Primjena aluminijevih legura i CMT postupka zavarivanja za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom

Županić, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:808342

Rights / Prava: Attribution 4.0 International/Imenovanje 4.0 međunarodna

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Matija Županić

Zagreb, 2019. godina

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:
izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić

Student:
Matija Županić

Zagreb, 2019. godina

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću i asistentu Ivanu Juriću, mag. ing mech. na smjernicama i savjetima prilikom izrade ovog rada. Također se zahvaljujem svojoj obitelji, prijateljima i djevojci na razumijevanju i podršci tijekom dosadašnjeg studija.

Matija Županić

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

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **MATIJA ŽUPANIĆ** Mat. br.: 0035198487

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena aluminijevih legura i CMT postupka zavarivanja za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of Aluminium Alloys and CMT Welding Process for Wire and Arc Additive Manufacturing**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno je ukratko opisati postupak aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom te navesti područja primjene. Obraditi CMT postupak zavarivanja i navesti specifičnosti opreme za isti. U literaturi potražiti primjere primjene aluminijevih legura i CMT postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom te ih detaljno obraditi. Navesti osnovna svojstva aluminijevih legura serije 5xxx s posebnim naglaskom na otpornost prema koroziji.

U eksperimentalnom dijelu primjenom robotiziranog zavarivanja izraditi više ispitnih uzoraka od aluminijevih legura serije 5xxx koristeći CMT postupak i konvencionalni postupak zavarivanja. Na gotovim uzorcima odrediti parametre teksture površine sukladno normi HRN EN ISO 25178 te ispitati osnovna mehanička svojstva. Ispitati korozijsku postojanost uzoraka u obrađenom i neobrađenom stanju. U konačnici izraditi komparativnu analizu rezultata i ocijeniti primjenjivost CMT postupka za aditivnu proizvodnju aluminijevih legura električnim lukom i žicom.

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

Zadatak zadan:
02. svibnja 2019.

Rok predaje rada:
04. srpnja 2019.

Predviđeni datum obrane:
10. srpnja 2019.
11. srpnja 2019.
12. srpnja 2019.

Zadatak zadao:
prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:
prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ ..... **I**
POPIS SLIKA ..... **III**
POPIS TABLICA ..... **V**
POPIS KRATICA ..... **VI**
POPIS OZNAKA ..... **VII**
SAŽETAK ..... **VIII**
SUMMARY ..... **IX**

1. UVOD **1**
2. ADITIVNA PROIZVODNJA **2**
2.1. Tehnologija aditivne proizvodnje 2
2.2. Procesi aditivne proizvodnje 3
2.3. Spajanje u sloju praška (3D – tiskanje) 4
2.4. Taložno očvršćivanje (FDM) 4
3. ADITIVNA PROIZVODNJA ŽICOM I ELEKTRIČNIM LUKOM **6**
3.1. Povijest WAAM procesa 6
3.2. Karakteristike WAAM postupka 7
3.3. Problematika WAAM procesa 9
3.4. Proizvodi WAAM tehnologije 13
3.5. Prednosti WAAM procesa 16
3.6. Nedostaci WAAM procesa 16
4. CMT (Cold metal Transfer) ZAVARIVAČKI PROCES **17**
4.1. Princip rada CMT uređaja za zavarivanje 18
5. ALUMINIJ **21**
5.1. Primjena čistog aluminija 22
5.2. Legure aluminija i magnezija (AlMg) 22
5.2.1. Kemijski sastav AlMg legura 23
5.2.2. Mehanička svojstva AlMg legura 24

5.2.3. Primjena AlMg legura ... 26

6. INDUSTRIJSKI ROBOTI ZA ZAVARIVANJE ... 27

6.1. Počeci primjene robota za zavarivanje ... 27
6.2. Opće značajke robota ... 28
6.3. Metode programiranja robota ... 29
6.3.1. *On – line* programiranje robota ... 29
6.3.2. *Off – line* programiranje robota ... 30

7. Eksperimentalni dio ... 31

7.1. Opis eksperimenta ... 31
7.2. Oprema za zavarivanje ... 32
7.2.1. Dodatni materijal za izradu zidova ... 35
7.2.2. Korišteni zaštitni plin ... 37
7.3. Tijek eksperimenta ... 38
7.3.1. Praćenje širine uzoraka ... 49
7.3.2. Praćenje visine uzoraka ... 50
7.4. Ispitivanje uzorka ... 51
7.5. Priprema uzoraka ... 52
7.6. Makroanaliza strukture ... 53
7.7. Mikroanaliza strukture ... 55
7.8. Mjerenje tvrdoće ... 61
7.9. Ispitivanje parametara teksture površine ... 63
7.10. Analiza dobivenih parametara ... 64
7.11. Ispitivanje kemijskog sastava ... 69
7.12. Ispitivanje korozijskih svojstava uzoraka ... 72
7.12.1. Priprema uzoraka za korozijsko ispitivanje ... 73
7.12.2. Rezultati ispitivanja ... 74

8. ZAKLJUČAK ... 79

POPIS SLIKA

Slika 1. Shema i princip aditivnog postupka spajanja u sloju praška [4] 4
Slika 2. Shema aditivnog postupka taložnog očvršćivanja [5] 5
Slika 3. Bakerov patent [6] 6
Slika 4. Shema WAAM + OOČ procesa [27] 8
Slika 5. Strojevi za ostvarivanje gibanja pištolja [8] 9
Slika 6. Shema WAAM sustava taloženja i valjanja [8] 10
Slika 7. Izgled poroznosti u zavaru [11] 11
Slika 8. Dio strukture krila zrakoplova [8] 13
Slika 9. Način taloženja na ploču [8] 13
Slika 10. Nosač kotača zrakoplova [8] 14
Slika 11. Testno krilo izrađeno WAAM tehnologijom [8] 15
Slika 12. Čelična konusna posuda izrađena WAAM postupkom [8] 15
Slika 13. Fronius CMT uređaj 17
Slika 14. Prikaz jednog CMT ciklusa [13] 19
Slika 15. Odnos parametra CMT ciklusa [13] 20
Slika 16. Privjesak za *on-line* programiranje [22] 30
Slika 17. Robotska stanica Almega OTC AX V6 33
Slika 18. a) Izgled programa Slika 18. b) Početni prolaz 34
Slika 19. Prikaz postupnog nastajanja jednog od uzorka 48
Slika 20. Dijagram praćena širine svih uzoraka 49
Slika 21. Prirast visine za četiri prolaza tijekom izrade uzoraka 50
Slika 22. Deformacija osnovne ploče i prikaz plazma rezačice 51
Slika 23. Uređaj za fino brušenje 52
Slika 24. Uzorak 2 (lijevo) i uzorak 6 (desno) 54
Slika 25. Uzorak 4 (lijevo) i uzorak 5 (desno) 54
Slika 26. Svjetlosni mikroskop „Olympus GX 51“ 55
Slika 27. Mikrostruktura uzorka 2 redom vrh, sredina i ZUT 57
Slika 28. Mikrostruktura uzorka 4 redom vrh, sredina i ZUT 58
Slika 29. Mikrostruktura uzorka 5 redom vrh, sredina i ZUT 59
Slika 30. Mikrostruktura uzorka 6 redom vrh, sredina i ZUT 60
Slika 31. Raspodjela tvrdoće uzoraka 62
Slika 32. Postupak provedbe 3D skeniranja uzorka 63

Slika 33. Parametri teksture površine za uzorak 2 65
Slika 34. Parametri teksture površine za uzorak 4 66
Slika 35. Parametri teksture površine za uzorak 5 66
Slika 36. Parametri teksture površine za uzorak 6 67
Slika 37. Dijagram vrijednosti parametra Ssk 67
Slika 38. Dijagram vrijednosti parametra Sku 68
Slika 39. Dijagram vrijednosti parametra Sz 68
Slika 40. Dijagram vrijednosti parametra Sq 69
Slika 41. Olympus XRF uređaj 70
Slika 42. Razlike u udjelu kemijskih elemenata na obrađenim i ne obrađenim stranama uzorka 71
Slika 43. Slana komora Ascott S450 72
Slika 44. Uzorci postavljeni u slanu komoru 73
Slika 45. Prikaz nakon 36 sati izlaganja uzoraka 2 slanoj komori 74
Slika 46. Prikaz nakon 36 sati izlaganja uzoraka 4 slanoj komori 75
Slika 47. Prikaz nakon 36 sati izlaganja uzoraka 5 slanoj komori 75
Slika 48. Prikaz nakon 36 sati izlaganja uzoraka 6 slanoj komori 76
Slika 49. Prikaz nakon 240 sati izlaganja uzoraka 2 slanoj komori 77
Slika 50. Prikaz nakon 240 sati izlaganja uzoraka 4 slanoj komori 77
Slika 51. Prikaz nakon 240 sati izlaganja uzoraka 5 slanoj komori 78
Slika 52. Prikaz nakon 240 sati izlaganja uzoraka 6 slanoj komori 78

POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav AlMg legura [19] 23
Tablica 2. Mehanička svojstva AlMg legura [19] 24
Tablica 3. Karakteristike izvora struje DP 400 34
Tablica 4. Karakteristike izvora struje TPS 400i CMT 35
Tablica 5. Kemijski sastav AlMg5 [23] 36
Tablica 6. Mehanička svojstva AlMg5 [23] 36
Tablica 7. Kemijski sastav AlMg4,5 Mn [24] 36
Tablica 8. Mehanička svojstva AlMg4,5 Mn [24] 36
Tablica 9. Mehanička i kemijska svojstva argona 4.8 [25] 37
Tablica 10. Parametri zavarivanja i geometrije uzorka 2 40
Tablica 11. Parametri zavarivanja i geometrija uzorka 4 42
Tablica 12. Parametri zavarivanja i geometrija uzorka 5 44
Tablica 13. Parametri zavarivanja i geometrija uzorka 6 46
Tablica 14. Kemijski sastav Kellerovog reagensa 53
Tablica 15. Rezultati mjerenja tvrdoće 61
Tablica 16. Udio legirnih elemenata na uzorcima 70

POPIS KRATICA

Kratica	Izvorni naziv
WAAM	Wire and Arc Aditive manufacturing
3D	Three-Dimensional Space
CAD	Computer - Aided Design
AM	Additive Manufacturing
RP	Rapid Prototyping
FDM	Fused deposition modeling
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
CNC	Computer Numeric Control
HCP	Hexagonal close packed
BCC	Body Centred Cubic
MAT	Modular Allocation Technique
BTF	Buy to fly
ZUT	Zona utjecaja topline
ISO	International Ogranization for Standardization
TIG	Tungsten Inert Gas
AA	Aluminum Association

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja
A	%	Istezljivost
m	kg	Masa
ρ	kg/m^3	Gustoća
T	°C	Temperatura
I	A	Struja

SAŽETAK

U diplomskom radu obrađena je tema aditivne proizvodnje žicom i električnim lukom (engl. Wire and Arch Additive Manufacturing – WAAM) aluminijskih legura. Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu rada objašnjeni su osnovne aditivne proizvodnje te, temeljni princip postupka aditivne proizvodnje žicom i električnim lukom (WAAM). Teorijski je obrađena tema aluminija za primjenu u ovoj tehnologiji. Aluminijeve legure serije 5xxx detaljnije su obrađene iz razloga što su korištene u eksperimentalnom dijelu rada. Opisan je CMT postupak zavarivanja, njegove osnove, princip rada, a detaljno su obrađeni i primjeri primjene ovog postupka zavarivanja za aditivnu proizvodnju žicom i električnim lukom.

U eksperimentalnom dijelu rada određeni su optimalni parametri za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom aluminijskih legura AlMg5 i AlMg4,5 Mn iz kojih su primjenom robotiziranog zavarivanja izrađena četiri uzorka. Po dva uzorka izrađeni su konvencionalnim MIG impulsnim postupkom, dok su još dva uzorka izrađena CMT postupkom zavarivanja. Na izrađenim uzorcima napravljena je makro i mikro analiza, te je izmjerena tvrdoća po Vikersu (HV10). Također, u radu je izvršeno 3D skeniranje izrađenih zidova (uzoraka) te su određeni parametri teksture površine. Izvršena je mehanička obrada glodanja sa jedne strane svakog od uzorka, dok je druga strana ostala u izvornom obliku. Ispitan je kemijski sastav na mehanički obrađenoj i ne obrađenoj strani uzorka te je na kraju izvršeno ispitivanje korozijske postojanosti izrađenih uzoraka u simuliranim morskim uvjetima koristeći slanu komoru.

Ključne riječi: *Aditivna proizvodnja žicom i električnim lukom, aluminij, CMT postupak zavarivanja*

SUMMARY

In this thesis, the topic of Wire and Arch Additive Manufacturing-WAAM aluminum alloys is discussd. The paper consists of a theoretical and experimental part.

Theoretical part explains the basic principles of Additive Manufacturing and the basic principle of Wire and Arch Additive Manufacturing (WAAM). Also the type of alluminium alloy used for WAAM is disscussed. Aluminum alloys of the 5xxx series are more elaborately processed because they are used in the experimental part of the work. The CMT welding process, its basis, the principle of operation, and the examples of the application of this welding procedure for Wire and Arch Additive Manufacturing are described.

In the experimental part of the work, optimal parameters for Wire and Arch Additive Manufacturing of aluminium alloys AlMg5 and AlMg4,5 Mn were obtained, from which four samples were made using robotized welding. Two samples were made by conventional MIG impulse, while two more samples were made by CMT welding process. Macro and micro analysis was performed on the samples, and the hardness was measured by Vickers hardness test (HV10). Also, 3D scanning of created walls (samples) has been performed and surface texture parameters were determined. Milling was performed on one side of each sample, while the other side remained in its original form. The chemical composition was examined on the mechanically processed and non-processed side of the sample, and at the end the corrosion stability test of the samples was simulated in sea conditions using the salt chamber for corrosion test.

Keywords: *Wire and Arch Additive Manufacturing, aluminium, CMT welding process*

1. UVOD

Zahtjevi i očekivanja tržišta i samih korisnika u današnje vrijeme dopiru do nikad viših razina. Sukladno tome nužan je razvoj znanosti i tehnologije koje bi zadovoljavala njihove apetite i želje. Uz razvoj novih, sve inovativnijih proizvoda industrija također ima zadatak kako proizvesti te proizvode uz rast profita tj. smanjenja troškova razvoja proizvoda te same izrade proizvoda. Nastoji se doći do inovativnog, kvalitetnog i revolucionarnog proizvoda u što kraćem roku koji se u konačnici može prodati za dobru cijenu.

Povećanje fleksibilnosti proizvodnje popraćeno je automatizacijom i modernizacijom postrojenja. Ključni elementi modernizacije proizvodnje su međusobno povezivanje njezinih dijelova, prihvaćanje novih proizvodnih filozofija, te razvoj suvremenih inteligentnih sustava. Primjerice, današnja auto industrija ne zamisliva je bez robota koji omogućuju značajnu uštedu materijala i vremena proizvodnje, zamjenjuju čovjeka na teškim i monotonim poslovima te postižu rast stupnja automatizacije postrojenja na najvišu moguću razinu što u konačnici znači i veću i ujednačenu kvalitetu samog proizvoda.

Ovaj rad bavi se suvremenim tehnologijama proizvodnje, a to su aditivna proizvodnja te aditivna proizvodnja žicom i električnim lukom (WAAM) koja se svakim danom sve više razvija te nastoji svijetu ponuditi nove, inovativne načine proizvodnje uz istovremenu uštedu materijala i vremena. Također u radu su opisani i najčešće korišteni materijali ove tehnologije te je navedena oprema za njezinu provedbu. Provedenim eksperimentom na kraju rada pokušala se ispitati primjenjivost i kvaliteta WAAM postupka izrade proizvoda.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja (AM) je tehnologija koja služi za proizvodnju 3D objekta, tj. proizvoda na način da ga izrađuje taloženjem sloja na sloj. Moglo bi se reći da je ova tehnologija suprotnost od obrade odvajanjem čestica koja do konačnog proizvoda dolazi odvajanjem čestica od sirovca sve dok se ne postignu željene dimenzije i oblik proizvoda. [4] Tehnički gledano, izraz aditivna proizvodnja može se odnositi na bilo koji proces kod kojeg se do konačnog proizvoda dolazi na način da se nešto izgradi, međutim naziv ove tehnologije odnosi se najčešće na 3D tiskanje. [1]

Aditivna proizvodnja relativno je nova tehnologija izrade proizvoda na kojoj se još uvijek provode istraživanja i razvoj, međutim prva pojava ove tehnologije bila je osamdesetih godina dvadesetog stoljeća kada dolazi do razvoja brze proizvodnje prototipova (eng. *Rapid Prototyping*, RP). Uz nju se usporedno razvijala i brza proizvodnja alata/kalupa (engl. *Rapid Tooling*, RT). Danas se ova tehnologija koristi za izradu proizvoda na temelju 3-D računalnog modela, a naziv aditivna proizvodnja koristi se od 2009. godine prema normi ASTM F42. [2]

Aditivna proizvodnja je tehnologija koja garantira smanjenje greška izrade proizvoda na način smanjenja viška materijala i vremena izrade proizvoda od CAD modela do plasiranja na tržište. Nadalje, ova vrsta tehnologije omogućuje više slobode pri konstrukciji proizvoda što u konačnici rezultira smanjenjem ukupne mase proizvoda kao i olakšavanjem izrade složenijih sklopova koji se bez ove tehnologije izrađuju od više dijelova.

Dakle, AM može predvidjeti koliko je vremena potrebno za izradu bez obzira na provedene promjene tijekom početne faze stvaranja proizvoda. [3]

2.1. Tehnologija aditivne proizvodnje

Prvi korak kod izrade proizvoda ovom tehnologijom je njegova 3D konstrukcija u nekom od računalnih programa. Ovaj korak se najčešće provodi pomoću računalnom potpomognutog konstruiranja, CAD programa ili na način da se skenira objekt koji se želi printati. Nakon toga računalo razvija program koji prevodi dizajn proizvoda u kod razumljiv stroju za aditivnu proizvodnju koji vrši njegovu izradu služeći se tehnikom izgradnje sloj po sloj. [1]

Aditivna proizvodnja koristi velik skup materijala u koji ulaze materijali od polimera, metala te od keramike do pjena pa čak i bio materije. Drugim riječima, može se koristiti bilo koja vrsta materijala samo se treba pronaći način da se lokalno spoje bilo koja dva dijela dobivena tehnologijom aditivne proizvodnje. Proces aditivne proizvodnje može se izvršiti na više različitih načina i može potrajati od nekoliko sati do nekoliko dana, sve ovisno o veličini proizvoda koji se izrađuje. Uobičajena, najčešće korištena metoda koristi mlaznicu koja taloži materijal sloj po sloj sve dok se ne postigne konačan oblik proizvoda osmišljen i konstruiran u CAD programu. [1]

2.2. Procesi aditivne proizvodnje

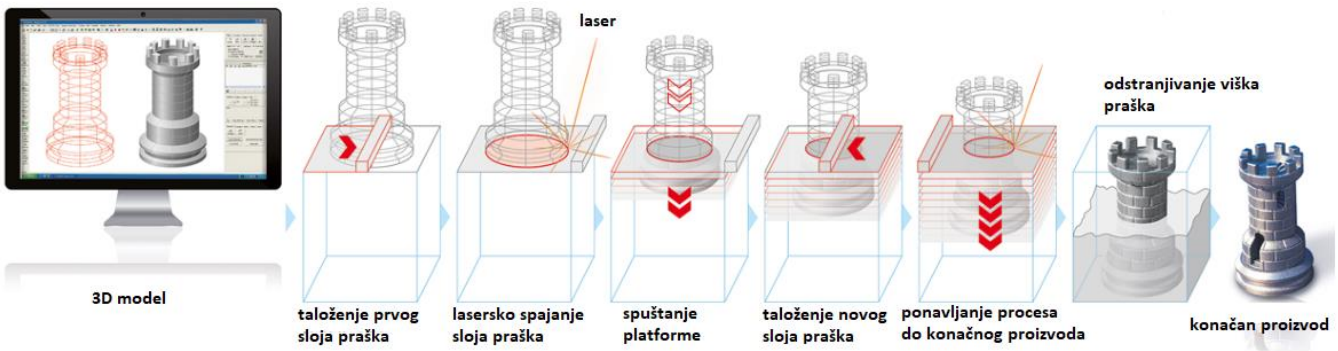
Iako svi procesi aditivne proizvodnje koriste slojevitu proizvodnju trodimenzionalnih izratka, tehnike proizvodnje znatno variraju. 2010. godine, Američko društvo za testiranje i materijale (ASTM) grupiralo je AM procese u sedam kategorija po novom standardu. ASTM F42 – Aditivna proizvodnja. Svake godine članovi ASTM odbora F42 se sastaju kako bi raspravljali o novim ili ažuriranim standardima, a neki od najčešće korištenih procesa aditivne proizvodnje su [4]:

- spajanje u sloju praška (3D – tiskanje),
- stereolitografija (SL),
- selektivno lasersko srašćivanje (SLS)
- taložno očvršćivanje (FDM),
- višefazno mlazno očvršćivanje (MJS),
- slojevita izrada laminiranjem (LLM).
- trodimenzionalno taloženje materijala u obliku aerosola (M^3D).

Svaki od sedam navedenih procesa aditivne proizvodnje sadrže značajnija odstupanja u načinu taloženja slojeva kod izrade 3D proizvoda. Stanje materijala (prah, tekućina, filament), izvor topline ili svjetlosti (laser, elektronski snop, plazma), broj osi ispisa, sustavi napajanja te karakteristike komore za izgradnju, sve se razlikuju. Također, treba napomenuti da neke aditivne tehnike proizvodnje zahtijevaju naknadnu završnu obradu, a neke ne. U ovom radu bit će pobliže objašnjene neki od navedenih procesa aditivne proizvodnje [4].

2.3. Spajanje u sloju praška (3D – tiskanje)

Spajanje u sloju praška (PBF) je proces koji je zajednički različitim tehnikama aditivnog tiskanja kao što su selektivno lasersko taljenje (SLM) te selektivno lasersko sinteriranje (SLS). Kao što i sam naziv govori PBF nastoji otopiti prah u dovoljnoj mjeri da se čestice praha spoje zajedno. Čestice su djelomično ili potpuno otopljene u različitim varijantama PBF procesa. Toplinska energija za taljenje praška dobiva se iz lasera ili pomoću zraka elektrona. Princip izrade se temelji na vrlo tankom sloju materijala (praška) koji se raširuje po radnom prostoru (platformi) pomoću specifičnog alata (često je to valjak ili neka vrsta oštrice). Prašak se nalazi ispod ili pokraj platforme za izradu koja je pomična te se nakon svakog prolaza sve više spušta kako se taloži svaki sljedeći sloj praha. Nakon završetka procesa prašak koji nije sudjelovao u taloženju tj. izgradnji proizvoda se ispuhuje ili briše. Na slici 1. prikazan je shematski prikaz ovog procesa aditivne proizvodnje. [4]

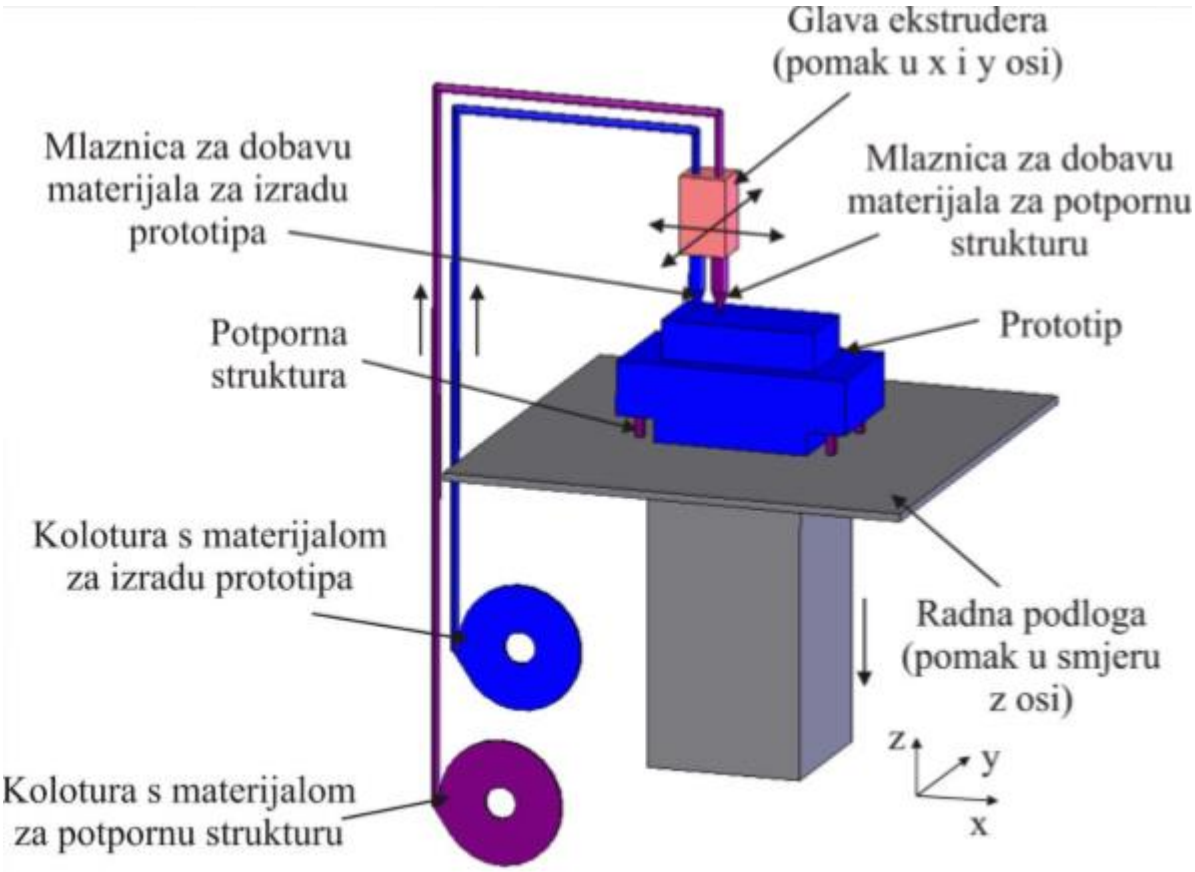


Slika 1. Shema i princip aditivnog postupka spajanja u sloju praška [4]

2.4. Taložno očvršćivanje (FDM)

Ovaj postupak aditivne proizvodnje vjerojatno je i najpoznatiji aditivni proizvodni proces. Princip rada temelji se na termoplastičnom dodatnom materijalu koji se ekstrudira kroz glavu ekstrudera do mlaznica koje se zagrijava i taloži materijal na radnu podlogu. Na glavi ekstrudera uglavnom postoje dvije mlaznice. Jedna se koristi za taloženje potporne strukture, a druga za taloženje proizvoda. Nakon taloženja materijala na prethodni sloj oni se sjedine te se počnu hladiti i očvršćivati. FDM postupak koristi širok raspon dodatnih materijala koji uključuju razne vrste polimera kao što su ABS, PLA, najlon, PC, ULTEM te druge složenije materijale poput onih koji su ispunjeni metalom ili drvom. [4]

Budući da je proces brz i jeftin, vrlo često se koristi za izradu prototipova. Iako dimenzijska točnosti nije bila na zavidnoj razini u prošlosti, noviji moderni industrijski FDM uređaji proizvode itekako iskoristive prototipove. Manjak ovog procesa su anizotropna svojstva izradaka. Budući da se slojevi talože uzduž X i Y osi, najveći problem odnosi se na vlačnu čvrstoću u vertikalnoj Z osi. U rješavanju ovog problema istraživanja su dokazala da se problem može djelomično riješiti naknadnom obradom izratka. Na slici 2 prikazana je shema FDM postupka izrade prototipa. [4]



Slika 2. Shema aditivnog postupka taložnog očvršćivanja [5]

3. ADITIVNA PROIZVODNJA ŽICOM I ELEKTRIČNIM LUKOM

Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom (engl. *Wire + arc additive manufacturing (WAAM)*) spada u grupu tehnologija proizvodnje koja je još u razvoju. Korištenje materijala više kvalitete i cijene koji osiguravaju odlična svojstva u primjeni (titan, aluminij, itd.) obično biva neisplativo zbog visokih troškova i gubitka materijala korištenjem standardnih postupaka obrade za dobivanje željenog proizvoda. WAAM tehnologija omogućuje relativno brzu izradu proizvoda uz značajnu uštedu materijala u odnosu na klasične postupke obrade materijala kao što su tokarenje ili glodanje kod kojih se do konačnog proizvoda dolazi postepenim skidanjem čestica materijala sa sirovog komada.

3.1. Povijest WAAM procesa

Prva pojava WAAM procesa počela je 1926. godine kada je Baker prvi put upotrijebio električni luk za taljenje i spajanje materijala sloj po sloj radi dobivanja trodimenzionalnog proizvoda. Ovaj patent prikazan je na slici 3. [6]



Slika 3. Bakerov patent [6]

Ujiie (Mitsubishi) je 1971. godine elektrolučnim zavarivanjem pod praškom (EPP, engl. SAW) izradio tlačne posude rabeći više žica od različitih materijala.

Kussmaul je 1983. godine iskoristio EPP postupak za proizvodnju visokokvalitetnog konstrukcijskog čelika za nuklearne elektrane (20MnMoNi5). Količina depozita približno je iznosila 80 kg/h, a ukupna težina 79 tona. [6]

Prinz i Weiss su 1993. godine patentirali postupak kombinacijom zavarivanja i CNC glodanja. Sveučilište u Cranfieldu je od 1994. do 1998. za Rolls Royce razvijalo postupak taloženja metalnih materijala za izradu određenih dijelova, a 2006. godine zrakoplovne su kompanije pregovarale s njima o brzoj aditivnoj proizvodnji dijelova od titana. Dijelovi su bili veličine oko 2,5 metra, relativno jednostavne geometrije. [7]

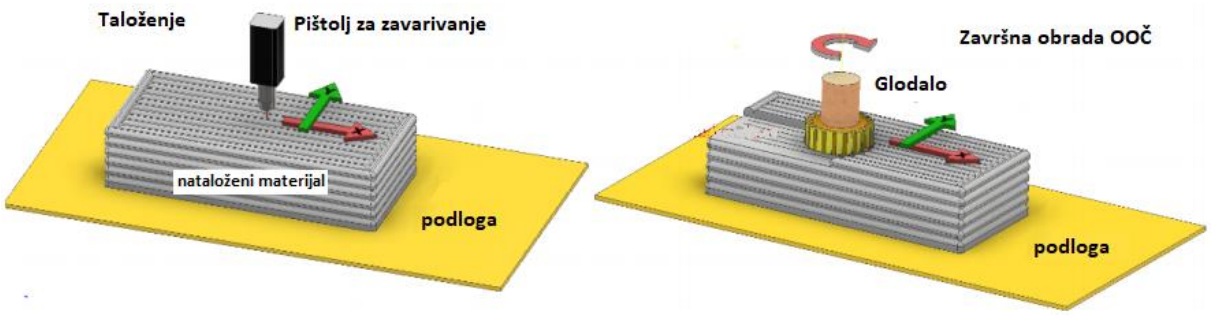
3.2. Karakteristike WAAM postupka

Aditivna proizvodnja žicom i električnim lukom vrlo je pogodna tehnologija za izradu proizvoda ili poluproizvoda većih dimenzija načinjenih od vrjednijih materijala. Ova vrsta tehnologije proizvodnje učinkovita je u smanjenju vremena proizvodnje od koncepta do samog proizvoda, uz istovremenu uštedu materijala te osiguranje slobode pri konstruiranju koje rezultira smanjenjem ukupne mase proizvoda. Također, ovu tehnologiju karakterizira kraće vrijeme obrade, savršena gustoća izratka, laka prilagodljivost različitim vrstama materijala te visoka sposobnost prilagodbe za automatizaciju. Posebno važnu ulogu u ovoj tehnologiji proizvodnje imaju aluminijske legure, pogotovo one sa većim iznosima čvrstoće koje su sve zastupljenije i korištenije u zrakoplovnoj i prijevozničkoj industriji. Zbog navedenih razloga u novije vrijeme sve više se ulaže u razvoj i istraživanja o aditivnoj tehnologiji žicom i električnim lukom. [8]

WAAM tehnologija bilježi rast zainteresiranosti kod više sektora industrije zbog njezine sposobnosti da proizvede proizvode kompleksnijih oblika te većih dimenzija, bez potrebe za korištenjem kompleksnih i skupih alata za provedbu, koristeći relativno jednostavnu i vrlo lako dostupnu opremu za zavarivanje te manipulatore. [2]

Vrste proizvoda za čiju proizvodnju je WAAM tehnologija najprikladnija su proizvodi srednjih do većih veličina > 400 mm te srednjih razina kompleksnosti. U zrakoplovnoj industriji postoji mnogo proizvoda ovakve vrste koji se dobivaju postupkom obrade odvajanjem čestica ili deformiranjem sa relativno visokim „*Buy to fly*“ omjerom (omjer mase

sirovca i konačnog proizvoda). Međutim, upravo je zrakoplovna industrija predložila da bi WAAM tehnologija bila alternativna tehnologija izrade traženih proizvoda kod koje bi se proizvodi izrađivali na skoro točne dimenzije, a kao završna obrada primijenila bi se obrada odvajanjem čestica koja bi osigurala točne dimenzije i željenu kvalitetu proizvoda. Ovaj način proizvodnje smanjio bi „*Buy to fly*“ omjer, smanjili bi se ukupni troškovi proizvodnje i vrijeme isporuke proizvoda. Na slici 4 prikazan je shematski prikaz WAAM proizvodnje proizvoda uz završnu obradu odvajanjem čestica. [8]



Slika 4. Shema WAAM + OOČ procesa [27]

Bilo kako bilo primjena ove tehnologije je još uvijek ograničena zbog prisutnih defekata nastalih nakon očvršćivanja proizvoda kao što su poroznosti i pukotine koji u konačnici dovode do smanjenja mehaničkih svojstava. Poroznost je glavni problem kod aluminijevih legura koje su podložne ovim pogreškama u zavarenim spojevima više od bilo kojeg drugog materijala. Ovo se događa iz razloga što prisutna koncentracija vodika prolazi kritičnu razinu potrebnu za razvoj mjehurića u materijalu zavara do koje najčešće dolazi zbog skraćenog vremena izlaska vodika iz zavara, tj. dolazi do prebrzog hlađenja ili odvođenja topline koje je karakteristično baš za ovaj materijal zbog visoke toplinske vodljivosti. [8]

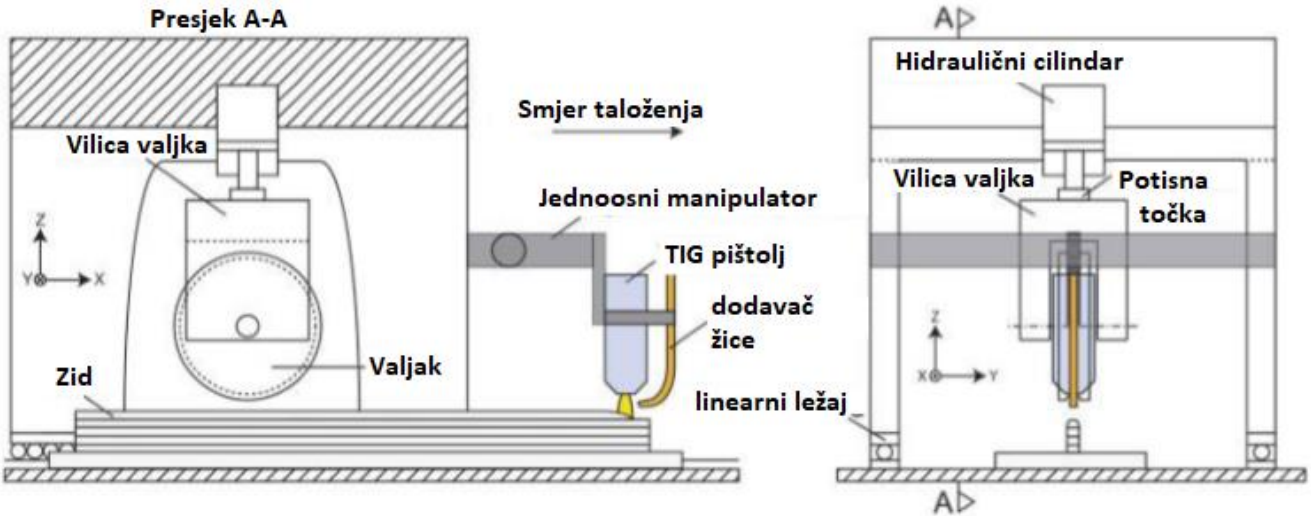
Osnovni sustav aditivne proizvodnje sastoji se od mehanizma koji omogućuje gibanje, izvora topline te sirovine. Kombinacija električnog luka kao izvora topline i žice kao sirovine naziva se WAAM te se ova vrsta tehnologije izrade proizvoda počela istraživati u svrhu aditivne proizvodnje od 1990 – tih godina, premda je prvi patent napravljen još davne 1925. godine. O WAAM tehnologija trenutno koristi standardnu opremu za zavarivanje koja se nudi na tržištu kao što su: izvor struje, pištolj te sistem dovoda žice za zavarivanje. Gibanje pištolja može se postići uporabom robotskih sistema ili računalnim numerički kontroliranim pokretnim postoljem (sustavima). Ovi strojevi prikazani su na slici 5.



Slika 5. Strojevi za ostvarivanje gibanja pištolja [8]

3.3. Problematika WAAM procesa

Kod provedbe WAAM tehnologije nailazi se na nekoliko problema korištenjem određenih materijala koje se nastoji riješiti. Naime, provedenim istraživanjima legura korištena za WAAM tehnologiju Ti-6Al-4V ponaša se anizotropno u slučaju vlačnih ispitivanja te produljenja. Istraživanja su pokazala da je vlačna čvrstoća veća kada je uzorak ispitivan na vlak u smjeru paralelnim sa smjerom taloženja dodatnog materijala dok je produljenje veće kada je uzorak ispitivan na vlak sa smjerom okomitim na smjer taloženja dodatnog materijala. Kako bi se riješio ovaj problem može se primijeniti okomito valjanje nataloženog sloja. Također, ovim postupkom površinski se oblikuje prethodno nataloženi sloj te se smanjuje variranje visine i njegova valovitost. Isto tako provedenim istraživanjima dokazano je da valjanje povoljno utječe na mikrostrukturu i na mehanička svojstva nataloženih slojeva, odnosno smanjuje se veličina zrna, sklonost zamoru materijala te se povisuje vlačna čvrstoća (oko 19 %) i granica razvlačenja (oko 26 %). Daljnji korak kod optimizacije svojstava nataloženih izratka postiže se kontroliranim hlađenjem odnosno određivanjem vremena predgrijavanja prethodno nataloženog sloja koje omogućuje znatnije smanjenje unutarnjih naprezanja. Na slici 6 prikazana je shema opreme za ovakav WAAM sustav koji uz sustav valjanja koristi i TIG postupak zavarivanja. [8]



Slika 6. Shema WAAM sustava taloženja i valjanja [8]

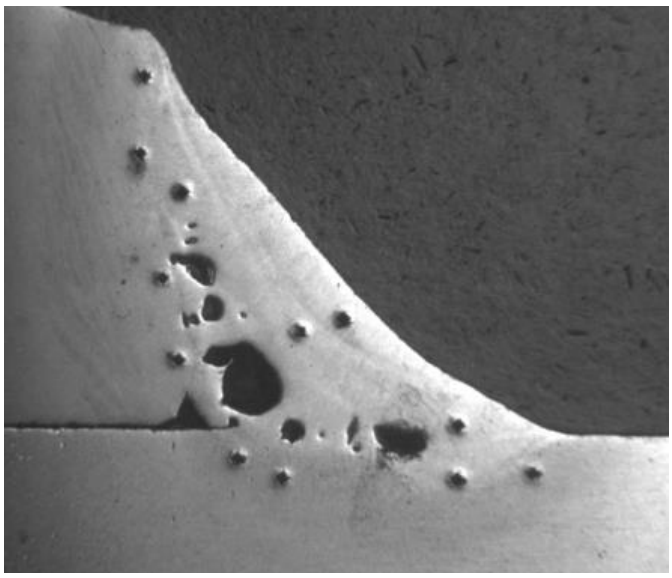
Kod korištenja aluminija kao materijala koji se taloži često se nailazi na problem visoke razine poroznosti. Poroznost je često ključan problem kod ostvarivanja željenih svojstava materijala. Još veći problem kod korištenja aluminija kao materijala koji se taloži je postizanje ponovljivosti identičnih ili sličnih svojstava. Ovaj problem komplicira kvalifikaciju komponenti i procesa, što u konačnici ograničuje komercijalnu primjenu WAAM postupaka. Kako bi WAAM postao komercijalno održiv postupak proizvodnje vrlo je važno razumjeti problem poroznosti, kontrolirati ga i svesti na prihvatljivu razinu. [9]

Postoji nekoliko mehanizama koji generiraju poroznost u aluminiju. Međutim, dominantan izvor ovog problema tijekom provedbe WAAM postupka i općenito postupka zavarivanja aluminija je stvaranje mjehurića vodika u materijalu tijekom njegovog skrućivanja što rezultira stvaranjem pora te u konačnici smanjenjem mehaničkih svojstava materijala. Do ovog problema dolazi zbog vrlo visoke razlike u topivosti vodika u aluminiju kad je on u krutom i tekućem agregatnom stanju. Ravnoteža topivosti vodika prikazana je kao 0,65 ml na 100 g u rastaljenom čistom aluminiju dok taj podatak za kruto stanje aluminija iznosi 0,034 ml na 100 g. Drugi mehanizam razvoja poroznosti je skupljanje materijala koje rezultira generiranjem pora nepravilnog oblika. Ovaj mehanizam javlja se zbog migracije vodika u praznine nastale u materijalu zbog volumenskih razlika u materijalu do kojih dolazi u krutom i tekućem stanju koje su posljedica Ostwaldovog zrenja. Također uz navedene glavne mehanizme, stvaranje poroznosti može proizaći i od drugih faktora kao što su brzina žice, brzina taloženja, prijenos materijala u električnom luku te mikrostruktura žice. [9]

Ovaj problem rješava se korištenjem adekvatne kombinacije kvalitetnih žica za zavarivanje te izvora energije (struje) kao i korištenje predgrijavanja materijala koje bi omogućilo dulje vrijeme hlađenja. Kao izvor struje često se koristi CMT impulsni postupak zavarivanja koji koristi nizak unos topline što doprinosi finijoj strukturi izratka te učinkovitog čišćenja sloja oksida na podlozi i s površine žice. [9]

Provedena istraživanja kod zavarivanja aluminija pokazala su da veći omjer brzine žice prema brzini zavarivanja omogućuju stvaranje i većeg broja poroznosti. Veći omjer brzine žice prema brzini zavarivanja rezultira također i većom količinom nataloženog materijala po jedinici duljine što u konačnici povećava veličinu zavara. Istim istraživanjima predložen je zaključak da veća veličina zavara ograničava sposobnost izlaska vodika iz zavara na njegovu površinu.

Međutim daljnjim istraživanjima koja su provedena koristeći omjer brzine žice i brzine zavarivanja veći od 25, dokazano je da se broj poroznosti smanjio. Ovakvi podaci pripisani su povećanom unosu topline korištenjem većih parametara zavarivanja koji su omogućili veća vremena hlađenja što za posljedicu ima veće vrijeme izlaska vodika iz zavara. Također zaključeno je da korištenjem većih brzina žice kod zavarivanja aluminija omogućuje veću razinu vodika prisutnu u zavaru što bi se moglo desiti i u slučaju aditivne proizvodnje žicom i električnim lukom korištenjem aluminija kao materijala koji se taloži. [9] Slika 7 prikazuje prisutne poroznosti u presjeku kutnog zavarenog spoja.



Slika 7. Izgled poroznosti u zavaru [11]

Nadalje, provedenim istraživanjima dokazalo se da sastav žice poprilično utječe na sadržaj vodika u zavaru, a samim time i na pojavu poroznosti. Sastav može već blago varirati od jednog koluta žice do drugog, makar je u specifikacijama žice navedeno da je sastav jednak. Dodatak magnezija, litija i cinka vrlo čistoj aluminijskoj leguri 1100 može povećati topivost vodika u čvrstom stanju dok dodatkom bakra ova topivost pada. Također dokazano je da na razinu poroznosti utječe i završna obrada žice koja rezultira nestabilnošću električnog luka tijekom procesa zavarivanja, a nestabilnost luka je u konačnici usko povezana sa pojavom poroznosti. [9]

Također, jedan od najvećih izazova kod WAAM sustava su algoritmi upravljanja koji su potrebni da bi nataložena geometrija u najvećoj mogućoj mjeri odgovarala traženoj te da se postigne strukturalni integritet taloženog dijela. Prema tome, potrebni su specifični sustavi za nadzor, kako parametara izrade, tako i nataložene geometrije sve s ciljem kako bi se izbjegle moguće komplikacije prilikom izrade određenog dijela. Kroz provedena istraživanja utvrđena je značajna veza između parametara zavarivanja i nataloženog sloja u WAAM tehnologiji, što nalaže i sama logika. Modificiranje nataloženog sloja omogućava prilagođavanje putanje alata, određivanje optimalnih parametara zavarivanja te njihovo ujedinjenje i usporedba sa putanjom taloženja dodatnog materijala. [10]

Gledano s druge strane, jedan od glavnih ograničenja ovog aditivnog procesa je značajna količina vremena za izradu dijelova, tj. za sam proces proizvodnje, a pogotovo se to odnosi na kompliciranije i veće dijelove. Stoga je vrlo važna, za daljnje poboljšanje učinkovitosti i djelotvornosti, kontrola procesa tijekom izrade proizvoda. Međutim ovaj dio je još uvijek premalo istražen. [10]

Osim Ti-6Al-4V i aluminija, za WAAM se uspješno primjenjuju materijali kao što su čelik, invar, mjed, bakar i nikal. Na svakom od navedenih materijala usredotočuje se na mehanička svojstva izrađenih dijelova te eliminaciju pogrešaka kao što su poroznosti.

3.4. Proizvodi WAAM tehnologije

Visina jednog nataloženog sloja WAAM tehnologije kreće se u granicama između 1 mm do 2 mm, a kao rezultat toga proizlazi valovitost (hrapavost) površine te se zbog ovog svojstva ne može dobiti konačan, tj. željen izgled proizvoda koristeći samo ovu tehnologiju već se mora primijeniti završna strojna obrada. Slika 8 prikazuje dio strukture krila zrakoplova napravljenog od strane inženjera iz Lancashirea WAAM postupkom izrade. [8]



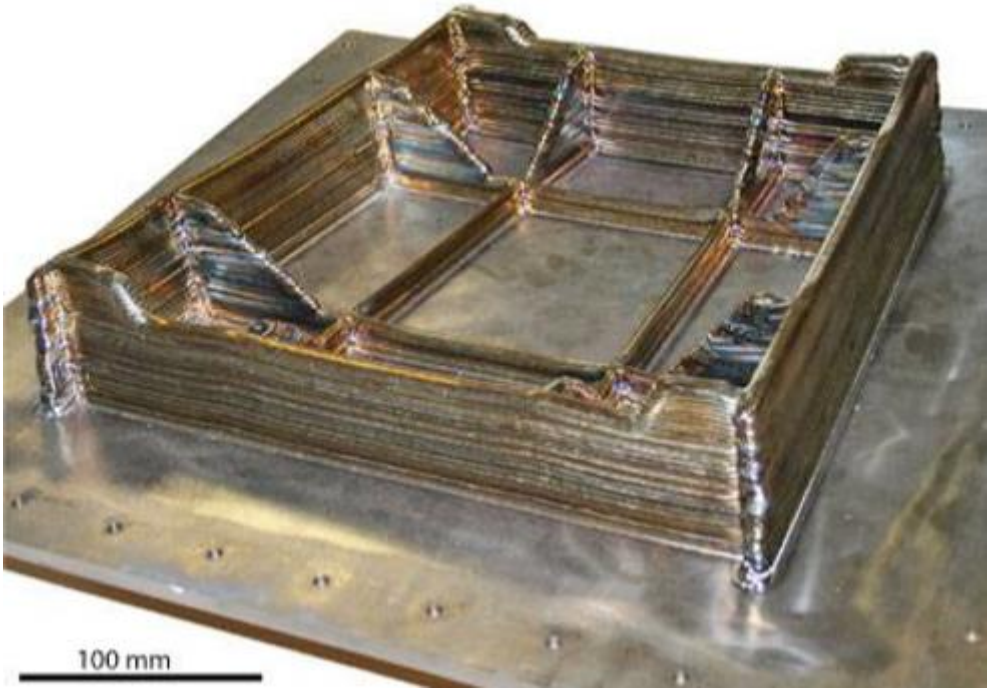
Slika 8. Dio strukture krila zrakoplova [8]

Dio je dugačak 1,2 metara a načinjen je od legure Ti-6Al-4V koja je nataložena po slojevima koristeći plazma elektrolučno zavarivanje na robotu sa sedam stupnjeva slobode gibanja. Izradak se sastoji od raznih ravnih i zakrivljenih bridova koji su okomiti na podlogu i spojeni T-spojem. Istodobno su izrađena dva dijela sa dvije različite strane podloge, naizmjeničnim taloženjem dodatnog materijala što je prikazano na slici 9. Brzina taloženja dodatnog materijala bila je 0,8 kg/h sa BTF omjerom 1,2. [8]



Slika 9. Način taloženja na ploču [8]

Na slici 10 prikazan je nosač kotača zrakoplova koji teži 24 kilograma i također je izrađen od legure Ti-6Al-4V. Dio je također izrađen brzinom taloženja od 0,8 kg/h sa svake strane podloge što daje najveću simetriju. Dio sadrži T-spojeve, križanja, okomite i blago zakrivljene podloge. Prilikom izrade ovog dijela ostvaren je BTF omjer od 1,2 čime je WAAM tehnologija omogućila konkretnu uštedu materijala veću od 220 kg. [8]



Slika 10. Nosač kotača zrakoplova [8]

Na slici 11 prikazano je krilo veličine 800 milimetara koje je izrađeno u suradnji sa jednom organizacijom koja se bavi istraživanjem zrakoplova, koja ima u cilju smanjiti vrijeme između puštanja u proizvodnju projektiranih površina (kao što je krilo) i prikupljanja podataka u zračnom tunelu. Postupak izrade krila proveo se uređajem Fronius CMT11 sa brzinom taloženja od 3,5 kg/h. Struktura krila je šuplja sve do svoje središnje točke kako bi se reducirala njegova masa što je također prikazano na slici 11 te je nakon završetka taloženja strojno obrađeno obradom odvajanjem česticama na točnost od 0,05 mm. [8]



Slika 11. Testno krilo izrađeno WAAM tehnologijom [8]

Slika 12 prikazuje konusnu posudu izrađenu također Fronius CMT11 postupkom, a brzina taloženja kretala se oko 2,6 kg/h. Parametri taloženja rezultirali su debljinom stjenke od 2,5 mm, što je malo više od ciljane debljine od 2,0 mm. BTF omjer iznosio je 1,25. [8]



Slika 12. Čelična konusna posuda izrađena WAAM postupkom [8]

3.5. Prednosti WAAM procesa

Uz već prije navedene prednosti WAAM tehnologije koja omogućuje uštedu vremena izrade i materijala potrebnog za izradu određenog proizvoda, ova tehnologija omogućuje i mnoge druge prednosti kao što su [8]:

- ne pretjerano skupa te vrlo fleksibilna oprema, sa kojom se mogu stvarati proizvodi od različitih vrjednijih materijala, uglavnom aluminij, titan i čelik,
- sloboda kod konstruiranja proizvoda, praktički bez ograničenja veličine proizvoda, tj. veličina predmeta ograničena je manipulatorom koji vodi pištolj za zavarivanje,
- relativno velik depozit dodatnog materijala koji se treba kretati u umjerenim brojkama (1 kg/h za titan i aluminij te 3 kg/h za čelik) jer se njegovim povećanjem povisuje i stupanj naknadne mehaničke obrade izratka,
- žica za WAAM tehnologiju jeftiniji je oblik sirovca,
- značajnija ušteda materijala (nizak BTF omjer),
- kraće vrijeme izrade proizvoda od 3D modela do gotovog proizvoda,
- povoljan proces za automatizaciju,
- niski troškovi proizvodnje.

3.6. Nedostaci WAAM procesa

Uz sve navedene prednosti WAAM procesa, treba navesti i nedostatke koje dotiče ova tehnologija izrade proizvoda, oni se najviše mogu pronaći kod usporedbe sa drugim procesima aditivne proizvodnje, a to su [12]:

- visok unos topline što dovodi do visokih zaostalih naprezanja i izobličenja,
- za dobivanje finalnog proizvoda uglavnom je potrebna završna obrada,
- preciznost i kvaliteta proizvoda niža je nego kod drugih aditivnih procesa,
- niska dimenzijska točnost otežava rekonstruiranje komada koristeći algoritme za optimizaciju geometrije,
- tehnologija nije primjenjiva za velikoserijsku proizvodnju,
- pojava poroznosti osobito kod zavarivanja aluminija,
- teško je postići ujednačenu geometriju na početku i na kraju prolaza.

4. CMT (Cold metal Transfer) ZAVARIVAČKI PROCES

„*Cold Metal Transfer*“ je modificirani MIG postupak zavarivanja koji se temelju na prijenosu materijala kratkim spojevima razvijen od strane Froniusa sa sjedištem u Austriji ne tako davne 2004. godine. Ovaj proces se razlikuje od standardnih MIG/MAG postupaka zavarivanja po načinu odvajanja kapljica dodatnog materijala. Proces osigurava odlična svojstva tijekom zavarivanja te vrlo visoku kvalitetu zavara, sa niskim unosom topline te stabilnim električnim lukom bez prskanja. [8]

Na slici 13 prikazan je standardan Fronius CMT uređaj koji se jedno vrijeme nalazio u Laboratoriju za zavarivanje, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.



Slika 13. Fronius CMT uređaj

Tijekom procesa zavarivanja, promjene temperature u zavaru i osnovnom materijalu imaju važan utjecaj na karakteristike materijala, na zaostala naprezanja kao i na točnost dimenzija i oblika zavarenih proizvoda. „*Cold metal transfer*“ omogućuje kontroliranu metodu taloženja dodatnog materijala te nizak unos topline na temelju inovativnog sustava dobave žice povezanog s digitalnom kontrolom brzine žice. Brzina dobave žice te kružni proces

uspostavljanja i prekidanja električnog luka kontrolirani su kako bi se ostvario točno potrebni unos topline za taljenje male količine osnovnog materijala te kako bi se odvojila kap dodatnog materijala tj. žice za zavarivanje. Postoje dvije glavne značajke CMT procesa, a to su: uspostavljanje kratkog spoja na određenom mjestu povezanog sa niskim strujama zavarivanja što omogućuje nizak unos topline te pojava kratkog spoja na stabilan i kontrolirani način. [13]

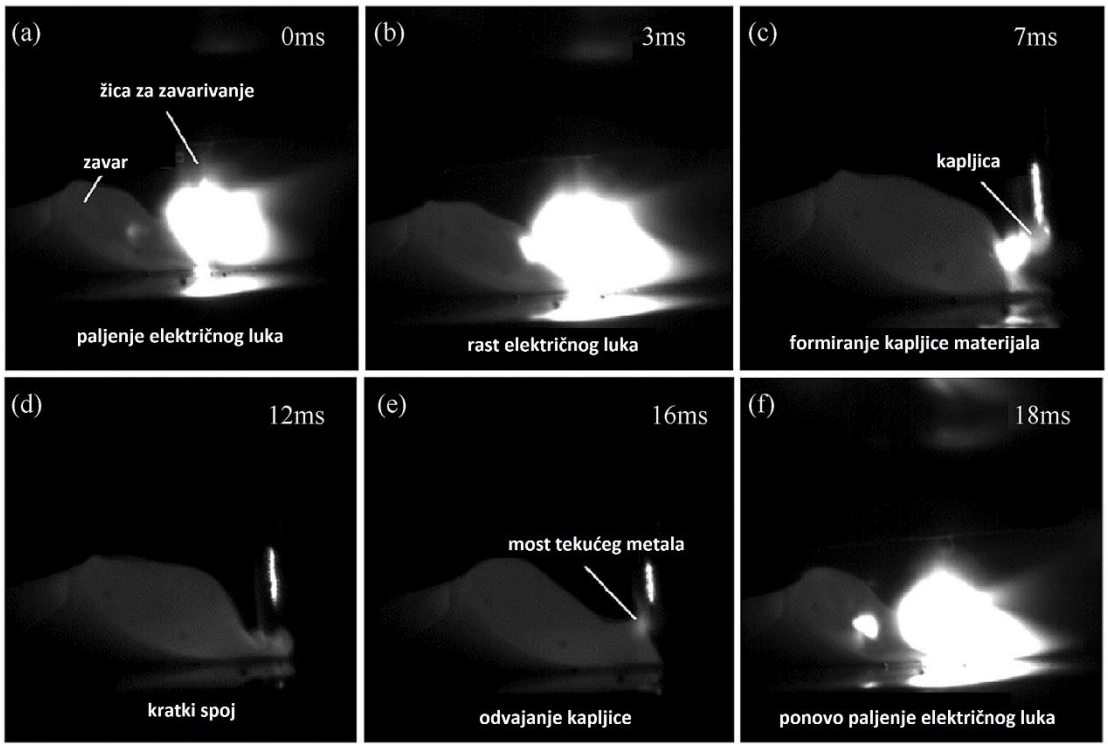
4.1. Princip rada CMT uređaja za zavarivanje

Princip rada CMT uređaja leži u digitalnom procesu prepoznavanja trenutka kada dođe do kratkog spoja nakon kojeg uređaj pomaže odvojiti kapljicu dodatnog materijala na način da uvuče žicu koja se tijekom zavarivanja kreće u jednom smjeru. Kao rezultat postiže se mali unos topline koji nastupa u vrlo kratkom vremenskom roku u trenutku kratkog spoja (kod paljenja luka). Kratki spoj je kontroliran, a struja zavarivanja se lako kontrolira i drži na niskim razinama što rezultira realizacijom procesa bez prskanja. Duljina električnog luka lako se detektira, a njezino podešavanje vrši se mehanički. Luk ostaje stabilan bez obzira na površinu obratka koji se zavaruje ili koliko iznosi brzina zavarivanja. Sve navedene prednosti idu u prilog činjenici da se CMT može koristiti svugdje i u bilo kojem položaju zavarivanja. Ovaj postupak omogućuje odličnu kvalitetu zavara, sa smanjenim unosom topline te prskanjem svedenim na minimalnu razinu.

Tipični CMT zavarivački ciklus odvija se u prosjeku od neki 20 ms, a cilj mu je odvajanje jedne kapljice dodatnog materijala. Analiza valnog oblika struje i napona bitna je za proučavanje raspodjele energije različitih faza u procesu odvajanja kapljica materijala, pa je zbog toga ciklus podijeljen na tri faze, a to su [13]:

1. Faza vršne struje – konstantan napon luka koji odgovara visokoj impulsnoj struji koja uzrokuje lakše paljenje električnog luka te se nakon toga dodatan materijal grije i formira kapljicu za odvajanje.
2. Faza pozadinske struje – odgovara nižim vrijednostima struje koja pada da bi se spriječilo grubo odvajanje kapljice metala žice, a ona traje sve do kad ne dođe do faze kratkog spoja.
3. Faza kratkog spoja – napon električnog luka sveden je na nulu, a u isto vrijeme povratni signal šalje se do dovoda žice koji nastoji osigurati blago uvlačenje žice. Također ova faza sudjeluje u lomu kapljice dodatnog materijala te u njezinom putu do mjesta taloženja.

Na slici 14 prikazan je CMT ciklus odvajanja jedne kapljice materijala.

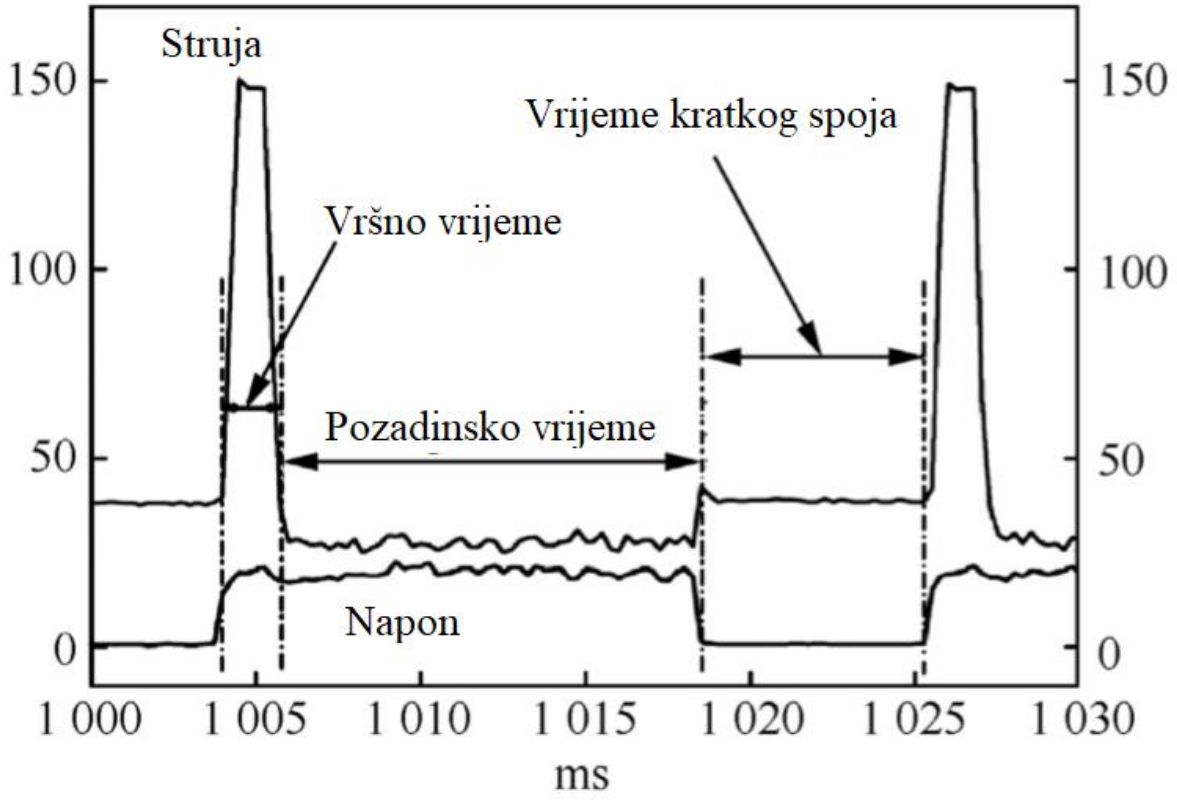


Slika 14. Prikaz jednog CMT ciklusa [13]

Kretanje žice odvija se na vrlo velikim frekvencijama što omogućuje taloženje oko 70 kapi dodatnog materijala u sekundi. Za postizanje ovakvog načina rada CMT sustava potreban je poseban pištolj za zavarivanje koji na sebi ima integriran dodatan sustav za kretanje žice koji potpomaže glavnom sustavu dobave žice koji se nalazi na izvoru struje. [8]

Postoji više CMT modela, kao što su: CMT-P, CMT-ADV i CMT-PADV. Slovo „P“ označava korištenje impulsne struje, „ADV“ označava zamjenu polariteta struje zavarivanja u fazi kratkog spoja CMT ciklusa, a „PADV“ opisuje razliku polariteta impulsnog ciklusa. [9] Provedenim istraživanjima konkretno za leguru aluminija s 6,3 % bakra zaključeno je da je najprikladniji postupak aditivne proizvodnje žicom i električnim lukom izvršeno CMT – PADV postupkom koji je osigurao odlična svojstva kod kontrole poroznosti u zavaru. Ključan faktor koji to omogućuje je nizak unos topline, fino zrnata struktura te efikasno čišćenje oksida žice. [13]

Složeni valni oblik struje zavarivanja u CMT procesu te uvlačenje žice za zavarivanje koji mehanički potpomažu taloženje dodatnog materijala čine teško razumljiv odnos između parametara zavarivanja, prijenosa materijala te prijelaza topline što je prikazano na slici 15. Tijekom prijenosa materijala struja zavarivanja pada blizu nulte vrijednosti, a to omogućuje izbjegavanje rasprskavanja. Čim je prijenos materijala završen, ponovo se pali električni luk, žica ponovo mijenja smjer sve do ponove pojave kratkog spoja. [13]



Slika 15. Odnos parametra CMT ciklusa [13]

5. ALUMINIJ

Aluminij je sjajan laki metal srebrno – bijele boje te je treći najzastupljeniji element u Zemljinoj kori s udjelom od oko 8 % odmah iza kisika i silicija. U prirodi se obično nalazi u obliku oksida, odnosno boksita. Boksit je smjesa aluminijem bogatih minerala (bemita i dijaspora, a katkad i hidrargilita), a od primjesa najviše ima silicijevih i željeznih oksida. Crveni boksiti sadrže 20 % – 25 % Fe_2O_3 i 1 % – 5 % SiO_2, a bijeli boksiti do 5 % Fe_2O_3 i do 25 % SiO_2. Da bi se ruda prevela u Al_2O_3 (glinicu), potrebno ju je očistiti od primjesa. To se vrši postupkom elektrolize. Aluminij je sastavni dio mnogih stijena, a gustoća mu iznosi 2,70 g/cm³. [14]

Najvažnije karakteristike aluminija su:

- Povoljan omjer čvrstoće i gustoće (specifična čvrstoća) omogućio je korištenje aluminija i njegovih legura kao tehničkih i konstrukcijskih materijala. Aluminij je 2,9 puta lakši od čelika, a njegovim legiranjem mogu se postići mehanička svojstva slična čeliku. Zbog ovih karakteristika najkorišteniji je materijal u zrakoplovnoj industriji. [15]
- Iako spada u grupu neplemenitih materijala zbog oksidnog sloja postojanog na površini pokazuje vrlo veliku otpornost prema utjecaju korozivnih tvari kao što su voda, dušične kiseline, mnoga organska otapala te atmosferski utjecaji. Oksidni sloj je vrlo otporna tvar koja se ne ljušti, ima znatno veću temperaturu taljenja od samog aluminija (2050 °C) te posjeduje sposobnost samo regeneracije, a debljina mu iznosi oko 0,01 μm. [16]
- Kao vodič električne energije ima svojstva bliska bakru (Cu), no kod jednake mase vodljivost mu je dvostruko veća. Zbog toga se najviše koristi kao vodič struje na velike udaljenosti – dalekovodi. [14]
- Vrlo dobar vodič topline (toplinska vodljivost 13 puta veća nego kod nehrđajućeg čelika); za čisti aluminij vodljivost iznosi 240 $Wm^{-1}\,°C^{-1}$, a za Al - legure između 117 $W\,m^{-1}\,°C^{-1}$ i 155 $W\,m^{-1}\,°C^{-1}$. [17]
- Nije magnetičan metal, pogodan za strojnu obradu sa visokim reflektivnim svojstvima te dobrim mogućnostima reciklaže.
- Lošija zavarljivost i oblikovljivost od čelika te svojstvo omekšavanja na mjestu zavarenog spoja, sklonost vrućim pukotinama u većoj te hladnom pukotinama u manjoj mjeri. [15]

5.1. Primjena čistog aluminija

Obzirom na navedena svojstva primjena čistog aluminija može se svesti na [18]:

- posude, aparati i rezervoari za transport u kemijskoj i prehrambenoj industriji,
- metalni proizvodi široke potrošnje te kuhinjsko posuđe,
- u građevini kod izrade krovova kao žlijebovi i ukrasi,
- ambalaža, folije, tube, limenke i cjevčice,
- za električne vodiče.

Međutim zbog lošijih mehaničkih svojstava uporaba aluminija je u glavnini samo sa legurama, a njegova primjena kao čistog materijala najčešće se spominje kad je najvažnije svojstvo antikorozivnosti. [18]

5.2. Legure aluminija i magnezija (AlMg)

Mehanička svojstva aluminija značajno se razlikuju obzirom na njegove legirne elemente, pa tako se razlikuju dvije osnove grupe, a to su:

- Al – legure bez strukturnog očvršćivanja, tzv. „nekaljive legure“: Al Mn, Al Mg Mn, Al Mg.
- Al – legure sa strukturnim očvršćivanjem, tzv. „kaljive legure“: Al Cu Mg, Al Mg Si, Al Mg Si, Al Zn Mg, Al Li Cu Zr, Al Li Cu Mg Zr.

Kad je u pitanju praktična primjena aluminijevih legura najvećim dijelom se koriste prešani (ekstrudirani) i valjani proizvodi, a zatim lijevani i kovani. Kod legura bez strukturnog očvršćivanja, ono se postiže kombinacijom efekta dodavanja legirnih elemenata (Mn, Si, Mg, Fe i drugih), hladnom plastičnom deformacijom i žarenjem. Ovim kombinacijama dobivaju se željene kombinacije mehaničkih svojstava od mekog stanja s minimalnim mehaničkim vrijednostima i maksimalne plastičnosti do tvrđih stanja s maksimalnom čvrstoćom i granicom razvlačenja te minimalnom plastičnosti.

5.2.1. Kemijski sastav AlMg legura

Legure aluminija sa magnezijem (5000) kao osnovni legirajući element sadrže magnezij čiji sadržaj se obično kreće od 0,5 % pa sve do 12 – 13 %, a ponekad se dodaje i mangan te krom. Legure s nižim sadržajem magnezija imaju najbolja svojstva oblikovanja, dok one sa višim udjelom magnezija sadrže svojstva dobre livljivosti te viših vrijednosti čvrstoća. Također, treba reći da se radi zadovoljavanja dobrih antikorozivnih svojstava sadržaj željeza i silicija nastoji osigurati u određenim granicama te im je sadržaj manji nego kod nekih drugih aluminijevih legura iako se ponekad one dodaju kako bi se povisila temperatura reklistalizacije. Silicij poboljšava fluidnost legure, dok se krom i mangan dodaju kako bi se smanjilo korozijsko djelovanje željeza u leguri. Silicij nema nikakav utjecaj na antikorozivna svojstva ali poboljšava livljivost i čvrstoću. [19]

Kod ranijih eksperimenata u AlMg legure dodavao se antimon, a njegovim oksidima pripisivala se otpornost na koroziju u morskoj vodi, ali su kasnija istraživanja pokazala suprotno. Titan te kombinacija titana i bora često se dodaju kao usitnjivaći zrna dok se berilij, a ponekad i litij dodaju za smanjenje oksidacije magnezija kod visokih temperatura, pogotovo u rastaljenom stanju. Olovo se dodaje kako bi se poboljšala svojstva obradivosti odvajanjem čestica, navodno bez utjecaja na čvrstoću te na otpornost prema koroziji. Tablica 1. prikazuje legirni sastav standardnih AlMg legura. [19]

Tablica 1. Kemijski sastav AlMg legura [19]

Legirni element	Udio u leguri	Legirni element	Udio u leguri
Mg	0,5 – 13 %	**Zn**	≤ 3 %
B	≤ 0,05 %	**Li**	≤ 3 %
Si	≤ 2 %	**Cr**	≤ 0,5 %
Ni	≤ 0,5 %	**Zr**	≤ 0,5 %
Fe	≤ 0,8 %	**Ti**	≤ 0,2 %
Be	≤ 0.01 %	**Mn**	≤ 2 %
Cu	≤ 0,2 %	-	-

5.2.2. Mehanička svojstva AlMg legura

Magnezij kao legirni element kod AlMg legura ključan je faktor u kontroli mehaničkih svojstava, međutim tome pridonose i svi drugi legirni elementi kojih je količinski manje. Tablica 2 prikazuje svojstva legure u ovisnosti sa kemijskim sastavom. Toplinska obrada ne daje značajnija poboljšanja čvrstoće, dok kod odljevaka, kontrola taline i naknadno prirodno starenje uvelike povećavaju vrijednosti istezanje (A, %). [19]

Tablica 2. Mehanička svojstva AlMg legura [19]

Legura Al	Uvjeti	Tvrdoća, HV	R_m, MPa	$R_{p0.2}$, MPa	Istezanje A, %
0,5 – 1,5 % Mg	Žareno Popušteno	25 – 35 60 – 80	100 – 150 200 – 300	40 – 80 150 – 250	20 – 40 5 – 15
1 % Mg, 1 % Mn	Žareno Popušteno	35 – 50 65 – 90	150 – 200 250 – 350	50 – 100 200 – 300	20 – 30 5 – 8
2 – 3 % Mg, 0 – 2 % Zn	Pješčani lijev Tlačni lijev Žareno Popušteno	50 – 60 50 – 70 40 – 55 65 – 90	150 – 200 170 – 220 150 – 250 250 – 350	50 – 100 70 – 150 80 – 150 200 – 300	3 – 7 3 – 8 25 – 35 6 – 15
5 – 7 % Mg	Pješčani lijev Tlačni lijev Žareno Popušteno	50 – 60 60 – 80 60 – 80 80 – 100	150 – 200 200 – 300 250 – 350 400 – 500	70 – 150 100 – 200 120 – 250 250 – 350	4 – 10 5 – 12 20 – 30 10 – 15
8 – 12 % Mg	Pješčani lijev Tlačni lijev Žareno Popušteno	70 – 90 75 – 90 80 – 100 90 – 110	150 – 300 200 – 350 350 – 500 450 – 600	100 – 200 100 – 250 150 – 300 300 – 400	3 – 8 5 – 10 10 – 25 5 – 15

Svojstva dobivena u legurama s 4 % – 5 % Mg i 1 % – 3 % litija nakon toplinske obrade jednaka su svojstvima samo legiranjem sa 5 % – 7 % Mg. U kovanim izradcima veličina zrna slabo utječe na čvrstoću. Svojstva kovanih izratka u određenoj mjeri ovise o kvaliteti kalupa u koji se lijeva. Visoko tlačni ljevovi ovih legura mogu sadržavati identična svojstva kao i kovani izradci. Legure koje sadrže više od 5 % magnezija rijetko se koriste u hladom stanju jer mogu biti podložnije napetosnoj koroziji. Modul elastičnosti pada povećanjem sadržaja magnezija, ali raste dodavanjem većine drugih legirnih elemenata. Povećanjem sadržaja magnezija isti se smanjuje. Otpornost prema zamoru materijala raste proporcionalno sa čvrstoćom. [19]

Promjenom temperature mehanička svojstva AlMg legura mijenjaju se identično kao i kod svih drugih aluminijskih legura. Niže temperature uzrokuju rast čvrstoće i otpornost na zamor sa malim padom duktilnosti i udarnog rada loma. Kod viših temperatura pada vrijednosti čvrstoće, otpornost na zamor materijala je znatno manje izražena nego kod drugih aluminijevih legura, pa se zbog tih dobrih svojstava na višim temperaturama znaju koristiti za izradu klipova motora kod automobila. Ipak, dugotrajno izlaganje višim temperaturama dovodi do smanjenja čvrstoće. [19]

Tlačna čvrstoća je približno jednaka vlačnoj, dok smična čvrstoća iznosi od 70 % do 80 % vlačne čvrstoće. Udarni rad loma najmanji je kod lijevanih proizvoda, osobito kod legura sa visokim udjelima magnezija dok su najviše vrijednosti udarnog rada loma zabilježili kovani proizvodi sa nižim udjelima magnezija. [19]

Modul elastičnosti smanjuje se povećanjem udjela magnezija, međutim raste dodatkom većine drugih legirnih elemenata. Konačni rezultat ponovo ovisi o udjelu legirnih elemenata no kod većine legura sa 5 % do 6 % magnezija blago se razlikuje od vrijednosti za čisti aluminij dok za veće udjele magnezija postižu se nešto niže vrijednosti. [19]

Otpornost na puzanje relativno je visoka, ali u znatnoj mjeri ovisi o raspodjeli legirnih elemenata u proizvodu. Lijevane legure imaju iznimno visoku otpornost na puzanje, ali ne zahvaljujući magneziju nego radi udjela Al_2O_3. Trenje i otpornost na trošenje padaju sa povećanjem udjela magnezija. [19]

Silicij u normalnim količinama prisutan u AlMg legurama ($\leq$ 2 % Si) blago smanjuje duktilnost i udarni rad loma bez uzajamnog povećanja čvrstoće. Kada se u leguri nalaze veće količine silicija kako bi se povećala livljivost to značajnije smanjuje svojstva duktilnosti, dok otpornost na puzanje uglavnom ostaje ne promijenjena. Željezo ima ograničeni učinak na čvrstoću kod AlMg legura sa nižim sadržajem magnezija. Kod legura sa višim sadržajem magnezija općenito je prisutno kao grublji kristal koji smanjuje duktilnost, udarni rad loma te otpornost na puzanje. [19]

Mangan i krom imaju učinak očvršćivanja sa smanjenjem duktilnosti kod legura sa nižim udjelima magnezija zbog toga što imaju sposobnost topivosti u matrici, međutim kod legura sa višim udjelima magnezija njihova topivost se smanjuje, a veličina čestice postaje grublja.

Također, količina koja proizvodi primarne kristale pada. I mangan i krom blago povećavaju svojstva legure kod niskih temperatura te otpornost na puzanje. [19]

Bakar u količinama u kojima se obično nalazi u AlMg legurama ima mali ili nikakav utjecaj na mehanička svojstva. Udio cinka u leguri od 1,5 % do 2,0 % neznatno povisuje čvrstoću sa malim ili gotovo nikakvim utjecajem prema otpornosti na puzanje. Cerij, titan, molibden, vanadij i cirkonij nemaju izravan utjecaj na svojstva čvrstoće međutim određeno povećanje tvrdoće i udarnog rada loma može se pojaviti radi usitnjenja zrna te dovesti do povećanja temperature rekristalizacije koje oni potiču. [19]

Otpornost na koroziju vrlo je visoka kod svih AlMg legura. Učinak antikorozivnosti smanjuju jedino nečistoće koje su prisutne u leguri u ograničenim količinama i njihov utjecaj je uglavnom zanemariv. Prema tome legure imaju odlična antikorozivna svojstva kod normalne izloženosti u vodovodnoj vodi i vodenoj pari, u morskoj vodi i morskoj atmosferi te u mnogim kemikalijama. [19]

5.2.3. Primjena AlMg legura

Ovaj tip legura sadrži prosječna mehanička svojstva, dobro se zavaruju i imaju znatno poboljšana mehanička svojstva kod niskih temperatura. Kako sadržaj magnezija u leguri raste vrlo su postojani u morskoj atmosferi dok je oblikovljivost dobra, ali pada. Primjena ovih legura pronalazi široku primjenu u koju spadaju:

- građevinarstvo, brodogradnja,
- uređaji za desalinizaciju morske vode,
- različite posude te cisterne za transport, rezervoari i spremnici,
- zrakoplovna, automobilska i željeznička industrija.

6. INDUSTRIJSKI ROBOTI ZA ZAVARIVANJE

Gotovo sve trenutno postojane industrije bilježe tendenciju rasta uporabe neke vrste robota. Roboti bilježe rast upotrebe jer omogućuju stvaranje konkurentnije te masovnije proizvodnje. Uz mogućnost automatizacije i povećanja dnevne norme izvršenog posla, uporaba robota u industriji i proizvodnji nudi i širok spektar ostalih pogodnosti kao što su ujednačena i stalno visoka kvaliteta proizvoda, dugoročna isplativost i zamjena ljudi u teškim, monotonim pa čak i opasnim poslovima za čovjeka.

6.1. Počeci primjene robota za zavarivanje

Roboti za zavarivanje definiraju se kao automatizirani zavarivački strojevi s više od 3 stupnja slobode gibanja računalom upravljani koji imaju mogućnost učenja i programiranja, dok je pojam industrijski robot određen ISO standardom 8373 kao uređaj s automatskom kontrolom, reprogramirljiv, višenamjenski manipulator s tri ili više osi tj. stupnjeva slobode gibanja. [20, 21]

Prva uporaba takozvanih „zavarivačkih robota“ pojavila se tridesetih godina 20. stoljeća u Americi kod izrade čeličnih brodova. Ovakvi strojevi posjedovali su uređaje za automatsko dovođenje žice do mjesta zavara, nešto slično kao današnji uređaji za MIG/MAG zavarivanje. Zavarivačka glava bila je postavljena na kolica koja su imala promjenjivu brzinu kretanja, odnosno brzinu zavarivanja. Razvojem senzora i računala omogućen je i razvoj te automatizacija procesa zavarivanja. Razvijene su komponente koje su omogućile bilježenje i praćenje parametara zavarivanja te predviđanje pogrešaka uz prethodno uklanjanje mogućih uzroka. 1996. godine u Japanu je prvi puta postignut nivo automatizacije od 44 % i stupanj robotizacije od 23 % u proizvodnji automobila i strojeva. [21]

Počeci primjene robota u zavarivanju bili su kod zavarivačkih procesa sastavljenih od većeg broja jednakih ili sličnih postupaka koji su ujedno i pogodni za automatizaciju. Roboti se koriste za ponovljive procese ili slične dijelove koji za zavarivanje zahtijevaju više od jedne osi ili gdje je pristup dijelovima težak.

6.2. Opće značajke robota

Da bi se dosegnula bilo koja točka u prostoru potreban je robot koji posjeduje slobodu gibanja u tri osi. Radi ostvarivanja potpune kontrole nad vrhom manipulatora (npr. pištolj zavarivanje), potrebno je ostvariti njegovu rotaciju u još tri osi. Time se dobiva robot ili robotska ruka sa ukupno šest stupnjeva slobode gibanja koji u konačnici diktiraju i cijenu samog stroja. Slijedeće točke navode opće značajke robota [20]:

- Stupnjevi slobode – obično ih označavaju broj i vrsta osi, što je više stupnjeva slobode gibanja robot je skuplji, ali i teži za upravljanje.
- Radni prostor – skup svih točaka u prostoru koje robot može dosegnuti.
- Struktura robota – opisuje vrste članova koji određuju moguća gibanja robota. Vrste struktura dijele se na kartezijevu, cilindričnu, kvazicilindričnu, sfernu i rotacijsku.
- Nosivost robota – nosivost robota koju robot može ostvariti bez hvataljke, a stvarna nosivost uz dodatak hvataljke uvelike ovisi i o udaljenosti na koju predmet treba odložiti.
- Brzina – opisuje vrijeme potrebno da robot pozicionira izvršni (alatni) koordinatni sustav u željenu poziciju.
- Preciznost – opisuje s kojom točnošću se robot pozicionira u željenu poziciju.
- Ponovljivost – opisuje sa kolikom preciznošću se robot vraća u programiranu poziciju.
- Kontrola kretnji – opisuje vrste kretanja robota (kontinuirani ili diskretni pomaci).
- Vrsta pogona – vrste motora za pogon robota i aktuatora u zglobovima robota.
- Prijenos – postoje direktni spojevi na zglobove i preko mjenjačkih mehanizama.
- Popustljivost – značajka koja opisuje manje promjene položaja kod većih opterećenja robota.
- Način upravljanja i programiranja.

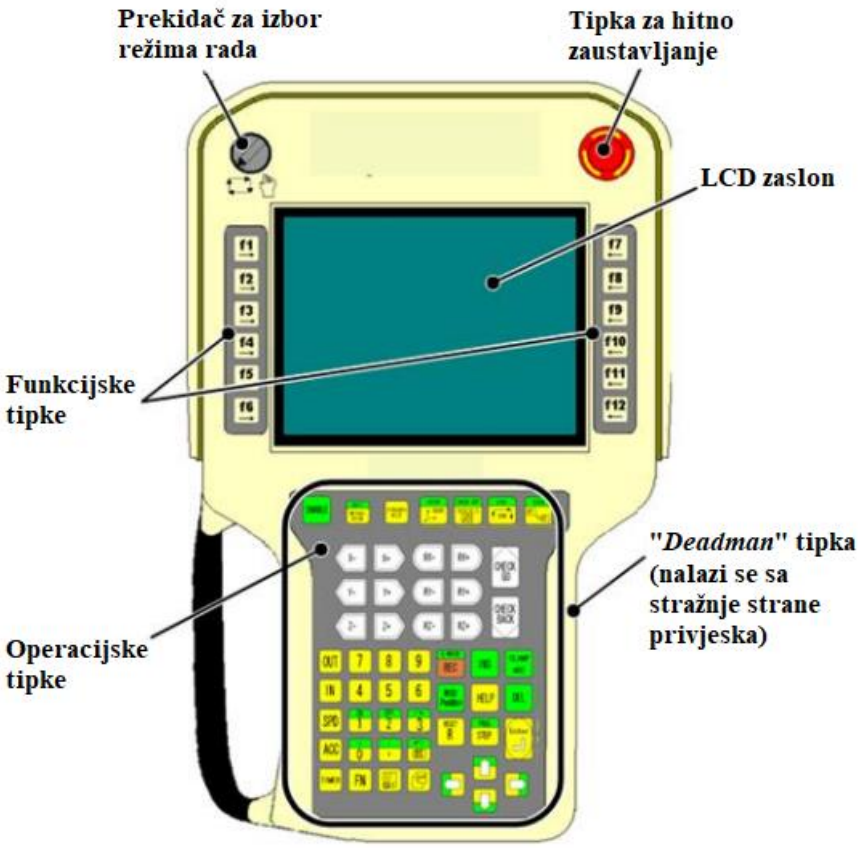
6.3. Metode programiranja robota

Pod pojmom programiranje robota smatra se definiranje zadatka robota, tj. kod robota za zavarivanje, definiranje željenog gibanja u njegovom radnom prostoru. U industrijskoj primjeni razlikuju se dvije osnovne metode programiranja, a to su *on – line* programiranje i *off – line* programiranje. *On – line* programiranje traži manju stručnost osoblja koje rukovodi robotom dok *off – line* programiranje robota zahtjeva popriličnu stručnost i obuku rukovodioca robota zbog toga što je nužno poznavanje određenih programskih alata. [20]

6.3.1. *On – line* programiranje robota

On – line programiranje robota (engl. *Teach – in*) naziva se još i metoda „učenja“ robota kako bi on izvršio određeni zadatak. Ova vrsta programiranja vrši se od strane obučene osobe, tj. operatera na samom radnom mjestu, na način da se robot provede kroz željene korake rada te se memoriraju željene točke u radnom prostoru i po tome se određuje putanja robota, uz definiranje parametara pojedinih točaka, kako bi se odredila brzina i način kretanja robotske ruke. Komunikacija operatera sa robotom vrši se pomoću privjeska za učenje (engl. *Teaching pandant*), a na slici 16 prikazan je jedan ovakav privjesak. Iako je ova metoda relativno jednostavna i vrlo raširena te ne zahtjeva preveliku obuku operatera ona ima i svojih mana. Određivanje preciznih i točno željenih položaja robota relativno je zahtijevan zadatak koji iziskuje iskustvo i vrlo visoku pozornost operatera. Sam robot pohranjuje nekoliko koordinatnih sustava koji mu omogućuju ostvarivanje različitih kretnji pa zbog toga i sam operater mora pratiti koordinatni sustav robota i njegove kretnje kako ne bi došlo do kolizije sa radnim komadom. Ovdje još treba napomenu da kod postizanja određenih putanja robota može doći do određenih fizičkih ograničenja, tj. nemogućnosti da se robot dovede u željenu poziciju (engl. *Dead Zone*). [20]

Nakon što se zabilježe sve točke po kojima je proveden robot u svome radnome prostoru, vrlo je važno da se prije izvršenja programa izvrši provjera njegovih kretnji, a nakon toga ako je u pitanju robot za zavarivanja i pusti napravljeni program bez uporabe električnog luka, čisto da se osigura željena točnost programa, sigurnost operatera, radnog komada, opreme i robota. [20]



Slika 16. Privjesak za *on-line* programiranje [22]

6.3.2. *Off – line* programiranje robota

Ova vrsta programiranja robota ne vrši se na radnom mjestu robota i nije ovisna o njemu. Najčešći alat potreban za ovakav način programiranja je računalo, a svi parametri kretanja robota te parametri zavarivanja ako se radi o robotu za zavarivanje kodiraju se u nekom od programskih jezika kao su „*Delmia"* i „*ABB RobotStudio"* te ne zahtijeva isključenje robota iz procesa proizvodnje već robot može nesmetano raditi po starom programu, sve do kad se u njegovu upravljačku jedinicu ne ubaci novi program. Metoda se zasniva na bazama podataka koje sadrže informacije o korištenom robotu, pozicioneru i drugoj potrebnoj opremi. Prednosti ove metode su već spomenuto ne izdvajanje robota iz proizvodnog procesa, brzina i točnost programiranja naročito kod programa i putanja alata za izradu kompleksnijih proizvoda dok je jedan od nedostataka moguća kolizija sa radnim komadom zbog smanjene kontrole putanje alata, tj. ne mogućnost provjere sa sigurnošću kao što to nudi on-line programiranje.

7. Eksperimentalni dio

Zadatak eksperimentalnog dijela rada bio je primjenom robotiziranog zavarivanja izraditi više ispitnih uzorka od aluminijevih legura serije 5xxx koristeći CMT postupak i konvencionalni postupak zavarivanja. Na gotovim uzorcima određeni su parametri teksture površine sukladno normi HRN EN ISO 25178 te je na njima izmjerena tvrdoća po Vikersu (HV10). Na posljetku je ispitan kemijski sastav uzoraka te je ispitana korozijska postojanost uzoraka u obrađenom i neobrađenom stanju. Za sva ispitivanja provedena je i komparativna analiza rezultata ispitivanja te je u zaključku ocijenjena primjenjivost CMT postupka za aditivnu proizvodnju aluminijevih legura žicom i električnim lukom. Eksperiment je proveden u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

7.1. Opis eksperimenta

Eksperimentalni dio proveden je u tri dijela, a to su:

- priprema i stezanje podloge za nanošenje zidova
- izrada WAAM zidova od aluminijevih legura
- izrezivanje uzorka iz zidova i njihovo ispitivanje.

Priprema podloge za WAAM zidove uključivala je pritezanje podloge stegama i čeličnim uporištima kako bi se osiguralo usidrenje aluminijske podloge zbog velikih deformacija i naprezanja koje se javljaju prilikom zavarivanja aluminija. Nakon učvršćivanja ploče izvršeno je čišćenje i uklanjanje sloja aluminijevih oksida, netom prije početka izrade zida, radi lakšeg uspostavljanja električnog luka na ploči i postizanja kvalitetnijeg prvog prolaza. Također prije početka izrade uzoraka izvršeno je zagrijavanje čelične radne ploče plamenom na koju se postavljala aluminijska podloga radi visokog koeficijenta toplinske vodljivosti kojeg posjeduje aluminij koji bi bez prethodnog zagrijavanja ploče omogućio brzi odvod topline sa aluminija na čelik. Prije početka izrade uzorka po podlozi su ostvareni navari od 6 prolaza koji su dodatno ustaliti temperaturu cijele podloge. Tijekom izrade uzoraka nastojala se osigurati međuprolazna toplina od oko 130 °C.

Nakon učvršćivanja ploče slijedio je početak izrade WAAM uzoraka. Prvobitno su određeni optimalni parametri zavarivanja za obje korištene aluminijeve legure. Nakon određivanja optimalnih parametara krenulo se na izrađivanje zidova. Bilo je potrebno izraditi zidove

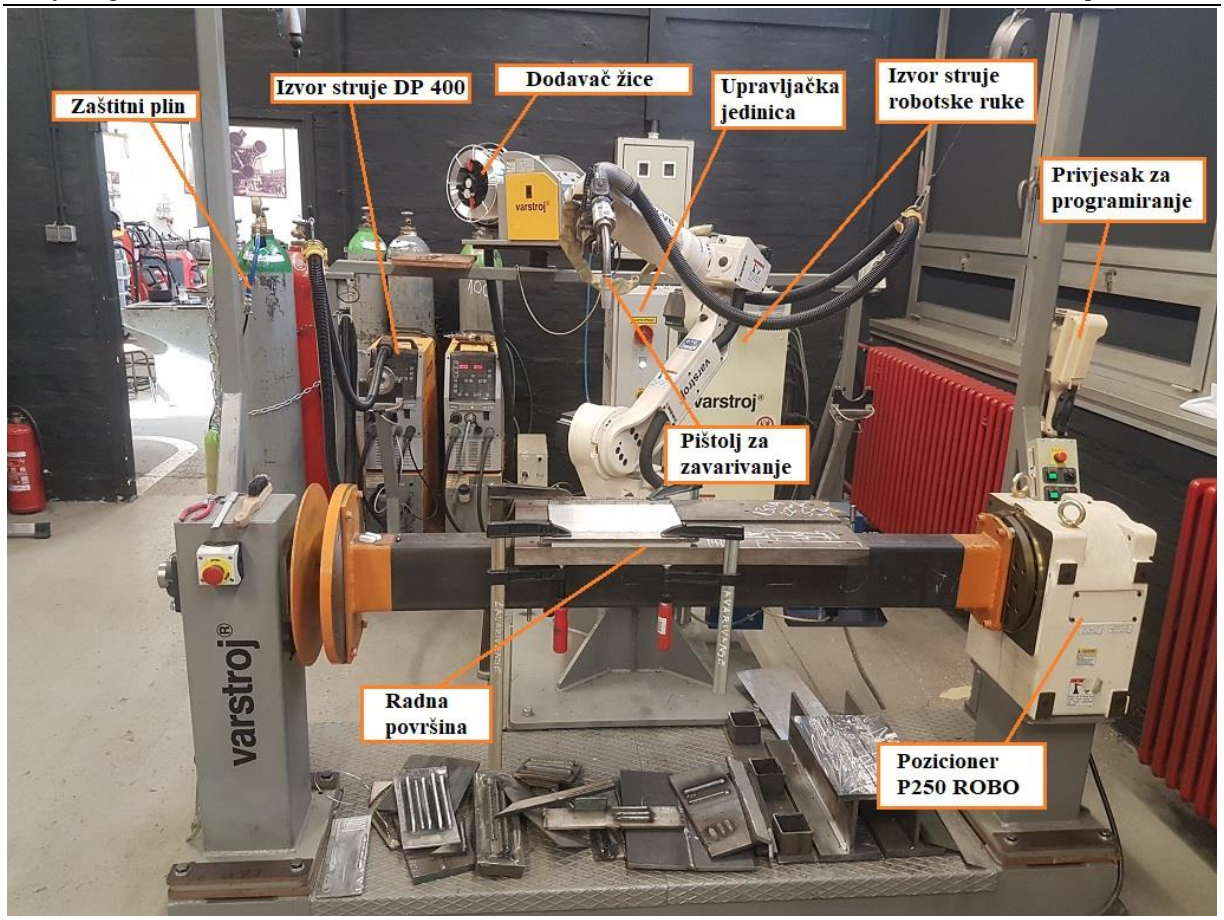
visine 50 mm, duljine 300 mm i širine od 6 mm do 9 mm prvo konvencionalni postupkom zavarivanja, a nakon toga i CMT postupkom zavarivanja. Tijekom izrade zidova mjerene su geometrijske značajke slojeva te je kontrolirana međuprolazna temperatura.

U posljednjem dijelu eksperimentalnog rada, koji je ujedno bio i najopširniji izvršeno je ispitivanje uzoraka. Najprije su izrezani uzorci duljine od 20 mm za izradu makro i mikro uzoraka, zbog čega ih se trebalo ispolirati i nakon toga promatrati ih na mikroskopu. Od ostatka zida izvršeno je 3D skeniranje svakog od izrađenih zidova (njih 4), izvršeno je mjerenje njihovih kemijskih sastava te na posljetku je sam zid odvojen od podloge te su izrađeni približno jednaki uzorci koji su korozijski ispitani u mehanički obrađenom i neobrađenom stanju. Na posljetku je izvršena njihova usporedba.

7.2. Oprema za zavarivanje

Za izradu zidova korištena je robotska stanica Almega OTC AX V6. Glavni dijelovi ovog robota su robotska ruka sa 6 stupnjeva slobode gibanja koja na sebi ima pištolj za zavarivanje te privjesak za *on-line* programiranje robota. Programiranje se vrši definiranjem putanji gibanja te bilježenjem željenih pozicija zavarivačkog pištolja.

Uz navedena dva dijela, ovaj robot sadrži i *shock* senzor koji služi za sprečavanje značajnijih oštećenja ako bi došlo do kolizije robota s nekim od elemenata iz okoline, uređaje za rezanje žice, čišćenje sapnice te nanošenje sredstva protiv naljepljivanja kapljica. Tu je dodatni izvor struje za TIG postupak zavarivanja te elektrolučni senzor AX-AR. Slika 17 prikazuje spomenuti robot te su na slici navedeni svi njegovi dijelovi.



Slika 17. Robotska stanica Almega OTC AX V6

Na slici 18. a) prikazani su privjesak za programiranje te izgled programa za izradu jednog prolaza, a slikom 18. b) izgled prvog izvedenog prolaza na ploči.





Slika 18. a) Izgled programa **Slika 18. b) Početni prolaz**

Za izradu uzoraka 2 i 5 korišten je izvor struje za zavarivanje OTC Daihen DP 400, a u tablici 3 prikazane su njegove karakteristike. Ovaj izvor struje omogućuje konvencionalno i impulsno MIG i MAG zavarivanje te REL zavarivanje obloženim elektrodama.

Tablica 3. Karakteristike izvora struje DP 400

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

Fronius TPS 400i CMT korišten je za izradu uzoraka 5 i 6. CMT uređaj obrađen je u teorijskom dijelu rada, a njegove karakteristike navedene su u tablici 4.

Tablica 4. Karakteristike izvora struje TPS 400i CMT

IZVOR STRUJE		**TPS 400i CMT**
Priključni napon, V/Hz		3 x 400 / 50
Područje struje zavarivanja, A		3 – 400
Područje napona zavarivanja, V		14,2 – 34
Intermitencija, A	100 %	360
	40 %	500
Promjer žice za zavarivanje, mm		0,8 – 1,2
Masa, kg		45
Dimenzije (D × Š × V), mm		710 × 300 × 550

Podloga koja se koristila kao osnovni materijal bila je također aluminijeva legura. Dimenzije podloge iznosile su : 300 mm x 200 mm x 10 mm.

7.2.1. Dodatni materijal za izradu zidova

Za izradu uzorka 2 i 6 korištena je puna žice AlMg5, poprečnog presjeka 1,2 mm. Po AWS-u ova žica ima oznaku A 5.10: ER 5356. Ova vrsta žice spada u legure aluminija s maksimalnim udjelom magnezija od 5%. Posjeduje odlična mehanička i antikorozivna svojstva zbog kojih se uglavnom koristi u brodogradnji, automobilskoj i željezničkoj industriji. Također, zavarljivost ove legure je vrlo dobra, a zavar je bez poroznosti ako je pravilno izveden te je jedan od najčešće korištenih materijala u području aluminijskih legura. Kemijski sastav ovog dodatnog materijala prikazan je tablicom 5, a njegova mehanička svojstva prikazana su tablicom 6. [23]

Tablica 5. Kemijski sastav AlMg5 [23]

AlMg5	Maseni udio elemenata, %										
	Be	Mn	Si	Cr	Cu	Fe	Mg	Zn	Ti	Al	drugo
	0,0008	0,05-2	0,2	0.05-0,2	0,1	0,4	4,5-5,5	0,1	0,06-0,12	ostatak	0,15

Tablica 6. Mehanička svojstva AlMg5 [23]

AlMg5	Mehanička svojstva			
	$R_{P0,2}$, MPa	R_M, MPa	Produljenje, %	Temperatura tališta, °C
	115 – 140	275 – 315	25 – 35	562 – 633

Kod izrade uzoraka 4 i 5 korištena je puna žica AlMg4,5 Mn, promjera 1,2 mm, oznake po AWS-u A 5.10: ER 5183. Ovaj materijal spada u legure aluminija s manganom i magnezijem. Pokazuje vrlo dobra mehanička svojstva te se primjenjuje u brodogradilištima, automobilskoj i željezničkoj industriji te za izradu rezervoara i spremnika. Vrlo dobra zavarljivost i mehanička svojstva u kombinaciji s visokom korozijskom postojanošću u morskoj atmosferi tipična je za ovu leguru te je ocjenjena s vrlo visokom ocjenom u grupi aluminijskih legura. Kemijski sastav ove legure prikazan je tablicom 7, a njezina mehanička svojstva tablicom 8. [24]

Tablica 7. Kemijski sastav AlMg4,5 Mn [24]

AlMg4,5	Maseni udio elemenata, %										
	Be	Mn	Si	Cr	Cu	Fe	Mg	Zn	Ti	Al	drugo
	0,0005	0,5-1,0	0,2	0.05-0,25	0,1	0,4	4,3-5,2	0,25	0,15	ostatak	0,15

Tablica 8. Mehanička svojstva AlMg4,5 Mn [24]

AlMg4,5	Mehanička svojstva			
	$R_{P0,2}$, MPa	R_M, MPa	Produljenje, %	Temperatura tališta, °C
	115 - 140	275 - 315	25 - 35	562 - 633

7.2.2. Korišteni zaštitni plin

Plin korišten za zavarivanje bio je argon (proizvođač: Messer Croatia Plin d.o.o), čistoće 99,998%. EC broj je 231-147-0. Argon je bezbojni plemeniti plin bez mirisa, gušći od zraka. Najvažnije kemijsko svojstvo argona je inertnost. Ovo svojstvo argona svrstava ga u red idealnih zaštitnih plinova, čak i kod temperatura koje su uobičajene u metalurgiji i zavarivanja električnim lukom. Tablica 9 prikazuje njegova fizička i kemijska svojstva. [25]

Tablica 9. Mehanička i kemijska svojstva argona 4.8 [25]

Argon 4.8, komprimirani plin – MEHANIKČA I KEMIJSKA SVOJSTVA	
Agregatno stanje	Plin
Boja	Bezbojan
Miris	Bez mirisa
Vrelište	186 °C
Zapaljivost	Nije zapaljiv
Tlak pare – plin (zrak =1)	1,38
Topivost u vodi	61 mg/l

7.3. Tijek eksperimenta

Prije početka izrade zidova pripremljena je ploča te je izvršeno čišćenje ploče alkoholom te brušenje iste četkom radi uklanjanja sloja oksida na dijelu osnovnog materijala na kojem se izradio uzorak kako bi se uspio uspostaviti što kvalitetniji električni luk. Također prije početka izrade uzoraka, zagrijala se čelična ploča na koju je smještena aluminijska pologa. Zagrijavanje se vršilo plinskog plamena te se na samoj aluminijskoj podlozi prije početka izrade uzorka navarilo nekoliko slojeva zavara koji su osigurali početnu temperaturu izrade uzoraka od oko 100 °C. Ovaj postupak bio je nužan radi aluminija i njegovog visokog koeficijenta toplinske vodljivosti koji mu omogućuje vrlo brzo hlađenje, tj. prijelaz topline s aluminijske podloge na čeličnu potpornu ploču.

Fiksni parametri zavarivanja kod izrade zidova bili su brzina zavarivanja od 110 cm/min (uzorci 2 i 6) i 95 cm/min (uzorci 4 i 5) te protok plina koji je u oba slučaja iznosio oko 19 l/min. Tijekom postupka zavarivanja na izvoru struje očitana je prosječna struja zavarivanja koja je iznosila oko 150 A i 160 A (uzorci 2 i 6) te 120 A i 130A (uzorci 4 i 5). Također, očitani su i naponi koji su bili u rasponu od 20 V i 21 V kod korištenja klasičnog MIG postupka (uzorci 2 i 4), odnosno između 16 V i 19 V korištenjem MIG CMT uređaja (uzorci 5 i 6). Odmah nakon svakog prolaza mjerena je i temperatura na 3 različita dijela uzorka (lijevo, sredina i desno) *Fluke IR Thermimetar* uređajem koji beskontaktno mjeri temperaturu. Ova temperatura mjerila se kod izrade uzoraka 2 i 4, dok se prilikom izrade uzoraka 5 i 6 kontrolirala visina rastućeg uzorka u 3 točke. Također, nakon svakog prolaza mjerene su i širine kod svih izrađenih uzoraka.

Zavarivanje je vršeno naizmjenično s lijeva na desno i obrnuto. Ovakve putanje pištolja su korištene da ne bi došlo do uspostave odnosno prekida luka samo na jednoj strani zida što bi dovelo do različite geometrije zida na nasuprotnim stranama. Razlog tome je nešto viša struja kod uspostave električnog luka.

Na početku svakog prolaza zabilježeno je vrijeme početka zavarivanja i u prosjeku između prolaza vrijeme čekanja bilo je približno 150 sekundi. Položaj pištolja je neutralan, tj. bez kuta nagiba. Također valja napomenuti da je slobodni kraj žice iznosio oko 12 mm.

Tablicama 10, 11, 12, 13 prikazani su očitani parametri zavarivanja, vrijeme i dimenzije nastalog zida nakon svakog prolaza, a slikom 19 prikazano je postepeno nastajanje WAAM zida klasičnim MIG postupkom.

Za izradu uzoraka 4 i 5 (AlMg4,5 Mn legura) koristila se manja brzina zavarivanja koja je omogućila brže taloženje dodatnog materijala i nastajanje samog zida. Također, veća struja korištena za izradu uzoraka 2 i 6 (AlMg5) omogućuje veći učinak taljenja što je dovelo do šireg zida. Prekomjerno povećanje struje zavarivanja može dovesti do prskanja luka tijekom zavarivanja. Također, valja spomenuti i napon zavarivanja koji valja optimalno odrediti uz odabranu struju zavarivanja. Niži napon daje uzak i ispupčen zavar, a viši napon daje širi i niži zavar.
Unesena toplina tijekom zavarivanja računa se prema izrazu koji slijedi:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v_z} \times \frac{60}{1000} \quad (1)$$

Pri čemu je:

Q – unesena toplina u zavar, kJ/cm

k – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja (kod MIG postupka je od 0,65 do 0,85, a uzeta vrijednost je 0,8 kako prepisuje norma)

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v_z – brzina zavarivanja, cm/min

Tablica 10. Parametri zavarivanja i geometrije uzorka 2

PARAMETRI ZAVARIVANJA – Uzorak 2								
Prolaz	Struja, A	Napon, V	Brzina, cm/min	Protok plina, l/min	Vrijeme	Širina zida, mm	Visina zida, mm	Unesena toplina, kJ/cm
1.	153	21	110	21	11:10	5,5	1	1,129
2.	158	21,8	110	21	11:16	5,8	2,3	1,142
3.	156	21,9	110	21	11:21	6,5	3,4	1,140
4.	156	21,5	110	21	11:23	6,8	5,9	1,143
5.	158	21,6	110	21	11:27	7,1	6,6	1,104
6.	157	21,6	110	21	11:30	7,9	8,6	1,081
7.	159	21,4	110	21	11:32	8,6	9,2	1,134
8.	158	21,5	110	21	11:35	8,7	9,9	1,137
9.	161	21,2	110	21	11:40	8,8	10,5	1,139
10.	162	21,4	110	21	11:43	8,8	11	1,176
11.	159	21,5	110	21	11:46	8,9	12,5	1,136
12.	158	21,5	110	21	11:49	8,9	13,8	1,113
13.	157	21,8	110	21	11:51	9	14,7	1,134
14.	157	21,6	110	21	11:53	9	15,9	1,091
15.	156	21,8	110	21	11:56	9,1	17,5	1,133
16.	158	21,7	110	21	11:58	9,1	19,3	1,100
17.	157	21,9	110	21	12:01	9,1	20,3	1,139
18.	156	21,7	110	21	12:03	9,2	20,9	1,124
19.	158	21,8	110	21	12:06	9,2	21,6	1,155
20.	156	21,8	110	21	11:09	9,2	22	1,130
21.	154	21,3	110	21	12:11	9,2	23,5	1,100
22.	158	21,7	110	21	12:14	9,2	25,2	1,130
23.	158	21,5	110	21	12:16	9,2	26,2	1,137
24	153	21,1	110	21	12:19	9,2	27	1,142
25.	151	21,3	110	21	12:22	9,2	27,7	1,145
26.	158	20,8	110	21	12:27	9,2	28,9	1,074

27.	153	21,4	110	21	12:29	9,2	30,3	1,077
28.	157	21,3	110	21	12:32	9,2	31	1,135
29.	152	21,2	110	21	12:34	9,2	31,4	1,143
30.	168	21,3	110	21	12:48	9,2	31,9	1,100
31.	159	21,4	110	21	12:51	9,2	33,1	1,142
32.	159	21,8	110	21	12:54	9,2	34,7	1,104
33.	153	21,6	110	21	12:57	9,2	36,1	1,137
34.	157	21,6	110	21	12:59	9,2	36,8	1,129
35.	159	21,6	110	21	13:01	9,2	37,3	1,133
36.	156	21,8	110	21	13:05	9,2	39,2	1,125
37.	157	21,7	110	21	13:07	9,2	40,9	1,088
38.	154	21,8	110	21	13:09	9,2	42,1	1,131
39.	156	21,7	110	21	13:12	9,2	42,5	1,123
40.	153	21,7	110	21	13:14	9,2	43,1	1,122
41.	158	21,8	110	21	13:16	9,2	44,3	1,125
42.	156	21,9	110	21	13:19	9,2	44,8	1,090
43.	155	21,8	110	21	13:21	9,2	45,2	1,127
44.	155	21,9	110	21	13:23	9,2	45,8	1,122
45.	156	21,9	110	21	13:25	9,2	46,5	1,152
46.	153	21,7	110	21	13:27	9,2	47,8	1,129
47.	157	21,8	110	21	13:29	9,2	48,8	1,142
48.	156	22,5	110	21	13:31	9,2	50,1	1,140

Tablica 11. Parametri zavarivanja i geometrija uzorka 4

PARAMETRI ZAVARIVANJA – Uzorak 4								
Prolaz	Struja, A	Napon, V	Brzina, cm/min	Protok plina, l/min	Vrijeme	Širina zida, mm	Visina zida, mm	Unesena toplina, kJ/cm
1.	121	19,7	95	21	9:49	5,0	2	1,314
2.	123	19,6	95	21	9:52	5,1	3,4	1,409
3.	126	19,1	95	21	9:55	5,8	4,6	1,398
4.	129	18,7	95	21	9:58	6,6	5,5	1,372
5.	126	18,5	95	21	10:00	7,1	6	1,396
6.	122	18,7	95	21	10:03	7,2	7,4	1,387
7.	124	19,3	95	21	10:05	7,6	8,7	1,392
8.	125	19,2	95	21	10:08	7,8	9,6	1,390
9.	124	19,4	95	21	10:10	7,9	11	1,396
10.	126	19,7	95	21	10:12	8,1	11,7	1,418
11.	123	19,5	95	21	10:15	8,1	13,1	1,398
12.	123	19,1	95	21	10:17	8,1	13,6	1,390
13.	124	19,3	95	21	10:19	8,1	15,1	1,400
14.	120	19,2	95	21	10:21	8,1	15,9	1,387
15.	122	19,6	95	21	10:23	8,1	17,3	1,391
16.	121	19,2	95	21	10:26	8,1	17,9	1,403
17.	124	19,4	95	21	10:28	8,1	20,5	1,407
18.	123	19,3	95	21	10:30	8,1	20,7	1,385
19.	125	19,5	95	21	10:32	8,1	21,6	1,409
20.	123	19,4	95	21	10:34	8,1	22,5	1,391
21.	121	19,2	95	21	10:55	8,1	23,7	1,342
22.	123	19,4	95	21	10:57	8,1	24,9	1,403
23.	127	18,9	95	21	10:59	8,1	25,9	1,390
24	123	19,6	95	21	11:02	8,1	26,9	1,321
25.	124	19,5	95	21	11:05	8,1	27,6	1,316
26.	120	18,9	95	21	11:97	8,1	29,2	1,344
27.	119	19,1	95	21	11:09	8,1	30,8	1,339

28.	121	19,8	95	21	11:10	8,1	31,3	1,368
29.	120	20,1	95	21	11:11	8,1	31,9	1,318
30.	121	19,2	95	21	11:14	8,1	33,1	1,464
31.	123	19,6	95	21	11:17	8,1	34,9	1,392
32.	124	18,8	95	21	11:19	8,1	36,2	1,418
33.	120	20,0	95	21	11:25	8,1	36,6	1,352
34.	121	19,7	95	21	11:27	8,1	37,9	1,387
35.	122	19,6	95	21	11:30	8,1	39,3	1,405
36.	120	19,8	95	21	11:32	8,1	40,4	1,391
37.	119	19,3	95	21	11:34	8,1	41,5	1,394
38.	120	19,9	95	21	11:36	8,1	42,4	1,373
39.	121	19,6	95	21	11:39	8,1	43,8	1,385
40.	119	19,9	95	21	11:42	8,1	45	1,358
41.	120	19,8	95	21	11:44	8,1	46,2	1,409
42.	118	19,5	95	21	11:47	8,1	47,1	1,398
43.	119	20,0	95	21	11:50	8,1	48,9	1,382
44.	119	19,9	95	21	11:54	8,1	49,3	1,389
45.	121	20,1	95	21	11:59	8,1	50,1	1,398

Tablica 12. Parametri zavarivanja i geometrija uzorka 5

PARAMETRI ZAVARIVANJA – Uzorak 5								
Prolaz	Struja, A	Napon, V	Brzina, cm/min	Protok plina, l/min	Vrijeme	Širina zida, mm	Visina uzorka, mm	Unesena toplina, kJ/cm
1.	167	18,1	95	18	10:57	4,5	1,4	1,432
2.	165	18,0	95	18	10:58	4,9	3,2	1,407
3.	166	18,1	95	18	11:00	5,8	5,4	1,423
4.	124	16,7	95	18	11:02	6,8	6,9	0,981
5.	125	17,1	95	18	11:05	7,1	8,2	1,013
6.	127	16,9	95	18	11:10	7,2	9,7	1,017
7.	124	16,5	95	18	11:14	7,2	11,1	0,969
8.	126	16,7	95	18	11:17	7,2	12,4	0,997
9.	125	16,6	95	18	11:23	7,2	13,6	0,983
10.	127	16,5	95	18	11:28	7,2	14,9	0,993
11.	125	17,1	95	18	11:31	7,2	16,2	1,013
12.	124	16,9	95	18	11:34	7,2	17,7	0,993
13.	127	17,0	95	18	11:37	7,2	19,0	1,023
14.	126	16,9	95	18	11:42	7,2	20,2	1,009
15.	125	17,1	95	18	11:46	7,2	21,6	1,013
16.	124	16,6	95	18	11:48	7,2	22,9	0,975
17.	126	16,8	95	18	11:50	7,2	24,3	1,003
18.	127	17,1	95	18	11:53	7,2	25,4	1,029
19.	126	17,2	95	18	11:56	7,2	26,6	1,027
20.	125	16,7	95	18	11:59	7,2	28,0	0,989
21.	126	16,6	95	18	12:02	7,2	29,1	0,991
22.	127	16,9	95	18	12:05	7,2	30,3	1,017
23.	126	16,6	95	18	12:09	7,2	32,0	0,991
24	127	17,1	95	18	12:13	7,2	33,1	1,029
25.	127	17,2	95	18	12:16	7,2	34,3	1,035
26.	126	17,0	95	18	12:19	7,2	35,5	1,015

27.	127	16,7	95	18	12:22	7,2	36,5	1,005
28.	128	17,1	95	18	12:25	7,2	37,8	1,037
29.	127	17,2	95	18	12:28	7,2	39,0	1,035
30.	127	17,1	95	18	12:32	7,2	40,6	1,029
31.	126	17,0	95	18	12:36	7,2	41,8	1,015
32.	127	16,9	95	18	12:40	7,2	43,1	1,017
33.	126	17,1	95	18	12:42	7,2	44,2	1,021
34.	127	16,7	95	18	12:44	7,2	45,4	1,005
35.	125	16,5	95	18	12:48	7,2	46,2	0,977
36.	126	16,6	95	18	12:50	7,2	48,0	0,991
37.	127	16,5	95	18	12:52	7,2	49,1	0,993
38.	126	16,8	95	18	12:54	7,2	50,5	1,003
39.	125	17,2	95	18	12:56	7,2	51,9	1,018
40.	124	16,8	95	18	12:59	7,2	53,1	0,987
41.	125	17,1	95	18	13:02	7,2	54,2	1,013
42.	127	16,8	95	18	13:05	7,2	55,9	1,011
43.	126	17,0	95	18	13:08	7,2	56,9	1,015

Tablica 13. Parametri zavarivanja i geometrija uzorka 6

PARAMETRI ZAVARIVANJA – Uzorak 6								
Prolaz	Struja, A	Napon, V	Brzina, cm/min	Protok plina, l/min	Vrijeme	Širina zida, mm	Visina uzorka, mm	Unesena toplina, kJ/cm
1.	163	19,5	110	18	10:57	5,2	1,2	1,300
2.	162	19,3	110	18	10:59	6,7	2,9	1,279
3.	166	19,6	110	18	11:02	7,3	4,9	1,331
4.	165	19,6	110	18	11:05	7,9	6,1	1,323
5.	155	18,5	110	18	11:09	8,1	7,4	1,173
6.	156	18,4	110	18	11:13	8,1	8,5	1,174
7.	157	18,8	110	18	11:17	8,2	9,6	1,207
8.	156	18,3	110	18	11:19	8,2	10,7	1,168
9.	157	18,6	110	18	11:23	8,2	11,9	1,195
10.	158	18,3	110	18	11:26	8,2	13,0	1,183
11.	156	18,5	110	18	11:29	8,2	14,2	1,181
12.	155	18,4	110	18	11:31	8,2	15,4	1,167
13.	156	18,6	110	18	11:34	8,2	16,6	1,187
14.	155	18,3	110	18	11:36	8,2	17,7	1,160
15.	156	18,5	110	18	11:39	8,2	18,6	1,181
16.	152	18,3	110	18	11:42	8,2	19,2	1,138
17.	153	18,4	110	18	11:45	8,2	19,9	1,152
18.	155	18,5	110	18	11:50	8,2	21,8	1,173
19.	157	18,4	110	18	11:55	8,2	22,8	1,182
20.	156	18,5	110	18	12:01	8,2	23,8	1,181
21.	155	18,3	110	18	12:05	8,2	25,2	1,160
22.	157	18,5	110	18	12:09	8,2	26,5	1,188
23.	154	18,4	110	18	12:11	8,2	27,7	1,159
24	155	18,3	110	18	12:13	8,2	28,6	1,160
25.	154	18,4	110	18	12:15	8,2	29,9	1,159
26.	153	18,2	110	18	12:18	8,2	31,0	1,139
27.	155	18,2	110	18	12:20	8,2	31,9	1,154

28.	156	18,5	110	18	12:22	8,2	33,4	1,181
29.	155	18,4	110	18	12:24	8,2	34,6	1,167
30.	155	18,4	110	18	12:26	8,2	35,6	1,167
31.	157	18,3	110	18	12:32	8,2	36,7	1,175
32.	156	18,4	110	18	12:35	8,2	37,7	1,174
33.	155	18,3	110	18	12:37	8,2	39,1	1,160
34.	154	18,5	110	18	12:39	8,2	40,3	1,166
35.	156	18,3	110	18	12:41	8,2	41,5	1,168
36.	155	18,4	110	18	12:43	8,2	42,3	1,167
37.	155	18,5	110	18	12:45	8,2	43,7	1,173
38.	156	18,6	110	18	12:48	8,2	44,6	1,187
39.	155	18,4	110	18	12:50	8,2	45,7	1,167
40.	156	18,5	110	18	12:52	8,2	46,8	1,181
41.	154	18,3	110	18	12:54	8,2	47,9	1,153
42.	156	18,6	110	18	12:57	8,2	49,0	1,187
43.	157	18,5	110	18	12:59	8,2	50,0	1,188
44.	155	18,6	110	18	13:01	8,2	51,5	1,179
45.	153	18,1	110	18	13:03	8,2	52,1	1,133
46.	154	18,2	110	18	13:08	8,2	53,4	1,147
47.	155	18,4	110	18	13:11	8,2	54,6	1,167
48.	154	18,5	110	18	13:13	8,2	55,7	1,166
49.	153	18,3	110	18	13:15	8,2	56,9	1,145
50.	156	18,4	110	18	13:17	8,2	57,9	1,174
51.	155	18,4	110	18	13:19	8,2	59,2	1,167
52.	156	18,7	110	18	13:21	8,2	60,0	1,193
53.	154	18,4	110	18	13:23	8,2	61,0	1,159
54.	155	18,3	110	18	13:26	8,2	62,6	1,160
55.	157	18,3	110	18	13:28	8,2	63,6	1,175
56.	156	18,6	110	18	13:30	8,2	64,4	1,187
57.	155	18,5	110	18	13:35	8,2	65,5	1,173
58.	154	18,4	110	18	13:39	8,2	66,7	1,159

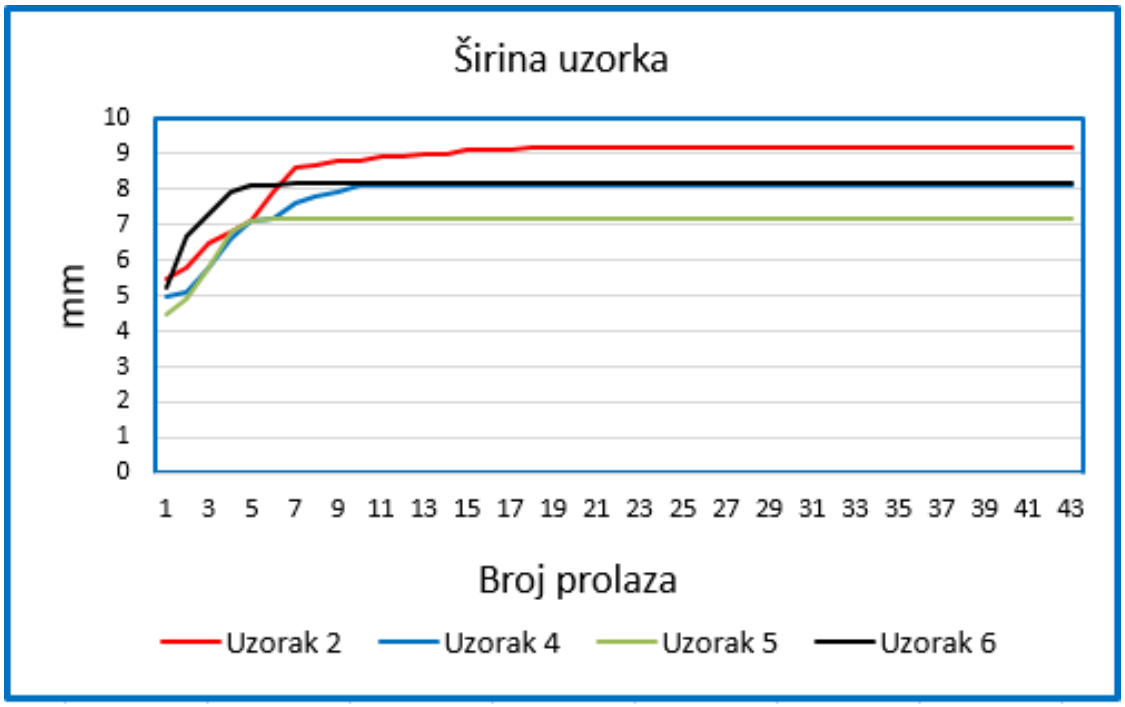


Slika 19. Prikaz postupnog nastajanja jednog od uzorka

Iz tablica koje prikazuju parametre zavarivanja može se vidjeti da je za uzorak 6 bilo potrebno izvesti naviše prolaza, njih čak 58. Ovaj broj prolaza izveden je radi pogreške koja je nastala kod 19. prolaza uslijed kojeg je došlo do mehaničkog zamaka CMT pištolja za zavarivanje iz razloga što je improvizirano montiran na robot, što kod klasičnog MIG postupka nije bio slučaj. Veći broj prolaza je izveden kako bi se dobila što veća ujednačena površina koja će se ispitati u analizi parametara teksture površine, a kasnije je obrađena u ovome radu.

7.3.1. Praćenje širine uzoraka

Tijekom izrade zidova bilježene su vrijednosti njihovih visina i širina. Na slici 20 prikazan je dijagram koji prati geometrijsku značajku širine svih uzoraka nakon svakog prolaza.



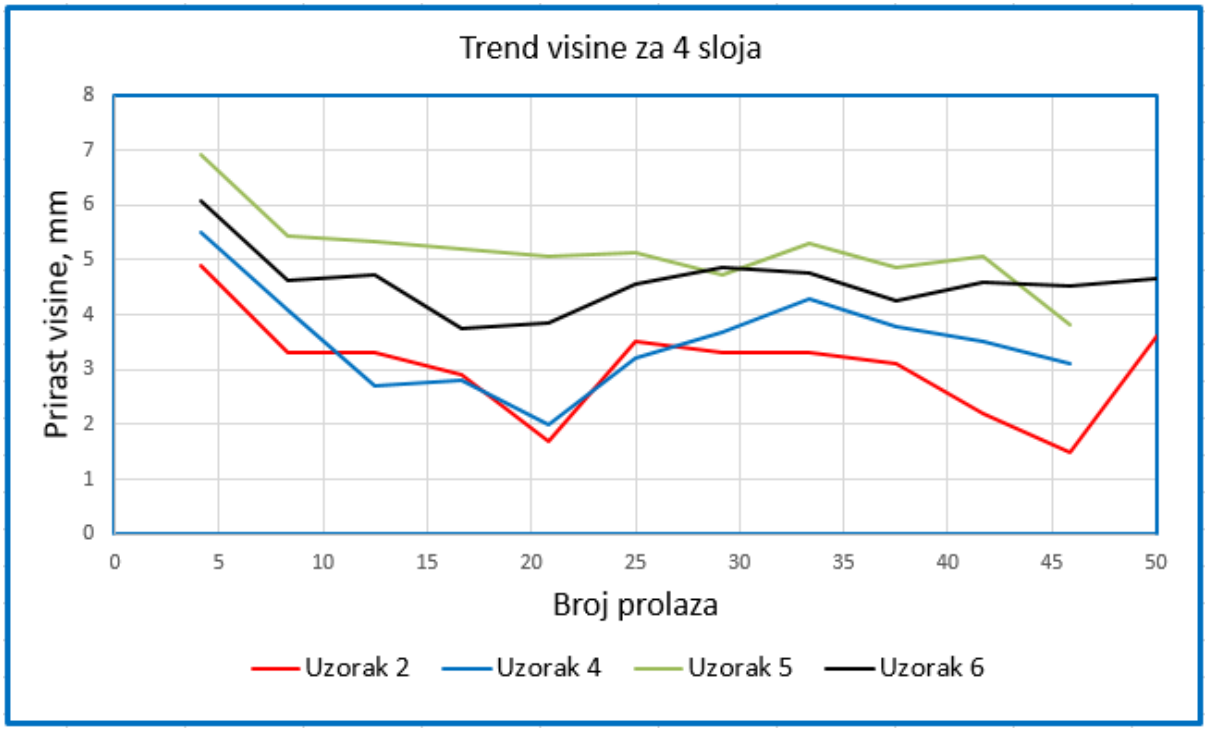
Slika 20. Dijagram praćena širine svih uzoraka

Iz dijagrama je vidljivo da je najveću širinu postigao uzorak 2 koja iznosi nešto preko 9 mm, a najmanju širinu uzorak 5 u iznosi nešto iznad 7 mm. Uzorci 4 i 6 imaju podjednaku konačnu širinu zidova koja iznosi oko 8 mm, a vidljivo je i da je ona postignuti dosta ranije za uzorak 6 koje je rađen CMT postupkom zavarivanja, dok je uzorak 4 izrađen konvencionalnim MIG impulsnim postupkom. Treba reći da su uzorak 2 i uzorak 6 izrađeni približno jednakim parametrima zavarivanja (vidi tablicu 10 i 13), a njihova konačna širina se razlikuje za 1 mm, što ukazuje na mnogo veći kvalitetu zavara bez prskanja i sa manjim unosom topline kod

korištenja CMT aparata za provedbu WAAM postupka. Najveći prirast širine zida za uzorak 2 bilježi se između 3. i 4. te 5. i 7. prolaza, a konačna fiksna vrijednost ustaljuje se kod 17. prolaza. Za uzorak 4 najveći prirast širine uočava se između 3. i 6. prolaza dok se konačna vrijednost širine zida postiže već kod 10. prolaza. Uzorak 5 najveći prirast širine bilježi između 2 i 4 prolaza, a vrijednost širine mu se ustaljuje nakon 6 prolaza što je najbrži rezultat. Uzorak 6 ostvaruje najveći prirast širine od svih uzoraka i to u prva dva prolaza, dok se vrijednost njegove širine ustaljuje nakon 7. prolaza.

7.3.2. Praćenje visine uzoraka

Kod praćenja visine uzoraka prilikom izrade treba napomenuti da se za uzorak 2 i 4 ona bilježila u jednoj točki nakon svakog prolaza, dok se kod uzoraka 5 i 6 bilježila u 3 različite tačke, pa se iz njih izračunala aritmetička sredina. Shodno tome izrađen je graf trenda visine, koji prikazuje prirast visine uzorka za 4 izrađena sloja, a prikazan je na slici 21.



Slika 21. Prirast visine za četiri prolaza tijekom izrade uzoraka

Analizom dobivenih rezultata uočava se da su uzorci izrađeni CMT postupkom ostvarili značajno veći prirast visine za 4 sloja od konvencionalnog MIG impulsnog postupka. Isto tako vidljiva su i manja odstupanja u prirastu visine tijekom cjelokupne izrade uzoraka. Najveći prirast visine za sve uzorke zabilježen je na početku izrade. Do ovog rezultata došlo je zbog korištenja većih parametara zavarivanja prilikom izrade početnih prolaza kako bi se što prije zagrijao osnovni materijal i ostvarila željena međuprolazna temperaturu, a samim time i smanjeno odvođenje topline. Vidljivo je da najveći prirast visine ostvaruje uzorak 5 dok ga uzorak 6 u tom aspektu nadmašuje u samo jednoj točci. Također je zanimljiv podatak da su uzorci 4 i 5 ostvarili u prosjeku veći prirast visine za 4 sloja iako su se za njihovu izradu koristili znatno manji parametri zavarivanja ako se usporede konvencionalni MIG impulsni i MIG CMT postupak zavarivanja.

7.4. Ispitivanje uzorka

Nakon završetka izrade zidova, ploča od aluminija, koja je služila kao osnovni materijal zacrtana je te je izrezana na CNC plazma rezačici kako bi se dobili odvojeni zidovi. Također, uočena je deformacija duž cijele ploču po dužini zbog neravnomjernog odvođenja topline sa osnovnog materijala. Ovaj problem javlja se zbog velikog koeficijenta toplinske dilatacije kojeg posjeduje aluminij. Slikom 22 prikazana je označena ploča i njeno postavljanje u radni prostor CNC plazma rezačice.



Slika 22. Deformacija osnovne ploče i prikaz plazma rezačice

7.5. Priprema uzoraka

Nakon odvajanja uzoraka, vrši se rezanje rubnih točaka zida na dužini od 10 mm kako bi se dobila što ravnija površina koja je na rubovima nepravilnija zbog uspostave i prekidanja luka te rezanje uzoraka na duljinu od 25 mm iz svakog navarenog zida za daljnje istraživanje. Postupak rezanja vrši se na tračnoj pili.

Nakon izrezivanja uzoraka izvršilo se ručno grubo brušenje brusnim papirom različitih granulacija. Korišteni brusni papiri redom imali su slijedeće oznake: P80, P100, P150, P240, P400, P500. Nakon grubog brušenja uzorci su poslani na daljnju obradu u Laboratorij za materijalografiju gdje je izvršeno fino brušenje istih na stroju Phenix Alfa prikazanom na slici 23. Brušenje je izvršeno brusnim papirima granulacija redom P320, P500, P1000, P2400. Tijekom procesa finog brušenja korištena je voda kao sredstvo za hlađenje i podmazivanje, a brzina rotacije bila je 300 okretaja u minuti. Nakon brušenja uzorci su isprani vodom kako bi se uklonile eventualne nečistoće.



Slika 23. Uređaj za fino brušenje

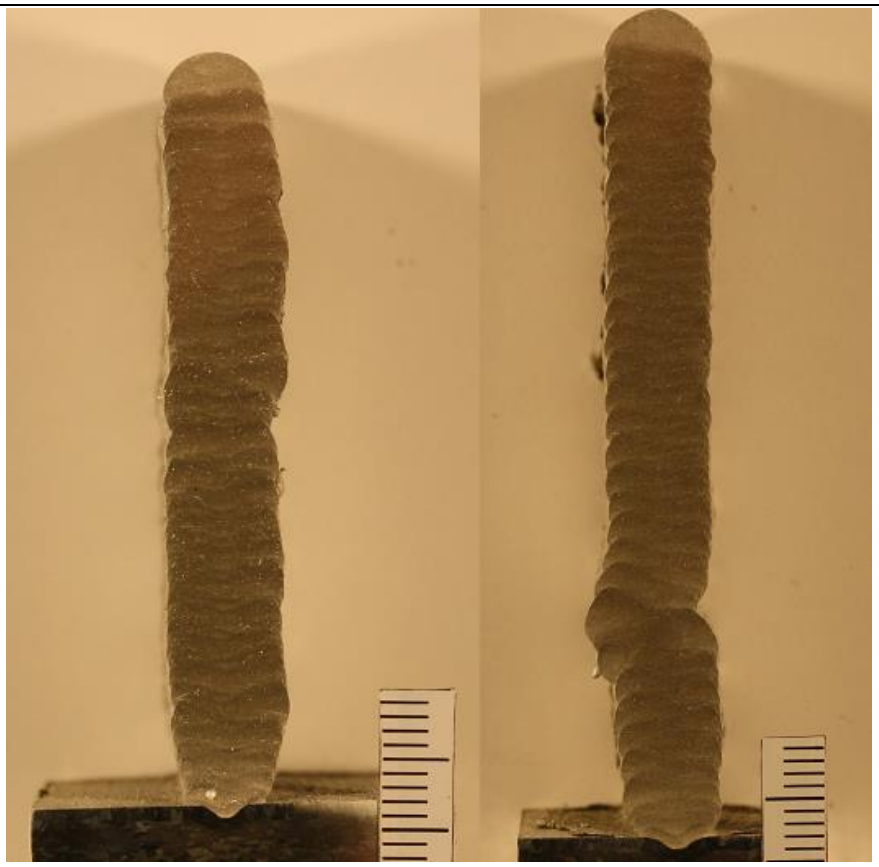
Nakon finog brušenja izvršilo se nagrizanje površina uzoraka. Sredstvo za nagrizanje bio je Kellerov reagens. Kemijski sastav ove otopine prikazan je tablicom 14.

Tablica 14. Kemijski sastav Kellerovog reagensa

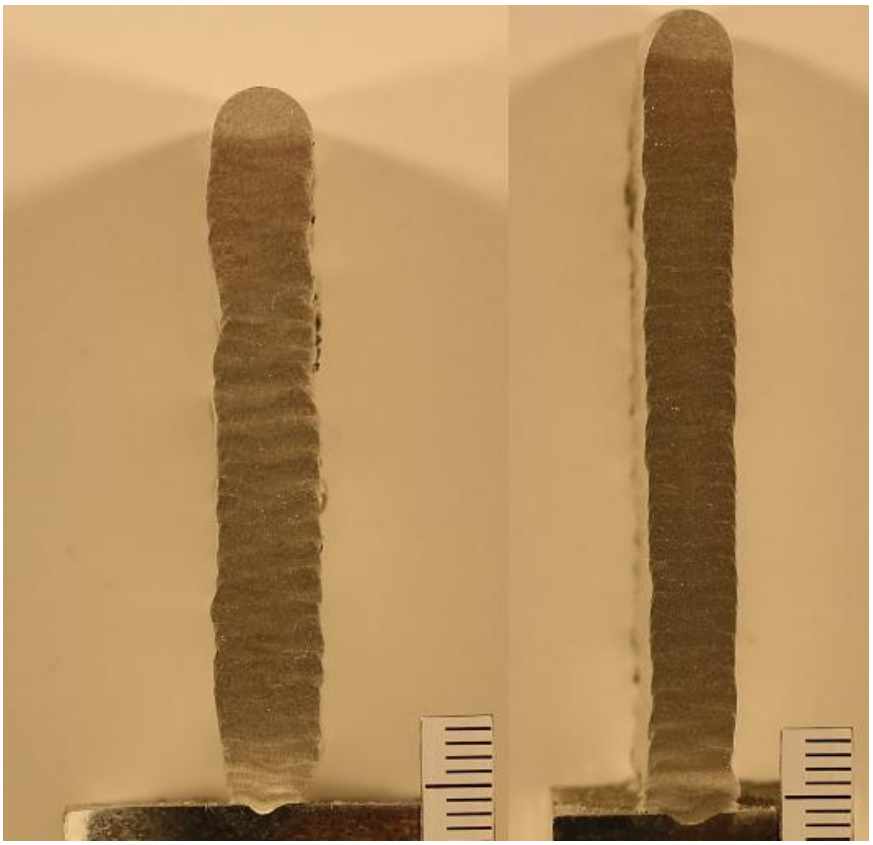
Kemijski spoj	Volumni udio
HNO_3	2,5 %
HCl	1,5 %
HF	1 %
Destilirana voda	95 %

7.6. Makroanaliza strukture

Na slici 24 prikazani su gotovi uzorci 2 i 6, dok su na slici 25 uzorci 4 i 5 spremni za makro i mikro analizu. Ovakav raspored uzoraka na slici odabran je radi parametara zavarivanja (struja, napon i brzina zavarivanja) koji su bili približno jednaki. Razlika je u procesu zavarivanja MIG impulsno te CMT postupak.



Slika 24. Uzorak 2 (lijevo) i uzorak 6 (desno)



Slika 25. Uzorak 4 (lijevo) i uzorak 5 (desno)

Makroanalizom uzoraka nisu uočene nikakve veće nepravilnosti na materijalu niti poroznosti te je uočena mala penetracija u osnovnu ploču koja je zbog velikog kontrasta vrlo dobro vidljiva na slikama. Izrađeni prolazi se vide i uglavnom su dosta pravilniji na uzorcima izrađenim CMT postupkom zavarivanja, a najpravilniji su na uzorku 5 koji zbog toga ima i najpravilniju vanjsku površinu uzorka. Na uzorku 6 vidi se mala nepravilnost na udaljenosti od 15 mm od ploče, koja je već spomenuta u radu, međutim u nastavku su slojevi izvedeni vrlo pravilno. Vidljiva je linija staljivanja osnovnog i dodatnog materijala te zona utjecaja topline koja je na slikama malo svjetlija od ostatka uzorka. Također, na svim makroizbruscima vidljivi su pokoji sitni uključci nastali vjerojatno od aluminijevih oksida koji su ostali u materijalu nakon izrade pojedinog sloja uzorka.

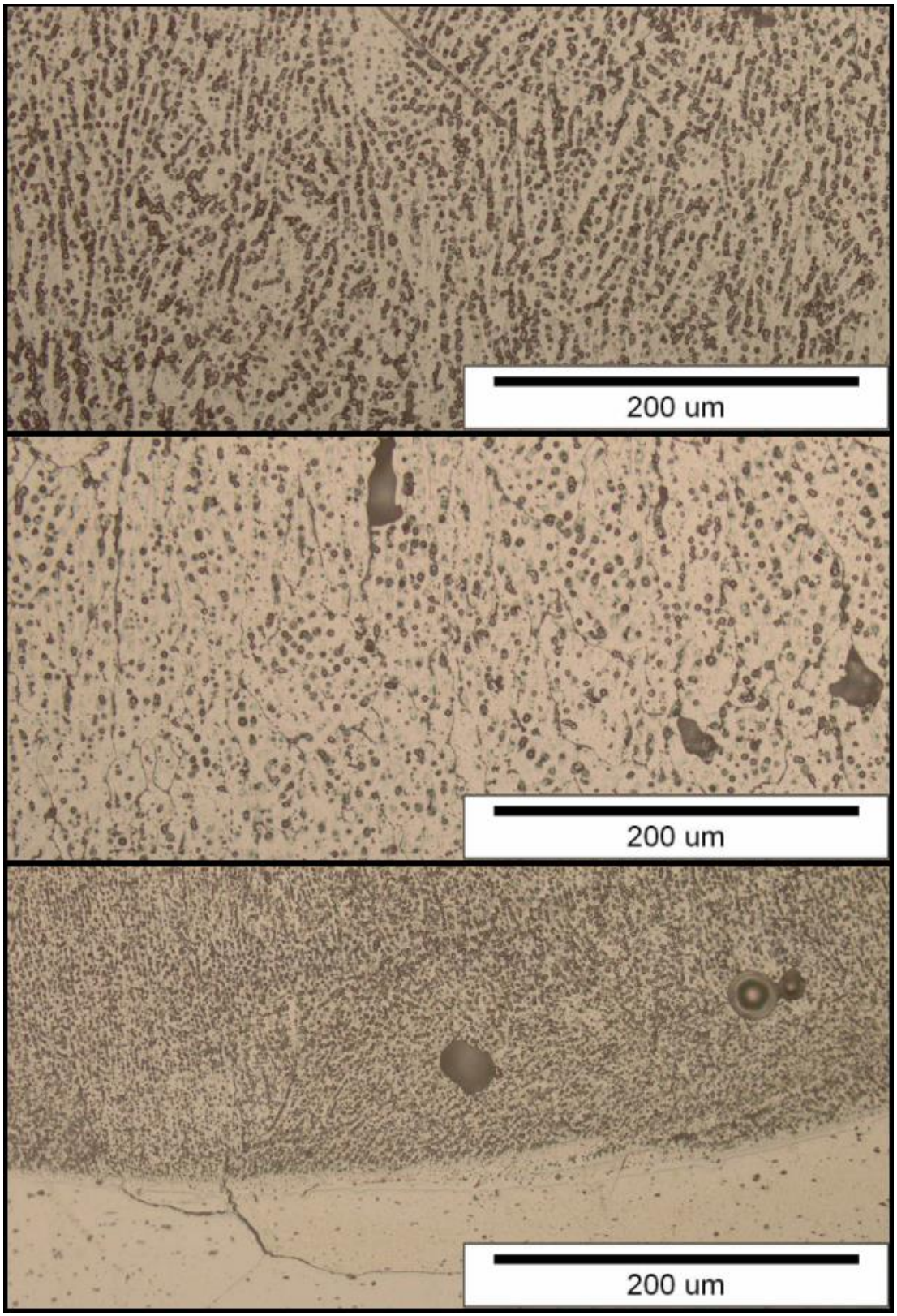
7.7. Mikroanaliza strukture

Ispitivanje mikrostrukture aluminijevih uzoraka provedeno je odmah nakon makroispitivanja, u Laboratoriju za materijalografiju, a priprema uzoraka je identična. Ispitivanje je provedeno na svjetlosnim mikroskopom „Olympus GX 51“, koji je prikazan na slici 26.

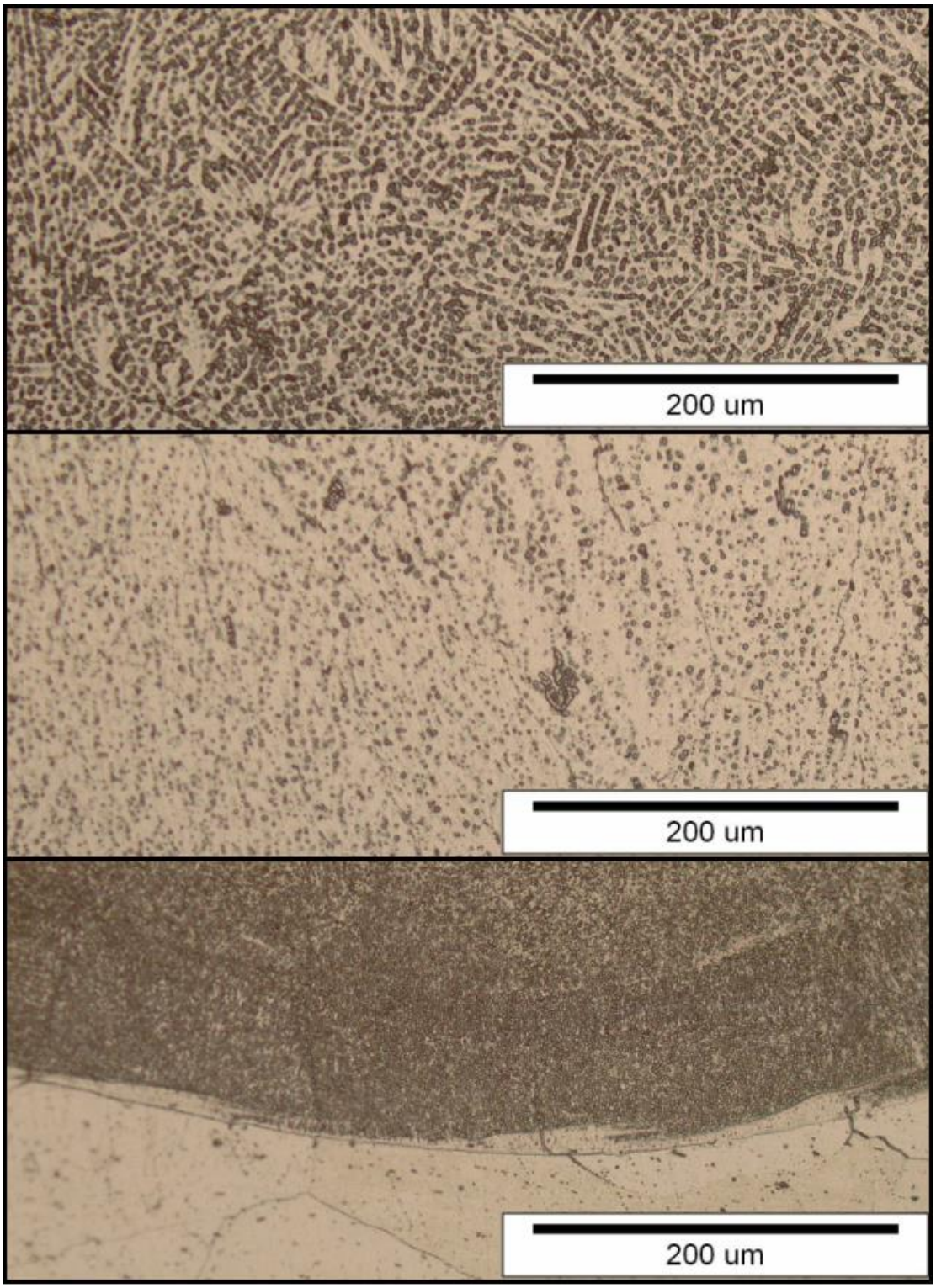


Slika 26. Svjetlosni mikroskop „Olympus GX 51“

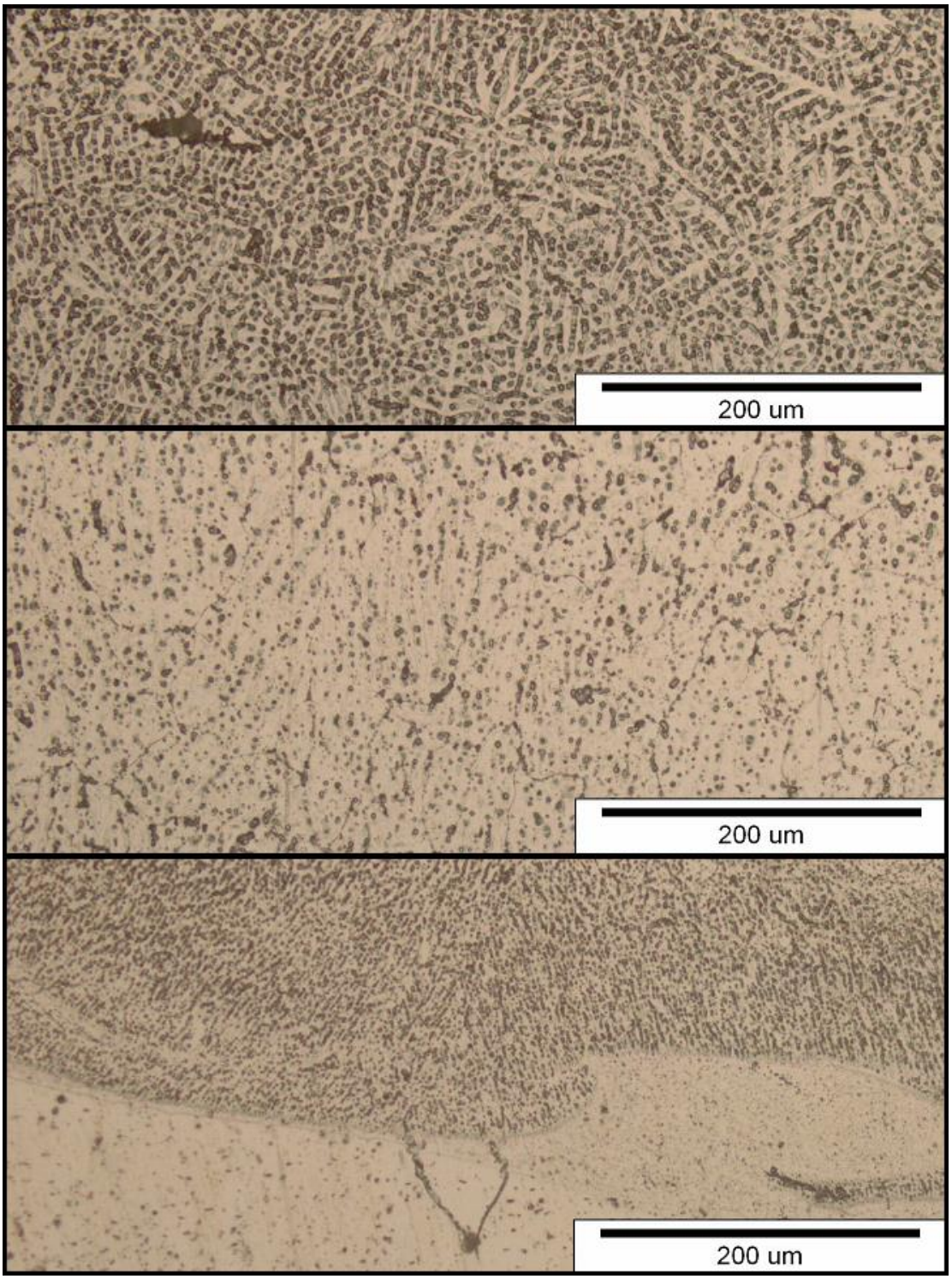
Ispitivanje uzoraka provedeno je na tri različita mjesta. Na vrhu uzorka, na sredini te liniji stapanja osnovnog i dodatnog materijala, tj. u zoni utjecaja topline. Kod MIG postupka zavarivanja aluminija moguća je pojava uključaka oksida u zavarenom spoju. Do ove pojave dolazi zbog nedovoljnog čišćenja sloja oksida na površini aluminija tijekom procesa zavarivanja. Osim oksidnih uključaka moguća je i pojava drugih sitnih uključaka kao što su: sulfidni, nitridni, fosfidni uključci te su usko povezani sa nastankom pukotina. Osim uključaka kod zavarivanja aluminija moguća je pojava poroznosti. To su mjesta ispunjena stlačenim plinom u metalu zavara, a mogu postići različite veličine. Nastaju zbog tendencije rastaljenog metala da upije određenu količinu plinova. Prilikom hlađenja zavara, plin naglo izlazi iz taline, a određena količina plinova ostaje zarobljena u zavaru u obliku mjehurića. Veličina i oblik mjehurića ovisi o upijenoj količini plinova i brzini skrućivanja zavara. Na slikama 27, 28, 29 i 30 prikazana je mikrostruktura svakog od uzorka na tri već navedenim mjestima.



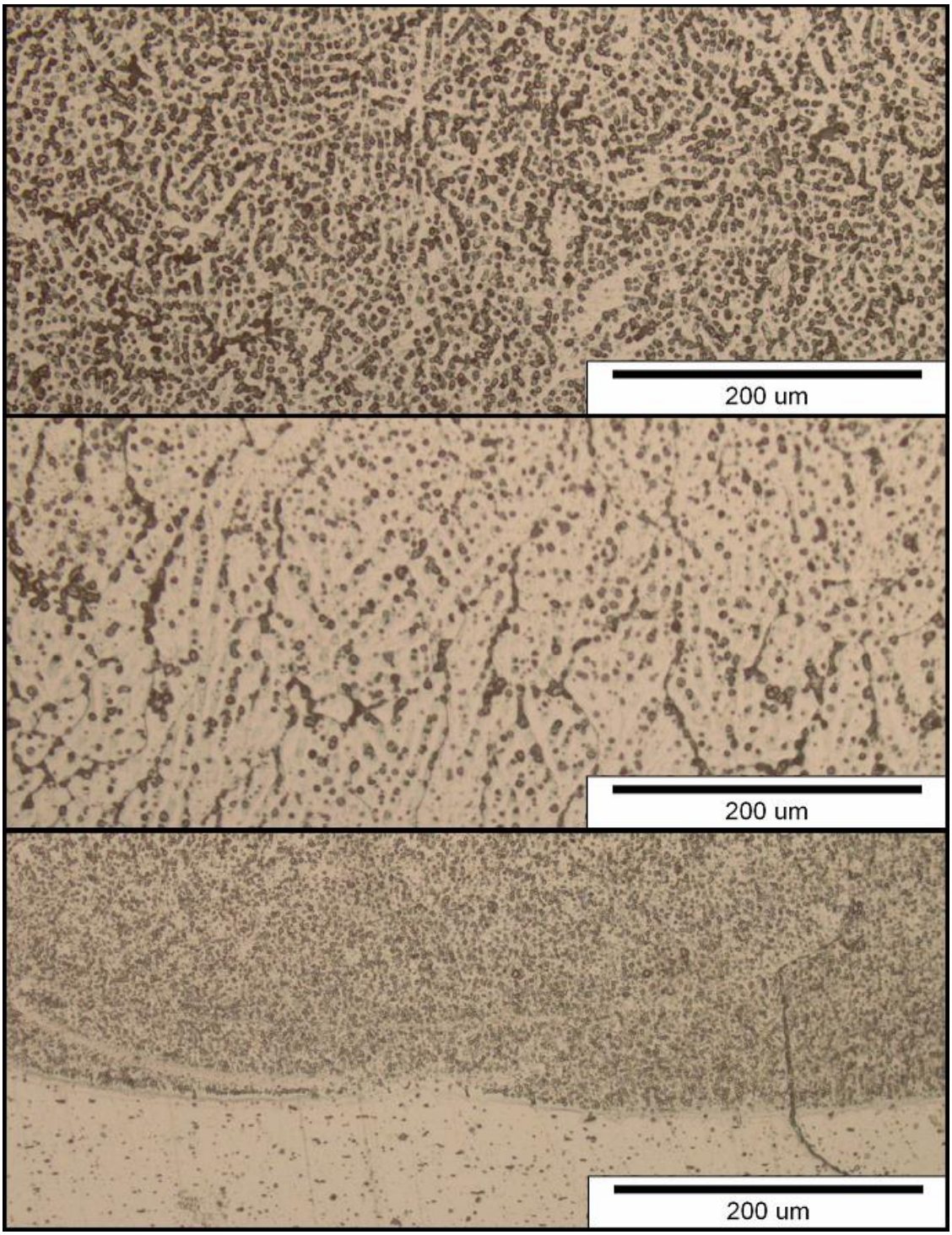
Slika 27. Mikrostruktura uzorka 2 redom vrh, sredina i ZUT



Slika 28. Mikrostruktura uzorka 4 redom vrh, sredina i ZUT



Slika 29. Mikrostruktura uzorka 5 redom vrh, sredina i ZUT



Slika 30. Mikrostruktura uzorka 6 redom vrh, sredina i ZUT

Na svim slikama mikrostrukture vidljive su pukotine koje su nastale u ZUT-u tj. na prijelazu između zida i podloge. U ovom radu to je zanemariv podatak iz razloga što se podloga odstranjuje od zida te nije bitna za istraživanje, međutim valja napomenuti da bi ovaj podatak mogao biti značajan u slučaju da bi podloga zajedno sa navarima ulazila u konačan proizvod.

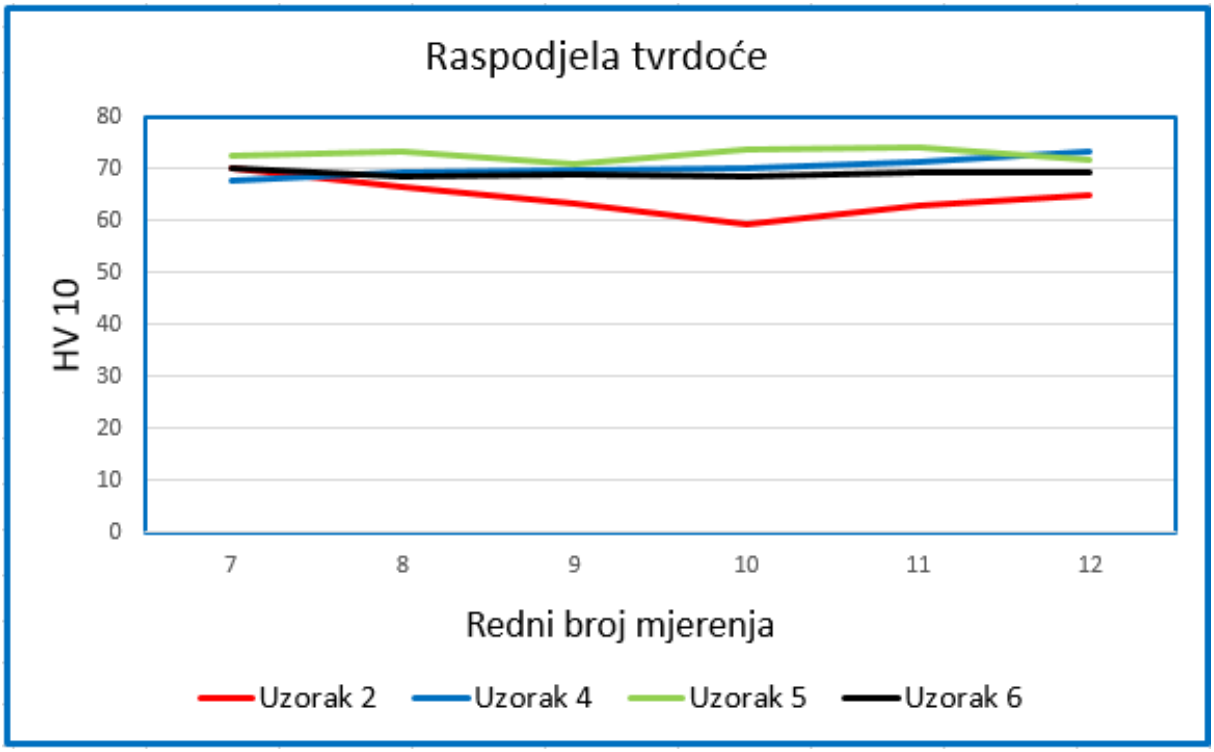
7.8. Mjerenje tvrdoće

Nakon ispitivanja mikrostrukture provedeno je mjerenje tvrdoće uzoraka. Mjerenje tvrdoće provedeno je metodom HV 10. Mjerenje se vršilo od osnovnog materijala prema vrhu uzorka u 15 točaka. U osnovnom materijalu provedena su 2 mjerenja, u ZUT-u 4, dok su provedena mjerenja prema vrhu uzorka bila na razmaku od prosječno 5 mm. Valja napomenuti da su na vrhu uzorka provedena 3 mjerenja tvrdoće na razmaku od 1,5 mm iz razloga što zadnji prolaz nije podvrgnut procesu normalizacije jer nema prolaza koji slijede iza njih. Dobiveni rezultati mjerenja prikazani su u tablici 15.

Tablica 15. Rezultati mjerenja tvrdoće

Tvrdoća HV 10					
Mjerenja		Uzorak 2	Uzorak 4	Uzorak 5	Uzorak 6
OSNOVNI MATERIJAL	1.	64,8	66,0	64,1	62,7
	2.	51,0	62,0	62,4	61,2
ZUT	3.	57,1	49,8	40,3	49,0
	4.	47,9	81,2	69,9	69,1
	5.	70,2	77,6	75,1	69,9
	6.	63,6	59,9	73,6	73,6
DUŽ UZORKA	7.	69,9	67,5	72,4	70,2
	8.	66,3	69,4	73,3	68,3
	9.	63,4	69,6	70,7	68,8
	10.	59,3	69,9	73,6	68,6
	11.	62,9	71,3	74,2	69,1
	12.	65,0	73,2	716	69,4
VRH UZORKA	13.	66,5	73,3	69,9	66,5
	14.	66,8	72,4	71,9	64,1
	15.	67,0	70,5	71,5	65,0
SREDNJA VRIJEDNOST	$\overline{X}$	64,47	70,15	72,3	69,07

Na temelju rezultata napravljen je graf koji prikazuje tvrdoću duž samog uzoraka te je izračunata srednja vrijednost tvrdoće za srednji dio (od 7. do 12. mjerenja) svakog od uzorka. Na slici 31 prikazana je raspodjela tvrdoće na sva 4 uzorka.



Slika 31. Raspodjela tvrdoće uzoraka

Iz dobivenih rezultata mjerenja vidi se približno kontinuirani raspon tvrdoće duž cijelih uzorka, međutim vidljiv je značajniji pad tvrdoće u zoni utjecaja topline koji je prisutan kod svih uzoraka. Najveći pad tvrdoće u ZUT-u zabilježen je kod uzorka 5, dok je kod uzorka 4 zabilježena najveća tvrdoća u 4. mjerenju. Za svaki uzorak izračunata je i srednja vrijednost tvrdoće te je vidljiv veći rezultat za uzorke 4 i 5 koji su izrađeni od AlMg 4,5Mn legure, dok je za uzorke 2 i 6, koji su izrađeni od legure AlMg5, taj rezultat nešto niži. Razlog zbog kojeg dolazi do omekšavanja aluminijskih legura na mjestu zavarenog spoja (u području ZUT-a) je ljevačka struktura aluminija.

7.9. Ispitivanje parametara teksture površine

Provedba ovog ispitivanja vršila se 3D skenerom DAVID video SLS-2 povezanim na računalo. Radi se o sustavu sa jednim projektorom i jednom kamerom. Projektor ima zadatak projiciranja svjetlosnog uzorka na predmet skeniranja, a kamera na temelju toga može jednoznačno odrediti prostorni položaj bilo koje točke na uzorku (na površini koja se skenira). Također treba napomenuti da prije početka skeniranja treba uređaj kalibrirati, a nakon toga njegov položaj mora ostati konstantan i ne promijenjen kod skeniranja sva četiri uzorka.

Prilikom provedbe ispitivanja nastojalo se postići zatamnjenje prostorije u kojoj se provodilo ispitivanje. Prije početka skeniranja svi uzorci su se očistili alkoholom te je nanesen bijeli razvijač sprej kako bi se postigli što kvalitetniji rezultati. Na slici 32 prikazan je postupak provedbe skeniranja.



Slika 32. Postupak provedbe 3D skeniranja uzorka

Nakon skeniranja provedeno je rezanje dobivenih uzoraka na dimenziju 100 mm x 38 mm u Microsoft programu Print 3D te njihovo spremanje u STL formatu što je ujedno posljednji postupak pripreme uzoraka za provedbu ispitivanja parametara teksture površine.

7.10. Analiza dobivenih parametara

Korišteni program za obradu skeniranih uzoraka bio je MountainsMap. Radi se o programu za analizu slike i površine, a u nastavku se nalaze objašnjenja parametara visine dobivenih ovim programom.

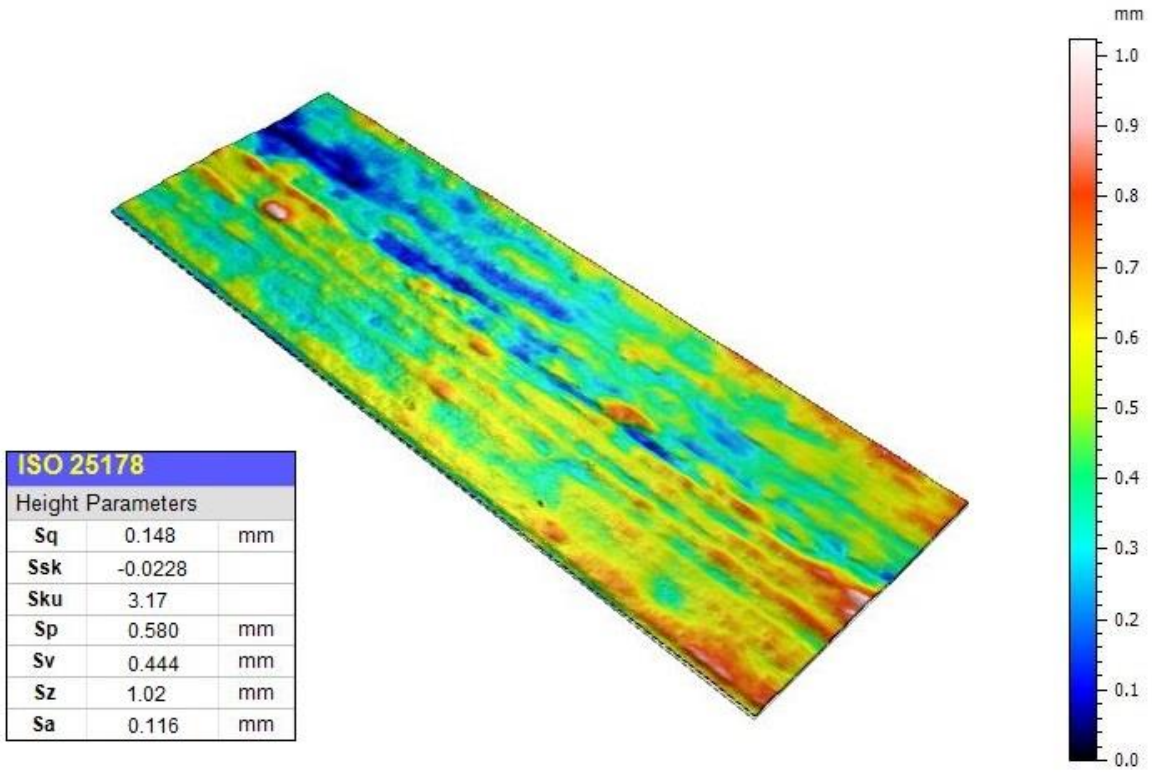
Sq i Sa parametri nazivaju se prosječna visina neravnina (engl. *Average Roughness*) i srednja kvadratna visina neravnina (engl. *Root Mean Square Roughness*), a ocjenjuju se na cijeloj skeniranoj površini. Ovi parametri predstavljaju ukupnu mjeru teksture koja obuhvaća površinu. Neosjetljivi su u vrhovima, udubinama i razmacima različitih značajki teksture. Zbog toga vrijednosti ovih parametara mogu biti varljive kod mnogih površina sa izrazito različitim značajkama prostorne i visinske simetrije. Dakle, mogu se dobiti slični rezultati Sq i Sa parametra, za dvije tekstualno potpuno različite površine što ukazuje na slabu osjetljivost ovih parametara. Međutim, kada se utvrdi vrsta površine, ovi parametri mogu otkriti značajna odstupanja u površinskim karakteristikama. Parametar Sq se karakteristično koristi za analizu neobrađenih površina dok se Sa koristi za mehanički obrađene površine. [26]

Ssk i Sku oznake koje označavaju parametar asimetrije (engl. *Skewness*) i parametar spljoštenosti (engl. *Kurtosis*). Ssk predstavlja stupanj simetrije površinskih nadvišenja oko srednje ravnine. Ssk indicira prevlast vrhova, tj. (Ssk > 0) ili prevlast udubina (Ssk < 0) koje obuhvaća promatrana površina. Parametar Sku ukazuje na prisutnost neuobičajeno visokih vrhova i udubina (Sku > 3,00) ili njihov manjak (Sku < 3,00) koji čine teksturu. Ako se visine neravnina ponašaju po normalnoj krivulji, tada je vrijednost Ssk 0.00 a Sku 3.00. Površine koje se opisuju kao postupno promjenjive bez ekstremnije izraženih vrhova i udubina imaju tendenciju vrijednosti Sku manju od 3.00. Parametar Ssk vrlo je koristan kod brušenih površina i praćenja različitih tipova trošenja. [26]

Parametar Sp označava maksimalnu visina vrha (engl. *Max Peak Height*), parametar Sv maksimalnu vrijednost udubine (engl. *Max Valley Depth*), a parametar Sz maksimalna visina

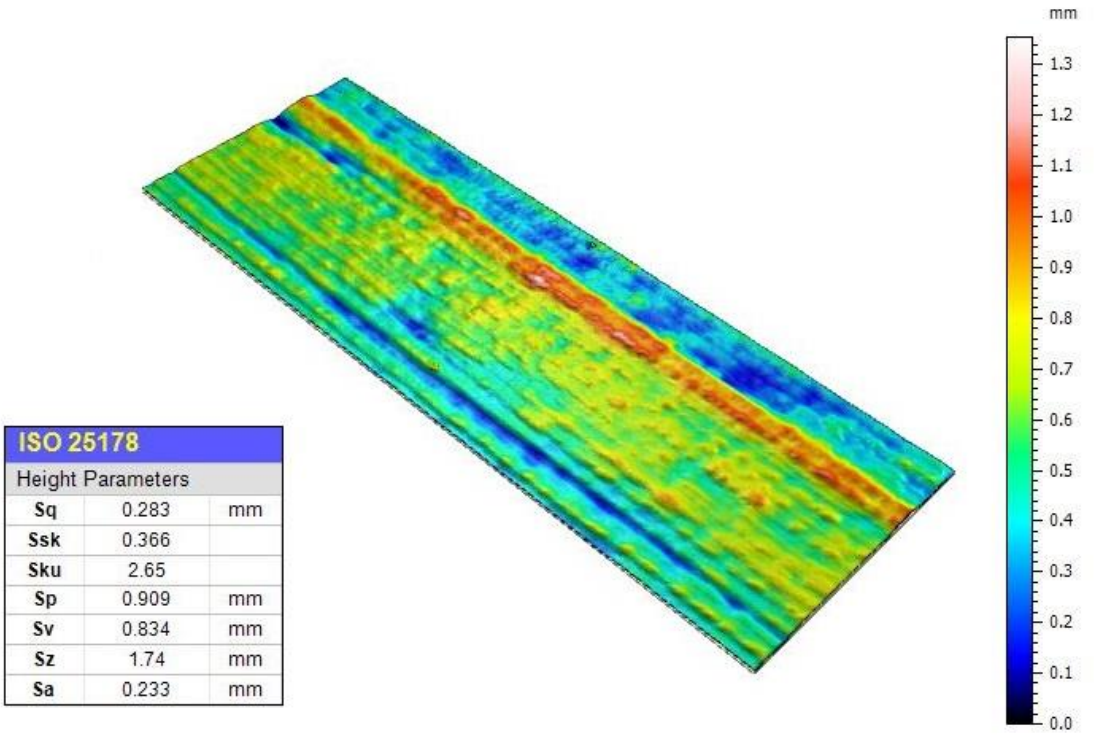
površine (engl. *Max Height of Surface*). Ovi parametri procjenjuju apsolutno najviše i najniže točke pronađene na površini. Parametar Sz određuje se oduzimanjem vrijednosti naviše i najniže zabilježene točke (Sz = Sp – Sv). Budući da se ovi parametri pronalaze iz pojedinih točaka, kod njih postoji tendencija rezultiranja u neponovljivim mjerenjima. Stoga, prilikom korištenja ova tri parametra potrebno je pravilno postaviti prostorne pojasne širine kako bi se uklonili nepravilni vrhovi i udubine te prosječna višestruka mjerenja na slučajnim mjestima uzduž uzorka s ciljem dobivanja statistički značajnog rezultata. Tipična primjena parametra Sz pronalazi se kod pjeskarenih i prevlačenih površina. Parametar Sp može naći primjenu kod površina koje će se koristiti u kliznom kontaktu dok parametar Sv za analizu površina u kojima postoji mogućnost zadržavanja fluida u udubinama, kao što su sustavi premazivanja i podmazivanja.

Na slici 33 prikazani su navedeni parametri teksture površine za uzorak 2 te 3D prikaz uzorka sa mjernom skalom vrhova i udubina.



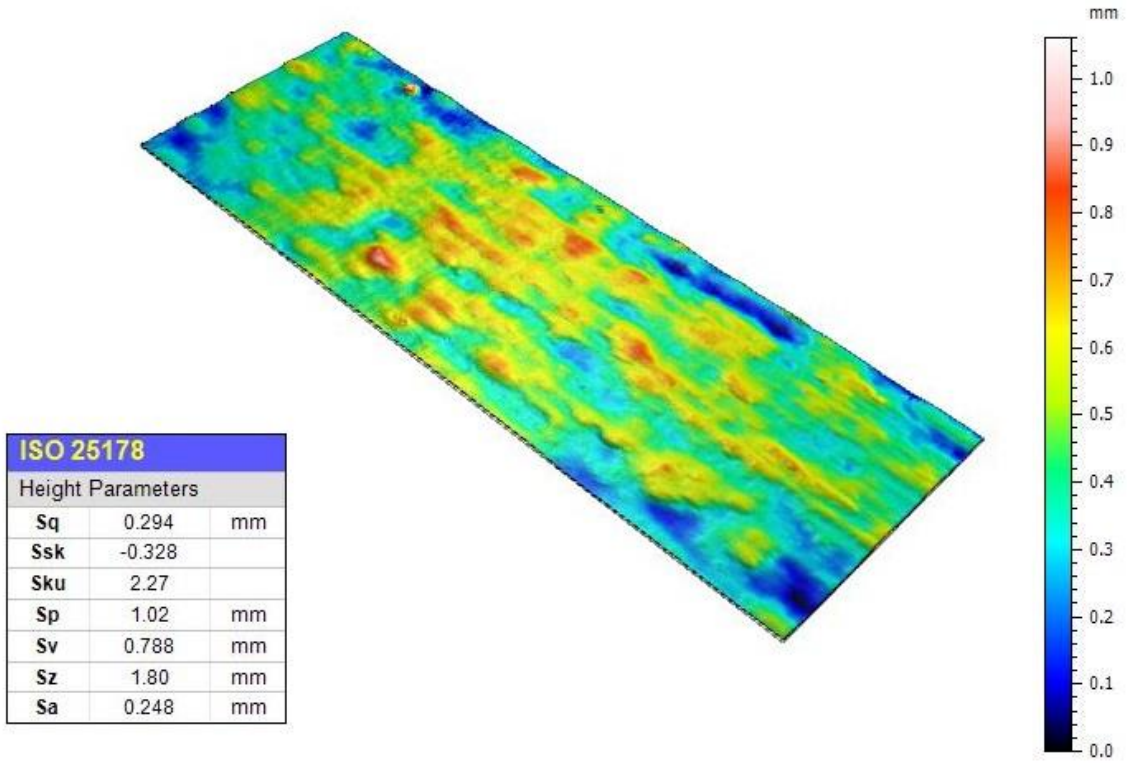
Slika 33. Parametri teksture površine za uzorak 2

Na slici 34, 35 i 36 prikazani su navedeni parametri teksture površine za redom uzorke 4, 5 i 6 te 3D prikaz uzorka sa mjernom skalom vrhova i udubina.



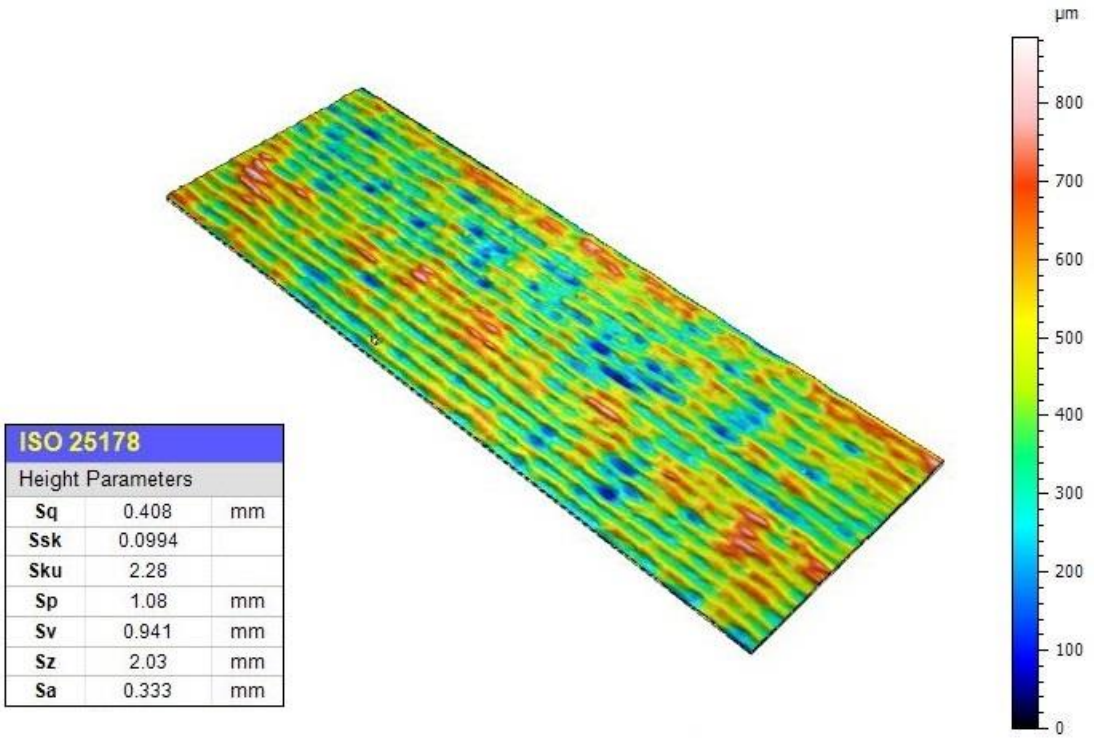
ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.283	mm
Ssk	0.366	
Sku	2.65	
Sp	0.909	mm
Sv	0.834	mm
Sz	1.74	mm
Sa	0.233	mm

Slika 34. Parametri teksture površine za uzorak 4



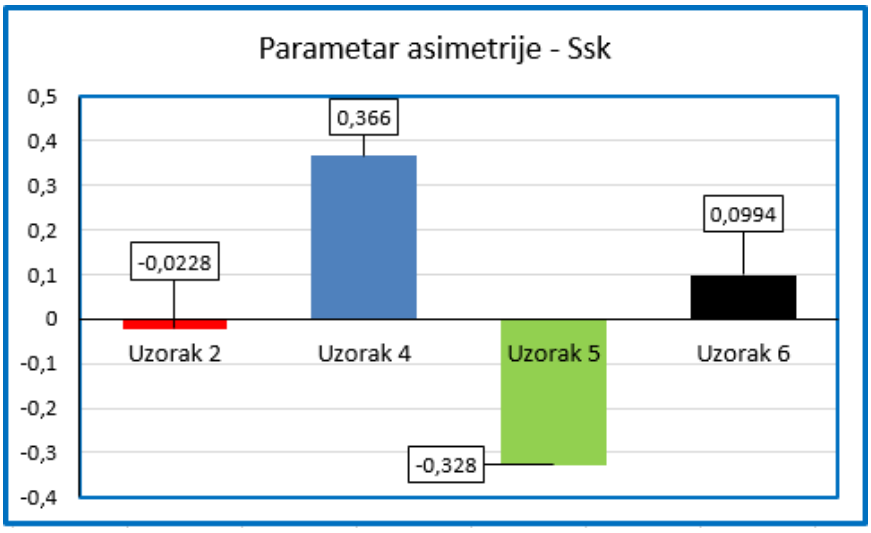
ISO 25178		
Height Parameters		
Sq	0.294	mm
Ssk	-0.328	
Sku	2.27	
Sp	1.02	mm
Sv	0.788	mm
Sz	1.80	mm
Sa	0.248	mm

Slika 35. Parametri teksture površine za uzorak 5



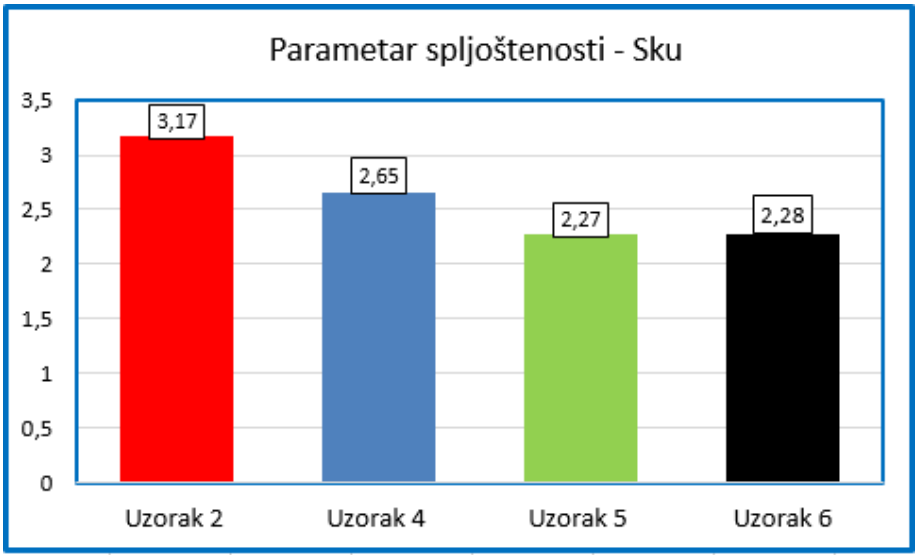
Slika 36. Parametri teksture površine za uzorak 6

Analizom dobivenih parametara može se vidjeti da uzorci 2 i 5 postižu negativne vrijednosti parametra Ssk što znači da po površini prevladavaju udubine. Ovaj parametar je za uzorke 4 i 6 pozitivan, s tim da je kod uzorka 4 ta vrijednost izraženije iznad 0 a kod uzorka 6 blago iznad nule. To znači da na njihovoj površini prevladaj vrhovi. Na slici 37 prikazan je dijagram vrijednosti parametra Ssk za sve uzorke.



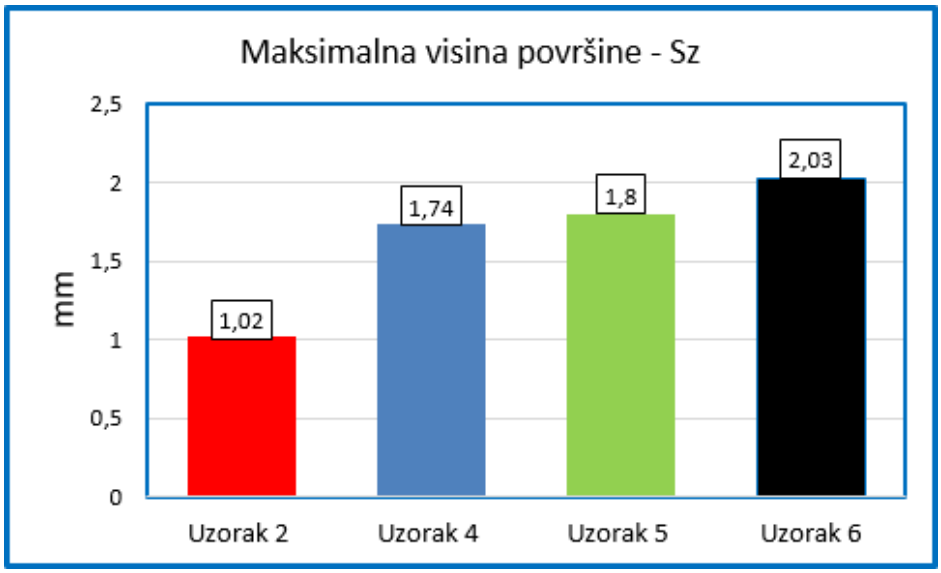
Slika 37. Dijagram vrijednosti parametra Ssk

Vrijednosti parametara Sku kod uzoraka 4, 5 i 6 nalazi se ispod vrijednosti 3.00 što označuje da su površine tih uzoraka bez ekstremnije izraženih vrhova i udubina, dok je kod uzorka 2 ta vrijednost blago iznad 3.00 što označuje prisutnost ekstremnijih vrhova i udubina na površini uzorka. Na slici 38 prikazan je dijagram sa vrijednostima parametra Sku za sve uzorke.



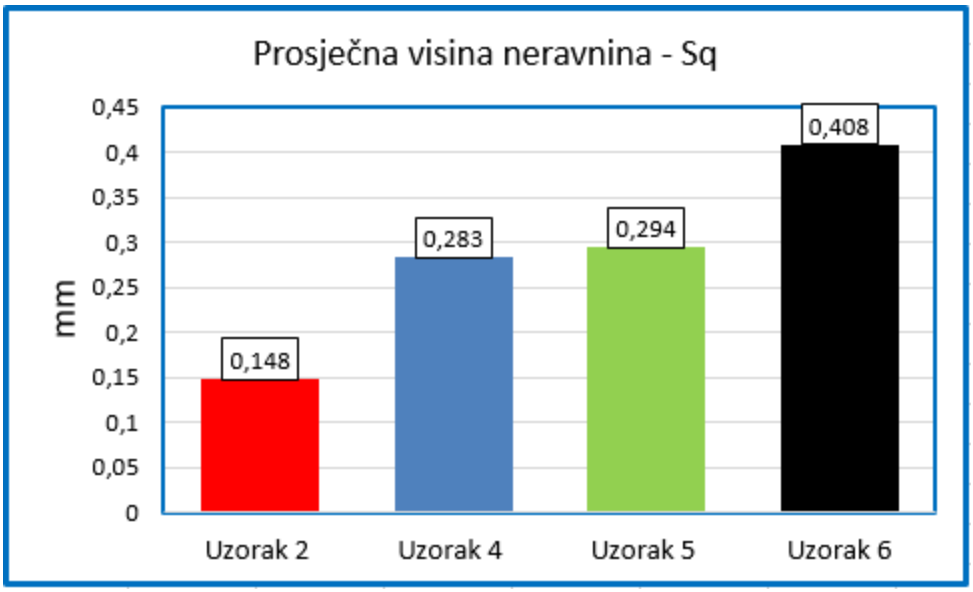
Slika 38. Dijagram vrijednosti parametra Sku

Sljedeći parametar uzet u analizu je Sz, a označuje maksimalnu visinu promatrane površine, tj. razlika između najviše i najniže izmjerene točke na površini. Ovaj parametar najviši je za uzorak 6 dok je najmanji za uzorak 2. Na slici 39 prikazan je dijagram sa vrijednostima parametra Sz za sve uzorke.



Slika 39. Dijagram vrijednosti parametra Sz

Posljednji parametar uzet u ovu analizu je Sq ili prosječna visina neravnina. Uzorak sa najvećom postignutom vrijednošću ovoga parametara je ponovo uzorak 6, dok je za uzorak 2 ova vrijednost najmanja. Parametar Sa nije obrađen zbog činjenice navedene u literaturi da se najćešće koristi kod mehanički obrađenih površina. Na slici 40. prikazan je dijagram sa vrijednostima parametra Sq za sve uzorke.



Slika 40. Dijagram vrijednosti parametra Sq

7.11. Ispitivanje kemijskog sastava

Prijašnja provedena ispitivanja u radu izvedena su na manjim uzorcima sa osnovnim materijalom ili na kompletno izrađenom WAAM zidu. Preostala ispitivanja zahtijevala su odvajanje zida od osnovnog materijala, izradu uzoraka približno jednakih dimenzija (100 mm x 40 mm) te CNC glodanje jedne strane uzorka radi ispitivanja kemijskog sastava i korozijskih svojstava na obrađenoj i neobrađenoj strani uzorka.

Ispitivanje kemijskih sastava uzoraka provedeno je na tri različita mjesta na uzorku sa svake strane (obrađena i neobrađena) te je na temelju tih podataka izračunata prosječna vrijednost udjela svakog legirnog elementa. Provedeno ispitivanje kemijskog sastava korišten je prijenosni Olympus XRF uređaj prikazan na slici 41. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 16.

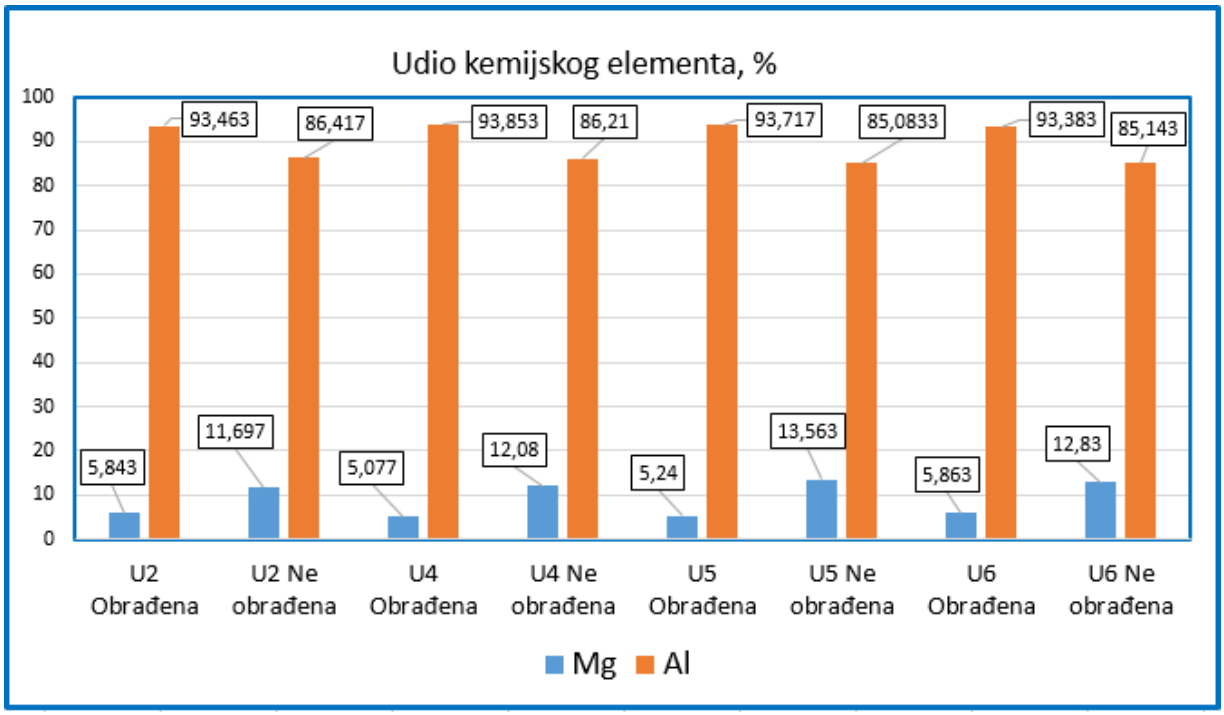


Slika 41. Olympus XRF uređaj

Tablica 16. Udio legirnih elemenata na uzorcima

Udio kemijskog elementa, %								
Strana	Uzorak 2		Uzorak 4		Uzorak 5		Uzorak 6	
	Obrađena	Ne obrađena	Obrađena	Ne obrađena	Obrađena	Ne obrađena	Obrađena	Ne obrađena
Mg	5,843	11,697	5,077	12,08	5,24	13,563	5,863	12,83
Al	93,463	86,417	93,853	86,21	93,717	85,0833	93,383	85,143
Si	0,273	1,303	0,260	0,683	0,247	0,477	0,31	1,533
Ti	/	0,095	0,098	0,08	/	0,1	/	0,09
Cr	0,087	0,087	0,048	0,063	0,0493	0,063	0,087	0,083
Mn	0,167	0,193	0,597	0,64	0,613	0,633	0,173	0,183
Fe	0,147	0,203	0,13	0,153	0,13	0,143	0,157	0,153
Ni	/	0,0095	0,007	/	0,006	/	/	/
Zn	0,0103	0,017	/	/	/	/	0,0113	0,0157
Pb	0,0107	0,297	/	/	/	/	0,008	0,0087
Zr	/	/	/	/	0,0027	0,0025	/	/

Iz priložene tablice mogu se vidjeti poprilično velike razlike između udjela elementa magnezija i aluminija na obrađenim i ne obrađenim stranama uzorka. Naime, vidljivo je da je udio magnezija u prosjeku duplo veći na obrađenoj strani uzorka. Isto vrijedi i za aluminij osim što su omjeri u suprotnosti, pa je udio aluminija veći na mehanički obrađenoj strani uzorka. Što se tiče ostalih legirnih elemenata, također je vidljiv veći udio silicija na ne obrađenoj strani uzoraka, dok se su udjeli ostalih prisutnih elemenata uglavnom podudaraju na obje strane uzoraka. Ove razlike u kemijskim sastavima obrađene i ne obrađene strane uzoraka mogu se pripisati vjerojatno različitom načinu skrućivanja i solidifikacije legirnih elemenata prilikom izrade WAAM zidova (uzoraka). Na slici 42 prikazan je dijagram razlika u kemijskom sastavu na svim uzorcima kod obrađene i ne obrađene strane uzoraka. U dijagram su uključeni samo elementi Mg i Al zbog očitanja očitih razlika u kemijskom sastavu, dok su kod drugih elemenata te razlike male i ne bi došle do izražaja u dijagramu.



Slika 42. Razlike u udjelu kemijskih elemenata na obrađenim i ne obrađenim stranama uzorka

7.12. Ispitivanje korozijskih svojstava uzoraka

Posljednji od provedenih eksperimenta u ovom radu je ispitivanje korozijskih svojstava izrađenih uzoraka. Eksperiment se provodio u Laboratoriju za zaštitu materijala, na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Glavni uređaj za ispitivanje bila je slana komora Ascott S450 prikazana na slici 43.

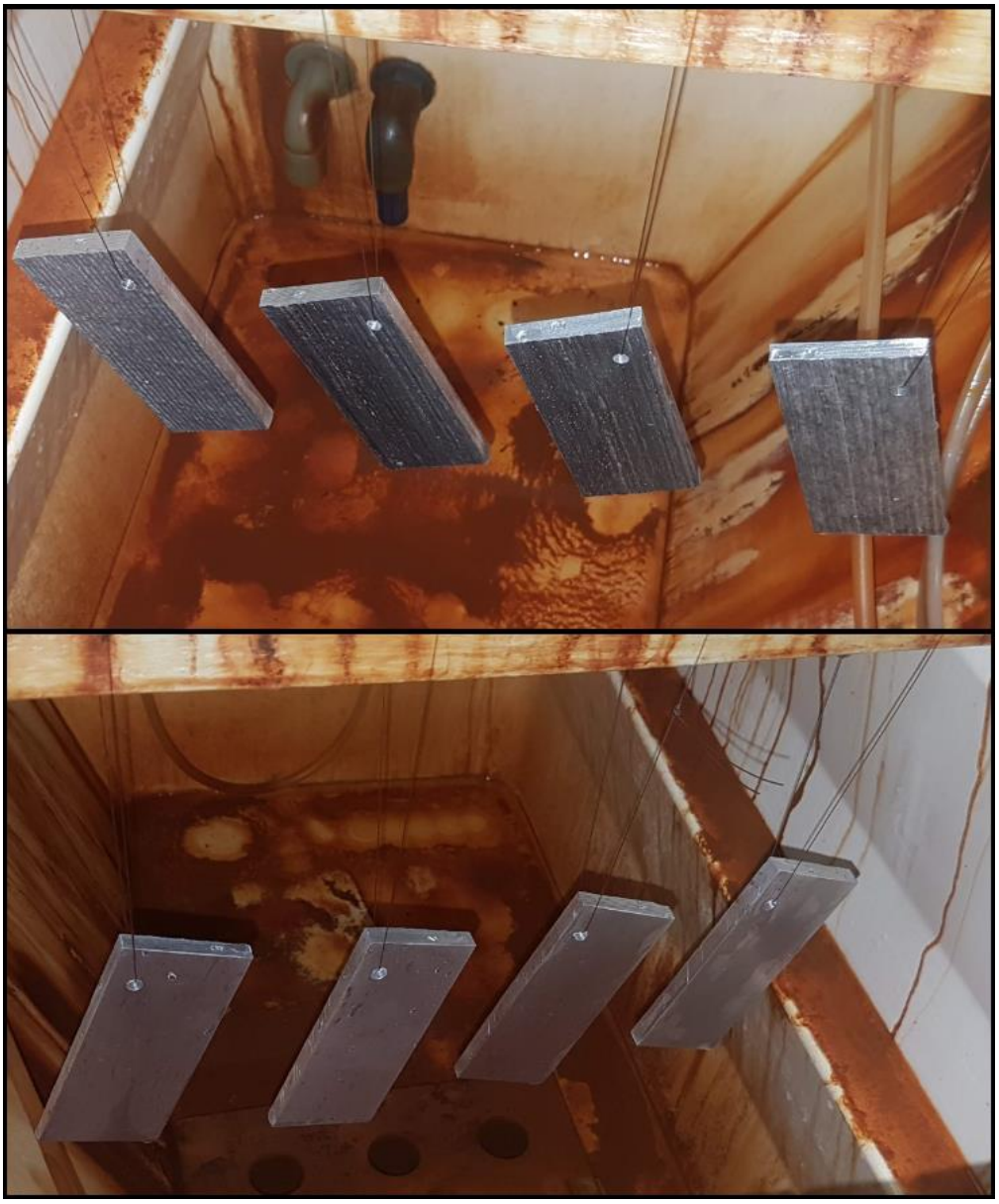


Slika 43. Slana komora Ascott S450

Ispitivanje uzoraka u slanoj komori omogućuje izlaganje uzoraka simuliranoj, umjetnoj morskoj atmosferi na način da se razrijeđena 5 % otopina NaCl raspršuje u obliku maglice po komori u kojoj se nalaze izrađeni i pripremljeni uzorci, dok se temperatura u komori nastoji održati na konstantnoj vrijednosti. Ispitivanje je provedeno po normi HRN EN ISO 9227:2012. Budući da materijal uzoraka slovi kao vrlo dobar i postojan materijal kod morskih uvjeta, vrijeme ispitivanje nije određeno na početku ispitivanja. Prva kontrola uzoraka izvršena je 36 sati nakon postavljanja u slanu komoru, a završna nakon 240 sati. U sljedećem dijelu rada prikazana je priprema uzoraka te njihovo stanja nakon izlaganja ispitivanju u slanoj komori.

7.12.1. Priprema uzoraka za korozijsko ispitivanje

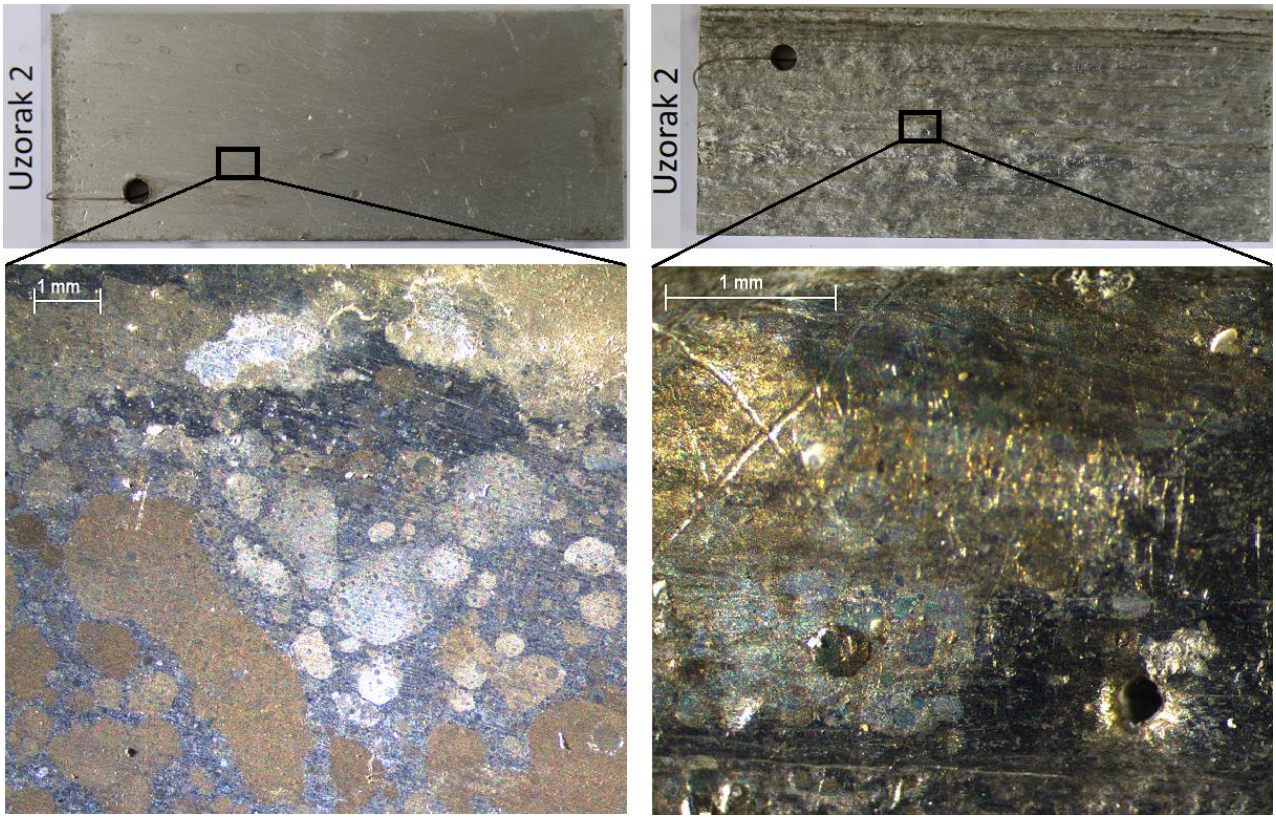
Nakon ispitivanja kemijskog sastava bilo je potrebno pripremiti uzorke za ispitivanje u slanoj komori. Svaki od uzorka je probušen na stolnoj bušilici kako bi se mogli pravilno postaviti u komoru. Kako je već prije navedeno, svi uzorci su izrezani na jednake dimenzije (100 mm x 40 mm). Jedna strana uzorka je obrađena mehaničkom obradom glodanja dok je druga ostala u izvornom obliku. Na mehanički obrađenoj strani također je izvršeno ručno brušenje brusnim papirom granulacijama P100 i P180, a nakon brušenja uzorci su isprani vodovodnom vodom te alkoholom kako bi svima bili nametnuti jednaki početni uvjeti. Na slici 44 prikazani su postavljeni uzorci u slanu komoru.



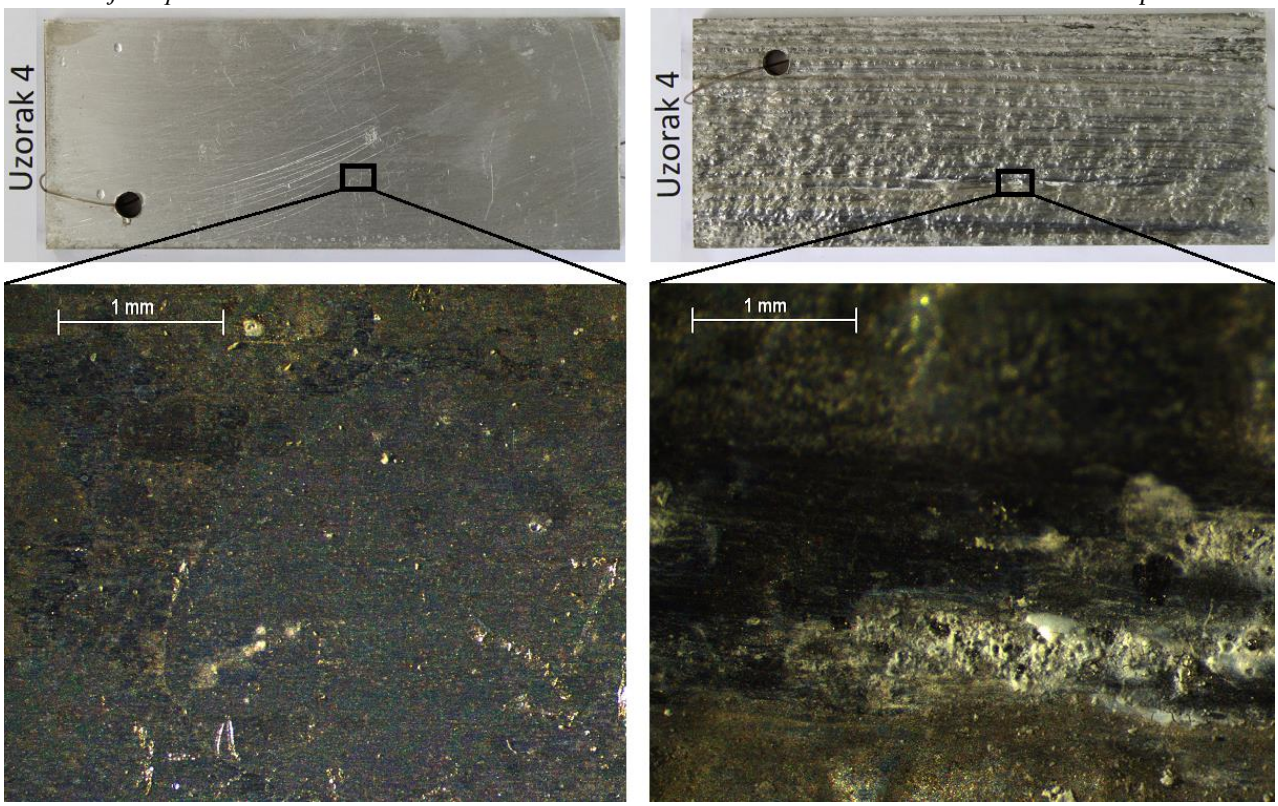
Slika 44. Uzorci postavljeni u slanu komoru

7.12.2. Rezultati ispitivanja

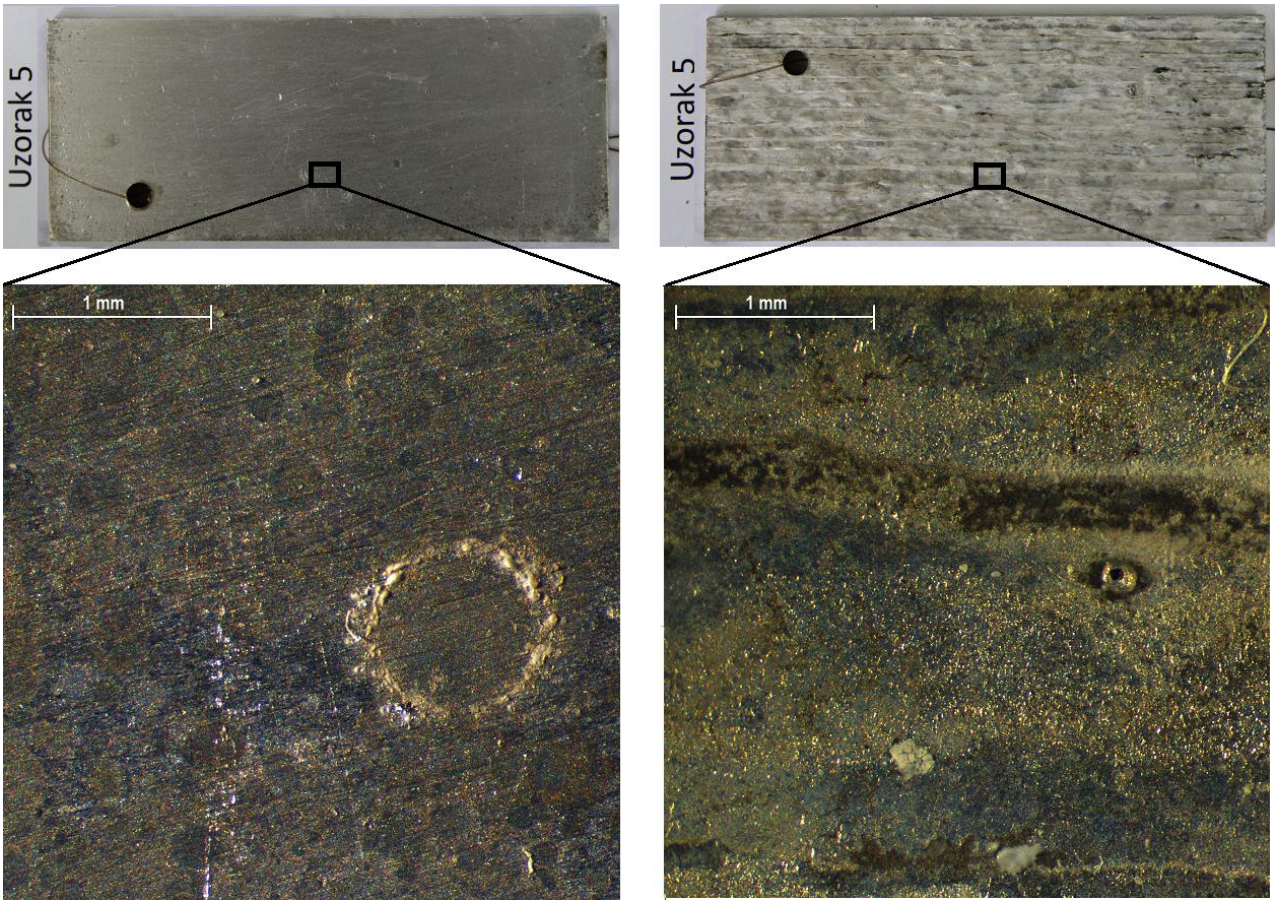
Nakon provedbe izlaganja uzoraka morskoj atmosferu u slanoj komori, na slici 45, 46, 47 i 48 prikazani su uzorci sa obrađene i neobrađene strane nakon 36 sati ispitivanja. Na slikama su također i pogledi izvedeni sa stereo mikroskopom. Tragovi korozije na niti jednom od uzoraka nisu vidljivi.



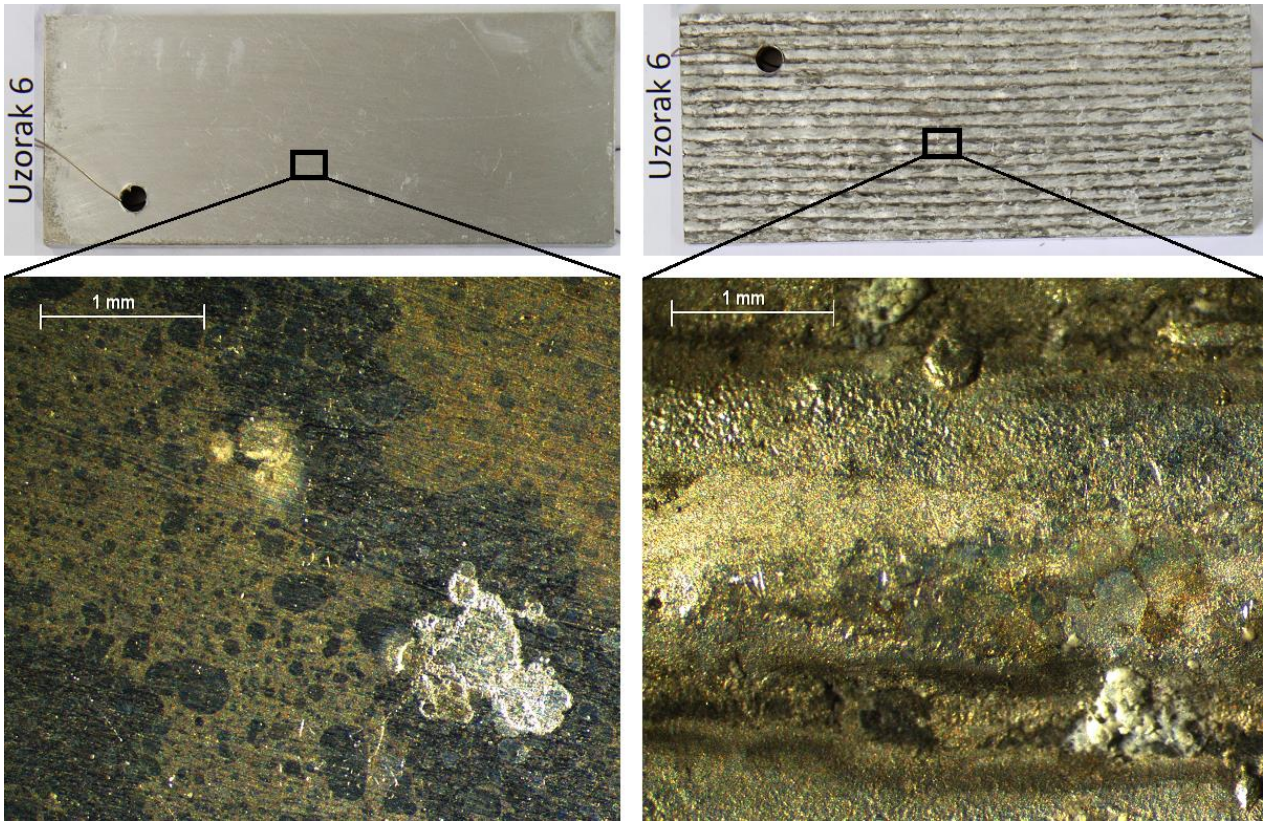
Slika 45. Prikaz nakon 36 sati izlaganja uzoraka 2 slanoj komori



Slika 46. Prikaz nakon 36 sati izlaganja uzoraka 4 slanoj komori



Slika 47. Prikaz nakon 36 sati izlaganja uzoraka 5 slanoj komori

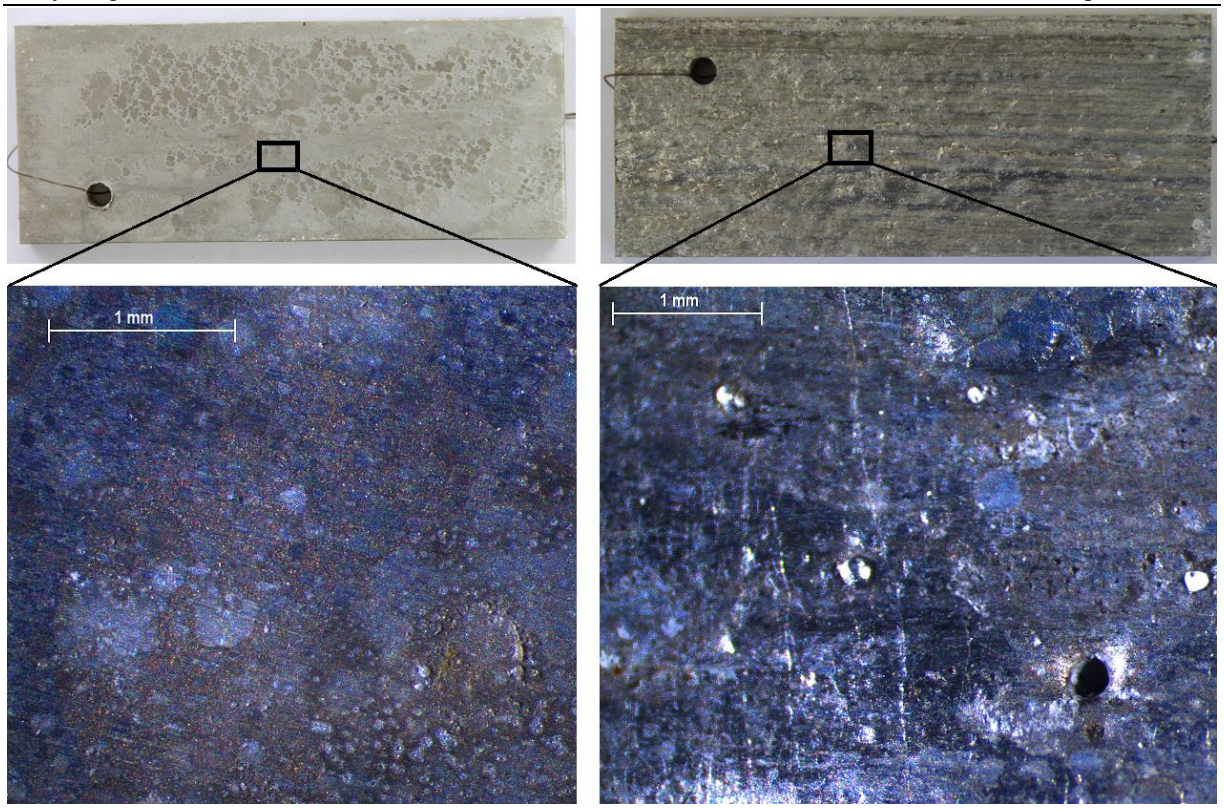


Slika 48. Prikaz nakon 36 sati izlaganja uzoraka 6 slanoj komori

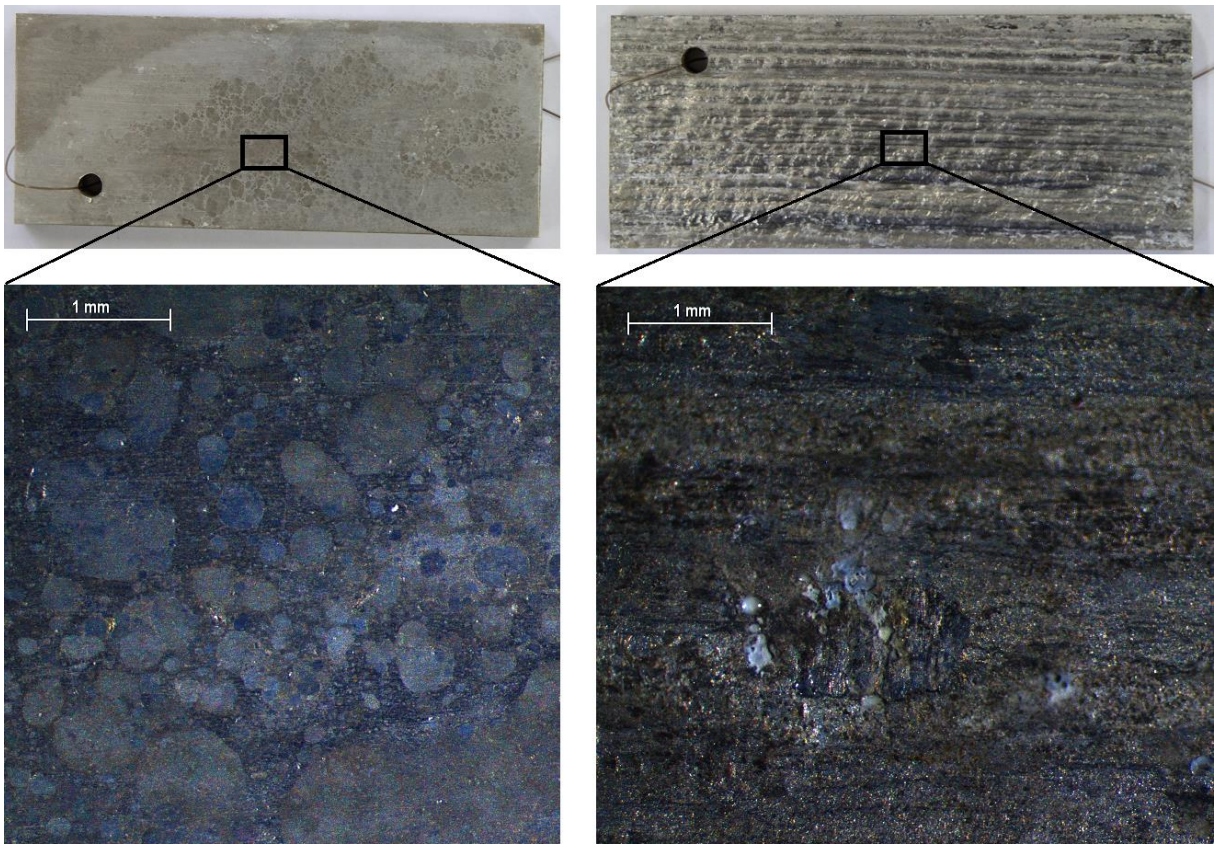
Iz priloženih slika vidljivo da na uzorcima nisu vidljivi znaci korozije, eventualno smeđi trakovi koji su vidljivi tek pod mikroskopom i označuju površinsku koroziju. Nakon slikanja uzoraka ponovo su vraćeni u slanu komoru na daljnje ispitivanje.

Preostalo ispitivanje u komori trajalo je dodatnih 204 sata, što u konačnici iznosi 240 sati ispitivanja. Slikama 49, 50, 51 i 52 ponovo su prikazani uzorci sa obrađene i ne obrađene strane za završno stanje uzoraka.

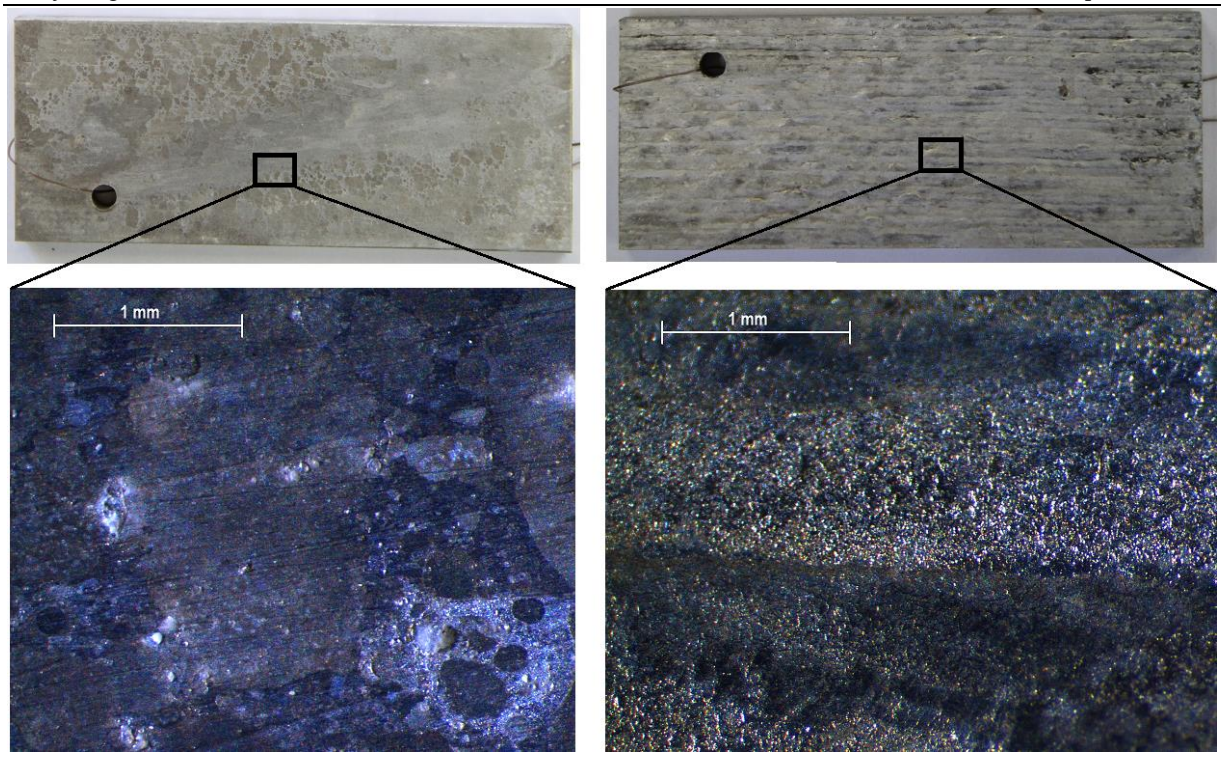
Iz priloženih slika je vidljivo da očitiji znakovi ne postoje. Slike na mikroskopu sadrže drugačiju nijansu radi osvjetljenja, a po površini uzorka vidljivi su svjetliji tragovi natrijevog klorida koji je prisutan u komori. Svi uzorci pokazali su dobra antikorozivna svojstva u simuliranoj morskoj atmosferi.



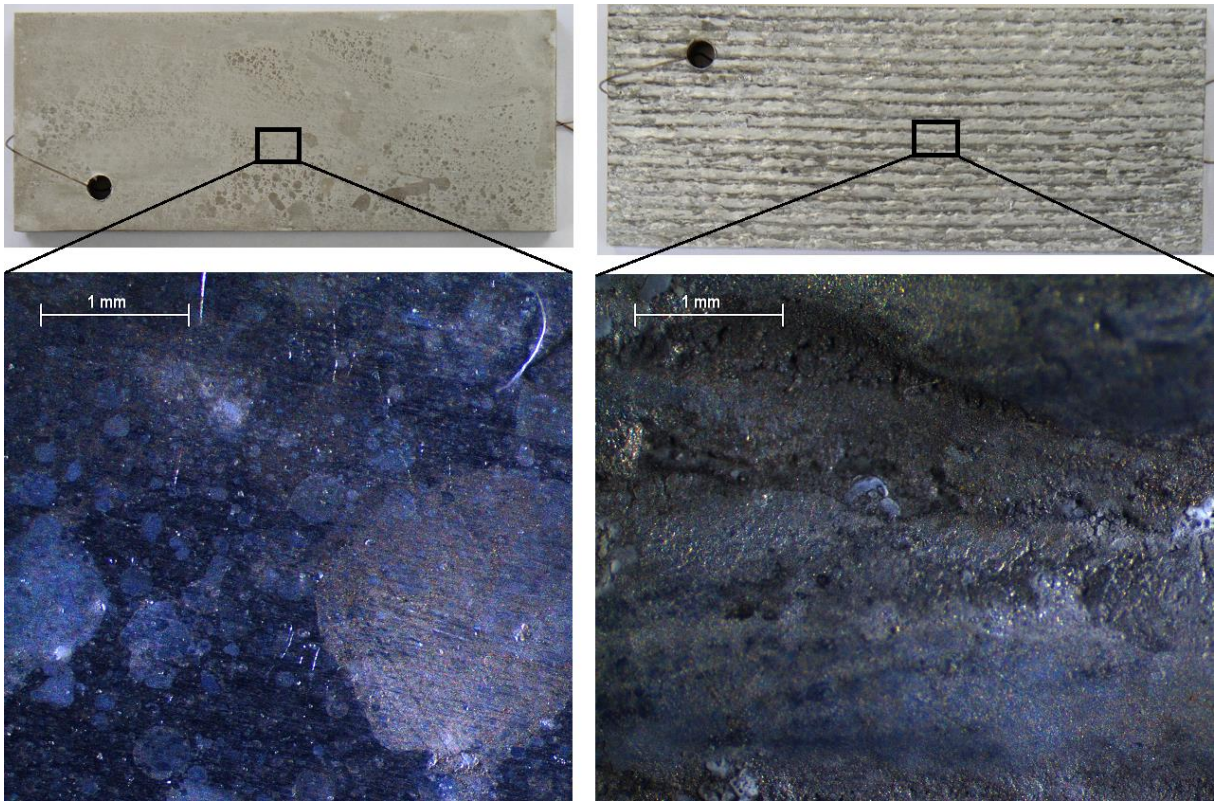
Slika 49. Prikaz nakon 240 sati izlaganja uzoraka 2 slanoj komori



Slika 50. Prikaz nakon 240 sati izlaganja uzoraka 4 slanoj komori



Slika 51. Prikaz nakon 240 sati izlaganja uzoraka 5 slanoj komori



Slika 52. Prikaz nakon 240 sati izlaganja uzoraka 6 slanoj komori

8. ZAKLJUČAK

Primjena aluminijevih legura u aditivnoj proizvodnji žicom i električnim lukom poprilično je nova tehnologija koja je još uvijek postepeno u razvoju. Njezin razvoj potiče se radi poticanja produktivnosti i profita, uz smanjenje troškova koji se odnose na vrijeme i materijal. U ovom diplomskom radu izrađeni su uzorci jednostavne geometrije, no s obzirom na njihovu kvalitetu može se zaključiti da je ovaj postupak primjenjiv i kod proizvoda složenije geometrije.

Cilj eksperimentalnog dijela rada bio je izraditi više uzoraka primjenom optimalnih parametara te robotiziranog zavarivanja koristeći CMT postupak i konvencionalni postupak zavarivanja. Izrađeni uzorci postigli su zadovoljavajuću razinu kvalitete. Geometrija svih uzoraka je na zavidnoj razini, a tipične greške kod zavarivanja aluminija kao što su pore i uključci nisu prisutni ili su prisutni u zanemarivoj količini. Prilikom izrade uzoraka uočeno je intenzivnije povećanje visine uzoraka koji su izrađeni CMT postupkom zavarivanja koji je omogućio manji unos topline i rasprskavanje, što slijedno tome omogućuje pravilnije taloženje dodatnog materijala. Ovaj podatak potvrđuju i širine uzoraka 5 i 6 koji su izrađeni identičnim parametrima kao i uzorci 2 i 4. Uzorci izrađeni CMT postupkom zavarivanja postigli su u konačnici za 1 mm manju širinu u usporedbi sa uzorcima izrađenim konvencionalnim MIG impulsnim postupkom. Ovakvi rezultati ne začuđuje previše zbog toga što je CMT mnogo napredniji postupak zavarivanja koji pruža kvalitetnije izvedbe zavare, međutim i konvencionalan MIG postupak je pružio zavidnu kvalitetu uzorka uz poprilično nižu cijenu opreme za zavarivanje. U konačnici njihovu primjenu za provedbu WAAM tehnologije treba regulirati kroz usporedbu željene cijene i kvalitete proizvoda.

Kod ispitivanja tvrdoće treba napomenuti da je korištena metoda ispitivanja po Vikersu (HV10) koja nije konvencionalna metoda mjerenja tvrdoće za aluminij, no ipak je provedena radi utvrđivanja razlika u tvrdoći između pripremljenih uzoraka. Provedeno je 15 mjerenja za svaki uzorak, međutim rezultati su se bazirali za sredinu uzorka, budući da je su za daljnja ispitivanja WAAM zidovi odvojeni od podloge. Iz rezultata ispitivanja vidljiv je poprilično konstantan iznos tvrdoće uz blage varijacije duž uzorka. Najviši prosjek tvrdoće zabilježio je uzorak 5, dok je najmanji zabilježio uzorak 2 dok je pad vrijednosti zabilježen samo u zoni spajanja zida i podloge.

Ispitivanje kemijskog sastava uslijedilo je nakon mjerenja tvrdoće. Svaki od uzoraka mehanički je obrađen sa jedne strane, dok je druga ostala u izvornom obliku. Rezultati za svaki uzorak govore da su različite strane uzoraka sadržavale razliku u udjelu legirnih elemenata. Konkretno, ne obrađene strane sadržavale su u prosjeku 6,5 % više magnezija te isto toliko deficita aluminija. U zaključku ovih rezultata može se reći da su vjerojatno ostvareni zbog različitog načina skrućivanja i solidifikacije legirnih elemenata prilikom izrade WAAM zidova (uzoraka).

Ispitivanje parametara teksture površine provedeno je u svrhu dobivanje podataka o kvaliteti površine uzoraka. Za parametre Sz i Sq uzorci 2 i 6 postigli su najveće razlike u vrijednostima ovih parametara, a parametri zavarivanja po kojima su izrađeni bili su identični. Uzorak 2 je izrađen MIG impulsnim, a uzorak 6 CMT postupkom zavarivanja. Za uzorke 4 i 5 ovi parametri bilježe slične vrijednosti. Za parametar Sku ponovo najviše razlike u vrijednostima bilježe uzorci 2 i 6, s time da je ovaj put najveću vrijednost postigao uzorak 2. Što se tiče parametra Ssk uzorci 2 i 5 bilježe negativne vrijednosti ovog parametra dok je za uzorak 4 i 6 ovaj parametar pozitivan. U konačnici, na temelju dobivenih parametara može se zaključiti da je razina kvalitete površine uzoraka izrađena WAAM postupkom zavarivanja postigla zadovoljavajuću kvalitetu. Za postizanje kvalitetnije i fino obrađene površine proizvoda izrađenih ovom tehnologijom moguće je primijeniti neku od mehaničkih obrada, sve ovisno o potrebama i zahtjevima za proizvod.

Posljednje provedeno ispitivanje bilo je izlaganje uzoraka simuliranim morskim uvjetima u slanoj komori. Na ovo ispitivanje postavljena je posebna pozornost budući da su korišteni materijali za izradu WAAM zidova bile AlMg legure za koje proizvođač navodi sigurno korištenje u morskoj atmosferi. Nakon provedenog ispitivanja može se zaključiti da su svi uzorci postigli zadovoljavajući rezultat bez ozbiljnije naznake o razvijanju korozije, tj. nije došlo do probijanja površinskog sloja aluminijevih oksida koji ovom materijalu pružaju zavidno visoku razinu zaštite od korozije. Na kraju se može reći da su ovi materijali svakako primjenjivi za provedbu WAAM postupka izrade proizvoda, jer njegovom provedbom ne narušuje se antikorozivnost materijala.

Provedbom eksperimentalnog dijela rada te izradom uzoraka 5 i 6 pokazalo se osobito prikladnim korištenje CMT postupka za provedbu aditivne proizvodnje žicom i električnim lukom. Uzorci su postigli zadovoljavajuće rezultate s obzirom na kvalitetu površine i

antikorozivna svojstva. Ovaj postupak zavarivanja omogućuje smanjeni unos topline koji sa sobom nosi brojne prednosti kao što su ušteda energije, veća preciznost, manje deformacije, uz mogućnost zavarivanja sa vrlo niskim parametrima, koji omogućuju WAAM-u izradu proizvoda manjih debljina. Daljnji razvoj i istraživanje ovog postupka zavarivanja za primjenu u WAAM tehnologiji mogao bi se usmjeriti na kombinaciju niskih i visokih parametara zavarivanja, te izradu proizvoda složenije geometrije sa različitim debljinama stjenki posebice od aluminijskih legura.

LITERATURA

[1] https://phys.org/news/2017-12-additive.html (dostupno: 12.3.2019.)

[2] A. Pilipović: Iz svijeta plastike i gume, članak: Aditivna proizvodnja, 2013.

[3] A. C. Addison, J. Ding., M. Filomeno, H. Lockett, S. Wiliams: Manufacture of Complex Titanium Parts using Wire + Arc Additive Manufacturing

[4] https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/information/additive-manufacturing-processes (dostupno: 12.3.2019.)

[5] A. Pilipović: Aditivni postupci (e. Additive Manufacturing – AM), predavanje, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

[6] Dr Filomeno Martina + the WAAMMat team Welding Engineering and Laser Processing Centre: Wire + Arc Additive Manufacturing: properties, cost, parts, Welding Engineering and Laser Processing Centre, Cranfield University

[7] I. Tabernero, A. Paskual, P. Alvarez, A. Suarez: Study on Arc Welding processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing; LORTE Technological Centre; 19. CIRP konferencija elektro fizičke i mehaničke obrade, 2018, Bilbao, Španjolska.

[8] S. W. Williams, F. Martina*, A.C. Addison, J.Ding, G. Pardal, P. Colegrove:Wire + Arc Additive Manufacturing, Materials Science and Technology, Vol. 32, Iss. 7, pp.641-647, Informa UK Limited, 2016

[9] E.M.Ryan,T.J.Sabin, J.F.Watts, M.J.Whiting: The influence of build parameters and wire batch on porosity of wire and arc additive manufactured aluminium alloy 2319, Journal of Materials Processing Tech., Department of Mechanical Engineering Sciences, University of Surrey, Guildford, Surrey, United Kingdom; Elsevier B.V. 2018.

[10] T.Artaza, A. Alberdi, M. Murua, J. Gorrotxategi, J. Frias, G. Puertas, M.A.Melchor, D. Mugica, A. Suarez: Design and integration of WAAM technology and in situ monitoring systen in a gantry machine, Manufacturing Engineering Society International Conference 2017, MESIC 2017, Vigo, Španjolska, Elsevier B.V, 2017

[11] https://makemoneywelding.com/8-ways-to-avoid-weld-porosity/(dostupno: 20.3.2019)

[12] I. Tabernero, A. Paskual, P. Alvarez, A. Suarez: Stuy on Arc Welding processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing; LORTE Technological Centre; Španjolska; Elsevier B.V, 2018

[13] S. Selvi, A. Vishvaksenan, E. Rajasekar: Cold metal transfer (CMT) technology- An overview, Mechanical Engineering, Institute of Road and Transport Technology, Erode, India, Elsevier B.V, 2018

[14] http://www.pse.pbf.hr/hrvatski/elementi/al/spojevi.html (dostupno: 27.3.2019)

[15] S. Jakovljević, K. Grilec: Aluminijeve legure; Predavanja iz kolegija „Materijali cestovnih vozila“, 2017.

[16] D. Radočaj, M. Jurica, S. Kos, T. Pavlic: Programiranje industrijskih robota za potrebe robotiziranog zavarivanja; Časopis Zavarivanje, broj 59, 2016.

[17] V. Rede: Označivanje Al i Al- legura, prezentacija, (dostupno 22.11.2017)

[18] N. Malešević: Osnovni nauke o materijalima IV; Metalurgija obojenih metala; Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb; 1965.

[19] http://www.totalmateria.com/Article75.htm (dostupno: 1.4.2019.)

[20] D. Radočaj, M. Jurica, S. Kos, T. Pavlic: Programiranje industrijskih robota za potrebe robotiziranog zavarivanja; Časopis Zavarivanje, broj 59, 2016.

[21] I. Ciglar, Z. Botak: Upravljanje i primjena robota za zavarivanje „REIS ROBOTICS RV6L“, Veleučilište u varaždinu, Varaždin

[22] Almega AX series, Instruction manual, "Basic operations", OTC DAIHEN EUROPE GmbH., Krefelder Strasse 675-677, D-41066 Monchengladbach

[23] http://www.ceweld.com/en/product/almg-5 (dostupno: 15.5.2019.)

[24] http://www.ceweld.com/en/product/almg-45mn (dostupno: 15.5.2019.)

[25] http://www.messer.hr/sheet/STL-Argon-_odobreno.pdf (dostupno: 15.5.2019.)

[26] https://www.michmet.com/3d_s_height_parameters.htm (dostupno: 28.6.2019)

[27] J. L. Prado-Cerqueira, J.L. Dieguez, A.M. Camacho: Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacutirng system (WAAM), Manufacturing Engineering Society International Conference 2017, MESIC 2017, Vigo, Spain, Elsevier B.V, 2017

PRILOZI

I. CD-R disc