

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, STROJARSTVA I  
BRODOGRADNJE**

**POS LIJEDIPLOMSKI DOKTORSKI STUDI J STROJARSTVA**

**KVALIFIKACIJSKI ISPIT**

**ADITIVNA TEHNOLOGIJA  
ELEKTROLUČNOG MIG PROCESA NA  
PRIMJERU ZIDOVA OD ALUMINIJSKIH  
LEGURA**

mr.sc. Živko Jurišić

Split, lipnja 2023.

# SADRŽAJ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. UVOD .....</b>   | <b>2</b>  |
| <b>2. ADITIVNA PROIZVODNJA .....</b>   | <b>4</b>  |
| 2.1. Definicija i glavne značajke aditivne proizvodnje .....                                   | 4         |
| 2.2. Podjela aditivne proizvodnje .....  | 5         |
| 2.3. Elektrolučni procesi u aditivnoj proizvodnji metala.....                                  | 6         |
| <b>3. MIG/MAG (GMAW) PROCES U ADITIVNOJ PROIZVODNJI.....</b>                                   | <b>8</b>  |
| 3.1. Osnovne karakteristike MIG/MAG procesa zavarivanja .....                                  | 8         |
| 3.2. Fizika prijenosa metala kod MIG procesa zavarivanja.....                                  | 11        |
| 3.3. Utjecaj parametara zavarivanja na geometrijske značajke zavara .....                      | 13        |
| <b>4. ADITIVNA PROIZVODNJA PRIMJENOM ELEKTRIČNOG LUKA I ŽICE (WAAM) .....</b>                  | <b>16</b> |
| 4.1. Osnovna načela WAAM procesa .....   | 16        |
| 4.2. Robotizirani WAAM proces .....  | 18        |
| 4.3. Metali u aditivnoj proizvodnji i elektrolučnim procesima .....                            | 20        |
| 4.4. Primjeri metalnih komponenti izrađenih pomoću WAAM procesa .....                          | 21        |
| 4.5. Profili zidova u WAAM tehnologiji .....   | 22        |
| 4.6. Proučavanje značajki dijelova izrađenih WAAM tehnologijom .....                           | 25        |
| 4.6.1. Mikrostruktura i mehanička svojstva izrađenih dijelova .....                            | 25        |
| 4.6.2. Karakteristične greške izrađenih dijelova.....  | 25        |
| 4.7. Utjecaj parametara WAAM procesa na geometrijske značajke izrađenog zida..                 | 27        |
| 4.8. Utjecaj izmjene topline na geometrijske značajke izrađenog zida .....                     | 37        |
| <b>5. GEOMETRIJSKE ZNAČAJKE ZIDOVA IZRAĐENIH WAAM PROCESOM..</b>                               | <b>47</b> |
| <b>6. PREDVIĐANJE GEOMETRIJSKIH ZNAČAJKI U WAAAM TEHNOLOGIJI</b>                               | <b>55</b> |
| 6.1. Primjena matematičkih modela za predviđanje geometrijskih značajki zida.....              | 55        |
| 6.2. Primjena modela umjetnih neuronskih mreža za predviđanje geometrijskih značajki zida..... | 59        |
| <b>7. ZAKLJUČCI I PRIJEDLOZI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA .....</b>                                    | <b>65</b> |
| <b>8. LITERATURA .....</b>   | <b>66</b> |
| <b>POPIS OZNAKA I KRATICA.....</b>   | <b>71</b> |
| <b>SAŽETAK .....</b>   | <b>75</b> |

# 1. UVOD

Ubrzani tehnološki razvoj uvjetuje i široku primjenu aditivne proizvodnje u mnogim područjima, kao što su elektronika, medicina, zrakoplovstvo, konstrukcije, automobilska, te vojna industrija i dr., [1]. Aditivna proizvodnja ima široki opseg primjene kao što je printanje osnovnih elektroničkih sklopova, pogona, motora za svemirske letjelice i 3D vozila, dijelova za velike arhitekture kuća, te lakših, sigurnijih i ekonomičnijih proizvoda.

Aditivne tehnike su pogodne za proizvodnju zrakoplovnih komponenti složene geometrije, niskog omjera težine i čvrstoće značajnog za konstruiranje zrakoplova. Time se postižu i značajne uštede materijala, inače skupih u zrakoplovstvu, [2]. Primjerice, u avioindustriji se proizvode metalni dijelovi od titanovih legura složenih oblika i visokih performanci sa značajno manjom alatnom obradom. Primjena aditivne proizvodnje u medicini se temelji u izradi alata i implantata malih serija, koji se primjenjuju u kirurgiji, te različitih bioproizvoda za obnovu tkiva, organa, kao i za pojedinačnu proizvodnju stanica. U automobilskoj industriji se primjerice proizvode dijelovi za pogonske osovine i ovjes, u slučajevima gdje se zahtijeva složenost geometrije i niski omjer težine i čvrstoće. Nadalje, aditivna proizvodnja u vojnoj industriji također ima široku primjenu, od proizvodnje streljiva, naoružanja, impelera, kaciga i zaštitne opreme, antenskih, satelitskih sustava. Pri tome se koriste različiti polimerni i metalni materijali, [3].

Između različitih aditivnih tehnika, aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom (eng. Wire Arc Additive Manufacturing) zauzima sve veće mjesto u proizvodnji velikih metalnih dijelova, obzirom na postignute brzine deponiranja koje su više u odnosu na tehnike aditivne proizvodnje praškastim materijalima. Obzirom na samu prirodu procesa, mnogi autori su istraživali utjecaj unosa topline na mehanička svojstva, zaostalo naprezanje, mikrostrukturu, kvalitetu površine i geometrijske značajke proizvedenih dijelova primjenom WAAM tehnologije, [4]. Doprinos razumijevanju procesa je i uvođenje matematičkog modela primjenom metode konačnih elemenata, kojim se opisuje 3D termomehaničko ponašanje procesa. Naravno da definiranje osnovnih aspekata WAAM procesa ovisi o konkretnoj primjeni, izboru elektrolučnog procesa, metalu žice, vrsti zaštitnog plina i odabranim parametrima procesa. U cilju postizanja zadovoljavajuće kvalitete proizvedenih dijelova, potrebno je kontrolirati zavarivačke parametre odabranog elektrolučnog procesa, kao što su: jakost struje, napon električnog luka, vrsta i protok zaštitnog plina, brzinu dodavanja žice, brzinu zavarivanja, CTWD (eng. Contact Tip to Work Distance) i kut pištolja za zavarivanje. Ovi parametri moraju biti optimalni jer utječu na prijenos metala, brzinu deponiranja metala, kao i mehaničke i geometrijske značajke izrađenog komada, [5].

Unatoč dosadašnjem poznavanju procesa zavarivanja, metalurških i mehaničkih svojstava zavarenih spojeva, u WAAM tehnologiji postoje pitanja koja je još potrebno istražiti, kao što je definiranje optimalne putanje obzirom na složenost geometrije gotovog proizvoda, minimiziranje zaostalih naprezanja, kontroliranje mikrostrukture slojeva te utjecaj unosa topline, odnosno, temperature svakog sloja na svojstva gotovog proizvoda. Shodno tome, razvijaju se inačice procesa aditivne tehnologije kako bi se smanjio negativni utjecaj odabranih uvjeta procesa na postignute karakteristike proizvedenih dijelova.

Problematika koja je od značajne važnosti i predmet je današnjih istraživanja, odnosi se na unos topline koji je povezan sa prirodom procesa zavarivanja, dimenzionalnu točnost i kvalitetu površine proizvedenih dijelova, te nadzor i upravljanje različitim parametrima procesa za vrijeme deponiranja slojeva, [6]. Naravno, područje interesa za primjenom elektrolučnih procesa u aditivnoj proizvodnji se povećava i iz ekonomskih razloga, zbog niske cijene i raspoloživosti materijala u odnosu na tehnologije koje koriste praškaste materijale, raspoloživosti procesa zavarivanja te većoj brzini deponiranja što je naročito prednost kod proizvodnje velikih komponenti.

U ovom kvalifikacijskom radu se obrađuje problematika aditivne tehnologije kroz primjenu MIG elektrolučnog procesa na aluminijskim legurama, s aspekta geometrijskih značajki. U poglavlju 2 su prikazani osnovni pojmovi, podjela aditivne tehnologije, te metali i elektrolučni procesi koji se u aditivnoj tehnologiji najčešće primjenjuju. Poglavlje 3 se bavi MIG procesom zavarivanja, odnosno osnovnim karakteristikama procesa, vrstama prijenosa metala, te utjecajem glavnih parametara zavarivanja na geometrijske značajke zavara. U poglavlju 4 detaljno je opisana aditivna tehnologija pomoću električnog luka i žice (WAAM proces) i primjena robotskih sustava u aditivnoj tehnologiji. Zatim je obrađen utjecaj zavarivačkih parametara, kao i utjecaj unosa topline na geometrijske značajke izrađenog zida. Kroz poglavlje 5 je obrađena problematika matematičkog modeliranja MIG procesa, te primjena modela za predviđanje geometrijskih značajki izrađenog zida. U poglavlju 6 su dati zaključci prethodno opisane problematike.

## 2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja predstavlja procese ili metode kojima se proizvode dijelovi dodavanjem materijala, koji mogu biti polimerni, metalni, keramički ili kompozitni. Različite metode primjenjuju različite tehnike na način da se pomoću njih mogu taliti materijali ili mijenjati njihovo stanje. Ovisno o tome primjenjuju se i različiti izvori topline. Tehnika proizvodnje dijelova po načelu „sloj po sloj“ je u potpunosti različita u odnosu na konvencionalne tehnike proizvodnje. Stoga je nužno u proceduri usvajanja pojedine aditivne tehnologije ispitati svojstva proizvedenog komada. U daljnjem tekstu je objašnjena definicija, podjela i glavne značajke aditivne proizvodnje općenito.

### 2.1. Definicija i glavne značajke aditivne proizvodnje

Prema ASTM standardu F2792-10, [7], aditivna proizvodnja je „proces spajanja materijala za izradu predmeta iz 3D modela, obično sloj po sloj, za razliku od konvencionalnih metodologija proizvodnje“.

Tehnološki procesi koji se najčešće primjenjuju u „aditivnoj proizvodnji“ koriste laserski ili električni luk kao izvor topline zbog niskog unosa topline, visoke preciznosti i male deformacije. Suvremena poboljšanja u tehnologiji zavarivanja omogućavaju i višestruku primjenu različitih izvora topline s mogućnošću kvalitetnog upravljanja procesom, [8]. Temeljna postavka aditivne tehnologije je da se dijelovi izrađuju dodavanjem materijala u slojevima, svaki sloj ima tanki poprečni presjek dobiven iz originalnog CAD modela. U fizikalnom smislu, svaki sloj mora imati konačnu debljinu tako da konačni dio bude aproksimacija originalnih dimenzija. Što su tanji slojevi, točnija će biti aproksimacija dimenzija originala.

Općenito, proces izrade dijelova aditivnom tehnologijom odvija se u 7 koraka:

1. CAD model – izrada softverskog modela koji opisuje vanjsku geometriju komada,
2. STL pretvorba (eng. „stereolithography“) – format kojim se opisuju vanjske zatvorene površine i formira baza za računanje slojeva. To je trokutni ravninski prikaz 3D geometrije objekta.
3. Prijenos datoteke na stroj za izradu dijelova i definiranje putanje robota. Važno je napomenuti kako većina robota koristi tzv. G-code, softverski paket naredbi za definiranje kretanja robota,
4. Izbor postavki stroja – procesni parametri koji moraju biti pažljivo odabrani,
5. Izrada dijela – uglavnom automatiziran proces prema odabranoj putanji i parametrima procesa,
6. Uklanjanje dijela sa pozicionera nakon izrade,
7. Obrada dijela nakon izrade i priprema za primjenu – čišćenje, bojanje i druge pripreme radnje.

Glavne prednosti aditivne proizvodnje dijelova očituju se u sljedećem:

- direktna pretvorba iz crteža u komponentu,
- izrada dijelova bez dodatnih alata i troškova proizvodnje,
- funkcionalni crtež omogućava proizvodnju složenijih dijelova,
- fleksibilna izrada dijelova šupljih i rešetkastih struktura,
- sposobnost direktne proizvodnje dijelova do konačnog oblika s minimalnom dodatnom obradom,
- potencijal za pristup „bez gubitaka proizvodnje“ maksimiziranjem utroška materijala,
- smanjenje vremena razvoja proizvoda i vremena od proizvodnje do tržišta,

- manji operacijski postupci u proizvodnji različitih dijelova,
- proizvodnja na zahtjev, napuštajući model projektirane proizvodnje.

Pored prednosti aditivne proizvodnje, u inženjerskoj praksi se javljaju i određena ograničenja. Trenutno, glavna ograničenja aditivne proizvodnje su brzina izrade, točnost, orijentacija dijela, svojstva materijala, obrada i trošak sustava proizvodnje, [9].

## 2.2. Podjela aditivne proizvodnje

Podjela aditivne proizvodnje se definira s obzirom na različite kriterije, a u postojećoj literaturi se mogu pronaći sljedeće podjele, [10]:

1. Procesi s direktnom i indirektnom primjenom aditivne proizvodnje,
2. Procesi aditivne proizvodnje metala i nemetala s obzirom na vrstu osnovnog materijala,
3. Kruti, tekući, praškasti i plinski procesi aditivne proizvodnje – s obzirom na fizikalno stanje korištenog osnovnog materijala,
4. Jednodimenzionalni i višedimenzionalna procesi – temeljena na načelu „od STL formata do modela“,
5. Fotopolimerizacija smola, istiskivanje materijala, proces na bazi usmjerene energije, laminiranje tankih listova, spajanje praškastih materijala - spajanje ovisno o načelu rada ili tehnici,
6. Spajanje temeljeno na krutom stanju osnovnog materijala za vrijeme procesa aditivne proizvodnje i primjenjenoj tehnici dodavanja slojeva,
7. Aditivna proizvodnja temeljena na izvoru energije - vezivo („binder“), laser, toplina trenjem, plazma, snop elektrona, električni luk i dr.,
8. Aditivna proizvodnja temeljena na vrsti osnovnog materijala – polimeri, keramika, metali, prašak, smola i dr.,
9. Aditivna proizvodnja praškastim materijalima ovisno o sustavu za dodavanje materijala,
10. Aditivna proizvodnja prema ASTM standardu, vodič F42 (niže navedeno).

Pored navedenih, a obzirom na ubrzani tehnološki razvoj razvijaju se i drugi tipovi aditivne proizvodnje. Međutim, prema ISO (International Organization for Standardization)/ASTM (American Society for Testing and Materials), standard 52900:2015, procesi aditivne proizvodnje se klasificiraju u sedam osnovnih kategorija, [11]:

- (1) naštrcavanje veziva (BJ - Binder Jetting),
- (2) deponiranje usmjerenom energijom (DED- Directed Energy Deposition),
- (3) istiskivanje materijala (ME - Material Extrusion),
- (4) naštrcavanje materijala – (MJ - Material Jetting),
- (5) spajanje praškastog materijala u slojevima (PBF - Powder Bed Fusion),
- (6) laminiranje listova (SL - Sheet Lamination) i
- (7) Fotopolimerizacija u komori (VP - Vat Photopolymerization).

Procesi aditivne proizvodnje metala mogu se primarno podijeliti u dvije kategorije (ASTM, standard F2792): 1. Depozit direktnom energijom (DED) i 2. Spajanje metalnim prahom (PBF), [12]. Daljnja podjela je prema vrsti izvora topline: laser, elektronski snop, plazma, električni luk.

Ovisno o izvoru topline koji se koristi za nanošenje metala, aditivna proizvodnja žicom se može podijeliti u tri skupine: na bazi lasera (eng. WLAM, Wire Laser Additive Manufacturing), eletrolučnog zavarivanja (eng. WAAM, Wire Arc Additive Manufacturing) i elektronskog snopa (eng. EBF, Electron Beam Fabrication). Aditivna proizvodnja na bazi lasera (eng. LBAM, Laser Based Additive Manufacturing) primjenjuje metode praškastog spajanja metala i depozita direktnom energijom lasera, [13]. U procese laserskog spajanja praškastog metala spadaju SLS (eng. Selective Laser Sintering), LMS (eng. Laser Micro Sintering), SLM (eng. Selective Laser Melting) i slični procesi. U procese depozita metala potpomognute direktnom energijom lasera spadaju LENS (eng. Laser Engineered Net Shaping), LC (eng. Laser Consolidation), Laser Cladding, laminiranje listova (eng. Sheet Lamination) te depozit žicom potpomognut laserom, WFLD (eng. Wire Feed Laser Deposition). Glavna prednost laserskog depozita žice u odnosu na laserskog spajanja metalnog praha je proizvodnja dijelova povišene čvrstoće i bez gubitka materijala. Prednost primjene lasera na praškastim metalima su proizvodnja dijelova malih dimenzija i visoke geometrijske točnosti.

Aditivna proizvodnja elektronskim snopom (EBF) je od strane istraživačkog centra NASA-e nedavno razvijena, odnosno aditivna metoda za proizvodnju konstrukcijskih metalnih dijelova, [14]. Metoda primjenjuje energiju elektronskog snopa za taljenje metalne žice u uvjetima vakuuma. Povećani zahtjevi tržišta, posebice u svemirskoj i avio-industriji potaknuli su primjenu aditivne proizvodnje elektronskim snopom sa žicom (eng. EBAMW, Electron Beam Additive Manufacturing with Wire), [15]. Istraživanja provedena na titanovim, aluminijskim i niklovim legurama, pokazala su značajne uštede u potrošnji materijala (do 79%) i troškovima proizvodnje (do 30%).

### **2.3. Elektrolučni procesi u aditivnoj proizvodnji metala**

Primjena tehnologije zavarivanja u proizvodnji 3D dijelova složenog oblika kronološki je prikazana kako slijedi, [19]:

- 1926. Baker je patentirao „primjenu električnog luka kao izvora topline za proizvodnju objekata pomoću štrcajućeg prijenosa metala u deponirane slojeve“,
- 1971. Yujie je patentirao proizvodnju visokotlačnih posuda, primjenom zavarivanja pod praškom,
- 1983. Kussmaul je koristio zavarivanje za proizvodnju velikih proizvoda od čelika visoke čvrstoće,
- 1993. Prinz i Weiss su patentirali kombiniranu tehnologiju nanošenja materijala zavarivanjem sa glodanjem CNC alatima,
- 1994.-1999. Sveučilište Cranfield razvilo SMD tehnologiju (eng. Shaped Metal Deposition) za proizvodnju kućišta motora za Rolls Royce korporaciju,

Također postoje podaci o pokušajuma izrade 3D metalnih dijelova primjenom zavarivanja 1960-ih u Njemačkoj, kao što su tvrtke Krupp i Thyssen proizvodile visokotlačne posude do 500 t težine. Zatim, uspješne pokušaje primjene procesa zavarivanja imala je tvrtka Babcock & Wilcox u izradi proizvoda velikih dimenzija od austenitnog čelika primjenom SM tehnologije (eng. Shape Melting). Tvrtka Rolls Royce primjenjuje zavarivanje za aditivnu proizvodnju različitih zrakoplovnih dijelova od skupih niklovih i titanovih legura. Gore navedene studije uglavnom su bile usmjerene na primjenjivost takvih postupaka zavarivanja kao što su GMAW i GTAW u aditivnoj proizvodnji. Ovi procesi osiguravaju dobru metaluršku adheziju, kao i zaštitu zavara i slojeva od stvaranja oksida. Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom (eng. WAAM, Wire Arc Additive Manufacturing) predstavlja sve veći interes proizvodne industrije zbog mogućnosti proizvodnje velikih metalnih komponenti

pri niskim troškovima i relativno kratkom vremenu proizvodnje. WAAM tehnologija za izradu metalnih proizvoda primjenjuje elektrolučne procese kao što su MIG (eng. Metal Inert Gas), TIG (eng. Tungsten Inert Gas), CMT (eng. Cold Metal Transfer) i PAW (eng. Plasma Arc Welding), ovisno o izvoru topline koji se koristi.

Prema [20], laser i elektronski snop kao izvori energije koriste vrlo visoke gustoće energije, što rezultira u dobrim dimenzijskim značajkama pri oblikovanju dijelova. Međutim, brzina deponiranja materijala je vrlo niska, troškovi opreme visoki, kao i dimenzionalno ograničenje pri izradi prototipa. S druge strane, aditivna proizvodnja električnim lukom ima visoku brzinu nanošenja materijala, niske troškove proizvodnje pri nešto nižoj kvaliteti površine i dimenzionalnoj točnosti. U primjeni WAAM procesa zavarivanja, značajan čimbenik je unos topline pri nanošenju uzastopnih slojeva, što se naročito mora uzeti u obzir pri izradi tankostijenih komada. Gdje god je moguće, u WAAM tehnologiji se primjenjuje MIG proces, zbog koaksijalnosti žice kao dodatnog materijala s pištoljem za zavarivanje, čime se olakšava izvedba putanje pištolja. Fronius je primjenom CMT procesa, kao modificiranog MIG procesa, osigurao kontrolirani prijenos metala, s nižim unosom topline i gotovo bez prskanja. Primjena ovih procesa je preporučljiva kod čelika i aluminija, dok kod titana dolazi do pojave nestabilnosti luka, koja rezultira povećanom hrapavošću površine. Iz tog razloga se kod titana primjenjuje TIG ili PAW proces.

Zavarivanje plazmom je proces vrlo sličan TIG procesu. Oba procesa koriste volframovu elektrodu uz relativno mali unos topline. Kod zavarivanja plazmom, netaljiva volframova elektroda je upuštena u sapnicu. Zaštitni plin pod tlakom, zagrijan na visoke temperature je ioniziran, u stanju plazme, izlazi velikom brzinom kroz mali otvor na donjem dijelu sapnice. Izlazeći mlaz vrućeg plina je izvor energije za zavarivanje. Glavne značajke PAW procesa su: povećan napon luka, ionizacija plina i temperatura luka. Rezultat toga je koncentriraniji izvor topline pri višoj temperaturi luka, što povećava učinkovitost prijenosa topline a time i veće brzine zavarivanja, [21]. Stoga je PAW proces prikladniji za primjenu u aditivnoj proizvodnji od TIG procesa.

Elektrolučni procesi, koji se najčešće primjenjuju u aditivnoj proizvodnji, mogu se načelno podijeliti u dvije grupe, obzirom na metodu taljenja žice: TIG (GTAW) i MIG (GMAW). TIG proces koristi kao izvor energije električni luk uspostavljen između netaljive volframove elektrode i osnovnog metala. Proces zavarivanja izvodi se s taljenjem dodatnog materijala (žice) ili bez njega (pretaljivanje). MIG proces zavarivanja koristi trošivu elektrodu – žicu koja se tali električnim lukom u zaštiti inertnog plina. Oba procesa imaju određene prednosti i nedostatke, te se sukladno tome i primjenjuju u aditivnoj proizvodnji. Zbog koaksijalnosti pištolja i žice, te time lakše izvedbe i kontrole putanje pištolja, MIG proces se primjenjuje gdje god je to moguće. Kod MIG procesa se prijenos metala osigurava taljenjem i deponiranjem žice u kapličnom obliku na metalnu podlogu. Načini prijenosa metala su: kratkim spojevima, globularni prijenos, prijenos štrcajućim lukom, impulsnim strujama.

Kod MIG procesa zavarivanja u aditivnoj proizvodnji se najčešće primjenjuje CMT proces (modificirani MIG). CMT proces je razvijen od austrijske tvrtke Fronius, a uključuje kontrolirani prijenos metala. Proces koristi vršnu struju koja je manja od prijelazne struje radi spriječavanja slučajnog odvajanja kapljice i koristi oscilirajuće kretanje žice za odvajanje kapljice. Kada vrh žice dođe u kontakt s metalom zavora, servomotor plamenika za zavarivanje mijenja smjer, što uzrokuje uvlačenje žice i prijenos kapljice. Čim je prijenos kapljice završen, luk se ponovo uspostavlja i žica se ponovo pomiče prema naprijed uz ponovno postavljanje zadane vrijednosti struje zavarivanja. Razvijene inačice CMT procesa su: impulsni CMT (CMT-P), napredni CMT (CMT-ADV), impulsni napredni CMT (CMT-PADV) i CMT proces s varijabilnim polaritetom (VP-CMT).



### 3. MIG/MAG (GMAW) PROCES U ADITIVNOJ PROIZVODNJI

Prema klasifikaciji procesa proizvodnje u sedam kategorija ((ISO)/ASTM 52900:2015), WAAM spada u DED proces (ASTM F2792-12a), u okviru kojeg MIG/MAG proces koristi električni luk i žicu za deponiranje metala u slojevima do izrade gotovog proizvoda. U literaturi se za procese aditivne proizvodnje metala često koristi naziv „SMD proces“ (eng. Shaped Metal Deposition), proizvodna tehnika uvedena od strane Rolls Royce PLC i certificirana od strane Sveučilišta u Sheffieldu, [22]. SMD tehnika primjenjuje različite aditivne procese, kao što su WLAM, EBF i WAAM. MIG/MAG proces spada u područje WAAM tehnologije, a primjenjuje se na različite metale kao što su čelik, titan i njegove legure, aluminij i njegove legure te nikal. MIG/MAG elektrolučno zavarivanje uključuje uporabu električnog luka i taljive elektrode (žice) uz dodavanje inertnog ili aktivnog zaštitnog plina ili njihovu mješavinu. Uz različiti izbor načina prijenosa metala, široki izbor elektroda i zaštitnih plinova, MIG/MAG proces se koristi za zavarivanje raznih željeznih i neželjeznih metala. Sa odgovarajućim propisanim procedurama, MIG/MAG proces se može izvoditi u svim položajima.

Općenito, zavarivanje na bazi električnog luka može biti jako složeno, budući da je potrebno odabrati optimalne procesne parametre kako bi se dobila zadovoljavajuća kvaliteta konačnog proizvoda. Optimalni procesni parametri se odnose na: jakost struje, napon, vrstu i protok zaštitnog plina, CTTWD – udaljenost vrha žice do radnog komada, brzinu žice, brzinu zavarivanja i kut pištolja. Izbor procesnih parametara utječe na vrstu prijenosa metala, geometrijske značajke i mehanička svojstva gotovog komada, [5].

U daljnjem izlaganju su opisane osnovne karakteristike MIG/MAG procesa zavarivanja, vrste prijenosa rastaljenog metala, utjecaj glavnih parametara zavarivanja na geometrijske značajke zavara i primjena MIG procesa zavarivanja u WAAM tehnologiji aluminijskih legura.

#### 3.1. Osnovne karakteristike MIG/MAG procesa zavarivanja

GMAW proces je, po definiciji, elektrolučni proces zavarivanja kojim se spajaju metali taljenjem lukom koji je uspostavljen između kontinuirane metalne elektrode i radnog komada. Proces koristi zaštitni plin za zaštitu tekućeg metala zavara. Primjena GMAW procesa načelno zahtijeva istosmjernu struju, DC+ polariteta elektrode, [23]. U nekoj literaturi umjesto GMAW se koristi termin MIG/MAG (eng. Metal Inert Gas/Metal Active Gas), ovisno o vrsti zaštitnog plina koji se koristi. GMAW proces se primjenjuje na širokom rasponu metalnih materijala, kao što su ugljični čelik, nehrđajući čelik, aluminij, magnezij, bakar, nikal, bronca i dr. GMAW proces ima široku primjenu zbog sposobnosti postizanja visokokvalitetnih zavara, od širokog raspona željeznih i neželjeznih legura, pri niskim troškovima.

Glavne prednosti GMAW procesa zavarivanja su:

- sposobnost spajanja širokog raspona različitih vrsta metala i debljina,
- jednostavna i raspoloživa oprema,
- visoka iskoristivost elektrode, između 93 % i 98 %,
- lako se prilagođava robotiziranim, automatiziranim i poluautomatiziranim sustavima,
- sposobnost zavarivanja u svim položajima,
- odlična geometrija zavara,
- niski unos topline u usporedbi s ostalim procesima zavarivanja,

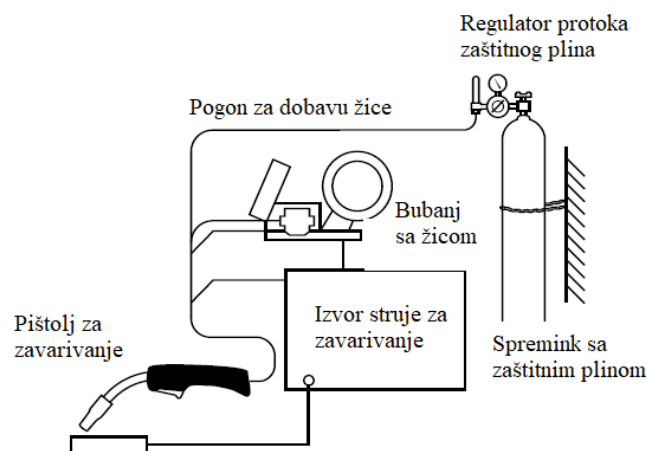
- minimalno prskanje i stvaranje troske.

MIG/MAG proces zavarivanja se primjenjuje kod materijala koji su osjetljiviji na atmosferski utjecaj (Al, Cu, CrNi čelici, Ti i sl.). Pri zavarivanju se najčešće koriste žice promjera 0,6 mm do 2,4 mm, a prijenos metala sa žice u talinu se obavlja u obliku metalnih kapljica.

Osnovna procesna oprema koja se koristi kod MIG/MAG zavarivanja je:

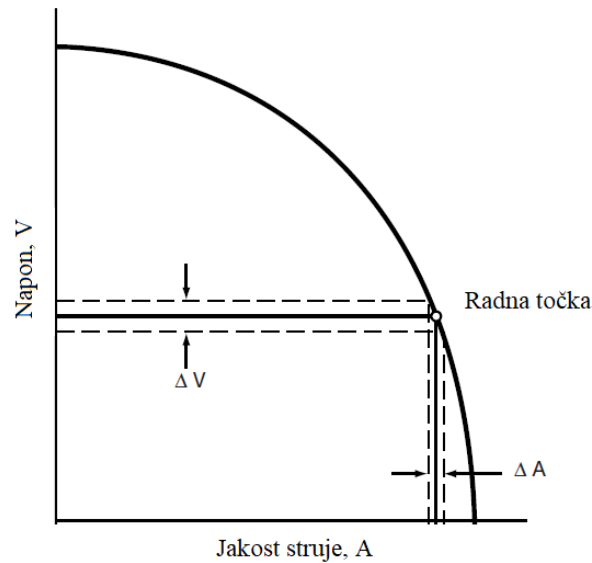
- izvor električne struje za zavarivanje,
- uređaj za dobavu žice, kolut sa žicom,
- pištolj za zavarivanje i
- zaštitni plin.

*Slikom 3.1.* shematski su prikazani osnovni elementi uređaja za MIG/MAG zavarivanje.



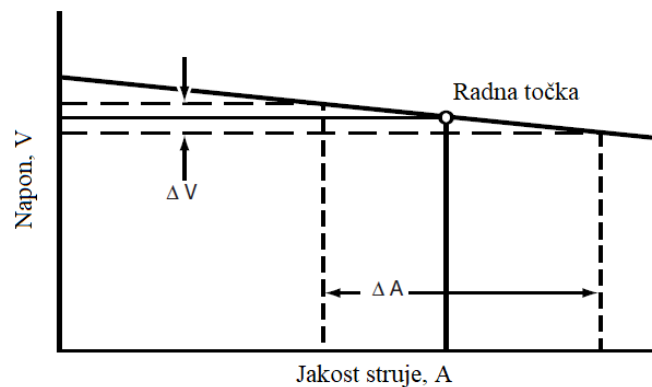
*Slika 3.1. Shematski prikaz sustava za zavarivanje MIG/MAG procesom, [23]*

*Izvor struje zavarivanja* ima statičku karakteristiku koja je podešena za optimiranje karakteristike luka za određeni proces zavarivanja. Kod MIG/MAG procesa, izvori struje za zavarivanje mogu s obzirom na statičku karakteristiku biti podijeljeni u dvije glavne kategorije: 1. s konstantnom strujom i 2. s konstantnim naponom. Izvori konstantne struje, čija je strma statička karakteristika prikazana *slikom 3.2.*, ranije su se više koristili kod MIG/MAG zavarivanja nego danas, premda još uvijek nalaze primjenu kod zavarivanja aluminija. Uobičajeno je da se izvori struje sa strmom statičkom karakteristikom primjenjuju kod MIG/MAG procesa zavarivanja alumijskih legura ili ugljičnih čelika velikih promjera, odnosno, debljina, [23].



Slika 3.2. Strma statička karakteristika izvora struje za zavarivanje, [23]

Izvor struje konstantnog napona osigurava odgovarajući napon električnog luka za odabranu brzinu žice. Ovakva krivulja se u zavarivačkoj praksi naziva položena statička karakteristika izvora struje za zavarivanje, *slika 3.3*.



Slika 3.3. Položena statička karakteristika izvora struje za zavarivanje, [23]

Uređaj za dobavu žice osigurava dobavu metalnih elektroda – žica različitih promjera na mjesto zavarivanja. Brzinu dobave žice moguće je podešavati pomoću elektronički upravljano kalibriranog sustava osiguravajući točnost značajnu za upravljanje procesom zavarivanja.

Pištolji za MIG zavarivanje su različiti, ovisno o tome da li se koristi ručno, poluautomatsko, mehanizirano, te automatizirano ili robotizirano zavarivanje. Zbog kontinuirane dobave žice, pištolj mora omogućiti klizni električni kontakt u cilju prijenosa struje zavarivanja na žicu. Konstrukcija pištolja omogućava prolaz plina kroz sapnicu koja usmjerava zaštitni plin oko luka i rastaljene metalne kupke.

Kolut sa žicom je smješten u sklopu sustava za dobavu žice, koja je nesmetano vođena i upravljana kroz vodilice.

Primarna funkcija zaštitnog plina je zaštita rastaljenog metala od atmosferskog utjecaja i posljedičnih nepravilnosti. Svaki zaštitni plin posjeduje određena fizikalna svojstva koja imaju utjecaj. Izbor vrste i protoka zaštitnog plina značajno utječe na brzinu zavarivanja, penetraciju, mehanička svojstva zavara, izgled i oblik zavara, stabilnost luka, a ovisi o vrsti i debljini osnovnog metala, te vrsti prijenosa dodatnog metala u zavar.

### 3.2. Fizika prijenosa metala kod MIG procesa zavarivanja

Prijenos metala u električnom luku kod MIG zavarivanja omogućavaju sile koje djeluju na formiranje i otkidanje kapljice dodatnog metala. Ukupna rezultatna sila koja nastaje tijekom prijenosa metala dana je sljedećim vektorskim izrazom, [24]:

$$\vec{F} = \vec{F}_g + \vec{F}_{pn} + \vec{F}_{em} + \vec{F}_r + \vec{F}_{pl} \quad (3.1)$$

gdje su:

$\vec{F}$  - rezultatna sila na kapljicu,

$\vec{F}_g$  - sila gravitacije,

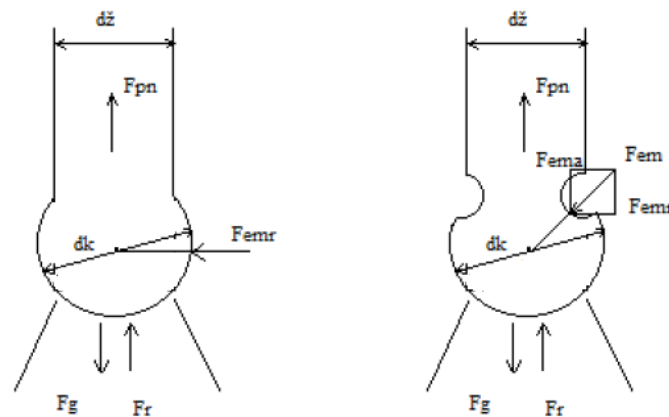
$\vec{F}_{pn}$  - sila površinske napetosti,

$\vec{F}_{em}$  - elektromagnetska (Lorentzova) sila koja uzrokuje tzv. „pinch“ efekt,

$\vec{F}_r$  - sila reaktivnog djelovanja zbog isparavanja metala na elektrodama i

$\vec{F}_{pl}$  - sila strujanja plazme.

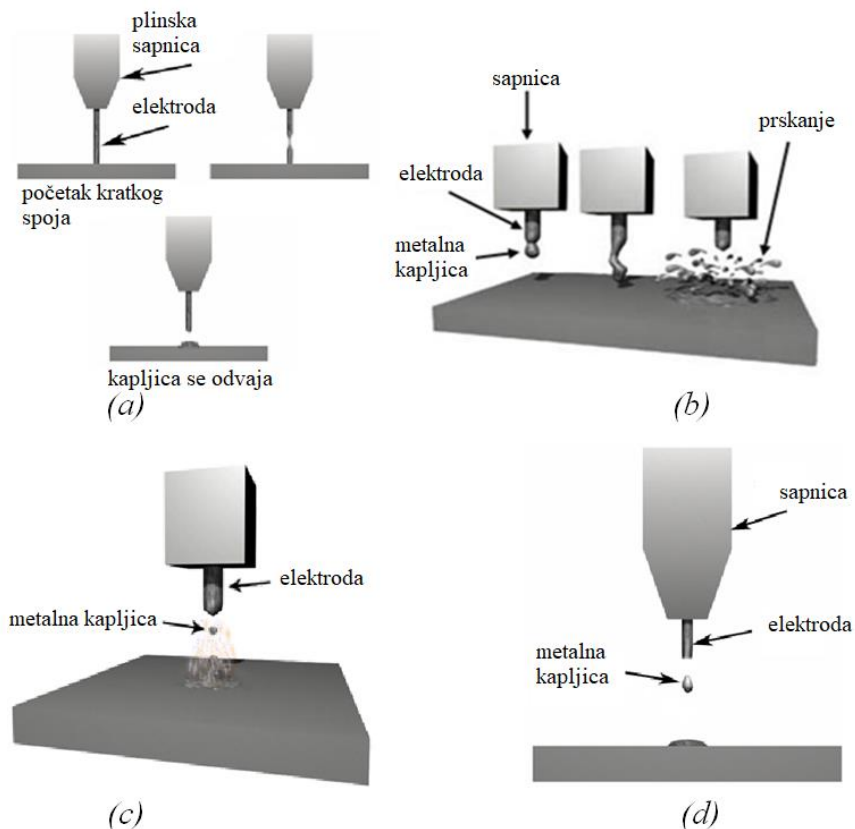
Vektorska raspodjela sila koje djeluju na kapljicu kod MIG procesa zavarivanja prikazana je slikom 3.4.



Slika 3.4. Raspodjela sila na kapljici kod MIG procesa zavarivanja, [24]  
 $d_{\check{z}}$  – promjer žice,  $d_k$  – promjer kapljice

Prema karakteristikama luka, razlikuju se četiri karakteristična načina prijenosa metala: prijenos metala kratkim spojevima, globularni, štrcajući i prijenos metala impulsnim strujama, slika 3.5. O načinu prijenosa metala ovisi stabilnost električnog luka i metalurške promjene u elektrodi žice. Varijable koje utječu na način prijenosa metala su: debljina i položaj osnovnog metala, parametri zavarivanja i zaštitni plin.

U kratkospojnom načinu prijenosa metal, metal zavara se prijenosi od elektrode do radnog komada za vrijeme kontakta elektrode s metalnom kupkom. Kada elektroda dotakne radni komad, poveća se jakost struje i rastaljeni metal se odvaja od elektrode i prijenosi na radni komad. Električni luk se ponovo uspostavlja i proces se ponavlja. Frekvencija ponavljanja ciklusa se kreće od 20 do 250 puta u sekundi. Iako kratkospojnim procesom nije moguće postići velike brzine deponiranja metala kao prijenosom metala štrcajućim lukom, njegova glavna prednost je primjena relativno niskog napon zavarivanja i posljedično niskog unosa topline u proces. Možebitni nedostatak je nepotpuno spajanje pri izradi debljih metalnih komada, [26].



Slika 3.5. Vrste prijenosa metala: (a) kratkim spojevima, (b) globularni prijenos (c) štrcajućim lukom, (d) impulsnim lukom, [25]

Globularni prijenos metala se odvija kada se na vrhu žice stvaraju kapljice rastaljenog metala, nepravilnog oblika i veće od promjera žice. Pod djelovanjem gravitacijske sile, na osnovni metal se nanosi svega nekoliko kapljica u sekundi. Ovaj prijenos metala se ne koristi često zbog povećanog prskanja, velikog profila zavara i lošeg izgleda zavara.

Kod štrcajućeg načina prijenosa metala, dodatni metal se prijenosi preko luka u kontinuiranom, usmjerenom mlazu finih kapljica (manjih od promjera žice). Kretanje metala kroz luk razlikuje se od globularnog načina prijenosa po tome što su kapljice manje i usmjerene, a luk je stabilniji. Također, za razliku od globularnog gdje se nekoliko kapi kreće kroz luk svake sekunde, štrcajući prijenos metala uključuje stotine kapi u sekundi.

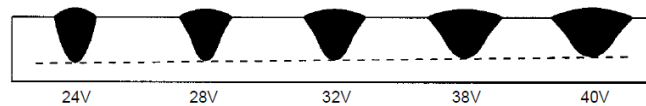
U impulsnom prijenosu metala (GMAW-P) izvor struje za zavarivanje stvara impulse s visokim vršnim strujama koje su postavljene na razinu koja će uzrokovati se prijenos odvija za vrijeme trajanja impulsa. Osnovna struja postavljena je na razinu koja će održavati luk, ali je preniska za bilo kakav prijenos metala. Za to vrijeme preneseni metal se skrutne. Ovakav način prijenosa metala omogućava lakše upravljanje procesom zavarivanja, te primjenu na različitim vrstama i različitim debljinama osnovnog metala. Zbog karakteristika procesa i svojstava zavara koji se postiže, impulsni prijenos metala je najpogodniji način prijenosa za primjenu procesa zavarivanja aluminijskih legura.

Prednosti impulsnog prijenosa metala u odnosu na ostale načine prijenosa su: povoljniji prijenos metala bez kratkih spojeva, oblik geometrije zavara, ujednačeniji kemijsko metalurški sastav metala, deformacije manje radi manjeg unosa topline (važno kod tankih limova), istom žicom se mogu zavarivati različite debljine metala. Također je olakšana kontrola i izbor optimalnih parametara zavarivanja. Zbog navedenih prednosti, a naročito zbog kontroliranog i niskog unosa topline, prijenos metala impulsnim strujama se učestalo primjenjuje pri zavarivanju aluminijskih legura.

### 3.3. Utjecaj parametara zavarivanja na geometrijske značajke zavara

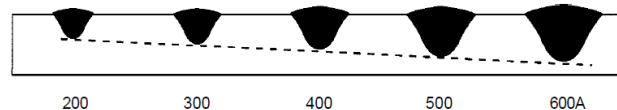
Parametri zavarivanja mogu imati primarni i sekundarni utjecaj na geometrijske značajke zavara. Primarni utjecaj se odnosi na utjecaj glavnih parametara kao što su jakost struje zavarivanja, napon električnog luka, te brzina zavarivanja. Njihov utjecaj se očituje kroz unos topline na geometrijske značajke zavara, što zahtijeva poznavanje njihovog interaktivnog djelovanja. Sekundarni utjecaj se odnosi na utjecaj ostalih parametara procesa kao što su vrsta i protok zaštitnog plina, promjer elektrode, parametri impulsa i dr. [27].

U priručniku [28] opisan je utjecaj parametara zavarivanja MIG/MAG procesa na geometrijske značajke zavara. Povećanjem napona luka povećava se duljina luka i postiže se veća širina zavara, ali je zato penetracija niža, *slika 3.6*. Ako se koristi kratkospojni proces većim naponom se smanjuje frekvencija kratkih spojeva, što daje veće kapljice i više prskanja. Prenizak napon može izazvati zataljivanje žice za osnovni materijal. Kod zavarivanja tankih limova kratkospojni proces se primjenjuje pri velikim brzinama zavarivanja bez progaranja. Pri tome se mora voditi računa o frekvenciji kratkih spojeva i dobroj stabilnosti luka.



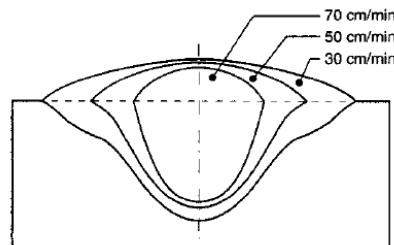
Slika 3.6. Utjecaj napona luka na geometriju zavara, [28]

Struja se postavlja neizravno brzinom i promjerom dodavanja žice. Struja je glavni parametar za zavarivanje i mora se odabrati prema debljini ploče i brzini zavarivanja uzimajući u obzir kvalitetu zavara. Utjecaj jakosti struje na geometriju zavara prikazan je *slikom 3.7*. Viša jakost struje rezultira većom širinom i manjom visinom zavara te većom penetracijom.



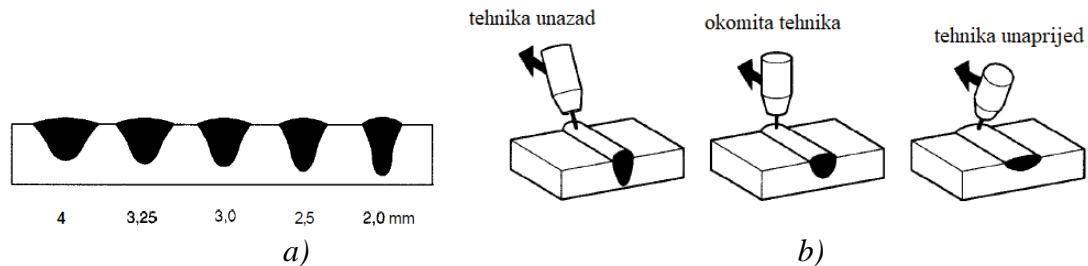
Slika 3.7. Utjecaj jakosti struje na geometriju zavara, [28]

Brzina zavarivanja utječe na penetraciju i širinu zavara, odnosno, površinu poprečnog presjeka, *slika 3.8*. Visoka brzina zavarivanja stvara ravni zavar s malom penetracijom, dok pretjerano visoka brzina zavarivanja može uzrokovati pojavu rubnih zajedaja, pora, greške korijena i slabo spajanje. Premala brzina zavarivanja rezultira u nejednolikoj površini, a pretjerano mala brzina zavarivanja može dovesti do toplinskih pukotina.



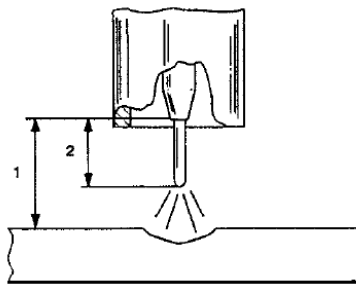
Slika 3.8. Utjecaj brzine zavarivanja na geometriju zavara pri konstantnoj jakosti struje i naponu luka, [28]

Na geometriju zavara utječe promjer žice (*slika 3.9.a*) i tehnika zavarivanja, odnosno kut pištolja (*slika 3.9.b*). Manji promjer žice ima veću penetraciju i stabilnost luka je bolja.



Slika 3.9. Utjecaj promjera žice (a) i kuta pištolja (b) na geometriju zavora, [28]

Pored navedenih parametara potrebno je spomeniti i neke druge parametre koje također imaju utjecaj na geometriju zavora. To je prije svega induktivitet izvora struje, koji se prilagođava promjeru žice. Niski induktivitet daje koncentriran luk ali može povećati prskanje. Visoki induktivitet može dati nešto širi zavar ali previsoke vrijednosti uzrokuju lošu stabilnost luka. Nadalje, bitan parametar u procesu zavarivanja je i udaljenost kontaktnog vrha do radnog komada (eng. CTWD – Contact Tip to Work Distance), slika 3.10. U praksi je poznato da je normalna udaljenost CTWD 10-15 x promjer elektrode. Premali CTWD može zataliti elektrodu s kontaktnim vrhom, a preveliki CTWD može uzrokovati udaranje žice na početku procesa. CTWD ima utjecaj na jakost struje i penetraciju zavora. Ako se CTWD poveća, struja i unos topline se smanjuje, čime je i slabija penetracija. Preporuka je držati CTWD konstantnim tijekom procesa zavarivanja.



Slika 3.10. Udaljenost vrha sapnice do radnog komada (1) i produžetak elektrode (2), [28]

Utjecaj jakosti struje, napona luka i protoka zaštitnog plina na geometrijske značajke zavora (dubinu penetracije, širinu zavora i visinu zavora) primjenom MIG procesa zavarivanja aluminijske legure AA2014 proučavan je u radu [29]. Za provedbu pokusa primjenjen je Taguchijev L9 ortogonalni plan pokusa, koji pomaže u smanjenju vremena i troškova pokusa. Plan pokusa se radio za 3 faktora (jakost struje zavarivanja, napon luka i protok plina) na 3 razine vrijednosti. Jakost struje zavarivanja kod MIG procesa ima najveći učinak na brzinu deponiranja, dimenzije i oblik zavora, te penetraciju. Pretjerano niska struja zavarivanja rezultira lošom penetracijom, te gomilanje metala zavora na površini osnovnog metala. Ukoliko je jakost struje prevelika dolazi do prevelike penetracije i progaranja zavora. Također, prevelika ili premala jakost struje uzrokuje pogoršanje mehaničkih svojstava zavora. S druge strane, kod prevelikog napona luka zavar postaje ravniji i širi, dok kod preniskog napona luka dolazi do užeg zavora i povećanja njegove konveksnosti. Kao zaštitni plin se kod MIG procesa koristi argon, helij ili njihova mješavina. Argon osigurava manje prskanja, a helij poboljšava penetraciju i profil zavora. Obzirom da je potrošnja helija za istu duljinu luka veća od argona, to uzrokuje i veće troškove.

Za primjenu procesa zavarivanja u WAAM tehnologiji izrade dijelova potrebno je pažljivo odabrati parametre vodeći računa o njihovom utjecaju na geometrijske značajke i mehanička svojstva gotovog proizvoda. U cilju razumijevanja prirode samog procesa i

njegove primjene u aditivnoj proizvodnji, u sljedećem poglavlju su opisane osnovne karakteristike procesa, utjecaj glavnih čimbenika na geometrijske značajke komada.



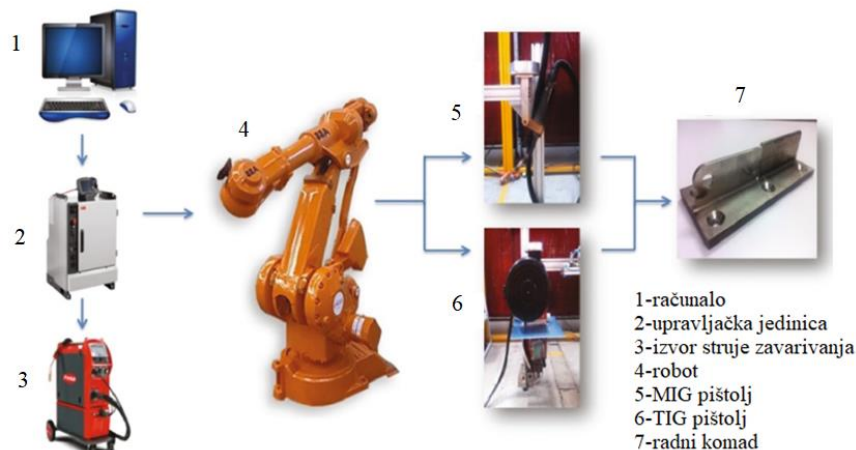
## 4. ADITIVNA PROIZVODNJA PRIMJENOM ELEKTRIČNOG LUKA I ŽICE (WAAM)

Aditivne tehnologije se razlikuju od konvencionalnih proizvodnih tehnologija u nekoliko aspekata i imaju veliki potencijal ukoliko se prilagode specifičnoj namjeni. Najvažnija osobina je fleksibilnost dizajna pri izradi sloj po sloj što smanjuje troškove proizvodnje. Pored poznatih prednosti, WAAM proces smanjuje troškove koji se odnose na raspoloživost postojeće opreme za zavarivanje i robotskih sustava, te nema potrebe za ulaganjem u razvoj posebne opreme za aditivnu proizvodnju.

### 4.1. Osnovna načela WAAM procesa

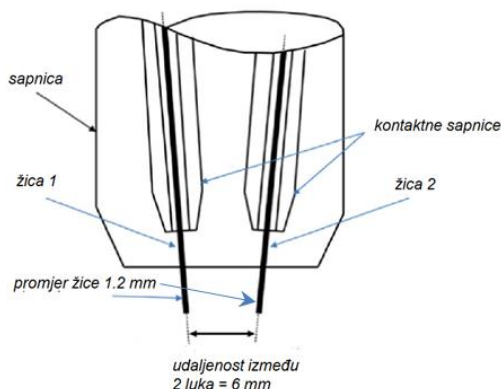
WAAM proces je proizvodni proces kojim se izrađuju metalni proizvodi iz 3D-CAD modela spajanjem materijala u slojevima, [30]. To je kombinacija aditivne proizvodnje, konvencionalne strojne obrade i elektrolučnog procesa zavarivanja. Iako je postignut značajan napredak, komercijalni sustavi aditivne proizvodnje koji uključuju elektrolučni proces se još uvijek razvijaju. Razlog tome je nedostatak automatiziranog optimalnog postavljanja procesnih parametara temeljem informacije o ulaznom CAD modelu. Procesni parametri kao što su putanja deponiranja, brzina dodavanja žice i brzina zavarivanja postavljaju se ovisno o geometriji komada, izvoru energije i odabranom materijalu. Ali za slučaj izrade proizvoda složene geometrije, programski odabir procesnih parametara postavlja se kao nužan uvjet stabilnosti procesa, jer ručno podešavanje parametara je u tom slučaju nepraktično. CAD modeli se režu u niz paralelnih slojeva u smjeru izrade, a komad se izrađuje po načelu „sloj po sloj“. Nakon rezanja u slojeve, pristupa se planiranju putanje, kada se posebna pozornost mora obratiti na zaostalo naprezanje i dimenzionalni odnos između geometrije sloja i geometrije komada. Izbor putanje utječe i na kvalitetu izrade komada WAAM procesom, a broj prolaza treba biti optimalan kako bi se izbjegle dodatne geometrijske nepravilnosti.

WAAM sustav se sastoji od izvora za elektrolučno zavarivanje, automatskog sustava za dobavu žice, radnog stola, računalno numerički upravljanih robotskih sustava, te neke dodatne opreme (npr. spremnik sa zaštitnim plinom, sustav predgrijavanja ili hlađenja). Tipičan robotizirani WAAM sustav prikazan je na slici 4.1, [6]. Računalno sučelje (1) se koristi za programiranje eksperimentalnog procesa i prikupljanje eksperimentalnih rezultata. Robotski kontroler (2) se koristi za koordinaciju kretanja robota i procesa zavarivanja. Za kontrolu postupka zavarivanja koristi se programabilni izvor struje zavarivanja (3). Robot (4) provodi kretanje pištolja za elektrolučno zavarivanje (5) (GMAW) ili pištolja za zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom (6) (GTAW). Nakon toga se izrađuje radni komad (7).



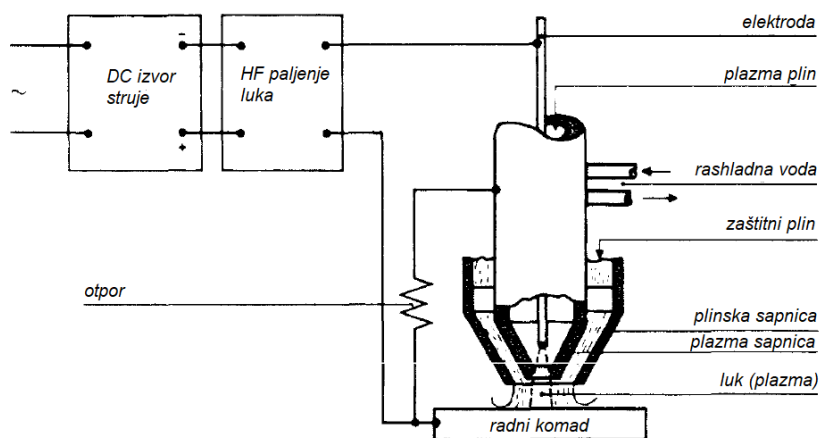
Slika 4.1. Shematski diagram razvijenog robotiziranog WAAM sustava, [6]

MIG proces zavarivanja je proces u kojem se stvara električni luk između taljive elektrode – žice i radnog komada. Kod MIG procesa se mogu koristiti različiti načini prijenosa metala, od impulsnog do štrcajućeg prijenosa. Široku primjenu kod WAAM procesa nalazi CMT proces, koji je u stvari kontrolirani način kratkospojnog prijenosa metala s niskim unosom topline, [31]. Tandem MIG proces, koji koristi pištolj s dvije žice za zavarivanje, također se primjenjuje pri izradi metalnih proizvoda visokim brzinama zavarivanja (eng. Twin-wire welding based additive manufacturing (TWAM)), [32], *slika 4.2.*



*Slika 4.2. Schematski prikaz pištolja s dvostrukom žicom za zavarivanje za WAAM, [32]*

Plasma Arc Welding (PAW) je elektrolučni proces zavarivanja koji koristi netaljivu volframovu elektrodu i električni plazma luk za zavarivanje metala, [28].

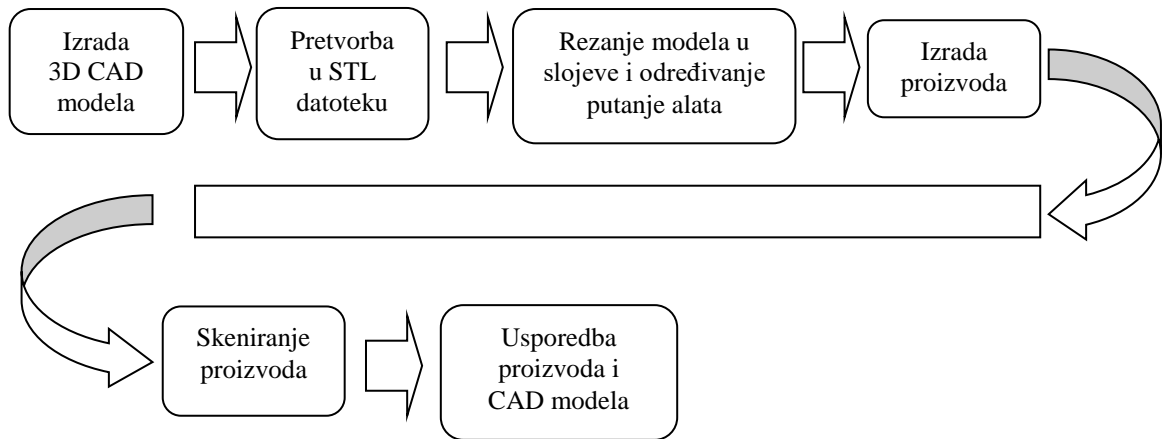


*Slika 4.3. Schematski prikaz PAW procesa zavarivanja, [28]*

Plazma proces zavarivanja koristi unutarnji plazma plin (argon, helij ili vodik) i vanjski zaštitni plin, kao što je prikazano *slikom 4.3.* Plazma plin teče oko netaljive volframove elektrode stvarajući plazma luk, a zaštitni plin teče kroz vanjsku sapnicu, slično kao kod TIG procesa zavarivanja.

Bez obzira koji se proces zavarivanja koristi u WAAM tehnologiji, sama tehnološka procedura sastoji se od određenog broja koraka nužnih za pripremu i izvedbu procesa i izradu kvalitetnog proizvoda.

Procedura WAAM tehnološkog procesa po koracima izvedbe prikazana je *slikom 4.4,* [33].



Slika 4.4. Koraci u izvedbi WAAM procesa, [33].

Prvi korak u tehnologiji WAAM procesa je izrada 3D CAD modela željenog proizvoda, nakon čega se model pretvara u STL format (od eng. stereolithography – oblik tehnologije 3D printanja) koji je najuobičajeniji u primjenama za aditivnu proizvodnju. Za ovaj korak je potrebno imati dostupan odgovarajući CAD program. 3D model se zatim reže po načelu „sloj po sloj“ u 2D plohe. Za svaki sloj se definira putanja alata koja se određuje „offline“ programiranjem kinematičkog kretanja robota. Nakon izrade, potrebno je proizvod skenirati i dimenzionalno usporediti sa 3D CAD modelom. U cilju dobivanja kvalitetnog konačnog proizvoda, uspoređuju se geometrijske značajke proizvoda, stanje površine, kao i mehanička svojstva. Pri tome je često potrebno izvesti strojnu obradu proizvoda do konačnih dimenzija, te toplinsku obradu radi anuliranja utjecaja zaostalih naprezanja i izbjegavanja pojave deformacije komada.

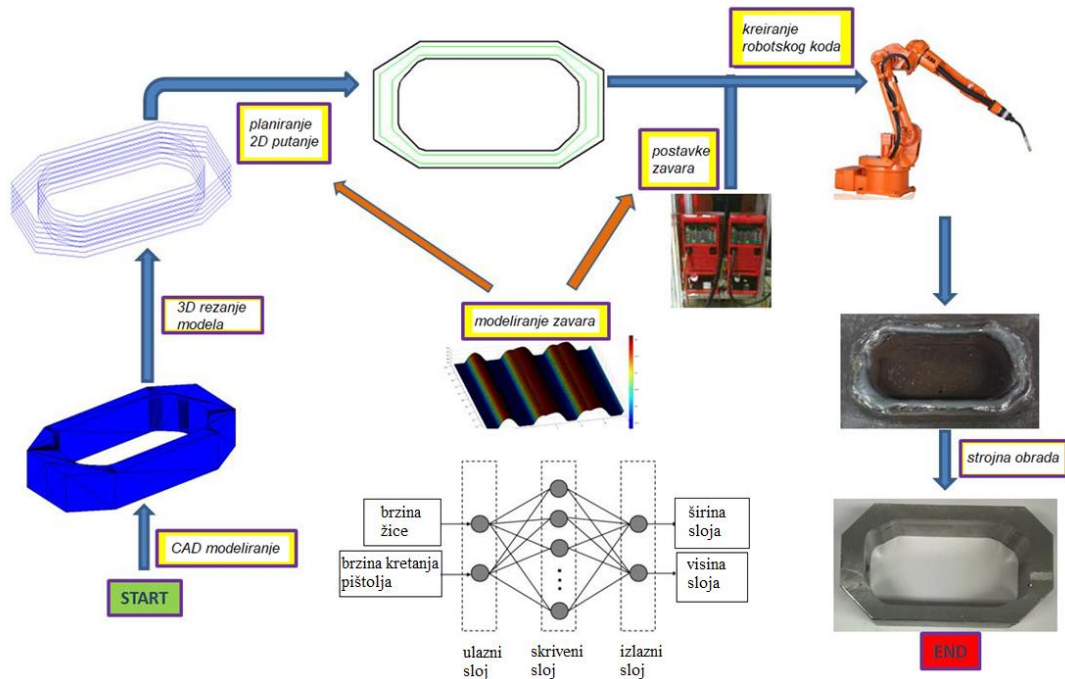
Daljnja istraživanja su temeljena na modeliranju i simulaciji WAAM procesa u cilju predviđanja mikrostrukture, mehaničkih svojstava, temperaturnog gradijenta. Većina modela se temelji na metodi konačnih elemenata, a dio istraživanja se odnosi na matematičke modele koje opisuju model raspodjele topline proizvoda primjenom WAAM procesa. Dio istraživanja modela zasniva se na predviđanju zaostalog naprezanja temeljenom na procesnim parametrima, a samo jedan mali dio se bavi predviđanjem geometrijskih značajki proizvoda. Obzirom na složenost WAAM procesa i njegovu sve veću primjenu, buduća istraživanja će se i dalje baviti optimiranjem procesa s ciljem poboljšanja i predviđanja mehaničkih i geometrijskih svojstava, analizom utjecaja raspodjele topline na mikrostrukturu, zaostala naprezanja i pojavu grešaka, kao i drugim značajkama tehnološkog procesa.

## 4.2. Robotizirani WAAM proces

Robotizirani WAAM proces predstavlja nezaobilazan preduvjet i standard svih današnjih znanstvenih istraživanja u području aditivne tehnologije, čime je pojednostavnjena izrada proizvoda složenih oblika i različitih dimenzija.

Robotizirani WAAM proces se odvija u sinkroniziranim koracima, koji su prikazani slikom 4.5., [30].

Pored već opisanih koraka u provedbi WAAM procesa, značajna je primjena umjetnih neuronskih mreža za predviđanje geometrije, a temeljem čega se i biraju odgovarajući glavni parametri procesa. Putanje pištolja za zavarivanje zajedno s definiranim parametrima zavarivanja prevedeni su u robotski kod koji se koristi u procesu izrade. Nakon izrade proizvoda po potrebi se provodi robotizirana strojna obrada.



Slika 4.5. Koraci robotiziranog WAAM procesa, [30]

## Definiranje putanje robota

U radu [34] je prezentirana nova metodologija izrade putanje pištolja kod primjene WAAM procesa, odnosno, algoritam MAT (eng. Medial Axis Transformation) putanje koji predstavlja osnovu zadane geometrije. Ovom metodologijom je moguće popuniti bilo koji zadani poprečni presjek bez praznina. MAT metodologija je tehnika opisivanja putanje pomoću središnje osi koja je definirana kao središnja linija koja povezuje lokalne maksimume kružnica koje dodiruju konture unutar nekog objekta. Pokusi su pokazali da je postignuta poboljšana kvaliteta izrađenog komada uporabom algoritma MAT putanje pištolja u usporedbi s primjenom tradicionalne konture putanje. Nastavno na navedeno, provedeno je istraživanje GMAW procesa zavarivanja primjenom bakrom čelične žice promjera 1.2 mm, [35]. Cilj istraživanja je bilo optimiranje parametara zavarivanja (brzine dodavanja žice, brzine zavarivanja) temeljeno na geometrijskim značajkama zavara (visina zavara, širina zavara) dobivenim predviđanjem primjenom modela neuronskih mreža. Drugi dio istraživanja je bilo određivanje optimalne putanje pištolja za zavarivanje primjenom algoritma MAT putanje. Razvijeni modeli su testirani u dva pokusa, koji su pokazali mogućnost izrade metalnih komponenti visoke kvalitete i geometrijske točnosti.

Većina komercijalnih AM procesa uključuje rezanje 3D CAD modela u niz 2.5D slojeva s konstantnom ili adaptivnom debljinom okomito na smjer izrade (obično označen kao smjer Z+). Međutim, za proizvodnju složenijih oblika WAAM tehnologijom, postupak jednosmjernog rezanja slojeva ima ograničenje u primjeni, te se uvodi metoda višesmjernog rezanja slojeva CAD modela, [36]. U ovom radu predstavljena je nova strategija višestrukog rezanja CAD modela prikazanih u STL formatu za aditivnu proizvodnju (AM). Za razliku od prethodno izrađenih metodologija u literaturi, pojednostavljenje modela i koncept dekompozicije-pregrupiranja uvode se u tijek rada. Algoritam je provjeren kao učinkovita i fleksibilna metoda za različite vrste CAD modela u AM primjeni.

Robotizirani WAAM proces ima posebnu ulogu pri izradi 3D modela, posebice kod primjene metoda predviđanja kojima se precizno određuju geometrijske i mehaničke značajke finalnog proizvoda. U radu [37] razvijen je model poprečnog presjeka profila primjenom

funkcija parabole, kosinusa i arkus kosinusa, uporabom laserskog 3D sustava za skeniranje, odnosno, mjerenja u visokoj rezoluciji. Također su analizirani geometrijski profili dobiveni kod procesa s višestrukim preklapanjem (FOM – Flat top Overlapping Model) i procesa s tangencijalnim preklapanjem (TOM – Tangent Overlapping Model). Razvijen je matematički model za predviđanje kritične udaljenosti između vrhova susjednih profila zavara, a predloženi model je provjeren eksperimentalno. Korišteni materijal je čelik, a proces robotizirani MIG.

U svakom slučaju, robotizirani sustav predstavlja standardizirani sustav koji se primjenjuje u svim današnjim istraživanjima u svrhu razvoja i primjene aditivnih tehnologija, dajući uvjete kojima se utječe na samu kvalitetu, stabilnost tehnološkog procesa i ponovljivost provedenih eksperimenata.

### **4.3. Metali u aditivnoj proizvodnji i elektrolučnim procesima**

Uobičajeni metali koji se primjenjuju u aditivnoj proizvodnji su čelik, aluminijeve legure, titan i njegove legure, superlegure na bazi nikla, CoCr, kao i drugi različiti metalni materijali, [16]. Pri tome je značajno definirati odnos između procesnih parametara, mikrostrukture i svojstava proizvedenih dijelova. Većina navedenih metala se koristi u aditivnoj proizvodnji primjenom četiri od sedam prethodno navedenih standardnih tehnologija – spajanje praškastim materijalom (eng. Powder Bed Fusion), deponiranje direktnom primjenom energije (eng. Direct Energy Deposition), naštrcavanje veziva (eng. Binder Jetting) i laminiranje listova (eng. Sheet Lamination), [17]. Nadalje, razlikuju se procesi koji koriste metalni prah ili metalnu žicu kao materijal za spajanje. Aditivni procesi koji koriste metalni prah su u najvećoj mjeri LBM (Laser Beam Melting), EBM (Electron Beam Melting) i LMD (Laser Metal Deposition). U posljednje vrijeme, ovi procesi se primjenjuju u dentalnoj industriji za izradu zubnih proteza (CoCr čelici), zatim alatni čelici u izradi dijelova za alate, biomedicinske svrhe (implatati od titanova legura Ti-6Al-4V), avio-industriji, dijelovima za sustave goriva i dr.

#### **Čelik**

Čelik je još uvijek najčešće korišteni tehnički materijal te stoga predstavlja i materijal od velikog interesa za aditivnu proizvodnju, [16]. Za aditivnu proizvodnju se najčešće koriste austenitni nehrđajući čelici, maraging čelici, precipitacijski očvrnuti nehrđajući čelici, mertenzitni čelici i alatni čelici. Navedeni čelici se primjenjuju tamo gdje se javljaju potrebe za materijalima povećane čvrstoće i tvrdoće. Mikrostruktura čeličnih dijelova dobivenih aditivnom proizvodnjom je finožrnata, usmjerenog zrna, što ovisno o odabranim procesnim parametrima utječe i na mehanička svojstva. Mehanička svojstva čelika, također, zadovoljavaju standardne specifikacije za tehnološke primjene. Finožrnata struktura dovodi do značajnog povećanja vlačne čvrstoće i granice tečenja, a ovisi o odabranom procesu i procesnim parametrima, te uvjetima toplinske obrade nakon izrade.

#### **Aluminijeve legure**

Najčešće korištene aluminijeve legure u aditivnoj proizvodnji su AlSi10Mg, AlSi12, Al-Mg-Sc, Al-Mg, Al-Mg-Si i Al-Cu legure. Različite aluminijeve legure imaju ograničenje u njihovoj teškoj zavarljivosti, pojavi prskanja i poroznosti, što predstavlja ograničenje i u aditivnoj proizvodnji, [16]. Kod aditivne proizvodnje AlSi10Mg i AlSi12 legura, mikrostrukturu karakterizira nehomogenost, prijelaz od finožrnate do grubožrnate dendritične strukture. Vlačna svojstva aluminijevih legura dobivenih aditivnom proizvodnjom imaju

slično ponašanje kao kod čelika, s obzirom na mikrostrukturu. Finozrnata struktura vodi ka povećanju čvrstoće, dok kod precipitacijskog očvršćavanja do povećanja čvrstoće i tvrdoće dolazi zbog promjene otopivosti legiranih elemenata, odnosno, stvaranja precipitata u osnovnom metalu.

## **Titan i njegove legure**

Titan i njegove legure nalaze široku industrijsku primjenu u proizvodnji dijelova visokih performansi, s visokim troškovima obrade i dugim vremenima u konvencionalnoj proizvodnji, [16]. Stoga, titan ima izrazitu prednost pri aditivnoj proizvodnji, kako dijelova od čistog titana, tako i dijelova od titanovih legura koje se koriste u komercijalne svrhe, primjerice Ti-6Al-4V. Ostale titanove legure koje su zanimljive za istraživanje su Ti-24Nb-4Zr-8Sn i Ti-6Al-7Nb (biomedicinske svrhe), te Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si (zrakoplovstvo). Pri tome je potrebno naglasiti kako velika raznolikost sastava legura i alotropska modifikacija titana u kombinaciji s visokim temperaturnim gradijentima i složenim toplinskim procesima čine titan jednim od najzanimljivijih materijala za istraživanje glede mikrostrukture i svojstava. Zbog svoje usmjerene teksture i porasta zrna zbog velikog temperaturnog gradijenta pri skrućivanju, posljedično dolazi do anizotropnih mehaničkih svojstava, [18]. Rastezljivost i žilavost su veće u uzdužnom nego u poprečnom smjeru izrade komada. Toplinski gradijent i brzina hlađenja rezultiraju u različitoj mikrostrukturi, što utječe i na različitu mikrotvrdoću u pojedinim područjima proizvedenog komada.

## **Ostali metalni materijali**

Ostali metalni materijali koji nalaze primjenu u aditivnoj proizvodnji su niklove superlegure za primjenu na visokim temperaturama, kao što su Inconel 625 i Inconel 718, kod kojih se primjenjuju EBM i LBM tehnološki procesi, [16]. Pored toga, u posljednje vrijeme se primjenjuju i CoCr, Invar, magnezij, tantal, te plemeniti metali kao što su srebro, bakar i legura  $\gamma$ -TiAl.

### **4.4. Primjeri metalnih komponenti izrađenih pomoću WAAM procesa**

Elektrolučni GMAW proces sve više zauzima značajno mjesto u aditivnoj tehnologiji izrade dijelova od aluminijskih legura. Najšira primjena aditivne proizvodnje aluminijskih dijelova je u avionskoj i automobilskoj industriji. WAAM tehnologija se koristi za izradu različitih komponenti uključujući čelične oklopne ploče, tankovi goriva, lopatice turbina, dijelovi krila zrakoplova i razne pregrade.

U daljnjem tekstu su prikazani neki od primjera aditivne proizvodnje aluminijskih dijelova, *slika 4.6*.



a) Aluminijsko rebro krila aviona, [38]  
 b) Aluminijska kupola tanka goriva, [39]  
 c) Složeni profil titanove zrakoplovne komponente [40]  
 d) Dio zrakoplovnog krila od titanove legure, [39]  
 e) Čahure granate od nehrđajućeg čelika [6]  
 f) Čelična turbinska lopatica [6]  
 g) Dio izrađen od raznorodnih materijala čelik/bronca [6]

Prednosti WAAM tehnologije omogućavaju njenu primjenu u industrijama kao što su zrakoplovna, automobilska, pomorska, vojna i dr. Poglavitito se to odnosi na izradu velikih dijelova srednje složenosti geometrije, pri čemu se mogu postići značajne uštede u materijalu i vremenu proizvodnje. Naravno da se pri tome moraju zadovoljiti zahtjevi funkcionalnosti i kvalitete proizvoda.

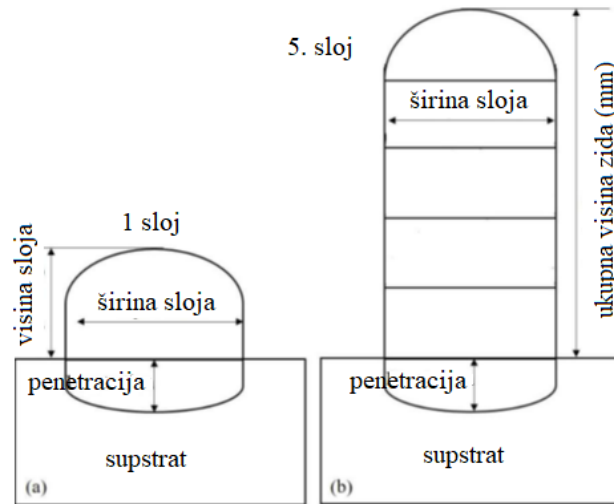
#### 4.5. Profili zidova u WAAM tehnologiji

Najjednostavnija struktura, koja se koristi u većini znanstveno-istraživačkih radova, je struktura zida. Izradom strukture zida omogućava se definiranje parametara procesa, proučavanje mikrostrukture, mehaničkih svojstava, geometrijskih značajki, kao i istraživanje pojave grešaka koje se javljaju u samoj strukturi. Time je stvorena podloga i olakšana procedura usvajanja aditivne tehnologije s ciljem izrade gotovog proizvoda.

Profili zidova koji se koriste u istraživanju ovise o svrsi, a mogu biti:

- ravni - okomiti, vodoravni i pod kutem,
- cilindrični – kružni i ovalni,
- konični – kružni i ovalni,
- kvadratični,
- preklapajući blokovi
- križni,
- složeni.

Shematski prikaz geometrije okomitog zida vidljiv je na slici 4.7.



Slika 4.7.. Shematski prikaz geometrije zida WAAM procesa, [41]

Tipični primjeri struktura zidova prikazani su slikom 4.8.



a)



b)



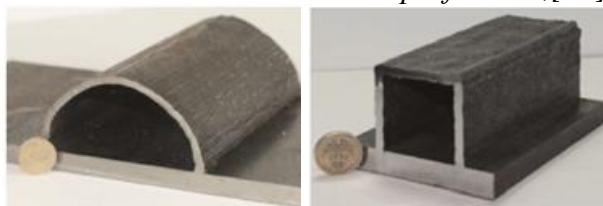
c)

Slika 4.8. Ravni profil zida, [30, 42]:  
a) okomiti, b) vodoravni, c) pod kutem





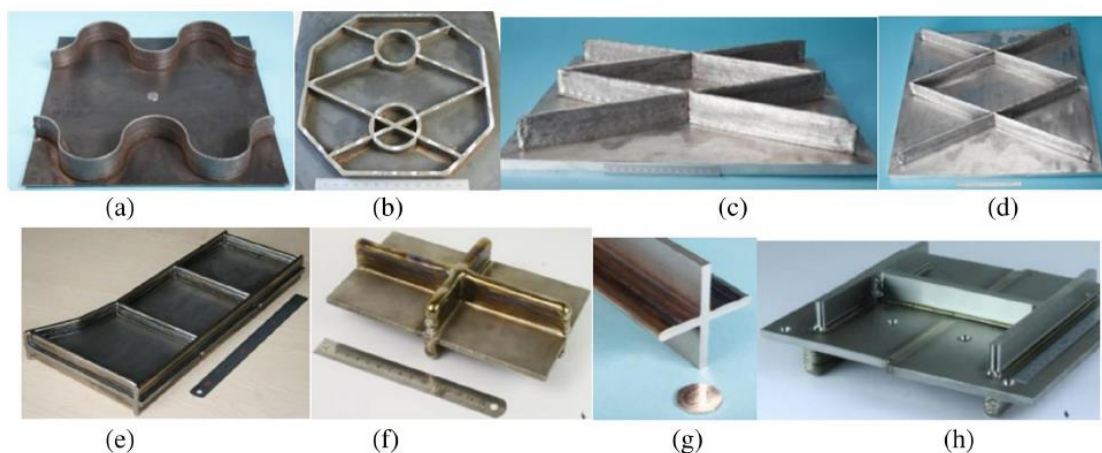
Slika 4.9. Cilindrični i konični profili zida, [39]



Slika 4.10. Zatvoreni cilindrični i kvadratični profil zida, [42]



Slika 4.11. Preklapajući blokovi, [43]



Slika 4.12. Primjeri složene geometrije izrađene WAAM procesom, [44]

(a), (b) – ugljični čelik, (c), (d) – aluminijska legura  
 (e), (f), (g), (h) – titanove legure

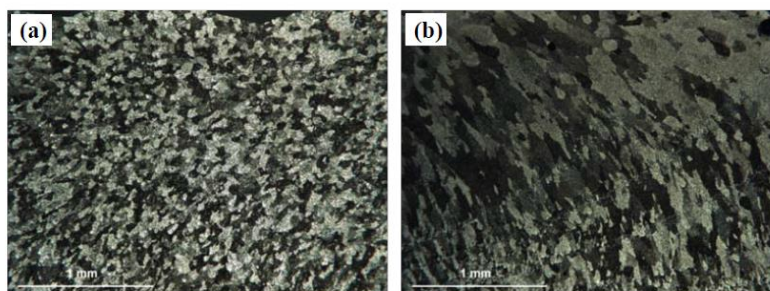
#### 4.6. Proučavanje značajki dijelova izrađenih WAAM tehnologijom

U cilju osiguranja potrebne kvalitete izrađenog proizvoda i usvajanja WAAM tehnologije, proučavaju se i njegove značajke. U sklopu toga se promatra mikrostruktura, mehanička svojstva, geometrijske značajke, ali i greške koje se javljaju u izrađenom dijelu.

##### 4.6.1. Mikrostruktura i mehanička svojstva izrađenih dijelova

Zasigurno da, ovisno o odabranom procesu, procesni parametri interaktivnim djelovanjem utječu na mikrostrukturu izrađenog dijela. Promjene u mikrostrukturi se očituju u obliku, veličini i usmjerenosti zrna i porozitet. Samim time se utječe na mehanička svojstva (vlačnu čvrstoću i tvrdoću, te deformaciju). Stoga je ispitivanje mikrostrukture i mehaničkih svojstava predmet istraživanja od posebne važnosti.

Tipičan primjer mikrostrukture prikazan *slikom 4.13*, opisan u radu [45], a odnosi se na aluminijsku leguru Al 2319, uz primjenu CMT procesa. Finozrnata struktura je postignuta primjenom CMT-PADV procesa (slika 4.13.a), a gruba stupičasta struktura zrna je postignuta CMT-P procesom (slika 4.13.b). Analizom mikrostrukture se dobio uvid i u pojavu pora, za odabranu aluminijsku leguru 2319. Najpogodniji proces, s najmanje pora, pokazao se CMT-PADV, zbog dobivene finozrnate strukture. Mehanička svojstva, čvrstoća i elengacija se uspoređivala s kovanim aluminijskim legurama 2219-O i 2219-T851. Granica tečenja ( $\sigma_{0,2}$ ) i prekidna čvrstoća su kod aluminijske legure 2319, dobivene aditivnim procesom značajno više u odnosu na Al2219-O, ali istovremeno su niži u odnosu na Al2219-T851.



Slika 4.13. Mikrostruktura Al-2319 postignuta CMT procesom, [45]  
a) CMT-PADV proces, b) CMT-P proces

Iz navedenog primjera se uočava važnost ispitivanja mikrostrukture i mehaničkih svojstava u cilju usvajanja aditivne tehnologije i primjene u praksi.

##### 4.6.2. Karakteristične greške izrađenih dijelova

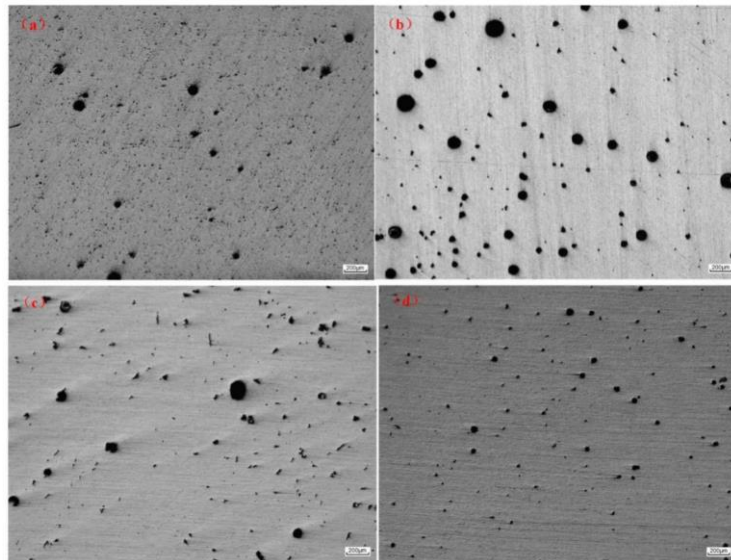
U svakom tehnološkom procesu, pa tako i u aditivnoj tehnologiji su moguće određene nepravilnosti, odnosno greške koje utječu na kvalitetu proizvoda u konačnici.

Karakteristične greške izrađenih dijelova su:

- pojava pora u mikrostrukturi,
- nedovoljno spajanje,
- pukotine,
- zaostala naprezanja i deformacije.

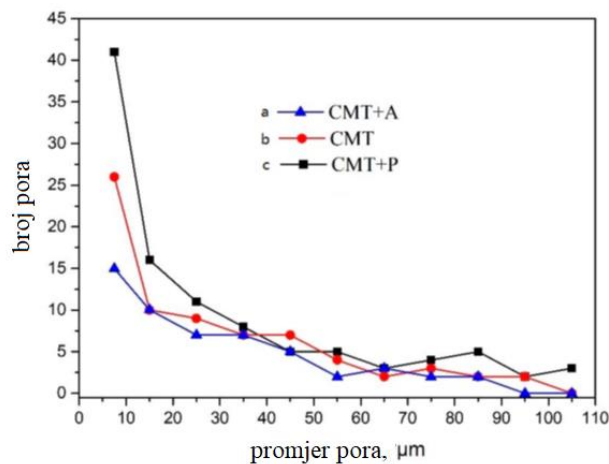
Među navedenim greškama, najčešće se proučava pojava pora, zaostala napreznja i deformacije.

Porozitet ima štetan utjecaj na mehanička svojstva izrađenih komponenti. Stoga se u istraživanju primjene WAAM procesa ispituje i analizira pojava pora kroz poučavanje mikrostrukture. Često se uspoređuju različite inačice procesa sa stanovišta pojave pora, kako bi se ustanovilo koja je inačica prikladnija za primjenu, *slika 4.14.*, [45, 46, 47]. Pri tome se bilježi i uspoređuje broj i promjer pora, *slika 4.15.*



*Slika 4.14.* Porozitet višeslojnih zidova Al 2219 izrađenih CMT procesom, [46]:

a) CMT, b) CMT-ADV, c) CMT-P, d) CMT-PADV



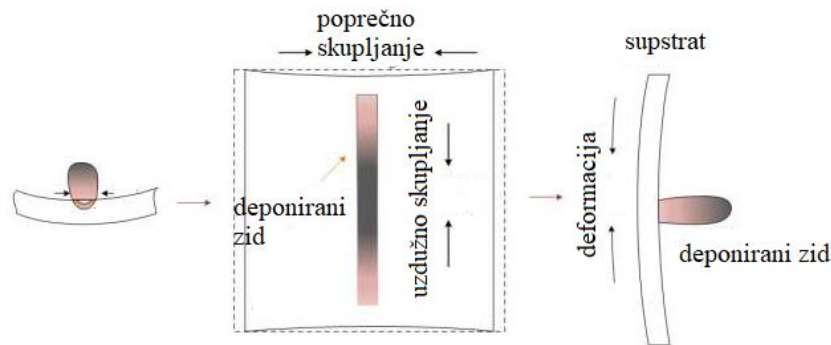
*Slika 4.15.* Ovisnost broja pora o promjeru, [47]:

a) CMT-A, b) CMT, c) CMT-P

Krupnozrnata struktura i porozitet negativno utječu namehanička svojstva, vlačnu čvrstoću i mikrotvrdoću. Naročito je to ograničenje u primjeni aditivne tehnologije aluminijskih legura. Finije zrno i smajenje broja pora se može postići mijenjanjem karakteristika odabranog procesa. Kod impulsnog procesa je to smanjenje frekvencije impulsa i sniženje jakosti impulsne struje, [48].

Zaostala napreznja i deformacije su također greške koje se javljaju pri izradi dijelova primjenom WAAM tehnologije. Zaostala napreznja su napreznja koja ostanu u materijalu i mogu biti značajan negativan utjecajni čimbenik na mehanička svojstva i zamor materijala, kao i na dimenzionalnu točnost. Javljaju se kao posljedica utjecaja odabranih procesnih

parametara, odnosno pretjeranog unosa topline izvora. Pravilnim odabirom procesnih parametara izbjegava se pojava zaostalih napreznja. Zaostala napreznja mogu izazvati deformaciju supstrata i komponente izrađene WAAM tehnologijom, *slika 4.16*.



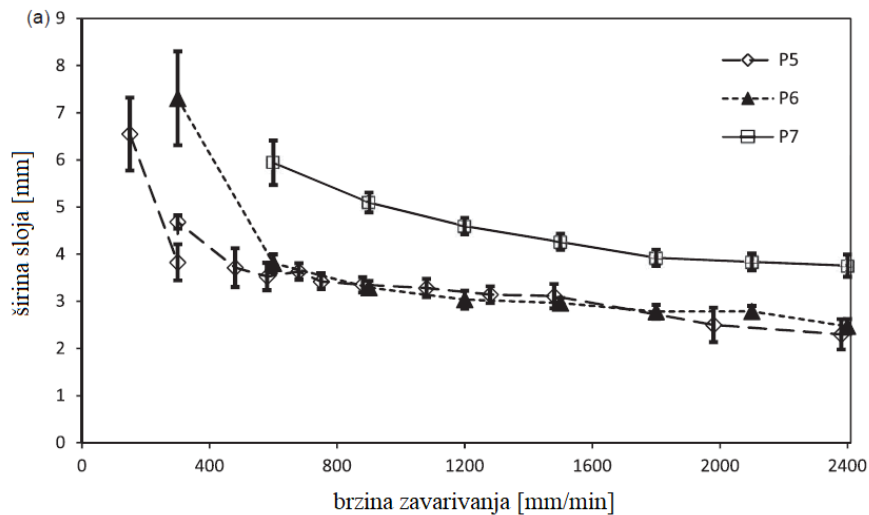
*Slika 4.16. Primjer deformacije izazvane zaostalim napreznjem, [49]*

#### **4.7. Utjecaj parametara WAAM procesa na geometrijske značajke izrađenog zida**

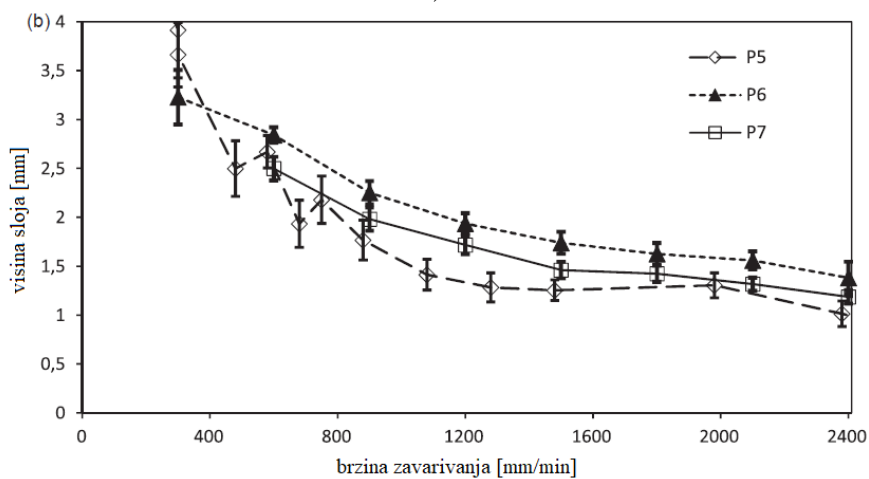
Parametri zavarivanja odabranog procesa koji se primjenjuje u aditivnoj tehnologiji imaju ključan utjecaj na mikrostrukturu, mehanička svojstva i geometrijske značajke proizvedenog komada. Eksperimentiranje je pokazalo kako se parametri zavarivanja elektrolučnog procesa mogu uspješno primijeniti na izradu prvog sloja, dok utjecaj parametara zbog akumuliranja topline u komadu koji se izrađuje, ima drugačiji učinak na izradu ostalih slojeva.

U znanstvenim istraživanjima s primjenom WAAM tehnologije, proučavaju se različiti geometrijski profili izrađenih komada, kao što su: cilindrični profil, okomiti zid, T-profil, križni profil ili neki drugi profili složenije geometrije. Svi navedeni profili se izrađuju deponiranjem metalne žice na supstrat po načelu „sloj po sloj“, uz prethodno definiranu putanju robota i odabrane procesne parametre. Okomiti zid je najjednostavniji geometrijski profil koji se koristi u proučavanju aditivne tehnologije zasnovane na električnom luku i žici. Glavne geometrijske značajke zida su: širina zida (sloja), visina zida (sloja), površina poprečnog presjeka profila i površinska hrapavost. Informacije koje se dobiju proučavanjem navedenih geometrijskih značajki koriste se u konačnici pri definiranju dimenzionalne točnosti gotovih proizvoda.

Utjecaj parametara zavarivanja na kvalitetu slojeva aluminijske legure Al5Si opisan je u radu [38], gdje su se pokusi provodili primjenom CMT procesa, najprije u jednom sloju, a zatim u 100 slojeva. Pri tome je provjeravana geometrijska točnost računanjem standardne devijacije visine i širine sloja mjerene na 50 poprečnih presjeka. Deponiranjem 100 slojeva formiran je zid, a standardna devijacija mjerene širine zida je iznosila oko 0.3 mm. Izrada višeslojnih zidova je zahtijevala progresivno povećanje brzine zavarivanja radi očuvanja konstantne širine sloja zbog akumulacije topline za vrijeme dodavanja uzastopnih slojeva. Također je postignuto linearno povećanje visine zida s porastom broja slojeva, što znači da je načelno postignuta konstantna debljina svakog sloja. Ovisnost visine i širine depozita jednog sloja o brzini zavarivanja za 3 različita seta parametara prikazana je *slikom 4.17*.



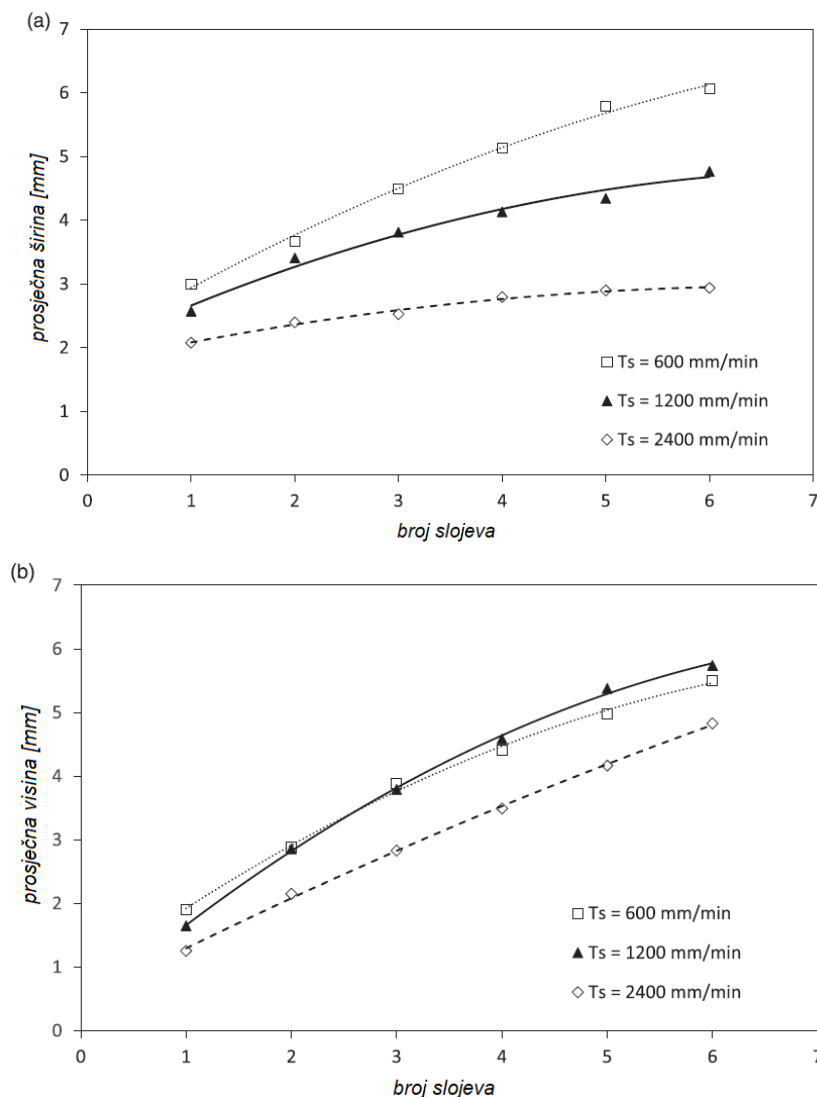
a)



b)

Slika 4.17. Ovisnost širine (a) i visine (b) depozita jednog sloja o brzini zavarivanja kod CMT procesa, [50]

Nakon pokusa s jednim slojem, izvedeni su pokusi s više slojeva promatrajući širine i visine zida u ovisnosti o broju slojeva, za 3 različite brzine zavarivanja, slika 4.18.



Slika 4.18. Ovisnost širine (a) i visine (b) o broju slojeva za različite brzine zavarivanja kod CMT procesa, [50]

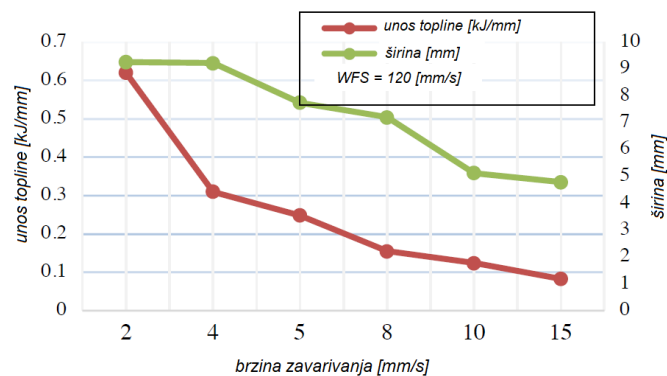
U cilju poboljšanja geometrijske kvalitete slojeva i bolje razumijevanja učinka svakog procesnog parametra na zagrijavanje žice i prijenos metala, provedeno je optimiranje procesnih parametara, jakosti struje i brzine žice. Promatran je utjecaj impulsne struje, trajanja impulsa, frekvencije kratkih spojeva, brzine žice na geometriju, odnosno, standardnu devijaciju geometrijskih značajki. Rezultati su poslužili za razumijevanje učinka navedenih parametara na prijenos metala i dane su preporuke za poboljšanje geometrijske točnosti i oblika za buduće optimiranje izrade gotovih dijelova.

Utjecaj glavnih parametara WAAM procesa je opisan kako slijedi:

*Brzina dodavanja žice* – optimalna brzina žice je značajna zbog izbjegavanja nekontinuiranog deponiranja i dimenzionalne netočnosti. Stoga je potrebno odrediti okvir minimalne i maksimalne vrijednosti brzine žice za pojedinu primjenu. Visina sloja je linearno povezana sa brzinom žice. Dakle, porastom brzine više je potrebno vremena da se talina skrutne, pa raste širina sloja, a visina sloja se smanjuje.

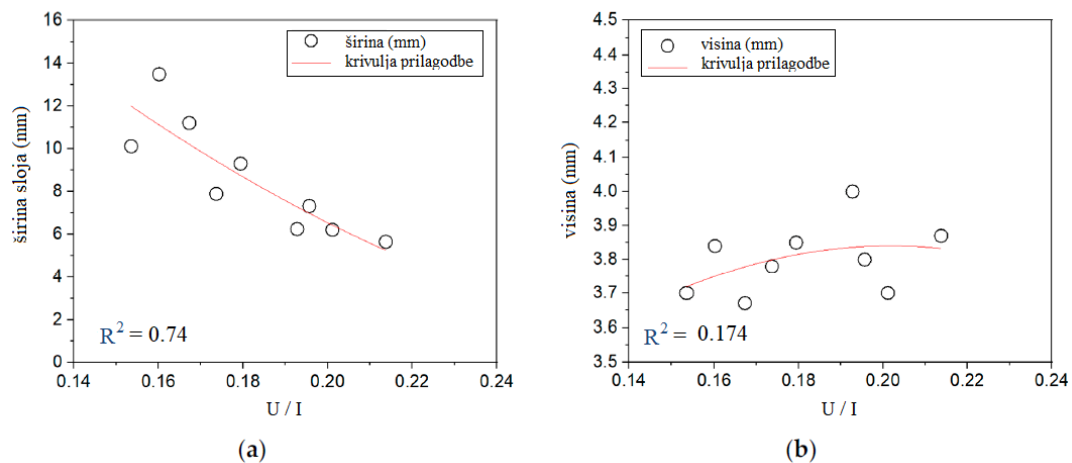
*Brzina zavarivanja* – predstavlja brzinu kojom se kreće pištolj za zavarivanje u smjeru deponiranja metala. Brzina zavarivanja obrnuto proporcionalno utječe na penetraciju i širinu slojeva. Dakle, povećanjem brzine zavarivanja smanjuje se širina zavara i penetracija.

Unos topline po duljini sloja,  $Q$  [kJ/mm] – predstavlja unos energije električnog luka po jedinici duljine sloja, a ovisi o naponu električnog luka, jakosti struje zavarivanja, brzini zavarivanja i efikasnosti električnog luka. Svaki od navedenih parametara zavarivanja ima zaseban utjecaj na geometrijske značajke, mikrostrukturu i mehanička svojstva zavora, ali njihov zajednički utjecaj definira se kao unos topline. Kod deponiranja više slojeva dolazi do pojave akumuliranja topline u komadu tijekom nanošenja svakog novog sloja. Pored toga, u početnim slojevima povećani utjecaj ima i odvođenje topline podloge. Kako bi se kontrolirao učinak unosa topline na navedena svojstva, modificiraju se i uvode nove tehnologije glede postizanja željenih značajki sa što manjim unosom topline. Da bi se smanjio utjecaj akumulacije topline, povećava se i brzina zavarivanja koja utječe i na smanjenje širine sloja, [51], slika 4.19.

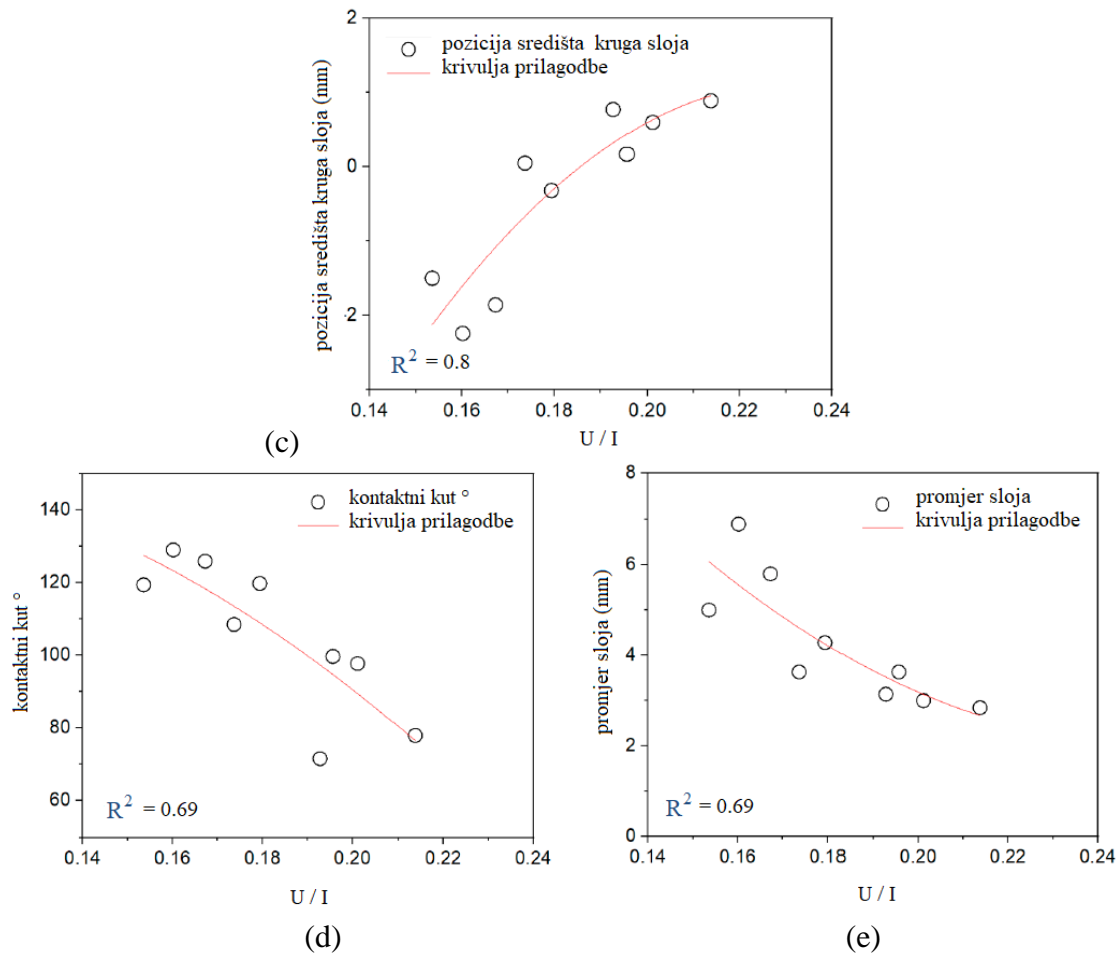


Slika 4.19. Utjecaj brzine zavarivanja na unos topline i širinu sloja, [51]

Međutim, prevelikim povećanjem brzine zavarivanja može se postići suprotni učinak, pojava grešaka u geometriji sloja. Stoga je potrebno optimirati druge procesne parametre ( $U, I, v_z$ ) u cilju održanja unosa topline konstantnim. Pored promatranja utjecaja jakosti struje i napona luka, često se uzima u razmatranje kombinirani utjecaj omjera  $U/I$  na pojedinu geometrijsku značajku. Utjecaj omjera  $U/I$  na geometriju prvog sloja proučavan je u radu [52]. Ovaj odnos je prikazan slikom 4.20.



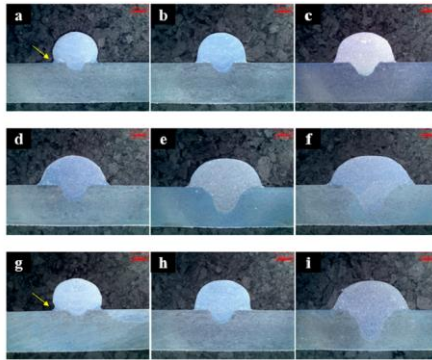
Slika 4.20. Ovisnost geometrije sloja o omjeru  $U/I$ : a) širina sloja; b) visina sloja; c) kontakti kut; d) promjer presjeka; e) položaj središta kruga, [52]



Slika 4.21. Ovisnost geometrije sloja o omjeru  $U/I$ : a) širina sloja; b) visina sloja; c) kontaktni kut; d) promjer presjeka; e) položaj središta kruga, [52]-nastavak

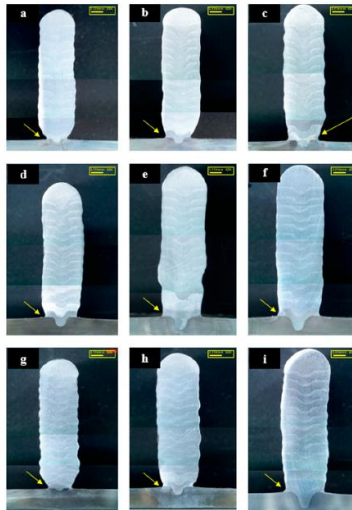
Za pokuse je korištena aluminijska ploča Al 7075, dimenzija  $L \times W \times H = 250 \text{ mm} \times 75 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$ . Korištena žica ER5356 promjera 1.2 mm. Zaštitni plin 99% argon, protoka 18 l/min. radni kut pištolja je bio  $90^\circ$ , a CTWD = 15 mm. Pokusi su se provodili primjenom CMT procesa u dvije faze. U prvoj fazi se izvodio jedan sloj, a promjena geometrije se promatrala za 9 različitih setova parametara. U prvih 6 pokusa je mijenjana brzina dodavanja žice u rasponu od 5 m/min do 7,5 m/min u intervalima od 0,5 m/min, a brzina zavarivanja se cijelo vrijeme držala konstantnom. Vrijednost napona luka je podešavana korekcijom duljine luka na uređaju za zavarivanje. U preostala 3 pokusa mijenjan je odnos  $U/I$  s ciljem promatranja utjecaja na geometrijske značajke. Visoki omjer  $U/I$  znači da je udio napona u unosu topline povećan. Održavajući unos topline približno konstantnim pretpostavlja se kako bi geometrija presjeka trebala biti ista. Međutim, geometrija presjeka je u provedenim pokusima bila različita, što znači da je uzrok tome različit odnos  $U/I$ , odnosno udio napona luka ili jakosti struje u unosu topline je bio različit. Razlike između unosa topline i omjera  $U/I$  utječu na geometriju presjeka jedno sloja, a kumulativna razlika tih parametara za više slojeva utječe i na kompletnu geometriju zida ili izrađenog komada. Te geometrijske razlike za različite kombinacije napona i jakosti struje luka prikazane su slikom 4.22.





Slika 4.22. Slike geometrije jednog sloja za različite parametre  
 a) 80A, 17.1V; b) 87A, 17.5V; c) 92A, 18V;  
 d) 102A, 18.3V; e) 110A 18.4V; f) 118A, 18.9V  
 g) 83A, 16V; h) 90A 16.5V; i) 112A 17.2V, [52]

U drugoj fazi je izrađeno 9 zidova, 15 slojeva svaki za iste parametre kao kod izrade jednog sloja, deponiranjem svakog sloja u smjeru suprotnom od prethodnog, duljina sloja 150 mm. Geometrija presjeka ovako dobivenih zidova je prikazana slikom 4.23.



Slika 4.23. Geometrija višeslojnog zida za različite parametre, [52]

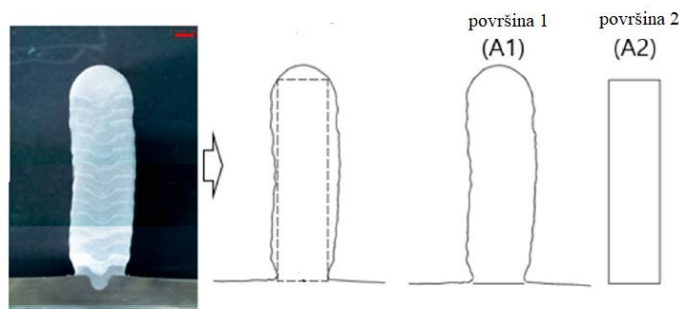
Pored navedenog utjecaja omjera U/I, često se promatra parametar koji se zove efikasnost deponiranja, a koji je definiran na sljedeći način:

$$\eta_d = \frac{A_2}{A_1} \quad (4.1)$$

gdje su:

$A_2$  – efektivna (iskoristiva) površina poprečnog presjeka,

$A_1$  – ukupna površina poprečnog presjeka, prikazano slikom 4.24.



Slika 4.24. Određivanje površina  $A_1$  i  $A_2$  za izračun  $\eta_d$ , [52]

Rezultati pokusa su pokazali da smanjenjem udjela napona u unosu topline za 10% smanjuje se efikasnost deponiranja za 1 do 3 %.

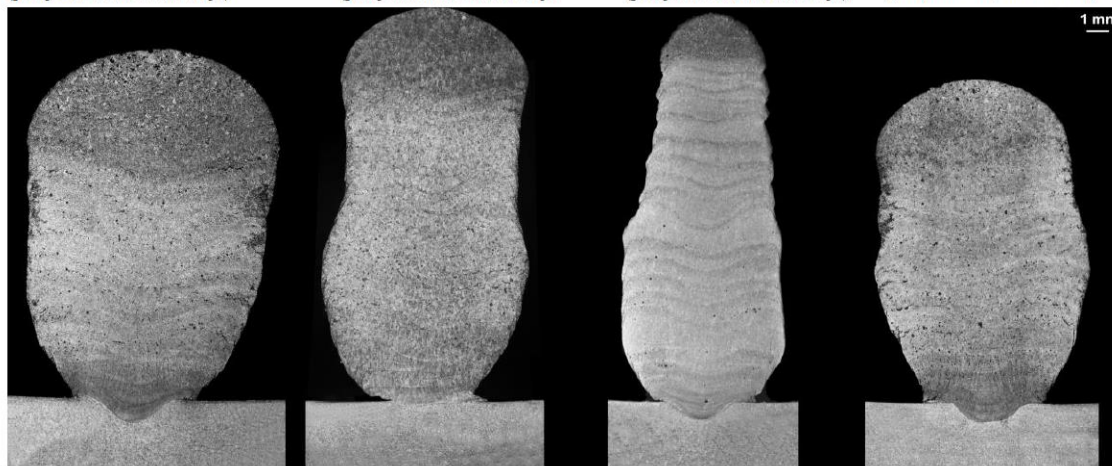
Zanimljiv pristup u izradi višeslojnog zida opisan je u radu [53], gdje su se primjenjivale različite strategije izbora procesnih parametara, a geometrijske značajke su se promatrale kroz površinu poprečnog presjeka zida. Primijenjen je MIG proces s dvostrukim impulsom (DP-MIG) zbog bolje jednolikosti geometrije u odnosu ka klasični MIG. Dvije tehnike deponiranja su primijenjene: 1. postepenim smanjenjem jakosti struje i 2. postepenim povećanjem brzine zavarivanja. Izrađeni su zidovi s 20 slojeva, a svakih 5 slojeva su se mijenjali parametri, bilo da se radi o jakosti struje ili brzini zavarivanja. Ostali parametri su birani sinergijski (brzina žice i napon luka).

Za procjenu kvalitete dimenzija, promatrani su sljedeći parametri:

- efektivna visina zida,
- efektivna širina zida,
- efektivna površina poprečnog presjeka zida,
- omjer efektivne visine i efektivne širine zida.

Postignute geometrijske značajke za ovako birane parametre prikazane su *slikom 4.25*.

|  |   |   |  |
|--|---|---|--|
| Jednoliki parametri:<br>120A<br>120 cm/min<br>(prosječno 106,8 J/mm/sloju) | 2 razine parametara:<br>120 A, 90 A<br>120 cm/min<br>(prosječno 90,75 J/mm/sloju) | 4 razine parametara:<br>120 A, 90 A, 67,5 A, 50,5 A<br>120 cm/min<br>(prosječno 67,94 J/mm/sloju) | 4 razine parametara:<br>120 A<br>120, 150, 188, 234 cm/min<br>(prosječno 78,81 J/mm/sloju) |
|--|---|---|--|



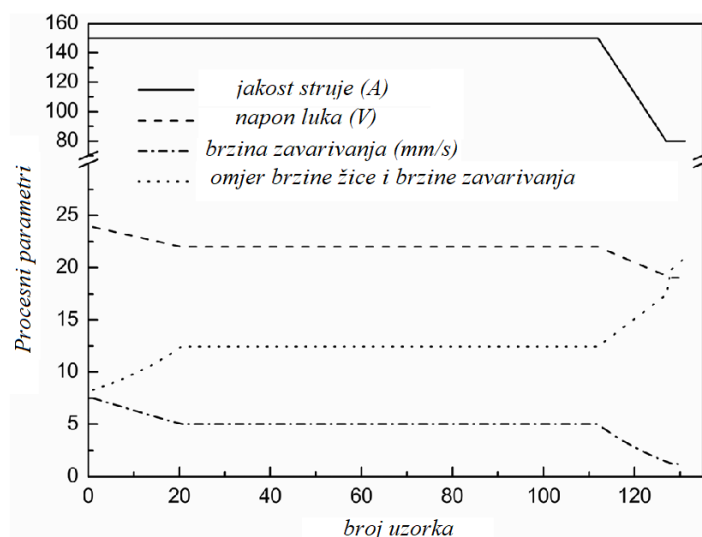
Slika 4.25. Poprečni presjek zida za odabrane parametre, [53]

Uočava se kako smanjenjem jakosti struje dolazi do sniženja širine zida za 34-45 % i povećanja visine sloja za 8-12 %. S druge strane, povećanje brzine zavarivanja može dovesti do nestabilnosti u formiranju profila poprečnog presjeka sloja zbog utjecaja na brzinu skrućivanja rastaljenog metala. Efektivna površina poprečnog presjeka se smanjuje pri smanjenju jakosti struje, što za odabrane uvjete iznosi 25-40 %, a razlog je proporcionalno

smanjenje brzine dodavanja žice. Također je istraživanje pokazalo da je tehnika postepenog snižavanja struje pogodnija za postizanje jednolike geometrije zida. Osim toga, ovom tehnikom postignut je veći omjer efektivne visine i širine zida za 14 %, ali i veća ušteda materijala.

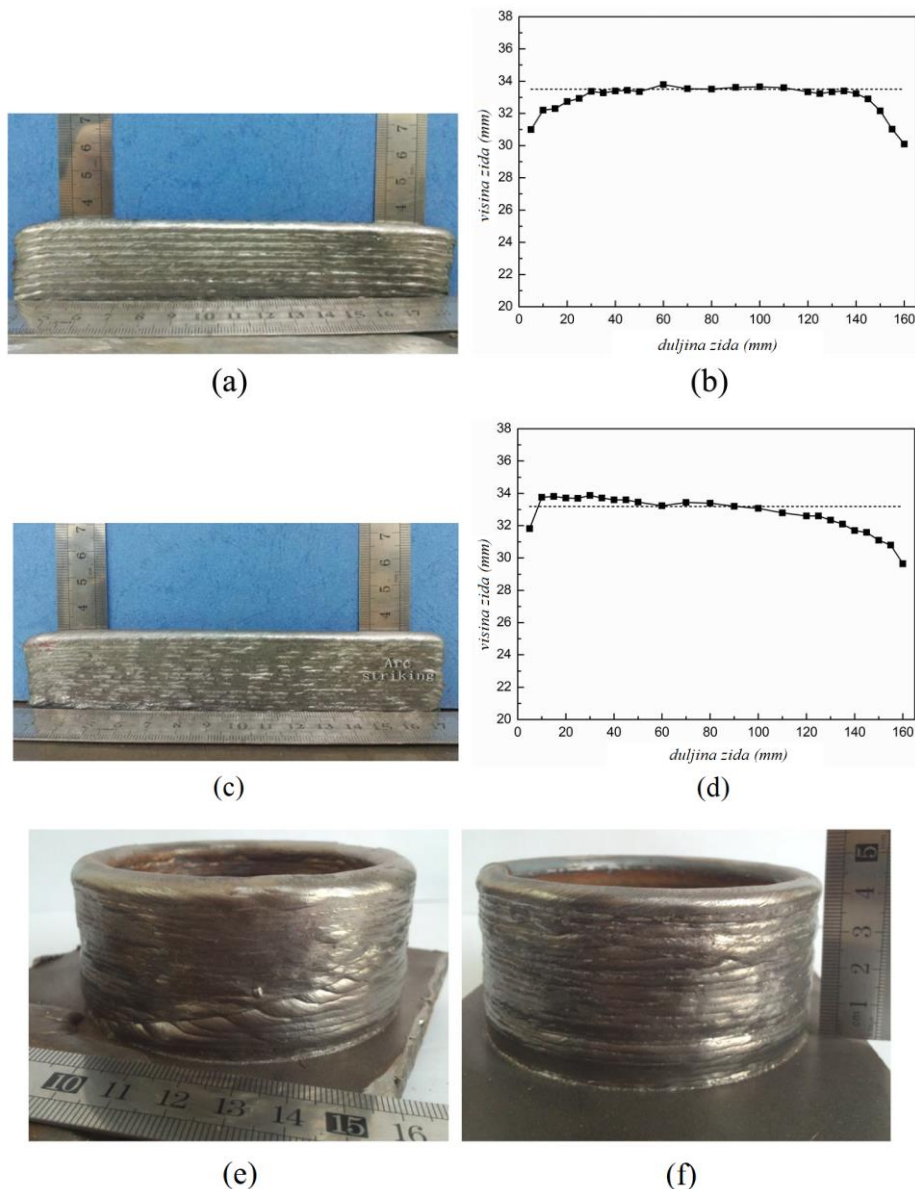
Karakteristični problemi koji se javljaju pri izradi proizvoda aditivnom tehnologijom električnim lukom i žicom odnose se na različitost geometrije u početnom i završnom dijelu sloja. U početnom dijelu sloja dolazi do pojave stvaranja tzv. brijega zbog pretjerane akumulacije materijala u fazi startanja luka, a u završnom dijelu dolazi do formiranja kratera zbog smanjene količine rastaljenog metala u fazi gašenja luka. Time se geometrija na početku i kraju sloja značajno razlikuje od središnjeg dijela. U cilju poboljšanja geometrijske točnosti primjenjuju se različite metode, koje se temelje na različitim procesnim parametrima na početku i kraju sloja u odnosu na središnji dio.

Znanstvena istraživanja problematike početnog i završnog dijela sloja uglavnom se temelje na čeliku, kao najzastupljenijem materijalu u proizvodnoj praksi. Tome u prilog, grupa autora [54] je proučavala utjecaj glavnih parametara, jakosti struje, napona i brzine zavarivanja na geometriju sloja u početnom i završnom dijelu procesa. Korišteni proces u istraživanju je MAG, a dodatni materijal je čelična žica promjera 1,2 mm. Zaštitni plin je mješavina 95 % argona i 5 % CO<sub>2</sub>, protok 18 l/min. Predložena metoda odabira glavnih parametara se temelji na linearnom smanjivanju brzine zavarivanja (od 7,5 mm/s do 5 mm/s) i napona luka (od 24 V do 22 V), uz zadržavanje jakosti struje konstantnom. Time se dobilo smanjenje visine početnog dijela sloja. U završnom dijelu sloja se stvara krater u nagnutoj ravnini zbog toga što se gasi luk. Predložena metoda se temelji na postepenom smanjivanju jakosti struje, napona i brzine zavarivanja te zadržavanju uključenog luka još 200 ms nakon što se pištolj zaustavi, kako bi se popunio krater. Kontrola ovako definiranih procesnih parametara prikazana je slikom 4.26.



Slika 4.26. Kontrolirani parametri MAG procesa, [54]

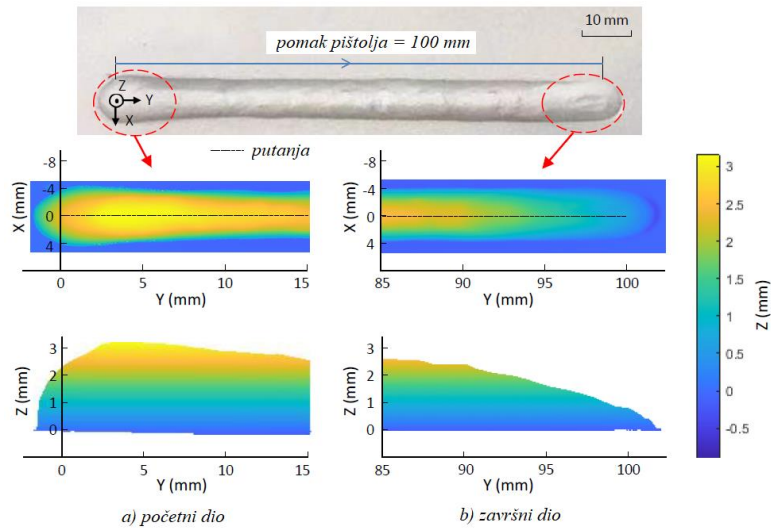
Slojevi su deponirani protusmjerno, a predloženom metodom je postignuto poboljšanje geometrije pri izradi komada kružnog komada i ravnog zida, slika 4.27. Pri izradi ravnog zida nije postignuto značajno poboljšanje geometrije u završnom dijelu slojeva, što se uočava iz grafičkog prikaza mjerene geometrije na slikama 4.27.b i d. Primjenom navedne metode pri izradi komada kružnog oblika postignuta je geometrija odlične kvalitete površine.



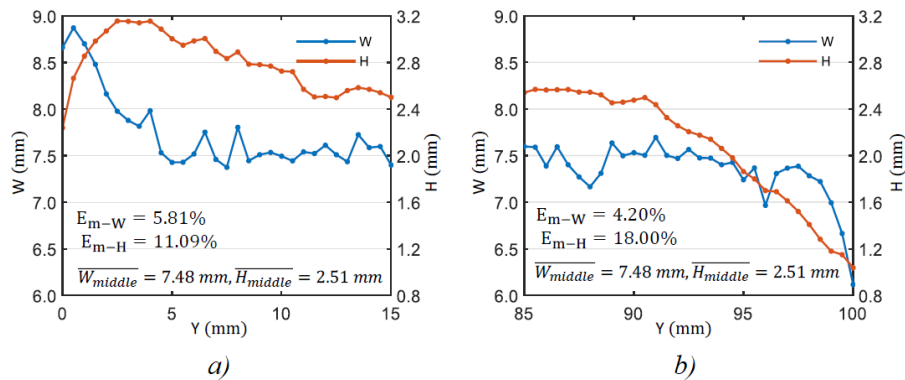
Slika 4.27. Izrađeni kružni komadi i ravni zidovi, [54]

- (a),(b) – protusmjerno deponiranje slojeva
- (c),(d) – kontrolirano deponiranje slojeva
- (e) – deponiranje pomicanjem početka sloja
- (f) – kontrolirano deponiranje slojeva

U cilju optimiranja parametara procesa na početnom i završnom dijelu sloja, skupina autora je, u radu [55], primjenila konfiguraciju parametara zavarivanja s variranjem brzine zavarivanja i povratnim punjenjem kratera, temeljem eksperimentalnih istraživanja i proučavanja postojećih različitih optimizacijskih metoda. Eksperimenti su provedeni primjenom CMT procesa i dodatnog materijala od čelika visoke čvrstoće ER100 (prema američkom AWS standardu), promjera 1,2 mm. Primjenjene su tri različite metode: 1. poseban način rada CMT u 2 koraka (eng. special 2-step CMT); 2. variranjem brzine zavarivanja; 3. povratna putanja na završnom dijelu. Geometrija početnog i završnog dijela prikazana je slikom 4.28. a mjerene vrijednosti širine (W) i visine sloja (H) prikazane su grafički slikom 4.29. Uočavaju se značajno više vrijednosti u početnom dijelu sloja, dok u završnom dijelu sloja te vrijednosti značajno padaju.

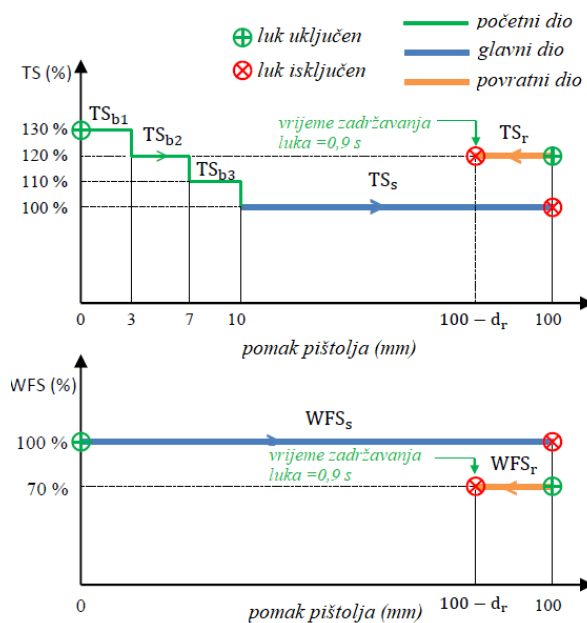


Slika 4.28. Geometrija početnog i završnog dijela sloja, [55]



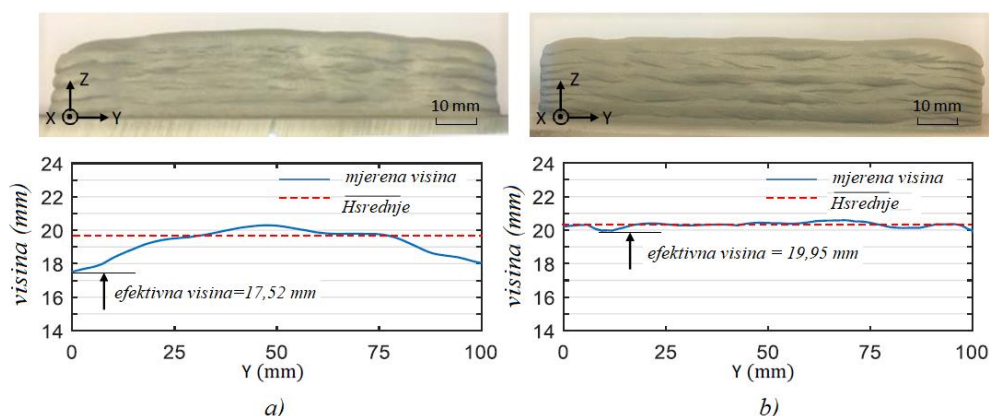
Slika 4.29. Mjerena geometrija početnog (a) i završnog dijela sloja (b), [55]

Ekperimentalnim putem odabrana je kombinirana strategija postepenog smanjivanja brzine zavarivanja u početnom dijelu i povratne putanje u završnom dijelu kako bi se popunio krater, slika 4.30.



Slika 4.30. Razvijena strategija poboljšanja procesa, [55]

Temeljem razvijene strategije poboljšanja procesa postignuta je ujednačena visina zida u svim segmentima, što je prikazano slikom 4.31.



Slika 4.31. Usporedba geometrije zida, [55]

a) bez primjenjene strategije poboljšanja

b) s primjenjenom strategijom poboljšanja

U radu [56], skupina autora je istraživala pojavu kratera u završnom dijelu sloja, kao posljedicu gašenja luka. Osnovni materijal je bila aluminijska legura 6005-T4, dodatni materijal aluminijska legura 4043, žica promjera 1,6 mm. Primijenjen je MIG proces, a zaštitni plin argon. Provedena je usporedba izrade zavara primjenom standardnog MIG procesa i primjenom tehnike punjenja kratera povratnom putanjom pištolja. Za vrijeme punjenja kratera jakost struje je smanjena sa 183 A na 83 A u trajanju 0,6 s, a u isto vrijeme se pištolj kretao u suprotnom smjeru. Na taj način je kupka održavana duže vrijeme, a krater se uspješno punio bez uočenih uobičajenih pukotina. Tehnika povratnog punjenja kratera se, dakle, pokazala učinkovitom u primjeni na odabranoj aluminijskoj leguri.

Razmatrajući opisanu problematiku početnog i završnog dijela sloja, koja se kumulativno manifestira u geometrijskoj nejednolikosti visine i širine zida, može se zaključiti da istraživanja provedena na čeliku mogu biti primjenjiva i na aluminijskim legurama, unatoč različitim termofizičkim svojstvima. Za primjenu je potrebno provesti eksperimentalno istraživanje s različitim vrijednostima glavnih parametara.

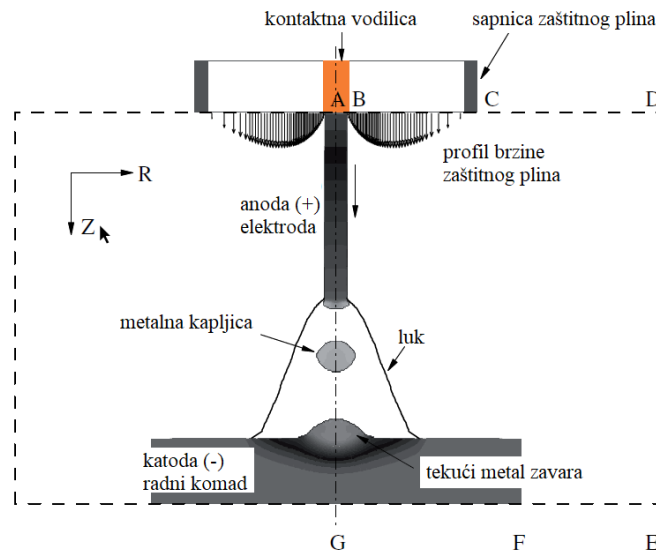
Obzirom da glavni procesni parametri interaktivno djeluju na geometrijske značajke komada proizvedenog WAAM tehnologijom, a njihova interakcija se očituje kroz izmjenu topline, bilo da se radi o unosu topline kroz proces ili odvođenju topline, o tome će biti riječi detaljnije u sljedećem poglavlju.

#### 4.8. Utjecaj izmjene topline na geometrijske značajke izrađenog zida

Sukladno prirodi elektrolučnog procesa, dovođenje i odvođenje topline predstavlja ključni čimbenik, kako za geometrijske značajke tako i za mikrostrukturu, odnosno mehanička svojstva komada koji se izrađuje. Da bi se razumio utjecaj topline na geometriju komada dobivenog aditivnom tehnologijom, potrebno je prethodno razumijeti utjecaj topline kod elektrolučnog procesa zavarivanja. Stoga će najprije biti opisan utjecaj topline na geometriju jednog sloja, a zatim i utjecaj topline na geometriju višeslojnog komada, odnosno, zida.

Mnogi razvijeni modeli, koji opisuju proces zavarivanja, su zbog složenosti procesa fokusirani na utjecaj jednog ili dva navedena segmenta procesa. Rastaljena kapljica udara u kupku zavara i utječe na raspodjelu i oblik slobodne površine kupke, kao i na konvektivni prijenos topline. Rastaljeni dio metala je podvrgnut silama kao što su gravitacijska i

elektromagnetska sila, te površinskim silama izazvanim površinskim naprezanjem zbog deformacije površine, Marangoni smičnim naprezanjem zbog temperaturne razlike i tlakom na spoju električnog luka i metala, [57]. Kako bi se opisao dinamički proces u sustavu elektroda – električni luk – metal, potrebno je uzeti u obzir pojave koje se odvijaju u svakom od područja promatranog sustava, *slika 4.32*. Električni luk se uspostavlja između elektrode i radnog komada. Elektroda (žica) se kontinuirano vodi prema radnom komadu i tali na vrhu pod djelovanjem visoke temperature luka. Na rastaljenom vrhu žice se formiraju kapljice, koje se odvajaju i prijenose do radnog komada. Radi spriječavanja oksidacije rastaljenog metala, kroz sapnicu se uvodi zaštitni plin. Matematičko opisivanje sustava se sastoji od područja anode (žice), područja električnog luka i područja katode (radnog komada), uz primjenu diferencijalnih jednadžbi.



Slika 4.32. Shematski prikaz GMAW sustava „elektroda-luk-metal“, [57]

Diferencijalne jednadžbe koje opisuju proces, uključuju zakon o očuvanju mase, zakon o očuvanju momenta i zakon o očuvanju energije te jednažbu kontinuiteta. Sve te jednadžbe su prikazane kako slijedi:

Jednadžba kontinuiteta mase

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (4.2)$$

Momentne jednadžbe

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} u) = \nabla \cdot \left( \mu_1 \frac{\rho}{\rho_1} \nabla u \right) - \frac{\partial p}{\partial r} - \frac{\mu_1}{K} \cdot \frac{\rho}{\rho_1} (u - u_s) - \frac{C \rho^2}{K^{1/2} \rho_1} |u - u_s| (u - u_s) - \nabla \cdot (\rho f_s f_1 \mathbf{V}_r u_r) - J_z \times B_\theta \quad (4.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} v) = \nabla \cdot \left( \mu_1 \frac{\rho}{\rho_1} \nabla v \right) v - \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\mu_1}{K} \cdot \frac{\rho}{\rho_1} (v - v_s) - \frac{C \rho^2}{K^{1/2} \rho_1} |v - v_s| (v - v_s) - \nabla \cdot (\rho f_s f_1 \mathbf{V}_r u_r) + \rho g \beta_T (T - T_0) + J_r \times B_\theta \quad (4.4)$$

Energetska jednadžba

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} h) = \nabla \cdot \left( \frac{k}{c_s} \nabla h \right) + \nabla \cdot \left( \frac{k}{c_s} \nabla (h_s - h) \right) - \nabla \cdot (\rho (\mathbf{V} - \mathbf{V}_s) \cdot (h_1 - h)) - \Delta H \frac{\partial f_1}{\partial t} + \frac{J_r^2 + J_z^2}{\sigma_e} - S_R + \frac{5k_b}{e} \left( \frac{J_r}{c_s} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{J_z}{c_s} \frac{\partial h}{\partial z} \right) \quad (4.5)$$

Jednadžba kontinuiteta struje

$$\nabla^2 \phi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (4.6)$$

Ohm-ov zakon

$$J_r = -\sigma_e \frac{\partial \phi}{\partial r}, \quad J_z = -\sigma_e \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (4.7)$$

Maxwell-ova jednadžba

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r J_z r dr \quad (4.8)$$

U jednadžbama (4.2) – (4.8) oznake su:

$u$  i  $v$  su brzine u  $r$  i  $z$  koordinatnim smjerovima,

$\mathbf{V}_r = \mathbf{V}_l - \mathbf{V}_s$  - vektor relativne brzine mase između tekuće i krute faze

$s$  i  $l$  indeksi predstavljaju krutu i tekuću fazu,

$0$  - inicijalno stanje,

$f$  - dio mase tekuće ili krute faze,

$K$  - funkcija permeabilnosti,

$C$  - koeficijent inercije,

$p$  – tlak,

$T$  – temperatura,

$h$  – entalpija,

$\Phi$  – električni potencijal,

$\rho$  – gustoća,

$\mu$  - dinamički viskozitet,

$k$  – toplinska vodljivost,

$g$  – gravitacijsko ubrzanje,

$\beta_T$  – koeficijent toplinske rastezljivosti,

$c$  – specifični toplinski kapacitet,

$\sigma_e$  – električna vodljivost,

$J_r$  i  $J_z$  - gustoće struje u smjeru  $r$  i  $z$  koordinatne osi,

$B_\theta$  – elektromagnetska indukcija,

$S_R$  – gubitak topline radijacijom,

$\mu_0$  – magnetska permeabilnost,

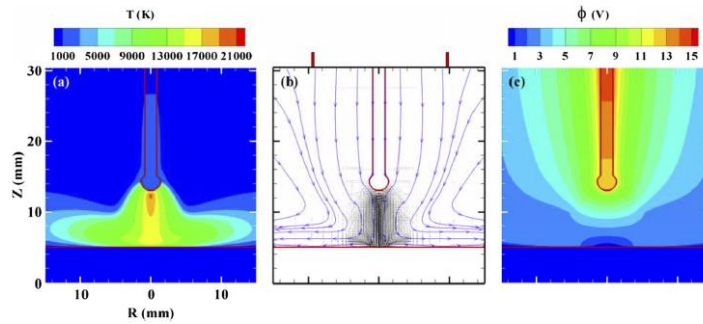
$k_b$  – Stefan-Boltzmann-ova konstanta,

$e$  – električni naboj.

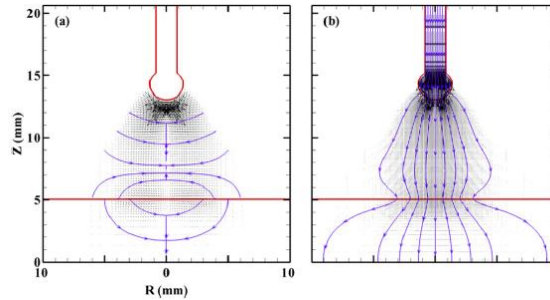
U području luka, pretpostavlja se lokalna termodinamička ravnoteža plazme, što znači da su temperature elektrona i čestice metala jednake, te se izračuni temelje na toj pretpostavci. U području metala, anoda i katoda mijenjaju oblik s vremenom, a raspodjela temperature unutar područja metala je definirana energetskom ravnotežom kondukcije, Ohm-ve topline i konvekcije u metalu i prijenosa topline plazmom luka.

Slikama 4.33 do 4.35 su prikazane raspodjele utjecajnih parametara dinamičkog sustava - temperature, brzine plazme luka, električnog potencijala, jakosti struje, elektromagnetske sile, zatim raspodjele tlačnog i smičnog naprezanja plazme luka.

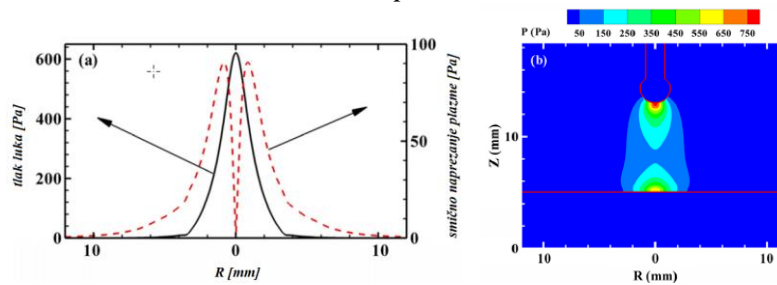




Slika 4.33. Raspodjela temperature (a), brzine plazme luka (b) i električnog potencijala (c) kod GMAW procesa, [57]



Slika 4.34. Raspodjela jakosti struje (a) i elektromagnetske sile (b) kod GMAW procesa, [57]



Slika 4.35. Raspodjela tlačnog i smičnog napreznja u plazmi luka (a) i na površini radnog komada (b), [57]

U postojećim dinamičkim modelima tekućeg metala zavara, pretpostavlja se raspodjela tlaka luka (ili tlačnog napreznja luka) u središtu površine radnog komada podliježe Gauss-ovoj raspodjeli sa fiksnom amplitudom i radijusom distribucije. Međutim, istraživanje opisano u radu [57], provedeno pri različitim vremenima trajanja prijenosa kapljice od vrha elektrode do radnog komada ( $t = 100 \text{ ms}$ ;  $133 \text{ ms}$ ;  $150 \text{ ms}$ ;  $400 \text{ ms}$ ), je pokazalo da se tlak luka mijenja značajno tijekom procesa zavarivanja zbog velike deformacije površine tekućeg metala zavara. To znači da Gaussova raspodjela ne može u potpunosti realno opisati rasodjelu tlaka plazme luka na površini tekućeg metala zavara. Slično se pretpostavlja da raspodjele jakosti struje i toplinskog toka podliježu Gauss-ovoj raspodjeli a konstantnom amplitudom i radijusom distribucije. Na raspodjelu jakosti struje i raspodjelu temperature utječe kretanje kapljice i deformacija površine kupke zavara. Raspodjela jakosti struje i raspodjela temperature utječu na raspodjelu toplinskog toka, što znači da je potrebno definirati objedinjeni model koji će bolje opisati ove procese u domeni luka i metala zavara, odnosno, bolje definirati granične uvjete na površini metala zavara.

Uzimajući u obzir gore navedeno, opisivanje matematičkog modela procesa zavarivanja Gaussovom raspodjelom je primjenjivo i u aditivnoj tehnologiji, ali samo za prvi sloj. Za ostale slojeve se proces odvija različito zbog utjecaja odvođenja i akumulacije topline, što posljedično ima i djelovanje na geometrijske značajke. Zbog složenosti dinamičkog procesa, često se pojednostavnjuje matematički model procesa, usvajajući određene

pretpostavke graničnih uvjeta modela. Isto tako se istraživanje provodi temeljem eksperimentalnih podataka koji mogu biti različiti ovisno o odabiru procesa i procesnih parametara za određenu primjenu. U cilju pronalazjenja matematičkog modela koji najbolje opisuje eksperimentalne rezultate, često se simulira sam proces zavarivanja, umjesto aditivni proces.

Utjecaj unosa topline po duljini sloja na mikrostrukturu i geometriju višeslojnog zida je pručavan u radu [41], usporedbom impulsnog MIG procesa i CMT procesa korištenog u aditivnoj tehnologiji na aluminijskoj leguri 5083. Korištena žica je ER5356, promjera 1.2 mm. Zaštitni plin je bio argon 99,998 %, protoka 20 l/min. Uređaj i robot za zavarivanje – OTC Welbee P500L.

Mjereni su napon električnog luka i jakost struje, a računati su trenutna snaga i unos topline prema sljedećim izrazima:

*Trenutna snaga*

$$IP = \sum_{i=1}^z \frac{I_i U_i}{z} \quad (4.9)$$

*Unos topline*

$$HI_{sr} = \eta \frac{I_{sr} \cdot U_{sr}}{TS} \left[ \frac{J}{cm} \right] \quad (4.10)$$

$$HI_i = \frac{\eta \sum_{i=1}^z \frac{I_i U_i}{z}}{TS} \left[ \frac{J}{cm} \right] \quad (4.11)$$

U izrazima (4.9) do (4.11), oznake predstavljaju:

$IP$  – trenutna snaga luka [W],

$I_i$  – trenutna jakost struje zavarivanja [A],

$U_i$  – trenutni napon električnog luka [V],

$HI_{sr}$  – unos topline po duljini zavara [J/mm],

$HI_i$  – trenutni unos topline po duljini zavara [J/mm],

$I_{sr}$  – srednja jakost struje,

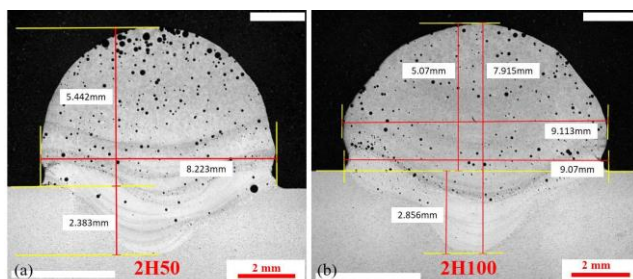
$U_{sr}$  – srednji napon električnog luka,

$TS$  - brzina zavarivanja,

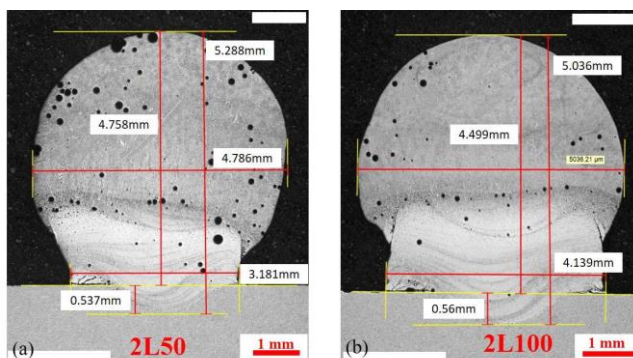
$\eta$  – učinkovitost procesa,

$z$  – broj trenutnih vrijednosti parametara.

Odabrane su dvije međuslojne temperaturi, 50°C i 100°C, a mjerenje temperature je provedeno samo na zadnjem sloju, pomoću digitalnog kontaktnog termopara K-tipa, prema standardu ASTM E2877. Temperatura je mjerena na tri pozicije, 50 mm od krajeva i u sredini zida. Također je korištena infracrvena termalna kamera kako bi se pratila promjena temperature zida za vrijeme deponiranja slojeva. Unos topline u pokusima je variran od 150 do 350 J/mm, a međuslojno vrijeme je bilo 30 i 120 s. Zidovi su izrađeni sa 5 slojeva svaki. Analizom pokusa za dvije odabrane međuslojne temperature, ustanovljena je razlika širine sloja od 0,89 mm za temperaturu od 100 °C i razlika visine sloja od 0,37 mm za temperaturu od 50 °C, a odnosi se na uzorke izrađene s višim unosom topline. S druge strane te razlike se niže za uzorke s nižim unosom topline, 0,26 i 0,25 mm, *slike 4.36 i 4.37*. Uzorci s višom međuslojnom temperaturom su imali i višu visinu sloja.

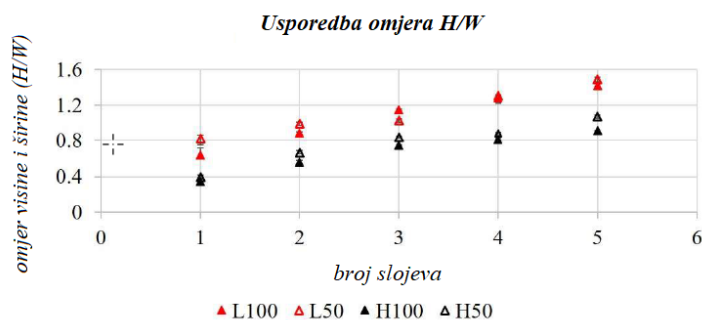


Slika 4.36. Geometrijske značajke uzoraka za visoki unos topline i međuslojne temperature od 50 °C i 100 °C, 5 slojeva - impulsni MIG, [41]



Slika 4.37. Geometrijske značajke uzoraka za niski unos topline i međuslojne temperature od 50 °C i 100 °C, 5 slojeva - impulsni MIG, [41]

Linearni rastući trend omjera visine i širine ( $H/W$ ) uočen je za sve uzorke s višim unosom topline unatoč maloj razlici u geometrijskim značajkama. Za sve uzorke uočeno je da je omjer  $H/W$  veći za uzorke s međuslojnom temperaturom od 50 °C nego za uzorke s međuslojnom temperaturom od 100 °C. Dakle, uzorci izrađeni pri temperaturi međusloja od 50 °C bili su viši i tanji od uzoraka s temperaturom međusloja od 100 °C, slika 4.38.

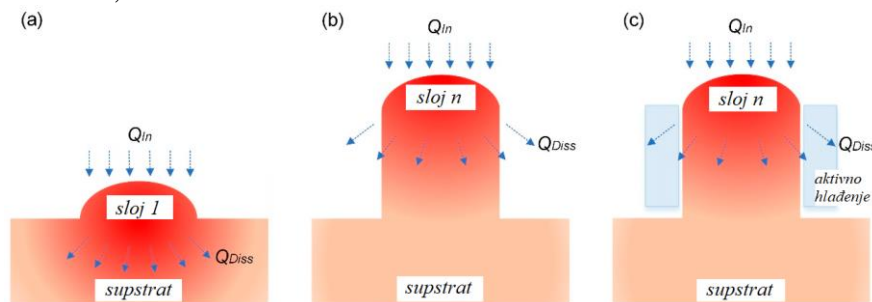


Slika 4.38. Grafički prikaz učinka unosa toplina i međuslojne temperature na omjer  $H/W$ , [41]

Pomoću XCT uređaja (računalna tomografija X-zrakama) se provodilo skeniranje s ciljem izrade 2D i 3D slika poprečnih presjeka zida, kako bi se dobile karakteristike unutarnje strukture zida – dimenzije, oblik i unutarnje nepravilnosti strukture, kao što je pojava pora. Pored geometrijskih značajki i unutarnje strukture, uzimani su i uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Temeljem temperaturnih zapisa skeniranjem termalnom kamerom uočava se da temperatura prethodno deponiranih slojeva raste iznad 300 °C, odnosno temperature rekristalizacije, što je pokazatelj kako su mikrostrukturne promjene neizbježne. Temperatura rekristalizacije se višesstrukto dostiže prilikom nanošenja svakog sljedećeg sloja, što dovodi do postepenog porasta zrna. Ukoliko se razmatra aditivna tehnologija impulsnim MIG i CMT procesom, usporedba je provedena proučavanjem utjecaja

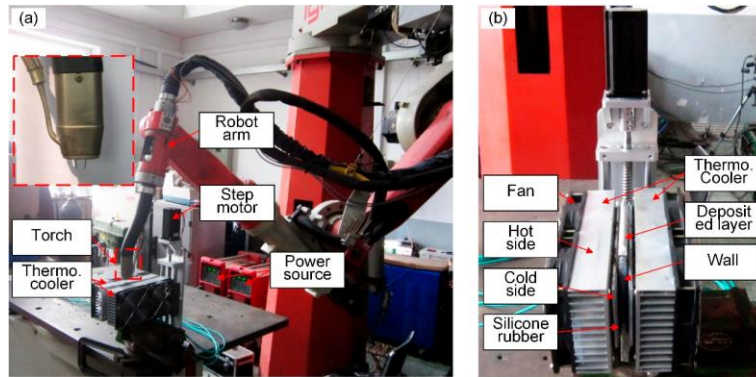
unosu topline i međuslojne temperature na mikrostrukturu i pojavu poroziteta. Zrna proizvedena CMT procesom su bila manja od zrna kod impulsnog MIG procesa, što se objašnjava kao rezultat kontroliranog depozita metala, bržeg skrutnjavanja i brzine hlađenja kod CMT procesa. Kod impulsnog MIG procesa, zrna su bila stupičasta u poprečnom smjeru od smjera kretanja pištolja, dok su kod CMT procesa bila približno jednolika. U uzdužnom smjeru su zrna kod oba procesa bila stupičasta. Visoki unos topline, kao i toplinski tok kod impulsnog MIG procesa podržava stvaranje stupičastih zrna u poprečnoj i uzdužnoj ravnini u odnosu na kretanje pištolja.

Kako bi se smanjio neželjeni utjecaj unosa topline na geometrijske značajke izrađenog zida, mnogi znanstvenici su u svom istraživanju imali različite pristupe. Načelno, jedan pristup je smanjenje unosa topline, odnosno dovođenja topline u proces, a drugi pristup je upravljanje odvođenjem topline za vrijeme WAAM procesa. Promjene unosa topline i rasipanja topline utječu na skrućivanje rastaljenog metala i u konačnici na geometriju. U radu [58] je razvijen aktivni sustav hlađenja za vrijeme procesa, s ciljem upravljanja odvođenjem topline. Relativno slabo odvođenje topline konvekcijom i zračenjem je zamijenjeno jakim kondukcijom na način da se odvođenje topline gornjih slojeva može izjednačiti s odvođenjem topline donjih slojeva, eliminirajući tako razlike u geometriji bez potrebe za podešavanjem procesnih parametara, *slika 4.39*.



*Slika 4.39. Shematski prikaz dovođenja topline ( $Q_{in}$ ) i odvođenja topline ( $Q_{diss}$ ) za vrijeme: (a) proces zavarivanja, (b) WAAM proces, (c) WAAM proces s aktivnim hlađenjem, [58]*

U ovom istraživanju su se provodili eksperimenti uporabom tandem-GMAW procesa s primjenom žice od aluminijske legure Al 2325, promjera 1.2 mm. Supstrat je aluminijska legura Al 2219. Zaštitni plin je bio argon, protoka 22 l/min. U eksperimentima je korišten termopar K-tipa koji se postavio 5 mm od vrha zadnjeg sloja za snimanje toplinskog ciklusa, te brza kamera za snimanje procesa u realnom vremenu. Za analizu mikrostrukture je korišten laserski konfokalni mikroskop. Uobičajeno hlađenje, odnosno, odvođenje topline u praksi se provodi ili zrakom ili vodom. Hlađenje zrakom može oštetiti električni luk, dok hlađenje vodom zahtijeva dodatni sustav za cirkulaciju vode. Stoga se u ovom istraživanju primijenio termoelektrični hladnjak koji radi na načelu Peltier-ova efekta, odnosno, radi se o aktivnoj dizalici topline koja prijenosi toplinu s jedne strane uređaja na drugu uz potrošnju električne energije. Jedna strana tako postaje hladnija, a druga toplija. U ovom slučaju su postavljena dva termoelektrična hladnjaka sa svake strane, *slika 4.28*. Vruća strana svakog hladnjaka bila je spojena na vanjske ventilatore kako bi mogla ostati na temperaturi okoline. Hladna strana bila je pričvršćena na bočnu površinu zida kako bi se regulirala disipaciju topline, odvojena visoko silikonskom gumom toplinske vodljivosti. Debljina silikonske gume je 2 mm. Aktivni sustav hlađenja se pomicao u Z smjeru pomoću posebnog mehanizma upravljanog motorom.



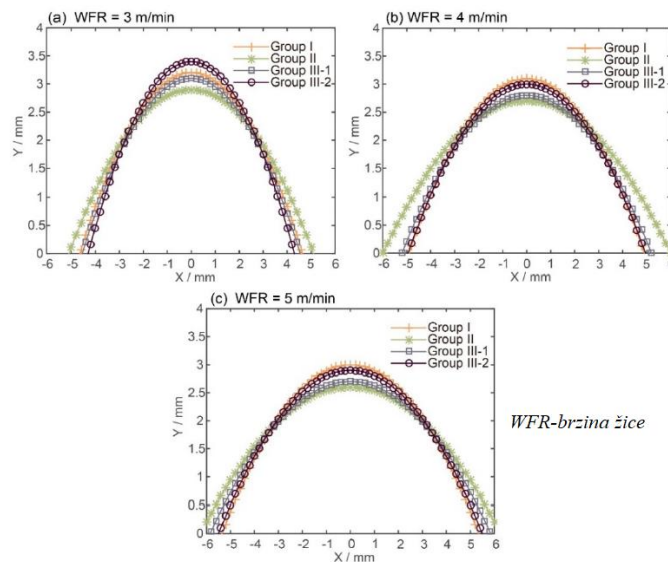
Slika 4.40. Eksperimentalni sustav, [58]:

a) robotski sustav za WAAM

b) aktivni sustav hlađenja

Eksperimenti provedeni u ovom istraživanju su podijeljeni u četiri grupe po tri sloja. Svaki pokus je ponavljan po tri puta, s različitim uvjetima odvođenja topline. U prvoj grupi pokusa provedeno je deponiranje na ploči dimenzija  $D \times \check{S} \times V = 150 \times 150 \times 6$  mm, gdje se odvija odvođenje topline kondukcijom, što je karakteristično za niže slojeve. U drugoj grupi pokusa, provedeno je deponiranje slojeva na već postojećem zidu dimenzija  $D \times \check{S} \times V = 150 \times 12 \times 150$  mm, gdje je odvođenje topline kombinacija konvekcije i zračenja. U preostale dvije grupe, deponiranje je provedeno na postojećem zidu s uključenim termoelektričnim hladnjakom s različitim snagama hlađenja (240 W i 360 W). Mijenjani procesni parametri su bili napon luka, jakost struje, brzina žice i brzina zavarivanja, s tim da je omjer brzine žice i brzine zavarivanja određen na konstantnoj vrijednosti 10.

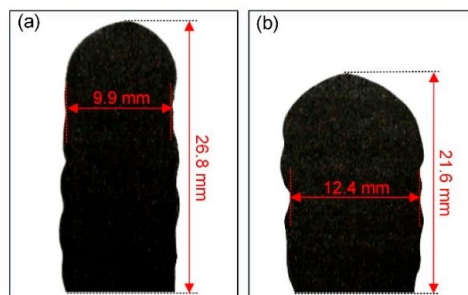
Iz provedenih eksperimenata se analiziralo sljedeće: (1) - učinak unosa topline na geometriju navara usporedbom po 3 pokusa unutar svake grupe; (2) – učinak visine zida na geometriju navara usporedbom grupe 1 i grupe 2; (3) – učinak odvođenja (rasipanja) topline usporedbom pokusa iz grupe 2 i 3. Također su uspoređene površine poprečnog presjeka navara grafičkim prikazom navara primjenom parabola modela za 3 različite brzine žice, *slika 4.41*.



Slika 4.41. Usporedba površina poprečnog presjeka navara za 3 različite brzine žice (3, 4 i 5 m/min), [58]

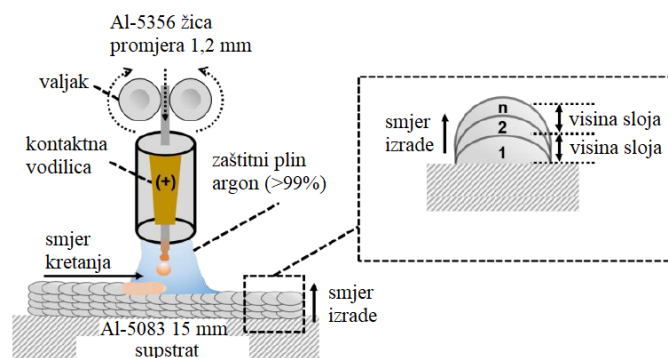
U okviru provedenih pokusa pokazalo se kako širina navara je veća, a visina navara je manja s porastom brzine žice. Za brzine žice od 3 m/min, 4 m/min ili 5 m/min, odgovarajući unos topline je oko 465 J/mm, 491 J/mm ili 519 J/mm. Dakle, paralelno s porastom brzine

žice dolazi i do porasta unosa topline, što znači da je unos topline u funkciji brzine žice. Za manje vrijednosti brzine žice, odnosno za manji unos topline talina nema dovoljno vremena da se raširi prije skrutnjavanja, a omjer širine i visine navara nastoji biti manji. Za veće iznose brzine žice, odnosno, veći unos topline, viskozitet taline se smanjuje i talina se lakše širi što povećava omjer širine i visine navara. Može se zaključiti da je podešavanje unosa topline jedan mogući način regulacije geometrije navara za vrijeme WAAM procesa. Nadalje, značajan je utjecaj brzine žice na geometriju sloja. Povećanjem brzine žice dolazi do povećanja širine sloja, uz istovremeno smanjenje visine sloja. Zbog toga je potrebno smanjivati brzinu žice s povećanjem broja slojeva, a time se smanjuje i jakost struje. Posljedično, dolazi i do smanjenja brzine deponiranja metala, čime se snižava i produktivnost. U proučavanju utjecaja parametara na geometriju ne smije se zaobići utjecaj odnosa širine prema visini sloja, RWTH (eng. Ratio Width To Height). Ovaj parametar prati brzinu žice. Što znači da porastom brzine žice dolazi i do porasta omjera širine i visine sloja i obrnuto. Da bi se održao parametar RWTH konstantnim, uvodi se termoelektrično hlađenje gornjih slojeva zida, čime se osigurava manja razlika temperature gornjih i donjih slojeva zida. Ovakav pristup s minimalnim odstupanjem rasipanja topline osigurava konzistentniju geometriju zida. U prilog tome ide i primjer prikazan slikom 4.42.



Slika 4.42. Poprečni presjek 2 zida s 10 slojeva, [58]:  
 a) sa termoelektričnim hlađenjem  
 b) bez termoelektričnog hlađenja

Za dobivanje jednolike geometrije zida izrađenog WAAM tehnologijom u praksi se često primjenjuju dvije strategije – smanjenje jakosti struje zavarivanja ili povećanje brzine zavarivanja za vrijeme deponiranja novih slojeva. Razlog tome, je smanjenje unosa topline radi smanjenja akumuliranja topline tijekom procesa. Već navedeni pristup proučavanju utjecaja topline na geometriju zida u radu [52]. Za istraživanje je korišten supstrat, aluminijska legura 5083, debljine 15 mm, a materijal žice aluminijska legura ER5356, promjera 1,2 mm. Zaštitni plin je bio argon, s protokom 15 l/min. primjenjeni proces DP-MIG (eng. Double Pulsed MIG). Shematski prikaz eksperimenata WAAM procesa je prikazan slikom 4.43.



Slika 4.43. Shematski prikaz eksperimenata, [52]

Promjenom pojedinačnih parametara jakosti struje i brzine zavarivanja na dvije i četiri razine, utjecalo se i na promjenu unosa topline za četiri različita uvjeta procesa. Prikaz geometrije izrađenih zidova sa 20 slojeva za 4 različita izbora procesnih parametara se vidi na slici 4.44.



Slika 4.44. Izrađeni zidovi s 20 slojeva – DP MIG proces, [52]

U prvom slučaju se vidi da je povećanje širine zida izazvano akumuliranjem topline pri konstantnim parametrima procesa. U drugom i trećem slučaju se utjecalo na smanjenje unosa topline promjenom jakosti struje u dvije i četiri razine, čime se postiglo smanjenje širine zida. U četvrtom slučaju se povećavala brzina zavarivanja u četiri razine, čime se postigla neravnomjernija geometrija slojeva. Uočena je pojava „brijegova“ u gornjoj polovici izrađenih slojeva (iznad 10. sloja), zbog učinka prevelike brzine kretanja pištolja na to da skrućivanje metala ima nepravilan oblik. „Brijegovi“ se nisu pojavili kod tehnike smanjenja jakosti struje jer se ujedno i smanjuje količina deponiranog metala pri istoj brzini kretanja pištolja.

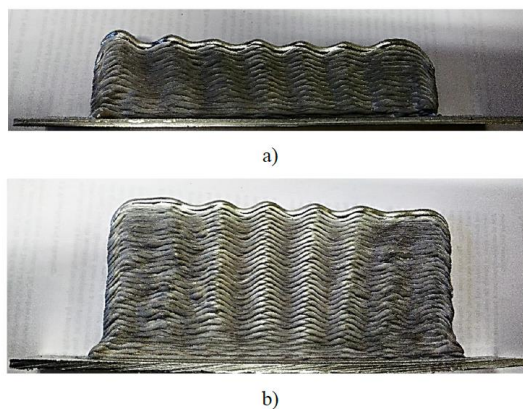
U sljedećem istraživanju bi bilo zanimljivo ispitati mogućnost istovremenog mijenjanja jakosti struje i brzine zavarivanja tijekom aditivnog procesa, te utjecaj na geometrijske značajke, mikrostrukturu i svojstva izrađenog zida.

## 5. GEOMETRIJSKE ZNAČAJKE ZIDOVA IZRAĐENIH WAAM PROCESOM

Povećani zahtjevi za fleksibilnošću proizvodnje u kombinaciji sa smanjenjem troškova proizvodnje, te smanjenjem ciklusa razvoja proizvoda, uvjetuju razvoj novih tehnologija kao što su aditivne tehnologije. WAAM tehnologija ispunjava tražene zahtjeve, primjenjujući široki spektar materijala za izradu složenih proizvoda, uključujući i aluminijske legure. U cilju ispunjenja navedenih zahtjeva, potrebno je postići odgovarajuću točnost oblika i dimenzija i zadovoljavajuća mehanička svojstva proizvoda.

Najzastupljeniji proces u primjeni kod aditivne proizvodnje aluminijskih legura je CMT proces, zbog relativno niskog unosa topline, kontrolirane penetracije, efikasnijeg taljenja žice i visoke brzine dodavanja žice, usporedivo s konvencionalnim MIG procesom.

Primjena CMT procesa za aditivnu proizvodnju aluminijske legure Al5Si eksperimentalno je istraživana u radu [59]. Supstrat je bio aluminijska legura 1050, 3 mm debljine, a žica Al5Si, promjera 1,2 mm. Provedeni su pokusi sa 25, 30 i 60 slojeva izrađenog zida. Promjenom različitih kombinacija procesnih parametara, napona i jakosti struje unutar jednog impulsa proučavan je učinak na geometrijske značajke izrađenog zida duljine 150 mm. Za određivanje visine zida, mjereno je 130 poprečnih presjeka pomoću skenera, a širina zida je određena kao prosječna vrijednost na deset različitih pozicija. U prvoj fazi istraživanja, brzina zavarivanja je odbrana na tri različite razine – 600, 1200 i 2400 mm/min. U drugoj fazi istraživanja, brzina zavarivanja je bila konstantna, 900 mm/min, ali su varirani parametri ciklusa CMT procesa. Promjena parametara ciklusa ima najveći utjecaj na stabilnost procesa i na geometrijske značajke kada su vrijednosti podešene na početku samog procesa.



*Slika 5.1 Geometrija višeslojnog zida postignuta CMT procesom, [59].  
pri brzini kretanja pištolja od 900 mm/min:  
a) nakon 30 slojeva, b) nakon 60 slojeva*

Iz slike 5.1 se uočava pojava stvaranja „brijegova“ duž slojeva, što se povezuje s kombinacijom niskog unosa topline i prevelike brzine kretanja pištolja.

U radu [60] je istraživana mogućnost primjene CMT procesa u aditivnoj proizvodnji usporedbom izrađenih komponenti od dvije aluminijske legure, Al-4047 i Al-5356. Pokusi su provedeni na supstratu aluminijske legure Al-6082, koja predstavlja aluminijsku leguru dobre zavarljivosti i toplinske vodljivosti. Za deponiranje je korištena žica promjera 1 mm, legure Al-4047 i Al-5356. Za WAAM proces su korišteni: uređaj za zavarivanje Fronius CMT Advanced 4000 R, te robotski sustav KUKA KR22. Za ispitivanje ponašanja procesa izrađeni su tanki zidovi duljine 100 mm u 20 slojeva, a za potrebe ispitivanja čvrstoće izrađeni su zidovi duljine 300 mm u 100 slojeva. Primjenjeni proces je impulsni CMT (CMT-P). Međuslojna temperatura je podešena na 100°C. Nakon vizualnog pregleda, mjerene su geometrijske značajke zida – širina i visina. Slikom 5.2. prikazani su izrađeni uzorci zidova

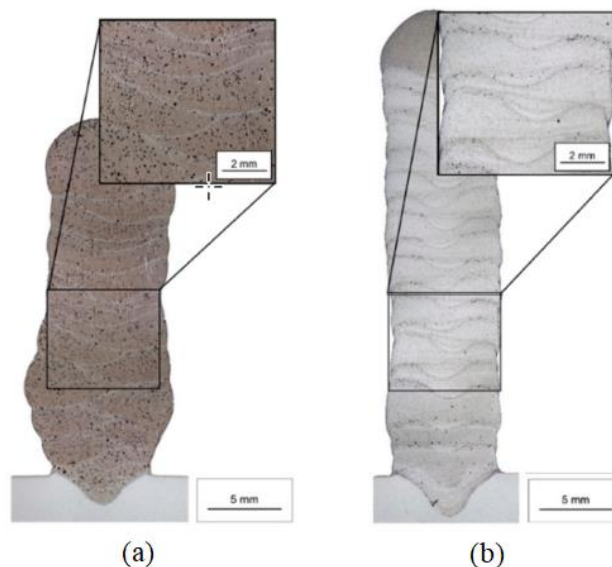


ove dvije aluminijske legure. Za lehuru Al-4047, širina zida je bila u rasponu od 9,6 do 12,1 mm, a visina zida od 22,3 do 24,8 mm. Pravilnija geometrija s manje odstupanja duž smjera deponiranja postignuta je kod legure Al-5356, sa širinom zida od 8,3 do 9,2 mm i visinom zida od 26,6 do 27,9 mm.



Slika 5.2. Izrađeni zidovi: a) Al-4047, b) Al-5356, [60]

Poprečni presjek uzoraka je prikazan slikom 5.3.



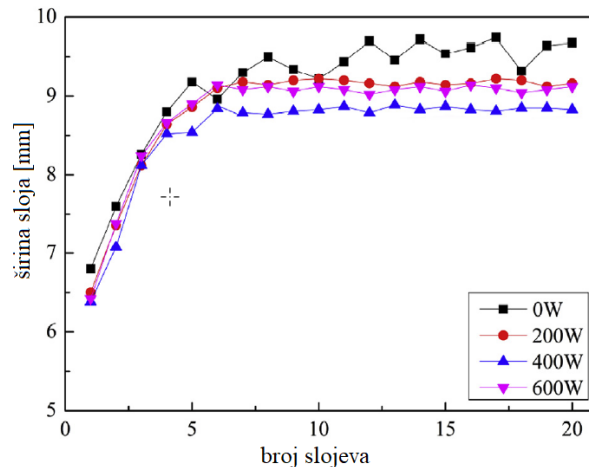
Slika 5.3. Poprečni presjek WAAM uzoraka  
a) Al 4047, b) Al 5356, [60]

Mjereno je i zaostalo naprezanje na vrhu zadnjeg sloja, kao i na gornjoj strani temeljne ploče. Zaostalo naprezanje ima značajno više vrijednosti kod legure Al-5356, jer magnituda zaostalog naprezanja ovisi i o granici tečenja dodatnog materijala. Mekša aluminijska legura Al-4047 pokazuje značajno niže zaostalo naprezanje.

U svrhu postizanja stabilnog procesa zavarivanja i primjene u aditivnoj tehnologiji aluminijskih legura, potrebno je voditi računa o niskom unosu topline, bez prskanja, pukotina i s minimalnim brojem pora. Značajan doprinos tome predstavlja optimiranje ulaznih parametara procesa, kao i predviđanje geometrijskih značajki zavora. U analizi rezultata, pored geometrijskih značajki, potrebno je imati informaciju o mikrostrukturi i mehaničkim svojstvima, s ciljem postizanja traženih zahtjeva kvalitete proizvoda.

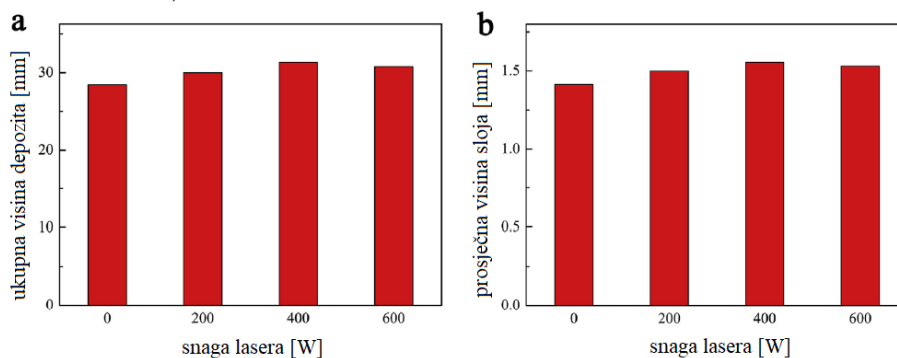
Pored ispitivanja pojave pora u samoj mikrostrukturi materijala, značajna karakteristika u primjeni WAAM tehnologije je i kvaliteta površine izrađenog komada. Pri tome se primjenjuju i uspoređuju različiti procesi zavarivanja s niskim unosom topline. U cilju poboljšanja svojstava proizvedenih komponenti, provedeno je istraživanje kvalitete površine tankog zida izrađenog hibridnim procesom – lasersko-MIG elektro-lučni proces (tzv. L-M proces), [61]. kao supstrat korištena je aluminijska legura 6061, a dodatni metal– žica za zavarivanje, aluminijska legura 5356. Pri tome su primjenjene različite prosječne snage lasera

od 0 W, 200 W, 400 W i 600 W. Mjerene dimenzije, visina i širina zida ovise o prosječnoj snazi laserskog snopa. Najmanje odstupanje dimenzija se postiglo pri snazi laserskog snopa od 400 W. Kvaliteta površine zida je značajno poboljšana u odnosu na klasični MIG proces, a postignut je i bolji koeficijent iskoristivosti materijala. *Slika 5.4.* pokazuje grafički ovisnost prosječne širine pri različitim snagama lasera, za izrađenih 20 slojeva zida. Prosječna širina se smanjuje s porastom snage laserskog luka. Također u prvih 5-6 slojeva, zbog toga što je tijekom procesa deponiranja tekući metal bio blizu supstrata, koji je imao bolje uvjete odvođenja topline za razliku od viših slojeva, tekući metal se skrutnio bez dovoljno vremena da se raširi, zbog čega je širina sloja bila manja u odnosu na širinu gornjih slojeva.



*Slika 5.4. Širina slojeva za različite snage lasera, [61]*

S druge strane, sa smanjenjem širine sloja došlo je do povećanja visine sloja jer je volumen tekućeg metala, a time i površina poprečnog presjeka sloja pod utjecajem istog unosa topline ostala ista, *slika 5.5.*

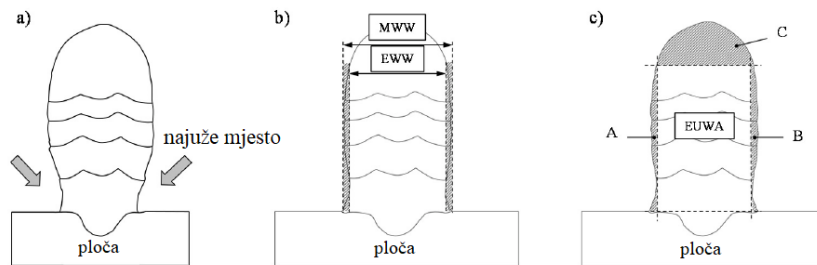


*Slika 5.5. Visina deponiranja za različite laserske snage: (a) ukupna visina depozita, (b) prosječna visina slojeva, [61]*

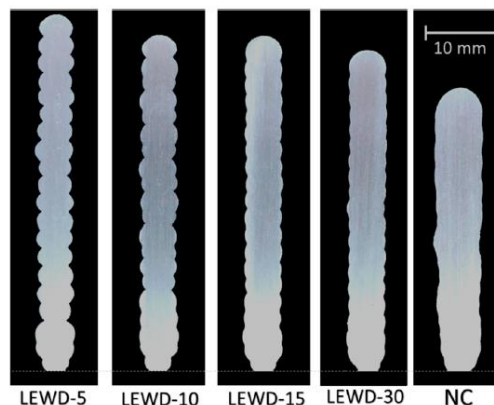
U usporedbi sa klasičnim MIG procesom, dodavanjem lasera značajno je poboljšana kvaliteta površine zida. Razlike širine i visine slojeva su također smanjene, a njihova standardna devijacija je smanjena za više od 50 %.

U cilju postizanja kvalitetnog oblika konačne konture zida, iskoristivosti materijala i što manje nepravilnosti bočne stijenke, potrebno je uzeti u obzir površinu poprečnog presjeka zida, koja proizlazi iz razlike maksimalno iskoristive širine zida i efektivne površine zida podijeljene s dva, *slika 5.6.* Iz *slike 5.6.c* se uočava da područje površina A, B i C mora biti uklonjeno strojnom obradom nakon aditivne proizvodnje, [62]. Maksimalna iskoristivost materijala predstavlja količnik  $EUWA/(EUWA + A + B)$ , gdje u izrazu EUWA predstavlja efektivnu iskoristivu površinu zida. Višeslojni zid proizveden primjenom CMT-PADV

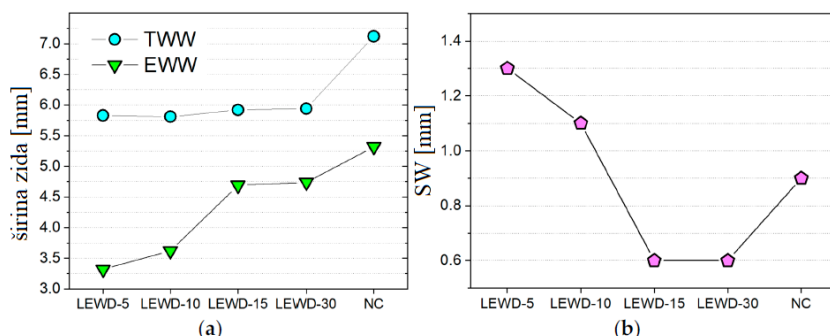
procesa je imao najpravilniju konturu poprečnog presjeka. Mjerena površinska nepravilnost je imala vrijednost od 0,89 mm i iskoristivost materijala iznad 80 %. CMT-PADV proces je imao najniži unos topline od 1,44 kJ/cm, što je rezultiralo najboljom geometrijom, najfinijom strukturom zrna i najmanjim porozitetom.



Kontrolirano odvođenje topline je zasigurno način upravljanja aditivnim procesom s ciljem postizanja odgovarajućih svojstava, mikrostrukture i geometrije. Doprinos tome je i rad [63], u kojem je opisana primjena aktivnog hlađenja (eng. NIAC-Near Immersion Active Cooling) u usporedbi s prirodnim hlađenjem (eng. NC-Natural Cooling) pri aditivnoj izradi zida od aluminijske legure AlMg5. Rezultati ovog istraživanja se mogu primijeniti i za druge procese elektrolučnog deponiranja, tehnike upravljanja toplinom i materijale. Pokusi su provedeni primjenom CMT procesa s dva pristupa: 1. izrada zida uz aktivno hlađenje vodom supstrata i nižih slojeva s regulacijom razine vode u tanku, 2. izrada zida uz prirodno hlađenje. U prvom pristupu se mijenjala udaljenost razine vode od ruba sloja (eng. LEWD - Layer Edge to Water Distance) u rasponu od 5 do 30 mm. Provedena mjerenja su se odnosila na sljedeće parametre: jakost struje, napon, te geometrijske značajke - ukupna širina zida, efektivna širina zida i visina sloja. Slikom 5.7. je prikazan kvalitativni učinak odabranih udaljenosti vode od ruba sloja na geometriju izrađenih zidova duljine 350 mm.

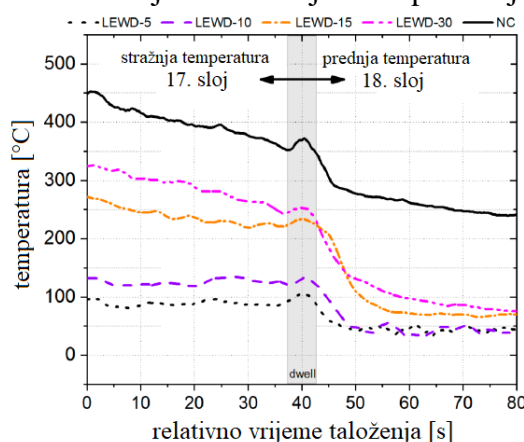


Utjecaj LEWD parametra na geometriju je prikazan slikom 5.8. Izbor LEWD parametra nema značajniji utjecaj na ukupnu širinu zida, ali s porastom LEWD raste i efektivna širina zida. Najmanja valovitost površine je postignuta za vrijednosti LEWD od 15 i 30 mm.



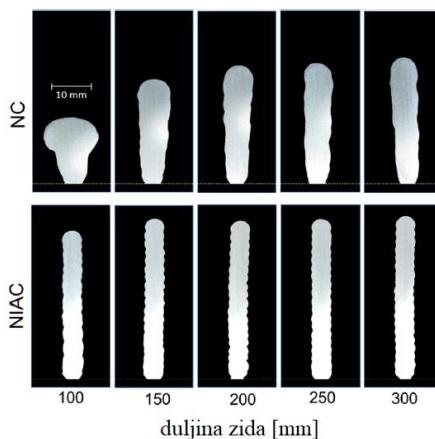
Slika 5.8. Utjecaj LEWD na ukupnu i efektivnu širinu zida (a) i na valovitost površine (b), [63]

U analizi utjecaja topline je mjerena temperatura, čija raspodjela je prikazana slikom 5.9. Uočava se da razina raspodjele temperature ovisi o parametru LEWD. Što je veći LEWD i razina temperature je veća. Pri tome je bitno i vrijeme deponiranja sloja.



Slika 5.9. Raspodjela temperature mjerena IC pirometrom, [63]

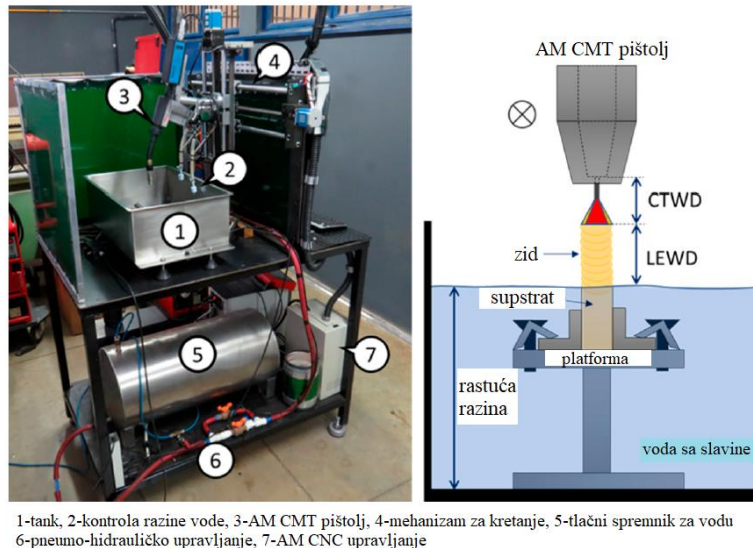
Nadalje su provedeni pokusi s konstantnim brojem slojeva i različitim duljinama sloja radi usporedbe utjecaja topline pri različitim duljinama sloja za aktivno i prirodno hlađenje zida, slika 5.10. Što je manja duljina zida, to je izraženiji štetan učinak akumulacije topline na geometriju. S većom duljinom zida, zid postaje viši i vitkiji zbog duljeg vremena deponiranja, odnosno, posljedično duljeg vremena hlađenja. Što se tiče geometrije i poroznosti, zidovi izrađeni tehnikom NIAC s LEWD vrijednostima između 15 i 20 mm pokazale su najbolje rezultate za razinu energije luka (82 J/mm) i odabrani materijal žice (ER 5356).



Slika 5.10. Utjecaj deponiranja na geometriju pri različitim duljinama zida, [63]

Temeljem navedenog istraživanja, uočava se da se deponiranjem s aktivnim i prirodnim hlađenjem tijekom aditivnog procesa može postići slična geometrija ako se primijene odgovarajuće međuprolazne temperature, a ukupno vrijeme deponiranja s prirodnim hlađenjem je značajno dulje zbog produljenog vremena hlađenja između slojeva.

Primjena CMT procesa i aktivnog hlađenja, uz razvoj jednostavnog matematičkog modela višestruke kvadratne regresije za predviđanje geometrijskih značajki, prikazana je u radu [64]. Eksperimentalna oprema za provedbu pokusa je prikazana slikom 5.11.



Slika 5.11. Eksperimentalna oprema i shematski prikaz provedbe WAAM procesa, [64]

Istraživanje je imalo za cilj odabrati radni okvir procesnih parametara za izradu zidova od aluminijske legure AlMg5 WAAM tehnologijom s aspekta geometrijske prihvatljivosti. Pri tome su se razmatrale geometrijske značajke kao što su ukupna i efektivna širina zida, visina sloja i površinska valovitost. Kako bi se izbjegla pretjerana oksidacija na gornjoj površini provedena je regulacija zaštitnog plina, a kako bi se smanjila bočna površinska valovitost, primijenilo se aktivno odvođenje topline vodom mijenjanjem udaljenosti razine vode od gornjeg sloja od 20 do 30 mm. Time je proširen radni okvir primjenjivosti procesnih parametara. Kao polazno stanovište za razvoj radnog okvira procesnih parametara, uspostavljena je matematička relacija između procesnih parametara i osnovnih geometrijskih značajki prema slici 5.12. i sljedećem izrazu:

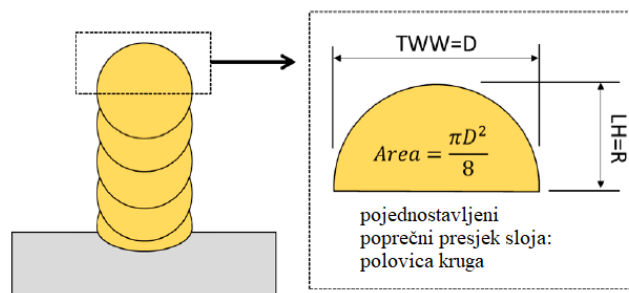
$$\frac{\pi \cdot TWW^2}{8} = \frac{WFS}{TS} \cdot Wire_{area} \quad (5.3)$$

gdje su:

$TWW$  – ukupna širina zida,

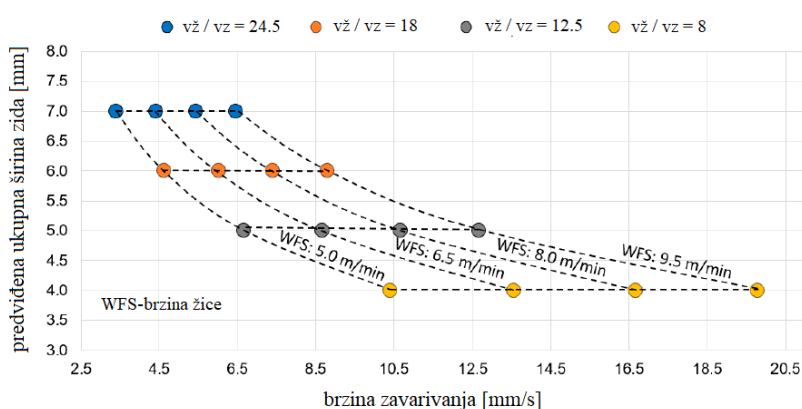
$WFS$  – brzina žice,  $TS$  – brzina kretanja pištolja,

$Wire_{area}$  – površina poprečnog presjeka žice.



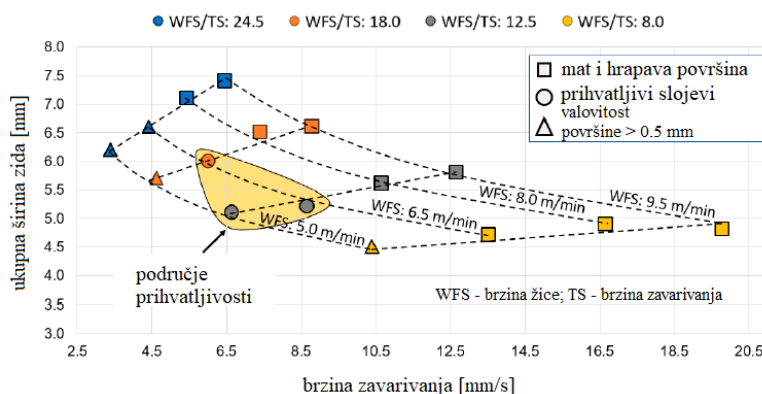
Slika 5.12. Pojednostavljeni model poprečnog presjeka sloja, [64]

Temeljem ovako postavljenog matematičkog modela, za odabrane vrijednosti brzine žice unutar raspona od 4 do 10.5 m/min i brzine kretanja pištolja unutar raspona od 3 do 25 mm/s, s ciljem dobivanja vrijednosti  $TWW$  od 4 do 7 mm s korakom od 1 mm, provedeno je modeliranje grafički prikazano slikom 5.13.



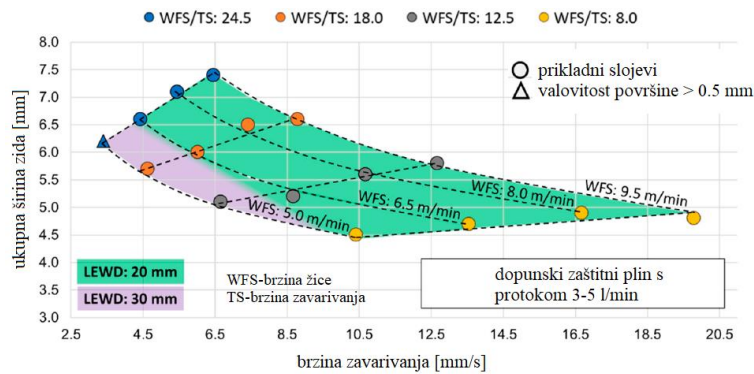
Slika 5.13. Radni okvir procesnih parametara dobiven predviđanjem, [64]

Temeljem ovakog pristupa i primjenom zavarivačkih standarda, provedeni eksperimenti su pokazali da su samo 3 od 16 izvedenih pokusa potvrdila odabrani kriterij prihvatljivosti, slika 5.14.



Slika 5.14. Radni okvir procesnih parametara temeljem eksperimenata, [64]

Nakon otklanjanja problema pretjerane oksidacije povećanjem protoka zaštitnog plina i pretjerane bočne površinske valovitosti primjenom aktivnog hlađenja vodom, te ponovne provedbe eksperimenata, radni okvir procesnih parametara je značajno proširen, slika 5.15.



Slika 5.15. Prošireni radni okvir procesnih parametara, [64]

Za prošireni radni okvir razvijeni su empirijski matematički modeli metodom kvadratne regresije za predviđanje  $TWW$ ,  $EWW$  (engl. Effective Wall Width) i  $LH$  geometrijskih značajki, te je provedeno optimiranje minimiziranjem uz pomoć software-a, prema sljedećem izrazu:

$$\text{Minimiziranje} \left[ (T - f(EWW))^2 + (f(TWW) - f(EWW))^2 \right] \quad (5.4)$$

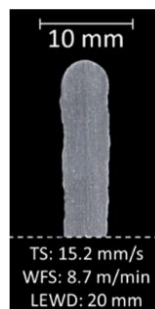
gdje su:

$T$  – željena širina zida,

$EWW$  – efektivna površina poprečnog presjeka zida,

$TWW$  – ukupna površina poprečnog presjeka zida.

Eksperimentalna procjena empirijskih modela i optimiranja je provedena eksperimentom za željenu širinu zida 5 mm, slika 5.16. Vidljivo je da geometrijske značajke modela i pokusa se sasvim dobro podudaraju.



Slika 5.16. Poprečni presjek zida temeljem empirijskog modela, [64]  
( $TWW=5.3$  mm,  $EWW=5.1$  mm,  $LH=1.7$  mm,  $SW=0.1$  mm)

Kao rezultat pristupa u navedenom istraživanju, procesni parametri se mogu birati temeljem definiranog radnog okvira ili primjenom numeričke optimizacije, čime se osigurava postizanje prihvatljivih geometrijskih značajki.

Promatrajući geometrijske značajke zida neke aluminijske legure, može se općenito zaključiti da ovise o mnogo čimbenika. Glavni utjecajni čimbenici su unos topline koji se regulira kroz odabir procesnih parametara, međuslojna temperatura i međuslojno vrijeme. Pored geometrije, značajno je analizirati mikrostrukturu s gledišta pojave pora i karakteristika zrna, te mehanička svojstva – vlačnu čvrstoću i tvrdoću. Pri tome je nužna primjena uređaja za snimanje promatranih karakteristika, kao što su XCT skener, termalna kamera, optički mikroskop i drugi, te odgovarajućeg softvera za analizu prikupljenih podataka.

## 6. PREDVIĐANJE GEOMETRIJSKIH ZNAČAJKI U WAAAM TEHNOLOGIJI

Modeliranje MIG procesa u WAAM tehnologiji je nezaobilazna procedura u istraživanju, jer se na takav način dobiva informacija o promatranim značajkama i postižu značajne uštede. Pri tome se uobičajeno modeliraju utjecajni parametri procesa, bilo pojedinačno ili interaktivno, te promatrane geometrijske značajke radnog komada. Najčešće metode koje se primjenjuju u modeliranju su: metoda konačnih elemenata, nelinearna regresija i umjetne neuronske mreže. Metoda konačnih elemenata se primjenjuje u modeliranju izvora topline odabranog procesa s ciljem definiranja procesnih parametara. Metode predviđanja geometrijskih značajki, kao što su primjena modela nelinearne regresije i umjetnih neuronskih mreža, često se koriste kao alat za modeliranje u sklopu aditivne proizvodnje, koji može doprinijeti ukupnoj kvaliteti izrade i uštedama.

### 6.1. Primjena matematičkih modela za predviđanje geometrijskih značajki zida

Kako bi se uspostavio odnos između parametara procesa i promatranih svojstava zida, primjenjuju se matematički nelinearni modeli za predviđanje istih. Najčešće korištene metode za tu svrhu su kvadratna regresijska metoda i metoda odzivnih površina. U statistici, metodologija odzivnih površina istražuje odnos između nekoliko objašnjivih varijabli i jedne ili više izlaznih varijabli. Metodu su uveli George E. P. Box i K. B. Wilson 1951., a glavna ideja RSM-a je koristiti niz planiranih eksperimenata kako bi se dobio optimalan odziv (maksimum ili minimum). U RSM metodi, odzivne površine su grafički prikaz koji opisuje međusobno djelovanje procesnih varijabli i promatranih značajki. Optimiranje procesa uključuje ispitivanje koeficijenata, predviđanje odziva i provjeru prihvatljivosti razvijenog modela.

Odziv se općenito opisuje kroz sljedeću jednadžbu:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \pm E \quad (6.1)$$

gdje su:

$Y$  – promatrani odziv,

$f$  – funkcija odziva,

$X_1, \dots, X_n$  - neovisne varijable,

$E$  – eksperimentalna pogreška.

Najčešće korištena funkcija odziva je polinom drugog stupnja sljedećeg izraza:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_i + \sum_{j=1}^n \beta_{jj} X_j^2 + \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=1}^n \beta_{ij} X_i X_j + E \quad (6.2)$$

gdje su:

$Y$  – promatrani odziv,

$\beta_0$  – regresijski koeficijent,

$\beta_i, \beta_{jj}$  i  $\beta_{ij}$  – linearni, kvadratni i interakcijski koeficijenti,

$X_i$  i  $X_j$  – vrijednosti procesnih varijabli,

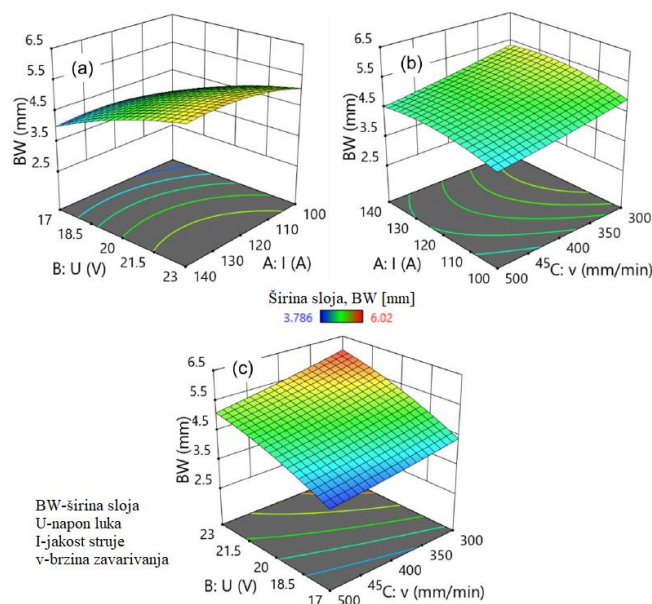
$E$  – eksperimentalna pogreška.

Proučavajući utjecaj parametara CMT procesa na geometrijske značajke zida aluminijske legure 2319, uspostavljen je model kvadratne regresije za predviđanje širine i



visine sloja zida, opisan u radu [65]. Provedeno je 15 pokusa temeljem plana pokusa prema Box–Behnken metodi. Kao ulazni parametri uzeti su brzina zavarivanja, brzina dodavanja žice i temperatura supstrata, koja se primjenjuje učinkovito do 4 faktora s 3 razine. Mjerenje širine i visine slojeva provedeno je pomoću laserskog skenera koji može mjeriti geometriju u realnom vremenu. Kako bi se potvrdili rezultati predviđanja, provedeno je dodatnih 5 eksperimenata, a pojedinačna relativna greška se kretala unutar 5%.

Regresijska analiza se uobičajeno primjenjuje za definiranje relacije između ulaznih i izlaznih parametara odabranog procesa, a odabrana regresijska funkcija je navedena regresijska jednadžba – polinom drugog reda (izraz (6.2)). Pri tome se provodi plan pokusa u okviru odabranih razina ulaznih parametara. Također se provode i pokusi za procjenu prihvatljivosti odabranog regresijskog modela te se računa relativna pogreška. Međutim, pri analizi utjecaja procesnih parametara potrebno je razmotriti interakcijski učinak promatranih procesnih parametara ( $I$ ,  $U$  i  $v_z$ ) na geometrijske značajke sloja (širinu i visinu sloja). Ovakav pristup je primijenjen u radu [66], kada se proučavao utjecaj parametara GMAW procesa primijenjenog u aditivnoj tehnologiji čelične legure. U pokusima se koristila žica od nehrđajućeg čelika 308L, promjera 1 mm, a osnovna ploča čelik SS400, dimenzija 250 mm x 150 mm x 10 mm. Zaštitni plin je bio 99,99 % argon, protoka 15 l/min. Provedeno je 17 pokusa prema planu pokusa pomoću Box-Behnken metode. Izrađeni su modeli za predviđanje širine i visine sloja primjenom kvadratne regresijske jednadžbe. Prihvatljivost modela se definirala pomoću ANOVA metode analize varijance. Dodatno su izvedena još 4 pokusa za procjenu točnosti razvijenih modela. Interakcijska ovisnost procesnih parametara prikazana je slikama 6.1 i 6.2.

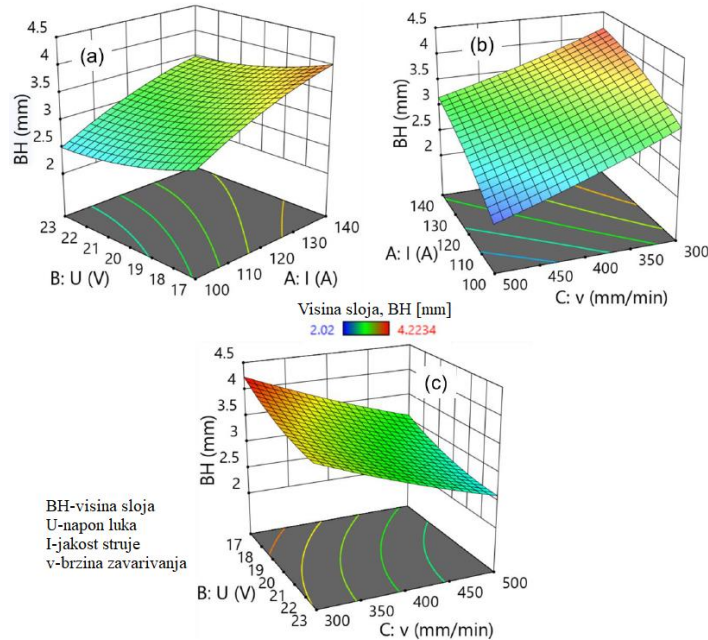


Slika 6.1. Interakcijski učinak procesnih parametara na širinu sloja  
(a) učinak  $I$ ,  $U$ ; (b) učinak  $I$ ,  $v_z$ ; (c) učinak  $U$ ,  $v_z$ , [66]

Uočava da širina sloja raste s porastom napona luka za sve vrijednosti jakosti struje (slika 6.1.a) i za sve vrijednosti brzine kretanja pištolja (slika 6.1.b). Povećanje brzine kretanja pištolja izaziva smanjenje širine sloja za sve vrijednosti napona luka i jakosti struje. Širina sloja se neznatno povećava s povećanjem jakosti struje za sve vrijednosti napona luka i brzine kretanja pištolja.

S druge strane, interakcijski učinak procesnih parametara na visinu sloja je prikazan slikom 6.2. Visina sloja raste s porastom jakosti struje od 100 A do 140 A za sve vrijednosti napona (slika 6.2.a) i za sve vrijednosti brzine kretanja pištolja (slika 6.2.b). S druge strane,

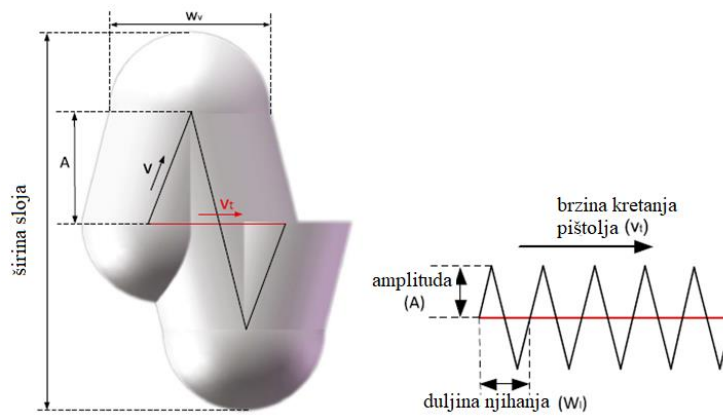
visina sloja se snižava s povišenjem brzine kretanja pištolja za sve vrijednosti jakosti struje (slika 6.2.b) i za sve vrijednosti napona luka (slika 6.2.c). Povećanje napona vodi postepenom smanjenju visine sloja, za sve vrijednosti jakosti struje (slika 6.2.a) i za sve vrijednosti brzine kretanja pištolja (slika 6.2.c). Pri najnižoj vrijednosti napona luka i brzine kretanja pištolja, te pri najvišoj vrijednosti jakosti struje, visina sloja postiže maksimalnu vrijednost.



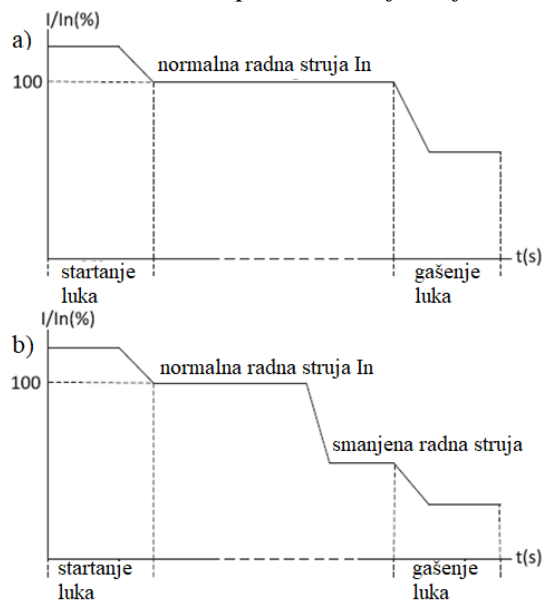
Slika 6.2. Interakcijski učinak procesnih parametara na visinu sloja  
(a) učinak  $I$ ,  $U$ ; (b) učinak  $I$ ,  $v_z$ ; (c) učinak  $U$ ,  $v_z$ , [66]

Računanjem relativne greške rezultata predviđanja u odnosu na rezultate eksperimenta procijenila se točnost odabranih regresijskih modela, a relativna greška se kretala od -3,28 % do 3,26 % za širinu sloja te od -2,96 % do 4,10 % za visinu sloja. Optimiranjem širine sloja, visine sloja i unosa topline za ovako odabrane modele pristupilo se izradi zida od 20 slojeva. U ovom slučaju je korišten optimizacijski modul u programu *Design Expert 11*, za dobivanje maksimuma širine i visine sloja uz istovremeni minimalni unos topline. Izrađeni zid je imao ujednačene vrijednosti za širinu a visina je bila promjenjiva zbog istosmjernog deponiranja slojeva.

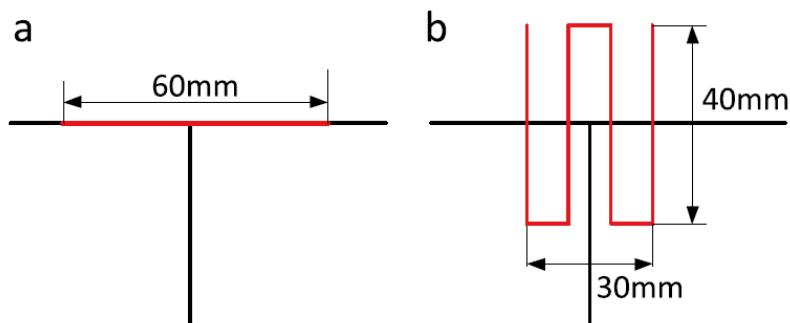
Posebno zanimljiva pojava, koja se javlja pri izradi dijelova od aluminijske legure primjenom aditivne tehnologije električnim lukom i žicom, odnosi se na nejednolikost geometrijskih karakteristika pojedinih slojeva (visine i širine sloja), čime je otežana primjena aditivnog procesa. Naročito je to značajno za izradu dijelova koji imaju veće dimenzije. U cilju postizanja ravnomjernijih geometrijskih značajki slojeva, primjenjuju se različite strategije optimiranja, kao što su primjerice deponiranje s njihanjem, kontrola paljenja i gašenja luka, te lokalno mjerenje geometrije i skidanje materijala na konačnu dimenziju strojnom obradom. U radu [67] su prezentirani robotski sustavi aditivne i subtraktivne proizvodnje, s ciljem kontrole geometrijske jednodolnosti slojeva pri proizvodnji dijelova velikih dimenzija. Pri tome su korištena tri navedena pristupa, koji uključuju njihanje, kontrolu startanja i gašenja luka te pristup s lokalnim mjerenjem i strojnom obradom izrađenog komada, prikazano slikama 6.3. do 6.5.



Slika 6.3. Model i parametri njihanja, [67]



Slika 6.4. Podešavanje jakosti struje prije gašenja luka, [67]



Slika 6.5. Putanja za lokalno mjerenje (a) i strojnu obradu (b) na mjestu križanja, [67]

Primjenjeni aditivni proces je CMT, a žica aluminijska legura 4043, promjera 1,2 mm. U procesu se koristio laserski senzor za mjerenje visine sloja, kako bi se utjecalo na to da li je potrebna strojna obrada prije nanošenja sljedećeg sloja. Načelno, visina početnog dijela sloja je veća u odnosu na srednji dio, a visina završnog dijela sloja je manja od srednjeg dijela sloja. Uzastopnim nanošenjem slojeva ta se razlika u početnom i završnom dijelu sloja akumulira, što može izazvati probleme pri samoj provedbi procesa. Pristup s kontrolom početnog i završnog dijela procesa se temelji na sljedećem: 1. protusmjerno nanošenje slojeva s radi preklapanja početnog i završnog dijela slojeva; 2. smanjenje glavne struje prije

završnog dijela gdje je dodatno smanjena završna struja. Podešavanje je provedeno smanjenjem brzine žice prije završnog segmenta, a također i podešavanjem brzine zavarivanja, kako bi brzina deponiranja materijala ostala konstantna. Odabrana jakost struje od 140 A je snižena na 110 A, 5 mm prije završnog dijela sloja, kada je završna struja snižena u odnosu na tu vrijednost struje. *Slikom 6.6.* je prikazan zid od 10 slojeva, izrađen sa kombinacijom njihanja i kontrole početnog i završnog dijela sloja.



*Slika 6.6. Deponirani zid kombinacijom njihanja i kontrole početnog i završnog dijela sloja, [67]*

Također je provedeno optimiranje polinomom drugog stupnja, kako bi se uspostavila relacija između procesnih parametara i geometrije, prema poopćenom izrazu (6.3.):

$$Y = b_0 + b_1 \cdot v_w + b_2 \cdot v_t + b_3 \cdot W_1 + b_4 \cdot A + b_5 \cdot v_w^2 + b_6 \cdot v_t^2 + b_7 \cdot W_1^2 + b_8 \cdot A^2 + b_9 \cdot v_w \cdot v_t + b_{10} \cdot v_w \cdot W_1 + b_{11} \cdot v_w \cdot A + b_{12} \cdot v_t \cdot W_1 + b_{13} \cdot v_t \cdot A + b_{14} \cdot W_1 \cdot A \quad (6.3)$$

gdje su:

$Y$  – širina ili visina sloja [mm],

$v_w$  – brzina žice [mm/min],

$v_t$  – brzina kretanja pištolja [mm/min],

$W_1$  – duljina njihanja [mm],

$A$  – amplituda njihanja [mm],

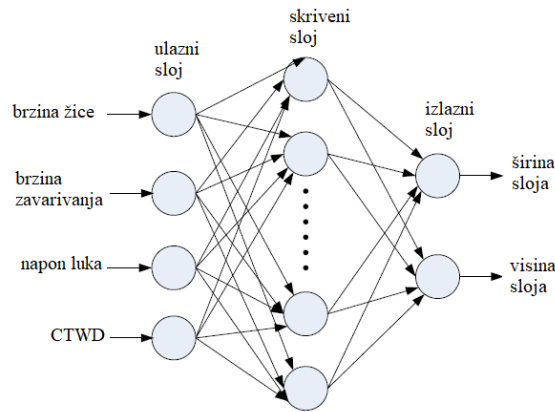
$b_0$  do  $b_{14}$  – koeficijenti.

Optimiranje je provedeno na 120 setova podataka, a prosječna greška predviđanja je iznosila 4,99 % za širinu i 5,57% za visinu sloja, računato sa novih 48 setova podataka. Pokazalo se kako je model regresije polinomom drugog stupnja unutar prihvatljive točnosti. Konačno je pokazano da je kombinacijom tri metode postignuta dobra geometrijska točnost izrađenog komada.

## **6.2. Primjena modela umjetnih neuronskih mreža za predviđanje geometrijskih značajki zida**

Pored ispitivanja mikrostrukture, mehaničkih i geometrijskih značajki proizvedenih komponenti aditivnom tehnologijom, u cilju postizanja optimalnih parametara procesa zavarivanja provode se i istraživanja u domeni predviđanja navedenih karakteristika različitim metodama. Modeli umjetnih neuronskih mreža (ANN, eng. Artificial Neural Networks) predstavljaju snažan alat za koreliranje ulaznih parametara procesa zavarivanja s promatranim značajkama, poglavito u predviđanju geometrijskih značajki komada. Korelacija između ulaznih parametara procesa i geometrijskih značajki izrađenog komada je složena zbog toga što je proces zavarivanja izrazito nelinearan.

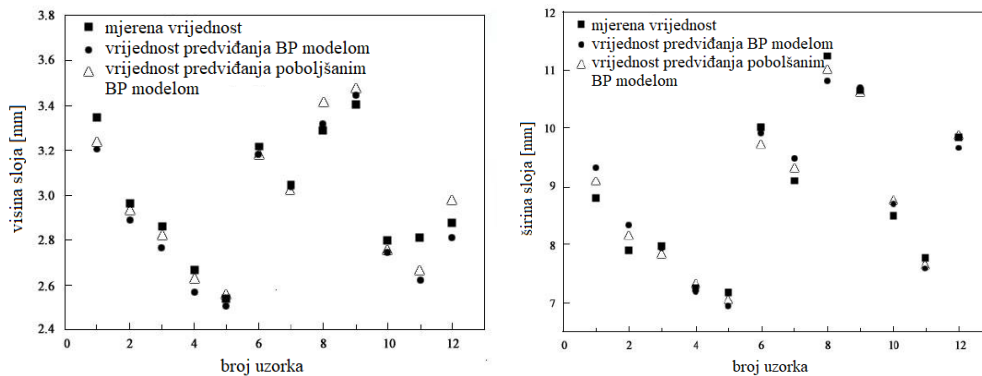
Primjer primjene umjetnih neuronskih mreža u modeliranju geometrijskih značajki sloja u aditivnoj proizvodnji prikazan je u radu [68]. Za aditivnu proizvodnju je korišten GMAW proces, žica od konstrukcijskog čelika, promjera 1,2 mm, supstrat ugljični čelik, dimenzija 210 mm x 120 mm x 9.5 mm. Korišteni zaštitni plin je bila mješavina 95 % argona i 5 % CO<sub>2</sub>. Struktura neuronske mreže za predviđanje geometrije prikazana je *slikom 6.7.*



Slika 6.7. Struktura neuronske mreže za predviđanje geometrije, [68]

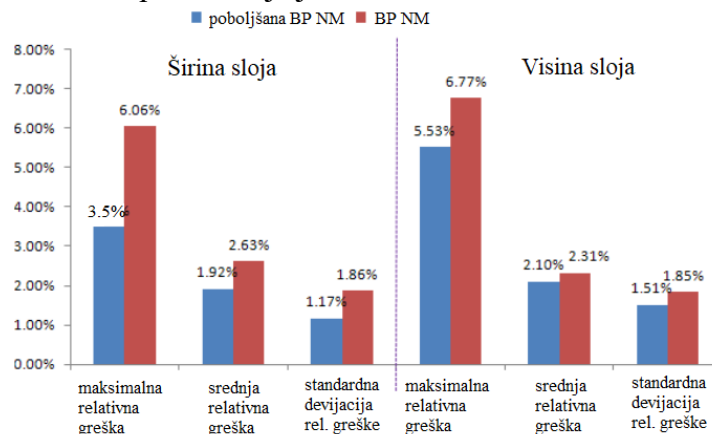
U cilju poboljšanja karakteristika neuronske mreže i izbjegavanja pojave lokalnih minimuma, korištena je metoda genetskog algoritma (GA) za optimiranje težinskih koeficijenata neuronske mreže. Sposobnost predviđanja modelom neuronskih mreža i poboljšanim modelom primjenom genetskog algoritma je provjerena sa 12 setova podataka.

Rezultati dobiveni klasičnim modelom neuronske mreže i poboljšanim modelom neuronske mreže prikazani su slikom 6.8.



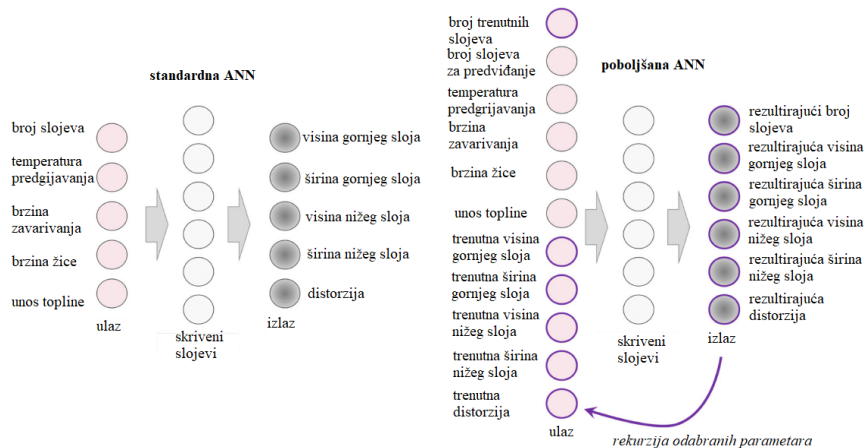
Slika 6.8. Usporedba rezultata eksperimenata i predviđanja širine i visine sloja, [68]

Rezultati pokazuju da kombinacija genetskog algoritma i neuronske mreže s povratnim rasprostranjem greške poboljšava točnost predviđanja, a prosječna relativna greška između mjenjenih rezultata i rezultata predviđanja je oko 5,5 %, slika 6.9.



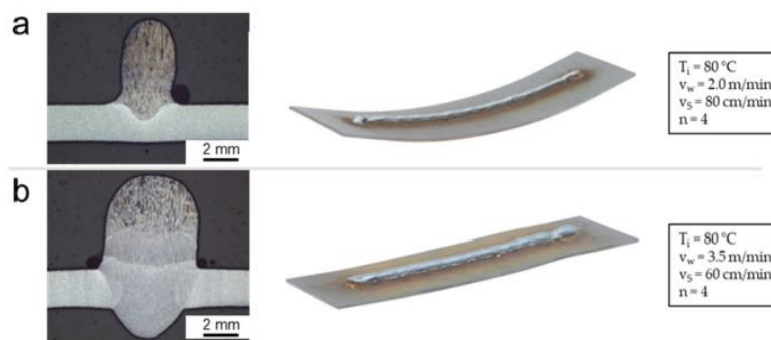
Slika 6.9. Usporedba rezultata predviđanja 2 modela NM, [68]

Metoda umjetnih neuronskih mreža za predviđanje geometrijskih značajki zida izrađenog WAAM tehnologijom primjenjena je u istraživanju grupe autora u radu [69]. Eksperimenti su provedeni pomoću CMT MIG procesa na niskougličnim čeličnim pločama dimenzija 200 x 52 x 2 mm, s niskolegiranom čeličnom žicom 1.5130 (10MnSi7) promjera 1,2 mm. Modeliranju neuronskim mrežama se pristupilo u dvije faze. U prvoj fazi su se u ulaznom sloju odabrali parametri procesa – broj slojeva, temperatura predgrijavanja, brzina zavarivanja, brzina žice, unos topline. U izlaznom sloju su odabrane geometrijske značajke – visina lica, širina lica, visina korijena, širina korijena, distorzija ploče. U drugoj fazi su se geometrijske značajke prethodnog sloja na ulazu nove strukture neuronske mreže, zajedno sa ostalim procesnim parametrima, *slika 6.10*.



*Slika 6.10. Struktura standardne i poboljšane ANN, [69]*

Korištena struktura mreže sadržavala je dva skrivena sloja, sa 150 neurona svaki, uz primjenu metode validacije „*early stopping*“ s 500 iteracija. Eksperimenti provedeni ovim procesom dali su vrlo prihvatljive rezultate, a geometrija za dva različita unosa topline prikazana je *slikom 6.11*.



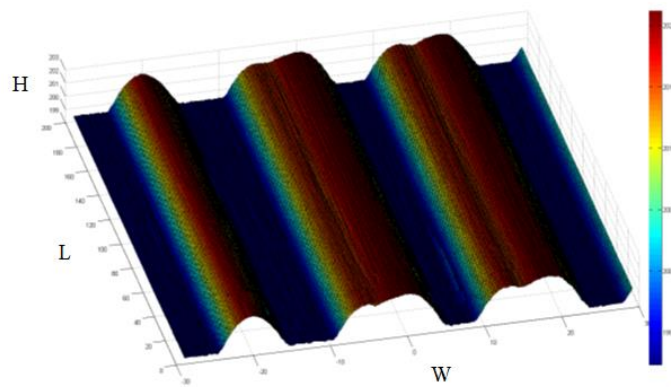
*Slika 6.11. Geometrijske značajke i distorzija ploče za 4 sloja (a) niski unos topline; (b) visoki unos topline, [69]*

U području niskog unosa topline je došlo do nedovoljne dubine penetracije bez formiranja korijena zavora, uz pojavu deformacije ploče u smjeru z-osi. Suprotno tome kod visokog unosa topline vidljivo je formiranje korijena zavora, a deformacija u y-z ravnini je niska ili zanemariva. Ovakvim pristupok, odnosno, primjenom poboljšane strukture neuronske mreže postignuti su rezultati predviđanja s relativnom greškom unutar 3 %.

U radu [30] su primjenom metode umjetnih neuronskih mreža razvijeni modeli za predviđanje geometrijskih značajki zavarenog spoja. Korišteni proces je impulsni GMAW

proces, dodatni materijal je bila Al-Mg žica promjera 1,2 mm. Zaštitni plin je bio argon, protok 15 l/min. Brzina žice je varirana u rasponu od 5 do 7 m/min, a brzina kretanja pištolja je varirana u rasponu od 0,35 do 0,7 m/min. Geometrijski profil je mjereno pomoću 3D laserskog skenera. Mjerenja geometrijskih profila, obrađena su pomoću programa MATLAB i prikazana su *slikom 6.12*. Lijevi profil predstavlja model jednog sloja, a ostala dva profila su po dva preklapajuća sloja.

Model neuronske mreže se sastoji od tri sloja – ulazni, skriveni i izlazni sloj. Kao parametri ulaznog sloja modela ANN su se koristili brzina dovođenja žice, brzinu kretanja pištolja i duljina izvučene žice. Geometrijske značajke izlaznog sloja su širina zavara i visina zavara. Izabrana struktura neuronske mreže je unaprijedna neuronska mreže, FFNN (eng. Feedforward Neural Networks), a izabrani algoritam učenja je algoritam s povratnim rasprostranjem pogreške (eng. Backpropagation Algorithm).



*Slika 6.12. Mjerni rezultati geometrijskih profila zavara, [30]*

Provedeno je 16 pokusa za učenje modela i dodatnih 7 pokusa, koji su izabrani metodom slučajnog odabira za testiranje modela, a rezultati predviđanja su pokazali kako se neuronske mreže mogu uspješno primjeniti u predviđanju geometrijskih značajki zavarenih spojeva općenito, ali i u području aditivne tehnologije.

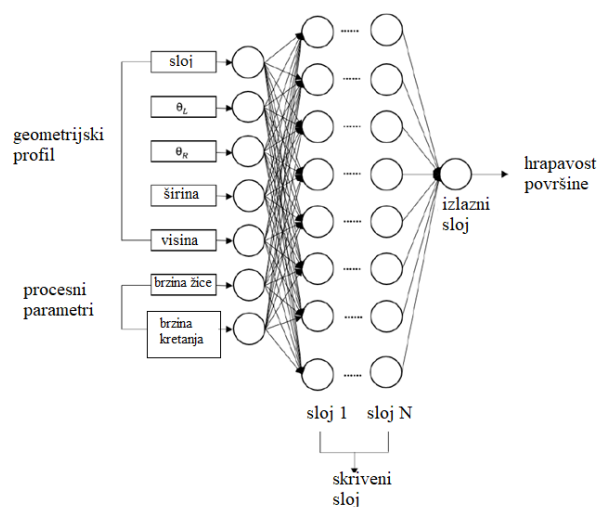
U radu [70] opisani su pokusi provedeni robotiziranim MAG procesom zavarivanja niskougličnog čelika, a za predviđanje geometrijskih značajki zavara primjenjene su dvije metode – metoda umjetnih neuronskih mreža i kvadratna regresija. U modelu umjetne neuronske mreže korištena su 3 sloja – ulazni, skriveni i izlazni sloj. U ulaznom sloju su odabrani parametri procesa – brzina dodavanja žice, brzina zavarivanja, napon zavarivanja, udaljenost vrha žice do radnog komada (CTWD, eng. Contact Tip to Work Distance). Neuroni u skrivenom slojevu su računski elementi koji ostvaruju nelinearno mapiranje između procesnih varijabli i geometrijskih značajki. Izabrane geometrijske značajke su širina zavara i visina zavara. Razvijeni regresijski model drugog stupnja se također pokazao prikladnim alatom za predviđanje promatranih geometrijskih značajki zavara. Rezultati modeliranja, provedeni na 25 pokusa, su pokazali da metoda neuronske mreže pokazuje bolju točnost od regresijskog modela drugog stupnja. Relativna pogreška kod modela neuronske mreže je između 0.003 i 0.004 %, a kod regresijskog modela se kreće između 1.163 i 1.318 %. Istraživanje je pokazalo da neuronske mreže mogu biti uspješno primijenjene za predviđanje geometrijskih značajki kod aditivne tehnologije višeslojnoj deponiranju.

U radu [71] je razvijeni model za predviđanje geometrijskih značajki zavara u jednom sloju, primjenom regresijske metode polinomom drugog stupnja. Primijenjeni kriterij valjanosti razvijeniog modela je tehnika statističke analize varijance (ANOVA), s razinom pouzdanosti od 95 % za unaprijed postavljene procesne parametre. Relativna pogreška rezultata predviđanja širine i visine zavara iznosila je 4.5 % i 7.1 %. U provedenim pokusima je korišten TIG proces zavarivanja, dodatni metal aluminijska legura 5A06, promjera 1.2 mm.

Nadalje, u svrhu razvoja optimalnih parametara zavarivanja, primjenjena je metoda odzivnih površina (eng. Response Surface Methodology) kako bi se proučio utjecaj pojedinih parametara na geometrijske značajke zavara. Optimalni procesni parametri su provjereni pokusom.

Proučavanje MIG procesa zavarivanja aluminijske legure AA6351, provedeno kroz optimiranje procesnih parametara kao što su jakost struje zavarivanja, protok zaštitnog plina i brzina dodavanja žice, prikazano je u radu [72]. Navedeni parametri imaju značajan utjecaj na geometrijske značajke sloja. Postizanje odgovarajućih geometrijskih značajki i mehaničkih svojstava sloja, preduvjet je za izradu kvalitetnih komponenti u više slojeva za tehnološke primjene aditivne proizvodnje aluminijskih legura. Primjenjeni proces zavarivanja je MIG, a dodatni materijal je AA4043, koji je zavarivački kompatibilan s AA6351. Optimiranje je povedeno primjenom neuronskih mreža gdje su se kao ulazni parametri koristile geometrijske značajke zavara (visina zavara, širina zavara i dubina penetracije i postotak površine presjeka penetracije), a kao izlazni sloj parametri procesa (jakost struje zavarivanja, protok zaštitnog plina i brzina dodavanja žice). Dobivene optimalne vrijednosti parametara procesa za zadanu geometriju su bile: jakost struje, 140 A; protok plina, 13,84 l/min; brzina dodavanja žice, 5,442 m/min.

U radu [73] provedeno je modeliranje primjenom DNN modela (eng. Deep Neural Networks) za predviđanje površinske hrapavosti zida od 5 slojeva izrađenog MAG-CMT procesom. Materijal osnovne ploče je bio nehrđajući čelik 316L, kao i žice promjera 1,2 mm. DNN je jedna od osnovnih metoda dubokog učenja koja je proizašla iz ANN strukture, uz primjenu 2 ili više skrivenih slojeva. DNN modeli su pokazali visoku učinkovitost pri rješavanju kompleksnih struktura s velikim brojem podataka i učenjem različitih nelinearnih korelacija između promatranih parametara. DNN struktura prilagođena ovoj problematici shematski je prikazana slikom 6.13. Površinska hrapavost je mjerena uređajem za mjerenje koordinata i računata je kao prosječno odstupanje lijeve i desne strane zida. Ulazni i izlazni podaci za treniranje DNN modela su definirani mjerenjem geometrijskog profila zida (širina sloja  $W$ , visina sloja  $H$ , te kutevi  $\vartheta_L$  i  $\vartheta_R$  s lijeve i desne strane u odnosu na horizontalnu ravninu između dva susjedna sloja), odabirom procesnih parametara (brzine zavarivanja i brzine dodavanja žice) i mjerenjem površinske hrapavosti. Podaci su dobiveni izradom 27 zidova sa po 5 slojeva. U razmatranje nije uzet prvi sloj zbog povećane interakcije s osnovnom pločom u odnosu na ostale slojeve. DNN model je uspoređen sa konvencionalnim regresijskim modelima (linearna, kvadratna i kubična regresija), te SVR (eng. Support Vector Regression). Pokazalo se da DNN model ima uvjerljivo najmanju grešku, MAPE (1,93 %), odnosno, RMSE (0,03).



Slika 6.13. Shematski prikaz DNN modela za predviđanje površinske hrapavosti, [73]



Obzirom na važnost predviđanja geometrijskih značajki sloja u aditivnoj tehnologiji, nameće se nužnost primjene neuronskih mreža ili neke druge metode a naročito u „online“ opciji, čime se utječe na točnost i kvalitetu izrađenih komada, uz postizanje značajnih ušteda.

## 7. ZAKLJUČCI I PRIJEDLOZI BUDUĆIH ISTRAŽIVANJA

Aditivna proizvodnja metalnih komada procesom zavarivanja predstavlja sve veći izazov i područje interesa u današnjim znanstvenim istraživanjima. Razlog tome su uštede materijala u odnosu na konvencionalne procese proizvodnje metalnih dijelova. Većina znanstvenih istraživanja u ovom području bave se optimiranjem procesnih parametara u cilju postizanja zadovoljavajućih geometrijskih značajki, mehaničkih svojstava i mikrostrukture izrađenog komada. U tu svrhu, nezaobilazna je primjena robotiziranog sustava koji će upravljati procesom višeslojnog zavarivanja, kao i mogućnost predviđanja traženih svojstava primjenom određenih matematičkih modela, regresijskih metoda i metoda umjetnih neuronskih mreža.

Brojni zavarivački procesi se primjenjuju u svrhu aditivne proizvodnje, a među najčešće korištenim procesima su procesi koji koriste laser i električni luk kao izvor topline u kombinaciji sa žicom. Ovisno o materijalu koji se koristi, postoje razne inačice navedenih procesa. Aditivna tehnologija primjenom električnog luka i žice, predstavlja još uvijek izazov u znanstvenim istraživanjima zbog jednostavnosti primjene i velikih ušteda. Radi postizanja željenih geometrijskih značajki, mehaničkih svojstava i kvalitete proizvoda, nameće se nužnost optimiranja unosa topline kroz procesne parametre. Uobičajeno se optimiraju tri glavna parametra – jakost struje zavarivanja, napon električnog luka i brzina zavarivanja. Pri tome je potrebno voditi računa o akumulaciji topline tijekom uzastopnog deponiranja slojeva.

Poseban izazov u promatranom području predstavlja istraživanje mogućnosti primjene aditivne tehnologije na aluminijskim legurama, zbog samog složenog procesa zavarivanja, prijenosa topline i utjecaja na mehanička svojstva i geometrijske značajke izrađenog komada. Najčešći problem kod WAAM tehnološkog procesa aluminijskih legura predstavlja pojava zaostalog naprezanja, deformacije materijala te pojava pora u samoj mikrostrukturi. Po pitanju geometrijskih značajki, zahtjevi za dimenzionalnom točnošću i kvalitetom površine izrađenog dijela predstavljaju nužni preduvjet praktične primjene aditivne tehnologije.

Preduvjet za izbjegavanje ovih pojava je stabilan proces zavarivanja, s niskim unosom topline kao ključnim uvjetom, dostatno vrijeme hlađenja komada nakon svakog međuprolaza, te optimalan izbor parametara zavarivanja temeljem primjene neke od metoda predviđanja promatranih značajki. Pri analizi promatranih svojstava komada koriste se razni alati i tehnike, te se razvijaju nove i poboljšavaju postojeće metode. Primjena sofisticiranih mjernih uređaja omogućava potpuni uvid u karakteristike izrađenog komada, kao i kontrolu aditivnog procesa.

Uporaba matematičkih modela i metoda, kao što su nelinearna regresija, metoda odzivnih površina za opisivanje utjecaja procesnih parametara i predviđanje promatranih značajki, doprinosi poboljšanju kvalitete konačnog proizvoda, ali i osigurava spoznaju temeljnih fizikalnih pojava primjenjenog aditivnog procesa. Poseban doprinos tome je i primjena umjetnih neuronskih mreža, koja je i u ovom području postala nezaobilazna.

Preporuka za buduće istraživanje primjene WAAM tehnologije kod aluminijskih legura je daljnje proučavanje procesnih parametara odabranog procesa zavarivanja, na odabranoj aluminijskoj leguri, uz pažljivo planiranje pokusa, te stvaranje baze podataka za izradu modela umjetnih neuronskih mreža za predviđanje promatranih geometrijskih i mehaničkih svojstava. Pri tome je značajno naglasiti kako su mikrostruktura i mehanička svojstva (vlačna čvrstoća) najznačajniji pokazatelj kvalitete izrađenog komada odabranom aditivnom tehnologijom.

## 8. LITERATURA

- [1] Parupelli, S.K.; Desai, S.: „A Comprehensive Review of Additive Manufacturing (3D Printing): Processes, Applications and Future Potential“, American Journal of Applied Sciences, 16(8), 244-272, 2019.
- [2] Mehrpouya, M. i dr.: „The Potential of Additive Manufacturing in the Smart Factory Industrial 4.0: A Review“, Applied Sciences, 9 (18), 1-34, 2019.
- [3] González, D.S.; Álvarez, A.G.: „AM Manufacturing Feasibility Study & Technology Demonstration - EDA AM State of the Art & Strategic Report“, s Interneta, <https://eda.europa.eu>, 2018, 11. ožujka 2020.
- [4] Uгла, A.A.; Khandair, H.J.; Almusawi, A.R.J.: „Metal Inert Gas Welding-Based-Shaped Metal Deposition in Additive Layered Manufacturing: A Review“, World Academy of Science, Engineering and Technology, 13(3), 244-257, 2019.
- [5] Rodrigues, T.A. i dr.: „Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)“, Materials, 12(7), 1121, 1-41, 2019.
- [6] Pan, Z. i dr.: „Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review“, Transactions on Intelligent Welding Manufacturing, 1, 3-24, Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2017.
- [7] „ASTM standard F2792-10 - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies“, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.
- [8] González, J.: „Additive manufacturing with GMAW welding and CMT technology“, Procedia Manufacturing, 13, 840–847, 2017.
- [9] Negi, S.; Dhiman, S.; Sharma, R. K.: „Basics, applications and future of additive manufacturing technologies: A review“, Journal of Manufacturing Technology Research, 5, 1/2, 75-96, 2013.
- [10] Srivastava M. i dr.: „Additive Manufacturing - Fundamentals and Advancements“, Boca Raton, Taylor & Francis Group, 2020.
- [11] Tofail, S.A.M. i dr.: „Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities“, Materials Today, 21, 1, 22-37, 2018.
- [12] DebRoy, T.: „Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties“, Progress in Materials Science, 92, 112–224, 2018.
- [13] Bian, L.; Shamsaei, N.; Usher, J.M.: „Laser-Based Additive Manufacturing of Metal Parts“, 1st edition, Boca Raton, Taylor & Francis Group, 2017.,
- [14] Taminger, K.M.B.; Hafley, R.A.: „Electron beam freeform fabrication: A rapid metal deposition process“, Preceeding of the 3rd Annual Automotive Composite Conference, Troy, 2003.
- [15] Węglowski1, M.S. i dr.: „Electron Beam Additive Manufacturing with Wire – Analysis of the Process“, AIP Conference Proceedings, 140015, 2018.
- [16] Herzog, D. i dr.: „Additive manufacturing of metals“, Acta Materialia, 117, 371-392, 2016.
- [17] Sames, W.J. i dr.: „The Metallurgy and Processing Science of Metal Additive Manufacturing“, International Materials Reviews, 61 (5), 1-46, 2016.
- [18] Saboori, A. i dr.: „An Overview of Additive Manufacturing of Titanium Components by Directed Energy Deposition: Microstructure and Mechanical Properties“, Applied Sciences, 7, 883, 2017.
- [19] Peleshenko S. i dr.: „Analysis of the Current State of Additive Welding Tecnologies or Manufacturing Volume Metallic Products (Review)“, Eastern European Journal of Enterprise Technologies, 3/1 (87), 1729-3774, 2017.

- [20] Prado-Cerqueira, J.L.; Dieguez, J.L.; Camacho, A.M.: „Preliminary Developmnt of a Wire and Arc Additive Manufacturing System (WAAM)“, *Procedia manufacturing*, 13, 895-902, 2017.
- [21] Alhuzaim, A.F.: „Investigation in the use of plasma arc welding and alternative feedstock delivery method in additive manufacture“, magistrarski rad, Montana Tech, University of Montana, SAD, 2014.
- [22] Uгла, A.A.; Khaudair, H.J.; Almusawi, A.R.J.: „Metal Inert Gas Welding-Based-Shaped Metal Deposition in Additive Layered Manufacturing: A Review“, *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 13 (3), 2019.
- [23] J. Nadzam, „Gas Metal Arc Welding Guidelines“, The Lincoln Electric Company, 2014., s Interneta, [www.lincolnelectric.com](http://www.lincolnelectric.com), 8. lipnja 2020.
- [24] Grubić, K.: „Doprinos teoriji MIG zavarivanja impulsnim strujama“, doktorska disertacija, FSB, Zagreb, 1991.,
- [25] N.N., „GMAW Applications“, Tooling University, Cleveland, Ohio, SAD, 2004., s Interneta, <http://www.toolingu.com>, 4. listopada 2010.
- [26] Hunko, W.S.: „Cold Metal Transfer-Gas Metal Arc Welding (CMT-GMAW) Wire + Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process Control Implementation“, doktorska disertacija, Auburn Univerity, SAD, 2018.
- [27] Senthilkumar, B.; Kannan, T.; Surendran, P.: „Influence of Welding Process Parameters on Bead Geometry-A Review“, *Journal of Mechanical and Mechanics Engineering*, 1(3), 1-13, 2015.
- [28] Weman, K.: „Welding processes handbook“, Woodhead Publishing Ltd, Cambridge, England, 2003.
- [29] Sakthivel, R. i dr.: „Effect of Welding Current, Arc Voltage and Gas Flow Rate on Depth of Penetration during MIG Welding of AA2014 Plate“, 2(2), 2015.,
- [30] Ding, D.: „Process planning for robotic wire arc additive manufacturing“, doktorska disertacija, University of Wollongong, Australia, 2015.
- [31] Almeida, P.M.S.; Williams, S.: „Innovative process model of Ti–6Al–4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT)“, *Proceedings of the 21st annual international solid freeform fabrication symposium*, 25–36, University of Texas at Austin, Austin, USA, 2010.
- [32] Somashekara, M.A. i dr.: „Investigations into effect of weld-deposition pattern on stress evolution for metallic additive manufacturing“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 90, 2009–2025, 2017.
- [33] Akbari, M.; Ding, Y.; Kovacevic, R.: „Process development for a robotized laser wire additive manufacturing“, *Proceedings of the ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference MSEC2017*, 1-11, Los Angeles, USA, 2017.
- [34] Ding, D.: „A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 34, 8–19, 2015.
- [35] Ding, D. i dr.: „Bead modelling and implementation of adaptive MAT path in wire and arc additive manufacturing“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 39, 32–42, 2016.
- [36] Ding, D. i dr.: „Multi-direction slicing of STL models for robotic wire-feed additive manufacturing“, *Conference: 2015 International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 1059-1069, Austin, USA, 2015.

- [37] Ding, D. i dr.: „A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)“, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 31, 101-110, 2015.
- [38] Williams, S.W. i dr., „Wire + Arc Additive Manufacturing“, *Material Science and Technology*, vol.00, 1-7, 2015.
- [39] Ryan, E.M., „On Wire and Arc Additive Manufacture of Aluminium“, doktorska disertacija, University of Surrey, Engleska, 2018.
- [40] Williams, S., Pickin, C., Gu, J., „Aluminium alloy composition optimisation for Wire + Arc Additive Manufacture“, Cranfield University, s Interneta, <https://waammat.com/documents>,
- [41] Derekar, K.S.: „Aspects of Wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium alloy 5183“, doktorska disertacija, Coventry University, England, 2020.
- [42] Neto, L.M.S.C., „Studying the Application of Additive Manufacturing to Large Parts“, magistarski rad, pp.107, Tecnico Lisboa, 2017.
- [43] Cong, B. i dr., „A Comparative Study of Additively Manufactured Thin Wall and Block Structure with Al-6.3%Cu Alloy Using Cold Metal Transfer Process“, *Applied Sciences*, 7, 275, 1-12, 2017.
- [44] Ding, D., „Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests“, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81, 465-481, 2015.
- [45] Gu, J., „Wire+arc additive manufacturing of aluminium“, 451-458, s Interneta, <http://utw10945.utweb.utexas.edu>
- [46] Fang, X. i dr.: „Microstructure Evolution and Mechanical Behavior of 2219 Aluminum Alloys Additively Fabricated by the Cold Metal Transfer Process“, *Materials*, 11, 812, 1-13, 2018.
- [47] Fang, X. i dr.: „Correlations between Microstructure Characteristics and Mechanical Properties in 5183 Aluminium Alloy Fabricated by Wire-Arc Additive Manufacturing with Different Arc Modes“, *Materials*, 11, 2075, 1-14, 2018.
- [48] Wang, D. i dr.: „Reducing Porosity and Refining Grains for Arc Additive Manufacturing Aluminum Alloy by Adjusting Arc Pulse Frequency and Current“, *Materials*, 11, 1344, 1-14, 2018.
- [49] Albannai, A.I., „A Brief Review on The Common Defects in Wire Arc Additive Manufacturing (Review Paper)“, *International Journal of Current Science Research and Review*, vol.05, 4556-4576, 2022.
- [50] Gomez, A. i dr.: „Effect of process parameters on the quality of aluminium alloy Al5Si deposits in wire and arc additive manufacturing using a cold metal transfer process“, *Science and Technology of Welding and Joining*, 23, 316-332, 2018.
- [51] Rosli, N.A. i dr.: „Influence of Process Parameters in Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process“, *Journal of Mechanical Engineering*, 17(2), 69-78, 2020.
- [52] Lee, H. i dr.: „Evaluation of Bead Geometry for Aluminum Parts Fabricated Using Additive Manufacturing-Based Wire-ArcWelding“, *Processes*, 8 (10), 1211, 1-14, 2020.
- [53] Grebmalai, J.; Warinsiriruk, E.: „Multi-Heat Input Technique for Aluminum WAAM Using DP-GMAW Process“, *AIP Conference Proceedings*, 2279 (1), 1-7, 2020.
- [54] Xiong, J.; Yin, Z.; Zhang, W.: „Forming appearance control of arc striking and extinguishing area in multi-layer single-pass GMAW-based additive manufacturing“, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87, 579–586, 2016.
- [55] Wang, Z i dr.: „Improvement strategy for the geometric accuracy of bead’s beginning and end parts in wire-arc additive manufacturing (WAAM)“, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 118 (7-8), 2139-2151, 2021.

- [56] H. Guo, H., Hub, J., Tsai, H.L.: „Formation of weld crater in GMAW of aluminum alloys“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 5533–5546, 2009.
- [57] Hu, J.; Tsai, H.L.: „Heat and mass transfer in gas metal arc welding. Part I: The arc“, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50, 833–846, 2007.
- [58] Li, F. i dr.: „Thermoelectric Cooling-Aided Bead Geometry Regulation in Wire and Arc-Based Additive Manufacturing of Thin-Walled Structures“, *Applied Sciences*, 8, 207, 1-12, 2018.
- [59] Ortega, A.G. i dr.: „Effect of welding parameters on the quality of multilayer deposition of aluminum alloy“, *Advances in Materials Processing Technologies Conference*, Vellore, India, 2017.
- [60] Köhler, M. i dr.: „Wire and Arc Additive Manufacturing of Aluminum Components“, *Metals* 9, 608, 1-9, 2019.
- [61] Zhang, Z. i dr.: „Surface quality and forming characteristics of thin-wall aluminium alloy parts manufactured by laser assisted MIG arc additive manufacturing“, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 1, 89-95, 2018.
- [62] Gierth, M. i dr.: „Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminum Alloy AlMg5Mn with Energy-Reduced Gas Metal ArcWelding (GMAW)“, *Materials*, 13, 2671, 1-22, 2020.
- [63] da Silva, L.J. i dr.: „Effect of Thermal Management Approaches on Geometry and Productivity of Thin-Walled Structures of ER 5356 Built by Wire + Arc Additive Manufacturing“, *Coatings*, 11, 1141, 1-12, 2021.
- [64] da Silva, L.J. i dr.: „Work Envelope Expansion and Parametric Optimization in WAAM with Relative Density and Surface Aspect as Quality Constraints: The Case of Al5Mg ThinWalls with Active Cooling“, *Journal of Manufacturing Materials Processing*, 5, 40, 1-21, 2021.
- [65] Fang, X. i dr.: „A model of bead size based on the dynamic response of CMT-based wire and arc additive manufacturing process parameters“, *Rapid Prototyping Journal*, 27(4), 741-753, 2020.
- [66] Le, V.T. i dr.: „Prediction of welding bead geometry for wire arc additive manufacturing of SS308l walls using response surface methodology“, *Transport and Communications Science Journal*, 71, 4, 431-443, 2020.
- [67] Ma. G i dr.: „Optimization strategies for robotic additive and subtractive manufacturing of large and high thin-walled aluminum structures“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101, 1275-1292, 2019.
- [68] Xue, Q. i dr.: „Weld Bead Geometry Prediction of Additive Manufacturing Based on Neural Network“, *11th International Symposium on Computational Intelligence and Design*, 2, 47-51, 2018.
- [69] Wacker, C. i dr.: „Geometry and Distortion Prediction of Multiple Layers for Wire Arc Additive Manufacturing with Artificial Neural Networks“, *Applied Sciences*, 11, 4694, 1-15, 2021.
- [70] Xiong, J. i dr.: „Bead geometry prediction for robotic GMAW-based rapid manufacturing through a neural network and a second-order regression analysis“, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25, 157–163, 2014.
- [71] Geng, H. i dr.: „A prediction model of layer geometrical size in wire and arc additive manufacture using response surface methodology“, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93, 175-186, 2015.
- [72] Sreeharan, B.N.; Dr. Kannan, T.; Aravind, P.: „Process optimization of GMAW over AA6351 aluminium alloy using ANN“, *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 8 (9), 208–218, 2017.

[73] So, M.S. i dr.: „Prediction of Metal Additively Manufactured Surface Roughness Using Deep Neural Network“, Sensors, 22, 7955, 1-14, 2022.

## POPIS OZNAKA I KRATICA

|             |  |
|-------------|--|
| $a_i$       | koeficijent korekcije                              |
| $A$         | amplituda njihanja                                 |
| $A_1$       | ukupna površina poprečnog presjeka                 |
| $A_2$       | efektivna površina poprečnog presjeka              |
| ANN         | artificial neural network                          |
| ANOVA       | analiza varijance                                  |
| ASTM        | American Society for Testing and Materials         |
| BH          | bead height  |
| BJ          | binder jetting                                     |
| BPNM        | neuronska mreža s povratnim rasprostiranjem greške |
| BW          | bead width   |
| $b_i$       | koeficijent korekcije                              |
| $B_\theta$  | elektromagnetska indukcija                         |
| $C$         | koeficijent inercije                               |
| $c$         | specifični toplinski kapacitet                     |
| CAD         | computer aided design                              |
| CMT         | cold metal transfer                                |
| CMT-ADV     | cold metal transfer - advanced                     |
| CMT-P       | impulsni CMT                                       |
| CMT-PADV    | impulsni CMT advanced                              |
| CNC         | computer numerical control                         |
| CTWD        | udaljenost kontaktnog vrha do radnog komada        |
| CWF+MIG     | cold wire feed +metal inert gas                    |
| DC          | direct current                                     |
| DED         | direct energy deposition                           |
| DE-SMD      | direct energy shaped metal deposition              |
| $D_m$       | dubina penetracije                                 |
| $d_k$       | promjer kapljice                                   |
| DNN         | deep neural networks                               |
| DP-MIG      | double pulse -MIG                                  |
| DW-SMD      | double wire-SMD                                    |
| $d_z$       | promjer žice                                       |
| $e$         | električni naboj                                   |
| <i>eng.</i> | engleski   |
| $E$         | eksperimentalna pogreška                           |
| EBAMW       | elektron beam additive manufacturing with wire     |
| EBF         | elektron beam fabrication                          |
| EBM         | electron beam melting                              |
| EP/EN       | electrode positive/ electrode negative             |
| EUWA        | efektivna korisna površina zida                    |
| EWV         | effective wall width                               |



|                   |  |
|-------------------|--|
| $f$               | dio mase tekuće ili krute faze                       |
| $F$               | rezultantna sila na kapljicu                         |
| $F_{em}$          | elektromagnetska (Lorentzova) sila                   |
| $F_g$             | sila gravitacije                                     |
| $F_{pl}$          | sila strujanja plazme                                |
| $F_{pn}$          | sila površinske napetosti                            |
| $F_r$             | sila reakcije zbog isparavanja metala na elektrodama |
| FEM               | finite element method                                |
| FFNN              | feedforward neural networks                          |
| FOM               | flat overlapping model                               |
| $g$               | gravitacijsko ubrzanje                               |
| G-code            | računalni programski jezik                           |
| GMAW              | gas metal arc welding                                |
| GMAW-P            | impulsni GMAW  |
| GTAW              | gas tungsten arc welding                             |
| $h$               | entalpija  |
| H/W               | omjer visine i širine                                |
| HI                | unos topline po jedinici duljine sloja               |
| $I$               | jakost struje zavarivanja                            |
| $I_i$             | trenutna jakost struje zavarivanja                   |
| IP                | trenutna snaga luka                                  |
| IPP               | Image ProPlus softver                                |
| ISO               | International Standard Organization                  |
| $I_{sr}$          | srednja jakost struje zavarivanja                    |
| $I_z$             | struja zavarivanja                                   |
| $J_r$             | gustoća struje u smjeru osi $r$                      |
| $J_z$             | gustoća struje u smjeru osi $z$                      |
| $K$               | funkcija permeabilnosti                              |
| $k$               | toplinska vodljivost                                 |
| $k_b$             | Stefan-Boltzmann-ova konstanta                       |
| $(koeficijent)_i$ | koeficijent podešavanja odabranog parametra          |
| LAHAM             | laser arc hybrid additive manufacturing              |
| LBAM              | laser based additive manufacturing                   |
| LBM               | laser beam melting                                   |
| LC                | laser consolidation                                  |
| LENS              | laser engineered net shaping                         |
| LEWD              | layer edge to water distance                         |
| $LH$              | visina sloja   |
| LMD               | laser metal deposition                               |
| LMS               | laser micro sintering                                |
| MAPE              | mean absolute percentage error                       |
| MAT               | medial axis transformation –algoritam putanje        |
| MATLAB            | programski paket za numeričko i matrično računanje   |
| ME                | metal extrusion                                      |

|             |                                      |
|-------------|--------------------------------------|
| MIG         | metal inert gas                      |
| MIG/MAG     | metal inert gas/ metal active gas    |
| MJ          | metal jetting                        |
| NC          | prirodno hlađenje                    |
| NIAC        | near immersion active cooling        |
| $(omjer)_i$ | omjer dubine taline i-tog i 1. sloja |
| $p$         | tlak                                 |
| PAW         | plasma arc welding                   |
| PBF         | powder bed fusion                    |
| RMSE        | root mean squared error              |
| $Q$         | unos topline luka                    |
| $\dot{Q}_w$ | toplina taljenja žice                |
| $Q_{diss}$  | rasipanje topline                    |
| $Q_{in}$    | unos topline                         |
| RWTH        | omjer širine i visine sloja          |
| SL          | sheet lamination                     |
| SLM         | selective laser melting              |
| SLS         | selective laser sintering            |
| SMD         | shaped metal deposition              |
| $S_R$       | gubitak topline radijacijom          |
| STL         | stereolitography                     |
| SVR         | support vector regression            |
| SW          | površinska valovitost                |
| SW-SMD      | double wire SMD                      |
| $T$         | željena širina zida                  |
| $T_0$       | početna temperatura                  |
| $T_p$       | vršna temperatura                    |
| T-GMAW      | twin GMAW                            |
| TIG         | tungsten inert gas                   |
| TM-GMAW     | TIG+MIG proces                       |
| TOM         | tangent overlapping model            |
| $TS$        | travel speed                         |
| TWAM        | twin wire additive manufacturing     |
| TWW         | ukupna širina zida                   |
| $U$         | napon električnog luka               |
| $U_{sr}$    | srednji napon električnog luka       |
| $u$         | koordinatni smjer                    |
| $U/I$       | omjer napona i jakosti struje        |
| $U_i$       | trenutni napon luka                  |
| $U_z$       | napon zavarivanja                    |
| $v$         | brzina zavarivanja                   |
| $V$         | brzina kretanja                      |

|                |  |
|----------------|--|
| $\dot{V}$      | protok metala                                    |
| $V_l$          | brzina tekuće faze                               |
| VP - VAT       | VAT polimerizacija                               |
| VP-CMT         | variable polarity CMT                            |
| VP-GMAW        | variable polarity GMAW                           |
| $V_r$          | vektor relativne brzine mase                     |
| $V_s$          | brzina krute faze                                |
| $v_t$          | brzina kretanja pištolja                         |
| $v_z$          | brzina zavarivanja                               |
| $v_z, v_f$     | brzina žice                                      |
| WAAM           | wire arc additive manufacturing                  |
| WFLD           | wire feed laser deposition                       |
| WFS            | wire feed speed                                  |
| $Wire_{area}$  | površina poprečnog presjeka žice                 |
| WLAM           | wire laser additive manufacturing                |
| $W_m$          | širina zavara                                    |
| XCT            | računalna tomografija X zrakama                  |
| $X_i$          | procesna varijabla                               |
| $X_j$          | procesna varijabla                               |
| $Y$            | promatrani odziv                                 |
| $z$            | broj trenutnih vrijednosti promatranog parametra |
| $\beta_0$      | regresijski koeficijent                          |
| $\beta_i$      | linearni koeficijent                             |
| $\beta_{ij}$   | interakcijski koeficijent                        |
| $\beta_j$      | kvadratni koeficijent                            |
| $\beta_T$      | koeficijent toplinske rastezljivosti             |
| $\mu$          | dinamički viskozitet                             |
| $\mu_0$        | magnetska permeabilnost                          |
| $\eta$         | učinkovitost procesa                             |
| $\eta_d$       | efikasnost deponiranja                           |
| $\theta_L$     | lijevi kut sloja                                 |
| $\theta_R$     | desni kut sloja                                  |
| $\rho$         | gustoća  |
| $\sigma_{0,2}$ | granica tečenja                                  |
| $\sigma_e$     | električna vodljivost                            |
| $\Phi$         | električni potencijal                            |
| $\pi$          | Ludolfov broj ( =3,14159... )                    |

## SAŽETAK

Suvremena aditivna proizvodnja predstavlja sve veći izazov u tehnološkim procesima izrade gotovih proizvoda. Primjena aditivne tehnologije ima značajan udio u izradi širokog spektra proizvoda iz različitih materijala – metala, polimera, keramike i kompozita, uključujući složene oblike koji se otežano proizvode na konvencionalan način. Današnja aditivna proizvodnja nalazi sve veću primjenu u zrakoplovstvu, auto-industriji, medicini te vojnoj industriji. Elektrolučni procesi zavarivanja se koriste u aditivnoj proizvodnji složenih dijelova, dodavajući tanke slojeve materijala prema unaprijed programiranoj putanji izvora topline dobivenoj iz 3D digitalnog modela. Razvojem i primjenom tehnoloških procesa zavarivanja u aditivnoj proizvodnji, znanstvenici se suočavaju s nizom problema poput postizanja željene geometrije, tolerancija i mehaničkih svojstava, pojave poroznosti, deformacija i zaostalih naprezanja. U svrhu minimiziranja navedenih problema i postizanja zahtjevane kvalitete izradaka proizvedenih aditivnim tehnologijama zasnovanima na električnom luku potrebno je izabrati optimalne parametre procesa. Jedan od najvažnijih parametara u elektrolučnim aditivnim proizvodnim procesima je unos i tok topline u izratku. Izravni učinci djelovanja topline očituju se u mikrostrukтури, geometrijskoj točnosti i rezultirajućem naprezanju.

U ovom kvalifikacijskom radu prikazan je pregled trenutnih istraživanja i najznačajnijih pojmova u aditivnoj proizvodnji zavarivanjem aluminijskih legura, s naglaskom na procese koji koriste električni luk i žicu. Kroz analizu utjecaja procesnih parametara, a koji se poglavito odnose na jakost struje zavarivanja, napon električnog luka i brzinu zavarivanja, na geometrijske značajke, opisana je metodologija aditivne tehnologije zasnovana na električnom luku i žici. Također je analiziran i utjecaj topline, kako dovedene topline procesom tako i odvedene topline, na promatranu geometriju. Utvrđeno je kako je pri primjeni električnog luka i žice u aditivnoj proizvodnji značajno imati što niži unos topline, budući se ista akumulira tijekom uzastopnog nanošenja slojeva. U okviru promatranih pojava, posebno je osjetljivo ponašanje odabranog procesa kod aluminijskih legura, s gledišta utjecaja topline, što se reflektira na geometrijske značajke, mehanička svojstva i mikrostrukтуру. Nadalje je prikazan i pregled metoda modeliranja koje se koriste u aditivnoj tehnologiji pri analizi promatranih pojava. Većina simulacijskih modela koristi metodu konačnih elemenata za opisivanje toplinskog procesa. Pri tome, za geometrijske značajke se razvijaju matematički modeli predviđanja temeljeni na parametrima procesa, a to se naročito odnosi na primjenu regresijskih modela i modela umjetnih neuronskih mreža za predviđanje promatranih značajki u cilju poboljšanja samog procesa, tehnologije i kvalitete izrade. Najnoviji modeli predviđanja primjenjuju DNN metodu, zbog rješavanja složenijih nelinearnih korelacija parametara i promatranih značajki.