

# Primjena WAAM tehnologije za izradu aluminijskih cijevi CMT postupkom

---

Crnečki, Martin

Master's thesis / Diplomski rad

2020

*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:235:825408>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-17**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Martin Crnečki**

Zagreb, 2020.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

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

Student:

Martin Crnečki

Komentor:

Dr. sc. Maja Jurica, dipl. ing.

Zagreb, 2020.

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

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Ivici Garašiću na povjerenju i vođenju kroz izradu diplomskog rada i kroz cjelokupni studij.

Posebno se zahvaljujem komentorici Maji Jurici na svojoj pomoći, strpljenju i pruženom vremenu u izradi diplomskog rada.

Također zahvaljujem se djelatnicima Laboratorija za zavarivanje na pruženoj pomoći i savjetima, kao i svim drugim Laboratorijima koji su sudjelovali u izradi diplomskog rada.

Zahvaljujem se tvrtki Fronius International GmbH na pruženoj prilici, savjetima i sjajnom iskustvu te tvrtki Eurotehnika d.o.o. na pruženoj pomoći.

Na kraju, zahvaljujem se prijateljima, sestri, djevojci, a posebno roditeljima na izuzetnoj podršci, pomoći i razumijevanju tijekom studija.

Martin Crnečki



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

|                                                              |         |
|--------------------------------------------------------------|---------|
| Sveučilište u Zagrebu<br>Fakultet strojarstva i brodogradnje |         |
| Datum:                                                       | Prilog: |
| Klasa:                                                       |         |
| Ur. broj:                                                    |         |

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MARTIN CRNEČKI** Mat. br.: **0035196178**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena WAAM tehnologije za izradu aluminijskih cijevi CMT postupkom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of WAAM technology in production of aluminum pipes using CMT process**

### Opis zadatka:

Ne temelju literaturnog pregleda detaljno opisati WAAM proizvodnu tehnologiju. Posebno obraditi područje primjene aluminija i aluminijskih legura te analizirati primjenjive postupke zavarivanja. Navesti i opisati osnovni princip prijenosa metala u električnom luku kod CMT postupka zavarivanja s naglaskom na parametre, dodatne materijale i zaštitne plinove. Dati dosadašnje primjere primjene CMT postupka u WAAM tehnologiji te analizirati korištene parametre i dodatne materijale s osvrtom na unos topline, geometrijske značajke i mehanička svojstva proizvoda.

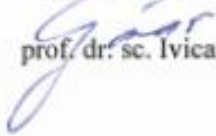
U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno izraditi aluminijske cijevi WAAM proizvodnom tehnologijom koristeći CMT postupak. U obzir uzeti više vrsta dodatnog materijala. Posebno analizirati parametre zavarivanja i kvalitetu površine proizvedenih cijevi. Nadalje, potrebno je ispitati mehanička svojstva i mikrostrukturu materijala stjenke. Analizom dobivenih rezultata ocijeniti primjenjivost CMT postupka za izradu cijevi i cijevnih elemenata od aluminija WAAM tehnologijom te dati preporuke za daljnja poboljšanja.

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

Zadatak zadan:  
16. siječnja 2020.

Rok predaje rada:  
19. ožujka 2020.

Predviđeni datum obrane:  
23. ožujka do 27. ožujka 2020.

Zadatak zadao:  
  
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Komentor:  
  
dr. sc. Maja Jurica

Predsjednica Povjerenstva:  
  
prof. dr. sc. Biserka Runje

|                                                                                   |             |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>SADRŽAJ .....</b>                                                              | <b>I</b>    |
| <b>POPIS SLIKA.....</b>                                                           | <b>III</b>  |
| <b>POPIS TABLICA.....</b>                                                         | <b>VI</b>   |
| <b>POPIS OZNAKA.....</b>                                                          | <b>VII</b>  |
| <b>SAŽETAK.....</b>                                                               | <b>VIII</b> |
| <b>SUMMARY.....</b>                                                               | <b>IX</b>   |
| <b>1. UVOD.....</b>                                                               | <b>1</b>    |
| <b>2. ADITIVNA PROIZVODNJA.....</b>                                               | <b>2</b>    |
| 2.1. Definicija i značajke.....                                                   | 2           |
| 2.2. Faze aditivne proizvodnje .....                                              | 5           |
| 2.3. Aditivna proizvodnja metalnih materijala.....                                | 6           |
| <b>3. ADITIVNA PROIZVODNJA ELEKTRIČNIM LUKOM I ŽICOM (WAAM).....</b>              | <b>9</b>    |
| 3.1. Povijest.....                                                                | 10          |
| 3.2. Značajke WAAM-a.....                                                         | 11          |
| 3.3. Problematika postupka .....                                                  | 14          |
| 3.4. Optimizacija parametara preklapanja.....                                     | 16          |
| 3.5. Materijali u WAAM-u .....                                                    | 18          |
| 3.5.1. Titan .....                                                                | 19          |
| 3.5.2. Legure na bazi nikla.....                                                  | 20          |
| 3.5.3. Čelik.....                                                                 | 20          |
| 3.5.4. Legure na bazi magnezija .....                                             | 20          |
| 3.6. Metode programiranja.....                                                    | 21          |
| 3.7. Primjena WAAM-a.....                                                         | 22          |
| <b>4. ALUMINIJ I NJEGOVE LEGURE .....</b>                                         | <b>26</b>   |
| 4.1. Općenito .....                                                               | 26          |
| 4.2. Legure .....                                                                 | 27          |
| 4.2.1. Legure aluminija sa silicijem 4XXX .....                                   | 28          |
| 4.2.2. Legure aluminija s magnezijem 5XXX .....                                   | 29          |
| 4.3. Utjecaji na zavarljivost.....                                                | 29          |
| 4.4. Postupci zavarivanja .....                                                   | 31          |
| 4.4.1. Zavarivanje taljivom elektrodom u atmosferi inertnih plinova (MIG).....    | 33          |
| 4.4.1.1. Vrste prijenosa materijala električnim lukom.....                        | 34          |
| 4.4.1.2. Izvedbe MIG/MAG postupka .....                                           | 35          |
| 4.4.2. Zavarivanje netaljivom elektrodom u atmosferi inertnih plinova (TIG) ..... | 37          |
| 4.4.2.1. Vrste električne struje kod TIG postupka .....                           | 38          |
| 4.4.2.2. Izvori struje .....                                                      | 39          |
| <b>5. CMT POSTUPAK .....</b>                                                      | <b>40</b>   |
| 5.1. Princip djelovanja i karakteristike.....                                     | 41          |
| 5.2. Oprema.....                                                                  | 43          |
| 5.3. Izvedbe CMT postupka .....                                                   | 45          |
| 5.3.1. CMT Pulse .....                                                            | 45          |
| 5.3.2. CMT Advance (CMT Napredni) .....                                           | 47          |
| 5.3.3. CMT Pulse Advance (CMT Napredni impulsni).....                             | 48          |
| 5.3.4. Ostali .....                                                               | 49          |

---

|                                                                  |            |
|------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.4. Parametri zavarivanja.....                                  | 50         |
| 5.5. CMT zavarivanje aluminija .....                             | 51         |
| 5.6. Postupci primjene.....                                      | 52         |
| <b>6. PRIMJERI PRIMJENE CMT POSTUPKA U WAAM TEHNOLOGIJI.....</b> | <b>55</b>  |
| 6.1. Primjer 1.....                                              | 55         |
| 6.2. Primjer 2.....                                              | 58         |
| <b>7. EKSPERIMENTALNI DIO .....</b>                              | <b>60</b>  |
| 7.1. Korištena oprema .....                                      | 60         |
| 7.1.1. Robotska stanica .....                                    | 61         |
| 7.1.2. Izvor struje .....                                        | 62         |
| 7.1.3. Sustav dovoda žice.....                                   | 63         |
| 7.2. Izrada cijevnih uzoraka .....                               | 65         |
| 7.2.1. Dodatni materijali .....                                  | 68         |
| 7.2.2. Parametri zavarivanja.....                                | 70         |
| 7.2.3. Izrađeni cijevni uzorci.....                              | 72         |
| 7.3. Ispitivanja cijevnih uzoraka .....                          | 73         |
| 7.3.1. Ispitivanje kemijskog sastava .....                       | 73         |
| 7.3.2. Radiografsko ispitivanje .....                            | 75         |
| 7.3.3. Izrada uzoraka .....                                      | 80         |
| 7.3.4. Analiza makrostrukture.....                               | 84         |
| 7.3.5. Analiza mikrostrukture .....                              | 86         |
| 7.3.6. Statičko – vlačno ispitivanje .....                       | 90         |
| <b>8. ZAKLJUČAK.....</b>                                         | <b>94</b>  |
| <b>LITERATURA .....</b>                                          | <b>96</b>  |
| <b>PRILOZI.....</b>                                              | <b>100</b> |

## POPIS SLIKA

|                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 1. Princip aditivne proizvodnje [2] .....                                                                         | 2  |
| Slika 2. Ciklus razvoja proizvoda [4].....                                                                              | 3  |
| Slika 3. Karakteristike proizvodnje metalnih dijelova aditivnim postupcima u odnosu na konvencionalne postupke [5]..... | 4  |
| Slika 4. Faze aditivne proizvodnje [6] .....                                                                            | 5  |
| Slika 5. Podjela postupaka aditivne proizvodnje metalnih komponenti ovisno o izvoru struje [8] .....                    | 7  |
| Slika 6. Usporedba WAAM tehnologije s drugim aditivnim postupcima izrade metalnih komponenti [9] .....                  | 8  |
| Slika 7. Presjek zida dobivenog WAAM tehnologijom [11] .....                                                            | 9  |
| Slika 8. Prvi patent WAAM-a (posuda-lijevo i košara-desno) [12].....                                                    | 10 |
| Slika 9. Grafički prikaz razvoja WAAM-a i kompleksnosti procesa [5] .....                                               | 10 |
| Slika 10. Opcije gibanja gorionika (a – robot, b – CNC stroj ) [14].....                                                | 11 |
| Slika 11. Primjer „back to back“ gradnje [14] .....                                                                     | 14 |
| Slika 12. „Online“ valjanje [11] .....                                                                                  | 15 |
| Slika 13. Prikaz parametara dimenzija zavara [16].....                                                                  | 17 |
| Slika 14. Razlika u visini dva susjedna zavara [16].....                                                                | 17 |
| Slika 15. Shema preklapanja u slučaju većeg broja zavara [16] .....                                                     | 18 |
| Slika 16. Nosač kotača aviona [14].....                                                                                 | 19 |
| Slika 17. Izrada broskog propelera [21] .....                                                                           | 22 |
| Slika 18. Primjena čeličnih šipki u građevini [22] .....                                                                | 23 |
| Slika 19. Faze izrade projektila [23] .....                                                                             | 23 |
| Slika 20. Lopatica turbine [18].....                                                                                    | 24 |
| Slika 21. Rotor [18].....                                                                                               | 24 |
| Slika 22. Aluminijsko krilo za testiranje [14] .....                                                                    | 25 |
| Slika 23. Prikaz pora u aluminiju korištenjem WAAM-a [29] .....                                                         | 30 |
| Slika 24. Primjena WAAM tehnologije u izradi zida [17].....                                                             | 32 |
| Slika 25. Shema MIG/MAG postupka zavarivanja [32] .....                                                                 | 33 |
| Slika 26. Shema TIG zavarivanja [34] .....                                                                              | 37 |
| Slika 27. Ovisnost struje o vremenu kod TIG impulsnog zavarivanja [36].....                                             | 39 |
| Slika 28. Spoj čelika i aluminijska [38].....                                                                           | 40 |
| Slika 29. Ciklus i dinamička karakteristika CMT postupka [41].....                                                      | 41 |
| Slika 30. Dijagram odnosa napona i struje [43] .....                                                                    | 42 |
| Slika 31. Valni oblik struje i napona CMT postupka [44] .....                                                           | 43 |
| Slika 32. Sustav za automatizirano CMT zavarivanje [45].....                                                            | 44 |
| Slika 33. Robacta Drive CMT [45] .....                                                                                  | 45 |
| Slika 34. Ciklus CMT pulse postupka [40] .....                                                                          | 46 |
| Slika 35. Izgled zavara ovisno o broju impulsa [45].....                                                                | 46 |
| Slika 36. Dinamička karakteristika impulsnog CMT postupka [40].....                                                     | 47 |
| Slika 37. Ciklus CMT – ADV [40] .....                                                                                   | 47 |
| Slika 38. Dinamička karakteristika naprednog CMT postupka [40].....                                                     | 48 |
| Slika 39. Ciklus CMT – PADV [40] .....                                                                                  | 48 |
| Slika 40. Dinamička karakteristika naprednog CMT impulsnog postupka [40].....                                           | 49 |
| Slika 41. CMT Twin [45].....                                                                                            | 49 |
| Slika 42. Sinergijska linija [40].....                                                                                  | 50 |



|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 43. Prikaz pora u zavaru: a) standardni CMT, b) CMT - P, c) CMT - ADV, d) CMT – PADV [46] .....   | 52 |
| Slika 44. Usporedba standardnog MIG/MAG gorionika i CMT Braze+ gorionika [45] .....                     | 53 |
| Slika 45. CMT Pin postupak [45].....                                                                    | 54 |
| Slika 46. Rezultati provedenog eksperimenta [22] .....                                                  | 56 |
| Slika 47. Analiza valovitosti površine [22].....                                                        | 56 |
| Slika 48. Topografski prikaz čeličnih šipki [22].....                                                   | 57 |
| Slika 49. Dijagram naprezanje - istežanje [22] .....                                                    | 57 |
| Slika 50. Rezultat eksperimenta [48] .....                                                              | 58 |
| Slika 51. Odnos širine i visine zavara u odnosu na jakost struje za svaku brzinu zavarivanja [48] ..... | 59 |
| Slika 52. Prikaz radne stanice .....                                                                    | 60 |
| Slika 53. Zaštita na ulasku u radnu stanicu .....                                                       | 61 |
| Slika 54. Privjesak za učenje.....                                                                      | 62 |
| Slika 55. TPS 500i Pulse.....                                                                           | 62 |
| Slika 56. Sučelje izvora struje .....                                                                   | 63 |
| Slika 57. Sustav dovoda žice (lijevo – dodavač žice, desno – razdjelna kutija) .....                    | 63 |
| Slika 58. Kompenzator povrata žice .....                                                                | 64 |
| Slika 59. Robacta Drive .....                                                                           | 65 |
| Slika 60. Shema kontinuirane izrade cijevi [51] .....                                                   | 65 |
| Slika 61. On-line programiranje.....                                                                    | 66 |
| Slika 62. Podloga za izradu učvršćena stegama.....                                                      | 67 |
| Slika 63. Stanica zaštitnog plina (lijevo) i priključak za dovod (desno).....                           | 67 |
| Slika 64. Kolut žice dodatnog materijala .....                                                          | 68 |
| Slika 65. Odabir materijala.....                                                                        | 70 |
| Slika 66. Odabir postupka zavarivanja.....                                                              | 70 |
| Slika 67. Izgled cijevi nakon izrade .....                                                              | 71 |
| Slika 68. Cijevni uzorci .....                                                                          | 72 |
| Slika 69. Primjer mjerenja promjera cijevi 3 .....                                                      | 73 |
| Slika 70. Olympus XRF uređaj za snimanje kemijskog sastava .....                                        | 74 |
| Slika 71. Prikaz odabranih pozicija ispitivanja kemijskog sastava.....                                  | 74 |
| Slika 72. Izvor X – zračenja .....                                                                      | 76 |
| Slika 73. Uzorci spremni za snimanje – vodoravni položaj.....                                           | 77 |
| Slika 74. Uzorak 1 - vodoravno .....                                                                    | 77 |
| Slika 75. Uzorak 1 - okomito .....                                                                      | 78 |
| Slika 76. Uzorak 2 - vodoravno .....                                                                    | 78 |
| Slika 77. Uzorak 2 - okomito .....                                                                      | 79 |
| Slika 78. Uzorak 3 - vodoravno .....                                                                    | 79 |
| Slika 79. Uzorak 3 - okomito .....                                                                      | 79 |
| Slika 80. Uzorak 4 - vodoravno .....                                                                    | 80 |
| Slika 81. Uzorak 4 - okomito .....                                                                      | 80 |
| Slika 82. Ispitni uzorak.....                                                                           | 81 |
| Slika 83. Brusni papiri različitih granulacija površine .....                                           | 81 |
| Slika 84. Uređaj za brušenje (lijevo) i uređaj za poliranje (desno) .....                               | 82 |
| Slika 85. Smjesa nagrizajuće otopine i voda korišteni u pripremi uzoraka .....                          | 83 |
| Slika 86. Uzorci nakon provedene pripreme .....                                                         | 84 |
| Slika 87. Oprema za snimanje makrostrukture .....                                                       | 84 |
| Slika 88. Analiza makrostrukture uzorka 1 .....                                                         | 85 |
| Slika 89. Analiza makrostrukture uzorka 4.....                                                          | 85 |
| Slika 90. Svjetlosni mikroskop Olympus GX 51 .....                                                      | 86 |

---

|                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------|----|
| Slika 91. Uzorak 1 - mikrostruktura vrha ispitne površine .....    | 87 |
| Slika 92. Uzorak 1 - mikrostruktura sredine ispitne površine.....  | 87 |
| Slika 93. Uzorak 4 - mikrostruktura vrha ispitne površine .....    | 88 |
| Slika 94. Uzorak 4 - prikaz razlike u mikrostrukturi.....          | 89 |
| Slika 95. Uzorak 4 - mikrostruktura sredine ispitne površine.....  | 89 |
| Slika 96. Dimenzije epruveta .....                                 | 90 |
| Slika 97. Ispitne epruvete .....                                   | 90 |
| Slika 98. Kidalica .....                                           | 91 |
| Slika 99. Ispitne epruvete 1 i 4 nakon završetka ispitivanja ..... | 91 |
| Slika 100. Dijagram sila - produljenje uzorka 1.....               | 92 |
| Slika 101. Dijagram sila - produljenje uzorka 4.....               | 92 |

**POPIS TABLICA**

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tablica 1. Podjela postupaka aditivne proizvodnje metalnih materijala [5] .....                 | 6  |
| Tablica 2. Greške u WAAM-u i uzroci [11] .....                                                  | 13 |
| Tablica 3. Prednosti i nedostaci WAAM postupka .....                                            | 13 |
| Tablica 4. Rasponi cijena za pojedine materijale [14] .....                                     | 18 |
| Tablica 5. Fizikalna i mehanička svojstva aluminija [24].....                                   | 26 |
| Tablica 6. Glavni legirni elementi aluminijskih serija [27] .....                               | 28 |
| Tablica 7. Utjecaj zaštitnih plinova inertne atmosfere na karakteristike zavarivanja [31] ..... | 31 |
| Tablica 8. Karakteristike TIG postupka ovisno o vrsti struje i polaritetu [31] .....            | 39 |
| Tablica 9. Karakteristike CMT izvora struje [45] .....                                          | 44 |
| Tablica 10. Kemijski sastav korištenih materijala u postocima [22] .....                        | 55 |
| Tablica 11. Parametri postupaka zavarivanja [22] .....                                          | 55 |
| Tablica 12. Karakteristike izvora struje - TPS 500i <i>Pulse</i> [50] .....                     | 62 |
| Tablica 13. karakteristike WF 25i REEL R [50].....                                              | 64 |
| Tablica 14. Prednosti i nedostaci AlMg 5 u odnosu na AlSi-5 [52] .....                          | 68 |
| Tablica 15. Prednosti i nedostaci AlSi 5 u odnosu na AlMg-5 [52] .....                          | 69 |
| Tablica 16. Kemijski sastav AlSi-5 [53] .....                                                   | 69 |
| Tablica 17. Mehanička svojstva AlSi-5 [53].....                                                 | 69 |
| Tablica 18. Kemijski sastav AlMg-5 u postocima [54] .....                                       | 69 |
| Tablica 19. Mehanička svojstva AlMg-5 [54] .....                                                | 69 |
| Tablica 20. Postavljeni parametri .....                                                         | 71 |
| Tablica 21. Završna dokumentacija korištenih parametara izrade .....                            | 71 |
| Tablica 22. Dimenzije dobivenih cijevi .....                                                    | 72 |
| Tablica 23. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava.....                                        | 75 |
| Tablica 24. Parametri radiografije.....                                                         | 76 |
| Tablica 25. Sastav smjese nagrizajuće otopine .....                                             | 83 |
| Tablica 26. Mehanička svojstva uzoraka 1 i 4 .....                                              | 92 |

## POPIS OZNAKA

| Oznaka            | Jedinica          | Opis                                                                  |
|-------------------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 3D                | -                 | Trodimenzionalno                                                      |
| A                 | %                 | Istezljivost                                                          |
| AC                | -                 | Izmjenična struja ( <i>Alternate current</i> )                        |
| Al                | -                 | Aluminij                                                              |
| ALC               | -                 | Korekcija duljine luka ( <i>Arc lenght correction</i> )               |
| AM                | -                 | Aditivna proizvodnja ( <i>Additive manufacturing</i> )                |
| Ar                | -                 | Argon                                                                 |
| BTF               | -                 | Buy to Fly (omjer mase sirovca i mase konačnog dijela)                |
| CAD               | -                 | Oblikovanje pomoću računala ( <i>Computer Aided Design</i> )          |
| CAM               | -                 | Proizvodnja pomoću računala ( <i>Computer Aided Manufacturing</i> )   |
| CMT               | -                 | Hladan prijenos metala ( <i>Cold metal transfer</i> )                 |
| CNC               | -                 | Računalno numeričko upravljanje ( <i>Computer Numerical Control</i> ) |
| CO <sub>2</sub>   | -                 | Ugljikov dioksid                                                      |
| DC                | -                 | Istosmjerna struja ( <i>Direct current</i> )                          |
| F <sub>m</sub>    | N                 | Vlačna sila                                                           |
| HCl               | -                 | Klorovodična kiselina                                                 |
| HCP               | -                 | Heksagonska gusto slagana rešetka ( <i>Hexagonal close paked</i> )    |
| He                | -                 | Helij                                                                 |
| Hf                | -                 | Hafnij                                                                |
| HNO <sub>3</sub>  | -                 | Dušična kiselina                                                      |
| I                 | A                 | Jakost struje                                                         |
| f                 | Hz                | Frekvencija                                                           |
| MIG/MAG           | -                 | Zavarivanje taljivom elektrodom u inertnoj/aktivnoj atmosferi         |
| R <sub>m</sub>    | N/mm <sup>2</sup> | Vlačna čvrstoća                                                       |
| R <sub>p0,2</sub> | N/mm <sup>2</sup> | Konvencionalna granica tečenja                                        |
| TIG               | -                 | Zavarivanje netaljivom elektrodom u inertnoj atmosferi                |
| Ti                | -                 | Titan                                                                 |
| TOM               | -                 | Tangentni model preklapanja ( <i>Tangent overlapping model</i> )      |
| U                 | V                 | Napon                                                                 |
| V                 | -                 | Vanadij                                                               |
| WAAM              | -                 | Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom                        |
| ZUT               | -                 | Zona utjecaja topline                                                 |

## **SAŽETAK**

Tema ovog diplomskog rada je primjena aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom u svrhu izrade aluminijskih cijevi pomoću CMT postupka.

U teorijskom dijelu objašnjen je pojam aditivne proizvodnje zajedno s principom izrade i karakteristikama. Nadalje, detaljno je objašnjena tehnologija aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom s naglaskom na primjenu aluminijske legure i postupke zavarivanja aluminijske legure. Jedan od postupaka zavarivanja aluminijske legure je CMT, modificirana verzija MIG/MAG postupka zavarivanja. Uz detaljan opis principa prijenosa metala u električnom luku, navedene su karakteristike postupka i navedeni osnovni modeli. Na kraju dani su primjeri primjene CMT postupka u WAAM tehnologiji te objašnjeni rezultati ispitivanja.

U eksperimentalnom dijelu izrađene su cijevi od dvije aluminijske legure WAAM tehnologijom koristeći CMT postupak. Provedena su ispitivanja mehaničkih svojstava i mikrostrukture, a na kraju je ocijenjena primjenjivost CMT postupka u WAAM tehnologiji i dan zaključak.

**Ključne riječi:** Aditivna proizvodnja, WAAM, zavarivanje, aluminij, CMT

## **SUMMARY**

Topic of this diploma thesis is application of wire and arc additive manufacturing technology used for purposes of manufacturing aluminum pipes with CMT welding process.

In theoretical part concept of additive manufacturing is explained along with the manufacturing principle and characteristics. Furthermore, the technology of arc and wire additive manufacturing is explained in detail, with emphasis on aluminum welding processes. One of the aluminum welding processes is CMT, a modified version of MIG/MAG welding process. With a detailed description of the principle of metal transfer in an arc, the process characteristics and the basic models are given. Finally, example of the application of CMT procedure in WAAM technology is explained along with test results.

In the experimental part, two aluminum alloy tubes were manufactured using WAAM technology and CMT process. Mechanical properties and microstructure were tested, and in the end applicability of the CMT process in WAAM was evaluated and conclusion was given

Key words: Additive manufacturing, WAAM, welding, aluminum, CMT

## 1. UVOD

Posljedica intenzivnog tehnološkog napretka i globalizacije je iznimno velika konkurencija na tržištu, zbog čega su proizvođači primorani povećati konkurentnost svojih proizvoda i usluga na tržištu. Danas postoje dva modela pozicioniranja na tržištu. Jedan od modela je proizvodnja proizvoda niže cijene i kvalitete te orijentacija na velikoserijsku proizvodnju. Ovaj model bio je zastupljeniji u prošlosti sve dok se tvrtke nisu okrenule kupcu i njegovim željama za ostvarivanje kvalitetnije, ali ujedno i izazovnije usluge. Drugi model je proizvodnja proizvoda visoke dodane vrijednosti koja zahtjeva kontinuirano ulaganje u istraživanje i razvoj, ali i rezultira inovativnim, naprednim i kvalitetnim proizvodom koji korisniku pruža kvalitetniju uslugu i personalizirani proizvod. Aditivna tehnologija pripada u drugi model. Ona se u zadnjih 30-ak godina počela intenzivnije razvijati i primjenjivati prvenstveno zbog efikasnijeg i financijski isplativijeg pristupa kreiranju poboljšanog proizvoda. Mogućnost smanjenja vremena od početne ideje do gotovog proizvoda te smanjenje potrošnje materijala glavne su karakteristike ove tehnologije. Aditivna proizvodnja (AM) je tehnologija u kojoj se dijelovi kreiraju kontinuirano ili sloj po sloj, te zaobilazi neke korake u proizvodnji koji su karakteristični za ostale konvencionalne postupke. Isto tako nudi izradu proizvoda od polimera, keramike i metala, u raznim veličinama i kompleksnosti površine.

Ovaj rad se dotaknuo teme aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom (WAAM), relativno mlade grane aditivne tehnologije, koja koristi već postojeći zavarivački sustav za navarivanje sloja na sloj u izradi metalnih dijelova. Moguće je koristiti sve vrste materijala koje se već koriste u zavarivanju. Razlog tome je taj što WAAM tehnologija koristi već postojeću opremu za zavarivanje te nije potrebno nikakva dodatna ulaganja u sustav osim žice dodatnog materijala. Ukoliko je dodatni materijal aluminij, moguća je pojava mnogih grešaka u proizvedenom dijelu, najčešće u vidu poroznosti. CMT je modificirana izvedba MIG/MAG postupka koji pokazuje iznimnu uspješnost u zavarivanju aluminijskih legura bez pojave grešaka. Eksperimentalnim dijelom na kraju rada ispitana je učinkovitost CMT postupka u proizvodnji aluminijskih dijelova WAAM tehnologijom te je dan zaključak.

## 2. ADITIVNA PROIZVODNJA

### 2.1. Definicija i značajke

Kroz povijest su se postupci aditivne proizvodnje mijenjali, a s time i terminologija. U počecima su se uglavnom koristili za brzu izradu prototipova (*Rapid prototyping* - RP). Pojam „brzo“ je imao relativno značenje jer je brzina ovisila o veličini izratka, ali i dalje je bilo potrebno puno manje vremena u usporedbi s klasičnim postupcima. Tehnologija RP razvijena je u svrhu realizacije inženjerskih zamisli te za analizu pojedinog dijela ili modela tako što bi ti prototipovi oponašali oblik (geometriju), materijal i funkciju budućeg proizvoda. Usporedno se razvijala i brza proizvodnja alata i kalupa (*Rapid Tooling* - RT). Priprema i proizvodnja kompliciranih i kompleksnih alata kao što su kalupi za injekcijsko prešanje polimera obično su usko grlo u razvoju proizvoda. RT omogućuju brzo pravljenje alata i kalupa, što znači da je moguće brzo odgovoriti na zahtjeve tržišta. Namjena RT postupaka nije proizvodnja gotovih proizvoda, već brza proizvodnja alata i kalupa koji omogućuju njihovu izradu. Postupci brze proizvodnje alata i kalupa mogu se smatrati drugim valom u RP području, jer oni omogućuju analizu proizvodnje, a ne samo proizvoda. [1]

Zajedno su RP i RT činili brzu proizvodnju (*Rapid Manufacturing* – RM) koja je omogućila proizvodnju bez potrebe za dodatnim alatima uz pomoć tehnologija kao što su CAD, CAM i CNC. Prema normi ASTM F42 iz 2009., usvaja se izraz aditivna proizvodnja (*Additive Manufacturing* - AM) te se definira kao proces povezivanja materijala pri pravljenju objekata izravno iz 3D računalnih modela, najčešće sloj po sloj. [2]

Primjer slaganja sloja na sloj prikazana je na slici broj 1.



Slika 1. Princip aditivne proizvodnje [2]

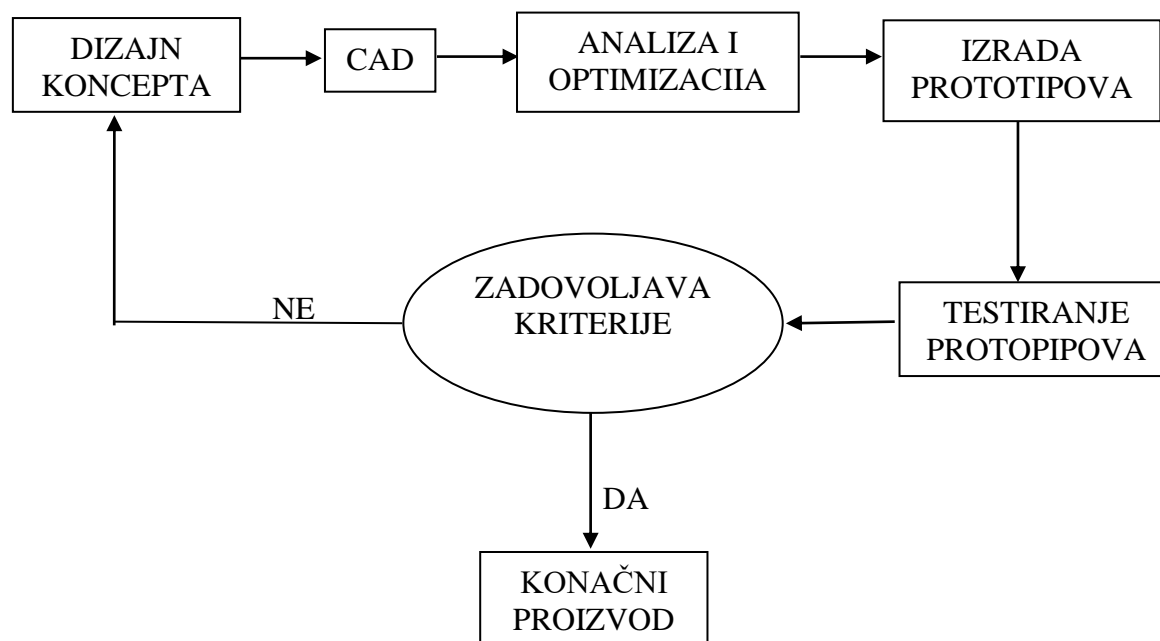


Iako su većina konačnih rezultata aditivne proizvodnje komplicirani (ne moraju nužno biti) 3D geometrijski oblici, načelno je riječ o 2½D postupcima pri kojima se 2D slojevi slažu jedan na drugi i tako dolaze do treće dimenzije proizvoda. Točnost u smjeru „z“ osi ovisi o debljini slojeva, odnosno što su deblji slojevi to je točnost manja. [1]

Danas proizvodnja predstavlja izradu dijelova i komponenti neke veće cjeline, ali isto tako moguće je izraditi i cjelokupni proizvod. Dostupnost materijala za AM polako se povećava zadnjih nekoliko godina te danas uključuje razne plastike, keramiku, metale i beton, odnosno bilo koji materijal koji se može rastaliti i zatim ponovno očvrnuti. [3]

Postupci aditivne proizvodnje također mogu biti rješenje za trenutačne trendove masovne prilagodbe zahtjevima kupaca. Dolazi do smanjenja proizvodnih serija zbog želje kupaca za svojim personaliziranim proizvodima. Upravo zbog toga aditivni postupci proizvodnje omogućuju troškovno efikasniji pristup u slučajevima izrade takvih proizvoda. Kako AM postupci ne zahtijevaju izradu alata i kalupa, nije potrebna ni velikoserijska proizvodnja kojom bi se amortizirao trošak izrade istih. [1]

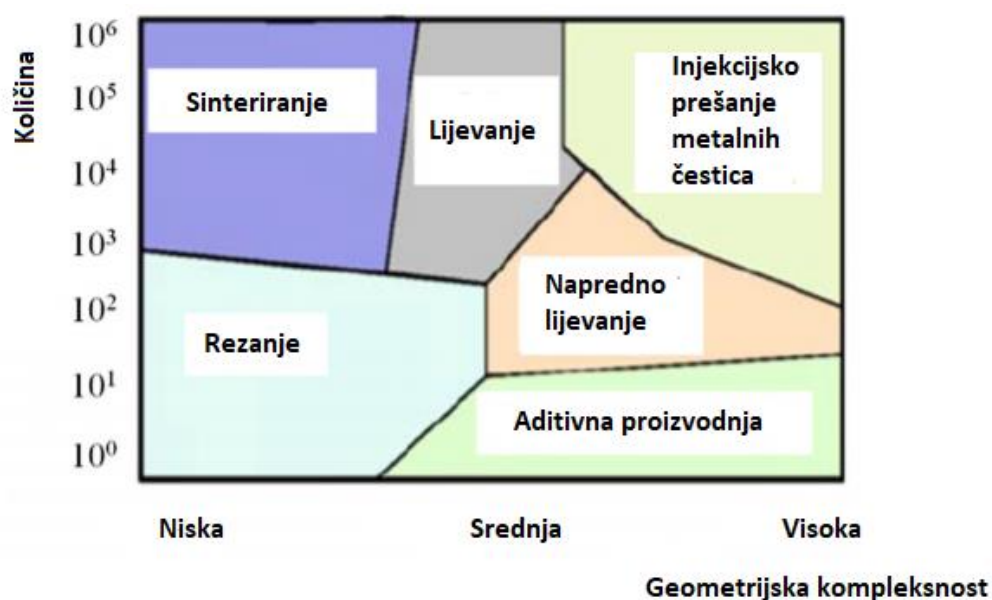
Na slici 2. prikazan je ciklus razvoja proizvoda.



Slika 2. Ciklus razvoja proizvoda [4]

Gledano s tehnološkog aspekta, tehnologiju aditivne proizvodnje karakteriziraju mnoge prednosti, a jedna od najvažnijih je mogućnost proizvodnje direktno iz digitalnog 3D modela dobivenog pomoću CAD sustava. Takav princip rada omogućuje izradu dijelova vrlo složene geometrije uz mogućnost promjene dizajna u vrlo kratkom vremenu. Isto tako puno je manji gubitak materijala jer se proizvod izrađuje sloj po sloj. Uz prednosti dolaze i neka ograničenja kao što je nemogućnost kombinacije materijala, izrada velikih dijelova, mala brzina izrade, potrebna kvalificirana radna snaga i naknadna obrada površine. Tehnološke karakteristike prate one ekonomske, koje imaju jednaku važnost te balansiraju sliku svakog procesa. Pa tako brzina i jednostavnost izrade, manji troškovi montaže i redizajna, personalizacija proizvoda koja povećava samu vrijednost proizvoda pozitivno utječu na ekonomsku sliku procesa. Problem predstavlja radno iskustvo radnika koji prije moraju proći obuku. Isto tako postoje veliki troškovi nabave materijala i energije. Jedan od problema je i volumen proizvodnje. Naime, povećanje volumena proizvodnje (serije) ne snižava proizvodni trošak proizvodnje pojedinog komada. Princip ekonomija razmjera u ovoj tehnologiji ne vrijedi jer je proizvodna cijena proizvoda u maloj i velikoj seriji jednaka. Zbog toga će velikoserijska proizvodnja standardiziranih dijelova ostati u domeni konvencionalnih proizvodnih tehnologija. [3]

Na slici 3 je prikazano da je pomoću aditivne proizvodnje moguće izraditi komponente srednje i visoke kompleksnosti, ali s relativno niskom kvantitetom.



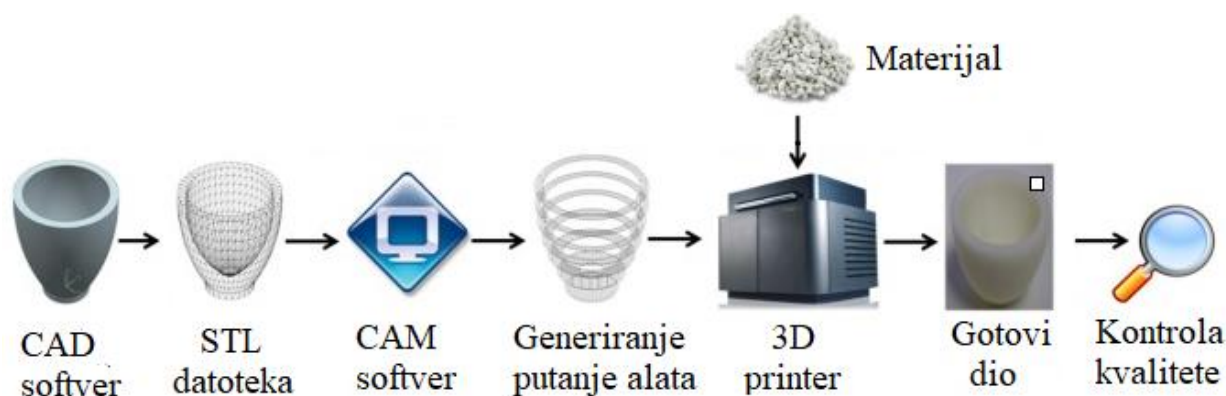
**Slika 3. Karakteristike proizvodnje metalnih dijelova aditivnim postupcima u odnosu na konvencionalne postupke [5]**

## 2.2. Faze aditivne proizvodnje

Proizvodi izrađeni postupkom aditivne proizvodnje prolaze određene faze (slika 4.) u svojoj izradi [2]:

- Izrada CAD modela
- Pretvaranje CAD modela u STL datoteku
- Prebacivanje STL datoteke na uređaj za aditivnu proizvodnju
- Podešavanje parametara
- Izrada dijela
- Naknadna obrada

Na slici 4. prikazan je redoslijed faza u aditivnoj proizvodnji.



Slika 4. Faze aditivne proizvodnje [6]

Kao što je već ranije navedeno, prvi korak svih postupaka aditivne proizvodnje izrada je 3D geometrijskog modela u nekom CAD programu. Nakon izrade se takav model sprema u različitim formatima, a od 1987. tvrtka 3D Systems uvodi STL datoteku (*Standard Tessellation Language*) koja predmet pokazuje kao mrežu povezanih trokuta. Nadalje ova datoteka nije imala boje, pa je od 2009. uvedena AMF datoteka (*Additive Manufacturing File*), koja uz STL datoteku postaje standard i čini osnovu za rezanje u slojeve. Obje datoteke predstavljaju cjelokupnu geometriju modela te čine temelj za rezanje kreiranog modela na slojeve po visini. Konture dobivenih slojeva služe za generiranje putanje alata. Nakon

podešavanja parametara stroja (debljina sloja, snaga, brzina itd.), slijedi izgradnja modela tako što se prvi sloj nanosi na temeljnu ploču, a na njega se kasnije nanosi novi sloj s određenom visinom. Proces traje dok se ne nanesu svi slojevi. Slijedi naknadna obrada (čišćenje viška materijala, odstranjivanje potporne strukture, bojenje) koja se može odvijati paralelno s izgradnjom samog modela, ali češće se taj segment odrađuje samostalno. [2,7]

### 2.3. Aditivna proizvodnja metalnih materijala

Postupci aditivne proizvodnje dijele se na postupke za izradu komponenti od metala, polimera i keramike u obliku kapljevine, praša, žice i folije. Od polimernih materijala najčešće se koriste akrilonitril/butadein/stiren (ABS), poliamid, poli(vinil-klorid) (PVC), poliuretani, epoksidne smole i drugi. [2]

Neki od najčešće korištenih postupaka proizvodnje polimernih komponenti su [2]:

- Stereolitografija
- Selektivno lasersko srašćivanje
- 3D tiskanje
- Slojevita izrada laminiranjem

Prema standardnoj normi ASTM F2792 aditivna proizvodnja metalnih materijala dijeli se u četiri kategorije prikazane u tablici 1.

**Tablica 1. Podjela postupaka aditivne proizvodnje metalnih materijala [5]**

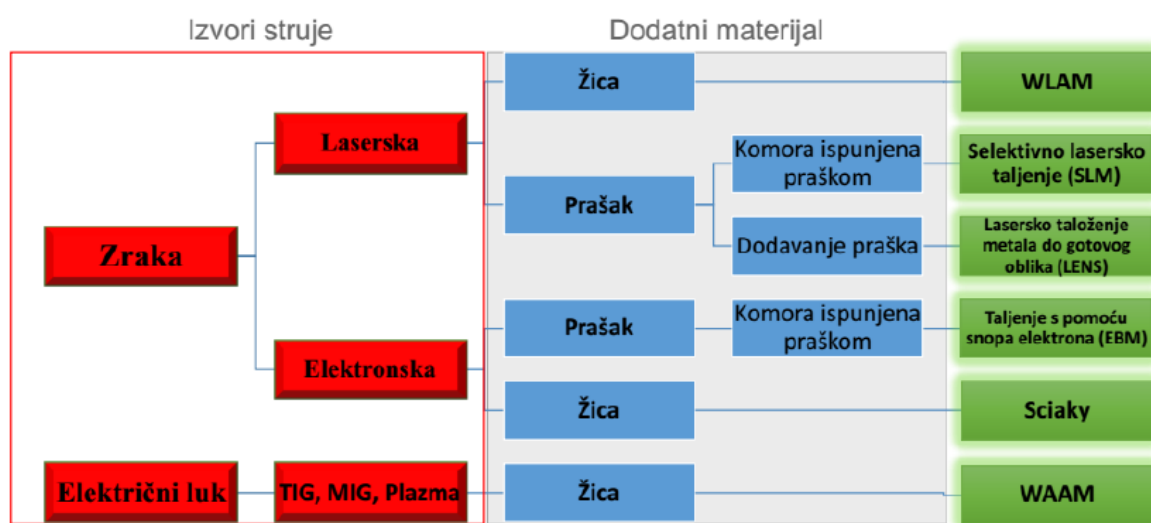
| Klasifikacija                | Postupak                                                  |
|------------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Fuzija praška                | Izravno metalno lasersko srašćivanje (DMLS)               |
|                              | Taljenje pomoću snopa elektrona (EBM)                     |
|                              | Selektivno lasersko srašćivanje (SLS)                     |
|                              | Selektivno lasersko taljenje (SLM)                        |
| Izravno energetsko taloženje | Oblikovanje pomoću elektronskog snopa (EBF <sup>3</sup> ) |
|                              | Izravno taloženje metala (LENS)                           |
|                              | Konsolidacija laserom (LC)                                |
|                              | Izravna proizvodnja snopom (DLF)                          |
|                              | Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom (WAAM)     |
| Spajanje vezivom             | Trodimenzijsko tiskanje (3DP)                             |
| Laminiranje                  | Izrada objekata laminiranjem (LOM)                        |
|                              | Ultrazvučna konsolidacija (UC)                            |

Postupke aditivne proizvodnje metalnih komponenti (slika 5.) dijele se u tri skupine ovisno o izvoru struje [5]:

- Laser
- Elektronski snop
- Električni luk

Glavna karakteristika lasera je visoka preciznost i loša energetska iskoristivost (2 - 5 %) koja ograničava njegovu upotrebu. Elektronski snop nudi bolju energetska iskoristivost (15 – 20 %), ali radna okolina zahtjeva rad u vakuumu pa je stoga primjenjiviji za rad u svemirskim postajama i sličnim uvjetima. Naspram lasera i elektronskih snopova, energetska iskoristivost električnog luka može iznositi i do 90 %, a ako se tome još nadoda niska cijena standardne zavarivačke opreme u odnosu na preostale dvije opcije izvora struje, može se zaključiti da osim široke primjene je i ekonomski isplativiji. [5]

Na slici 5. prikazana je podjela aditivne proizvodnje metalnih komponenti ovisno o izvoru struje.

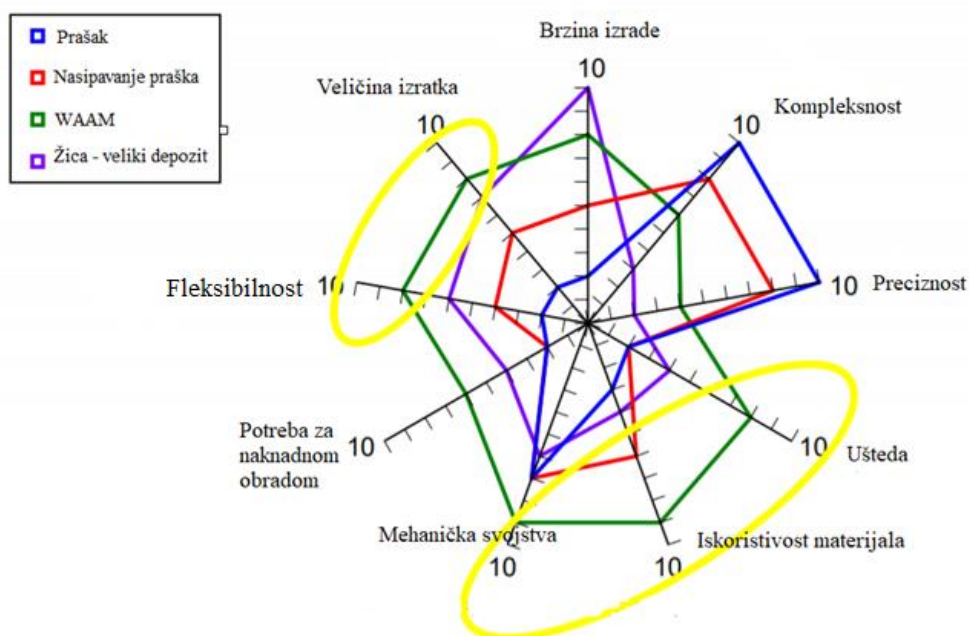


Slika 5. Podjela postupaka aditivne proizvodnje metalnih komponenti ovisno o izvoru struje [8]

Postupci na temelju praška bolje su razvijeni zbog mogućnosti proizvodnje komponenti s većom preciznošću. Standardna debljina sloja dobivena korištenjem praška je između 20 - 100  $\mu\text{m}$ , dok završne komponente ostvaruju dimenzijsku točnost do  $\pm 0,05$  mm te hrapavost površine od 9 – 16  $\mu\text{m}$ . S druge strane, komponente na bazi praška imaju određenu limitiranost. Naime brzina taloženja je ekstremno niska, obično oko 10 g/min. Kod procesa

koji koriste žicu kao dodatni materijal znatno je veća iskoristivost materijala pa je moguće dosegnuti i iskoristivost od 100 % taloženja dodatnog materijala. Takav proces puno je ekonomski i ekološki isplativiji te ne izlaže radnike zagađenim okruženjem koje stvara prašak. Još jedna od prednosti žice u odnosu na prašak leži u puno većoj brzini taloženja. Može se zaključiti da odabir između praška i žice ovisi o zahtjevima koji su stavljeni od strane kupca/tržišta. Na kraju važno je nadodati da je cijena metalnih žica puno manja, čineći proizvodnju na bazi žice konkurentnijom. [5]

Na slici 6. grafički je prikazana usporedba postupaka aditivne proizvodnje izrade metalnih komponenti.



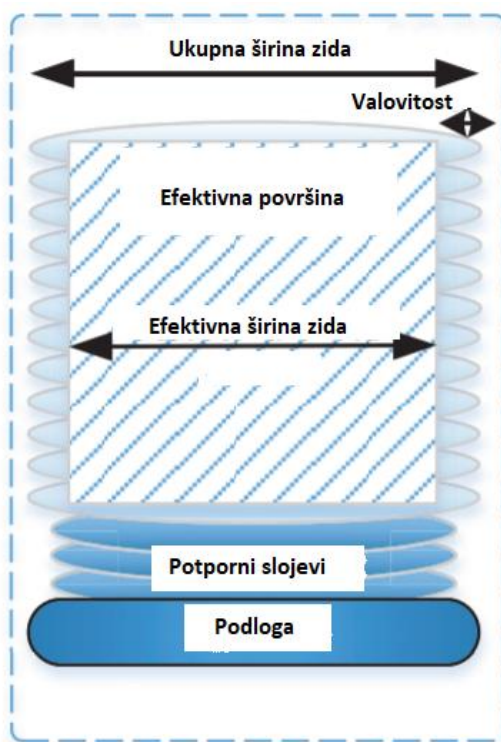
**Slika 6. Usporedba WAAM tehnologije s drugim aditivnim postupcima izrade metalnih komponenti [9]**

### 3. ADITIVNA PROIZVODNJA ELEKTRIČNIM LUKOM I ŽICOM (WAAM)

Većina AM tehnologija koriste polimerne materijale ili metal u praškastom obliku, što često rezultira proizvodima koji imaju razne greške (poroznosti, šupljine, slaba mehanička svojstva) te nisu potpuno funkcionalni. Razvitak aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom (WAAM – *Wire + Arc Additive Manufacturing*) nudi rješenje za većinu problema s kojima se suočavaju ostale AM tehnologije. [10]

WAAM postupak je relativno nova tehnologija aditivne proizvodnje koja koristi električni luk kao izvor energije. Zagrijavanje žice dodatnog materijala uzrokuje njeno taljenje te taloženje na određenu površinu. Za provedbu postupka potrebna je standardna zavarivačka oprema te puno žice dodatnog materijala.

Taljenjem žice dodatnog materijala kapljice se zadržavaju na određenom području i čine jedan sloj. Kasnijim dodavanjem više slojeva izradak se diže u visinu, a na svojoj vanjskoj površini ostaje valovitost (vidi slika 7.) dobivena naslagivanjem kapljica. To predstavlja dio materijala koji se mora odstraniti naknadnom obradom u svrhu ostvarivanja jednolične površine. [11]

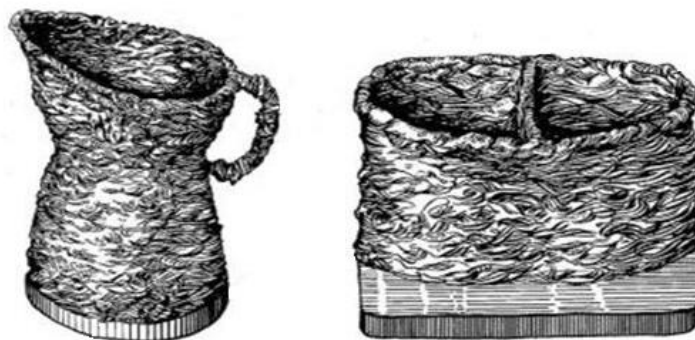


Slika 7. Presjek zida dobivenog WAAM tehnologijom [11]



### 3.1. Povijest

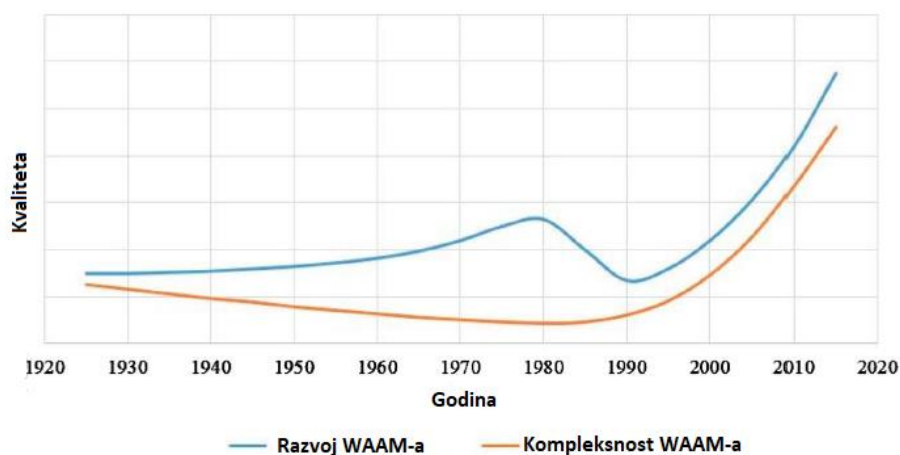
Iako je WAAM postupak priznat kao dio aditivne proizvodnje unatrag 15-ak godina, sami koncept proizvodnje pomoću zavarivanja postoji skoro 100 godina. Postupak se prvi put spominje 1926. kada je američki znanstvenik Baker patentirao upotrebu električnog luka kao izvor topline u svrhu izrade prototipa. Na slici br. 8. prikazan je prvi patent, odnosno posuda (lijevo) i košara (desno).



Slika 8. Prvi patent WAAM-a (posuda-lijevo i košara-desno) [12]

Nakon prvog patenta slijedi stanka u razvoju sve do 1971. godine kada je zaposlenik tvrtke Mitsubishi pod imenom Ujiie izradio posude pod tlakom koristeći više žica od različitog materijala dobivši time funkcionalne zidove. Nakon toga 1983. WAAM je korišten za proizvodnju visokokvalitetnih masivnih dijelova od konstrukcijskog čelika za primjenu u nuklearnim elektranama s količinom depozita do 80 kg/h. Prinz i Weiss 1993. patentiraju kombinaciju zavarivanja i 3D glodanja, a 2006. Rolls Royce patentira tehnologiju za brzu izradu specijalnih metalnih materijala. [13]

Na slici broj 9. prikazan je grafički razvoj WAAM-a i kompleksnosti procesa.



Slika 9. Grafički prikaz razvoja WAAM-a i kompleksnosti procesa [5]

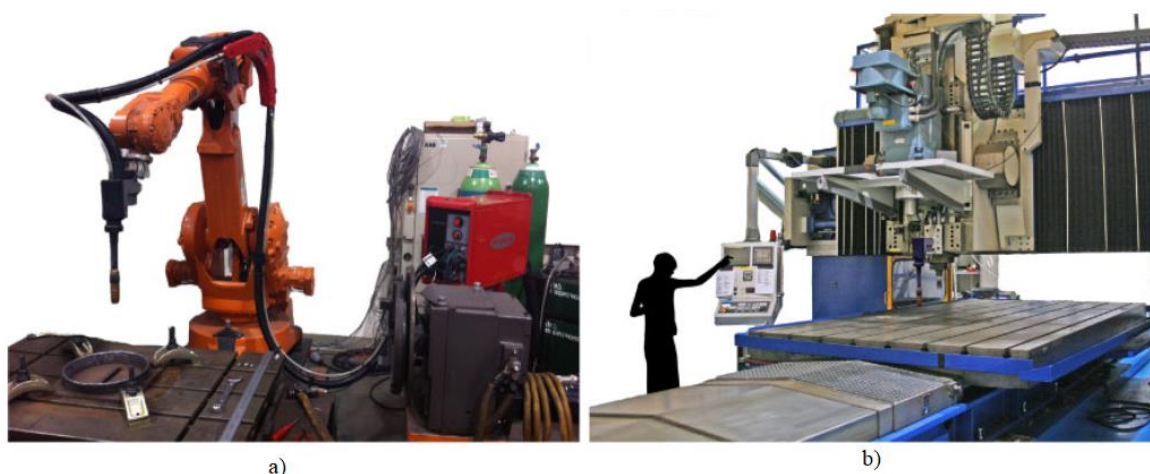


### 3.2. Značajke WAAM-a

Najvažnija karakteristika WAAM tehnologije jest različitost samog procesa u odnosu na ostale aditivne postupke proizvodnje. Postoje prednosti, ali i izazovi koji koče primjenu WAAM-a te moraju biti riješeni s ciljem daljnjeg razvoja postupka.

Već na prvi pogled cjelokupnog sustava uočljiva je jedna prednost. Naime WAAM tehnologija koristi već postojeću opremu za zavarivanje. To korisniku omogućava upotrebu izvora struje, zaštitnih plinova i dodatnog materijala koje je prije koristio u neku drugu svrhu, a uz to je potreban i robot ili CNC stroj, koji omogućuju manipulaciju pištoljem. Takva karakteristika predstavlja značajnu ekonomsku prednost u odnosu na ostale postupke aditivne proizvodnje. Također moguća je izrada komponenti od aluminija, čelika, ali i nekih skupljih materijala kao titan i nikal te njihove legure.

Na slici broj 10. prikazane su opcije gibanja gorionika za izradu komponenti pomoću WAAM-a.



Slika 10. Opcije gibanja gorionika (a – robot, b – CNC stroj ) [14]

Jedna od većih prednosti je manjak gubitka materijala nastalog uslijed proizvodnje i naknadne obrade. Kako je već prije spomenuto nakon završene izgradnje pomoću WAAM tehnologije, postoji određena valovitost (vidi slika 7.) na površini koja se kasnije uklanja naknadnom obradom. Taj odvojeni volumen predstavlja gubitak materijala, a u odnosu na konvencionalne postupke aditivne proizvodnje je vrlo mali. Korištenjem WAAM-a umjesto drugih postupaka moguće je smanjiti gubitak materijala s 90% na 10% [11]. Omjer koji prikazuje masu sirovca na početku proizvodnje u odnosu na masu konačnog dijela označava se s BTF (*Buy to Fly*) te pokazuje ekonomsku isplativost postupka. Za titan i konvencionalne postupke omjer je vrlo

visok i teži se njegovom snižavanju. Upravo titan, s lošom obradivošću i niskom iskoristivosti materijala, predstavlja problem u avio industriji za koju se predviđa da će idućih 20-ak godina trebati 20 milijuna tona sirovog materijala [10]. Kod takvih industrija gdje se potražnja traži u milijunima tona, WAAM je idealan postupak proizvodnje zahvaljujući svojem niskom BTF omjeru.

Velike količine depozita važne su kod izrade velikih dijelova u relativno kratkom vremenu. S brzinama u rasponu od 1 kg/h do 4 kg/h za aluminij i čelik moguća je izrada izuzetno velikih dijelova u jednom danu. Moguće je ostvariti i veće brzine (do 10 kg/h), ali s posljedicom rasta BTF omjera čineći konačni proizvod skupljim. Održavanjem stope depozita u normalnim iznosima (1 kg/h za aluminij i titan te 3 kg/h za čelike) moguće je ostvariti BTF omjer manjim od 1,5. Uz veće brzine taloženja ostvarivi su i puno veći dijelovi pa materijali kao aluminij i čelik ne zahtijevaju zaštitu zaštitnim plinovima. S tom karakteristikom je veličina izratka definirana jedino dosegom manipulatora. Zbog toga su proizvodi dobiveni WAAM-om prikladniji za srednje do velike izratke. [14]

Neka istraživanja su pokazala da izradci dobivenih WAAM-om imaju jednaka ili čak bolja mehanička svojstva od odljevaka i kovanih izradaka istog materijala. Čvrstoća i duktilnost dosežu istu vrijednost, dok otpornost na umor pokazuje bolje vrijednosti. [10]

Zajedno s prednostima dolaze i neki nedostaci koje je potrebno ukloniti ili barem poboljšati.

Prije svega WAAM je pogodniji za izradu većih komada jednostavnije geometrije, nego za izradu manjih, preciznijih i kompleksnijih komada, što jasno definira njegovu primjenu. Nadalje, iako pokazuje neka bolja mehanička svojstva, velik je problem anizotropnosti tih svojstava. Anizotropija predstavlja osobinu nekog sredstva da njegova fizikalna svojstva poprimaju različite vrijednosti za različite smjerove. Pa tako postoji veća čvrstoća, ali i manja duktilnost u horizontalnom smjeru (smjer nanošenja slojeva). [10]

Kao što je prije navedeno velika količina depozita za izradu dijelova velikih dimenzija predstavljaju pozitivnu karakteristiku, ali s njom dolaze i neki problemi. Naime veliki unos topline stvara zaostala naprezanja i deformacije što može predstavljati problem. Uz zaostala naprezanja i deformacije, velike količine depozita uzrokuju veliku hrapavost površine zbog koje je potrebna naknadna obrada.

Jedan od problema je modeliranje geometrije slojeva koje predstavlja skup operacija. Te operacije povezuju varijable vezane za planiranje i generiranje putanje s odabirom optimalnih parametara da bi se dobila što bolja geometrija slojeva. Stoga će na kvalitetu proizvoda direktno utjecati modeliranje slojeva pojedinačno i načina na koji se preklapaju. U suprotnom,

ako se ovaj korak ne izvede kvalitetno, mogu se pojaviti problemi poput suvišnog preklapanja ili nedovoljnog stapanja i vezivanja slojeva [10]. Provedeno je mnogo istraživanja na ovu temu s ciljem razvijanja algoritma koji omogućuje što kvalitetniji proces (vidi točka 3.4.).

Kao i svi postupci kod kojih se tali materijal javljaju se određene greške u vidu poroznosti, ugorina i nadvišenja. Najopasnije su poroznosti koje se ne mogu vidjeti golim okom. One predstavljaju šupljine u zavaru (mogu biti i na površini) ispunjene stlačenim plinom. Naime, poroznosti nastaju tijekom hlađenja taline kada plinovi izlaze iz metala u obliku mjehurića. Ako je brzina izlučivanja plinova manja od brzine skrućivanja materijala, plinovi ostaju zarobljeni u zavaru te s time utječe na čvrstoću zavara ovisno o broju, veličini mjestu i obliku šupljina. [15]

**Tablica 2. Greške u WAAM-u i uzroci [11]**

| Greške     | Uzroci                             |
|------------|------------------------------------|
| Poroznost  | Nedovoljan protok zaštitnog plina  |
|            | Niska čistoća zaštitnog plina      |
|            | Nezadovoljavajući parametri        |
|            | Prevelika brzina zavarivanja       |
|            | Nečistoće u materijalu             |
| Ugorine    | Prevelik iznos struje zavarivanja  |
|            | Preveliki iznos brzine zavarivanja |
|            | Pogrešan kut zavarivanja           |
|            | Kemijski sastav materijala         |
|            | Nedovoljna brzina dodavanja žice   |
| Nadvišenja | Prevelika brzina zavarivanja       |

Prethodno navedene karakteristike prikazane su u Tablici 3. u svrhu preglednosti.

**Tablica 3. Prednosti i nedostaci WAAM postupka**

| Prednosti                               | Nedostaci                                     |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Korištenje već postojeće opreme         | Manje primjenjiv za manje i preciznije komade |
| Dobar BTF omjer                         | Anizotropnost materijala                      |
| Velika količina depozita                | Modeliranje geometrije slojeva                |
| Veća otpornost na umor                  | Velika zaostala naprezanja                    |
| Moguća strojna obrada za bolja svojstva | Potrebna naknadna obrada                      |
| Veliki izbor materijala                 | Pojava poroznosti i drugih grešaka            |
| Niži troškovi nego kod primjene praška  |                                               |
| Nema ograničenja za veličinu proizvoda  |                                               |
| Robotizacija i automatizacija postupka  |                                               |

### 3.3. Problematika postupka

Komponente dobivene WAAM postupkom karakterizira veliki unos topline što rezultira:

- Zaostalim napreznjima
- Deformacijama

Zaostala napreznja uzrokuju nešto lošija mehanička svojstva dobivenih proizvoda, a deformacije stvaraju probleme kod tolerancija. U svrhu izbjegavanja problema koji se pojavljuju tokom WAAM postupka potrebno je obratiti pažnju na određene radnje. Prije početka postupka potrebno je optimizirati parametre i način taloženja, a posebnu važnost ima pravilno učvršćivanje podloge. Čim započne postupak radnje koje slijede su najučinkovitije za smanjenje deformacija i napreznja. Kako bi se spriječilo deformiranje podloge prilikom izrade zida, potrebno je ostvariti taloženje materijala s obje strane podloge što eliminira deformacije i smanjuje zaostala napreznja, a predlaže se i simetrična gradnja. Primjer takve strategije naziva se „back to back“ gradnja prikazana na slici broj 11. [11,14]

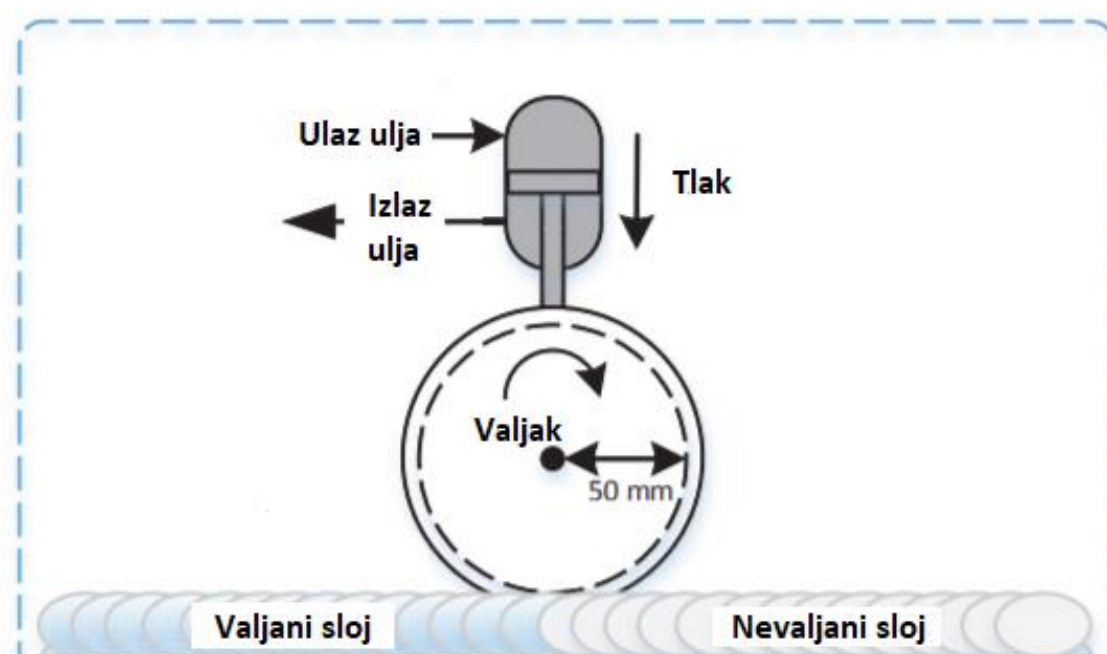


Slika 11. Primjer „back to back“ gradnje [14]

Takve strategije imaju snažan utjecaj na smanjenje deformacije, ali nema znatan utjecaja na zaostala napreznja. Jedan od načina uklanjanja zaostalih napreznja 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 je WAAM tehnologija izrade sloja po sloj, temperatura međusloja predstavlja temperaturu prethodno nanesenog sloja. Naime, problem kod optimizacije vremena hlađenja je moguće dugo čekanje, što bi odužilo vrijeme izrade. Iako veća temperatura međusloja poboljšava viskoznost taline, talog pri visokim temperaturama može postati nestabilan te izazvat

urušavanje izrađenog dijela. Kako god, jedna od mogućnosti je kontroliranje međuslojne temperature nametanjem optimalnog vremena hlađenja koje se može optimizirati simuliranjem temperaturnog ponašanja tijekom izrade komponente pomoću metode konačnih elemenata.

Jedan od načina uklanjanja zaostalih napreznja koji se sve više koristi je „online“ valjanje prikazano na slici 12., a koristi se za valjanje nakon nanesenog sloja. Oprema za valjanje sastoji se od hidrauličkog cilindra koji osigurava pritisak na naneseeni sloj. [11, 17]



Slika 12. „Online“ valjanje [11]

Ovim postupkom ne samo da se smanjuju zaostala napreznja već se reduciraju visina sloja i kasnije moguće deformacije. Isto tako poboljšavaju se svojstva mikrostrukture što izravno utječe na mehanička svojstva kao što su granica razvlačenja ( $R_e$ ) i vlačnu čvrstoću ( $R_m$ ). [11]

Naime, pritiskom valjka na sloj zavara utječe se na veličine zrna tako što ga smanjuje i poboljšava orijentaciju zrna. Dizajn valjka svojom geometrijom mora se prilagoditi zavaru. Manja zrna poboljšavaju vlačna svojstva materijala. Uz valjanje veliku važnost ima i predgrijavanje pomoću kojeg je moguće smanjiti vjerojatnost pojave pora [12]. Problem poroznosti posebno se javlja u aluminijskim legurama zbog njegove niske topivosti. Najčešće se javlja na granicama slojeva. Nažalost valjanjem nije moguće potpuno ukloniti zaostala napreznja zbog neizbježnog skupljanja materijala usred hlađenja i deformacija, ali moguće ih

je znatno smanjiti zajedno s poroznosti uz poboljšanje homogenosti mikrostrukture i mehaničkih svojstava. Međutim, ova primjena je limitirana na posebne konstrukcije. Uz to masivna konstrukcija valjka može uzrokovati značajno produljenje izrade, time eliminirajući jednu od glavnih prednosti u odnosu na ostale postupke aditivne proizvodnje – veliku brzinu taloženja. [17]

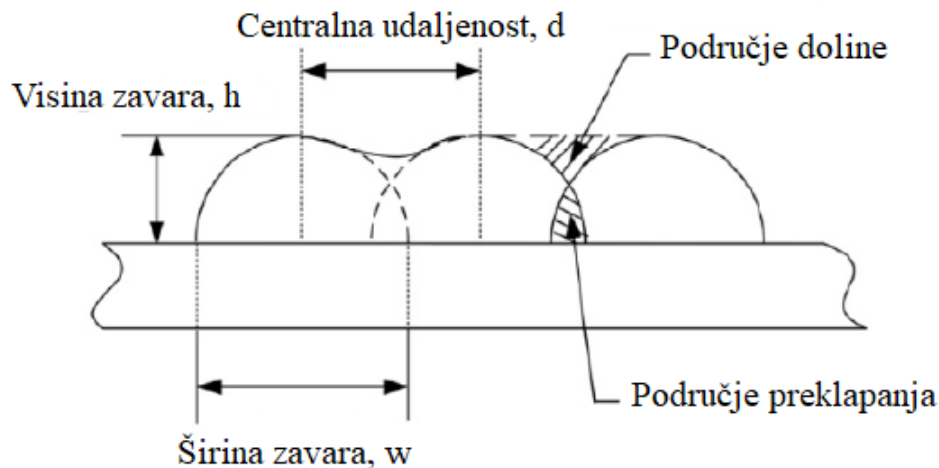
Nadalje jedna od najučinkovitijih metoda ublažavanja zaostalih naprezanja i pukotina je zagrijavanje podloge na koju će biti izrađena komponenta. Razlog zagrijavanju je to što smanjuje razliku u temperaturi između podloge i prvog nanesenog sloja te smanjuje brzinu hlađenja. U WAAM tehnologiji poznato je da su prvi slojevi, ukoliko nije izvedeno zagrijavanje podloge, uglavnom uži u odnosu na sljedeće slojeve. Razlog tome je brzo hlađenje uzrokovano velikim područjem podloge i njenom nižom temperaturom u odnosu na prvi sloj [17]. No zagrijavanja podloge prije početka nije jedini način poboljšanja završnog postupka. Istraživanja su pokazala da kontinuirano taloženje materijala utječe na manje deformacije podloge isto kao i zagrijavanja podloge prije početka. Međutim kontinuirana metoda može uzrokovati velike unose temperature u određenim područjima što bi dovelo do velikih temperaturnih gradijenata i ponovnog taljenja podloge. Takvi problemi uzrokuju smanjenje dimenzijsku točnost i lošiju dobivenu površinu. Rezultati dovode do zaključka da je potrebno naći kompromis između primjenjivanja međuslojnog hlađenja i održavanja dovoljne temperature podloge u svrhu smanjivanja deformacija. [18]

### 3.4. Optimizacija parametara preklapanja

U svrhu unaprjeđenja postupka provedeno je mnogo istraživanja s ciljem postizanja optimalne geometrije slojeva te je razvijen „Tangentni model preklapanja“ (*Tangent overlapping model* – TOM), a postavljen je na sljedeći način. Prvim korakom određuju se parametri dimenzija pa tako „ $h$ “ predstavlja visinu jednog zavara, „ $w$ “ širinu istog, a „ $d$ “ udaljenost između dvaju zavara ili centralna udaljenost. Svaki zavar u dodiru sadrži dva područja [16]:

- Područje doline
- Područje preklapanja

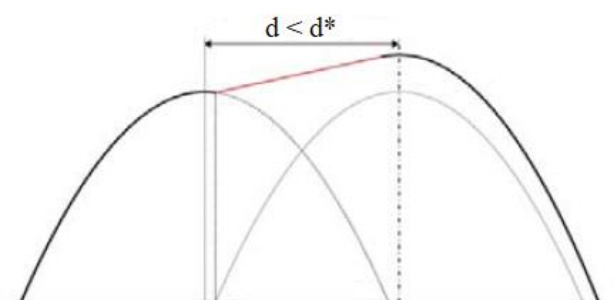
Gore navedeni parametri prikazani su na slici 13.



Slika 13. Prikaz parametara dimenzija zavora [16]

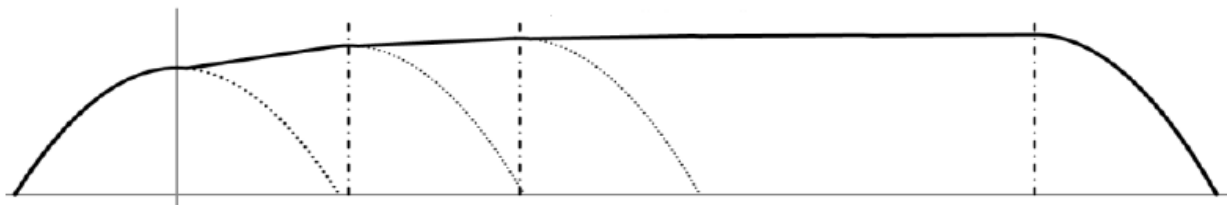
Ovisno o centralnoj udaljenosti ta dva područja će se mijenjati. Povećanjem udaljenosti povećavat će se i područje doline, dok će se preklapanje smanjivati. Suprotno vrijedi za smanjivanje udaljenosti između zavora. Postoje tri slučaja preklapanja u Tangentnom modelu preklapanja [16]:

1. Ako su područja preklapanja i doline jednaka onda se centralna udaljenost naziva kritična centralna udaljenost ( $d = d^*$ ) i predstavlja idealan slučaj preklapanja dva zavora.
2. Ako je centralna duljina veća od kritične centralne duljine, ali manja od širine zavora ( $d^* < d < w$ ), preklapanje će biti manje, ali će biti veća valovitost površine.
3. Ako je centralna duljina manja od kritične, ali veća od polovice iznosa širine zavora, ( $w/2 < d < d^*$ ) profil drugog (kasnijeg) zavora bit će viši nego prethodni (vidi slika 14.). Takva reakcija označava da je preklapanje veće od dopuštenog te da proces nije stabilan.



Slika 14. Razlika u visini dva susjedna zavora [16]

U WAAM tehnologiji svaki sloj izrađen je taloženjem većeg broja kapljica jedne do druge, a proces preklapanja određuje kvalitetu površine i dimenzijsku točnost izratka. Naime ako se dogodi da je centralna duljina manja od kritične i s takvim parametrima se nataloži nekoliko zavara zaredom, izradak može izgledati kao shema na slici broj 15.



**Slika 15. Shema preklapanja u slučaju većeg broja zavara [16]**

Zbog takvog problema, analizom TOM modela, donesena je odluka da kritična centralna duljina iznosi 0,738 širine zavara, a centralnu duljinu bi trebala imati istu ili veću vrijednost ( $d \geq d^* = 0,738 w$ ). [16]

### 3.5. Materijali u WAAM-u

Svaki materijal dostupan u obliku žice dodatnog materijala može se koristiti za WAAM, a najčešći su:

- Čelik
- Aluminiј
- Titan
- Legure na bazi nikla
- Legure na bazi magnezija

Osim svojstva materijala, jedan od parametara kod odabira materijala za proizvodnju je i cijena. U tablici 4. prikazani su rasponi cijene za tri najčešće korištena materijala ovisno o promjeru žice i vrsti legure.

**Tablica 4. Rasponi cijena za pojedine materijale [14]**

| Materijal | Cijena            |
|-----------|-------------------|
| Čelik     | £2/kg - £15/kg    |
| Aluminiј  | £6/kg - £100/kg   |
| Ti-6Al-4V | £100/kg - £250/kg |

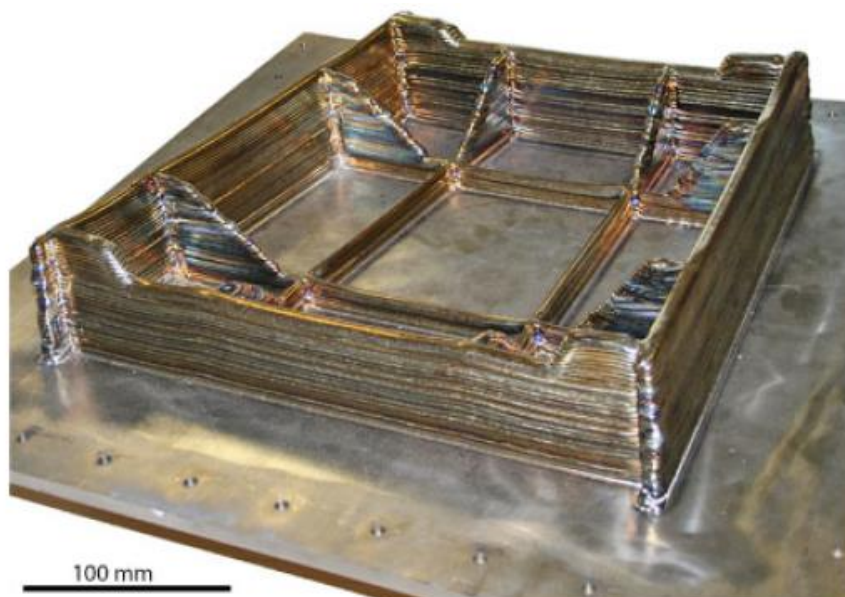


U sljedećim točkama ukratko su opisane karakteristike i područje primjene najzastupljenijih materijala u WAAM-u, osim aluminijski koji je detaljnije opisan u sljedećem poglavlju.

### 3.5.1. Titan

Legure na bazi titana najčešće su istraživane u području WAAM-a zbog svoje loše obradivosti i velikih troškova obrade. Takve legure imaju visoku čvrstoću, žilavost, dobru otpornost na koroziju i mogu podnijeti ekstremne temperature bez značajnih gubitaka mehaničkih svojstava, što ih čini pogodnim za zrakoplovne i biomedicinske svrhe. [17] Nadalje vrlo je lagan te ima relativno nisku istezljivost, što ih čini dobro zavarljivima.

Na slici 16. prikazan je nosač kotača aviona izrađenog od Ti-6Al-4V, najčešće korištena legura titana.



Slika 16. Nosač kotača aviona [14]

Titan se pojavljuje u dvije alotropske modifikacije,  $\alpha$ -faza (od sobne temperature do 885 °C s heksagonalnom gusto pakiranom rešetkom) i  $\beta$ -faza (od 885 °C do temperature taljenja s površinski centriranom kubičnom rešetkom). Zavarljivost  $\alpha$ -legura je dobra, otporne su na koroziju i puzanje, s visokom čvrstoćom pri povišenim temperaturama, dok prisutnost  $\beta$ -faze ima povoljan utjecaj na usitnjenje zrna, čvrstoću i žilavost, a poboljšava se i zavarljivost. Prema tome strukturno stanje Ti-legura ovisi prvenstveno o kemijskom sastavu. Sa stajališta zavarivanja može se uočiti da Ti-legure koje očvršćuju toplinskom obradom očvršćuju i tijekom zavarivanja. Za takve legure potrebno je predgrijavanje kao i toplinska obrada nakon

zavarivanja. U zavaru je moguća pojava pogrešaka, a najčešće su vezane s apsorpcijom plinova, porastom zrna, poroznošću i hladnim pukotinama. [19]

Titan uz odlična svojstva ima nedostatak u cijeni. Njegova visoka cijena predstavlja problem za uporabu zbog mogućih velikih gubitaka u materijalu, a upravo WAAM je idealan postupak zbog malog BTF omjera.

### **3.5.2. Legure na bazi nikla**

Glavno obilježje ovih legura je FCC kristalna struktura što u primjeni znači da ne dolazi do prijelaza žilavog u krhak prijelom sa snižavanjem temperature pa se mogu nazvati žilavim materijalom. Legure na bazi nikla najčešće se koriste u kemijskoj, naftnoj, prehrambenoj, zrakoplovnoj i nuklearnoj industriji. Karakterizira ih visoka čvrstoća na povišenim temperaturama, mala toplinska istezljivost, dobra zavarljivost, sjajna korozijska otpornost i vatrootpornost. Visoki troškovi te otežana mogućnost strojne obrade guraju WAAM na idealno mjesto za odabir u proizvodnji takvih legura. [17,19]

### **3.5.3. Čelik**

Čelici su željezne legure široko primijenjene u brodskoj, automobilskoj, građevinskoj i plinskoj industriji koje se u kombinaciji s WAAM-om mogu koristiti za proizvodnju dijelova s ukupno niskom cijenom. Među čelicima, nehrđajući čelici našli su primjenu u kemijskim postrojenjima i nuklearnoj industriji, gdje su potrebni dijelovi visoke otpornosti na toplinu i koroziju. [17]

### **3.5.4. Legure na bazi magnezija**

Zadnjih nekoliko godina raste primjena ovih legura kao alternativa aluminiju s ciljem smanjenja težine pojedinih dijelova u automobilskoj i biomedicinskoj industriji. Razvoj magnezijских legura bio je ograničen zbog rizika od zapaljivosti (vrelište mu je blizu tališta), ali zbog povećanog interesa za Mg – Al legurama, određeni legirni elementi dodani su magneziju i suzbili osjetljivost na paljenje. Nadalje magnezij ima HCP strukturu što rezultira lošom duktilnošću, ali i izvrsnu istezljivost. Većina magnezijevih legura dobiva se lijevanjem zbog problema oštećenja tijekom kovanja ili istiskivanja. Magnezij, slično kao i aluminij, na površini stvara oksidni vatrootporni sloj, ali postupak uklanjanja je puno lakši nego kod aluminija. [17, 19]

### 3.6. Metode programiranja

Kao što je već ranije navedeno, aditivnu proizvodnju odlikuje mogućnost izrade modela u CAD modelu. No postoje i druge metode pomoću kojih se može postići proizvodnja nekog dijela, a to su:

- *On-line* programiranje
- *Off-line* programiranje

WAAM tehnologija nije orijentirana na izradu preciznih komada, velike kompliciranosti i točnosti kao npr. tehnologije na bazi praška pa nema običaj izrađivati CAD modele za jednostavne dijelove

*On-line* programiranje je proces „učenja“ robota da izvrši željeni zadatak. Tu vrstu programiranja izvršava iskusan operater tako da provodi robot od pozicije do pozicije pomoću privjeska za učenje. Uz pozicije potrebno je definirati kretanja i ostale potrebne značajke. Problem leži u postupku koji se može činiti jednostavnim, no istina je malo drugačija. Potrebno je paziti na koordinatni sustav odnosno njegovu orijentaciju da bi se izbjegnula kolizija robota s radnim prostorom te na putanju između točaka radi izbjegavanja kolizije s radnim komadom. Roboti imaju svoja ograničenja u vidu nosivosti i dohvata. Nakon završetka pisanja programa potrebna je provjera. Još jedan od nedostataka je taj što za svaku promjenu na radnom komadu treba ponoviti cijeli proces kontrole pozicija. Bez obzira na nedostatke, *on-line* programiranje je i dalje najraširenija vrsta programiranja robota. [20]

Druga metoda obavlja se na računalu i ne zahtijeva isključivanje robota iz proizvodnog procesa, što je prednost u odnosu na *on-line* programiranje. *Off-line* programiranje zasniva se na bazama podataka koje sadrže robote, pozicionere i drugu opremu. Glavne prednosti ove metode su brzina i točnost programiranja putanja robotskog manipulatora. Također, jedna od velikih prednosti je mogućnost programiranja simultanog gibanja više robotskih mehanizama unutar jednoga robotskog sustava. Postupak se sastoji od prvotne analize materijala u svrhu odabira vrste postupka zavarivanja te po kojim putanjama na radnom komadu je potrebno izvršiti zavarivanje. Simulacijom se provjerava tijek programa, analiziraju se eventualne greške i izvode se poboljšanja. Nakon odabira konačne pravilne verzije programa, on se šalje u memoriju kontrolera. [20]

### 3.7. Primjena WAAM-a

WAAM tehnologija za izgradnju koristi standardnu zavarivačku opremu pa tako njen razvoj zapravo ovisi o razvoju zavarivačke grane. Prvenstveno se misli na razvoj raznih modificiranih postupaka zavarivanja koji će omogućiti izradu kvalitetnijih, preciznijih i ispravnijih dijelova dobivenih ovom tehnologijom. Uz te karakteristike gleda se i BTF vrijednost, koja pokazuje koliko se materijala na kraju iskoristi, tj. koliko se materijala odbaci. Odbačeni materijal predstavlja gubitak, a pošto se WAAM-om izrađuju masivni dijelovi, ta vrijednost može iznositi i nekoliko kilograma za samo jedan komad.

WAAM je primjenu pronašao u raznim granama pa se tako dijelovi izrađeni ovom tehnologijom mogu pronaći u zrakoplovnoj industriji, građevinarstvu, brodogradnji i mnogim drugim granama. Primjenom širokog broja materijala i njihovih legura izrađuju se srednji i veliki dijelovi, ne prevelike složenosti.

Od prije navedena slika 16. u točki „3.5.1. Titan“ predstavlja nosač kotača zrakoplova s masom od 24 kilograma. Primjenom WAAM tehnologije uštedeno je više od 220 kilograma zahvaljujući sjajnoj BTF vrijednosti. [14]

Na slici broj 17. prikazana je izgradnja broskog propelera.



Slika 17. Izrada broskog propelera [21]

Za primjer dijelova ne prevelike složenosti može se uzeti izgradnja čeličnih šipki (slika 18.) kao armatura u betonskom zidu.



**Slika 18. Primjena čeličnih šipki u građevini [22]**

Na slici broj 19. prikazane su faze izrade projektila. Materijal koji se koristio je čelik, a postupak zavarivanja je impulsni MIG postupak kojim je ostvarena brzina taloženja od 4 kg/h te je konačna masa jednog projektila iznosila 32 kg.



**Slika 19. Faze izrade projektila [23]**

Težina izrade lopatice turbine ne predstavlja nikakav problem za WAAM tehnologiju. Zbog svoje specifične zakrivljenosti, izrada lopatice može predstavljati problem u izradi. Međutim, s mogućnošću korištenja CAD programa i robota za zavarivanje, zakrivljenost ne predstavlja prepreku. Na slici 20. prikazana je lopatica turbine nakon završetka izgradnje.





**Slika 20. Lopatica turbine [18]**

Rotor, prikazan na slici 21., konstruiran je u CAD sustavu radi ostvarivanja kompleksnije geometrije.



**Slika 21. Rotor [18]**

Na slici broj 22. prikazan je testni model krila izrađenog od aluminijske visine 0,8 metara. Ova komponenta izrađena pomoću CMT postupka zavarivanja, šuplja je do polovice svoje visine. Cilj proizvodnje bio je testirati vrijeme između puštanja u proizvodnju i prikupljanja podataka.



**Slika 22. Alumijsko krilo za testiranje [14]**

## 4. ALUMINIJ I NJEGOVE LEGURE

### 4.1. Općenito

Aluminij je nakon kisika i silicija najzastupljeniji metal u zemljinoj kori s udjelom od 8%. U prirodi se nalazi u obliku oksida i smjese oksida iz kojih se metal izdvaja skupim elektrolitičkim postupkom. U tablici broj 5. prikazana su fizikalna i mehanička svojstva aluminijske legure.

**Tablica 5. Fizikalna i mehanička svojstva aluminijske legure [24]**

| Svojstva                          | Vrijednost                   |
|-----------------------------------|------------------------------|
| Gustoća                           | 2700 kg/m <sup>3</sup>       |
| Talište                           | 660°C                        |
| Modul elastičnosti                | 69 000 N/mm <sup>2</sup>     |
| Toplinska rastezljivost           | 23,8 10 <sup>-6</sup> /K     |
| Električna vodljivost             | 36...37,5 m/Ωmm <sup>2</sup> |
| Granica razvlačenja               | 20...120 N/mm <sup>2</sup>   |
| Vlačna čvrstoća (ovisno o stanju) | 40...180 N/mm <sup>2</sup>   |
| Istezljivost (ovisno o stanju)    | 50%                          |

Tri su glavna svojstva koja određuju primjenu aluminijske legure kao inženjerskog materijala [24]:

- Povoljan omjer čvrstoće i gustoće (specifična čvrstoća). Gustoća aluminijske legure je oko trećine gustoće čelika, pa se aluminij i njegove legure prvenstveno koriste u proizvodnji zrakoplova i vozila.
- Omjer električne vodljivosti i gustoće najpovoljniji je među svim metalima, zbog toga aluminij istiskuje bakar iz upotrebe.
- Al ima veliki afinitet prema kisiku, a korozivna postojanost mu je ipak relativno velika i na njoj se zasniva široka primjena aluminijske legure.

Nelegirani se aluminij uglavnom koristi zbog niske gustoće i korozivne postojanosti. Njegova se antikorozivnost temelji na postojanju gustog nepropusnog oksidnog sloja koji se stvara na površini metala. Ukoliko se ošteti, odmah se oksidacijom nadomješta novim. Slično vrijedi i za toplinsku rastezljivost koja je dvostruka od one čelika, što se može iskoristiti kod izrade posuda i cjevovoda. Isto tako aluminij je primjenu našao u kemijskoj i prehrambenoj



industriji, izradi kuhinjskog posuđa i metalnih proizvoda široke potrošnje, graditeljstvo itd.

Aluminij s kubičnom plošno centriranom strukturom (FCC) je izvanredno toplo i hladno oblikovljiv deformiranjem. Osim što nije magnetičan, aluminij je relativno mekan s niskom vlačnom čvrstoćom pa se zbog toga većinom primjenjuje u legiranom stanju. [24]

Aluminij i njegove legure upotrebljavaju se vrlo rasprostranjeno u [25]:

- Građevinarstvu: dijelovi montažnih zgrada, elementi krovova i pročelja, pokućstvo, radijatori, ukrasni elementi
- Transportu: dijelovi putničkih vlakova, automobili, zrakoplovi, ambalaži, cisterne
- Brodogradnji: brodska nadgradnja, dimnjaci, čamci za spašavanje, brzi patrolni čamci, dijelovi jahti
- Kemijskoj i prehrambenoj industriji: destilacijske kolone, izmjenjivači, hladila, spremnici
- Elektrotehnici: kabeli, antene, radarska oprema

## 4.2. Legure

Legiranje poboljšava mehanička svojstva, ponajprije vlačnu čvrstoću i tvrdoću, te krutost, rezljivost, a može i žilavost. Najvažniji legirni elementi su bakar, magnezij, silicij, cink, mangan. Kao dodaci odnosno nečistoće u manjoj količini su prisutni željezo, krom i titan.

Svojstva pojedinih legirnih elemenata u legurama aluminija [26]:

- Magnezij (Mg) i Mangan (Mn) povećavaju čvrstoću mehanizmom očvršćivanja pomoću čvrste topivosti i poboljšava očvršćivanje deformacijom.
- Bakar (Cu) značajno povećava čvrstoću, omogućuje precipitacijsko očvršćivanje, smanjuje otpornost na koroziju, duktilnost i zavarljivost.
- Silicij (Si) povećava čvrstoću i duktilnost te utječe na viskoznost taline
- Cink (Zn) značajno povećava čvrstoću, može izazvati napetosnu koroziju.
- Željezo (Fe) povećava čvrstoću čistog aluminija, uglavnom je zaostali element.
- Krom (Cr) povećava otpornost na napetosnu koroziju.
- Nikal (Ni) poboljšava čvrstoću na povišenim temperaturama.
- Titan (Ti) i Cirkonij (Zr) se koriste za smanjenje veličine zrna.

- Litij (Li) i Skandij (Sc) značajno povećavaju čvrstoću i modul elastičnosti, omogućuju precipitacijsko očvršćivanje i smanjuju gustoću
- Olovo (Pb) i bizmut (Bi) poboljšavaju svojstva kod obrade odvajanjem čestica

U tablici 6. prikazani su glavni legirni elementi aluminijskih serija.

**Tablica 6. Glavni legirni elementi aluminijskih serija [27]**

| Serijska legura aluminija | Glavni legirni element |
|---------------------------|------------------------|
| 1XXX                      | 99% minimum aluminija  |
| 2XXX                      | Bakar                  |
| 3XXX                      | Mangan                 |
| 4XXX                      | Silicij                |
| 5XXX                      | Magnezij               |
| 6XXX                      | Magnezij i Silicij     |
| 7XXX                      | Cink                   |
| 8XXX                      | Ostali elementi        |

Legiranje znatno utječe na mehanička svojstva pa tako najtvrdje aluminijske legure imaju tvrdoću i nekoliko desetaka veću tvrdoću od najmekšeg aluminija, dok je kod granica razvlačenja razlika još i veća. [25]

Zbog korištenja aluminijskih legura serija 4XXX i 5XXX u eksperimentalnom dijelu, jedino su one obrađene u ovome radu.

#### **4.2.1. Legure aluminija sa silicijem 4XXX**

Glavni legirni element ove serije je silicij čiji sadržaj može dosezati i do 14 %, dok od ostalih legirnih elemenata sadrži još magnezij < 2 % i bakar < 1,3 %. Vlačna čvrstoća iznosi od 170 do 380 MPa. Ove legure posjeduju relativno dobru korozivnu postojanost. Svrha dodavanja silicija u aluminij je smanjivanje točke taljenja i poboljšavanje njegove fluidnosti u rastaljenom stanju. Ove karakteristike su poželjne za dodatne materijale koji se koriste kod zavarivanja i lemljenja. Posljedično, ova serija legura pretežno se nalazi kao dodatni materijal za zavarivanje. Silicij nije toplinski obradiv, međutim, brojne od tih silicijskih legura su dizajnirane tako da imaju dodatak magnezija ili bakra, što im omogućuje da odgovarajuće reagiraju na toplinsku obradu. Tipično, ove legure kao dodatni materijal se koriste isključivo kada se zavarena komponenta poslije zavarivanja podvrgava toplinskoj obradi. [27]

#### 4.2.2. Legure aluminija s magnezijem 5XXX

Osnovni legirni element je magnezij čiji se maseni udio nalazi u rasponu od 0,2 do 5,6 %, dok se od ostalih elemenata ponekad dodaje mangan i krom. Legure iz serije 5XXX imaju najveću čvrstoću (vlačna čvrstoća iznosi od 125 do 350 MPa) od legura koje se ne mogu precipitacijski očvrnuti. Ove legure posjeduju osrednja mehanička svojstva, dobro se zavaruju i imaju znatno poboljšana mehanička svojstva pri niskim temperaturama. S većim sadržajem magnezija odlično se ponašaju u morskoj atmosferi. Oblikovljivost je dobra ali opada s porastom sadržaja magnezija. Zbog dobre zavarljivosti ima široku primjenu, na primjer u brodogradnji, građevinarstvu, proizvodnji cisterni za transport, tlačnih posuda, mostova i uređaja za desalinizaciju morske vode. Aluminijske legure magnezija se zavaruju dodatnim materijalom koji se odabire nakon razmatranja magnezijevog sadržaja osnovnog materijala, kao i uvjeta aplikacije zavarene komponente. Legure u ovoj seriji s više od 3,0 % magnezija se ne preporučuju za povišene temperature iznad 65 °C zbog mogućeg senzibiliziranja i naknadne osjetljivosti na napetosnu koroziju. [27]

#### 4.3. Utjecaji na zavarljivost

Zavarljivost je sposobnost metala da se u uvjetima zavarivanja ostvari zavareni spoj, a ovisi o sadržaju legirnih elemenata i stanju legure. U primjeni aluminija i njegovih legura postoje određeni problemi kod ostvarivanja dobrog zavarenog spoja.

Aluminij ima površinsku centriranu kubičnu rešetku, nisku gustoću (2,9 puta je lakši od čelika) i dobru korozijsku otpornost zahvaljujući tankom  $Al_2O_3$  oksidnom filmu koji znatno pasivira površinu. Problem kod zavarivanja aluminija se javlja zbog oksidnog sloja koji se formira na površini u kontaktu s kisikom iz zraka. Takav tanki sloj aluminijevog oksida ( $Al_2O_3$ ) se konstantno stvara na površini legure, a njegova visoka temperatura taljenja (2050 °C) je u odnosu na nisku temperaturu taljenja aluminija (oko 660 °C) problem jer se ne otapa u rastaljenom aluminiju i stoga pri zavarivanju i lemljenju mora biti uklonjen s površine jer može ući u talinu kao nemetalni uključak. To se rješava četkanjem površine prije zavarivanja s četkom od nehrđajućeg čelika ili još elektrolučnim postupcima zavarivanja u inertnoj atmosferi te kemijskim nagrivanjem osnovnog i dodatnog materijala. [19]

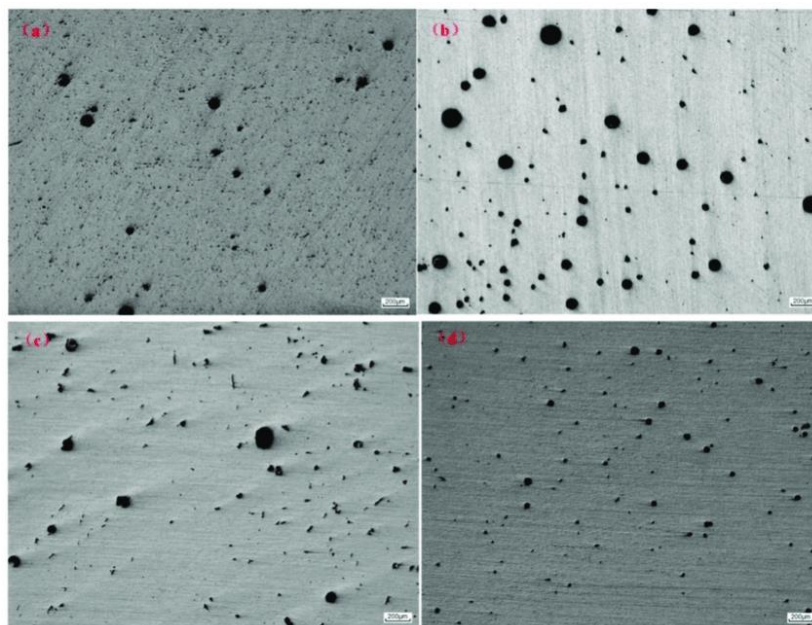
Još jedan problem kod zavarivanja je velika toplinska vodljivost (četiri puta veća nego kod običnog čelika) što znači da se brzo hladi i zagrijava. To uvjetuje potrebnom predgrijavanju te zahtijeva zavarivanje jakim izvorima struje. Predgrijavanje nije potrebno za zavarivanje

tankih limova, ali je nužno kod većih debljina zbog intenzivnog odvođenja topline. Problem kod predgrijavanja je taj da toplinskom obradom Al-legure očvršćuju te predgrijavanje može dovesti do omekšavanja osnovnog materijala. Stoga temperatura predgrijavanja ne smije biti viša od temperature umjetnog starenja. [19]

Veliki koeficijent toplinskog istezanja uzrokuje veća istezanja i deformacije pri hlađenju pa je moguća pojava pukotina zbog stezanja. Upravo su pukotine jedan od najvećih problema u zavarivanju aluminija i njegovih legura. Naime mogu se pojaviti u zoni taljenja, a ponekad u ZUT-u. Osnovni uzrok nastajanja pukotina je postojanje područja termalne krhkosti. Za sprječavanje toplih pukotina koriste se dodatni materijali s dodatkom titana, cirkonija ili kroma. Isto tako predgrijavanje i pravilan redoslijed zavarivanja mogu umanjiti pojavu toplih pukotina. [19, 28]

Uz pukotine javlja se i poroznost za koju se smatra da potječe od vodika apsorbiranog u talinu metala zavara tijekom zavarivanja. Vodik potječe iz vlage i nečistoća na površini mjesta zavarivanja i žice dodatnog materijala. [25]

Na slici 23. prikazane su pore u aluminiju pri korištenju WAAM tehnologije.



**Slika 23. Prikaz pora u aluminiju korištenjem WAAM-a [29]**

Nadalje pravilan izbor dodatnog materijala ima veliku važnost u postizanju odgovarajuće kvalitete zavara. Glavno pravilo pri odabiru dodatnog materijala je biranje dodatnog materijala iste vrste kao što je osnovni materijal uz nešto veći udio istih legirnih elemenata.

Drugo pravilo je da se ne smije upotrijebiti dodatni materijal od čistog aluminija jer će u metalu zavara nastati pukotina. [30]

#### 4.4. Postupci zavarivanja

Kod zavarivanja aluminija i njegovih legura mogu se koristiti svi postupci, no ipak MIG i TIG postupci imaju prednost nad drugim postupcima. Ručno elektrolučno zavarivanje (REL) najčešće se koristi pri reparaturnom zavarivanju, (EPP) slabo je primjenjiv, jedino uz iznimku za deblje materijale. [30]

MIG i TIG spadaju u grupu postupaka koji koriste inertne plinove za zaštitu procesa zavarivanja. Inertni plinovi su Ar i He te njihove mješavine, svaki plin ima neka svoja svojstva kojima mijenja određene dijelove i parametre procesa.

Svrha zaštitnog plina je da osigura odgovarajuću atmosferu za zaštitu vrha elektrode i taline od prodiranja kisika i drugih štetnih plinova u područje taljenja, što bi kasnije moglo uzrokovati neku grešku u zavarenom spoju. Zaštitni plin dovodi se iz boce u pištolj te se direktno kroz sapnicu upuhuje u zonu taljenja.

U tablici 7. prikazan je utjecaj inertnih plinova na karakteristike zavarivanja.

**Tablica 7. Utjecaj zaštitnih plinova inertne atmosfere na karakteristike zavarivanja [31]**

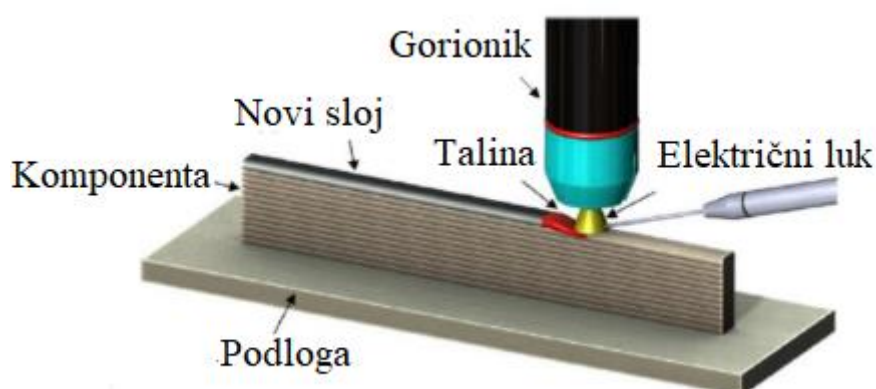
| Karakteristika     | Ar        | Mješavina Ar/He        | He                      |
|--------------------|-----------|------------------------|-------------------------|
| Brzina zavarivanja | Smanjena  | Veća nego kod 100% Ar  | Veća                    |
| Penetracija        | Smanjena  | Veća nego kod 100% Ar  | Povećana                |
| Čišćenje oksida    | Dobro     | Kao kod 100% Ar        | Loše                    |
| Uspostava luka     | Laka      | Bolja nego kod 100% He | Otežana                 |
| Stabilnost luka    | Dobra     | Bolja nego kod 100% He | Niža pri nižim strujama |
| Oblik luka         | Fokusiran | Uži nego kod 100% He   | Širi                    |
| Napon luka         | Manji     | Srednji                | Veći                    |
| Protok             | Manji     | Veći nego kod 100% Ar  | Povećan                 |
| Cijena             | Niža      | Veća nego kod 100% Ar  | Veća nego kod 100% Ar   |

WAAM se kategorizira u skupinu izravnog taloženja energije i definira se kao kombinacija električnog luka i žice kao dodatnog materijala [17]. Sustav se sastoji od izvora struje, sustava dovoda žice, radnog stola, robotskog sustava te ostala oprema kao što je zaštitni plin, sustav za predgrijavanje ili hlađenje. Računalno sučelje koristi se za programiranje procesa i skupljanje podataka, dok se privjesak za učenje koristi za upravljanje robotom i postavljanje parametara. Ispravno podešavanje parametara je ključni dio cjelokupnog procesa, a ovisi o korištenom postupku zavarivanja. Primjenjivi postupci zavarivanja u WAAM tehnologiji su:

- MIG/MAG
- TIG
- Plazma

U WAAM tehnologiji najčešće se koristi MIG/MAG postupak zavarivanja. Prednost leži u tome što je žica koaksijalna s gorionikom te osigurava lagano generiranje putanje. Dok je MIG/MAG postupak primjenjiviji za čelike i aluminij, postoji problem kod zavarivanja titana zbog lutanja luka što čini TIG postupak prigodniji. Problem kod TIG-a je vanjsko dovođenje dodatnog materijala, odnosno nezavisno je od gorionika. Naime da bi smo dobili dobru kvalitetu, žicu je potrebno dodavati uvijek s iste strane. To znači da se gorionik mora rotirati što uvelike otežava programiranje robota. [7]

Na slici broj 24. prikazana je upotreba zavarivanja u aditivnoj proizvodnji zida.



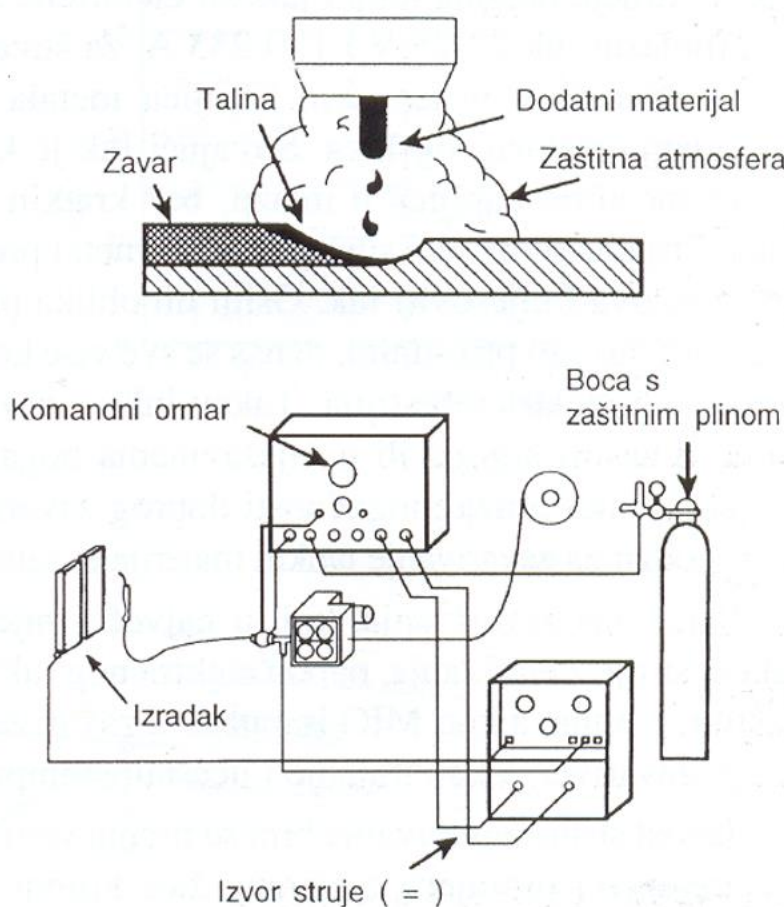
**Slika 24. Primjena WAAM tehnologije u izradi zida [17]**

Ako se u zavarivanju koriste tanji materijali, preporučuje se ukrućivanje radnog komada radi sprječavanja deformacija, dok kod debljih materijala preporučuje se predgrijavanje. [25]

#### 4.4.1. Zavarivanje taljivom elektrodom u atmosferi inertnih plinova (MIG)

Elektrolučno zavarivanje metalnom taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnih (*Metal inert gas* - MIG) plinova spada u postupke zavarivanja taljenjem i jedan je od najzastupljenijih postupaka zavarivanja. Žica dodatnog materijala predstavlja elektrodu, koja se onda zagrijavanjem tali i popunjava mjesta zavara. Ukratko postupak i oprema je u cijelosti ista kao i kod MAG postupka uz drugačiju zaštitnu atmosferu.

Shema MIG/MAG postupka prikazana je na slici 25.



Slika 25. Shema MIG/MAG postupka zavarivanja [32]

Postupak može biti automatski, poluautomatski (dodavanje žice je mehanizirano, dok je vođenje pištolja ručno) i robotiziran. U današnje vrijeme najkorišteniji je poluautomatski.

Danas se radi postizanja što bolje regulacije parametara zavarivanja mnogo radi na području razvoja izvora struje zavarivanja. Razvijeni su tiristorski, a u novije vrijeme i tranzistorski izvori struje. Tranzistorski izvori struje su u prednosti zbog jednostavnije regulacije parametra zavarivanja, tako da su već razvijeni sustavi kod kojih su na osnovi jednog, automatski određeni ostali parametri zavarivanja (sustavi sinergijskog upravljanja). [19]

Prednosti MIG postupka [32]:

- Velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala
- Zavarivanje u svim položajima, i na terenu i u radionici
- Velika učinkovitost i proizvodnost
- Široki raspon debljina
- Pogodan za automatizaciju

Nedostaci MIG postupka [32]:

- Veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja
- Štrcanje kod zavarivanja kratkim spojem
- Složeni uređaj (dovođenje žice, automatska regulacija)

#### 4.4.1.1. Vrste prijenosa materijala električnim lukom

Električni luk se uspostavlja između elektrodne žice spojene na „+“ pol i osnovnog materijala spojenog na „-“ pol.

Postoji nekoliko vrsta prijenosa metala električnim lukom, a ovisno o jakosti struje i naponu električnog luka dijeli se na četiri načina [19]:

- Kratki luk
- Štrcajući luk
- Prijelazni
- Impulsni

Kratki luk upotrebljava se pri niskim strujama (50 – 170 A) i malim promjerima žica (0,8 – 1,2 mm), a zavarivanje se izvodi kratkim spojevima uz prekidanje električnog luka. Naime zbog porasta struje zavarivanja metalna kap na vrhu elektrode se povećava do trenutka kada kap ne dotakne rastaljeni metal. U tom trenutku javlja se kratki spoj, električni luk nakratko se prekida, napon pada na nulu, a struja poraste u svrhu odvajanja kapljice. Nakon odvajanja luk se ponovno uspostavlja, a ciklus počinje ispočetka i tako 150 – 250 puta u sekundi [19]. Ovakav princip osigurava mali unos energije pa je moguće zavarivanje tankih materijala uz preporuku primjene izvora što ravnije karakteristike i namještanja odgovarajućeg induktiviteta. [30]



Prijenos materijala štrcajućim lukom karakteriziraju visoke struje i naponi. Pri velikim strujama i povišenim naponima dolazi do znažnog „pinch-efekta“ koji dovodi do odvajanja mlaza finih kapljica koje idu u kupku. Kapljice su sitne te u mlazu omogućuju stalno održavanje električnog luka. Budući da je gustoća struje veća od  $300 \text{ A/mm}^2$ , postiže se visok učinak taljenja i ekonomičnost. Zbog velikih struja koriste se žice većeg promjera (1,2 – 2 mm). Isto tako veći je unos topline, a zbog velike gustoće struje veća je i penetracija. Zbog takvih karakteristika štrcajući prijenos idealan je za deblje materijale, ali samo u vodoravnom položaju. [19]

Prijelazni ili mješoviti luk prenosi se djelomično kratkim spojevima, a djelomično prolazom kapi kroz luk (kao kod štrcajućeg prijenosa). [19]

Prijenos metala pomoću gore navedenih načina spada u tzv. prirodni prijenos materijala. Danas se sve više koristi prijenos metala djelovanjem impulsnih struja. Za takav princip prijenosa karakteristični su strujni impulsi određene frekvencije i trajanja. Pojednostavljeno prikazano, proces održavanja električnog luka i stvaranja kapljice materijala isti je kao kod prirodnog prijenosa materijala, sve dok se pomoću posebnog uređaja na izvoru uključuje povećana jakost struje koja završava oblikovanje kapljice i gura ju u talinu. Opisani ciklus ponavlja se više puta u sekundi. Na takav način lijepo se zavaruju tanki materijali i provaruju korijeni te se izvodi zavarivanje u prisilnim položajima što predstavlja veliku prednost pogotovo kod zavarivanja aluminijskih materijala koji imaju sklonost očvršćivanju. Impulsni način u električnom luku ostvariv je jedino u atmosferi argona ili mješavinama bogatim argonom. Stabilan luk i pri malim strujama, jednoličan zavar i smanjenje prskanja samo su neke od prednosti. [19, 30]

#### 4.4.1.2. Izvedbe MIG/MAG postupka

Zbog svoje široke primjenjivosti i velikog spektra mogućnosti MIG/MAG postupci najzastupljeniji su postupci u zavarivanju. Zbog tog razloga počeli su se tražiti neki novi zahtjevi za poboljšanje postupka (povećanje produktivnosti, smanjenje deformacija i prskanja, kontroliraniji unos topline, uvođenje zahtjevnijih vrsta osnovnih materijala). Ti zahtjevi rezultirali su pojavom nekih novih modifikacija MIG/MAG postupka. Pa tako postoje tri glavna područja prijenosa metala kod elektrolučnog zavarivanja [33]:

- Prirodni (prijenos kratkim spojevima, štrcajući i prijelazni)
- Kontrolirani (impulsni)
- Modificirani

Suvremeni postupci odlikuju se modificiranim načinima prijenosa metala kod kojih je uvijek osnova kratki spoj, štrcajući luk i impulsna struja. U današnje vrijeme u praksi postoji dvadesetak postupaka MAG zavarivanja koji koriste takve modificirane prijenose, a kod većine je glavna karakteristika niski unos topline. Neki od takvih postupaka su [33]:

- STT – Surface Tension Transfer
- FastROOT
- AC MIG – Alternating Current MIG
- CMT – Cold Metal Transfer

STT postupak koristi mehanizam površinske napetosti za ostvarivanje fine regulacije. Porast struje u kratkom spoju zaustavlja se kada se ostvare uvjeti za prijenos rastaljenog metala samo uz djelovanje površinske napetosti. Izbjegavanjem porasta struje eliminira se rasprskavanje materijala, a nakon odvajanja kapljice slijedi novi impuls koji zagrijava vrh žice i formira novu kapljicu. Rezultat ovog modificiranog postupka je nizak unos energije uz eliminiranje štrcanja. Zbog toga glavna primjena mu je zavarivanje korijenskog prolaza, kod pripreme s većim smaknućem i zavarivanje tankih materijala, najčešće nelegiranog i visokolegiranog čelika, legura nikla itd. [33]

FastROOT zasniva se na prijenosu kratkim spojevima kao i većina ostalih modificiranih postupaka s ciljem sniženog unosa topline. Naime ovaj postupak je kombinacija struje kratkog spoja i sekundarnog strujnog pulsa. Taj sekundarni puls zagrijava osnovni materijal i vrh žice kao priprema za novi ciklus u kojem se onda kratkim spojem odvajaju kapljica. Za ovakav moderni prijenos metala izrazito je bitna brza regulacija struje i napona u svakom trenutku za eliminiranje štrcanja. Kao i STT postupak, prvenstveno se primjenjuje za tanke limove i zavarivanje korijenskog prola. [33]

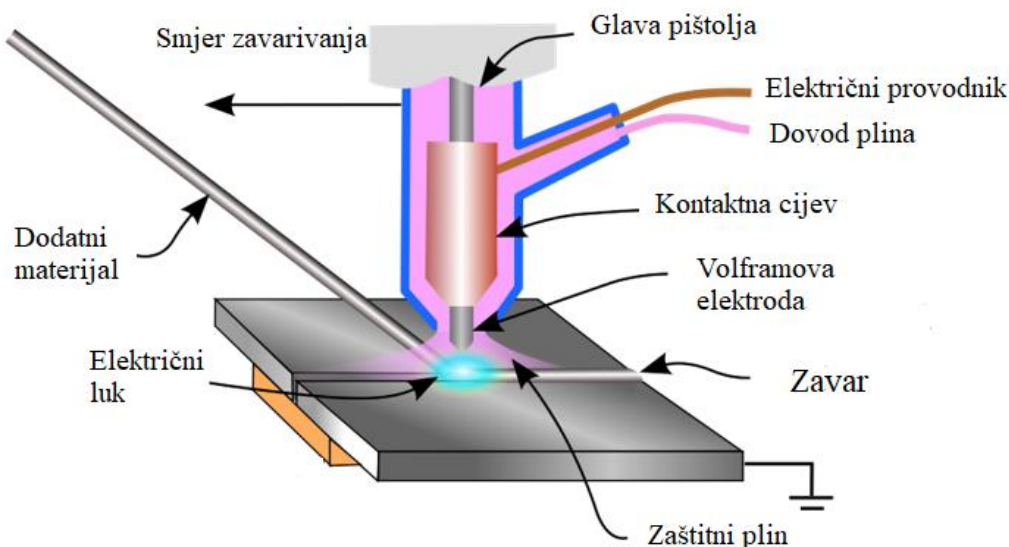
Primjenom promjenjivog polariteta na žici (AC MIG) postiže se precizna kontrola distribucije topline u električnom luku. Iako inače koriste pozitivan polaritet, MIG/MAG postupcima negativan polaritet daje veću brzinu taljenja i veći depozit uz manju penetraciju. Ipak složenost i kompleksnost izvora struje predstavljaju nedostatak postupka. [33]

Ovo su samo neki od modernih MIG/MAG postupaka. Od poznatijih tu su još Cold Arc, Force Arc, Cold MIG i mnogi drugi. Jedan od najpoznatijih i najprimjenjivijih je CMT postupak koji će detaljno biti razrađen u sljedećem poglavlju.

#### 4.4.2. Zavarivanje netaljivom elektrodom u atmosferi inertnih plinova (TIG)

Kod zavarivanja TIG postupkom električni luk se uspostavlja između radnog komada i netaljive volframove elektrode u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (Ar, He). Inače zavarivanje je moguće bez dodatnog materijala, ali primjenom u WAAM tehnologiji ključno je dodavanje žice (inače nema taloženja) koje je mehanizirano.

Shema TIG zavarivanja prikazana je na slici 26.



Slika 26. Shema TIG zavarivanja [34]

Za uspostavljanje električnog luka zaslužna je netaljiva volframova elektroda koja se troši uslijed erozije vrha i mogućim slučajnim kontaktom s radnim komadom. Trajnost elektrode je prosječno oko 30 sati, što je dovoljno dugo da se smatra netaljivom. Izrađuje se od čistog volframa ili s malim udjelima dodataka većinom torijevog ili cirkonijevog oksida (1 do 2 %), ali mogu i neki drugi legirni elementi. Svrha ovih legirnih elemenata prvenstveno je lakše uspostavljanje luka i njegova stabilnost tijekom postupka zavarivanja. [35]

Prednosti TIG postupka su [30]:

- Koncentriranost električnog luka, smanjen ZUT
- Nema prskanja ni troske
- Minimalna količina štetnih plinova
- Zavarivanje širokog spektra materijala
- Zavarivanje u svim položajima

- Mogućnost zavarivanja tankih materijala
- Odličan izgled zavarenog spoja

Nedostaci TIG postupka su [30]:

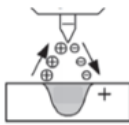
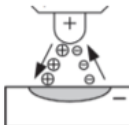
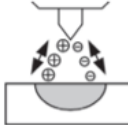
- Mala brzina zavarivanja
- Mali depozit
- Neekonomičnost u zavarivanju debljih (više od 6 mm) materijala
- Viša cijena opreme
- Precizna priprema spoja

Postoje dvije izvedbe TIG postupka. Jedno je ručno TIG zavarivanje gdje se koriste izvori sa strmom padajućom statičkom karakteristikom (CC – *Constant current*) s ciljem osiguravanja približno konstantne struje, neovisno o promjeni duljine luka zbog pomicanja ruke zavarivača. S druge strane kod mehaniziranog zavarivanja mogu se koristiti i izvori s ravnom statičkom karakteristikom (CV – *Constant voltage*), ali to su rjeđi primjeri. [19]

#### 4.4.2.1. Vrste električne struje kod TIG postupka

Od vrsti struje TIG nudi primjenu istosmjerne (elektroda ili na minus ili plus polu) i izmjenične struje. Kod primjene istosmjerne struje s elektrodom na minus polu, elektroni se gibaju od negativne elektrode na pozitivni radni komad, a ioni u suprotnom smjeru. Elektroni imaju znatno veću kinetičku energiju od iona što rezultira većim zagrijavanjem radnog komada od elektrode. Zbog toga elektroda može biti zašiljena što dovodi do veće penetracije. Električni luk s elektrodom na plus polu dovodi do većeg trošenja elektrode te je potrebna elektroda većeg promjera. Većim promjerom a manjom strujom električni luk je nestabilan, s manjom penetracijom, ali i dobrom sposobnosti uklanjanja oksida. Izmjenična struja mijenja polaritet te time preuzima dobro protaljivanje minus pola i dobro razaranje sloja oksida plus pola. Samo se laki metali (aluminij, magnezij i njihove legure) zavaruju izmjeničnom strujom radi razaranja tanke, ali teško taljive oksidne prevlake koja se javlja na tim materijalima. Postavljeni su veliki zahtjevi prema kvaliteti, stanju i čistoći u pripremi zavarenog spoja. [30] U tablici 8. prikazane su karakteristike TIG postupka ovisno o vrsti struje i polaritetu.

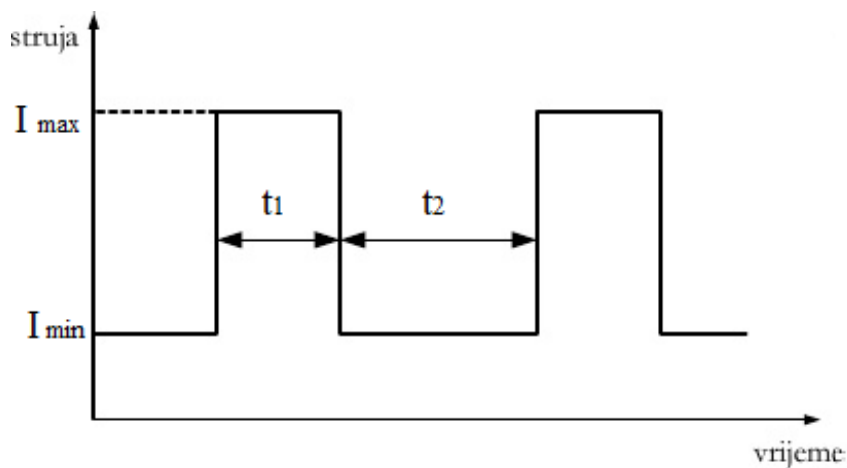
**Tablica 8. Karakteristike TIG postupka ovisno o vrsti struje i polaritetu [31]**

| Vrste struje       | DC                                                                                | DC                                                                                | AC                                                                                  |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Polaritet          | -                                                                                 | +                                                                                 |                                                                                     |
| Shema              |  |  |  |
| Raspodjela topline | 1/3 na elektrodu                                                                  | 2/3 na elektrodu                                                                  | 1/2 na elektrodu                                                                    |
|                    | 2/3 na materijal                                                                  | 1/3 na materijal                                                                  | 1/2 na materijal                                                                    |
| Penetracija        | Uska, duboka                                                                      | Plitka, široka                                                                    | Srednje široka, srednje duboka                                                      |

#### 4.4.2.2. Izvori struje

Kod TIG postupka izbjegava se uspostavljanje električnog luka kratkim spojem. Razlog tome je što se kratkim spojem oštećuje vrh elektrode pa dolazi do smanjenja stabilnosti luka. Drugi razlog je moguća pojava uključaka volframa u zavaru što može imati negativne posljedice po mehanička svojstva spoja. U novije doba se proizvode i primjenjuju TIG uređaji kod kojih je moguće ostvariti impulsne struje. Struja se kreće u rasponu od maksimalne struje koja tali materijal do minimalne koja održava stabilan električni luk. [35]

Na slici 27. prikazana je ovisnost struje o vremenu kod TIG impulsnog zavarivanja.



**Slika 27. Ovisnost struje o vremenu kod TIG impulsnog zavarivanja [36]**

U intervalu  $t_1$  prolazi struja veće jakosti ( $I_{max}$ ) kojom se tali i protaljuje, dok je intervalu  $t_2$  vrijednost osnovne struje manja s ciljem skrućivanja pretaljenog mjesta, ali dovoljno opet ne dovoljno niska struja koja dopušta hlađenje. [30]

Prednost ovog postupka je stabilniji električni luk i precizna kontrola penetracije uz niski unos energije i smanjenje deformacije pa je idealan za zavarivanje tankih limova.

## 5. CMT POSTUPAK

CMT je modificirani MIG/MAG postupak zavarivanja temeljen na prijenosu materijala kratkim spojevima. Ovaj revolucionarni postupak prvi je počeo primjenjivati povratno gibanje žice te otvara nova područja primjene, dok su ograničenja prisutna kod zavarivanja u zaštitnoj atmosferi (MIG/MAG) su smanjena.

Krajem prošlog stoljeća austrijska firma Fronius započela je istraživati mogućnost zavarivanja aluminija i čelika. Kriterij uspjeha bio je izbjeći miješanje dva materijala, odnosno aluminij se morao rastaliti, a u istom trenutku čelik je morao ostati u krutom stanju. Da bi se postigao ovakav efekt, MIG/MAG postupak morao se provoditi uz vrlo malu energetska razinu. [37]

Na slici broj 28 prikazane su dvije čelične ploče spojene rastaljenim aluminijem.



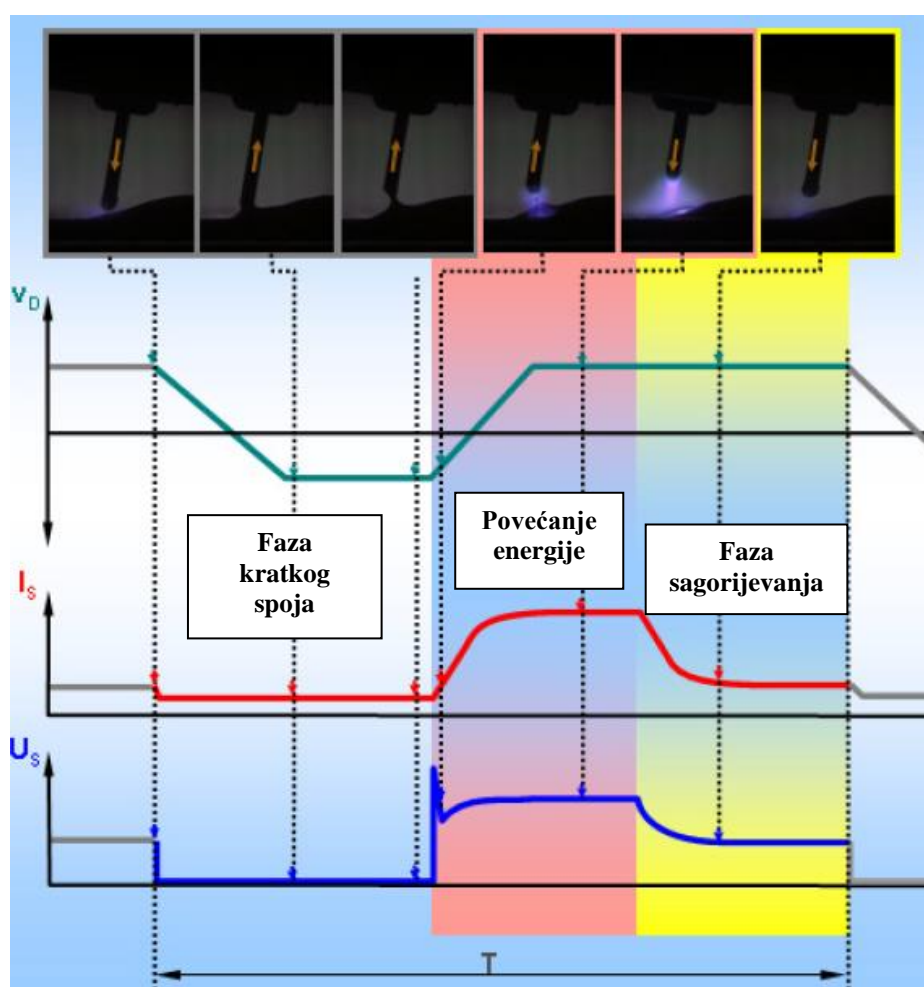
**Slika 28. Spoj čelika i aluminija [38]**

Temeljem uspješnih istraživanja spajanja čeličnih ploča s aluminijem, 2002. godine počinje razvoj i primjena CMT postupka čiji je glavni cilj bio razvoj opreme za zavarivanje pogodne za industrijsku primjenu. Ovaj postupak karakterizira odvajanje kapljice koje se odvija u uvjetima jako niskog unosa topline što rezultira i nižom temperaturom taline. Navedena niža temperatura predstavlja slovo „C“ u skraćenici procesa (Cold = hladno) te predstavlja relativan izraz, jer iako je prisutna dovoljno visoka temperatura da rastali dodatni materijal, sve zone zavarivanja su hladnije u odnosu na ostale postupke zavarivanja električnim lukom. [39]

### 5.1. Princip djelovanja i karakteristike

Kao što je u prijašnjoj točki napisano, prijenos materijala ostvaruje se kratkim spojevima koje karakteriziraju niska struja i napon odnosno mali unos topline. Najvažnija razlika CMT-a u odnosu na konvencionalni postupak je potpuna digitalna kontrola zavarivačkog procesa. [39] Naime princip rada temelji se na prepoznavanju trenutka pojave kratkog spoja. Žica se kreće prema radnom komadu dok ne dođe do kratkog spoja pri čemu uređaj reagira i povlači žicu dodatnog materijala iz taline. Takvo djelovanje pomaže pri odvajanju kapljice i rezultira niskim unosom struje, a postupak se događa i do 70 puta u sekundi (za neke i više).

Na slici 29. prikazani su ciklus i dinamička karakteristika CMT postupka.

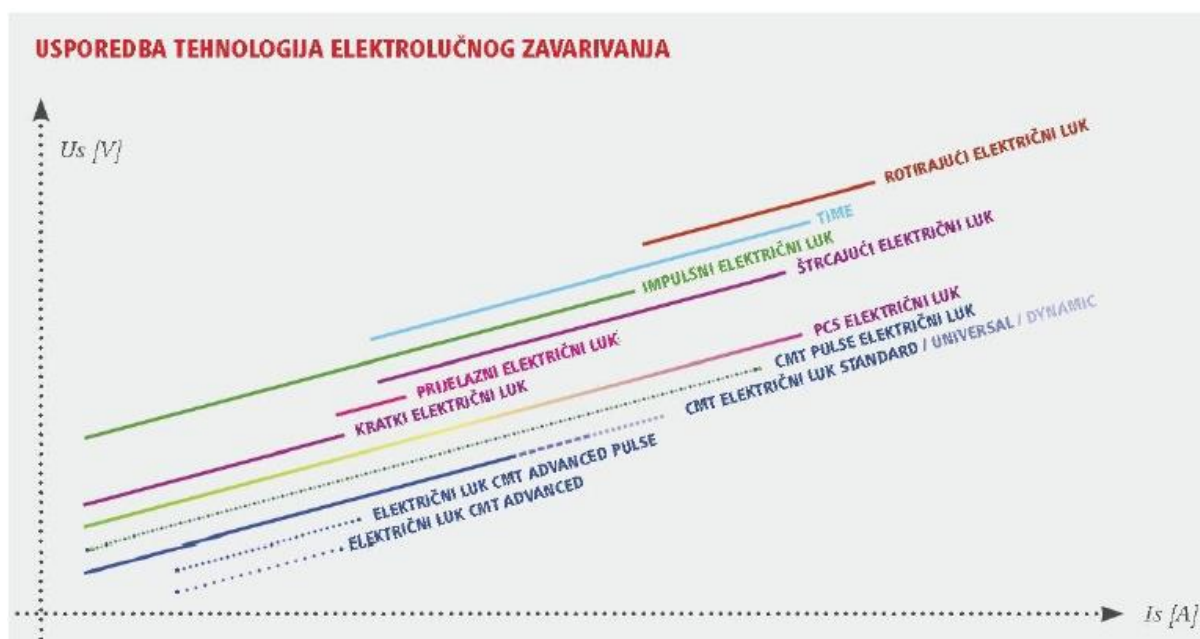


Slika 29. Ciklus i dinamička karakteristika CMT postupka [41]

Iznos struje za vrijeme kratkog spoja izrazito je nizak, a put povrata žice je kontroliran što rezultira zavarivanjem bez prskotina. Dakle, nema ni gubitka materijala ni naknadne obrade površine, što dovodi do smanjenja vremena obrade i veće produktivnosti. Sljedeća prednost

CMT procesa u odnosu na ostale načine prijenosa metala je idealna duljine električnog luka. Općenito kod MIG/MAG procesa duljina luka se određuje pomoću napona. Problem kod takvog pristupa je što napon ovisi o raznim površinskim uvjetima radnog komada koji mogu poremetiti kontrolu duljine luka. Kod CMT postupka žica dodatnog materijala kreće se prema radnom komadu do pojave kratkog spoja, nakon čega se povlači natrag. To znači da je duljina luka produkt brzine i vremena, odnosno prilagođena je nakon svakog kratkog spoja. Treća prednost je mogućnost premošćivanja velikog zazora između materijala, što je bio veliki problem kod zavarivanja tankih limova velikog zazora koji su se rastalili prije nego bi zazor bio zatvoren. [42]

Uz mnoge prednosti dolaze i neki nedostaci. Prije svega, postupak je ograničen na tanke materijale maksimalne debljine 3 do 4 mm. Također, ručni CMT postupak je zahtjevniji za zavarivača zbog veličine i težine nužno potrebnog izmjeničnog motora, a samim time i gorionika. [39]



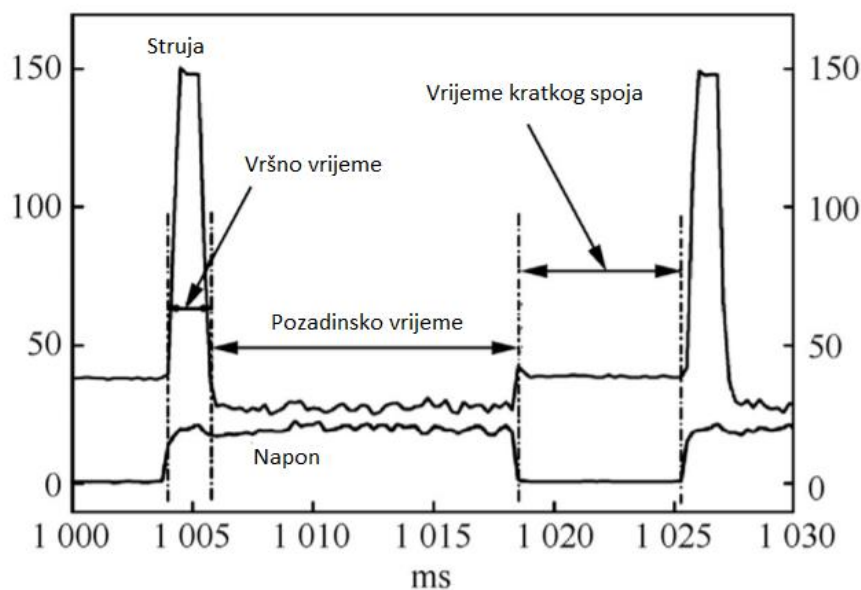
Slika 30. Dijagram odnosa napona i struje [43]

Na gornjoj slici (slika 30.) prikazano je još jedno ograničenje postupka. CMT nije moguć pri visokim iznosima struje jer ne dolazi do stvaranja kratkog spoja. Također dijagram pokazuje da je unos topline u odnosu na ostale konvencionalne postupke u tom području parametara zavarivanja znatno manji.



Analiza valnog oblika struje i napona bitna je za proučavanje raspodjele energije različitih faza u procesu odvajanja kapljice s vrha žice dodatnog materijala. Taj ciklus, prikazan na slici 31, podijeljen je u tri faze [44]:

1. Faza vršne struje
2. Faza pozadinske struje
3. Faza kratkog spoja

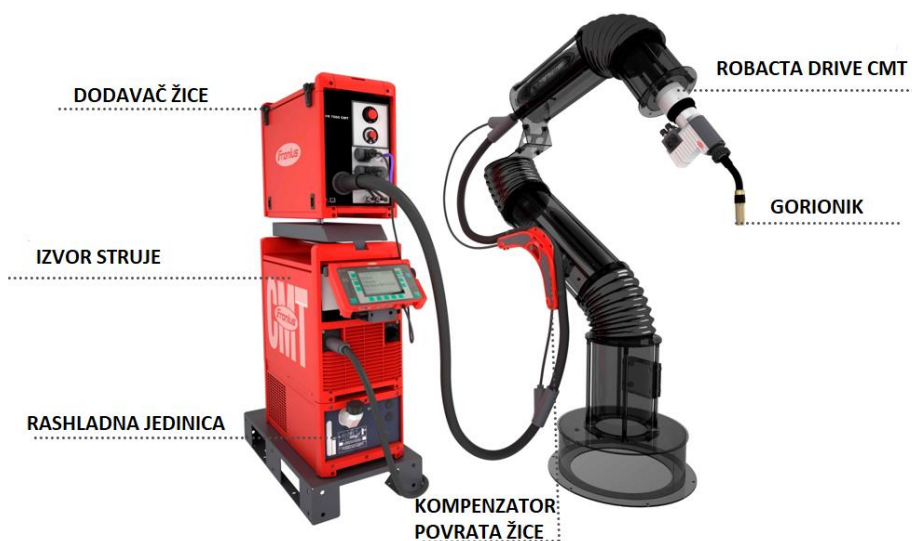


**Slika 31. Valni oblik struje i napona CMT postupka [44]**

Kao što je prikazano slici 31., fazu vršne struje karakterizira konstantni napon s visokom vršnom strujom. Ta struja uzrokuje lakše paljenje električnog luka te je odgovorna za zagrijavanje dodatnog materijala od kojeg će se kasnije formirati kapljica. Ulaskom u sljedeću fazu struja opada za znatan iznos, a razlog tome je sprječavanje grubog odvajanja kapljice. Za razliku od struje, napon je nešto veći u odnosu na početnu fazu. Ta faza pozadinske struje traje sve do pojave kratkog spoja. Pojavom kratkog spoja ciklus ulazi u završnu fazu (faza kratkog spoja) u kojoj je napon sveden na nulu. [44]

## 5.2. Oprema

Tvrtka Fronius razvila je opremu za primjenu CMT postupka. Tako danas postoji opcija za korištenje ručnog (manualnog) te robotiziranog i automatiziranog zavarivanja. Cijeli sustav je potpuno digitaliziran. Na slici 32. prikazan je kompletni sustav.



Slika 32. Sustav za automatizirano CMT zavarivanje [45]

Kao izvor struje koristi se digitaliziran, mikroprocesorski upravljani i digitalno regulirani inverterski izvor struje za zavarivanje pod zaštitom plinova. Modeli za primjenu su TPS 3200, 4000, 5000 CMT. Izvor napajanja ima procesore visokih performansi što omogućuje vrlo brzu razmjenu podataka. To je ključno za precizno dovođenje žice dodatnog materijala, a time i visoku stabilnost procesa. [45]

U tablici 9. prikazane su karakteristike pojedinih CMT izvora.

Tablica 9. Karakteristike CMT izvora struje [45]

| Parametar                     | TPS 3200 CMT | TPS 4000 CMT | TPS 5000 CMT |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Mrežni napon [V]              | 3x400        | 3x400        | 3x400        |
| Frekvencija [Hz]              | 50/60        | 50/60        | 50/60        |
| Iskoristivost [%]             | 91           | 88           | 90           |
| Raspon struje zavarivanja [A] | 3-320        | 3-400        | 3-500        |
| Intermitencija 40% [A]        | 320          | 400          | 500          |
| Intermitencija 100% [A]       | 220          | 320          | 360          |
| Napon praznog hoda [V]        | 65           | 70           | 70           |
| Radni napon [V]               | 14,2-30      | 14,2-34      | 14,2-39      |
| Težina [kg]                   | 35,6         | 35,2         | 35,6         |

Robacta Drive CMT (slika 33.) predstavlja pištolj za zavarivanje koji svojim kompaktnim dimenzijama omogućava lagan pristup teže dostupnim mjestima, a svojom malom težinom za uporabu na robotu omogućava veće brzine kretanja. Natražno gibanje žice osigurava posebno konstruirani „push-pull“ pištolj koji sadrži izmjenični servo motor. [45]



Slika 33. Robacta Drive CMT [45]

Zbog pokreta žice unatrag, u paketu mora biti osiguran međuspremnik žice „CMT-banana“ radi sprječavanja poteškoća u dodavanju žice tijekom zavarivanja. Ovaj kompenzator povrata žice služi za skladištenje žice, a digitalni procesi brinu se o tome da se kompenzator nikad ne napuni do kraja. [37]

Kod ručnog zavarivanja većina opreme ostaje ista osim što se digitalna jedinica za upravljanje zamijenila zavarivačem, a automatski pištolj zamijenjen ručnim.

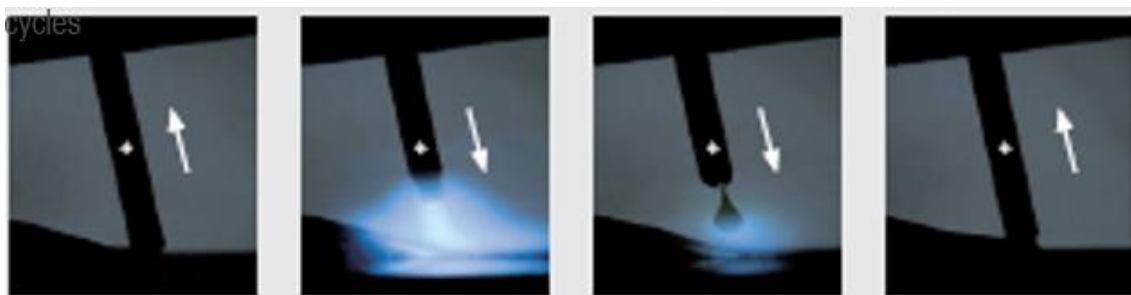
### 5.3. Izvedbe CMT postupka

Na početku razvoja CMT-a naglasak je bio na određivanju optimiziranog gibanja žice, ali Fronius nije stao na tome pa je razvio nekoliko izvedbi CMT uz standardni/konvencionalni postupak.

#### 5.3.1. CMT Pulse

Kako je CMT „hladan“ postupak, u nekim primjenama poželjno je povećati unos topline radi postizanja zavara najbolje kvalitete. Tako je moguće spojiti CMT postupak i impulsno zavarivanje. Takav postupak omogućava različite kombinacije između gibanja žice i impulsnih načina rada u cilju optimiziranja značajki zavarivanja za najzahtjevnije primjene. [37]

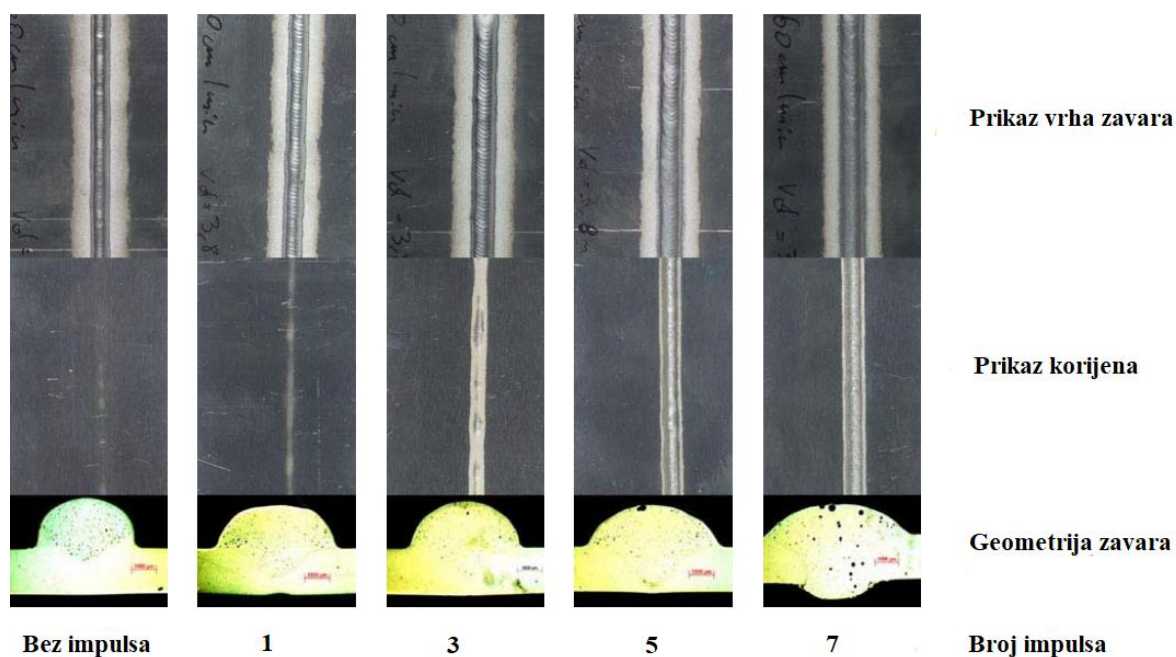
Na slici broj 34. prikazan je ciklus CMT Pulse postupka.



Slika 34. Ciklus CMT pulse postupka [40]

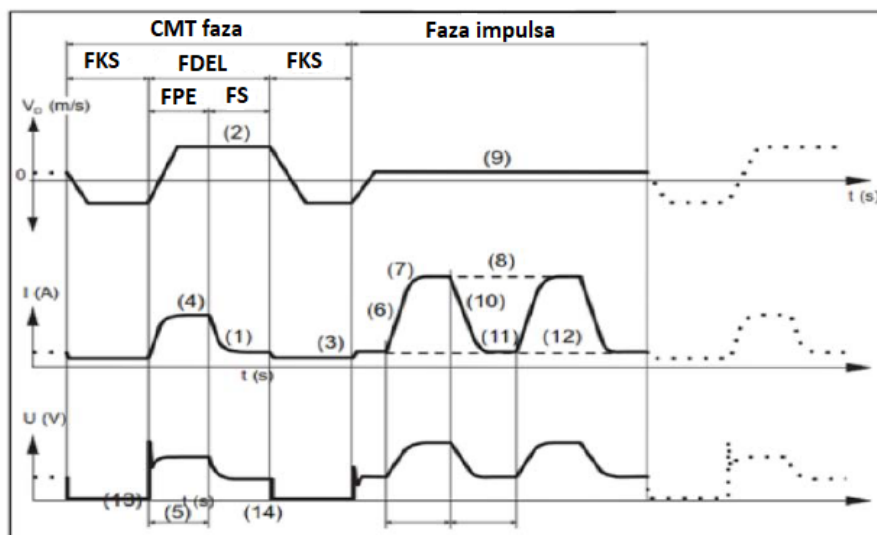
Ovaj postupak se uglavnom koristi pri zavarivanju aluminija. Za postupak prevlačenja ne preporučuje se jer je unos topline velik što utječe razrjeđivanje i sastav premaza. [40]

Broj impulsa po ciklusu utjecat će na izgled zavara. S porastom broja impulsa povećat će se širina te dobiti na dubini penetracije, kao što je prikazano na slici 35.



Slika 35. Izgled zavara ovisno o broju impulsa [45]

Nakon faze kratkog spoja, slijedi faza impulsa. Impuls karakterizira skokovita promjena iz minimalne i maksimalnu jačinu struje i obrnuto. Takva skokovita karakteristika uočljiva je na slici 36.



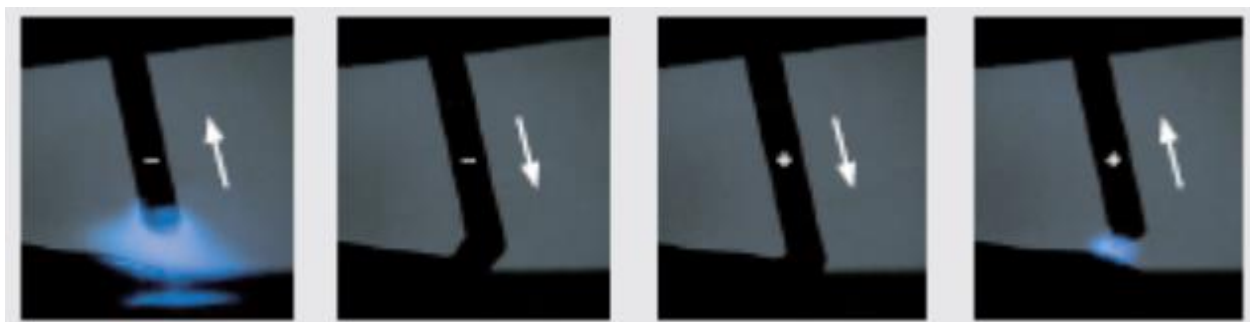
**FKS** = Faza kratkog spoja  
**FPE** = Faza povećanja energije  
**FS** = Faza sagorjevanja  
**FDEL** = Faza djelovanja električnog luka

Slika 36. Dinamička karakteristika impulsnog CMT postupka [40]

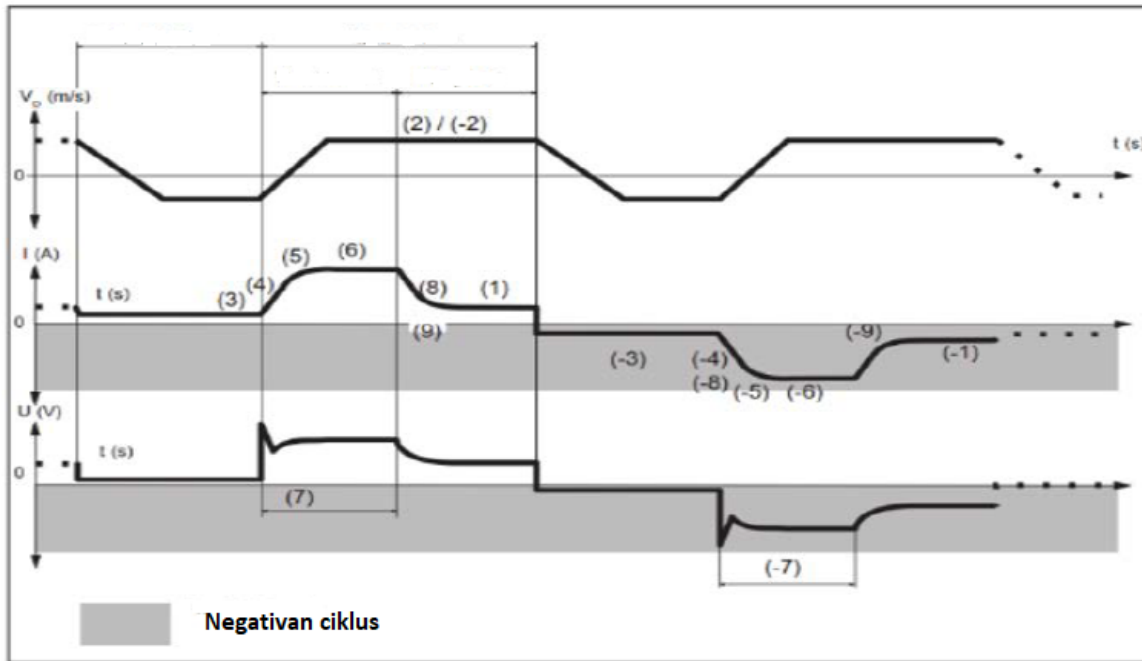
### 5.3.2. CMT Advance (CMT Napredni)

Ako je žica spojena na plus-pol, više energije se prenosi u osnovni metal i on se više zagrijava. Suprotno, ako je elektroda spojena na minus-pol, energija je usredotočena na elektrodu, povećava se količina taljenja žice, a manje topline se prenosi u osnovni metal te je postupak hladniji. U praktičnim primjenama polaritet se mijenja tijekom zavarivanja. Nakon plus faze slijedi negativna tijekom kratkog spoja unutar CMT faze, a ne tijekom vremena održavanja luka. [37]

Na slici 37. prikazan je ciklus, a na slici 38. dinamička karakteristika CMT Advance postupka



Slika 37. Ciklus CMT – ADV [40]

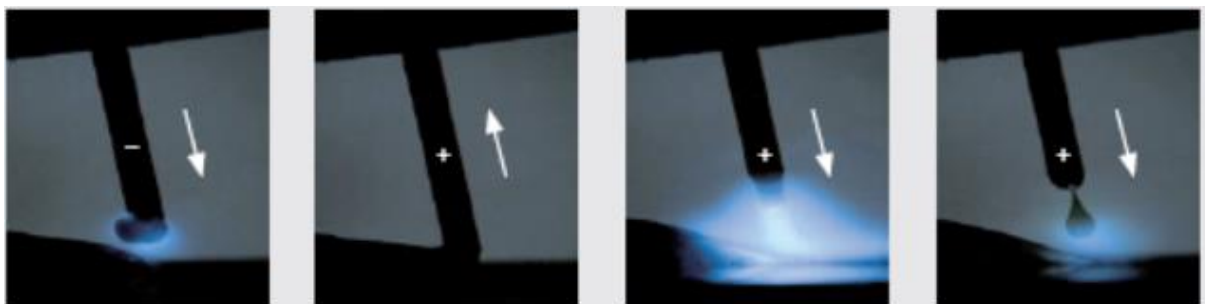


Slika 38. Dinamička karakteristika naprednog CMT postupka [40]

### 5.3.3. CMT Pulse Advance (CMT Napredni impulsni)

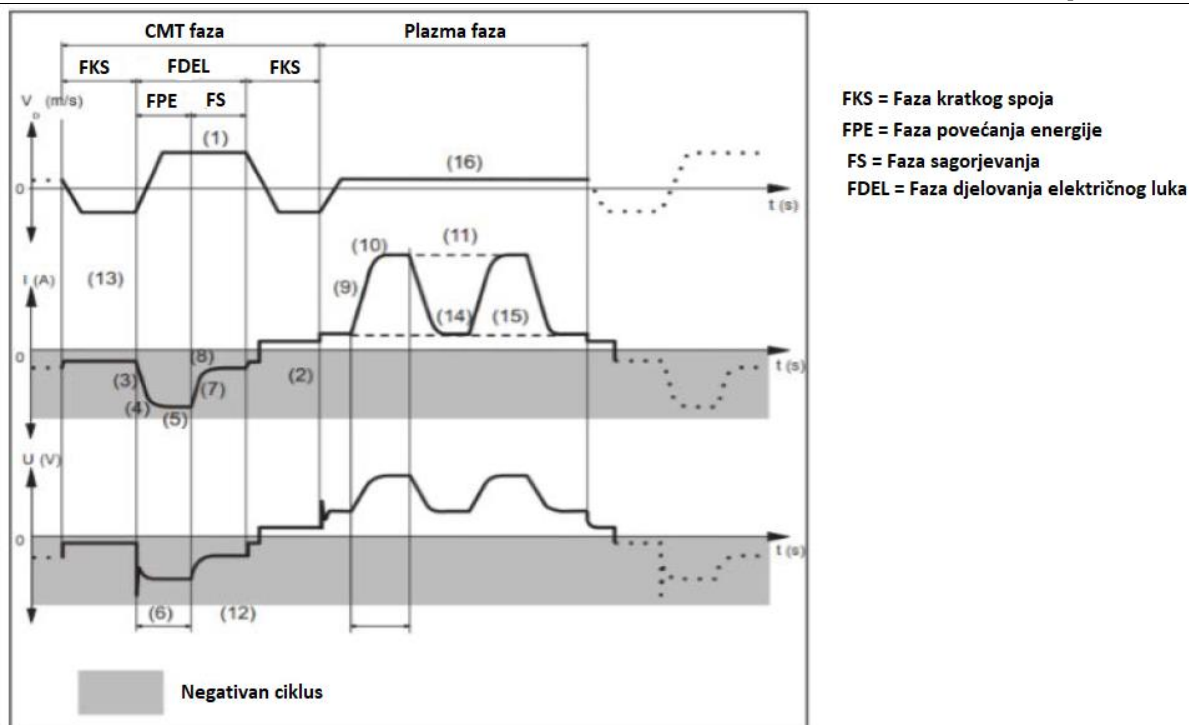
U ovom modelu izmjenjuju se pozitivni i negativni ciklusi, odnosno kombiniraju se ciklusi s negativnom i impulsna faza s pozitivnom polarnošću. Postupak postiže veći učinak taljenja tijekom faze negativnog polariteta s nižim unosom temperature. Promjena polariteta na pozitivni javlja se pojavom kratkog spoja. Impulsna faza daje prednost u prijenosu kapljice bez kratkog spoja. Ova inačica CMT postupka omogućava spajanje čelika visoke čvrstoće s dovoljno visokom brzinom taloženja, a opet s malim unosom topline. [44]

Na slici 39. prikazan je ciklus, a na slici 40. dinamička karakteristika CMT Pulse Advanced postupka.



Slika 39. Ciklus CMT – PADV [40]





Slika 40. Dinamička karakteristika naprednog CMT impulsnog postupka [40]

#### 5.3.4. Ostali

CMT je postupak s dosta ograničenom količinom rastaljenog metala zbog primjene slabih parametara zavarivanja. Ako je potrebna veća količina rastaljenog metala, moguće je kombinirati dva nezavisna CMT postupka. Takva koncept naziva se „CMT Twin“ i omogućuje udvostručenje količine rastaljenog metala i povećava brzinu zavarivanja. Isto tako ovaj postupak omogućuje korištenje dva načina prijenosa. Pa tako jedna žica koristi CMT, dok druga CMT impulsnu način, što omogućuje najveće brzine te se koristi za najdeblje limove. [37]

Na slici 41. prikazan je CMT Twin postupak.



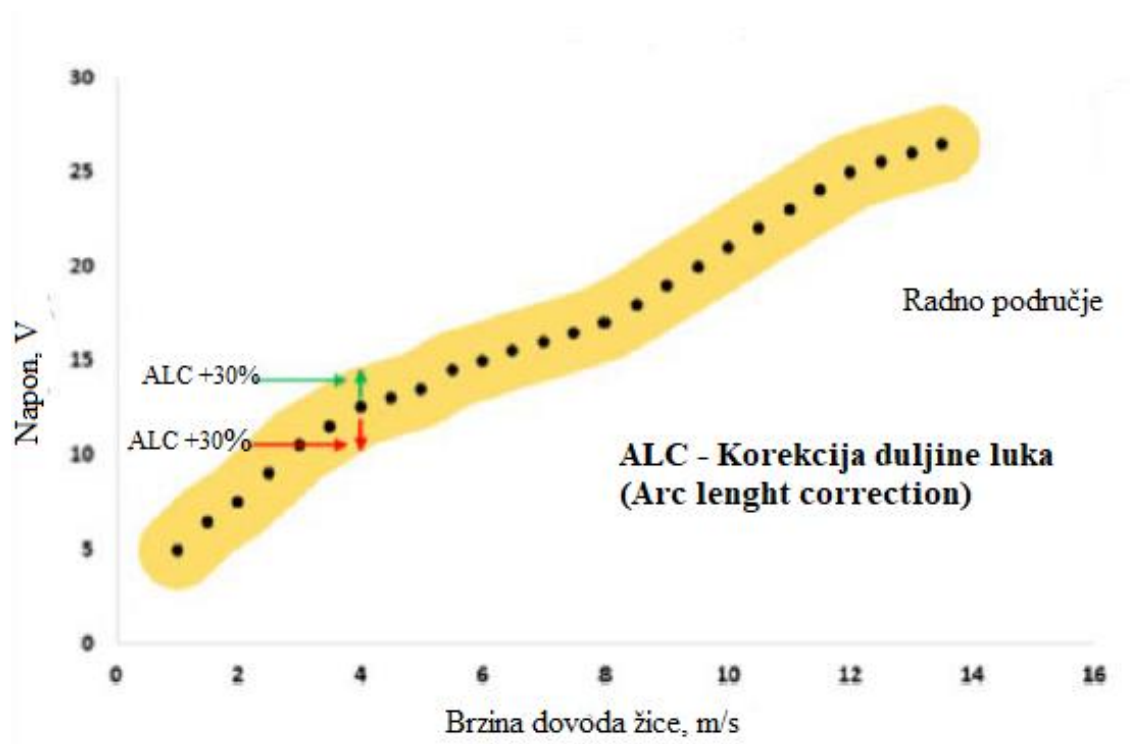
Slika 41. CMT Twin [45]

Među novijim modelima su CMT Dynamic i Universal. Ti postupci predstavljaju standardni CMT postupak s drugačijom sinergijskom krivuljom. Naime, frekvencija kretanja žice povećana je na 130 Hz i time povećala operacijske limite za 40%. Veća brzina taloženja i gustoća energije električnog luka povećava penetraciju i povećava brzinu zavarivanja. Ipak postoji određena razlika u postupcima. CMT Dynamic omogućuje veću penetraciju i brzinu zavarivanja, dok Universal ima bolju mogućnost premošćivanja zazora. [45]

#### 5.4. Parametri zavarivanja

S razvojem CMT-a i pojavom različitih modela, razvile su se i razne sinergijske linije ovisno o vrsti žice i njenom promjeru. Naime, sinergijska linija predstavlja skup parametara koje predlaže softver ovisno o materijalu koji se koriste s ciljem postizanja zavara optimalne kvalitete. Korištenjem robota otežana je optimizacija zbog potrebe za određivanjem dodatnih parametara koji se vežu s robotom. Ideja kreiranja nove sinergijske linije započinje s malom brzinom dovoda žice s kojom je definirano i funkcionalno područje napona. Nakon toga slijedi povećavanje brzine dovoda žice sve do maksimalnog iznosa i sa svakim iznosom brzine povezuje se područje napona. Time se dobivaju radne točke i kreira se krivulja koja predstavlja sinergijsku liniju. [40]

Na slici 42. prikazana je sinergijska krivulja.



Slika 42. Sinergijska linija [40]



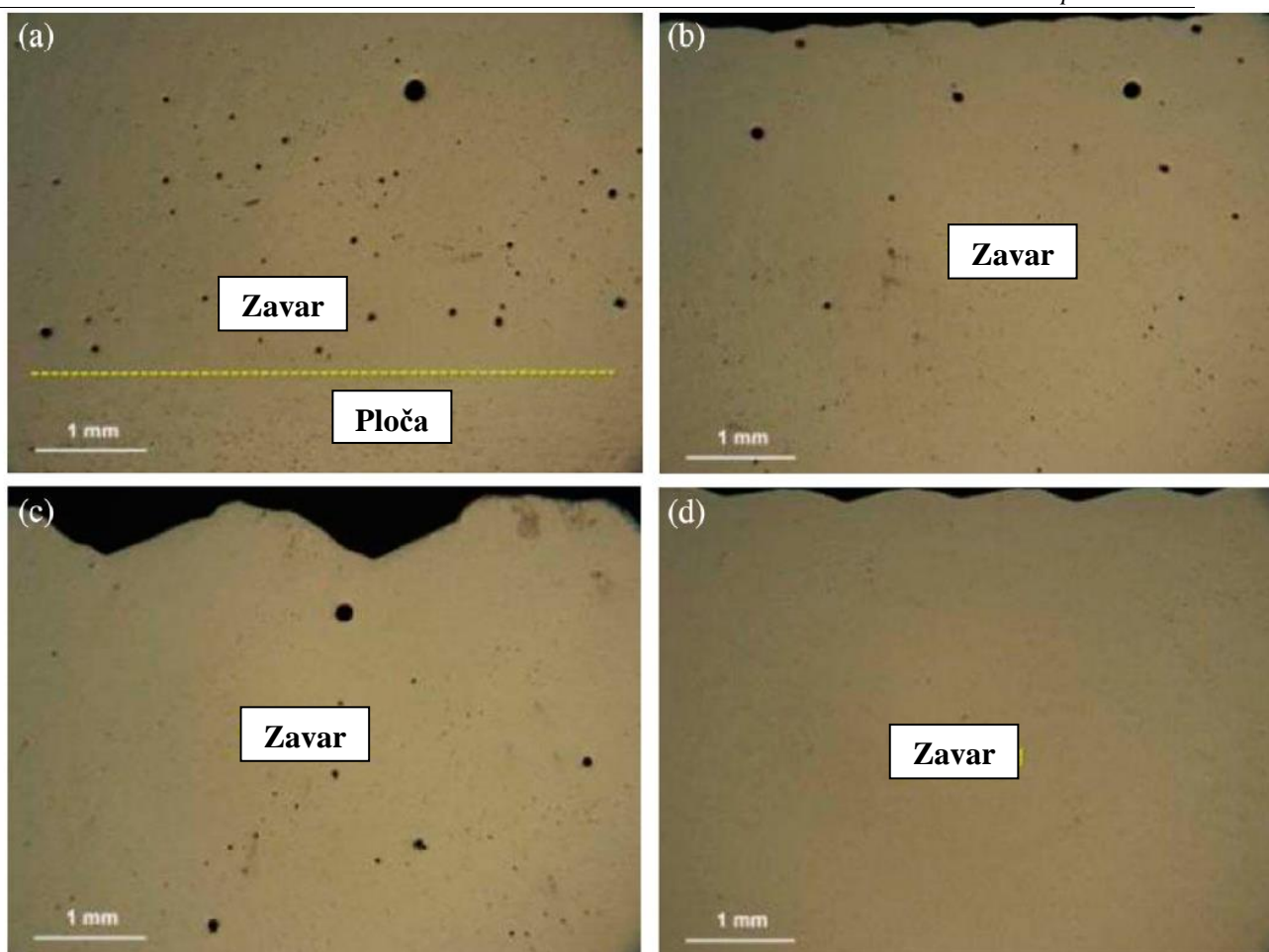
Iako će korištenje sinergijske krivulje dati dobre rezultate, ponekad je potrebno zasebno promijeniti određene parametre za ostvarivanje optimalnih rezultata. Korekcija duljine luka važan je parametar u zavarivanju. Kraći luk ima pozitivan učinak na brzinu zavarivanja, dok duži luk na širinu zavara. Duljina luka može se kretati u rasponu od -30% do +30%. Smanjivanjem korekcije dužine luka smanjuje se i vrijeme povrata žice, a povećava se frekvencija procesa. Također povećava se brzina dodavanja žice, ali se smanjuje unos topline i prosječni napon. Stoga su kapljice manje, ali se njihov broj povećava. Za povećanje korekcije duljine luka vrijedi sve suprotno. Važno je nadodati da dulji luk uzrokuje veće gubitke energije, nego kraći luk. Još jedan važan korekcijski faktor naziva se dinamička korekcija, koja se koristi za određivanje trajanja i svojstava vremena između kratkih spojeva. Nadalje, slobodni kraj žice predstavlja udaljenost između vrha žice i taline te ima utjecaj na svojstva zavara. Pa tako kraći slobodni kraj žice dovodi do manje penetracije, smanjenja količine depozita i ravnijeg vrha zavara. [40]

Brzina dodavanja žice kontrolira snagu zavarivanja. Za konvencionalne MIG/MAG zavarivačke procese brzina žice i napon su konstantni, ali kako se smjer dodavanja žice mijenja kod CMT-a, brzine dodavanja ne mora biti konstantna.

## **5.5. CMT zavarivanje aluminija**

Problem poroznosti u zavarivanju aluminija i njegovih legura predstavlja glavni izazov u razvoju i mogućnosti veće primjene aluminija u WAAM tehnologiji. Pojavom CMT postupka počelo se nazirati rješenje. Naime, CMT pokazuje izrazitu uspješnost u zavarivanju aluminija. Pojavljivanje pora je usko povezano s dubinom penetracije, unosom topline, oblikom i veličinom formiranih zrna. Naime, veći unos topline i veća penetracija formiraju gruba zrna, što naposljetku zadržava vodik u spoju. Nadalje, iako se primjenom CMT-a smanjuje vjerojatnost pojave pora, neki modeli pokazuju bolje rezultate. [46]

Na slici 43. prikazane su pore na površinama, ovisno o primijenjenom modelu CMT-a.



Slika 43. Prikaz pora u zavaru: a) standardni CMT, b) CMT - P, c) CMT - ADV, d) CMT – PADV [46]

## 5.6. Postupci primjene

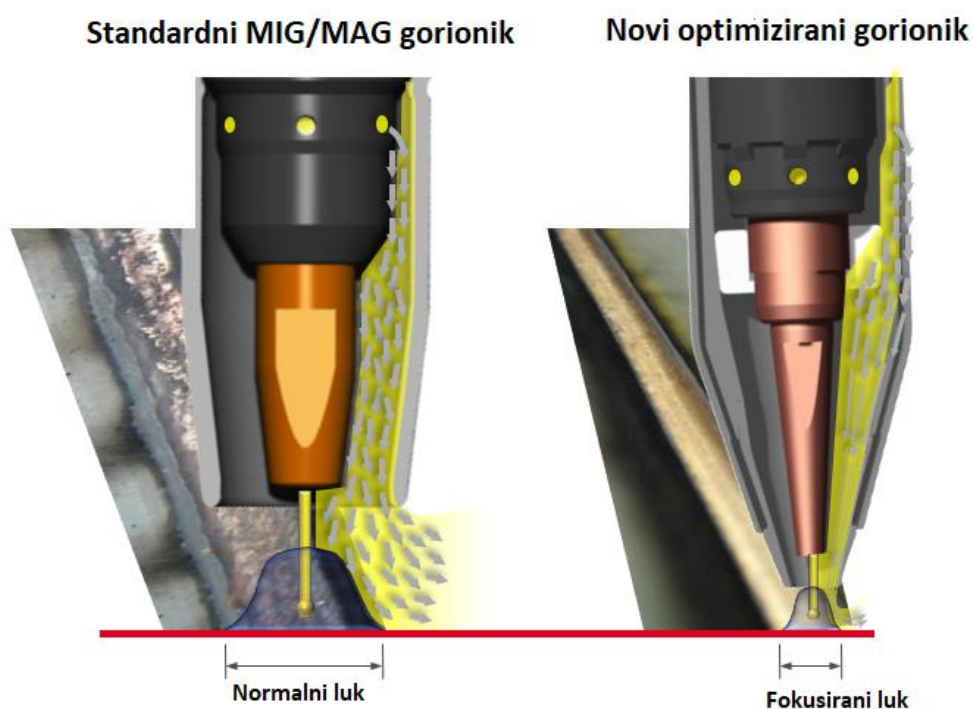
Iako je CMT proces relativno novi postupak, industrija je prepoznala njegove prednosti te je našao široku primjenu u industriji zavarivanja, ali i kod nekih drugih grana.

Navarivanje je jedan od postupaka koji primjenom CMT postupka ima važnu primjenu u današnje vrijeme. Naime navarivanjem se zaštićuju dijelovi od utjecaja okoliša. Važno je da kemijski sastav navara bude u potpunosti različit od osnovnog metala. Osnovni zahtjevi kod navarivanju su [37]:

- Miješanje osnovnog i dodatnog metala mora biti što je manje moguće
- Navareni sloj ne smije sadržavati greške kao što su pore, uključci ili naljepljivanja
- Količina nataljenog materijala mora biti što je moguće veća u jedinici vremena

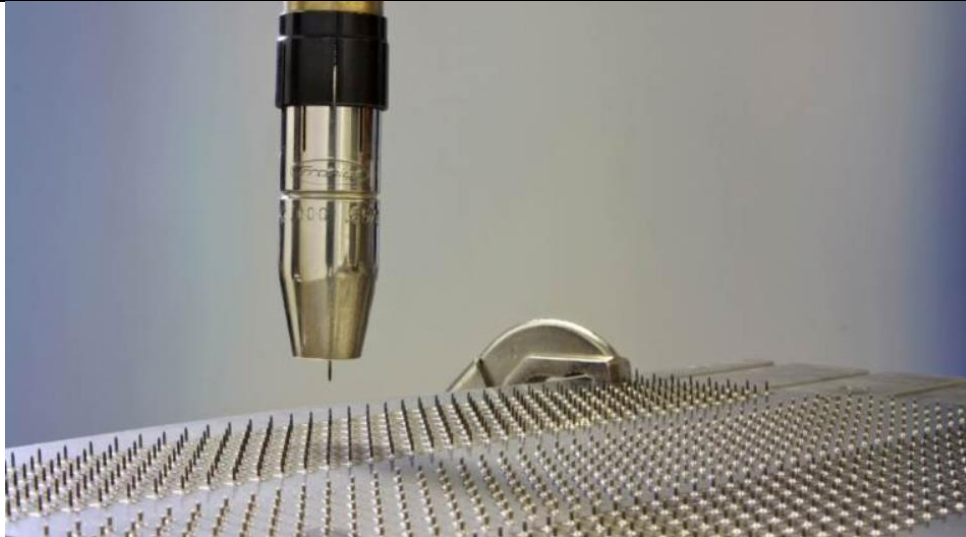
Još jedna od mogućnosti primjene je korištenje CMT-a u svrhu lemljena (CMT Braze+). Razlog tome je mogućnost smanjenja unosa topline na minimum. Postupak karakterizira vrlo velika brzina navarivanja do čak 3 m/min, što se pokazalo kao najekonomičnije rješenje u serijskoj automobilskoj proizvodnji. Isto tako ovaj postupak ima usku mlaznicu koja omogućuje usko područje utjecaja topline i kvalitetan zavar. [37]

Na slici 44. prikazana je usporedba standardnog MIG/MAG postupka i CMT Braze+ gorionika.



**Slika 44. Usporedba standardnog MIG/MAG gorionika i CMT Braze+ gorionika [45]**

Uz navarivanje i lemljenje, CMT se može primijeniti kod oigličjenja (CMT PIN – slika 45.). Postupak se razvio zbog činjenice da se samo metali koji provode električnu energiju mogu električno zavariti. CMT Pin je provjeren postupak zavarivanja za spajanje metala u nemetalne materijale poput plastike. Posebnim promjenama struje i sile povlačenja žice tijekom CMT ciklusa mali dijelovi žice mogu se zavariti na metalne površine. Takve strukture mogu se koristiti za označavanje i kao jake metalne četke. [37,47]



**Slika 45. CMT Pin postupak [45]**

Gledajući sve gore navedene mogućnosti primjene, uz prednosti koje donosi CMT postupak, moguće je zaključiti da postoji široka primjena ovog postupka. Pa tako od zavarivanja vrlo tankih limova, spajanja aluminija i čelika, lakšeg zavarivanja korijena na cijevima, mogućnosti automatiziranja do izrade različitih oblika pomoću aditivne tehnologije, CMT je našao svoje mjesto u modernoj proizvodnji. Od avio i automobilske industrije do građevinske i mnogih drugih.

## 6. PRIMJERI PRIMJENE CMT POSTUPKA U WAAM TEHNOLOGIJI

### 6.1. Primjer 1

Prema [22] provedeno je ispitivanje čeličnih šipki na ploči debljine 10 mm materijala S355N, uz korištenje žice dodatnog materijala od nelegiranog čelika G4Si1 promjera 1 mm. Kemijski sastav korištenih materijala dan je u tablici 10.

**Tablica 10. Kemijski sastav korištenih materijala u postocima [22]**

|       | C     | Si    | Mn       | P     | S      | Cr    | Mo    | Ni    | Cu    |
|-------|-------|-------|----------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| G4Si1 | 0,061 | 0,845 | 1,66     | 0,025 | 0,0139 | 0,035 | 0,006 | 0,044 | 0,088 |
| S355N | 0,2   | 0,5   | 0,9-1,65 | 0,03  | 0,025  | 0,3   | 0,1   | 0,5   | 0,55  |

Dimenzije čeličnih šipki bile su 50 mm duljine i 9 mm promjera. U eksperimentu su korištena tri postupka zavarivanja:

- MIG
- CMT
- CMT Advanced

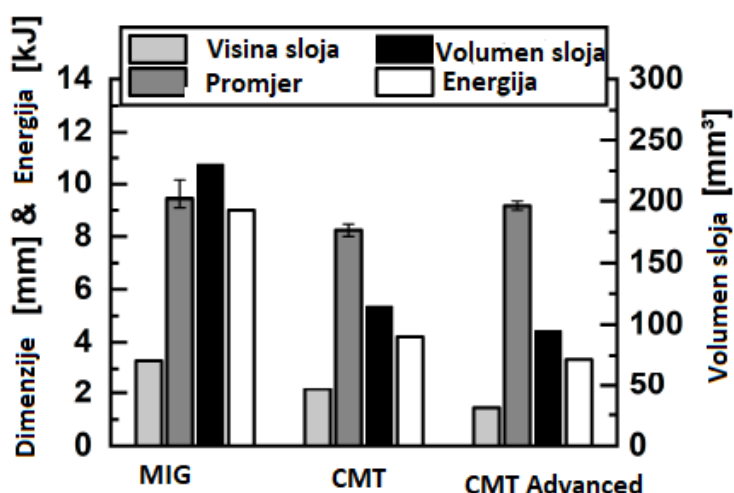
Pošto su šipke uskih dimenzija nije bilo nikakvih kretnji već jedino taloženje kapljica jedne na drugu i pomicanje gorionika po z osi. Zavarivanje se odvijalo u inertnoj zaštitnoj atmosferi s 82% Ar i 18 % CO<sub>2</sub>, a parametri su prikazani u tablici 11.

**Tablica 11. Parametri postupaka zavarivanja [22]**

| Parametar             | Mjerna jedinica | MIG  | CMT  | CMT Advanced |
|-----------------------|-----------------|------|------|--------------|
| Dovod žice            | m/min           | 10,6 | 5    | 9,4          |
| Vrijeme zavarivanja   | s               | 1,5  | 2,4  | 1            |
| Struja                | A               | 218  | 158  | 204          |
| Napon                 | V               | 27,6 | 11,1 | 16,4         |
| Unos topline po sloju | kJ/cm           | 9    | 4,21 | 3,35         |

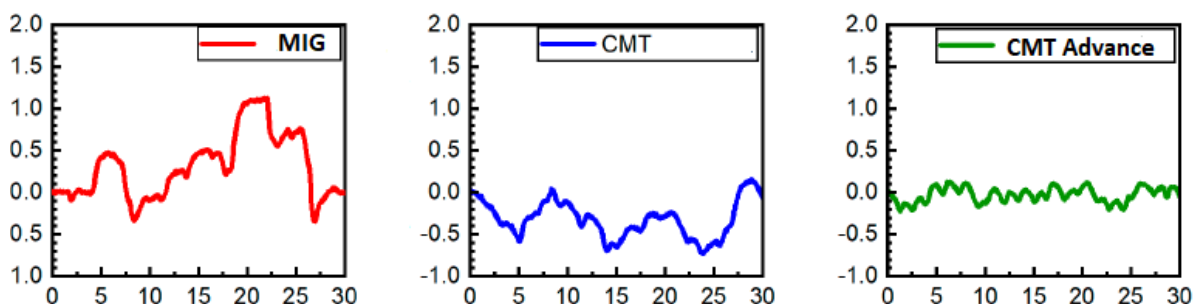
Nakon obavljenog eksperimentalnog dijela, uslijedila su ispitivanja. Za relativno iste promjere, MIG postupak je rezultirao najvećim unosom topline i volumenom. Obje karakteristike nisu poželjne, unos topline zbog zaostalih naprezanja, a volumen zbog potrebe naknadne obrade što će rezultirati gubitkom vremena i novca.

Na slici 46. prikazani su rezultati provedenog eksperimenta.



Slika 46. Rezultati provedenog eksperimenta [22]

Isto tako ispitana je i površina u svrhu utvrđivanja hrapavosti. Iz tog ispitivanja se vidi da najbolje stanje površine daje CMT Advanced postupak (slika 47).

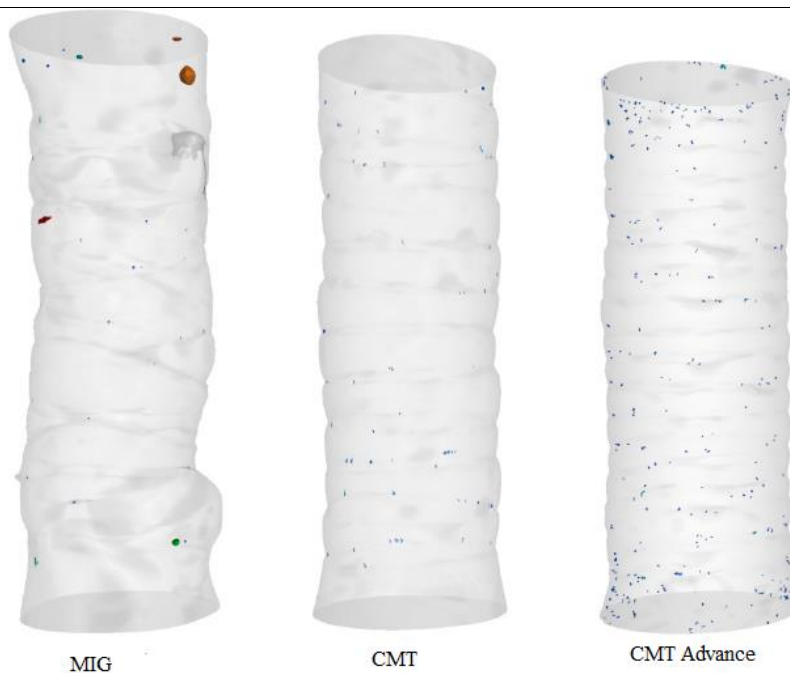


Slika 47. Analiza valovitosti površine [22]

Važnost hrapavosti je u tome što ona utječe na BTF omjer te govori koliko materijala će morati biti uklonjeno. Variranje između najviše i najniže točke iznosila je 1,4 mm za MIG, što predstavlja veliko odstupanje. Za usporedbu CMT je dao rezultat od 0,89 mm dok CMT Advance samo 0,35 mm, što pokazuje prednost u odnosu na standardni MIG postupak.

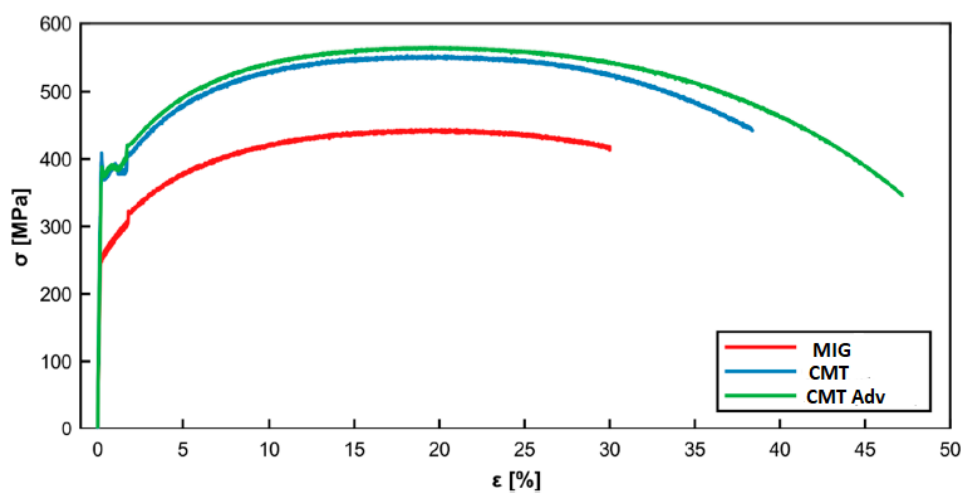
Kod analiziranja tvrdoće može se uočiti da ona raste s opadanjem unosa topline po postupku. Pa je tako MIG postupak dao najmanju prosječnu tvrdoću, a CMT Advance najveću. Isto tako treba napomenuti da s porastom broja slojeva raste i tvrdoća zbog grubozrnate mikrostrukture završnih slojeva.

Na slici broj 48. prikazana je topografija snimljenih uzoraka dobivenih pomoću računala s ciljem analiziranja pora.



Slika 48. Topografski prikaz čeličnih šipki [22]

Gornja slika prikazuje rezultat ispitivanja poroznosti. Šipka dobivena MIG postupkom sadrži mali broj pora, ali su zato prisutne neke pore većih dimenzija. Pore u šipkama dobivene CMT postupkom su znatno manje, no kod postupka CMT Advance uočljiv je znatno veći broj pora. Razlog ovakvih rezultata je taj što veće količine taline s kraćim vremenima zavarivanja, kao što je to kod MIG postupka, rezultiraju s mogućim porama većih dimenzija. S druge strane, manje količine taline i duža vremena zavarivanja pogodnija su za razvijanje manjih pora. Nadalje ispitana su i mehanička svojstva svake šipke, a rezultati vlačnog ispitivanja su prikazani na slici 49.



Slika 49. Dijagram naprezanje - istezanje [22]



Sa slike 49. moguće je zaključiti da su dobiveni uzorci vrlo duktilni, pogotovo uzorci dobiveni CMT postupkom. Šipka dobivena MIG postupkom pokazuje znatno lošija mehanička svojstva u odnosu na druge dvije.

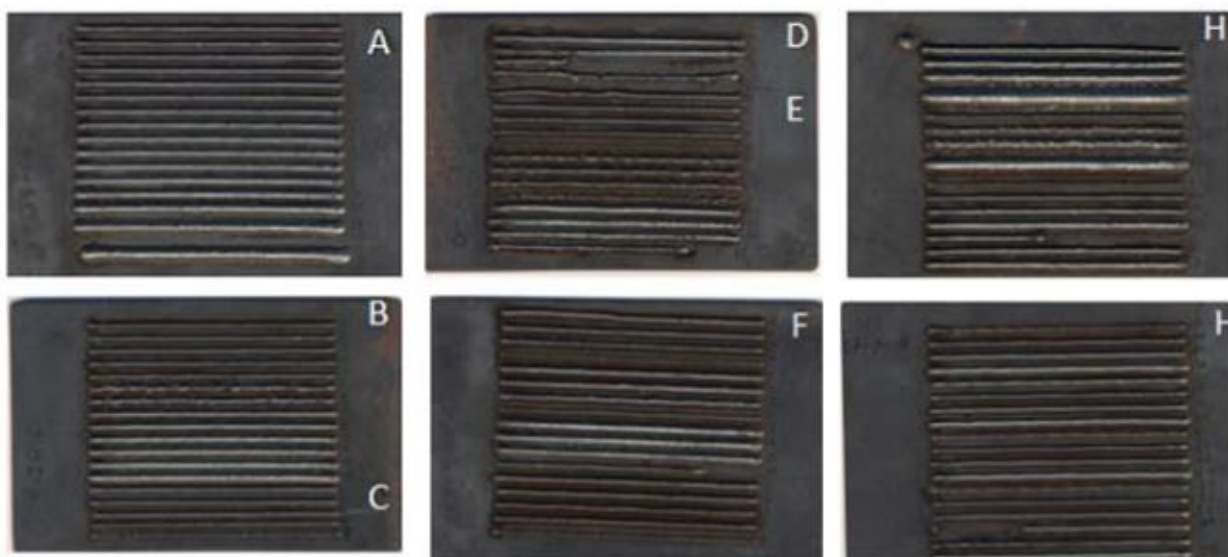
Konačno ispitivanjem šipki za upotrebu u građevinarstvu dobivene WAAM postupkom doneseni su sljedeći zaključci:

- Geometrija sloja ovisi u unosu topline
- Unos topline direktno je povezan s mikrostrukturom. Visok unos temperature rezultira s homogenom mikrostrukturom, ali manjom čvrstoćom
- Poroznost ovisi o otplinjavanju taline metala zavara
- Visok unos topline povezan je s nižom tvrdoćom i manjom istezljivošću

## 6.2. Primjer 2

Prema [48] provedeno je ispitivanje u svrhu ispitivanja parametara. Korištena je čelična ploča materijala S235 JR debljine 3 mm i dimenzija 150 x 100 mm, a žica dodatnog materijala je bila promjera 0,8 mm. Zaštitni plin sastojao se od 15% CO<sub>2</sub> i ostatak Ar. U svrhu otkrivanja optimalnih parametara i njihovog međusobnog odnosa, 115 zavara je provedeno na 8 ploča, s različitim parametrima

Na slici 50. prikazani su rezultati eksperimenta.



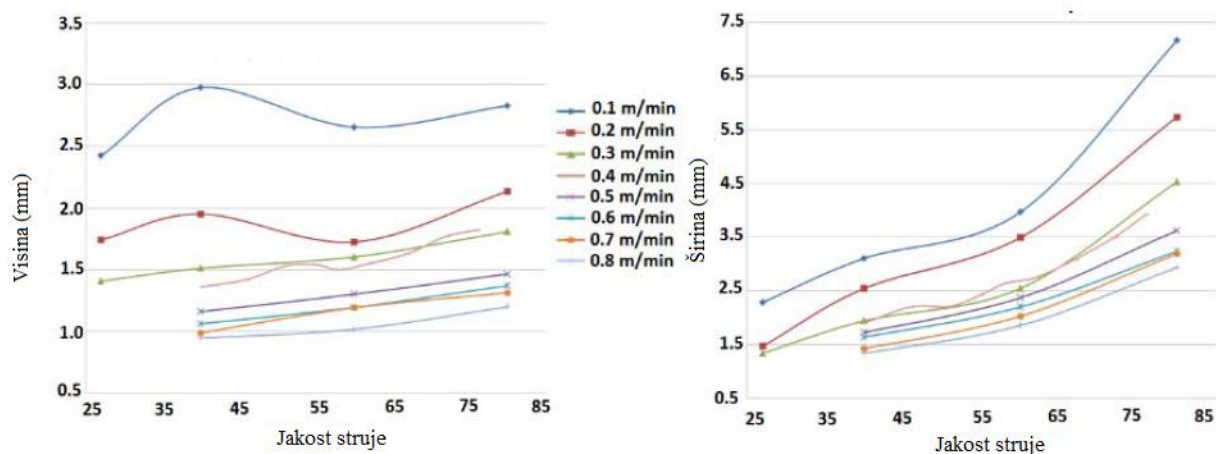
Slika 50. Rezultat eksperimenta [48]

Brzina zavarivanja bila je konstantna za svaki zavar, dok su ostali parametri varirali.



Iz dobivenih rezultata moguće je bilo uočiti izravnu povezanost između brzine dovođenja žice i jakosti struje, čiji se odnos mogao prikazati gotovo linearno. To se objašnjava na način da s bržim dovođenjem žice potrebna je i veća struja da je rastali. S druge strane napon se ponaša nešto drugačije. U teoriji napon se povećava s povećanjem dovođenja žice, no u stvarnosti on varira između 9 i 12 V.

Na slici 51. prikazan je odnos širine i visine zavara u odnosu na jakost struje za svaku brzinu zavarivanja.



**Slika 51. Odnos širine i visine zavara u odnosu na jakost struje za svaku brzinu zavarivanja [48]**

Na slici 51. je moguće uočiti da za brzine zavarivanja veće od 0,2 m/min, širina i visina zavara rastu umjerenije s jasnim trendom kod povećanja jakosti struje.

Na kraju eksperimenta zaključeno je da je 400 mm/min optimalna brzina zavarivanja zbog ujednačene visine zavara pri povećanju jakosti struje, dok širina raste zbog veće količine nataloženog materijala.

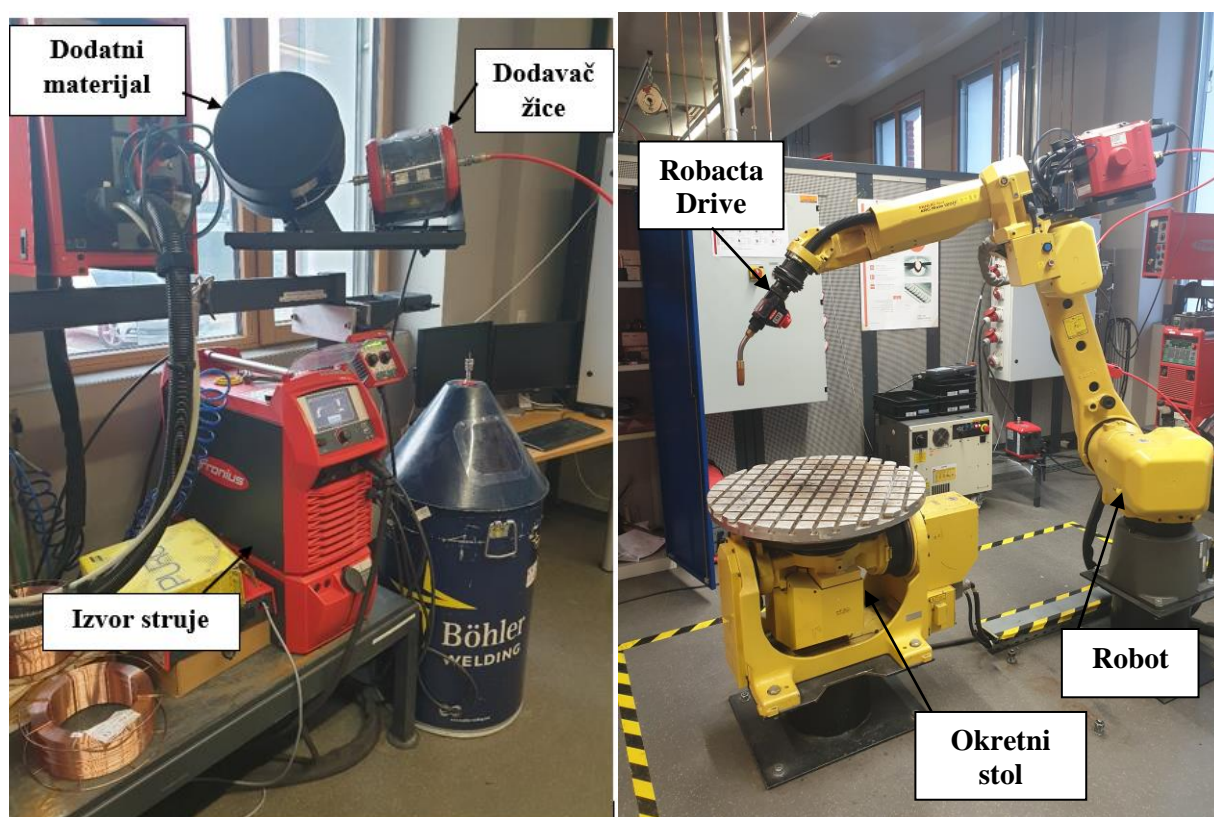
## 7. EKSPERIMENTALNI DIO

Cilj eksperimentalnog dijela zadatka bio je izraditi aluminijske cijevi WAAM proizvodnom tehnologijom koristeći CMT postupak zavarivanja, te ispitati kvalitetu površine, mehanička svojstva i mikrostrukturu. Na kraju potrebno je ocijeniti primjenjivost CMT postupka za izradu cijevi i cijevnih elemenata WAAM tehnologijom.

Eksperiment je proveden u laboratoriju tvrtke Fronius u Welsu (Austrija), dok su ispitivanja obavljena u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

### 7.1. Korištena oprema

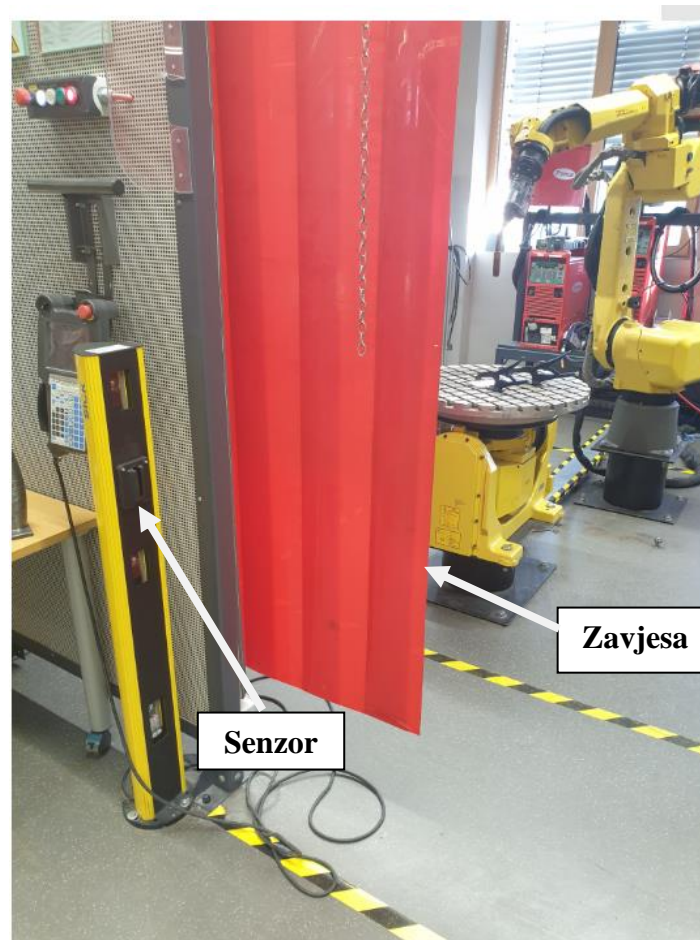
Prije početka svakog eksperimenta potrebno je proučiti željeni rezultat. Time se dobiva uvid u opremu koja će biti korištena. U ovoj točki opisana je sva oprema koja je korištena u izradi aluminijskih cijevi. Slika 52. prikazuje radnu stanicu opremljenu svom potrebnom opremom.



Slika 52. Prikaz radne stanice

Radna stanica zatvara se s plastičnom zavjesom u svrhu zaštite te se na ulazu nalazi senzor koji ukoliko bude prijeđen, obustavlja postupak zavarivanja.

Na slici 53. prikazana je zaštita na ulasku u radnu stanicu.

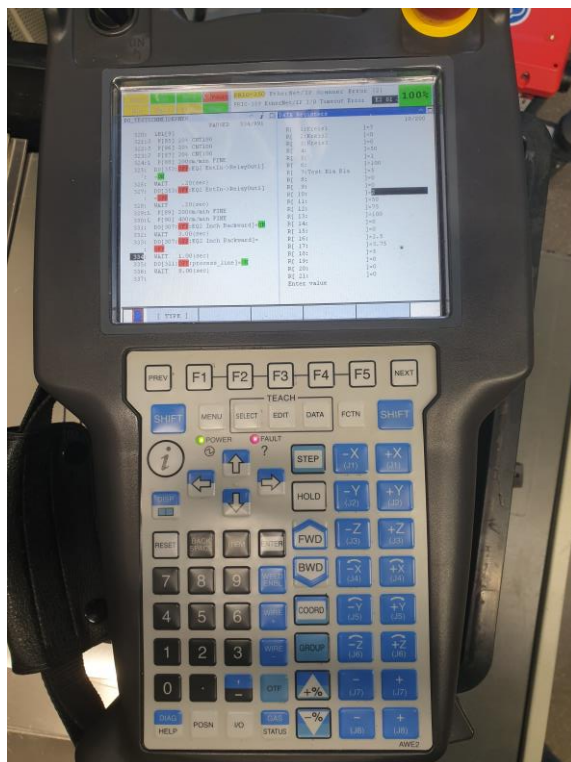


Slika 53. Zaštita na ulasku u radnu stanicu

### 7.1.1. Robotska stanica

Postupak izrade cijevi proveden je na robotskoj stanici Fanuc Arc mate 120ic. Proizveden je posebno za zavarivanje visokim brzinama i rezanje velikih dijelova. Ovaj robot sa šest stupnjeva slobode gibanja ima dohvat od 1,8 metara te nosivosti do 20 kg, a ponovljivost iznosi  $\pm 3$  mm. [49]

U sklopu stanice nalazi se radni stol koji ima mogućnost rotiranja i nagnjanja, ali u ovom eksperimentu nije bilo potrebe za bilo kakvim kretanjama pa je postavljen u neutralnu poziciju, tj. radna površina postavljena je vodoravno. Manipuliranje robotom te određivanje i mijenjanje parametara ostvaruje se privjeskom za učenje prikazanog na slici broj 54.



Slika 54. Privjesak za učenje

### 7.1.2. Izvor struje

Za izvor struje koristio se Froniusov uređaj TPS 500i *Pulse* (slika 55.), s karakteristikama prikazanim u tablici broj 12.

Tablica 12. Karakteristike izvora struje - TPS 500i *Pulse* [50]

Slika 55. TPS 500i *Pulse*

|                               |               |
|-------------------------------|---------------|
| Maksimalna struja zavarivanja | 500 A         |
| Minimalna struja zavarivanja  | 3A            |
| Intermitencija                | 500 A / 40 %  |
|                               | 430 A / 60 %  |
|                               | 360 A / 100 % |
| Radni napon                   | 14,2 - 39,0 V |
| Napon praznog hoda            | 71,0 V        |
| Mrežna frekvencija            | 50 - 60 Hz    |
| Mrežni napon                  | 3 x 400 V     |
| Masa                          | 38 kg         |

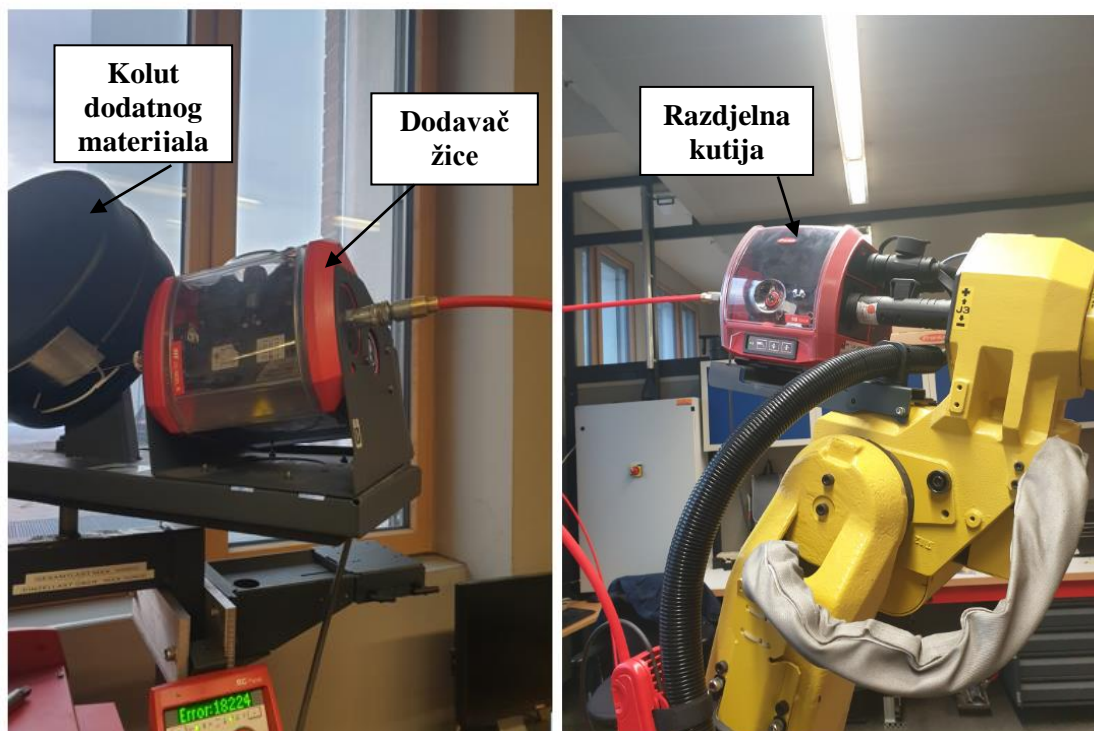




**Slika 56. Sučelje izvora struje**

Na sučelju izvora struje (slika 56.) odabire se postupak zavarivanja, dodatni materijal, zaštitni plin i parametri. Tijekom zavarivanja, uređaj nudi mogućnost praćenja cjelokupnog procesa i brzu promjenu parametara. Isto tako moguće je spajanje na računalo te praćenje svih podataka sa sigurne udaljenosti.

### 7.1.3. Sustav dovoda žice



**Slika 57. Sustav dovoda žice (lijevo – dodavač žice, desno – razdjelna kutija)**

Sustav dovoda žice (slika 57.) realiziran je na način da dodavač žice pomoću motora gura žicu i odmotava kolut dodatnog materijala. Dodavač žice omogućava konstantno i precizno dovođenje žice, a prvenstveno se dijele s obzirom na udaljenost robota od dodatnog materijala. U eksperimentu korišten je dodavač žice modela WF 25i REEL R, a njegove karakteristike prikazane su u tablici broj 13.

**Tablica 13. karakteristike WF 25i REEL R [50]**

|                  |                   |
|------------------|-------------------|
| Radni napon      | 24 V DC / 60 V DC |
| Brzina dodavanja | 1 - 25 m/min      |
| Broj kotačića    | 4                 |
| Promjer žice     | 0,8 - 2,4 mm      |

Razdjelna kutija je mjesto spajanja žice dodatnog materijala, rashladne tekućine i zaštitnog plina, a povezana je i sa izvorom struje. Sustav dodavanja žice još čine kompenzator povrata žice, prikazan na slici broj 58. te Robacta Drive koja čini posljednju točku sustava prikazana na slici broj 59.



**Slika 58. Kompenzator povrata žice**

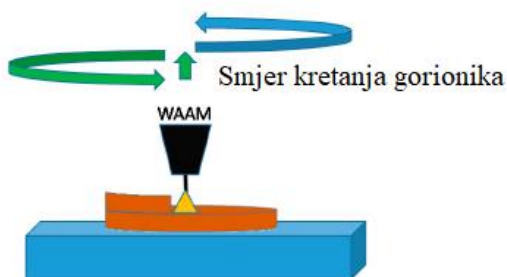


Slika 59. Robacta Drive

## 7.2. Izrada cijevnih uzoraka

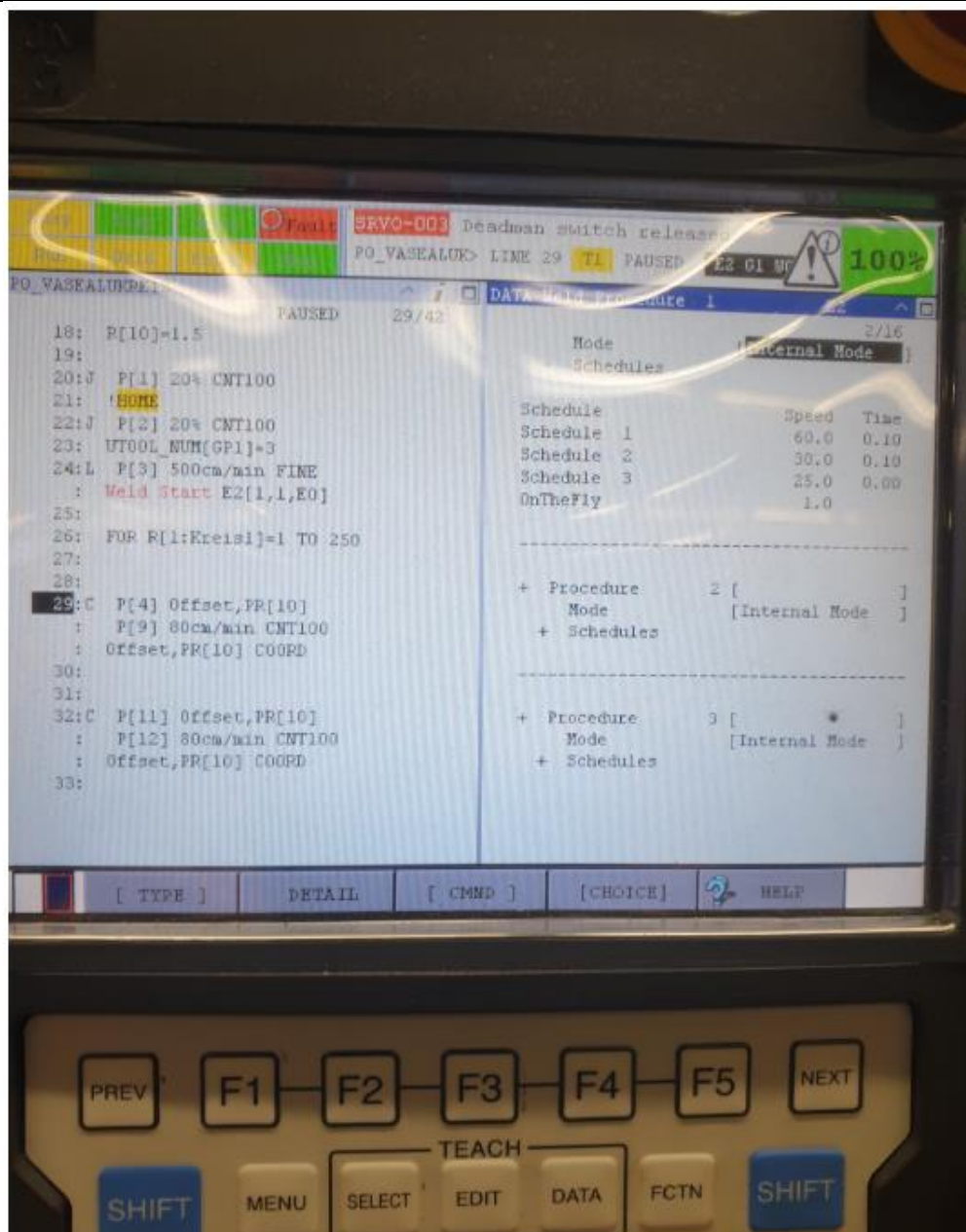
U eksperimentu su izrađena četiri uzorka od dvije aluminijske legure (dva uzorka za svaku leguru) pomoću CMT postupka. Izrada cijevi ostvarena je kontinuiranim gibanjem robota, stoga su cijevi izrađene u jednom prolazu bez zaustavljanja.

Na slici 60. prikazana je shema kontinuirane izrade cijevi.



Slika 60. Shema kontinuirane izrade cijevi [51]

Pomoću privjeska za učenje izvršeno je *on-line* programiranje (slika 61.), tj. određene su točke koje su povezane putanjom. Uz putanju, određene su i početna visina, brzina prilaza gorionika i drugi parametri vezani uz kretanju robota.



Slika 61. On-line programiranje

Priprema podloge za WAAM tehnologiju zahtjeva učvršćivanje što je ostvareno pomoću čeličnih stega (vidi slika 62.) radi smanjenja deformacija koje se javljaju uslijed zavarivanja. Prije početka zavarivanja potrebno je bio očistiti podlogu radi uklanjanja sloja aluminijskih oksida s površine, ali i radi lakšeg uspostavljanja električnog luka. Zbog debljine podloge od samo 2 mm i korištenja CMT postupka zavarivanja kojeg karakterizira niski unos topline, ploča se nije zagrijavala. Naime, zbog velike toplinske vodljivosti aluminijskog materijala, zagrijavanjem bi se smanjilo odvođenje topline i brzo hlađenje prvog nanesenog sloja. Zbog izostavljanja zagrijavanja podloge može se očekivati uži prvi sloj zbog bržeg hlađenja.





**Slika 62. Podloga za izradu učvršćena stegama**

Za zaštitni plin odabran je 100% Ar, a spremnici sa zaštitnim plinom smješteni su u drugoj prostoriji iz koje se opskrbljuju sve radne stanice istraživačkog odjela. S takvim pristupom ostvarena je ušteda prostora, no problem može predstavljati napuštanje radne stanice radi provjere količine preostalog zaštitnog plina.

Sustav dovoda zaštitnog plina prikazan je na slici 63.



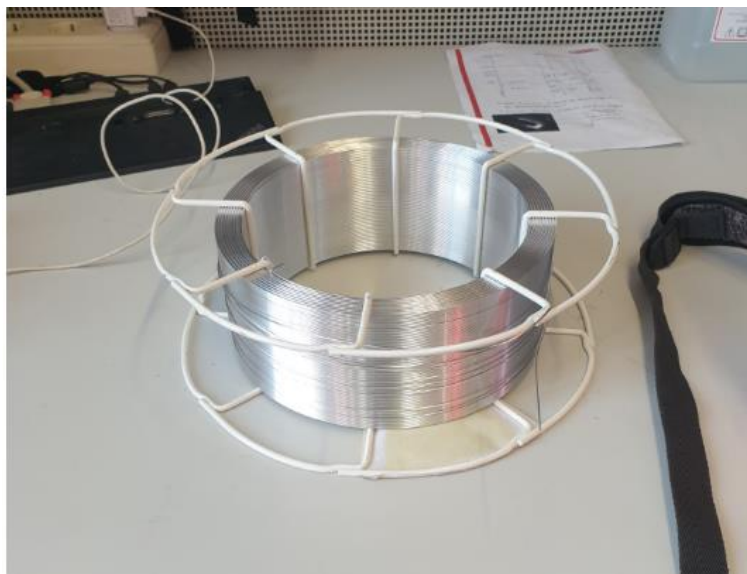
**Slika 63. Stanica zaštitnog plina (lijevo) i priključak za dovod (desno)**

### 7.2.1. Dodatni materijali

Za dodatni materijal odabrane su legure aluminija:

- AlSi-5 (uzorci 1 i 2)
- AlMg-5 (uzorci 3 i 4)

Na slici 64. prikazan je kolut žice dodatnog materijala



**Slika 64. Kolut žice dodatnog materijala**

Kod izbora dodatnog materijala važno je poznavati njegove karakteristike. Naime, promatranjem žica navedenih aluminijevih legura dobit će se zanimljive tehnološke razlike. Iako žice AlMg 5 i AlSi 5 imaju slična tehnološka svojstva postoje razlike.

Međusobna usporedba prednosti i nedostataka legura AlMg-5 i AlSi-5 prikazane su u tablicama 14 i 15.

**Tablica 14. Prednosti i nedostaci AlMg 5 u odnosu na AlSi-5 [52]**

| <b>Prednosti</b>                                    | <b>Nedostaci</b>                                           |
|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| Manje poteškoće u dovođenju žice zbog veće čvrstoće | Manja viskoznost taline, a time i lošiji površinski izgled |
| Veće vrijednosti čvrstoće zavarenog spoja           | Teža optimizacija parametara zavarivanja                   |
| Bolja otpornost na koroziju                         | Manje protaljivanje                                        |
| Bolja plastičnost zavarenog spoja                   | Veće rasprskivanje materijala                              |
| Manja sklonost poroznosti                           | Zacrnljenje uz zavar zbog niže temperature isparavanja     |

**Tablica 15. Prednosti i nedostaci AlSi 5 u odnosu na AlMg-5 [52]**

| <b>Prednosti</b>                          | <b>Nedostaci</b>                                                     |
|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Dublje protaljivanje                      | Veće poteškoće pri dodavanju žice                                    |
| Lijep izgled zavara uz blage prijelaze    | Skлонost poroznosti u zavaru                                         |
| Lakša optimizacija parametara zavarivanja | Slabija plastičnost                                                  |
| Manja sklonost toplim pukotinama          | Kod zavarivanja stvara se veća količina ozona (potrebna ventilacija) |

Kemijski sastav i mehanička svojstva AlSi-5 prikazani su u tablicama 16. i 17.

**Tablica 16. Kemijski sastav AlSi-5 [53]**

| AlSi-5  | Maseni udio elemenata, % |       |       |       |       |
|---------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|
|         | Al                       | Si    | Fe    | Cu    | Mg    |
| Ostatak | 4,5 - 6                  | < 0,6 | < 0,3 | < 0,2 | < 0,2 |

**Tablica 17. Mehanička svojstva AlSi-5 [53]**

| Jonvencionalna granica tečenja<br>$R_{p0,2}$<br>N/mm <sup>2</sup> | Vlačna čvrstoća<br>$R_m$<br>N/mm <sup>2</sup> | Istezljivost<br>$A_5$<br>% |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|
| $\geq 40$                                                         | $\geq 120$                                    | 8                          |

Kemijski sastav i mehanička svojstva AlMg-5 prikazani su u tablicama 18. i 19.

**Tablica 18. Kemijski sastav AlMg-5 u postocima [54]**

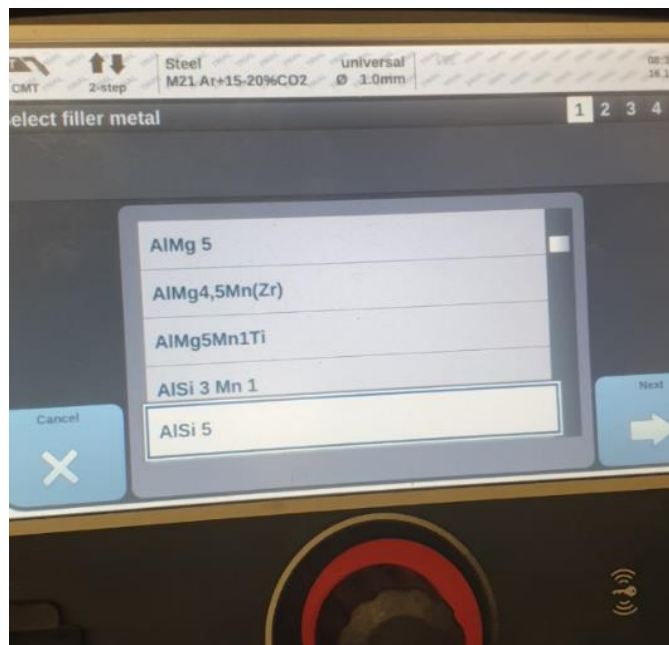
| AlMg-5  | Maseni udio elemenata, % |      |     |     |     |     |     |    |
|---------|--------------------------|------|-----|-----|-----|-----|-----|----|
|         | Al                       | Mn   | Si  | Cr  | Fe  | Cu  | Mg  | Zn |
| Ostatak | 0,2                      | 0,25 | 0,2 | 0,4 | 0,1 | 4,5 | 0,1 |    |

**Tablica 19. Mehanička svojstva AlMg-5 [54]**

| Konvencionalna granica tečenja<br>$R_{p0,2}$<br>N/mm <sup>2</sup> | Vlačna čvrstoća<br>$R_m$<br>N/mm <sup>2</sup> | Istezljivost<br>$A_5$<br>% |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|----------------------------|
| 110                                                               | 240                                           | 17                         |

### 7.2.2. Parametri zavarivanja

Pri postavljanju parametara prvo što se unosi u sustav su vrsta materijala (slika 65.), debljina dodatnog materijala i vrsta zaštitnog plina. Nakon toga sustav sam predlaže određene postupke ovisno o unesenim podacima kao što je prikazano na slici 66.



Slika 65. Odabir materijala



Slika 66. Odabir postupka zavarivanja

Za izradu cijevi žicom AlSi-5 odabran je CMT Dynamic, dok za AlMg-5 CMT Universal. Ostali parametri postavljeni prije početka zavarivanja su prikazani u tablici broj 20.



**Tablica 20. Postavljeni parametri**

| Parametri                                          | Iznos     |
|----------------------------------------------------|-----------|
| Vrijeme puštanja zaštitnog plina prije zavarivanja | 0,1 s     |
| Vrijeme puštanja zaštitnog plina nakon zavarivanja | 0,1 s     |
| Brzina protoka plina                               | 13 l/min  |
| Hot start                                          | 0,5 s     |
| Karakteristika izvora struje                       | CC        |
| Brzina zavarivanja                                 | 80 cm/min |

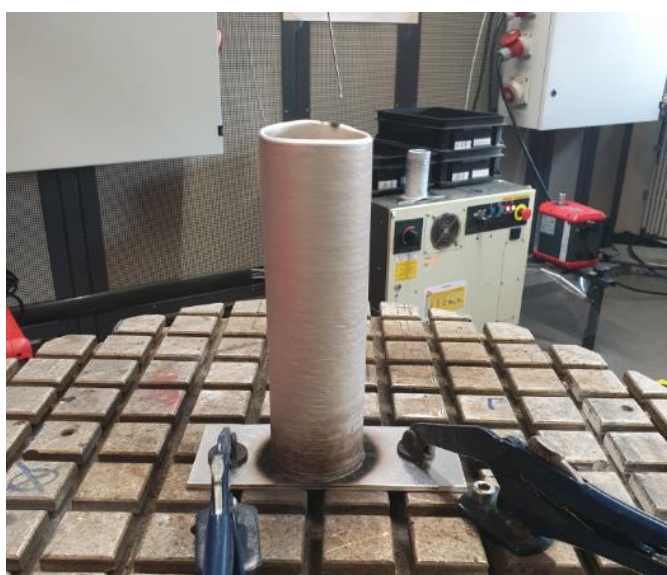
Određeni parametri, kao što su brzina dovođenja žice i visinu podizanja gorionika po sloju, mijenjali su se tijekom izrade u svrhu optimiranja izrade. Brzina dodavanja žice varirala je od 7 m/s u početnim slojevima do 2,5 m/s, dok visina po sloju od 1,5 do 0,8 mm.

Na kraju ispitivanja završna dokumentacija prikazana je u tablici broj 21.

**Tablica 21. Završna dokumentacija korištenih parametara izrade**

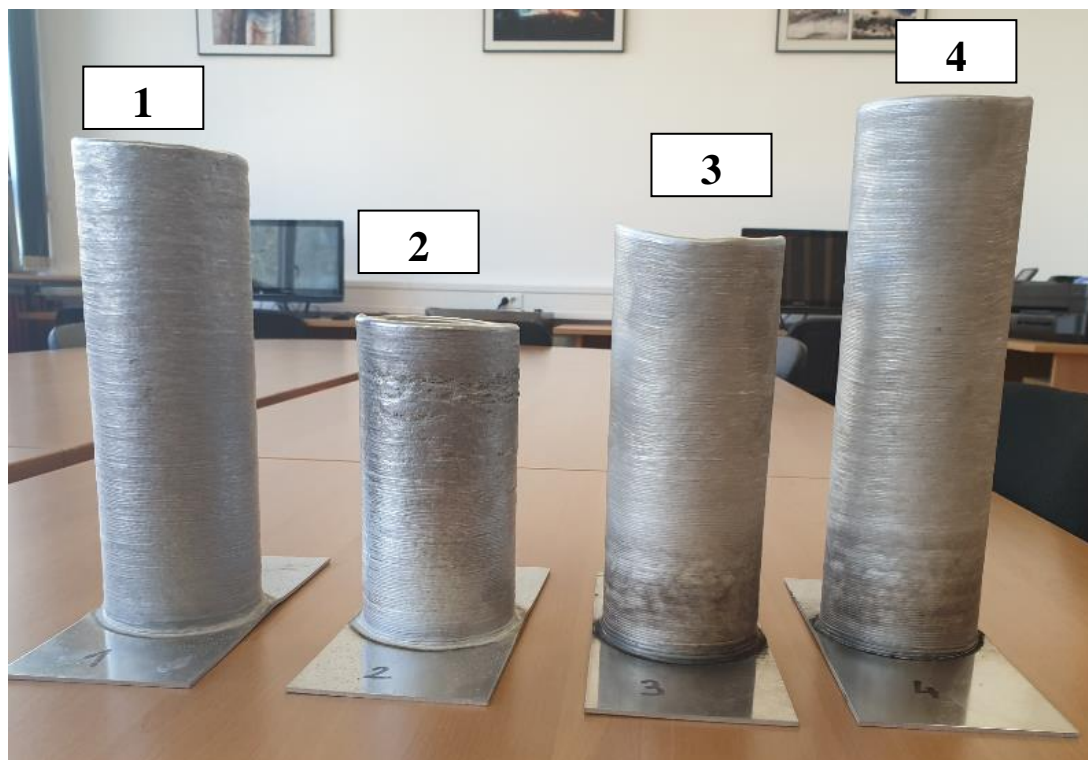
| Parametri                   | Uzorak 1 | Uzorak 2 | Uzorak 3  | Uzorak 4 |
|-----------------------------|----------|----------|-----------|----------|
| Vrijeme izrade              | 3953,7 s | 2472,6 s | 2839,9 s  | 3964,8 s |
|                             | 65,9 min | 41,2 min | 47,33 min | 66,1 min |
| Prosječna struja (A)        | 55       | 55       | 36        | 36       |
| Prosječni napon (V)         | 8,7      | 8,8      | 11,3      | 11,3     |
| Brzina dodavanja žice (m/s) | 3,1      | 3,1      | 2,5       | 2,6      |
| Snaga (W)                   | 588,2    | 589,5    | 440,6     | 434,9    |
| Ukupni unos (kJ)            | 2375,3   | 1485,8   | 1277,2    | 1756,3   |

Na slici 67. prikazana je cijev nakon završetka izgradnje.

**Slika 67. Izgled cijevi nakon izrade**

### 7.2.3. Izrađeni cijevni uzorci

Na slici 68. prikazani su dobiveni cijevni uzorci.



**Slika 68. Cijevni uzorci**

Zbog ograničenog vremena korištenja robota, uzorci 2 i 3 su niži

Nakon završetka izrade, vizualnom kontrolom moguće je uočiti:

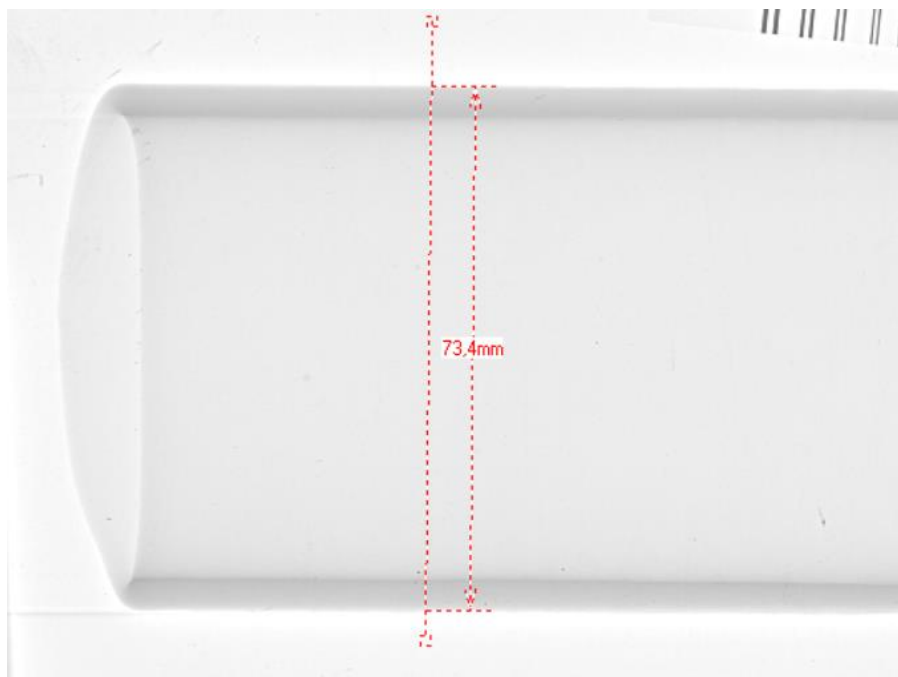
- Niti jedan od uzoraka ne pokazuje nikakve vizualne nepravilnosti u svojoj geometriji (ne uključujući prvih par slojeva uz podlogu)
- Deformacije podloge su minimalne ili nikakve
- Na uzorku 2 pri vrhu uočljiva su oštećenja na površini nastala uslijed veće vrijednosti slobodnog kraja žice, čime je električni luk postao nestabilan te se pojavila greška
- U prvim slojevima izrade uzoraka 3 i 4 vidljivo je zacrnjenje što je karakteristično za aluminijske legure s magnezijem zbog njihove niže temperature isparavanja
- Mali gubitak materijala (dobar BTF)

U tablici broj 22. prikazane su dimenzije dobivenih cijevnih uzoraka.

**Tablica 22. Dimenzije dobivenih cijevi**

| Dimenzija uzoraka    | Uzorak 1 | Uzorak 2 | Uzorak 3   | Uzorak 4  |
|----------------------|----------|----------|------------|-----------|
| Visina (mm)          | 219      | 145      | 182        | 235       |
| Vanjski promjer (mm) | 74,5     | 75,1     | 73,9       | 73,5      |
| Debljina (mm)        | 4 - 5,3  | 4 - 5,5  | 2,75 - 4,1 | 2,7 - 4,5 |

Mjerenje je obavljeno pomoću dobivene radiografske slike, ispitivanja koje će biti kasnije objašnjeno. Naime, uz pregled radiograma, aplikacija nudi opciju mjerenja određenih površina i linija kao što je prikazano na slici 69.



**Slika 69. Primjer mjerenja promjera cijevi 3**

Pošto su mjerenja obavljena ručnim pomicanjem granica te vizualnom provjerom, točnost mjerenja varira  $\pm 0,1$  mm.

### **7.3. Ispitivanja cijevnih uzoraka**

Ispitivanja su provedena na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, a analizirali su se kemijski sastavi, mikro i makro strukture, greške u spojevima te mehanička svojstva uzoraka. Za ispitivanja dobivenih cijevi korišteni su uzorci 1 i 4.

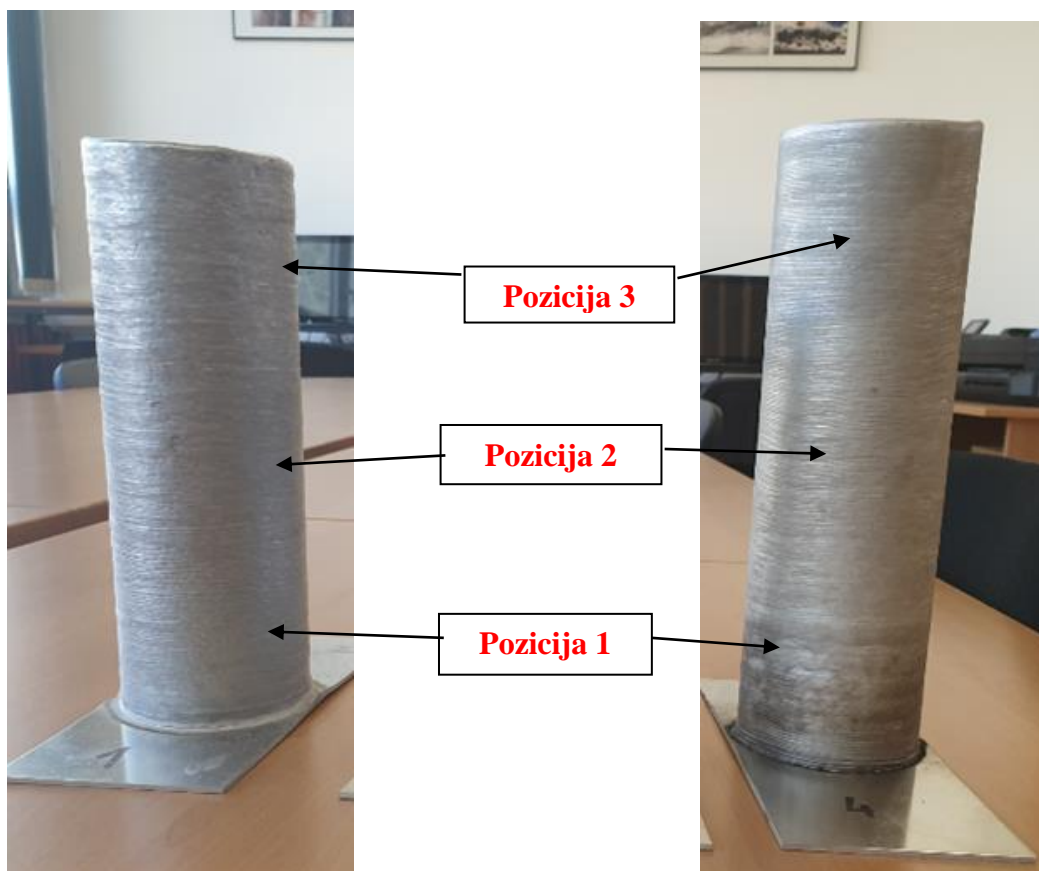
#### **7.3.1. Ispitivanje kemijskog sastava**

Analiza kemijskog sastava provedena je u Laboratoriju za zaštitu materijala pomoću Olympus XRF uređaja s ciljem utvrđivanja mogućih odstupanja u kemijskom sastavu. Za ispitivanje su određene tri točke (pri dnu, po sredini, pri vrhu uzorka) u kojima se snimao kemijski sastav.

Na slici 70. prikazana je oprema za ispitivanje, dok na slici 71. prikazana su (otprilike) mjesta ispitivanja.



Slika 70. Olympus XRF uređaj za snimanje kemijskog sastava



Slika 71. Prikaz odabranih pozicija ispitivanja kemijskog sastava



Rezultati ispitivanja kemijskog sastava prikazani su u tablici 23.

**Tablica 23. Rezultati ispitivanja kemijskog sastava**

| Uzorak 1                  |            |            |            |         | Uzorak 4                  |            |            |            |        |
|---------------------------|------------|------------|------------|---------|---------------------------|------------|------------|------------|--------|
| Udio kemijskog sastava, % |            |            |            |         | Udio kemijskog sastava, % |            |            |            |        |
| Element                   | Pozicija 1 | Pozicija 2 | Pozicija 3 | Atest   | Element                   | Pozicija 1 | Pozicija 2 | Pozicija 3 | Atest  |
|                           | %          | %          | %          | %       |                           | %          | %          | %          | %      |
| Al                        | 86,75      | 84,87      | 83,71      | Ostalo  | Al                        | 93,03      | 93,16      | 93,41      | Ostalo |
| Mg                        | /          | 0,87       | 0,58       | < 0,2   | Mg                        | 6,48       | 6,41       | 6,03       | 4,5    |
| Si                        | 13,07      | 14,06      | 15,52      | 4,5 - 6 | Si                        | 0,13       | 0,15       | 0,2        | 0,25   |
| Fe                        | 0,18       | 0,17       | 0,19       | < 0,6   | Fe                        | 0,084      | 0,074      | 0,079      | 0,4    |
| Pb                        | /          | 0,004      | /          | /       | Mn                        | 0,16       | 0,1        | 0,15       | 0,2    |
| Zr                        | 0,0035     | 0,0027     | 0,0028     | /       | Cr                        | 0,1        | 0,1        | 0,11       | 0,2    |
| Hf                        | /          | 0,018      | /          | /       | Hf                        | 0,027      | /          | /          | /      |
| Cu                        | /          | /          | /          | < 0,3   | Cu                        | /          | /          | /          | 0,1    |
|                           |            |            |            |         | Zn                        | /          | /          | /          | 0,1    |

Ispitivanjem kemijskog sastava uočena su određena odstupanja u odnosu na atest žice. Minimalna odstupanja su uvijek za očekivati i prihvatljiva su, ali odstupanje u udjelu silicija u uzorku 1 je preveliko. Odstupanje se javilo zbog problematike u očitavanju lakih metala koje je karakteristično za XRF metodu. Isto tako nedostatak ove metode je što je površinska metoda te zbog toga nije pouzdana.

### 7.3.2. Radiografsko ispitivanje

S ciljem uočavanja nepravilnosti u volumenu koje nisu vidljive oku, kao što su pore i uključci, provodi se radiografsko ispitivanje. Snimanje je izvedeno izvorima zračenja (RTG izotopi) na slikovne ploče, koje su pomoću skeniranja prebačene u digitalni format zvan TIFF. Takav oblik moguće je koristiti na računalu te pomoću programa analizirati radiograme.

Oprema korištena u ispitivanju:

- RTG uređaj – Balteau 300 D
- Skener – VMI 5100
- Slikovna ploča – Kodak industrex flex Blue

Parametri korišteni u radiografskom ispitivanju prikazani su u tablici 24., a oprema na slici 73.

**Tablica 24. Parametri radiografije**

| Parametri snimanja       |         |
|--------------------------|---------|
| Napon                    | 125 kV  |
| Struje                   | 4 mA    |
| Film fokus udaljenost    | 1000 mm |
| Vrijeme                  | 80 s    |
| Parametri skeniranja     |         |
| Napon lasera             | 15 V    |
| Napon fotopultiplikatora | 5,25 V  |
| Rezolucija skeniranja    | 0,05 mm |

**Slika 72. Izvor X – zračenja**

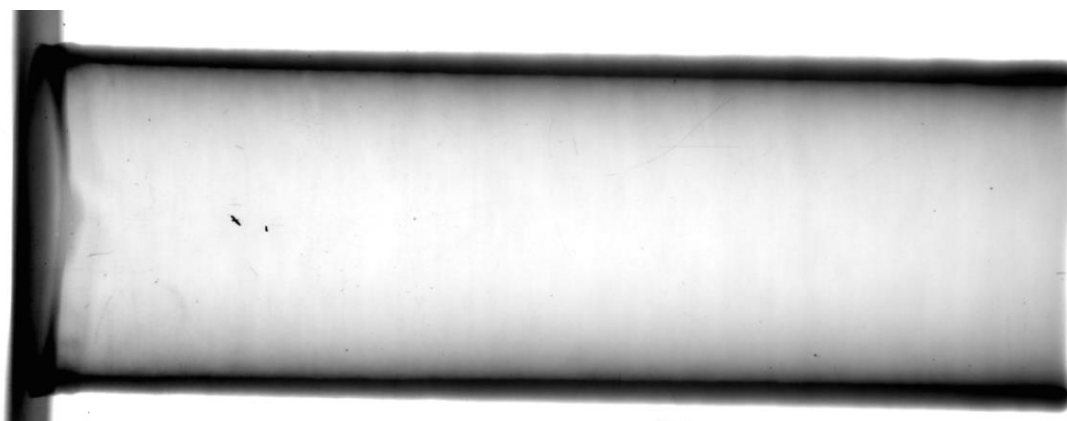
Na slici 73. prikazani su uzorci prije snimanja.



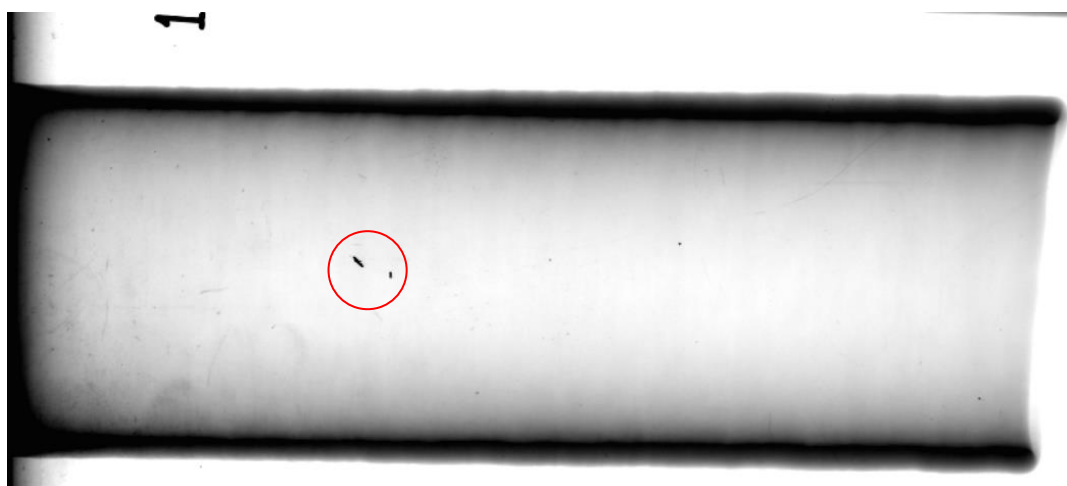
**Slika 73. Uzorci spremni za snimanje – vodoravni položaj**

Radiogramsko ispitivanje provedeno je na način da su se uzorci prvo snimali polegnuto (vodoravno), a kasnije su zarotirani za  $90^\circ$ .

Slike u rasponu od 74. do 81. dobivene su posebnim programom za analizu radiograma. Uz analiziranje rezultata, program ima i neke druge mogućnosti, no jedino je još korišteno mjerenje dimenzija uzoraka (vidi slika 69). Vizualnom analizom, npr. slike 74., uočljiva je razlika u debljini stijenke cijevi. U donjim slojevima puno je manja debljina zida što nije poželjno pri izradi dijelova, zbog drugačijih mehaničkih svojstava. Također, razlika u debljini stijenki cijevi prikazana je u tablici 22. zajedno s drugim dimenzijama.

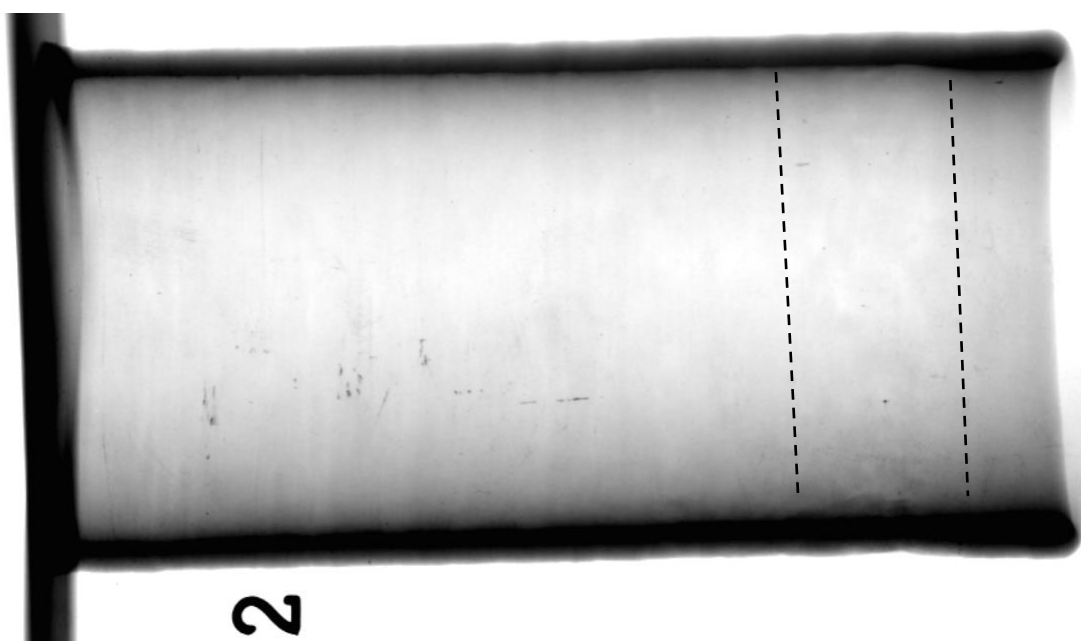


**Slika 74. Uzorak 1 - vodoravno**



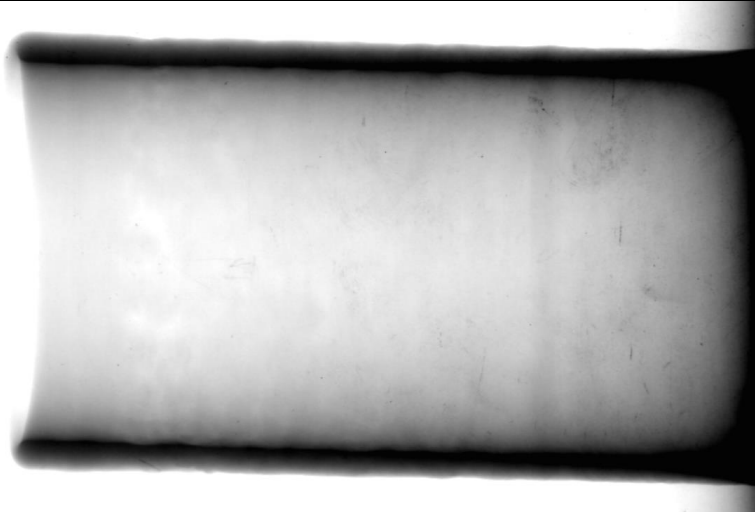
**Slika 75. Uzorak 1 - okomito**

Na slici 75. uočava se crna crta koja predstavlja površinsko oštećenje te nije greška u zavaru.

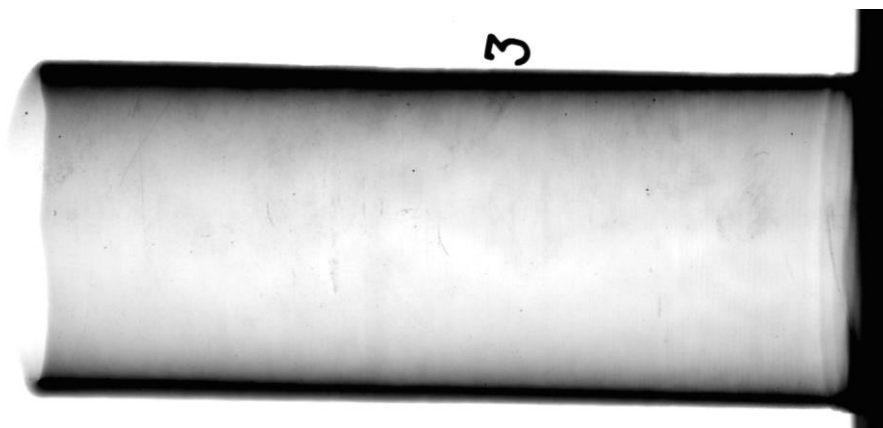


**Slika 76. Uzorak 2 - vodoravno**

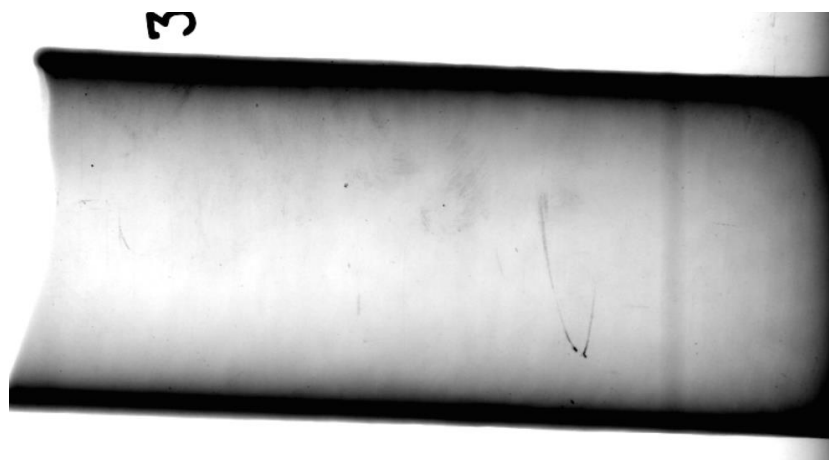
Na slici 76. isprekidanim linijama označeno je područje oštećenja, već prije napomenuto (analiza slika 68.). Na tom dijelu struktura površine nije slojevita kao u ostatku cijevi.



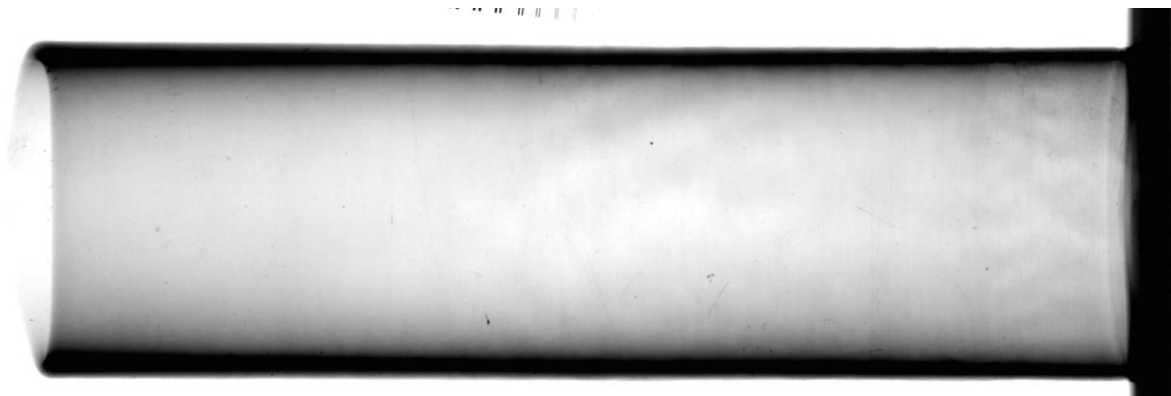
**Slika 77. Uzorak 2 - okomito**



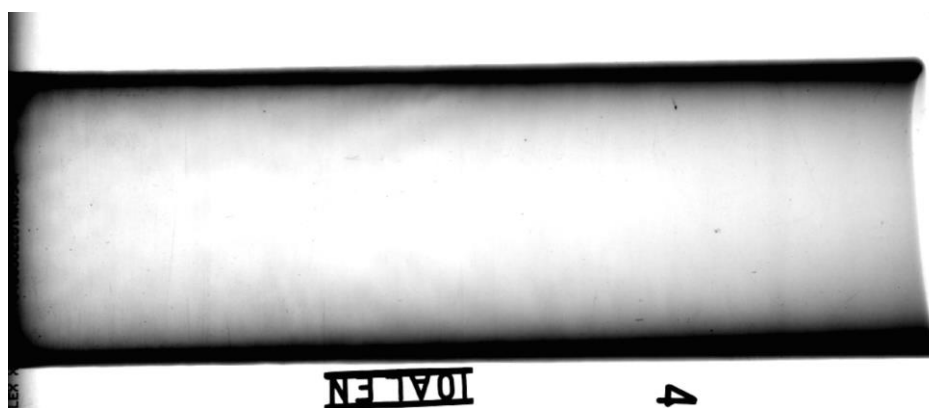
**Slika 78. Uzorak 3 - vodoravno**



**Slika 79. Uzorak 3 - okomito**



Slika 80. Uzorak 4 - vodoravno



Slika 81. Uzorak 4 - okomito

Na okomitom snimanju pojavila se greška u vidu tamnije crte, vidljive u donjim slojevima cijevi 2 i 3. Ta greške ne predstavlja nepravilnost u cijevi, već se javila na radiogramu. Spomenuto površinsko oštećenje uzorka 2 vidljivo je slici 76. Ostali uzorci pokazali su homogenost strukture te nisu uočene greške niti pukotine.

### 7.3.3. Izrada uzoraka

Za ispitivanja kemijskog sastava i radiografsko snimanje bilo je potrebno ispitati ukupni volumen cijevi. Za daljnja ispitivanja potrebno je izraditi dva ispitna uzorka, jedan za svaku aluminijsku leguru. Uzorci su izrađeni rezanjem cijevi 1. i 4. po dužini na tračnoj pili u Laboratoriju za zavarivanje. Za ispitnu površinu uzeta je po jedna bočna strana oba uzorka. Važno je napomenuti da su uzeti uzorci zadnjih nanesenih slojeva zavarivanja.

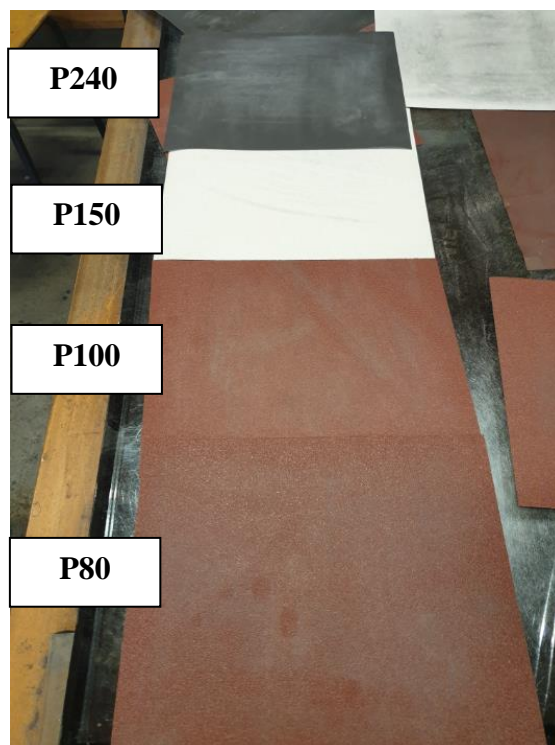
Na slici 82. prikazan je ispitni uzorak.





**Slika 82. Ispitni uzorak**

Nakon izrade uslijedilo je brušenje rubnih površina. Za izradu mikroizbruska korišteni su brusni papiri (vidi slika 83.) sljedećih granulacija površine: P80, P100, P150, P240.

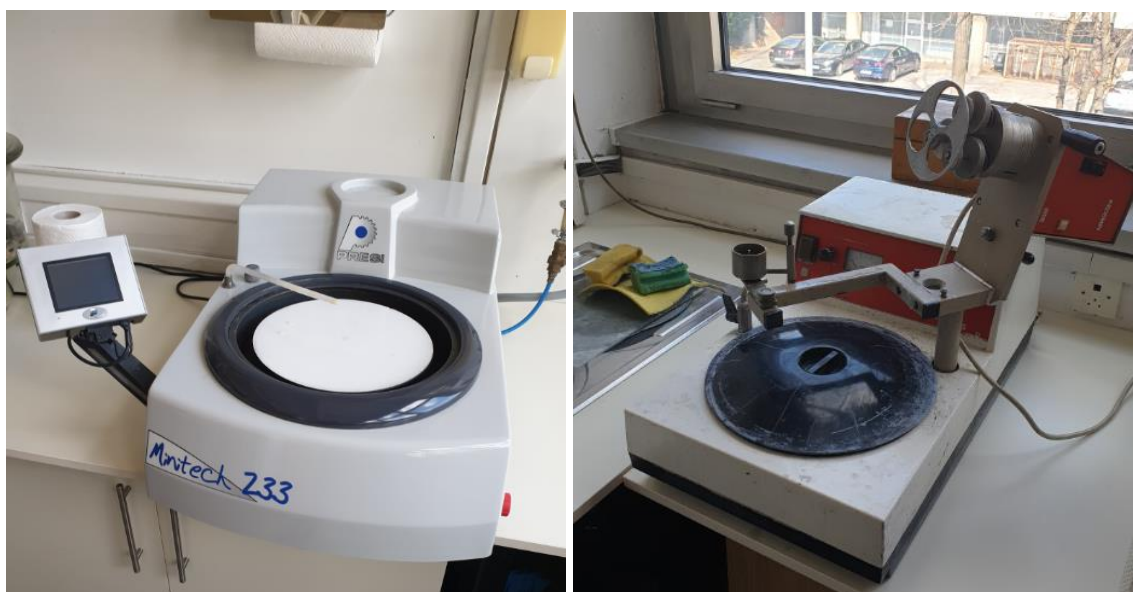


**Slika 83. Brusni papiri različitih granulacija površine**



Nakon završetka početnih koraka, ispitivanje se nastavilo u Laboratoriju za materijalografiju gdje je uslijedila dodatna priprema uzoraka te kasnija analiza makrostrukture i mikrostrukture. Naime za novo brušenje uzoraka korišteni su fini brusni papiri granulacija površine: P320, P600, P1200, P2400, P4000. Za razliku od prvog brušenja, koje je bilo obavljeno ručno, ovaj set brušenja izveden je pomoću uređaja za brušenje Minitech 233 tvrtke Presi. Ispitivanje se izvodilo uz prisutnost vode čija je svrha hlađenje i podmazivanje ispitne površine zbog brzine okretanja od  $300 \text{ min}^{-1}$ . Nadalje, nakon odrađenog brušenja uslijedilo je poliranje, za koje je korišten uređaj tvrtke Struers.

Uređaji za brušenje i poliranje prikazani su na slici 84.



**Slika 84. Uređaj za brušenje (lijevo) i uređaj za poliranje (desno)**

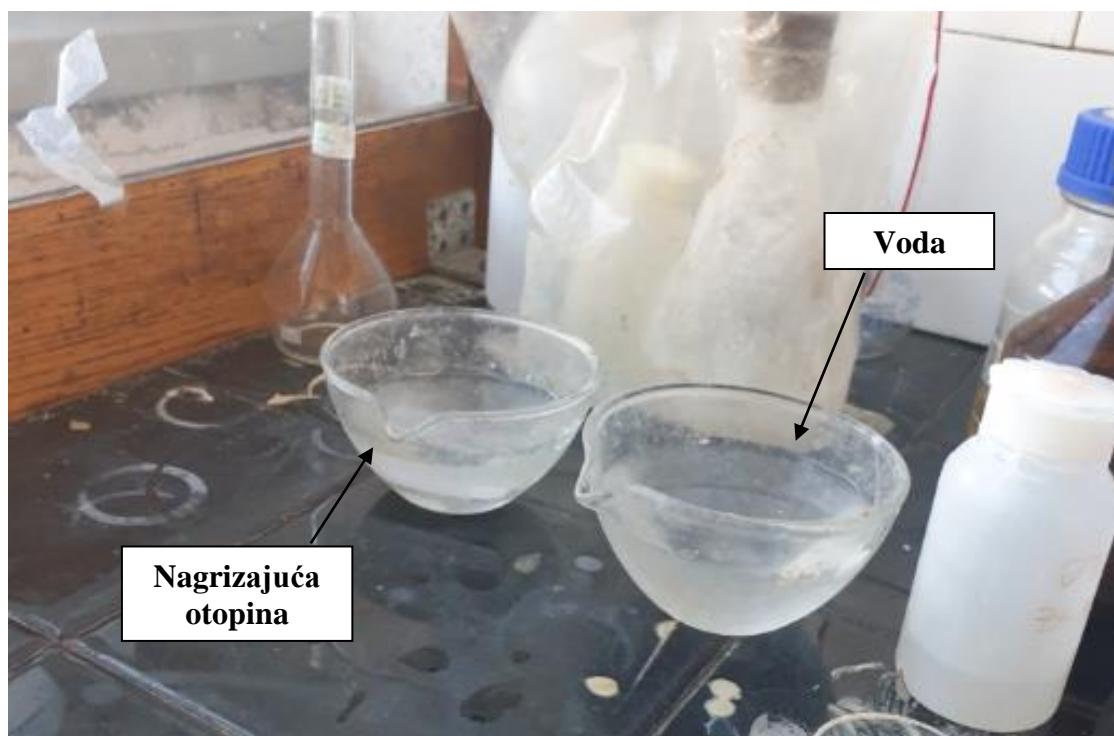
Poliranje je izvedeno u dva koraka. Razlika u koracima jedino je u primjeni različitih dijamantnih pasta pa je tako u prvom koraku korištena dijamantna pasta od 3 mikrona, dok u drugom koraku u vrijednosti od 0,03 mikrona. Uz dijamantnu pastu, za poliranje se koristila i tkanina po kojoj je tekao lubrikant s ciljem očuvanja strukture, a brzina okretanja iznosila je  $150 \text{ min}^{-1}$ . Slijedeći korak u pripremi uzoraka bio je postavljenje uzoraka u nagrizajuću otopinu. Sastav takve otopine ovisi o materijalu koji se ispituje, a u ovom slučaju korištena je otopina Kellerov reagens opisana u tablici broj 25.

**Tablica 25. Sastav smjese nagrizajuće otopine**

| Spoj             | Količina |
|------------------|----------|
| HNO <sub>3</sub> | 2,5 ml   |
| HCl              | 1,5 ml   |
| Hf               | 1 ml     |
| Destilirana voda | 95 ml    |

Ispiranje uzoraka u nagrizajućoj otopini odvijalo se u trajanju od jedne minute, nakon čega je uslijedilo ispiranje u vodi.

Na slici 85. prikazane su korištene tekućine u pripremi ispitnih površina.



**Slika 85. Smjesa nagrizajuće otopine i voda korišteni u pripremi uzoraka**

Tijekom svih postupaka pripreme vrlo je važno izbjegavati dodirivanje ispitnih površina radi mogućeg zamašćivanja površine što bi ometalo daljnja ispitivanja. Ukoliko dođe do dodira, postupke pripreme trebalo bi provesti ispočetka.

Na slici 86. prikazani su ispitni uzorci nakon završetka pripreme ispitnih površina.



**Slika 86. Uzorci nakon provedene pripreme**

#### **7.3.4. Analiza makrostrukture**

Kako su uzorci uklonjeni s površine cijevi, postojao je problem postavljanja uzoraka radi njihove zaobljenosti. Taj problem riješen je korištenjem gline za fiksiranje uzorka tokom ispitivanja.

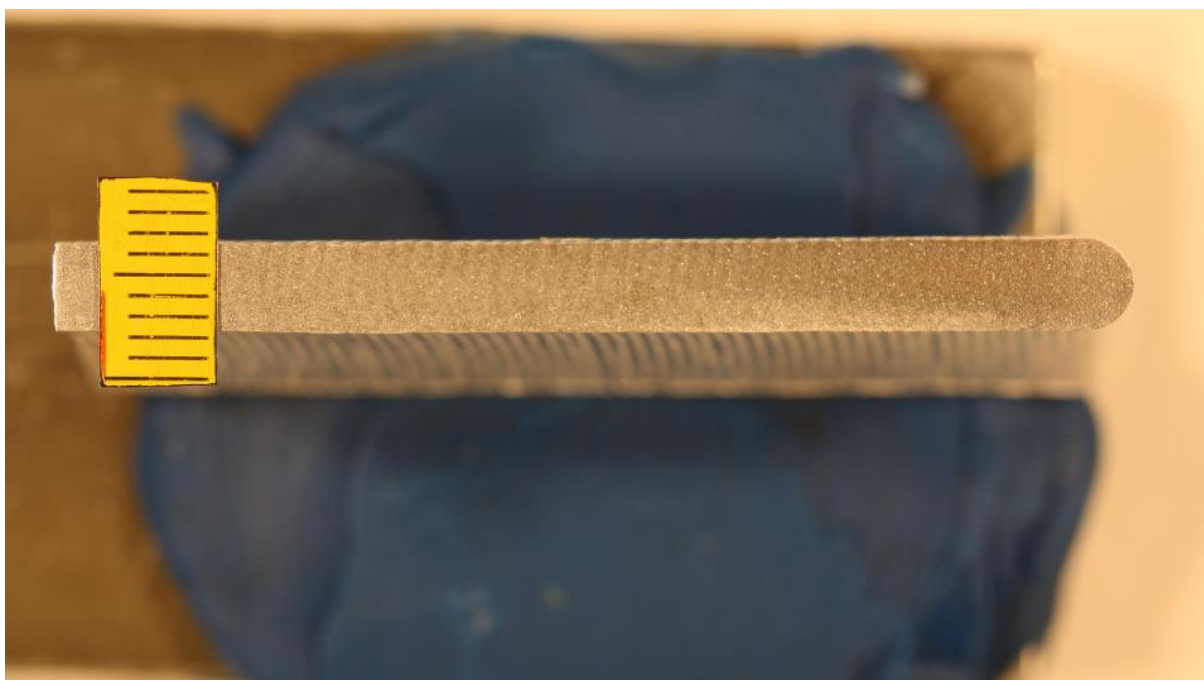
Na slici broj 87. prikazana je oprema za snimanje makrostrukture, dok na slikama 88. i 89. prikazani su dobiveni rezultati.



**Slika 87. Oprema za snimanje makrostrukture**



**Slika 88. Analiza makrostrukture uzorka 1**



**Slika 89. Analiza makrostrukture uzorka 4**

Analizom dobivenih rezultata vidljivi su prolazi na uzorku 4, dok kod uzorka 1 su teško uočljivi. S druge strane, iako su obje površine relativno ravne, valovitost je nešto veća kod uzorka 1 u usporedbi s uzorkom 4. Iako postoje manje nepravilnosti, uzorci su pokazali da nema većih geometrijskih odstupanja, a sam uzorak je okomit što znači da nije došlo do



pojave naljepljivanja i naginganja. To sve dovodi do zaključka da ukoliko ova cijev bude primijenjena, naknadna obrada biti će minimalna, a samim tim postignut je i niski BTF omjer.

### 7.3.5. Analiza mikrostrukture

Pri završetku makroanalize uslijedila je mikroanaliza. Ispitivanje je provedeno na svjetlosnom mikroskopu „Olympus GX 51“, prikazanog na slici 90.

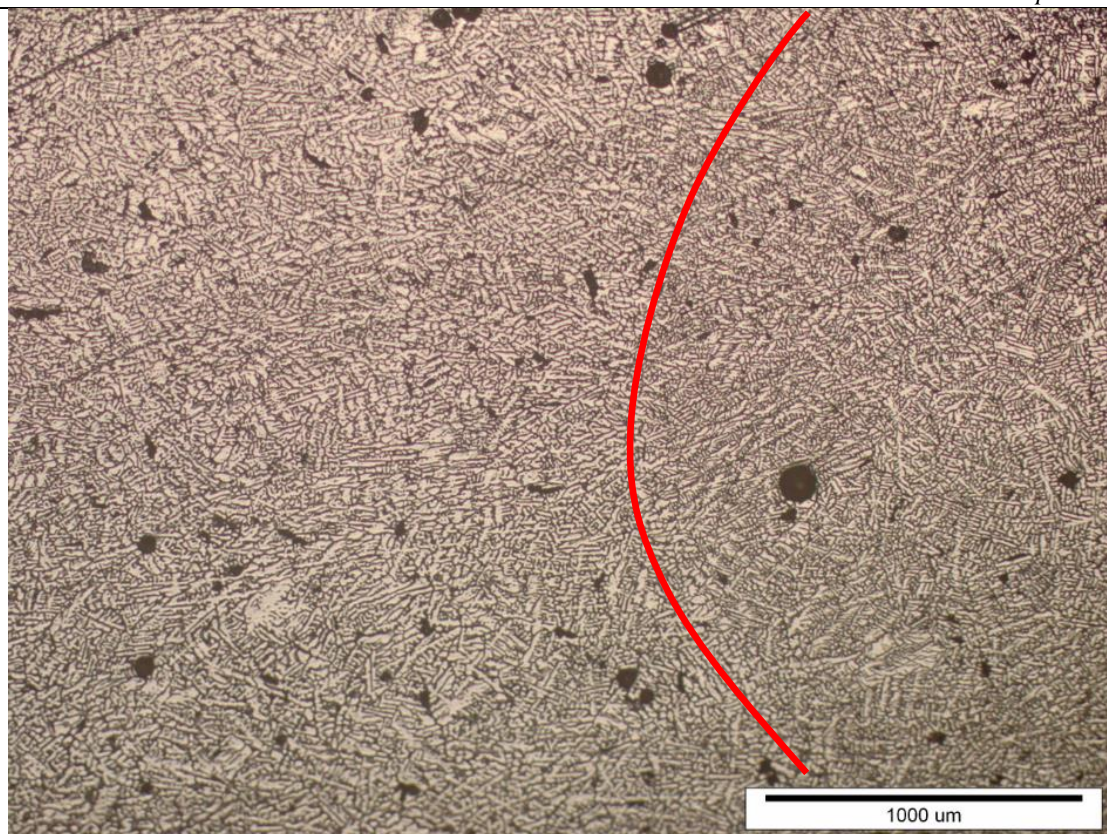


**Slika 90. Svjetlosni mikroskop Olympus GX 51**

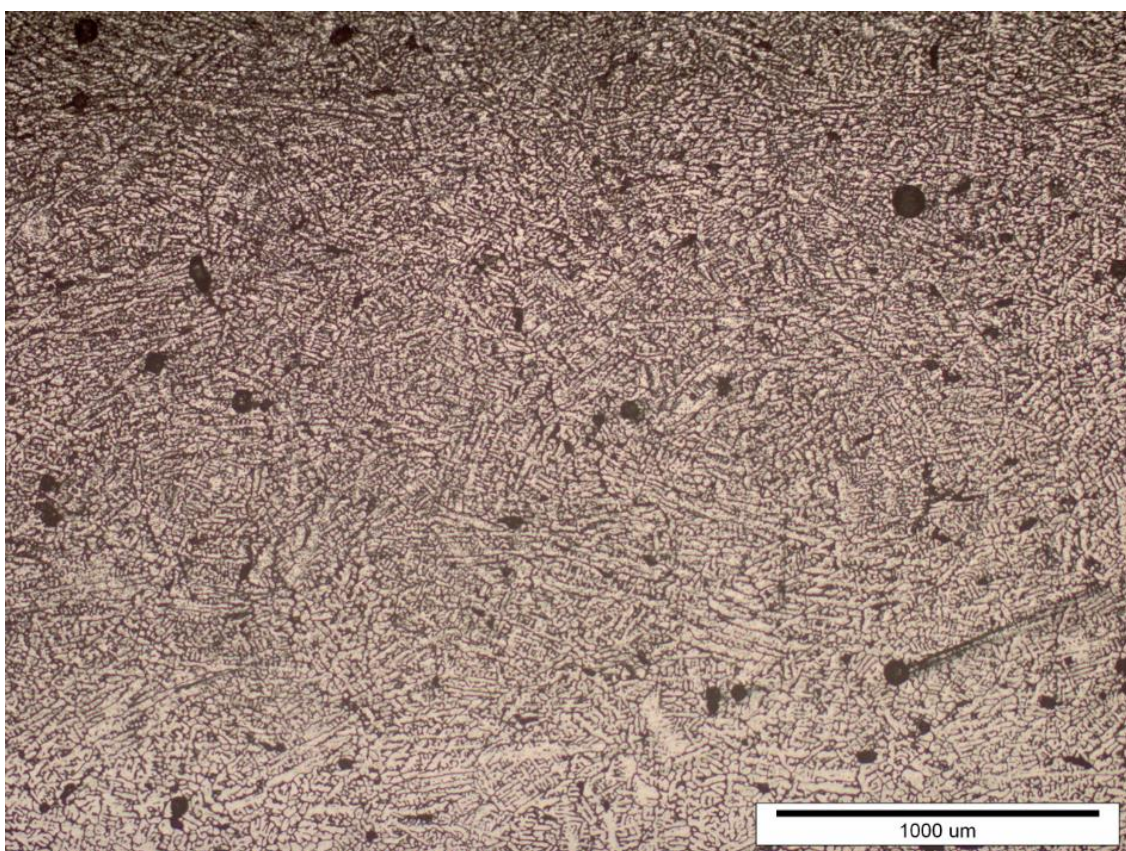
Za ispitivanja odabrana su dva mjesta analize oba uzorka. Prvo mjesto ispitivanja je krajnji dio uzorka, tj. onaj dio koji predstavlja zadnji naneseni sloj izrade, dok za drugo mjesto je odabrana sredina uzorka.

Rezultati analize mikrostrukture prikazani su na slikama 91. i 92.





**Slika 91. Uzorak 1 - mikrostruktura vrha ispitne površine**

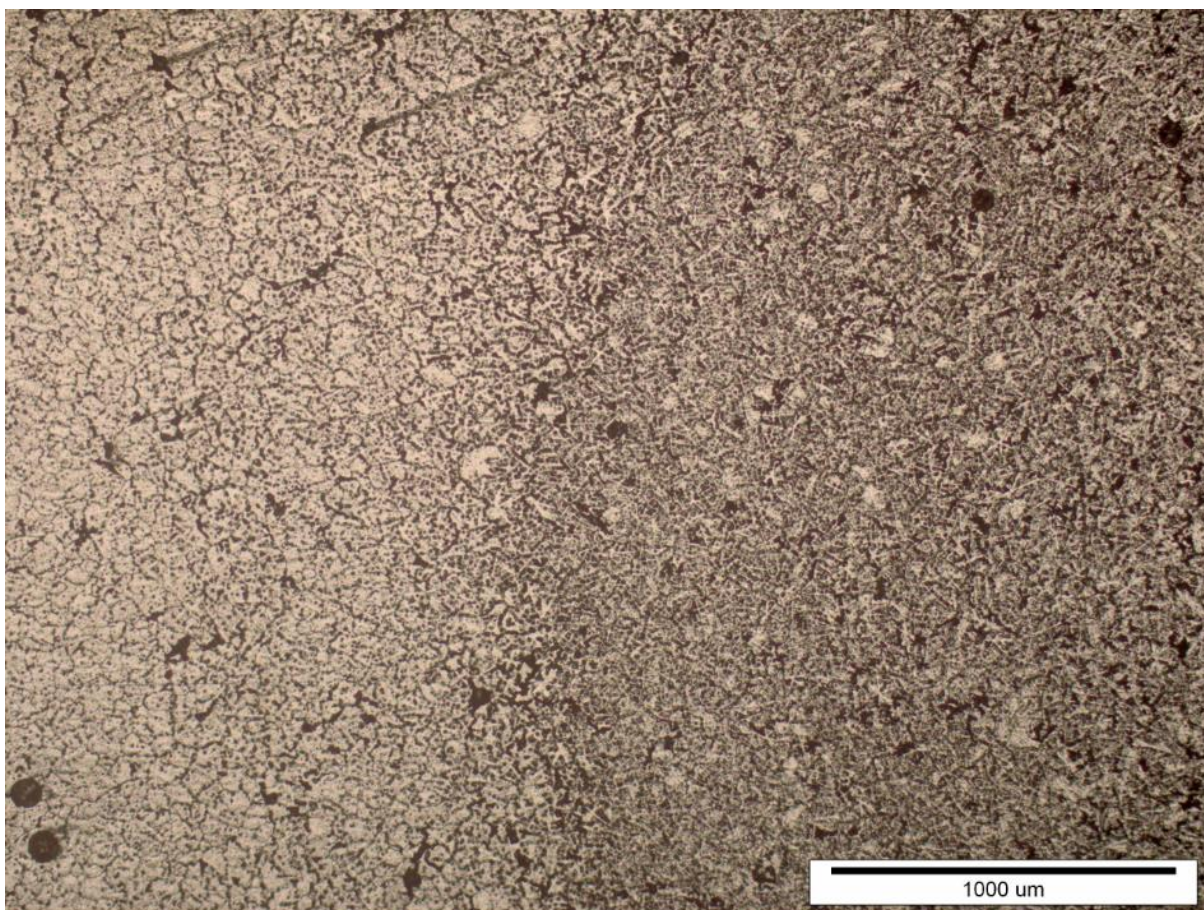


**Slika 92. Uzorak 1 - mikrostruktura sredine ispitne površine**



Analizom uzorka 1 nisu zamijećene nikakve greške, ni pukotine, već mikrostruktura izgleda homogeno. Crne točke vidljive na obje gornje slike predstavljaju pore, ali kod primjene aluminija one su uvijek očekivane i nemoguće ih je izbjeći. Iako postoje, takve pore ne predstavljaju problem za mehanička svojstva dobivenog dijela.

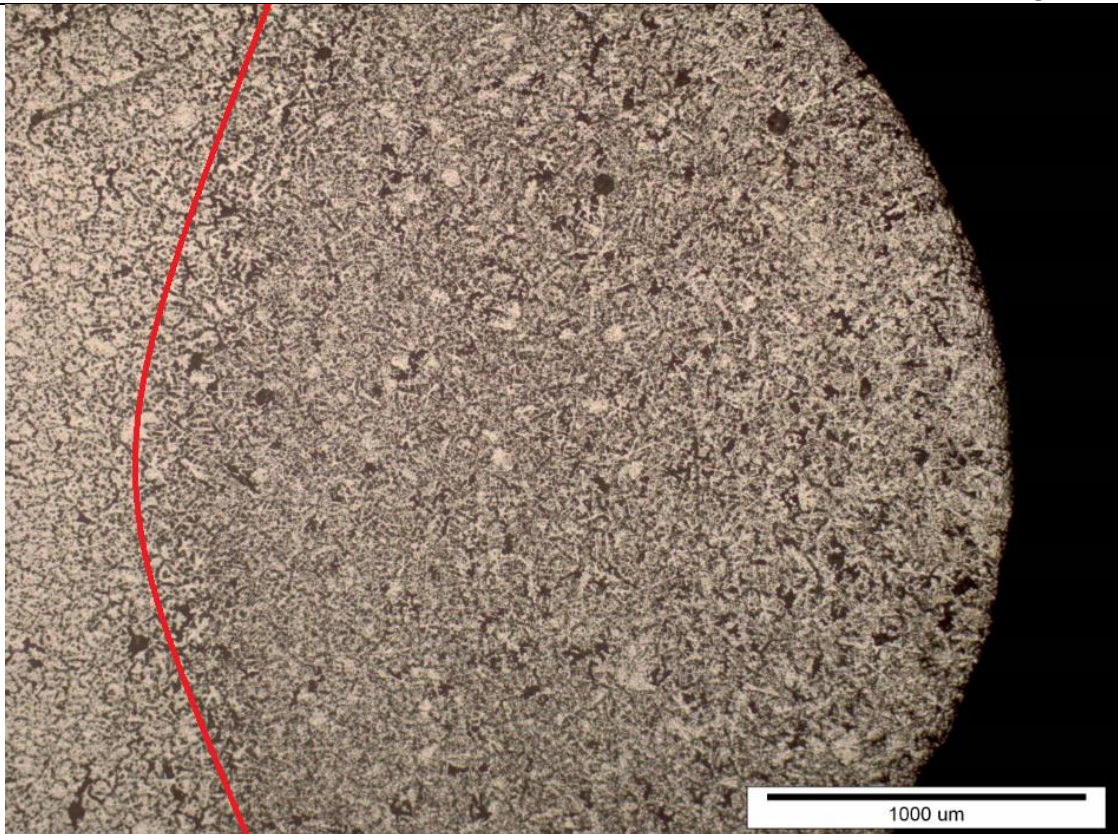
Analizom uzorka 4 (AlMg-5) dobiveni su sljedeći rezultati vidljivi na slikama 93. i 95.



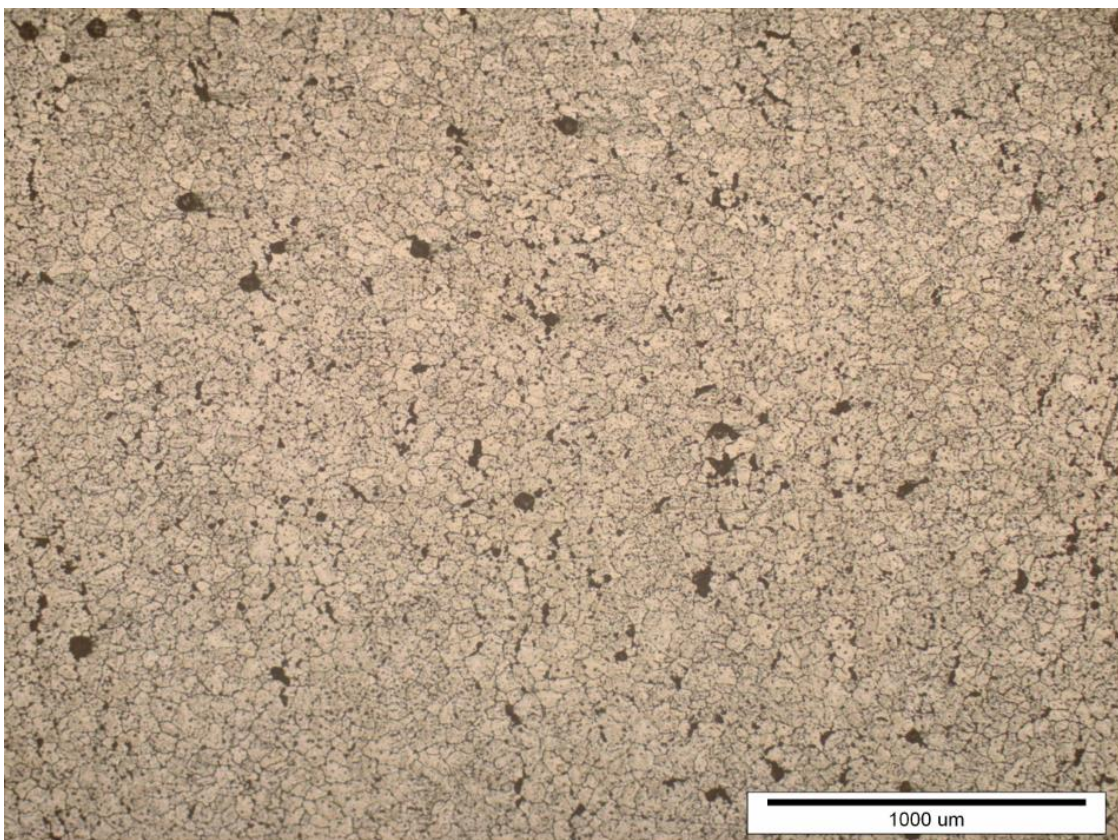
**Slika 93. Uzorak 4 - mikrostruktura vrha ispitne površine**

Na slici 93. uočljiva je granica u mikrostrukturi, odnosno vidljiv je zadnji sloj izrade. Na slici 94. crvenom linijom prikazan je ta granica.





**Slika 94. Uzorak 4 - prikaz razlike u mikrostrukтури**

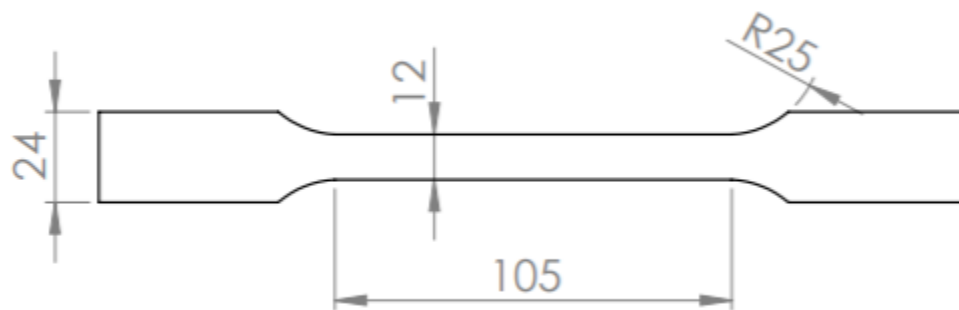


**Slika 95. Uzorak 4 - mikrostrukтура sredine ispitne površine**

Za razliku od vrhova uzoraka, u ostatku presjeka mikrostruktura je po cijelom ispitnom uzorku ujednačena i nisu vidljive nikakve nepravilnosti. Kao i kod uzorka 1, na slikama su vidljive male pore. Gledajući rezultate makro i mikro analize može se zaključiti da su oba uzorka vrlo dobro izvedena te da veće nepravilnosti nisu uočene.

### 7.3.6. Statičko – vlačno ispitivanje

Za statičko vlačno ispitivanje izrađene su epruvete u Laboratoriju za alatne strojeve. Uzorci su rađeni prema normi ISO 4136, a dimenzije su prikazane na slici 96, dok su ispitne epruvete prikazane na slici 97.



Slika 96. Dimenzije epruveta



Slika 97. Ispitne epruvete

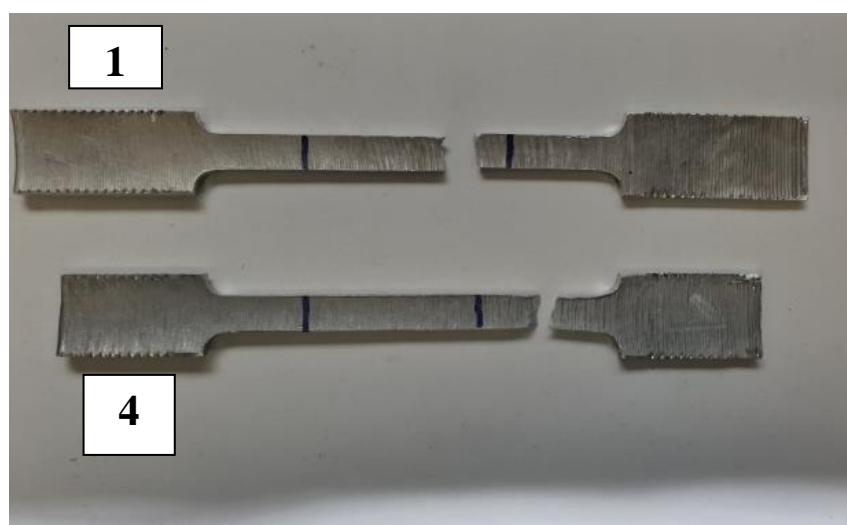


Epruvete su umetnute na kidalicu tvrtke Heckert (slika 98), a cijeli postupak se mogao pratiti na računalu. Na kraju pokusa, računalo je dalo vrijednosti konvencionalne granice tečenja, vlačne čvrstoće i sile razvlačenja, kao i dijagram sila – produljenje. Produljenje uzoraka mjerilo se unutar granica ucrtanih po sredini ispitnih epruveta.



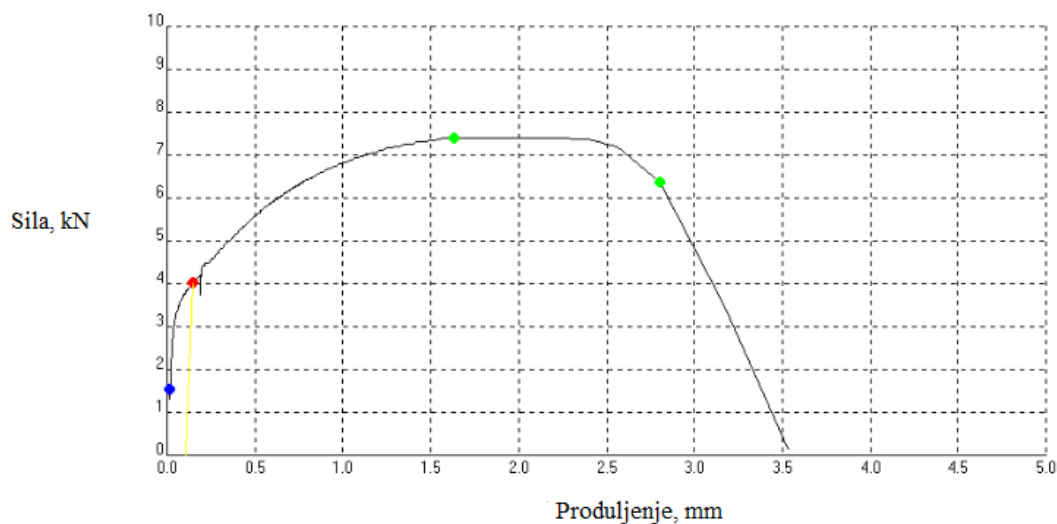
**Slika 98. Kidalica**

Na slici 99. prikazane su ispitne epruvete na kraju ispitivanja.

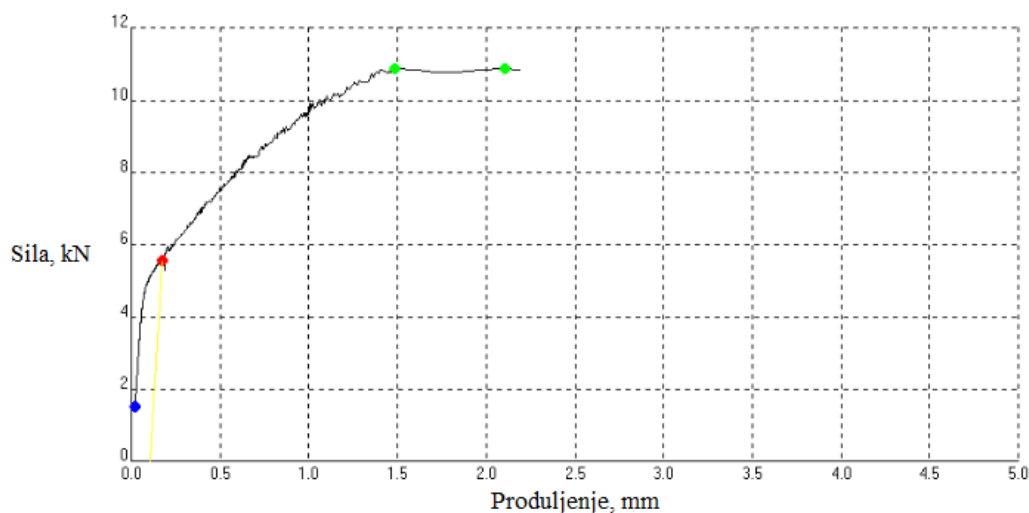


**Slika 99. Ispitne epruvete 1 i 4 nakon završetka ispitivanja**

Pokus je završio pucanjem obiju epruveta, a dijagrami sila – produljenje za uzorke 1 i 4 prikazani su na slikama 100. i 101.



Slika 100. Dijagram sila - produljenje uzorka 1



Slika 101. Dijagram sila - produljenje uzorka 4

Mehanička svojstva uzoraka 1 i 4 dobivena statičko vlačnim pokusom prikazana su u tablici 26..

Tablica 26. Mehanička svojstva uzoraka 1 i 4

|          | $R_{p0,2}$ | $R_m$  | $F_m$ |
|----------|------------|--------|-------|
| Uzorak 1 | 64,07      | 117,82 | 7,41  |
| Uzorak 4 | 111,94     | 219,88 | 10,88 |

Vizualnom kontrolom uzorka može se uočiti da pucanje epruveta nije ostvareno na sredini, već su obje pukle bliže desnom kraju epruvete. Taj kraj predstavlja donje slojeve u izradi cijevi, a kao što je prije napomenuto donji slojevi su dali manju debljinu stijenke. Stoga moglo se očekivati da će epruvete biti sklonije pucanju pri manjim vrijednostima poprečnog presjeka. Nadalje, prema tablici 22., uočljivo je da je razlika u debljini slojeva između najmanje i najveće debljine puno izraženija kod uzorka 4, nego kod uzorka 1. Ta činjenica objašnjava razlog pucanja uzorka 4 puno dalje od sredine epruvete u odnosu na uzorak 1. Uspoređujući mehanička svojstva između danih vrijednosti prije početka izrade cijevi i rezultata dobivenih statičko vlačnim pokusom, može se zaključiti da nema većih odstupanja. Isto tako mjerenje produljenja nije mjereno zbog pucanja izvan zacrtanih granica.

## 8. ZAKLJUČAK

WAAM tehnologija predstavlja relativno mladu granu aditivne proizvodnje koja je još u fazi istraživanja i razvoja. Sve veća primjena ove tehnologije bazira se na velikoj brzini taloženja i izrazito maloj količini otpadnog materijala zbog čega se WAAM ponajviše koristi za izradu srednjih i velikih dijelova. Zbog takvih karakteristika moguće je ovom tehnologijom zamijeniti neke tradicionalne postupke proizvodnje. WAAM tehnologija koristi već postojeću zavarivačku opremu u kombinaciji s robotom ili CNC strojem pa stoga nisu potrebna velika ulaganja. Međutim, razvoj WAAM-a direktno je povezan s razvojem zavarivačke industrije. Modificiranjem MIG/MAG postupka razvio se CMT postupak. Temeljen je na prijenosu materijala kratkim spojevima pri čemu se primjenjuje mehaničko rješenje u vidu povrata žice, rezultirajući kontroliranim prijenosom metala uz eliminiranje prskanja. Ovaj postupak karakterizira nizak unos topline zahvaljujući niskoj struji kratkog spoja te je idealan u izradi većih dijelova čime su izbjegnuta velika zaostala naprezanja. Unos topline kod CMT-a manji je i od impulsnog zavarivanja, koje bi konvencionalno bilo primijenjeno. Manji unos topline direktno je povezan s mehaničkim svojstvima. Naime, kod aluminijske cijevi, manji unos topline rezultirati će boljim vrijednostima čvrstoće i tvrdoće, ali slabijom duktilnosti i žilavosti.

U eksperimentalnom dijelu rada izrađene su aluminijske cijevi pomoću CMT postupka koristeći WAAM tehnologiju. Proizvodnja je odrađena vrlo brzo zbog kontinuiranog nanošenja slojeva, a vizualna kontrola dala je zadovoljavajuće rezultate. Okomita konstrukcija s minimalnom valovitošću i bez naljepljivanja ukazala je na dobar odabir parametara. Ispitivanjima se pokušala ispitati cjelokupna građa cijevi. Radiografskim ispitivanjem ustanovljeno je da nije došlo do pojave poroznosti. Mikro i makro analize su pokazale da nije došlo do pojave većih grešaka te da je struktura homogena, a statičko vlačno ispitivanje je potvrdilo mehanička svojstva dodatnih materijala. Problemi koji su se javili posljedica su izostanka zagrijavanja podloge na kojoj su se proizvele cijevi. Naime, zbog velikih početnih razlika u temperaturi prvi slojevi su se brže hladili te je takva pojava rezultirala užim zavarom. Nastojeći kompenzirati nedostatak zagrijavanja podloge, u početku se odredila veća brzina dovođenja žice s ciljem veće količine depozita, a samim time i širim zavarom. Olakšavajuća okolnost bila je upotreba aluminijske cijevi zbog čije je velike toplinske provodnosti bilo lakše održati manju temperaturu radnog komada. Kasnijom nadogradnjom slojevi su bili širi jer su se nanosili na već zagrijane donje slojeve. Ovakvi uvjeti rezultirali su dobivenim

uzorcima koji su imali različite debljine u donjim i gornjim slojevima. Gledajući tablicu 22. uočava se puno veća razlika u rasponu debljina kod uzorka 4 u odnosu na uzorak 1. Ta činjenica bila je vidljiva pri statičko vlačnom ispitivanju gdje je uzorak 4 puknuo pri dnu epruvete, zbog manjeg poprečnog presjeka. Iako su dobiveni uzorci pokazali dobre rezultate pri ispitivanjima, problemi u geometriji mogu stvoriti probleme kao povećani gubitak materijala i narušavanje BTF omjera. Isto tako moguće je i prijevremeno pucanje uzorka zbog narušenih mehaničkih svojstava.

Analizom provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata, dolazi se do zaključka da primjena CMT postupka u WAAM tehnologiji može dati izvrsne rezultate. Činjenica da nije došlo do pojave pora zavarivanjem aluminijskog materijala dovoljan je pokazatelj mogućnosti ovog postupka. Nadalje, izostanak deformacija te relativno dobra preciznost i niska potrošnja energije čine CMT izrazito prikladnim postupkom. Dobar odabir parametara u kombinaciji s odgovarajućim postupcima prije i za vrijeme zavarivanja, jednako je važno kao i sam postupak zavarivanja.

Stoga ne čudi sve veća primjena CMT postupka u WAAM tehnologiji, a daljnja istraživanja i razvoj mogu otvoriti neka nova područja primjene. Za početak bilo bi korisno provesti istraživanje plinske mješavine s helijem pri CMT postupku. Nadalje, usavršavanje postupka valjanja nakon svakog prolaza s ciljem smanjenja zaostalih naprezanja, a da se pri tome ne utječe na brzinu izrade dijela. Svakodnevnim napretkom u industriji i pomicanjem limita za očekivati je i savladavanje najveće prepreke za WAAM – povećanje kompleksnosti dijelova.



## LITERATURA

- [1] D. Godec, M. Šercer: Aditivna proizvodnja, Udžbenici sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 2015.
- [2] A. Pilipović: Aditivna proizvodnja, Iz svijeta plastike i gume, članak Aditivna proizvodnja, Polimeri 33 (2012) 3-4.
- [3] C. Weller, R. Kleer, F. T. Piller: Economic implications of 3D printing: Market structure model in light of additive manufacturing revisited, Production Economics, Njemačka, 2015.
- [4] K. V. Wong, A. Hernandez: A review of additive manufacturing, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Miami, USA, 2012.
- [5] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li: Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, DOI 10.1007/s00170-015-7077-3, London 2015.
- [6] L. D. Sturm, C. B. Williams, J. A. Camelio, J. White, R. Parker: Cyber-physical vulnerabilities in additive manufacturing systems, USA, 2017.
- [7] N. Knezović, A. Topić: Wire and arc additive manufacturing (WAAM) – a new advance in manufacturing, New Technologies NT-2018, 4th International Conference, Sarajevo, 2018.
- [8] D. Ilić: Optimizacija prijenosa metala za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [9] S. Williams: Large scale metal wire + arc additive manufacturing of structural engineering parts, Cranfield university, prezentacija, dostupno 26.2.2020.
- [10] N. Knezović: Aditivna proizvodnja uz pomoć električnog luka i žice kao dodatnog materijala – trenutno stanje i potencijal, časopis Zavarivanje, Mostar, 2018.
- [11] A. Busachi, J. Erkoyuncu, P. Colegrove, F. Martina, J. Ding: Designing a WAAM based manufacturing system for defence applications, Elsevier, 2015.
- [12] K. S. Derekar: A review of arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium, Materials science and technology, vol 34, NO.8,895-916, 2018.

- [13] [https://www.bouwenmetstaal.nl/uploads/editor/09\\_technologyday\\_2018\\_richardson.pdf](https://www.bouwenmetstaal.nl/uploads/editor/09_technologyday_2018_richardson.pdf), dostupno 21.2.2020.
- [14] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, P. Colegrove: Wire + arc additive manufacturing, *Materials science and technology*, 32:7, 641-647, 2016.
- [15] I. Juraga, K. Ljubić, M. Živčić, I. Garašić: Pogreške u zavarenim spojevima, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Četvrto prerađeno i dopunjeno izdanje, Zagreb, 2015.
- [16] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li: A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 31 101-110, University of Wollongong, Australija, 2015.
- [17] T. A. Rodrigues, V. Duarte, R. M. Miranda, T. G. Santos and J. P. Oliveira: Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM), *Materials*, doi:10.3390, 2019.
- [18] D. Ding: Process planning for robotic wire arc additive manufacturing, Doctor of philosophy thesis, School of mechanical, materials and mechatronics engineering, University of Wollongong, 2015.
- [19] M. Gojić: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Metalurški fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Sisak, 2003.
- [20] D. Radočaj, M. Jurica, S. Kos, T. Pavlic: Programiranje industrijskih robota za potrebe robotiziranog zavarivanja, *Zavarivanje – časopis za zavarivanje i srodne tehnologije, siječanj-travanj*, vol. 59., Zagreb, 2016.
- [21] V. V. Subramania: WAAM Martensitic Stainless Steel: Process Optimization & Resulting Weld Geometrical Characterization, Masters degree, Delft University of Technology, 2017.
- [22] J. Muller, M. Grabowski, C. Muller, J. Hensel, J. Unglaub, K. Thiele, H. Kloft, K. Dilger: Design and parameter identification of wire and arc additively manufactured (WAAM) steel bars for use in construction, *Metals*, 9,725; doi: 10.3390/met9070725, 2019.
- [23] P. Colegrove, S. Williams: High deposition rate high quality metal additive manufacture using wire + arc technology, Cranfield University, pdf, preuzeto 5.9.2019.
- [24] T. Filetin, F. Kovačiček, J. Indof: Svojstva i primjena materijala, udžbenici sveučilišta u Zagrebu, 2019.
- [25] G. Mathers: The welding of aluminium and its alloys, Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, Engleska, 2002.

- [26] T. Benković: Elektrokemijska oksidacija aluminija, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2017.
- [27] I. Juraga, M. Živčić, M. Gracin: Reparturno zavarivanje, Zagreb 1994.
- [28] [https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/al\\_lg.pdf](https://www.sfsb.hr/kth/zavar/tii/al_lg.pdf), dostupno 1.3.2020.
- [29] [https://www.researchgate.net/figure/Optically-observed-porosity-for-the-WAAM-2219-aluminum-alloys-by-different-modes-a\\_fig3\\_325175966](https://www.researchgate.net/figure/Optically-observed-porosity-for-the-WAAM-2219-aluminum-alloys-by-different-modes-a_fig3_325175966), dostupno 1.3.2020.
- [30] B. Kovačević, M. Živčić: Zavarivanje aluminijskih materijala (četvrti dio), Znanstveno stručni časopis Zavarivanje, br. 3/4 , 2013.
- [31] M. Horvat, V. Kondić, D. Brezovečki: Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, Stručni članak 8,4, 426-432, 2014.
- [32] [http://www.fsb.unizg.hr/usb\\_frontend/files/1398155789-0-mig\\_magzav1.ppt](http://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1398155789-0-mig_magzav1.ppt), dostupno 3.3.2020.
- [33] S. Kralj, B. Radošević, Z. Kožuh, I. Garašić: Strojevi i oprema za zavarivanje, podloge, FSB – katedra za zavarene konstrukcije, Zagreb, 2013.
- [34] [https://www.bouwenmetstaal.nl/uploads/editor/09\\_technologyday\\_2018\\_richardson.pdf](https://www.bouwenmetstaal.nl/uploads/editor/09_technologyday_2018_richardson.pdf), dostupno 3.3.2020.
- [35] S. Kralj, Z. Kožuh, Š. Andrić: Zavarivački i srodni postupci, priručnik, Hrvatsko društvo za tehniku zavarivanja, Zagreb, 2015.
- [36] <https://vdocuments.mx/zavarivanje-i-skripta.html>, dostupno 2.3.2020.
- [37] G. Posch, W. Scherleitner, D. Matei: The evolution of CMT: From joining and cladding to metal additive manufacturing and pinning, Zavarivanje, časopis za zavarivanje i srodne tehnologije, svibanj-kolovoz, vol. 58. 57-128, Zagreb, 2015.
- [38] <http://www.toolec.com.ph/products/high-technology-welding-welding/fronius-cmt-cold-metal-transfer>, preuzeto 10.9.2019.
- [39] T. Tucman: CMT proces – nova revolucija u digitalnom zavarivanju, 5. seminar, Aluminij i aluminijske legure, Pula, 2008.
- [40] N. E. Imoudu: The characteristics of cold metal transfer (CMT) and its application on cladding, Master's thesis in technology and safety in the high north, Faculty of Technology, University of Norway, June 2017.
- [41] G. Posch, H. Weber, G. Schmitt: Inovative GMAW solutions for high-alloyed and nickle based overlays, Paper ID: C-002, Fronius, Austrija, 2013.
- [42] K. Himmelbauer: The CMT process – A revolution in welding technology, Fronius International GmbH

- [43] L. Pavlič: Primjena Cold Metal Transfer (CMT) zavarivanja u izradi zavarenih konstrukcija i proizvoda, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Slavonski Brod, 2015.
- [44] S. Selvi, A. Vishvaksean, E. Rajasekar: Cold Metal Transfer (CMT) technology – An overview, Elsevier, India, 2018.
- [45] CMT Cold Metal Transfer, Prezentacija, Fronius International GmbH, Wels
- [46] B. Cong, J. Ding, S. Williams: Effect on arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6,3% Cu alloy, Springer, International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2015) 76: 1593-1606, London 2014.
- [47] <https://www.fronius.com/en/welding-technology/our-expertise/welding-processes/cmt-pulse-advanced>, preuzeto 11.9. 2019.
- [48] J. L. Prado-Cerqueira, J. L. Dieguez, A. M. Camacho: Preliminary Development of Wire and arc additive manufacturing system (WAAM), Elsevier, Manufacturing Engineering society international Conference 28-30 june, 2017, Vigo (Pontevedra), Spain
- [49] <https://www.fanuc.eu/bg/en/robots/robot-filter-page/arc-welding/arcmate-120ic>, dostupno 7.3.2020
- [50] <http://www.tps-i.com/en/>, dostupno 9.3.2020.
- [51] M. Graf, A. Halsig, K. Hofer, B. Awiszus, P. Mayr: Thermo-mechanical modelling of wire-arc additive manufacturing(WAAM) of semi-finished Products, Metals, 8, 1009; doi:10.3390/met8121009, 2018.
- [52] B. Kovačević, M. Živčić: Zavarivanje aluminijskih materijala (sedmi dio), Zavarivanje 58(2015)3/4
- [53] [http://www.alruqee.com/Userfiles/Product/TablePdf/15112015000000B\\_Boehler%20S-Al%20Si%205\\_solid%20wire.pdf](http://www.alruqee.com/Userfiles/Product/TablePdf/15112015000000B_Boehler%20S-Al%20Si%205_solid%20wire.pdf), preuzeto 9.3.2020.
- [54] <https://artediem.ro/product/sarma-plina-bohler-union-almg5-1-2-mm-7-0-kg/>, preuzeto 9.3.2020.

## **PRILOZI**

I. CD-R disc