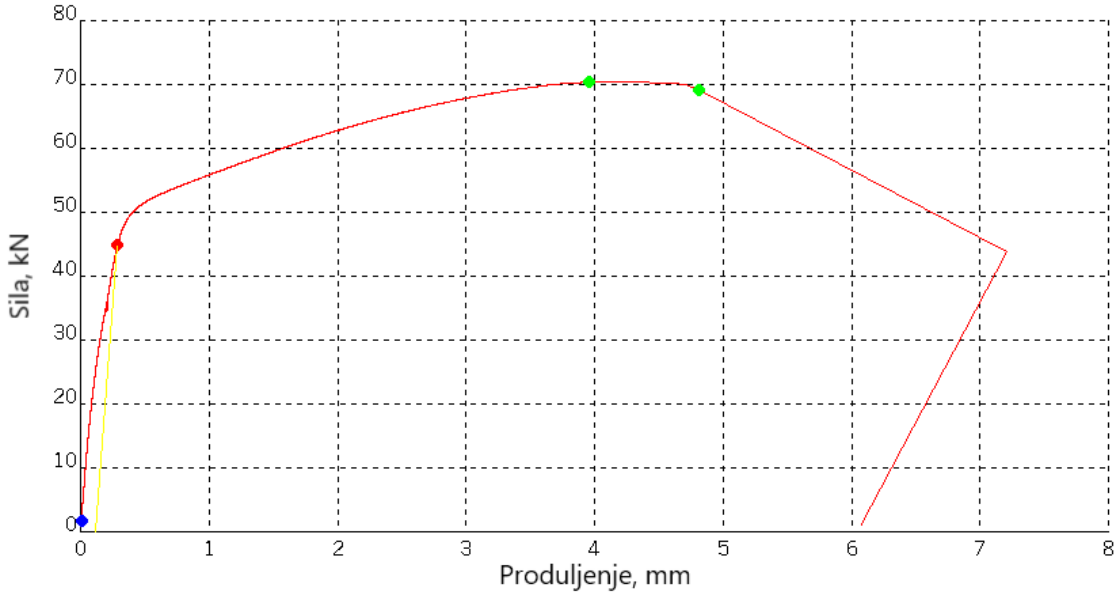
Rezultati ispitivanja i dijagrami sila-produljenje za uzorke 3 i 4 uzeti su iz [39]. U tablici 28 prikazani su rezultati nakon statičkog vlačnog pokusa za sva četiri uzorka.

Tablica 28. Rezultati statičkog vlačnog pokusa za sve uzorke

Uzorak	$R_{p0,2}$, MPa	R_m, MPa	F_m, kN	F_k, kN	L_u, mm
Uzorak 1	410,92	684,13	68,21	66,60	81,4
Uzorak 2	425,52	668,18	70,40	69,11	83,4
Uzorak 3	336,25	698,99	73,14	68,79	93,8
Uzorak 4	315,63	699,88	72,20	51,48	80,8

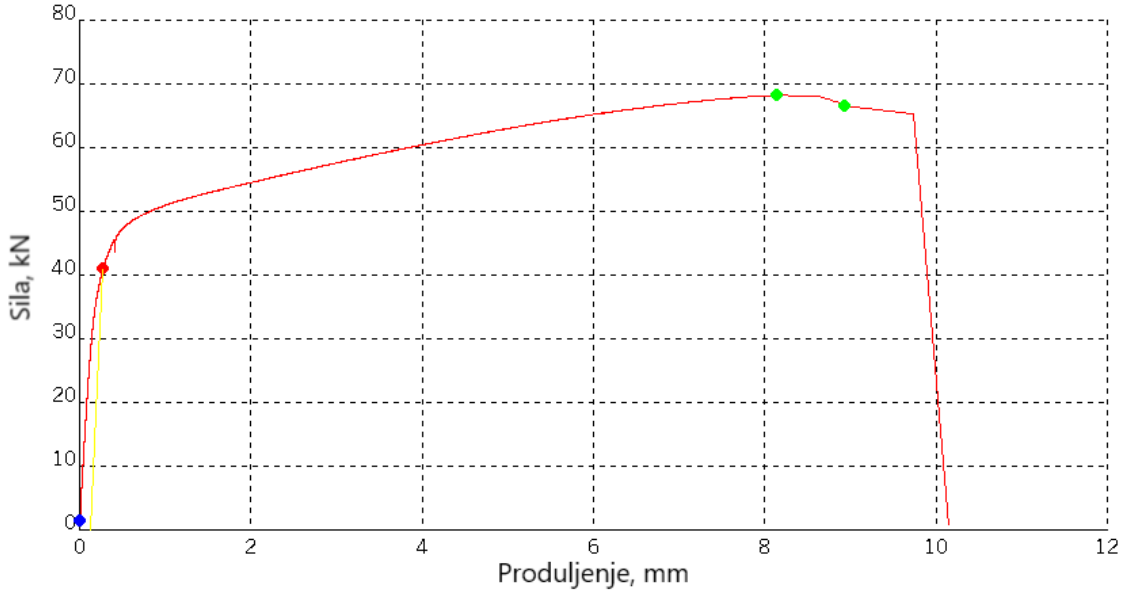
Slikama 69, 70, 71 i 72 prikazani su dijagrami sila-produljenje uzoraka dobiveni tijekom ispitivanja.

Duljina ispitnog područja uzorka 1 se produljila za 21,4 mm što je istezljivost A_5 od 35,7 %. Taj rezultat zadovoljava mehanička svojstva dodatnog materijala prema specifikaciji proizvođača (A_5 je od 30 % do 60 %). Prema istoj specifikaciji granica razvlačenja $R_{p0,2}$ treba biti minimalno 448 MPa, a vlačna čvrstoća R_m minimalno 724 MPa. Kod ovog uzorka vrijednost granice razvlačenja $R_{p0,2}$ je 410,92 MPa, a vlačne čvrstoće R_m 684,13 MPa što znači da su vrijednosti manje od propisanih vrijednosti prema specifikaciji proizvođača.



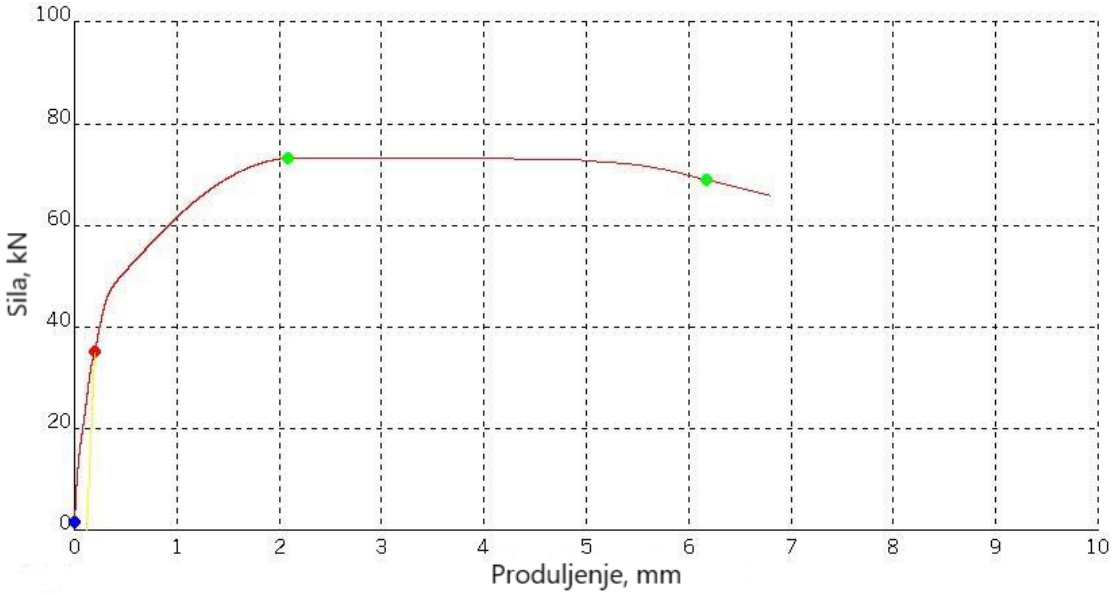
Slika 69. Dijagram sila-produljenje za uzorak 1

Kod uzorka 2 produljenje iznosi 23,4 mm, odnosno istezljivost A_5 je 39,0 % te zadovoljava prema specifikaciji proizvođača. Granica razvlačenja $R_{p0,2}$ je 425,52 MPa, a vlačna čvrstoća R_m 668,18 MPa. Njihove vrijednosti su manje od propisanih vrijednosti dodatnog materijala prema specifikaciji proizvođača.



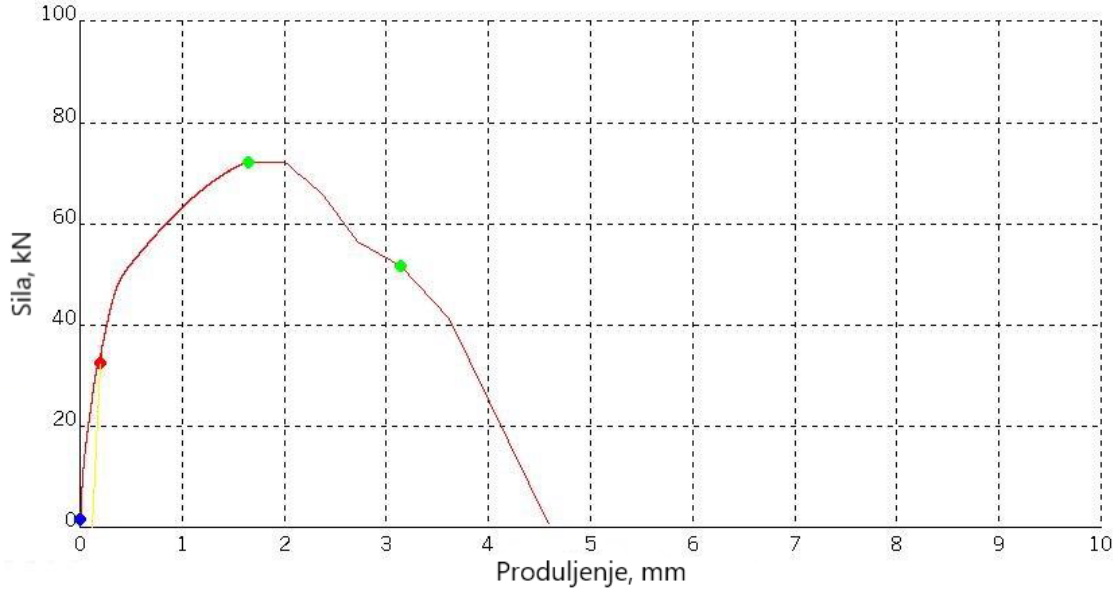
Slika 70. Dijagram sila-produljenje za uzorak 2

Duljina ispitnog područja uzorka 3 se produljila za 33,8 mm što je istezljivost A_5 od 56,3 %, te zadovoljava mehanička svojstva prema specifikaciji proizvođača. Prema istoj specifikaciji vrijednosti granice razvlačenja $R_{p0,2}$ i vlačne čvrstoća R_m su manje od propisanih.



Slika 71. Dijagram sila-produljenje za uzorak 3 [39]

Kod uzorka 4 epruveta je pukla izvan mjernog područja. Mogući razlog tome je loša priprema same epruvete. Dobiveni rezultati granice razvlačenja $R_{p0,2}$ i vlačne čvrstoće R_m su manji od propisanih vrijednosti dodatnog materijala prema specifikaciji proizvođača.



Slika 72. Dijagram sila-produljenje za uzorak 4 [39]

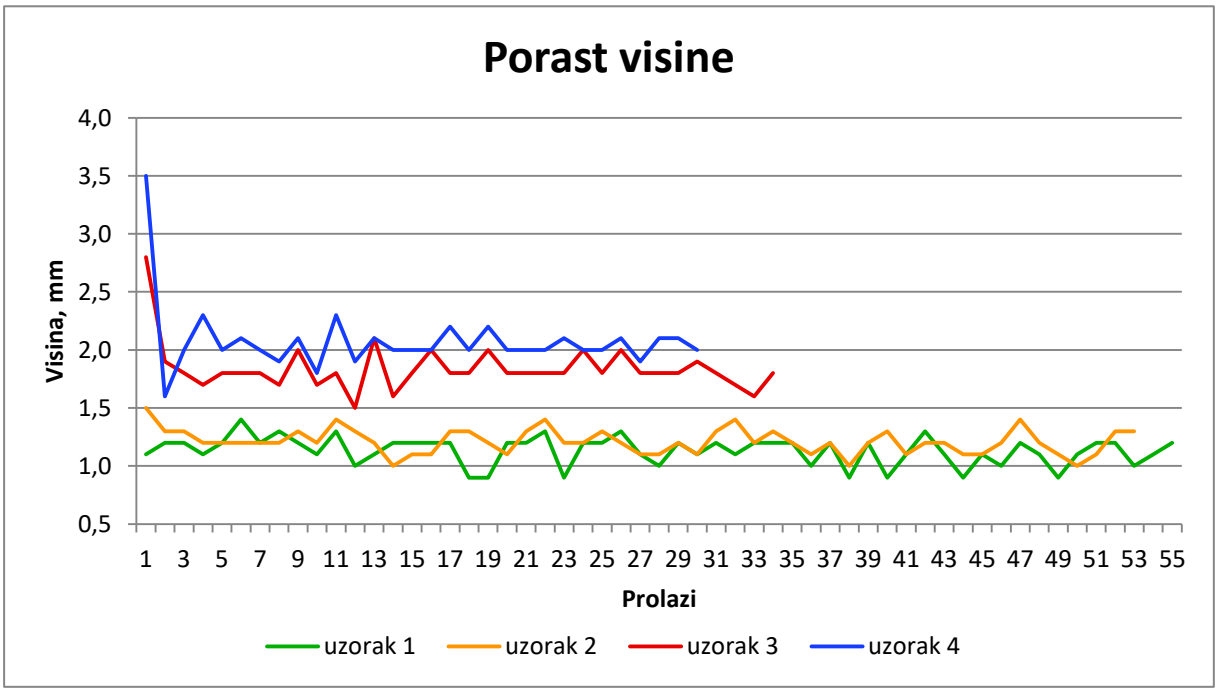
6. ANALIZA REZULTATA

Tablicom 29 prikazana je usporedba prosječne visine svakog sloja i prosječnog unosa topline kod uzorka. Iz tablice je vidljivo da je kod prva dva uzorka, za približno jednak prosječan unos topline, prosječna visina svakog sloja veća kod uzorka 2. Iz toga proizlazi da se kod jednakog unosa topline plinom Inoxline H5 postiže veći depozit materijala, odnosno da je korištenjem tog plina postupak produktivniji. Kod uzoraka 3 i 4 veća je prosječna visina sloja, ali je isto tako veći i prosječan unos topline, pa se uzorci ne mogu usporediti s uzorcima 1 i 2.

Tablica 29. Prosječna visina sloja i prosječan unos topline za sva četiri uzorka

Uzorak	Prosječna visina sloja, mm	Prosječan unos topline, kJ/cm
Uzorak 1	1,13	2,45
Uzorak 2	1,21	2,47
Uzorak 3	1,84	2,90
Uzorak 4	2,08	3,13

Slikom 73 prikazana je usporedba prosječnog porasta visine svakog sloja za sva četiri uzorka. Kod uzoraka 3 i 4 izražen je veći porast visine u prvom sloju. To je posljedica korištenja manje brzine zavarivanja, u prvom prolazu, u svrhu dobivanja šire baze za lakše navarivanje ostalih slojeva.



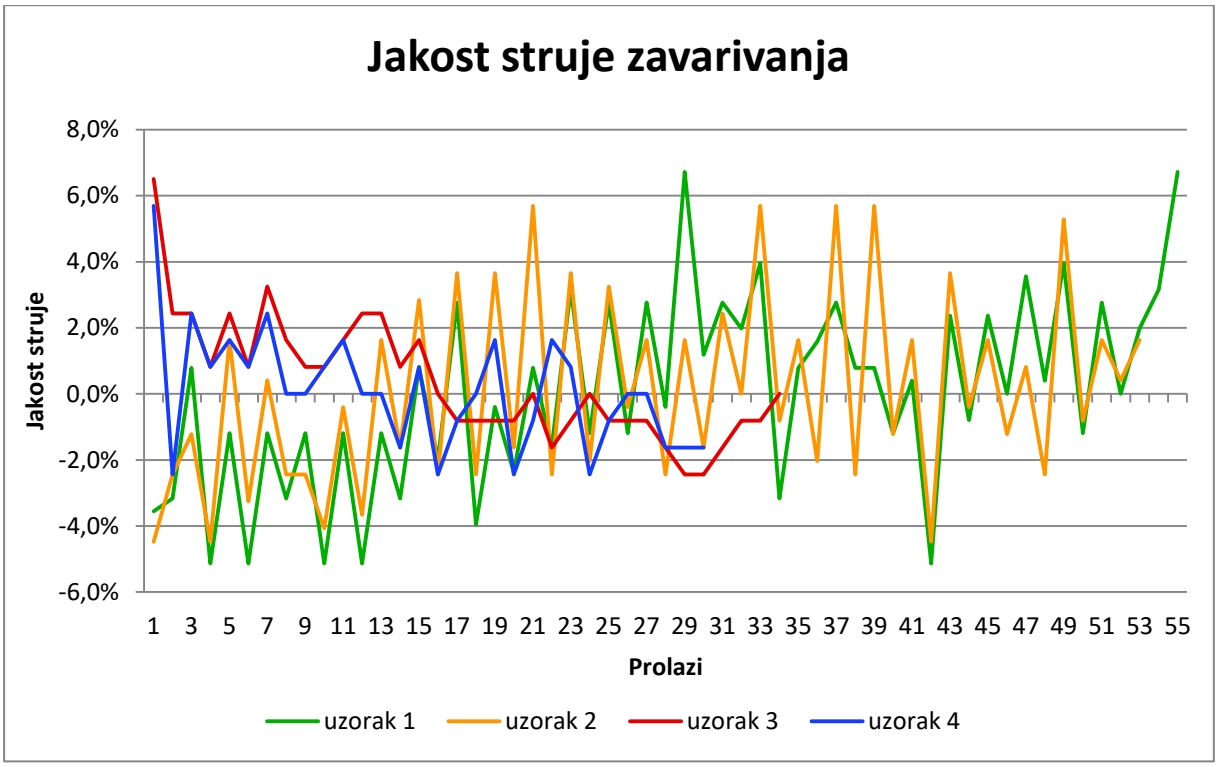
Slika 73. Usporedba porasta visine po sloju

Na slici 74 prikazan je graf s usporedbom kretanja jakosti struje tijekom navarivanja za sva četiri uzorka. Pošto su struje kod uzoraka 1 i 2 mnogo veće od onih kod uzoraka 3 i 4 prikazana su odstupanja, u postocima, od srednje vrijednosti struje na uzorku. Kod prva dva uzorka, s obzirom na veliku brzinu zavarivanja i parametara određenih za postizanje maksimalne produktivnosti, vrijednosti jakosti struje dosta variraju. Isto tako, naizmjenično se izmjenjuju rast i pad vrijednosti struje kod tih uzoraka. Razlog tome je smjer zavarivanja, odnosno kretanje pištolja za zavarivanje (spomenuto u poglavlju 5.4). Kod oba uzorka prisutan je rastući trend, odnosno struje zavarivanja su na kraju veće od onih na početku. Za uzorke 3 i 4 korištene su mnogo manje vrijednosti struje. Jakosti struja variraju oko svojih vrijednosti, ali s puno manjim odstupanjima u odnosu na uzorke 1 i 2 (izuzevši prvi prolaz gdje dolazi do miješanja materijala). Kod njih je prisutan padajući trend jakosti struje.

Tablicom 30 prikazane su srednja vrijednost, standardna devijacija te minimalne i maksimalne vrijednosti za svaki od uzoraka kako bi se detaljnije prikazao raspon i karakter ponašanja struje tijekom zavarivanja. Iz standardnih devijacija je vidljivo da su varijacije struje kod prva dva uzorka dosta veće od varijacija trećeg i četvrtog uzorka.

Tablica 30. Statistički podaci za vrijednosti jakosti struje zavarivanja

Uzorak	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Uzorak 1	253	0,029	240	270
Uzorak 2	246	0,029	235	260
Uzorak 3	123	0,019	120	131
Uzorak 4	123	0,018	120	130



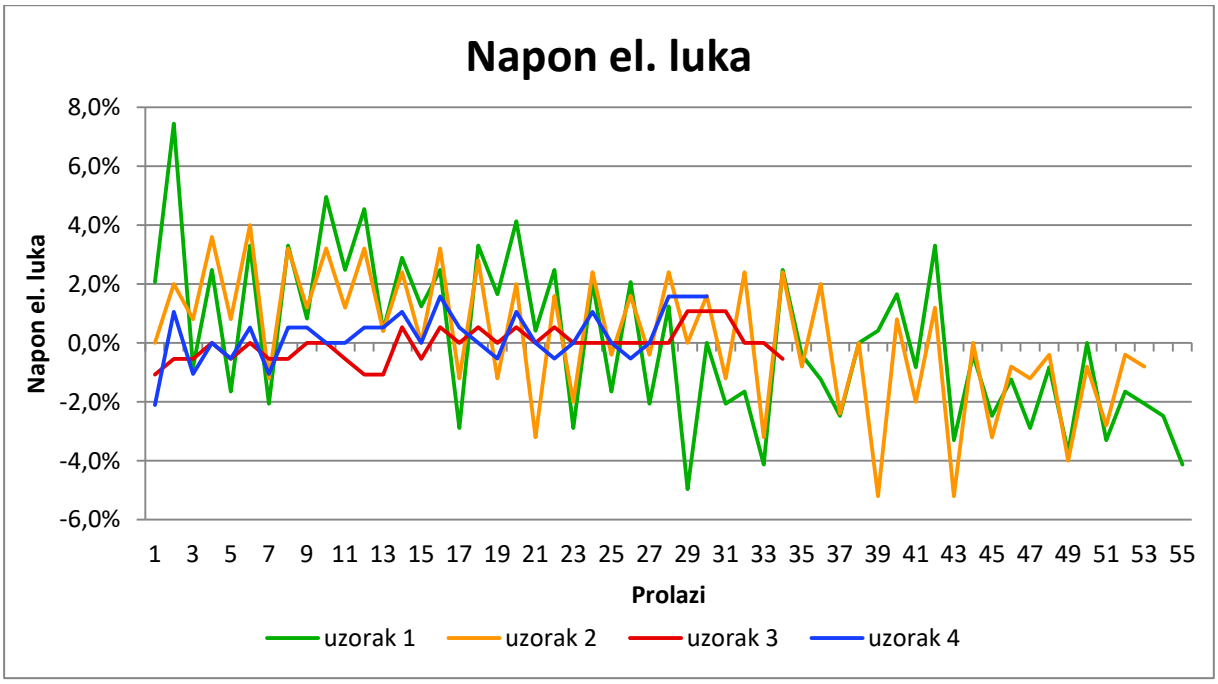
Slika 74. Usporedba kretanja jakosti struja zavarivanja

Slikom 75 prikazan je graf s usporedbom kretanja napona za sva četiri uzorka. Ponovo su kod uzoraka 1 i 2 mnogo izraženije varijacije nego što je to slučaj s uzorcima 3 i 4. Razlog tome su visoke vrijednosti napona i velika brzina zavarivanja te se dobiva nestabilniji proces. Kod napona, kao i kod struje, naizmjenično se izmjenjuju rast i pad vrijednosti zbog različitih smjerova zavarivanja. Kod uzoraka 1 i 2 je padajući trend, dok je kod uzoraka 3 i 4 prisutan blagi rastući trend vrijednosti napona.

U tablici 31 prikazani su statistički podaci za vrijednosti napona. Vrijednosti standardnih devijacija potvrđuju nekoliko puta veće varijacije kod uzoraka 1 i 2 (najveće kod uzorka 1).

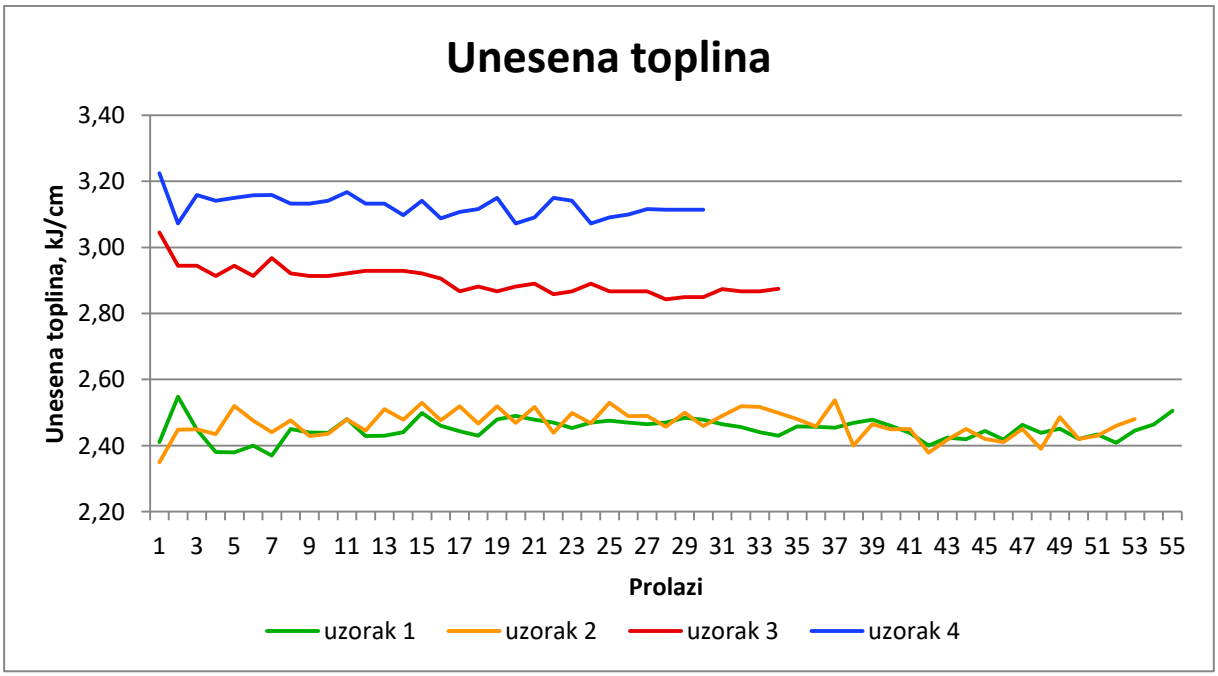
Tablica 31. Statistički podaci za vrijednosti napona električnog luka

Uzorak	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Uzorak 1	24,2	0,027	23,0	26,0
Uzorak 2	25,0	0,023	23,7	26,0
Uzorak 3	18,6	0,006	18,4	18,8
Uzorak 4	19,0	0,009	18,6	19,3



Slika 75. Usporedba kretanja napona električnog luka

Na slici 76 prikazan je graf s usporedbom unesene topline za sva četiri uzorka. Veći unos topline je kod uzoraka 3 i 4 iz razloga što odabirom parametara (za postizanje maksimalne produktivnosti) kod uzoraka 1 i 2 nije bilo moguće postići te vrijednosti. Razlog tome je velika nestabilnosti električnog luka. Najveći unos topline zabilježen je kod uzorka 4, iako ima najnižu vrijednost jakosti struje. Razlog tome je manja brzina zavarivanja tijekom cijelog procesa izrade uzorka 3.



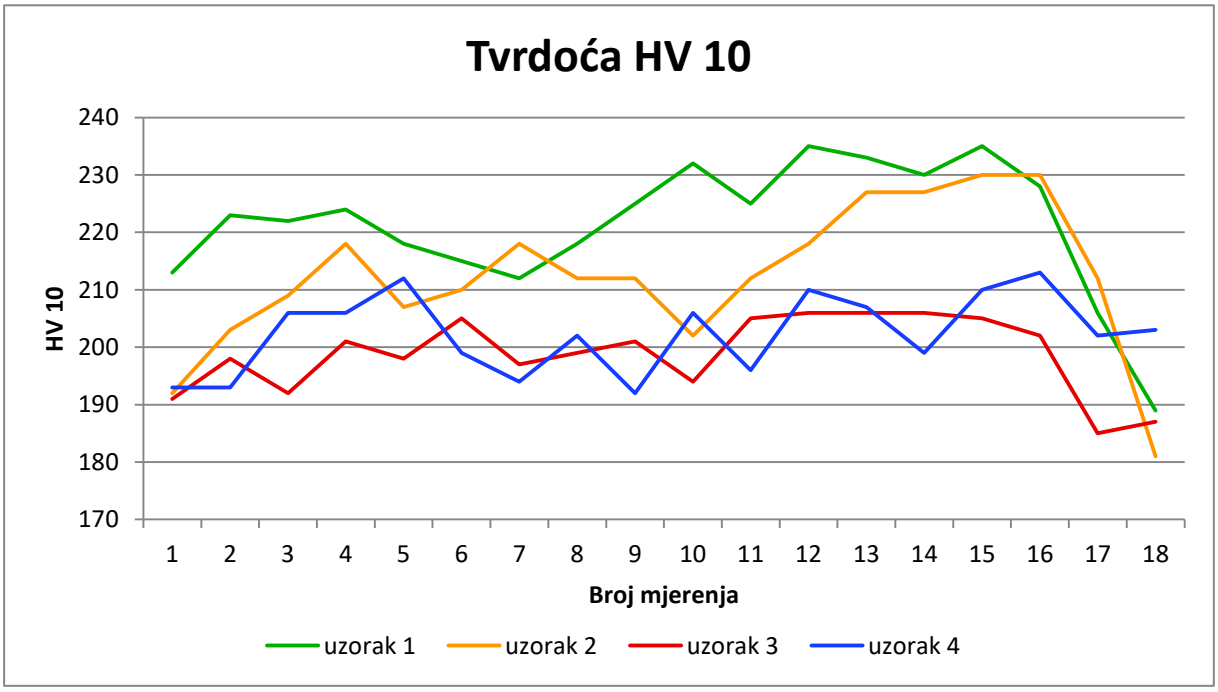
Slika 76. Usporedba unesenih toplina

Slikom 77 prikazan je graf s usporedbom izmjerene tvrdoće za sva četiri uzorka. Posljednja dva mjerenja kod sva četiri uzorka imaju manju vrijednost jer je tu tvrdoća mjerena na osnovnom materijalu. Vidljivo je da uzorci 1 i 2 imaju veću prosječnu tvrdoću. Jedan od razloga je postignuta mikrostruktura s većim udjelom karbida. Drugi razlog može biti taj da nije osigurana obnovljivost rezultata mjerenja, odnosno razlika koja se javlja u rezultatima mjerenja nastala je zbog različitih mjeritelja.

Tablicom 32 dan je prikaz statističkih podataka za vrijednosti tvrdoće. Statistički podaci obrađeni su za dio zida (od četvrtog do trinaestog mjerenja) kako bi se dobila bolja usporedba podataka. Najveća prosječna vrijednost tvrdoće u odabranom području zida je kod uzorka 1.

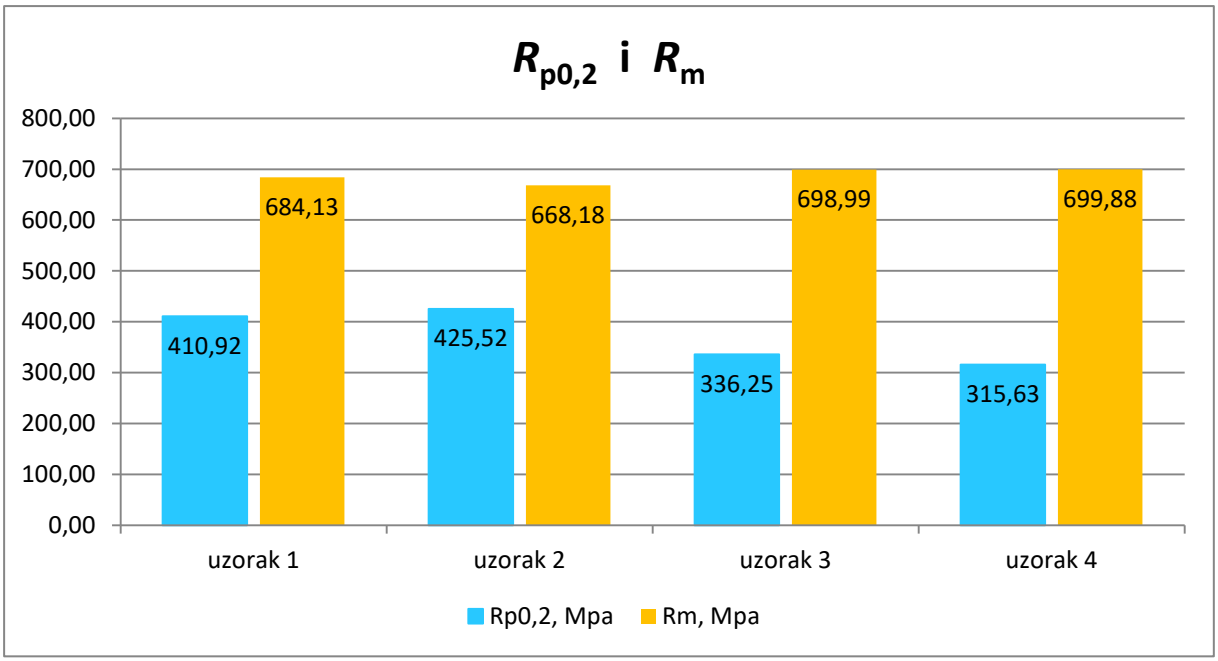
Tablica 32. Statistički podaci za vrijednosti tvrdoće

Uzorak	Srednja vrijednost	Standardna devijacija	Minimum	Maksimum
Uzorak 1	223,70	0,036	212	235
Uzorak 2	213,60	0,033	202	227
Uzorak 3	201,20	0,021	194	206
Uzorak 4	202,40	0,034	192	212



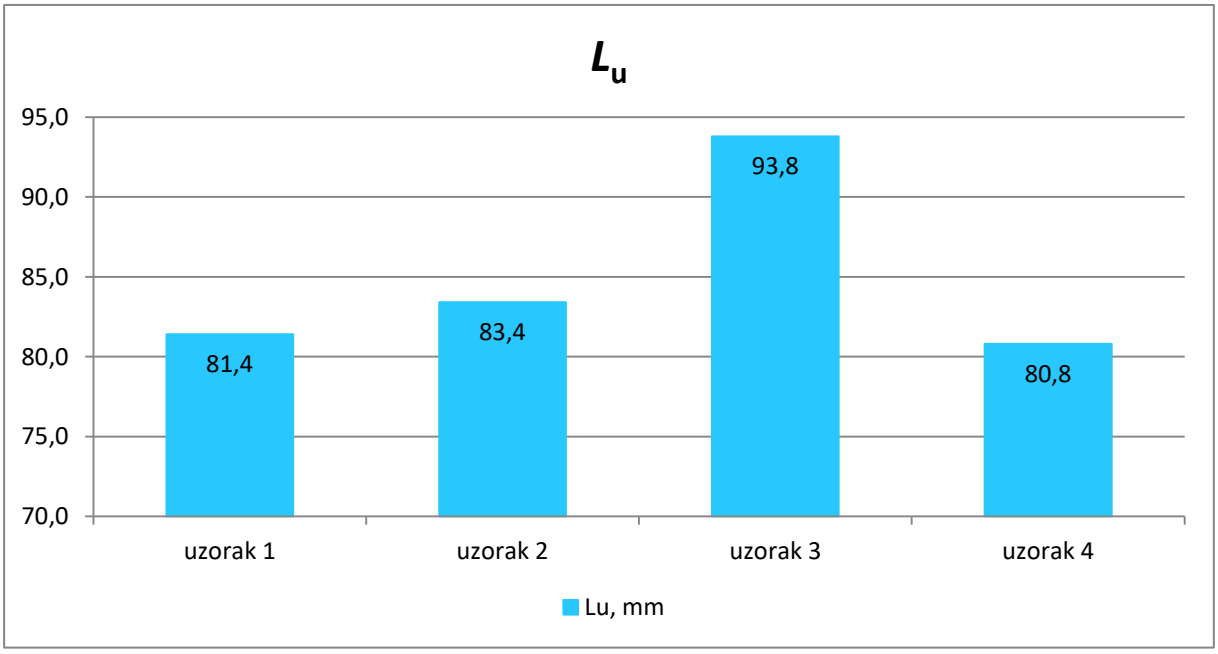
Slika 77. Usporedba tvrdoća HV 10

Slikom 78 prikazan je graf s usporedbom vlačne čvrstoće (R_m) i konvencionalne granice razvlačenja ($R_{p0,2}$) za sve uzorke. Vidljivo je da se kod uzoraka 1 i 2 dobivaju nešto manje vrijednosti vlačne čvrstoće. Kod istih uzoraka znatno je veća vrijednost konvencionalne granice razvlačenja, čime je osigurano veća elastično područje u odnosu na uzorke 3 i 4.



Slika 78. Usporedba vlačnih čvrstoća i konvencionalnih granica razvlačenja

Slika 79 daje usporedbu duljina epruveta nakon ispitivanja. Kod uzorka 3 zabilježeno je veće produljenje u odnosu na ostale uzorke.



Slika 79. Usporedba duljina epruveta nakon ispitivanja

7. ZAKLJUČAK

Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom (WAAM) kombinacijom elektrolučnog zavarivanja i dodavanja žice omogućuje slobodu pri konstruiranju komponente, izradu proizvoda različitih veličina, neograničen volumen izrade, niske troškove ulaganja i kraće vrijeme izrade. Usporedbom WAAM postupaka s klasičnim postupcima izrade komponenti, smanjenje otpada je drastično, od 90 % do 10 %. Sve navedene karakteristike čine postupak pogodnim za fleksibilnu izradu funkcionalnih dijelova po narudžbi od vrlo skupih materijala. Tehnologija još uvijek nije učestala u industriji, ali s razvojem strojeva u koje su integrirani izvor struje i obrada odvajanjem čestica sa zaštitnom atmosferom, sigurno će imati svoj značajan udio.

Problem koji se javlja kod zavarivanja MAG postupkom koji je dio WAAM postupka je taj da geometrija zavara nije jednolika po cijeloj duljini, naročito na početku i na kraju prolaza. To dovodi do nejednolične geometrije, loše kvalitete površine i dimenzijske netočnosti komponente. Jedno od rješenja tog problema je optimiziranje putanje gibanja pištolja za zavarivanje primjenom kontinuirane putanje koja će minimizirati broj prolaza za svaki sloj. Međutim, kontinuirana putanja zanemaruje glavni problem kod WAAM-a, a to su zaostala naprezanja i deformacije. Prema tome, daljnja istraživanja bi trebala biti usmjerena u pronalaženju kompromisa između zaostalih naprezanja i deformacija, te poboljšanja geometrije zavara.

Na temelju provedenih ispitivanja i analize dobivenih rezultata može se zaključiti sljedeće:

- Prilikom samog odrezivanja zida i podloge s ploče od konstrukcijskog čelika došlo je do pucanja pripoja. Time je potvrđena osjetljivost WAAM postupaka na zaostala naprezanja i deformacije koje nastaju tijekom izrade.
- Iz analize radiografskih snimki nisu uočene veće nepravilnosti u uzorcima. Prolazi nisu izraženi što znači da je došlo do kvalitetnog slaganja slojeva i miješanja materijala bez naljepljivanja. Vidljivo je da se uporabom zaštitnog plina Inoxline H5 postiže neravnomjernija površina zida, što ujedno znači i da je ukupna iskoristiva površina zida manja. Isto tako, primjenom tog zaštitnog plina intenzivnije je rasprskavanje kapljica. Može se zaključiti da se bolji rezultati postižu uporabom zaštitnog plina Argon 5.0.

- Na slikama makrostrukture uzoraka 3 i 4 vidljivo je da se primjenom manjih brzina zavarivanja postiže ravnomjernije slaganje slojeva nego što je to slučaj kod uzoraka 1 i 2, gdje su primijenjene velike brzine zavarivanja. Isto tako, razlog tome može biti i veći unos topline kod uzoraka 3 i 4. Najveća iskoristivost zida, odnosno najveća efektivna površina je kod uzorka 3, dok je najmanje iskoristiv uzorak 2.
- Analizom mikrostrukture vidljiva je prisutnost karbida. Zaključeno je da je udio karbida veći kod većih brzina zavarivanja. Također, udio karbida je manji u donjem dijelu zida zbog toplinske obrade koja je nastala prilikom navarivanja sljedećih slojeva.
- Usporedbom visine uzoraka 1 i 2 (približno jednak unos topline) vidljivo je da je kod uzorka 2 veća prosječna visina svakog sloja. Iz toga se može zaključiti da je postupak produktivniji primjenom zaštitnog plina Inoxline H5.
- Primjenom velikih brzina zavarivanja vrijednosti jakosti struje dosta variraju te se postiže nestabilniji električni luk. Isto tako, naizmjenično se izmjenjuju rast i pad vrijednosti struje kod tih uzoraka čemu je razlog naizmjenični smjer zavarivanja.
- Mjerenjem tvrdoće pokazalo se da uzorci izrađeni većom brzinom zavarivanja (uzorci 1 i 2) imaju veću prosječnu tvrdoću. Također, na istim uzorcima, najveća vrijednost tvrdoće je u donjem dijelu zida. Razlog tome je povećani udio karbida koji nastaju zbog boljeg odvođenja topline u donjem dijelu zida.
- Statičkim vlačnim pokusom dobivene su visoke vrijednosti istezljivosti materijala. Zaključeno je da se primjenom većih brzina zavarivanja dobivaju veće vrijednosti konvencionalne granice razvlačenja $R_{p0,2}$, odnosno osigurano je veće elastično područje. Kod manjih brzina zavarivanja postižu se veće vrijednosti vlačne čvrstoće R_m.

Pregledom dobivene mikrostrukture i ispitanih mehaničkih svojstava vidljivo je da su odabrani parametri zavarivanja kod uzoraka 1 i 2 u optimalnom području za postizanje maksimalne produktivnosti. Ovisno o potrebi, kombinacijom parametara može se utjecati na dobivanje željenih mehaničkih svojstava (veća tvrdoća, manja čvrstoća ili manja tvrdoća, veća čvrstoća). Na temelju provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata preporuča se daljnja istraživanja usmjeriti prema postizanju veće iskoristive površine izrađenih dijelova. Također, trebalo bi provesti i detaljne metode karakterizacije materijala (npr. EDS analizu) kako bi se odredio točan sastav mikrostrukture.

LITERATURA

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

[2] http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=69979, dostupno 17.10.2017.

[3] Pilipović, Ana: Polimeri: časopis za plastiku i gumu, Vol. 33, No. 3-4, 2013.

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

[5] Ilić, Dražen: Optimizacija prijenosa metala za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

[6] 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, 2015.

[7] Sequeira Almeida, P. M.: Process Control and Development in Wire and Arc Additive Aanufacturing, Cranfield University, 2012.

[8] Busachi A., Erkoyuncu A. J., Martina F., Ding J.: Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications, Elsevier, 2015.

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

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

[11] Ding, Donghong: Process planning for robotic wire ARC additive manufacturing, University of Wollongong, 2015.

[12] Uđbinac, Domagoj: Primjena dupleks čelika za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

[13] 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.

[14] Kralj, S.; Andrić, Š.: Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1992.

[15] Jurica, Maja: Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenoga spoja čelika X80, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.

[16] Kralj, Slobodan: Skripta za učenje iz kolegija Zavarivanje 1, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

[17] http://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWires-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf, dostupno 24.10.2017.

[18] Shinagawa, K.: Essential factors in gas metal arc welding, Kobe Steel LTD, 4. izdanje, Tokio, 2011.

[19] http://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1398155789-0-mig_magzav1.ppt, dostupno 24.10.2017.

[20] Bajs, Marko: Primjena i specifičnosti modificiranih MAG postupaka, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.

[21] Guidelines for Gas Metal Arc Welding, https://www.millerwelds.com/~/media/miller%20electric/files/pdf/resources/bookspamphlets/mig_handbook.pdf, dostupno 25.10.2017.

[22] http://www.esabna.com/euweb/mig_handbook/592mig1_4.htm, dostupno 26.10.2017.

[23] Rudan, Marijan: Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom, 4. seminar, Čelici otporni na koroziju (nehrđajući čelici), Pula, 2007.

[24] Elango P., Balaguru S.: Welding Parameters for Inconel 625 Overlay on Carbon Steel using GMAW, Indian Journal od Science and Tehnology, Tamil Nadu, 2015.

[25] http://www.caldereriajuanlasa.com/en/overlay-and-hardfacing.html, dostupno 29.10.2017.

[26] Special Metals, https://f.nordiskemedier.dk/2yu209juqbdw0xca.pdf, dostupno 29.10.2017.

[27] Shankar, V., Bhanu Sankara Rao, K., Mannan, S.L.: Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy, Journal od Nuclear Materials 288, India, 2001.

[28] Xing, X., Di, X., Wang, B.: The effect of post-weld heat treatment temperature on the microstructure of Inconel 625 deposited metal, Shanghai, 2013.

[29] http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921509316314137, dostupno 5.11.2017.

[30] VDM Metals, https://www.vdm-metals.com/fileadmin/user_upload/Downloads/Dana_Sheets/Data_Sheet_VDM_Alloy_625.pdf, dostupno 5.11.2017.

[31] Wang, J.F., Sun, Q.J., Wang, H., Liu, J.P., Feng, J.C.: Effect of location on microstructure and mechanical properties of additive layer manufactured Inconel 625 using gas tungsten arc welding, Peking, 2016.

[32] Arthur L. Philips.: Welding Handbook, New York, 2003.

[33] http://uddcomb.se/en/weld-overlay/weld-overlay-360-tubes, dostupno 5.11.2017.

[34] http://www.formula1-dictionary.net/exhaust.html, dostupno 5.11.2017.

[35] http://www.tinita.in/inconel-alloy-600-601-625-800-825-heat-exchangers-manufacturer-exporters.html, dostupno 5.11.2017.

[36] http://www.spiroflex.hr/galerija-proizvoda, dostupno 5.11.2017.

[37] http://www.tandfonline.com/loi/twld20, dostupno 5.11.2017.

[38] http://www.volund.dk/News/2014/01/Newsletter/CMT, dostupno 5.11.2017.

[39] Krišto, Mate: Primjena legure Inconel 625 za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2017.

[40] http://www.varstroj.si/welding-machines_ang/mig-mag-welding_ang/vs_eng/vps-4000-digit-eng.html, dostupno 14.11.2017.

[41] http://selector.specialmetalswelding.com/products/datash/fm625.pdf, dostupno 15.11.2017.

[42] http://www.messer.hr/products/castolin/tabzavrez.pdf, dostupno 15.11.2017.

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

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

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

PRILOZI

I. CD-R disc