Primjena CMT postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom

Kušević, Matija

Undergraduate thesis / Završni 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:235:223423

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

ZAVRŠNI RAD

Matija Kušević

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Matija Kušević

Zagreb, 2019.

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

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

Matija Kušević

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

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

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **MATIJA KUŠEVIĆ** Mat. br.: **0035200458**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **PRIMJENA CMT POSTUPKA ZA ADITIVNU PROIZVODNJU ELEKTRIČNIM LUKOM I ŽICOM**

Naslov rada na engleskom jeziku: **APPLICATION OF CMT PROCESS FOR WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING**

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu opisati specifičnosti CMT procesa te navesti prednosti i nedostatke u usporedbi s konvencionalnim MAG zavarivanjem. Ukratko objasniti postupak aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom. U literaturi potražiti primjere primjene CMT postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom te ih detaljno obraditi.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je odrediti optimalno područje parametara za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom koristeći CMT postupak. Optimalne parametre odrediti za više razina brzine žice. Na izrađenim uzorcima ispitati parametre teksture površine te osnovna mehanička svojstva. U konačnici ocijeniti primjenjivost CMT postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom.

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

Zadatak zadan:
29. studenog 2018.

Zadatak zadao:
Prof. dr. sc. Ivica Garašić

Rok predaje rada:
1. rok: 22. veljače 2019.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.
3. rok: 20. rujna 2019.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.
3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Predsjednik Povjerenstva:
Prof. dr. sc. Branko Bauer

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. Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom 3
2.2. Prednosti i nedostaci WAAM tehnologije [7] 4
2.3. Primjena WAAM tehnologije 5
2.4. Parametri teksture površine 6
2.4.1. Srednje kvadratno odstupanje površine, S_q [12] 7
2.4.2. Srednje aritmetičko odstupanje površine, S_a [12] 8
2.4.3. Najveća visina površine, S_z [12] 8
2.4.4. Koeficijent asimetrije površine, S_{sk} [12] 8
2.4.5. Koeficijent oštrine površine, S_{ku} [12] 9
2.4.6. Najveća visina vrha površine, S_p [12] 10
2.4.7. Najveća visina dna površine, S_v [12] 10
3. COLD METAL TRANSFER 11
3.1. Princip rada CMT procesa [13] 11
3.2. Prednosti i nedostaci CMT procesa [13] 13
3.3. Primjer primjene CMT procesa u WAAM-u [15] 15
4. EKSPERIMENTALNI DIO 19

4.1. Oprema za zavarivanje 23
4.1.1. Dodatni materijal 25
4.1.2. Zaštitni plin 26
4.2. Parametri zavarivanja 27
4.2.1. Praćenje visine uzorka 31
4.3. Ispitivanje parametara teksture površine 32
4.4. Makroanaliza strukture 38
4.5. Mjerenje širine zidova 40
4.6. BTF omjer 42
4.7. Mjerenje tvrdoće 44
5. ZAKLJUČAK 48
6. LITERATURA 50

POPIS SLIKA

Slika 1. Postupak slaganja slojeva u aditivnoj proizvodnji [4] 2

Slika 2. Prikaz proizvoda izrađenih taloženjem sloj po sloj – Baker, 1926. god. [5] 3

Slika 3. Zid izrađen WAAM tehnologijom [6] 4

Slika 4. WAAMpeller - brodski propeler izrađen WAAM tehnologijom [8] 5

Slika 5. MX3D - most dobiven WAAM tehnologijom [9] 6

Slika 6. Leptir [10] 6

Slika 7. Srednje kvadratno odstupanje linije [12] 7

Slika 8. Srednje aritmetičko odstupanje površine [12] 8

Slika 9. Najveća visina neravnina [12] 8

Slika 10. Koeficijent asimetrije površine [12] 9

Slika 11. Koeficijent oštrine površine [12] 9

Slika 12. Najveća visina vrha linije [12] 10

Slika 13. Najveća visina dna linije [12] 10

Slika 14. Princip rada CMT procesa [13] 12

Slika 15. Odnos struje i napona kod CMT procesa [13] 13

Slika 16. Područje CMT procesa [13] 15

Slika 17. Eksperiment [15] 16

Slika 18. Površina navarenih slojeva (lijevo) i presjeci tri uzorka (desno) [15] 17

Slika 19. Tvrdoća po presjeku [15] 17

Slika 20. Fiksirana osnovna ploča 20

Slika 21. Uzorci izrađeni WAAM postupkom 20

Slika 22. Uzorci izrađeni WAAM postupkom - pogled odozgo 21

Slika 23. Uzorci izrađeni WAAM postupkom - pogled s boka 21

Slika 24. Rezanje uzoraka 22

Slika 25. Odrezani uzorci 22

Slika 26. Izvor struje - Fronius TPS 400i CMT [16] 23

Slika 27. Robotska stanica Almega OTC AX V6 [16] 24

Slika 28. Izgled programa 25

Slika 29. Prirast visine za 3 uzorka 31

Slika 30. Skeniranje 3D uzorka 32

Slika 31. 3D prikaz - uzorak 1 33

Slika 32. Parametri teksture površine - uzorak 1 34

Slika 33. 3D prikaz - uzorak 2 34

Slika 34. Parametri teksture površine - uzorak 2 35

Slika 35. 3D prikaz - uzorak 3 35

Slika 36. Parametri teksture površine - uzorak 3 36

Slika 37. Dijagram vrijednosti parametra Ssk 36

Slika 38. Dijagram vrijednosti parametra Sku 37

Slika 39. Dijagram vrijednosti parametra Sz 37

Slika 40. Dijagram vrijednosti uzorka Sq 38

Slika 41. Uzorci nakon brušenja 39

Slika 42. Uzorak 1 (lijevo), uzorak 2 (sredina) i uzorak 3 (desno) - 1. set 39

Slika 43. Uzorak 1 (lijevo), uzorak 2 (sredina) i uzorak 3 (desno) - 2. set 40

Slika 44 . Područje mjerenja širine – uzorak 1 (lijevo), uzorak 2 (sredina) i uzorak 3 (desno) 41

Slika 45. Širine za svaki uzorak 42

Slika 46. Izgled površine za uzorak 1 (lijevo), uzorak 2 (sredina) i uzorak 3 (desno) 43

Slika 47. Raspodjela tvrdoće uzoraka - 1. set 46

Slika 48. Raspodjela tvrdoće uzoraka - 2. set 46

POPIS TABLICA

Tablica 1. Zavarivački parametri 16

Tablica 2. Karakteristike uređaja Fronius TPS 400i CMT [17] 24

Tablica 3. Kemijski sastav žice SG2 [18] 26

Tablica 4. Mehanička svojstva žice SG2 [18] 26

Tablica 5. Kemijski sastav plina [19] 26

Tablica 6. Parametri - Uzorak 1 28

Tablica 7. Parametri - Uzorak 2 29

Tablica 8. Parametri - Uzorak 3 30

Tablica 9. Širine uzoraka 41

Tablica 10. Rezultati mjerenja tvrdoće 45

POPIS KRATICA

Kratica	Izvorni naziv
3D	Three-Dimensional Space
AM	Additive Manufacturing
ASTM	American Society for Testing and Materials
BTF	Buy to Fly
CMT	Cold Metal Transfer
CNC	Computer Numeric Control
ISO	International Ogranization for Standardization
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
OM	Osnovni materijal
RM	Rapid Manufacturing
SFI	Spatter free ignition
WAAM	Wire and Arc Aditive manufacturing
ZUT	Zona utjecaja topline

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_5	%	Istezljivost
KV	J	Udarni rad loma po Charpyu
R_m	MPa	Vlačna čvrstoća
$R_{p0,2}$	MPa	Konvencionalna granica razvlačenja

SAŽETAK

U završnom radu obrađena je tema aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom pomoću CMT postupka. Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu rada objašnjene su osnove aditivne proizvodnje, njene prednosti i nedostaci te parametri teksture površine dobivenog izratka. Teorijski je obrađen CMT postupak zavarivanja, njegov princip rada, prednosti i nedostaci te par primjera primjene.

U eksperimentalnom radu napravljena su tri uzorka WAAM postupkom pomoću robotske stanice CMT postupkom, svaki sa svojim setom parametara te su ispitana njihova svojstva. Pomoću 3D skeniranja određeni su parametri teksture površine, određen je BTF omjer i izmjerena tvrdoća uzorka.

Ključne riječi: CMT postupak, aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom

SUMMARY

In this thesis, the topic of Wire and Arch Additive Manufacturing-WAAM using CMT process is discussed. The paper consists of a theoretical and experimental part.

In the theoretical part, the principles of additive manufacturing were explained, along with its advantages and disadvantages and the parameters of surface texture of the product samples. The CMT welding process, the principle of operation, advantages and disadvantages and the examples of the application of this welding procedure for Wire and Arch Additive Manufacturing are described.

In the experimental part, three samples were made using the robot station and CMT process, every sample with their own set of parameters. 3D scanning of created walls (samples) has been performed and surface texture parameters were determined so as BTF ratio and the hardness was measured.

Key words: CMT process, Wire and Arch Additive Manufacturing

1. UVOD

Aditivna proizvodnja počinje poprimati sve veće razmjere primjene u proizvodnji. Spektar njene upotrebe je vrlo širok te je jako pogodna za izradu dijelova komplicirane geometrije čime se smanjuje broj operacija pri proizvodnji takvih dijelova. Zahtjevi tržišta u današnje vrijeme su vrlo visoki te sami korisnici, a i proizvođači očekuju da proizvod bude što prije napravljen i sa što manjim troškovima. Takav pristup pogoduje aditivnoj proizvodnji jer izrada može biti vrlo brza zbog manje operacija pri izrada, a i jeftinija zbog manjeg utroška materijala i manje odbačenog materijala.

Iako je prvi sinonim za materijal kod aditivne proizvodnje plastika on može biti i metal. Zavarivačka industrija ima svoju aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom (engl. *Wire and Arc Additive Manufacturing* - WAAM) te jedan od bitnijih postupaka je CMT (engl. *Cold Metal Transfer*) radi svojeg niskog unosa energije i topline u radni materijal. WAAM ne bi bio moguć ručnom izradom stoga se svugdje primjenjuju robotske ruke za precizno navarivanje sloj po sloj.

U ovom radu bavit će se suvremenim tehnologijama kao što su aditivna proizvodnja te aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom (WAAM) pomoću CMT postupka. Provedenim eksperimentom pokušala se ispitati primjenjivost postupka te njegova kvaliteta.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja je prikladan naziv za opisati tehnologije kojima dobivamo 3D predmete dodajući sloj po sloj materijala, bio on plastika, metal ili beton [1].

Prema ASTM-u (engl. *American Society for Testing and Materials*) aditivna proizvodnja je proces povezivanja materijala pri izradi objekata izravno iz 3D računalnih modela, najčešće sloj na sloj, što je suprotno postupcima obrade odvajanjem čestica [2].

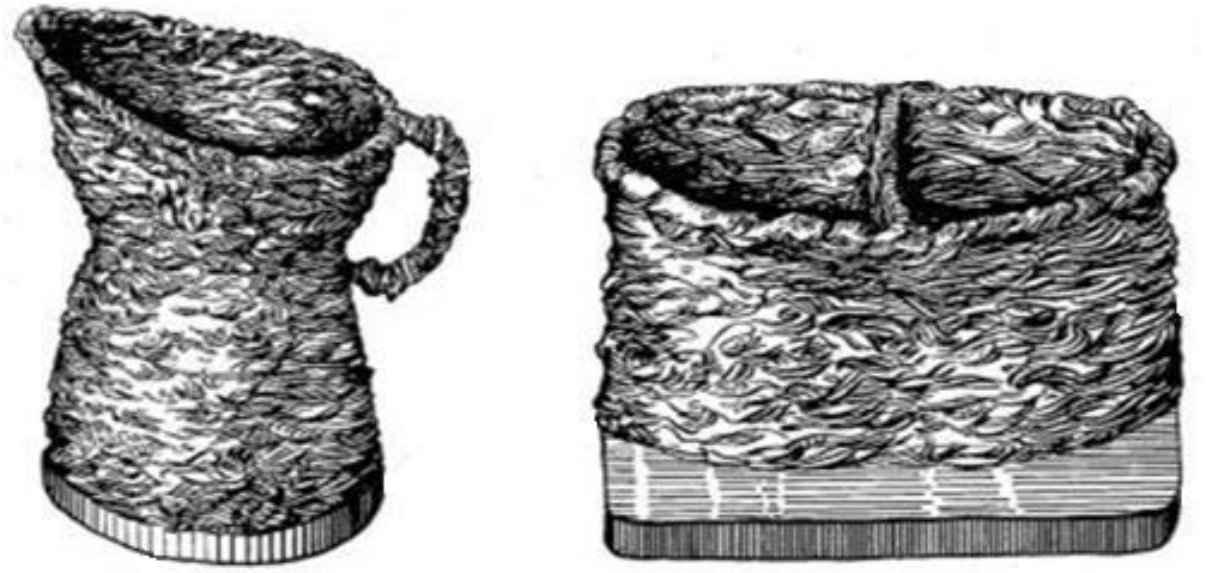
1980-ih počinje se razvijati brza izrada prototipova (engl. *Rapid Prototyping - RM*) koja je omogućila izradu pojedinog dijela odnosno prototipa u kraćem vremenskom razdoblju. Osim brže izrade i smanjenog troška, brza izrada prototipova omogućila je izradu skoro svih mogućih oblika koje je bilo jako teško dobiti strojnom obradom. Prema normi ASTM F42 koja je donesena 2009. rabi se izraz aditivna proizvodnja (engl. *Additive Manufacturing – AM*) [3]. Slika 1 prikazuje proizvod dobiven aditivnom proizvodnjom, dodavanjem sloja na sloj.



Slika 1. Postupak slaganja slojeva u aditivnoj proizvodnji [4]

2.1. Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom

Aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, skraćeno WAAM prvi je patentirao Baker 1926. godine. On je koristio elektrolučno zavarivanje za izradu 3D modela taloženjem taline materijala i nanašanjem sloj po sloj (Slika 2) [5].



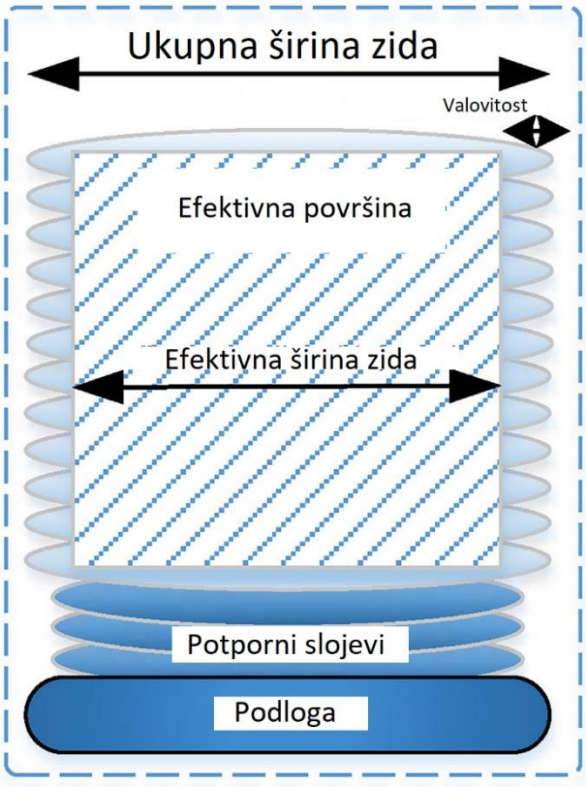
Slika 2. Prikaz proizvoda izrađenih taloženjem sloj po sloj – Baker, 1926. god. [5]

WAAM postupak je relativno nova tehnologija u svijetu zavarivanja te još nije dovoljno razvijena za veću komercijalnu uporabu. Ovaj postupak kombinira elektrolučno zavarivanje i sustav dobave žice te omogućuje slobodu u dizajnu komponente, potencijalno nizak BTF (buy-to-fly) omjer od 1,2 i mogućnost izrade proizvoda svih veličina [6].

BTF je omjer mase sirovca i gotovog proizvoda te je poželjno da on bude što bliže jedinici. Kod nekih obrada titana taj odnos može dosegnuti 20 dok primjenom WAAM tehnologije može doći do smanjenja tog odnosa na 2 time uštedi velike količine materijala. Najčešći postupak zavarivanja u tehnologiji WAAM je MIG zbog koaksijalnosti pištolja i žice čime se postiže lako programiranje i generiranje putanje alata. Popularna inačica zavarivanja je zavarivanje hladnim prijenosom metala, CMT, kod koje se postižu slojevi bolje kvalitete [7].

Slika 3 prikazuje zid dobiven WAAM tehnologijom. Prilikom izrade zida dolazi do pojave valovitosti kao nuspojave. Valovitost se mora ukloniti dodatnom strojnom obradom kako ne bi narušavala mehanička svojstva. Razlika između ukupne širine i efektivne širine zida je

materijal koji se treba ukloniti. Na slici je jasno prikazana visoka učinkovitost, odnosno omjer efektivne i ukupne površine zide. Iz prikazanih površina presjeka moguće je odrediti optimalnost parametara zavarivanja, odnosno moguće je odrediti efikasnost nanošenja depozita [6].



Slika 3. Zid izrađen WAAM tehnologijom [6]

2.2. Prednosti i nedostaci WAAM tehnologije [7]

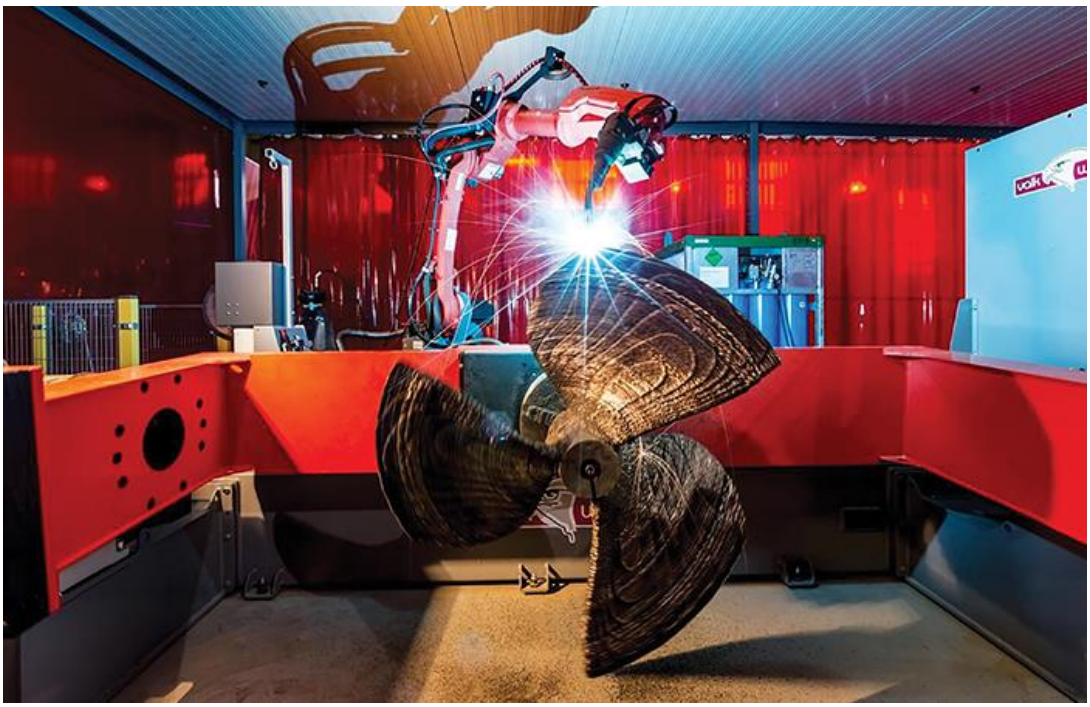
Primjenom WAAM tehnologije ostvaruju se brojne prednosti u odnosu na konvencionalne postupke. Troškovi opreme su smanjeni jer se postojeća oprema za zavarivanje kombinira s robotom ili CNC strojem. Zbog korištenja žice za zavarivanje manji su troškovi materijala i veći je izbor materijala u odnosu na druge AM tehnologije. Moguća je veća brzina izrade, manje je otpada, moguće je proizvesti složenije izratke te komade raznih veličina gdje je jedino ograničenje veličine osnovna ploča ili komora za stvaranje zaštitne plinske atmosfere.

Problemi koji se pojavljuju kod WAAM tehnologije su deformacije, pomaci i zaostala naprezanja. Proizvodi se obično izrađuju tako da se materijal nanosi s jedne strane osnove ploče te se zbog velikog unosa topline ploča deformira. Deformacija teži tome da osnovu ploču „povuče“ prema gore, u smjeru okomitom na smjer taloženja što rezultira i

deformacijom proizvoda. Jedan od načina rješavanja tog problema je pritezanje ploče, ali se onda javljaju zaostala naprezanja u materijalu. Rješenje oba problema je strategija nazvana Balanced Building Strategy ili Symmetrical Building koja se zasniva na tome da se odredi najpogodnija ravnina simetrije komada i da se osnova ploča podudara s tom ravninom. Prilikom izrade se slojevi nanose s obje strane ploče te se tako deformacije i zaostala naprezanja anuliraju. Za dobivanje finalnog proizvoda potrebna je završna obrada što produžuje postupak te ga i poskupljuje te nije pogodno za velikoserijsku proizvodnju.

2.3. Primjena WAAM tehnologije

Primjenjujući WAAM tehnologiju mogu se izraditi razni kompleksni oblici koje inače nije moguće postići konvencionalnim postupcima izrade ili su znatno jeftiniji za izradu zbog manjeg gubitka materijala. Jedna od mogućnosti izrade su brodski propeleri (Slika 4) koji umjesto da se lijevaju i zatim strojno obrade nastaju pomoću WAAM-a te se onda strojno obrade [8].



Slika 4. WAAMpeller - brodski propeler izrađen WAAM tehnologijom [8]

Osim industrijskih mogućnosti postoje i građevinske te je tako u Nizozemskoj 2015. godine započet projekt izrade mosta (Slika 5) koji će biti postavljen preko rijeke u Amsterdamu [9].



Slika 5. MX3D - most dobiven WAAM tehnologijom [9]

Kako ne bi postojala samo funkcionalna svrha pobrinuo se nizozemski inženjer Joris Laarman. U svojem laboratoriju Laarman osim funkcionalnih proizvoda izrađuje i one estetske te je jedan od njegovih eksponata izradak dobiven WAAM tehnologijom u obliku leptira (Slika 6) [10].



Slika 6. Leptir [10]

2.4. Parametri teksture površine

Prilikom izrade proizvoda WAAM tehnologijom bitan aspekt je tekstura površine. Kako bi proizvod imao manje završne obrade želi se postići što bolja tekstura. Norma ISO 25178 definira pojmove, definicije i parametre za određivanje površinske teksture ravninskim metodama. Prema normi postoji šest grupa 3D parametara hrapavosti [11]:

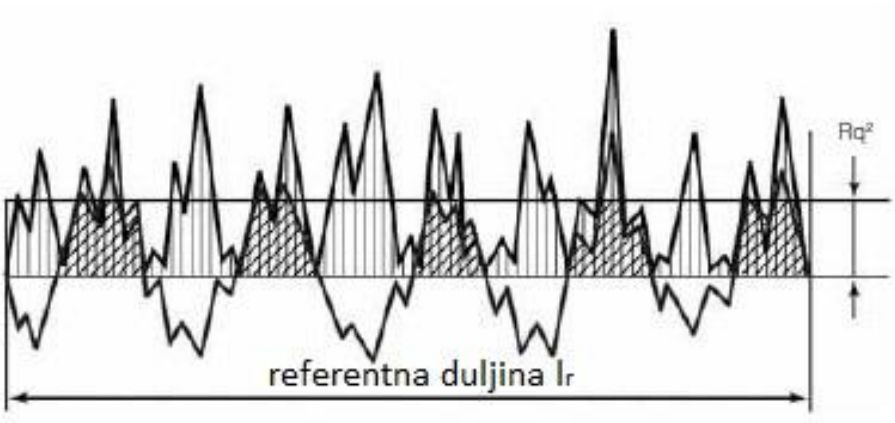
1. Amplitudni parametri
2. Prostorni parametri
3. Hibridni parametri
4. Funkcionalni parametri
5. Parametri značajke
6. Ostali 3D parametri

Nama najbitniji parametri su amplitudni parametri [11]:

- srednje kvadratno odstupanje površine
- srednje aritmetičko odstupanje površine
- najveća visina površine
- koeficijent asimetrije površine
- koeficijent oštrine površine
- najveća visina vrha površine
- najveća visina dna površine

2.4.1. Srednje kvadratno odstupanje površine, S_q [12]

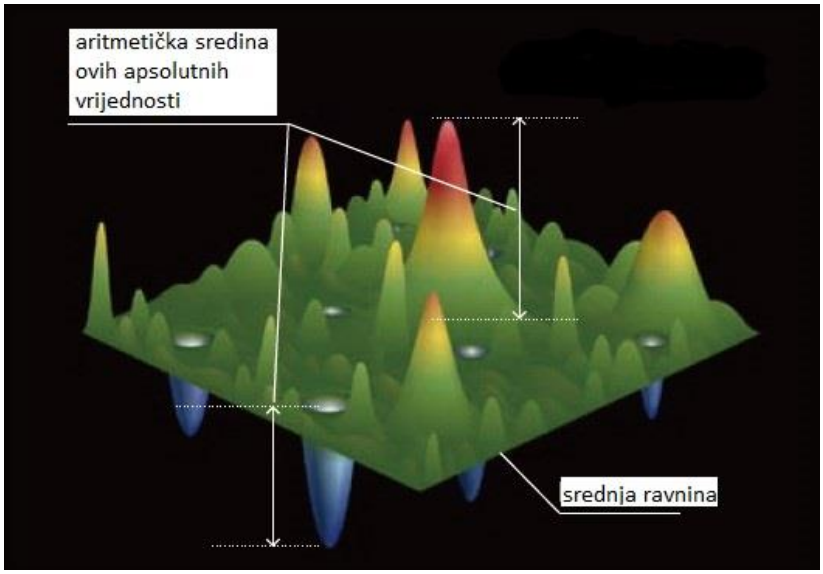
S_q predstavlja srednje kvadratno odstupanje površine na ordinati unutar definiranog područja. To je ekvivalent standardnoj devijaciji visina. Slika 7 prikazuje primjer R_q (srednje kvadratno odstupanje linije), S_q je ravninsko produljenje od R_q.



Slika 7. Srednje kvadratno odstupanje linije [12]

2.4.2. Srednje aritmetičko odstupanje površine, S_a [12]

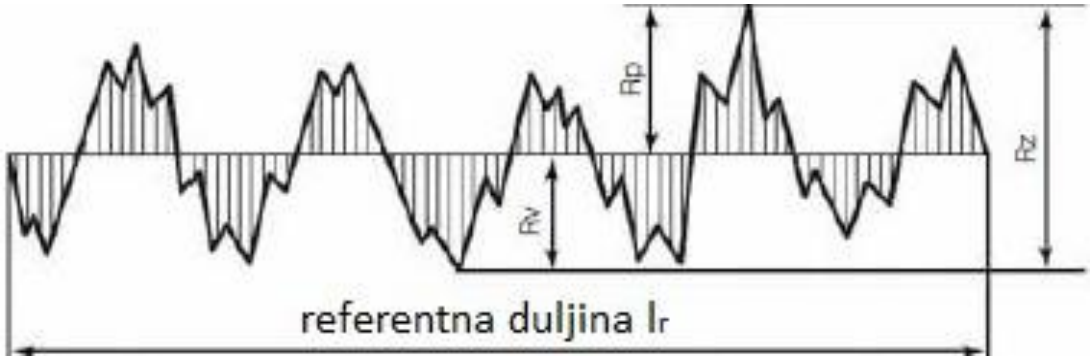
S_a je produljenje od R_a (aritmetička sredina odstupanje profila od srednje linije) na površinu. Izražava se kao apsolutna vrijednost razlike u visinama svake točke u usporedbi s aritmetičkom vrijednosti površine. Ovaj parametar se općenito koristi za procjenu hrapavosti površine. Slika 8 prikazuje primjer parametra.



Slika 8. Srednje aritmetičko odstupanje površine [12]

2.4.3. Najveća visina površine, S_z [12]

S_z je definiran kao suma vrijednosti najvećeg vrha i najvećeg dna unutar definiranog područja. Slika 9 prikazuje primjer R_z (najveća visina neravnina) te je S_z površinsko produljenje R_z.



Slika 9. Najveća visina neravnina [12]

2.4.4. Koeficijent asimetrije površine, S_{sk} [12]

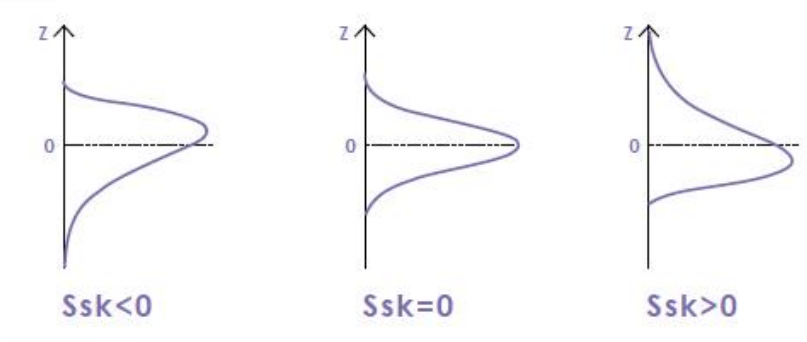
S_{sk} vrijednosti predstavljaju stupanj pristranosti oblika hrapavosti (neravnosti).

$S_{sk} < 0$: Raspodjela visina je iskrivljena iznad srednje ravnine.

$S_{sk} = 0$: Raspodjela visina (vrhovi i udubine) je simetrična oko srednje ravnine.

$S_{sk} > 0$: Raspodjela visina je iskrivljena ispod srednje ravnine.

Slika 10 prikazuje primjere parametra S_{sk}.



Slika 10. Koeficijent asimetrije površine [12]

2.4.5. Koeficijent oštrine površine, S_{ku} [12]

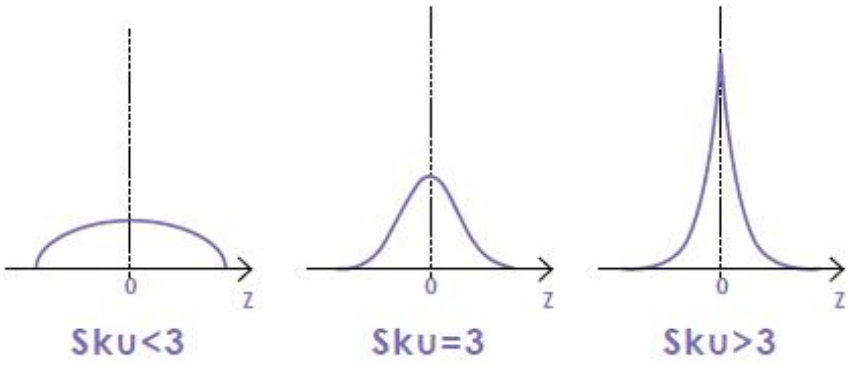
S_{ku} vrijednost je mjera oštrine hrapavosti profila.

$S_{ku} < 3$: Raspodjela visina je iskrivljena iznad srednje ravnine.

$S_{ku} = 3$: Raspodjela visina je normalna.

$S_{ku} > 3$: Raspodjela visina je šiljasta.

Slika 11 prikazuje primjere parametra S_{ku}.



Slika 11. Koeficijent oštrine površine [12]

2.4.6. Najveća visina vrha površine, S_p [12]

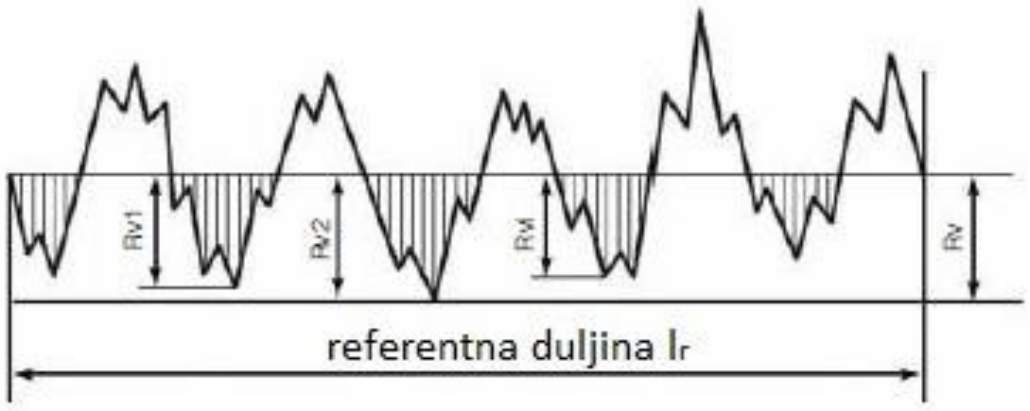
S_p je visina najvećeg vrha unutar određenog područja. Slika 12 prikazuje primjer R_p (najveća visina vrha linije) te je S_p površinsko produljenje od R_p.



Slika 12. Najveća visina vrha linije [12]

2.4.7. Najveća visina dna površine, S_v [12]

S_v je apsolutna vrijednost visine najveće udubine unutar određenog područja. Slika 13 prikazuje primjer R_v (najveća visina dna linije) te je S_v površinsko produljenje od R_v.



Slika 13. Najveća visina dna linije [12]

3. COLD METAL TRANSFER

Pojavom procesa CMT (engl. *Cold Metal Transfer*) došlo je do revolucije u tehnologiji zavarivanja kako opreme tako i njegove uporabe. Granice koje su postojale kod konvencionalnih postupaka poput MIG/MAG mogu se proširiti, npr. moguće je spajanje aluminija i čelika električnim lukom [13].

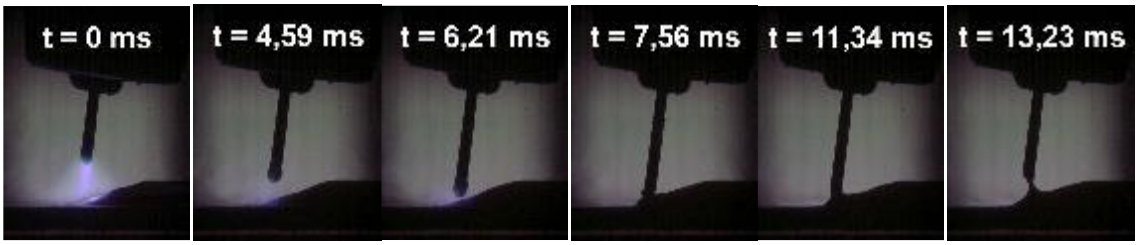
1991. godine tvrtka Fronius počela je istraživati u području spajanja čelika i aluminija električnim lukom. Veliki proboj se mogao ostvariti kod CMT procesa radi niskog unosa topline. Sekundarni izvor kod CMT procesa je paljenje bez štrcanja (engl. *Spatter-free ignition - SFI*) kod kojeg se žica kreće prema naprijed i povlači nazad od radnog materijala. To je bio prvi put da se žica namjerno povlači nazad. 1999. godine kupci zahtijevaju zavarivanje s malo kapljica koje dolaze od žice na tanke materijale. 2002. godine sami proces je bio jako poznat i počeo je CMT projekt, čiji cilj je bio razvoj zavarivačke opreme pogodne za industrijsku upotrebu CMT procesa [13].

3.1. Princip rada CMT procesa [13]

CMT je abrevijacija za Cold Metal Transfer te opisuje proces pod zaštitom aktivnog plina čiji unos topline je manji od konvencionalnih proces pod zaštitom aktivnog plina. Stoga je riječ „hladan“ (engl. *Cold*) u imenu procesa. CMT proces je konvencionalni proces s potpuno novom metodom odvajanja kapljice od žice.

Kod konvencionalnih procesa žica ide naprijed dok ne dođe do kratkog spoja, odnosno dodira žica i radnog materijala. U tom trenutku struja zavarivanja raste te je ona odgovorna za otvaranje kratkog spoja kako bi se luk ponovo zapalio. Postoje dvije glavne značajke CMT procesa: prva značajka je visoka struja kratkog spoja odgovara velikom unosu topline, a druga značajka je da kratki spojevi su nekontrolirani te rezultiraju velikim štrcanjem kod konvencionalnih postupaka.

Kod CMT procesa žica nije samo gurana prema nego i od radnog materijala. Oscilirajuća dobava žice kao dodatnog materijala s prosječnom frekvencijom osciliranja do 70 Hz prikazana je na Slika 14.



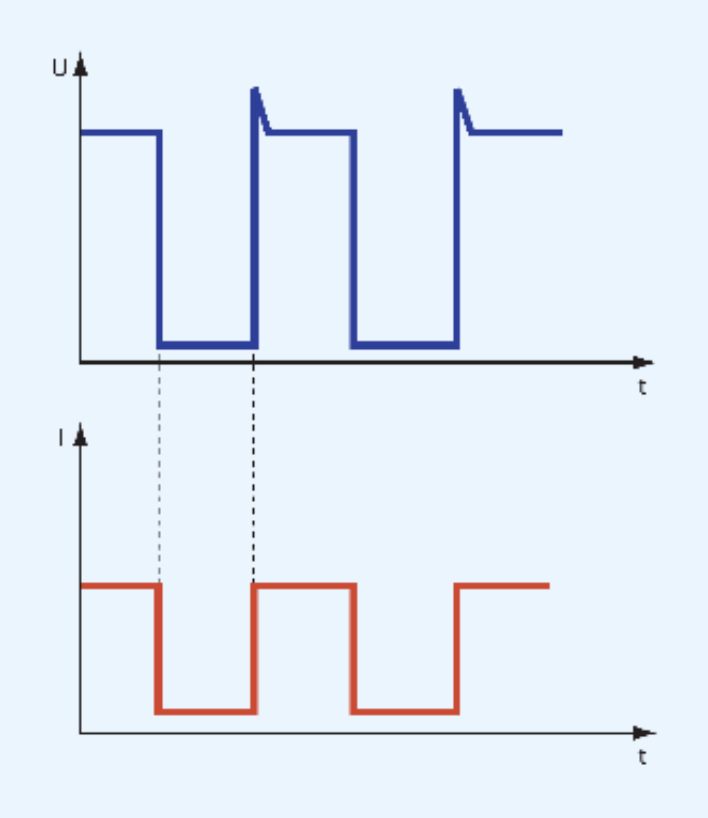
Slika 14. Princip rada CMT procesa [13]

Postoje tri značajke CMT procesa koje ga razlikuju od ostalih konvencionalnih postupaka u zaštiti aktivnog plina.

Prva značajka, kretanje žice je izravno uključeno u kontrolu procesa zavarivanja. Do sada je brzina dobave žice tijekom zavarivanja bila unaprijed određena ili je imala predodređen vremenski raspored. U CMT procesu žica se pomiče prema radnom komadu dok ne dođe do kratkog spoja. U tom trenutku brzina žica je okrenuta i žica se odvlači od radnog komada. Kada dođe do ponovo do kratkog spoja , brzina žica se opet okreće, žica ponovo putuje prema radnom komadu i proces počinje ponovo. Ovdje nema unaprijed određenog vremenskog rasporeda za dobavu žice, nego pojava i otvaranje kratkog spoja određuju brzinu žice i smjer. Stoga kretanje žice određuje što se događa u zavarivačkom bazenu i stvari koje se događaju u zavarivačkom bazenu određuju kretanje žice.

To je razlog zašto se spominje samo prosječna frekvencija osciliranje žice, kada dođe do kratkog spoja malo ranije, povlačenje žice počinje također malo ranije. Kada kratki spoj počne malo kasnije, povlačenje žice također krene malo kasnije. Stoga frekvencija osciliranja žice ovisi o vremenu, ali prosjek je do 70 Hz.

Druga značajka koja karakterizira CMT proces je činjenica da prijenos metala je skoro bez struje, dok konvencionalni postupci imaju visoku struju kratkih spojeva. Kod CMT procesa struja nije odgovorna za otvaranje kratkog spoja. Žica se povlači te to gibanje podržava prijenos metala zbog površinske napetosti otopljenog materijala. Stoga se struja za vrijeme kratkih spojeva može održavati na niskim vrijednostima te je unos topline jako mali. Slika 15 prikazuje odnos struje i napona tijekom CMT procesa.



Slika 15. Odnos struje i napona kod CMT procesa [13]

Konačno, CMT proces je okarakteriziran činjenicom da kretanje žice podržava prijenos metala kako je objašnjeno u tekstu iznad.

Osim konvencionalnog CMT postupka postoji još njih nekoliko: CMT-P, CMT-ADV i CMT-PADV. Slovo „P“ označava korištenje impulsne struje, kratica „ADV“ (skraćeno od advanced, *engl.* napredno) označava zamjenu polariteta struje zavarivanja u fazi kratkog spoja CMT ciklusa, a „PADV“ opisuje razliku polariteta impulsnog ciklusa [14].

3.2. Prednosti i nedostaci CMT procesa [13]

Kod konvencionalnih procesa pojavljuje se visoka struja u vremenu između otvaranja kratkih spojeva čime se kratki spoj otvara relativno nekontrolirano te zato ima puno prskanja.

Kod CMT procesa prilikom kratkog spoja struja se može održati na niskim vrijednostima. Prilikom otvaranja kratkog spoja ne dolazi do nekontroliranog otvaranja, nego je on otvoren na kontroliran način zbog povlačenja žice. Ove dvije činjenice rezultiraju da skoro nema štrcanja kod zavarivanja. Prilikom rada s normalnim kutom zakreta pištolja, zavari su doista bez štrcanja. Samo za ekstremne pozicije pištolja može doći do neke vrste štrcanja. To

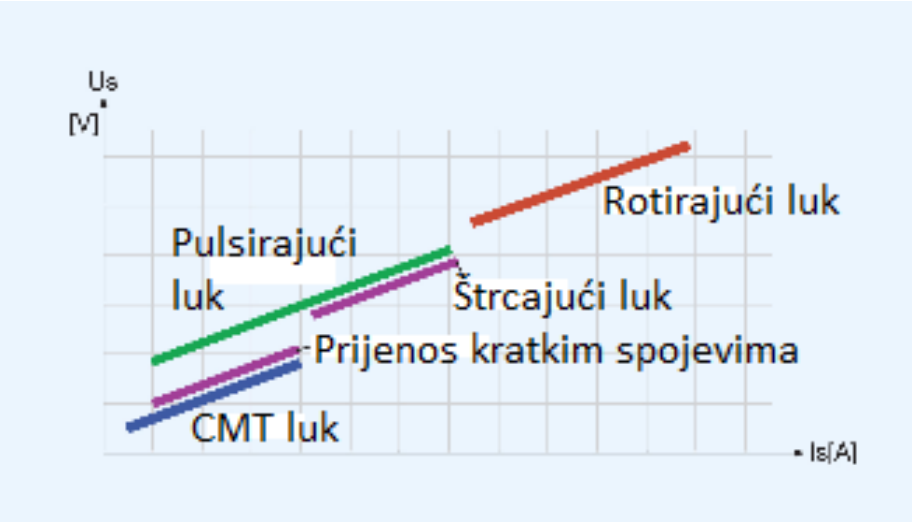
štrcanja proizlazi iz kretanja bazena zavara, a ne zbog samoga procesa. Zbog toga što CMT proces je skoro bez štrcanja nema potrebe za skupom i vremenski zahtjevnom naknadnom obradom.

Sljedeća važna prednost CMT procesa je iznimno dobra kontrola električnog luka. Kod konvencionalnih postupaka mjeri se napon zavarivanja kako bi se odredila duljina električnog luka, ali napon zavarivanja nije jedina funkcija duljine luka nego varira za različite površinske uvjete radnog materijala. Stoga kontrola duljine električnog luka može biti kriva zbog varijacija na površini radnog materijala.

Kod CMT procesa žica se giba prema radnom komadu dok ne nastane kratki spoj, koji odgovara duljini električnog luka koja je nula. Nakon toga žica se povlači od radnog komada na određeno vrijeme, stoga je duljina električnog luka točno rezultat brzine i vremena. Duljina električnog luka kod CMT procesa nije kontrolirana pomoću napona nego je mehanički određena poslije svakog kratkog spoja. Kako frekvencija osciliranja ide do 70 Hz tako i duljina električnog luka se određuje 70 puta u sekundi. Iako se duljina slobodnog kraja žica mijenja, duljina električnog luka ostaje konstantna. Duljina električnog luka se ne mijenja za različite brzine zavarivanja što je bilo tipično za konvencionalne postupke zavarivanja u atmosferi zaštitnog plina.

Treća značajna prednost CMT procesa je spojivost kod većih praznina. Problem kod tankih limova i velikog međuprostora kod konvencionalnih postupaka je veliki unos topline zbog kojeg se prije rastali lim nego se taj međuprostor zavari.

Kao i svi drugi zavarivački postupci i CMT ima svoja ograničenja. Slika 16 prikazuje područje čistog CMT procesa (bez dodatka pulsirajućeg luka) u dijagramu napona i struje.



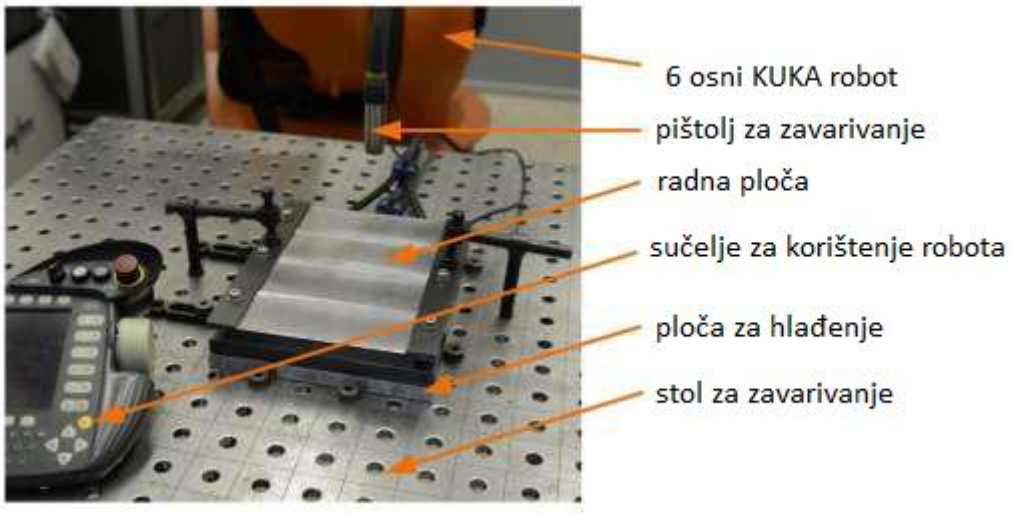
Slika 16. Područje CMT procesa [13]

CMT proces ima gornju granicu pri kojoj se počinje pojavljivati prijelazni luk. Za više vrijednosti struje prijenos kratkim spojevima se više ne pojavljuje te se CMT proces ne može izvoditi. Donja granica CMT procesa je niža uspoređujući je sa standardnim prijenosom kratkim spojevima stoga područje zavarivanja postaje veće.

Dijagram također prikazuje da je snaga i unos topline kod CMT procesa niži nego kod konvencionalnih postupaka.

3.3. Primjer primjene CMT procesa u WAAM-u [15]

Kako bi se ispitali parametri postupka i svojstva uzorka tim istraživača je napravio eksperiment navarivajući sloj po sloj i tako su dobili 3 uzorka u obliku zida. Za eksperiment su koristili šest osni KUKA industrijski robot KR 150-2 i Fronius CMT Advanced 4000 kao izvor struje. Eksperiment se izvodio na fiksiranoj ploči od niskougljičnog čelika S355 dimenzija 200 x 50 x 20 mm^3. Kako bi se osigurala eliminacija oksidnog sloja i nečistoća, površina ploče je bila strojno obrađena i očišćena izopropanolom. Ispod radne ploče se nalazila ploča za hlađenje uzorka kako bi se postigla stalna temperatura od 17 °C. Kao dodatni materijal koristila se bakrena žica promjera 1 mm, sastava materijala 1.2343 (37CrMoV 5-1), a kao zaštitni plin koristila se mješavina 18% CO_2 i 82% Ar. Slika 17 prikazuje izgled eksperimenta.



Slika 17. Eksperiment [15]

Prije samog eksperimenta obavljen je manji test koji je odredio granice procesa te procijenio sam proces i karakteristike zavarivanja. Nakon što su određeni parametri i granice postupka počelo se s izrađivanjem zidova visine 23 mm s parametrima danim u Tablica 1. Prolazna temperatura je bila 25 °C. Zadaća eksperimenta je bila odrediti utjecaj temperature svakog prolaza i energiju po jedinici duljine na mehanička svoja i mikrostrukturu. Kako bi se uravnotežila geometrija, svaki završetak navara je bio početak sljedećeg navara.

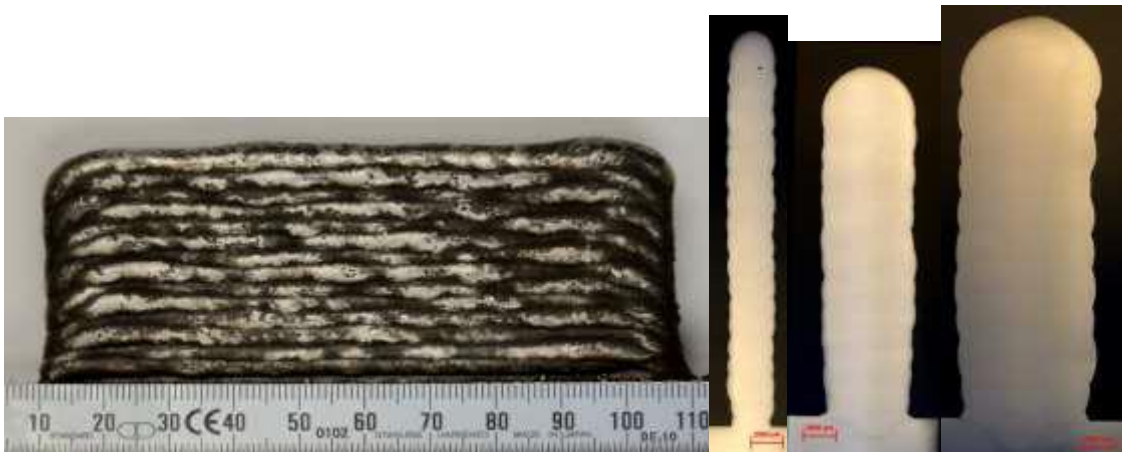
Tablica 1. Zavarivački parametri

Set parametara	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
Brzina dobave žice	4 m/min	13 m/min	10 m/min
Brzina zavarivanja	0,7 m/min	0,9 m/min	0,3 m/min
Energija luka	0,95 kJ/cm	2,2 kJ/cm	5,5 kJ/cm
Temperatura prolaza	100-200-300-400-500-600 °C		

Eksperimentom je zaključeno da je unesena energija po jedinici duljine veća pri većim brzinama dobave žice i manjim brzinama zavarivanja. Rezultati su također pokazali da je utjecaj brzine dobave žice na unos energije po jedinici duljine veći pri brzinama do 7 m/min. Pri većim brzinama dobave žice, brzina zavarivanja obratno ima veći utjecaj na unos energije po jedinici duljine.

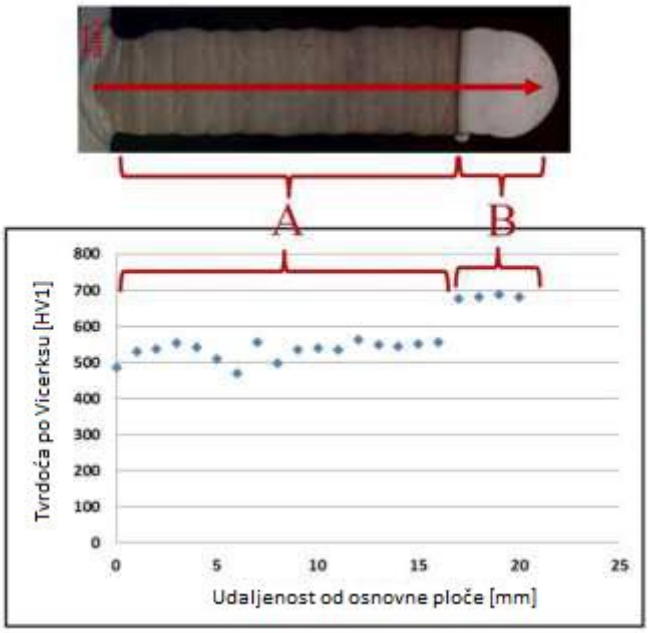
Povećanjem brzine dobave žice i smanjenjem brzine zavarivanja dovelo je do većih širina navarenih slojeva. Brzina dobave žice nije mogla prijeći iznad 13 m/min zbog ograničena

izvora struje. S ovim parametrima, širine navara varirale su između 2,7 i 9,4 mm. Brzina zavarivanja ima veći utjecaj na visinu navarenog sloja od brzine dobave žice. Pomoću tri seta parametara i tri različita unosa energije dobivena su tri uzorka. Slika 18 (lijevo) prikazuje dobivenu geometriju dok Slika 18 (desno) prikazuje presjeka sva tri uzorka gdje se jasno vide različite širine navarenih slojeva.



Slika 18. Površina navarenih slojeva (lijevo) i presjeci tri uzorka (desno) [15]

Ispitivanje tvrdoće se vršilo uzduž visine uzorka po sredini svakog uzorka. Sva tri uzorka su imala slične vrijednosti tvrdoće. Na uzorku se pojavljuju dva područja različitih tvrdoća, A i B (vidi Slika 19). Područje A ima vrijednost tvrdoće oko 500 HV1 te je poprimilo tamniju boju. Područje B ima vrijednost tvrdoće oko 690 HV1 te je svjetlije boje.



Slika 19. Tvrdoća po presjeku [15]

Ovaj fenomen se dogodio zato što se dio A zakalio te zbog toga mikrostruktura ima manji udio zaostalog austenita. Do toga je došlo jer slojevi nisu postigli temperaturu austenitizacije te su se zbog toga zakalili, što znači da je proizveden zakaljeni martenzit te je dio zaostalog austenita transformiran u martenzit. Efekt zakaljivanja odražava se u nižoj vrijednosti tvrdoće. Kod područja B slojevi se nisu zakalili što je dovelo do strukture sastavljene od martenzitne faze, karbida i zaostalog austenita te zbog toga ima veće vrijednosti tvrdoće u odnosu na područje B. Zbog toga je došlo do hipoteze da bi navareni slojevi trebali biti držani iznad temperature početka pretvorbe martenzita kako bi mikrostruktura ostala u austenitnoj fazi i tako se ne bi pretvorila u martenzitnu fazu.

4. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni rad proveden je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Zadatak eksperimentalno dijela bio je izraditi tri ispitna uzorka u obliku zidića pomoću CMT postupka zavarivanja i robotske stanice. Cilj eksperimenta je bio ispitati utjecaj parametara zavarivanja na stabilnost procesa, produktivnost i površinska svojstva uzorka.

Prije početka samo eksperimenta fiksirala se osnova ploča (Slika 20) na koju se navarivalo te je ploča bila očišćena alkoholom kako bi se uklonile nečistoće i masti radi što stabilnijeg luka prilikom navarivanja. Pomoću privjeska za učenje od robotske stanice napravio se mali program koji je simulirao putanju pištolja. Zbog nekompatibilnosti robotske stanice i izvora struje električni luk se palio ručno te je zbog toga postojala odgoda od tri sekunde kada je pištolj došao u početnu točku i ista odgoda kada je došao u krajnju točku. Položaj pištolja je bio neutralan, tj. bez kuta nagiba. Navarivanje se vršilo tako da je jedan prolaz bio u lijevo, a drugi prolaz u desno kako bi se izbjegle nepravilnosti u geometriji uzorka. Prije svakog prolaza u programu bi se prilagodila putanja radi visine uzorka, vršena su mjerenja visine u tri točke te se uzorak hladio puhanjem zraka kako bi temperatura bila ispod 130 °C prije navarivanja novog sloja. Konačni izgled uzoraka nakon navarivanja može se vidjeti na Slika 21, Slika 22 i Slika 23.

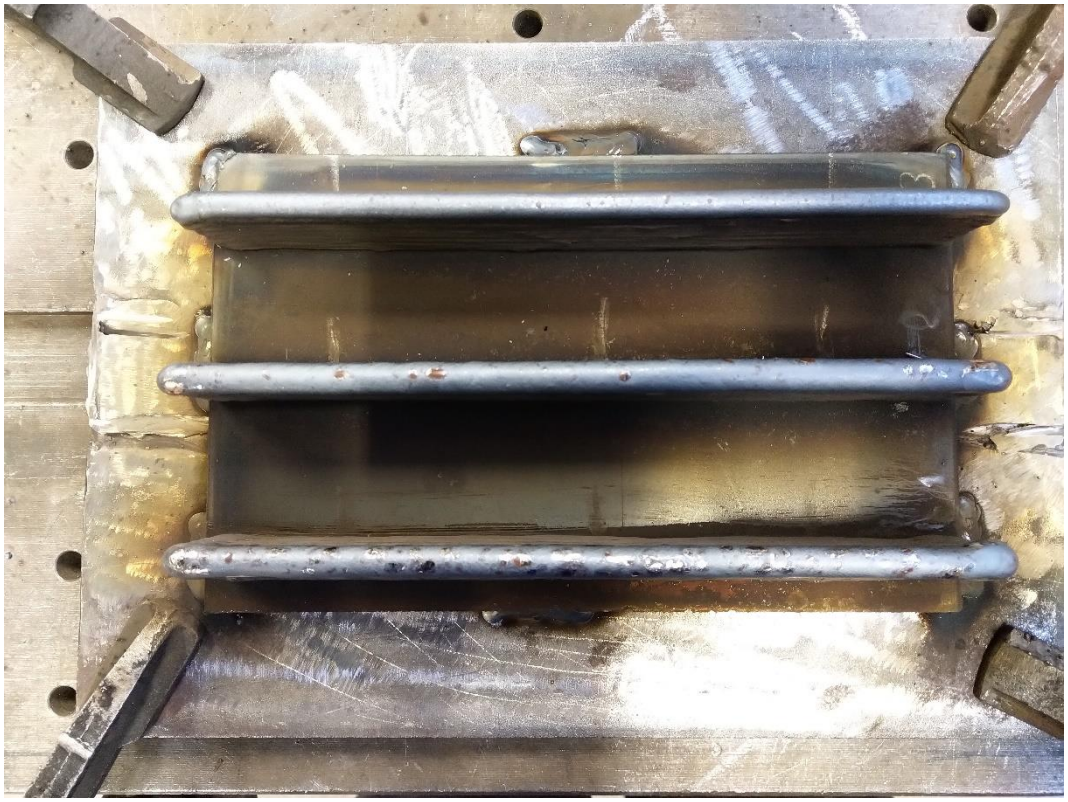
Nakon izrade uzoraka izvršila se pripremna faza strojne obrade odnosno rezanje uzoraka (Slika 24) od osnovne ploče i izrada uzorka potrebnog za daljnja ispitivanja (Slika 25). Sljedeća faza eksperimenta bila je 3D skeniranje teksture površine i ispitivanje tvrdoće uzoraka.



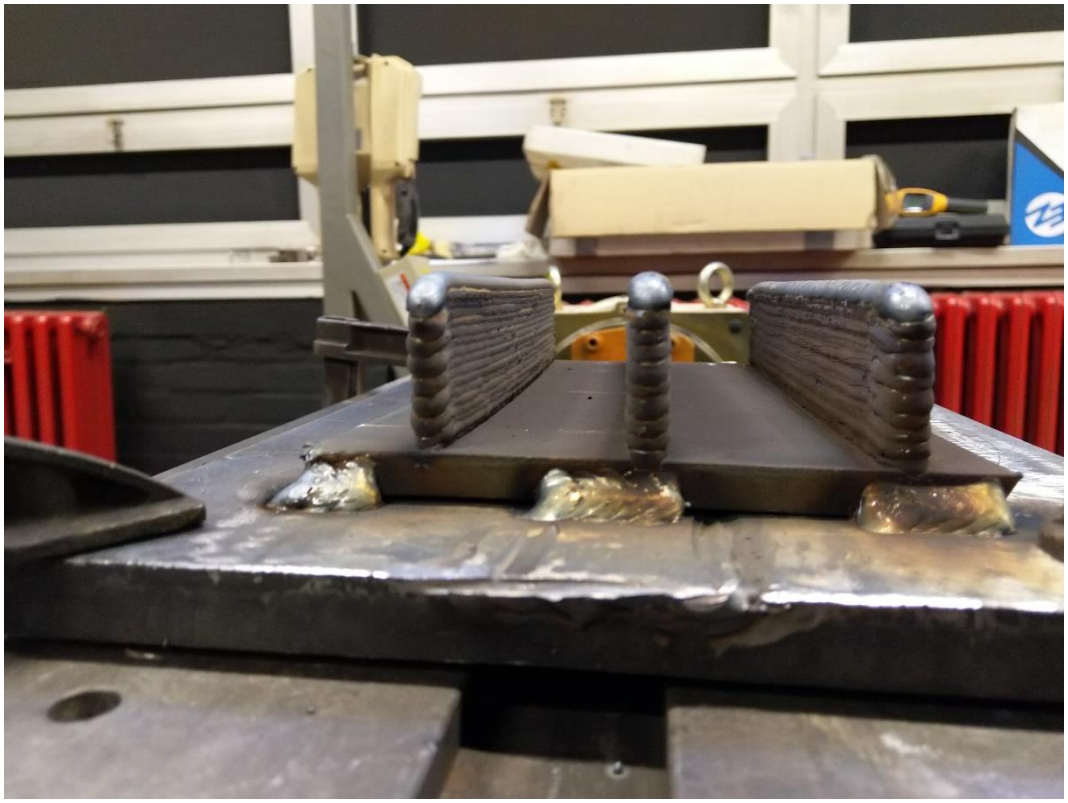
Slika 20. Fiksirana osnovna ploča



Slika 21. Uzorci izrađeni WAAM postupkom



Slika 22. Uzorci izrađeni WAAM postupkom - pogled odozgo



Slika 23. Uzorci izrađeni WAAM postupkom - pogled s boka



Slika 24. Rezanje uzoraka



Slika 25. Odrezani uzorci

4.1. Oprema za zavarivanje

Izvor struje korišten za eksperimentalni dio je Fronius TPS 400i CMT. Specifičnosti CMT uređaja objašnjene su u teorijskom dijelu rada. Na Slika 26 se može vidjeti uređaj koji je neko vrijeme bio smješten u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. U Tablica 2 se mogu vidjeti karakteristike izvora struje.

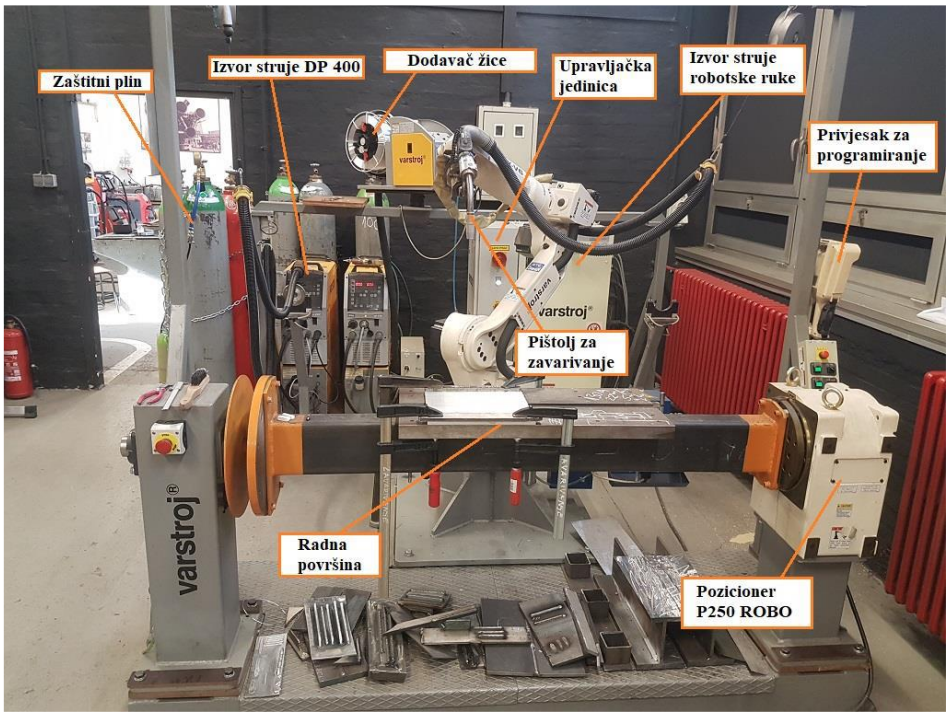


Slika 26. Izvor struje - Fronius TPS 400i CMT [16]

Tablica 2. Karakteristike uređaja Fronius TPS 400i CMT [17]

IZVOR STRUJE		Fronius 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 %	320
	40 %	400
Promjer žice za zavarivanje, mm		0,8 – 1,2
Masa, kg		36,5
Dimenzije (D x Š x V), mm		708 x 300 x 510

Pri izradi zidova korištena je robotska stanica Almega OTC AX V6. Robotska stanica sastoji se od robotske ruke sa šest stupnjeva slobode gibanja koja na sebi ima pištolj za zavarivanje i privjesak za on-line programiranje robota kao što se može vidjeti na Slika 27 te sve njegove dijelove. U ovom slučaju nije korišten izvor DP 400 koji je integriran s robotskom stanicom nego je zamijenjen s Fronius TPS 400i CMT.



Slika 27. Robotska stanica Almega OTC AX V6 [16]

Programiranje robotske ruke se vrši definiranjem putanje gibanja pomoću privjeska za on-line programiranje. Slika 28 prikazuje izgled programa za izradu jednog prolaza.



Slika 28. Izgled programa

4.1.1. Dodatni materijal

Za izradu uzoraka koristila se puna žica SG2, poprečnog presjeka 1,2 mm. Prema EN ISO standardu žica ima oznaku 14341-A: G 42 4 C/M 3Si 1. Ova vrsta žice spada u bakrom ili broncom obložene žice za zavarivanje nelegiranih ili nisko legiranih čelika. Kemijski sastav dodatnog materijala prikazan je u Tablica 3, a njegova mehanička svojstva u Tablica 4 [18].

Tablica 3. Kemijski sastav žice SG2 [18]

SG2	Maseni udio elementa, %			
	C	Mn	Si	Cu
	0,06 – 0,13	1,4 – 1,6	0,7 – 1,0	≤ 0,3

Tablica 4. Mehanička svojstva žice SG2 [18]

SG2	Mehanička svojstva			
	$R_{p0,2}$, MPa	R_m, MPa	A_5, %	KV (-40 °C), J
	> 430	500 - 640	> 22	≥ 47

4.1.2. Zaštitni plin

Plin koji se koristio za zavarivanje bio je mješavina argona i ugljikovog dioksida, trgovačkog naziva Ferroline C18 (proizvođač: Messer Croatia Plin d.o.o). Prema ISO normi 14175 plin ima oznaku M21. Tablica 5 prikazuje sastav odabranog plina [19].

Tablica 5. Kemijski sastav plina [19]

Naziv proizvoda	Grupa po ISO 14175	Volumni sastav, %	
		Ar	CO_2
Ferroline C18	M21	82	18

4.2. Parametri zavarivanja

Zadatak eksperimenta bio je izraditi tri uzorka s tri seta parametara koristeći uvijek isti omjer brzine žice i brzine zavarivanja. Sami parametri određeni su prije nego se počelo s eksperimentom, odnosno nisu se radile probe kako bi se utvrdili optimalni parametri. Cilj je bio dostići visinu uzorka od 40 mm te onda usporediti kvalitetu i produktivnost dobivenih uzoraka.

Za izradu prvog uzorka odabrani su sljedeći parametri:

- brzina žice: 5 m/min
- brzina zavarivanja: 33 cm/min

Za izradu drugog uzorka odabrani su sljedeći parametri:

- brzina žice: 3,5 m/min
- brzina zavarivanja: 23 cm/min

Za izradu trećeg uzorka odabrani su sljedeći parametri:

- brzina žice: 2 m/min
- brzina zavarivanja: 13 cm/min

Tijekom izrade zidove očitavani su parametri jakosti struje zavarivanja i napona zavarivanja. Prilikom svakog prolaza izmjerena je visina zida u tri točke, na krajevima i u sredini. Slobodni kraj žice za sva tri uzorka iznosio je 12 mm. Protok plina Prvog i drugog zida iznosio je 16,5 l/min dok je kod trećeg zida on iznosio 17,5 l/min. Očitani parametri zavarivanja i visine po prolazima za prvi uzorak prikazani su u Tablica 6, za drugi uzorak u Tablica 7, i za treći u Tablica 8.

Unos topline računao se prema sljedećem izrazu [20]:

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

Pri čemu je:

Q – unesena toplina u zavar, kJ/cm

k – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja (uzeta vrijednost je 0,8 kako prepisuje norma)

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v_z – brzina zavarivanja, cm/min

Tablica 6. Parametri - Uzorak 1

Prolaz	Struja, A	Napon, V	Visina, mm			Srednja vrijednost visine, mm	Unesena toplina, kJ/cm
			1	2	3		
1	179	17,3	3,5	3,2	3,5	3,4	4,504
2	182	17,6	5,9	5,8	5,8	5,8	4,659
3	183	17,4	7,8	7,5	7,4	7,6	4,632
4	184	17,5	9,7	9,4	9,5	9,5	4,684
5	184	17,6	11,8	11,2	11,4	11,5	4,710
6	183	17,5	13,9	13,7	13,7	13,8	4,658
7	182	17,7	16,2	15,7	15,4	15,8	4,686
8	186	17,4	18,0	17,9	17,6	17,8	4,707
9	188	17,5	19,9	19,6	19,5	19,7	4,785
10	186	17,5	21,9	22,1	21,8	21,9	4,735
11	186	17,4	24,1	24,0	23,7	23,9	4,707
12	185	17,5	26,2	26,0	25,7	26,0	4,709
13	187	17,5	27,8	28,2	27,8	27,9	4,760
14	186	17,6	29,9	30,5	29,9	30,1	4,762
15	187	17,5	31,8	32,2	31,7	31,9	4,760
16	188	17,4	33,8	34,3	33,9	34,0	4,758
17	189	17,2	35,6	36,0	35,8	35,8	4,728
18	185	17,5	37,7	37,9	37,8	37,8	4,709
19	185	17,5	39,7	40,4	40,0	40,0	4,709
20	187	17,4	41,9	42,4	42,5	42,3	4,733

Tablica 7. Parametri - Uzorak 2

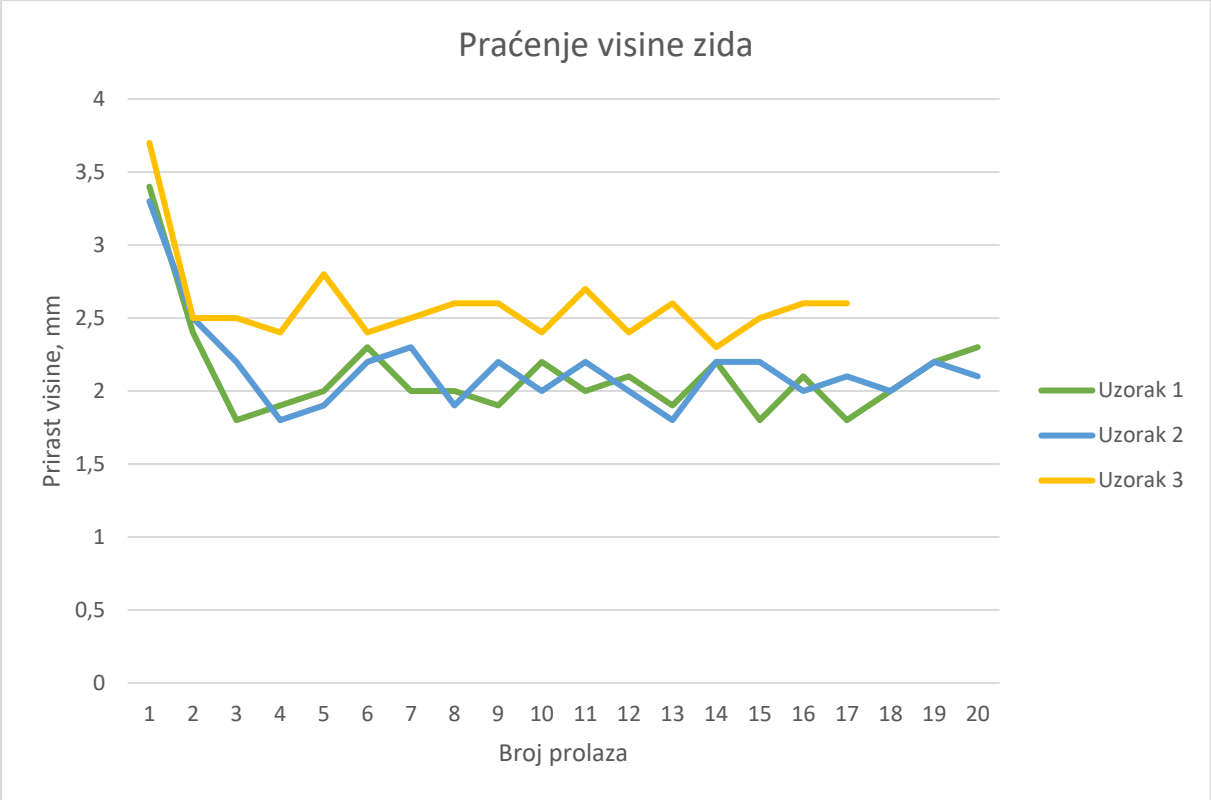
Prolaz	Struja, A	Napon, V	Visina, mm			Srednja vrijednost visine, mm	Unesena toplina, kJ/cm
			1	2	3		
1	131	15,3	3,3	3,5	3,2	3,3	4,183
2	140	16,1	5,7	5,9	5,8	5,8	4,704
3	142	16,0	8,2	7,9	7,9	8,0	4,742
4	145	16,1	10,0	9,9	9,5	9,8	4,872
5	144	16,2	12,1	12,0	11,1	11,7	4,868
6	142	16,2	14,2	14,4	13,2	13,9	4,801
7	141	16,2	16,3	16,7	15,5	16,2	4,767
8	142	16,1	18,2	18,5	17,5	18,1	4,771
9	140	16,2	20,4	20,8	19,7	20,3	4,733
10	143	16,0	22,6	22,8	21,6	22,3	4,775
11	145	15,9	24,8	25,3	23,4	24,5	4,811
12	143	16,1	26,7	27,1	25,8	26,5	4,805
13	145	16,0	28,6	29,1	27,1	28,3	4,842
14	144	16,1	30,7	31,3	29,6	30,5	4,838
15	143	16,2	32,9	33,5	31,6	32,7	4,835
16	144	16,2	35,0	35,5	33,6	34,7	4,868
17	143	16,2	37,1	37,6	35,6	36,8	4,835
18	143	16,1	39,0	39,5	38,0	38,8	4,805
19	145	16,0	41,4	41,7	39,9	41,0	4,842
20	145	16,1	43,5	43,6	42,1	43,1	4,872

Tablica 8. Parametri - Uzorak 3

Prolaz	Struja, A	Napon, V	Visina, mm			Srednja vrijednost visine, mm	Unesena toplina, kJ/cm
			1	2	3		
1	77	12,5	3,7	3,6	3,8	3,7	3,554
2	85	13,4	6,4	6,0	6,2	6,2	4,206
3	83	13,2	8,8	8,7	8,6	8,7	4,045
4	86	13,6	11,3	11,2	10,9	11,1	4,319
5	88	13,4	14,1	13,9	13,7	13,9	4,354
6	87	13,5	16,4	16,4	16,2	16,3	4,337
7	87	13,5	18,9	18,9	18,7	18,8	4,337
8	88	13,4	21,5	21,3	21,5	21,4	4,354
9	87	13,4	24,0	24,3	23,8	24,0	4,304
10	88	13,6	26,3	26,5	26,4	26,4	4,419
11	86	13,4	29,4	29,2	28,8	29,1	4,255
12	88	13,6	31,4	31,6	31,5	31,5	4,419
13	86	13,4	34,3	34,2	33,8	34,1	4,255
14	88	13,4	36,3	36,5	36,5	36,4	4,354
15	86	13,5	39,0	39,0	38,7	38,9	4,287
16	87	13,6	41,3	41,6	41,5	41,5	4,369
17	86	13,4	44,1	44,3	43,9	44,1	4,255

4.2.1. Praćenje visine uzorka

Praćenje visine uzorka provođeno je mjerenjem u tri točke, točke lijevo i desno mjerene su 5 cm od ruba te jedna točka u sredini. Kako bi se dobila jedna vrijednost računala se aritmetička sredina sve tri visine. Kako bi se vidjelo koji uzorak je imao najveći prirast visine izrađen je graf koji je prikazan na Slika 29.



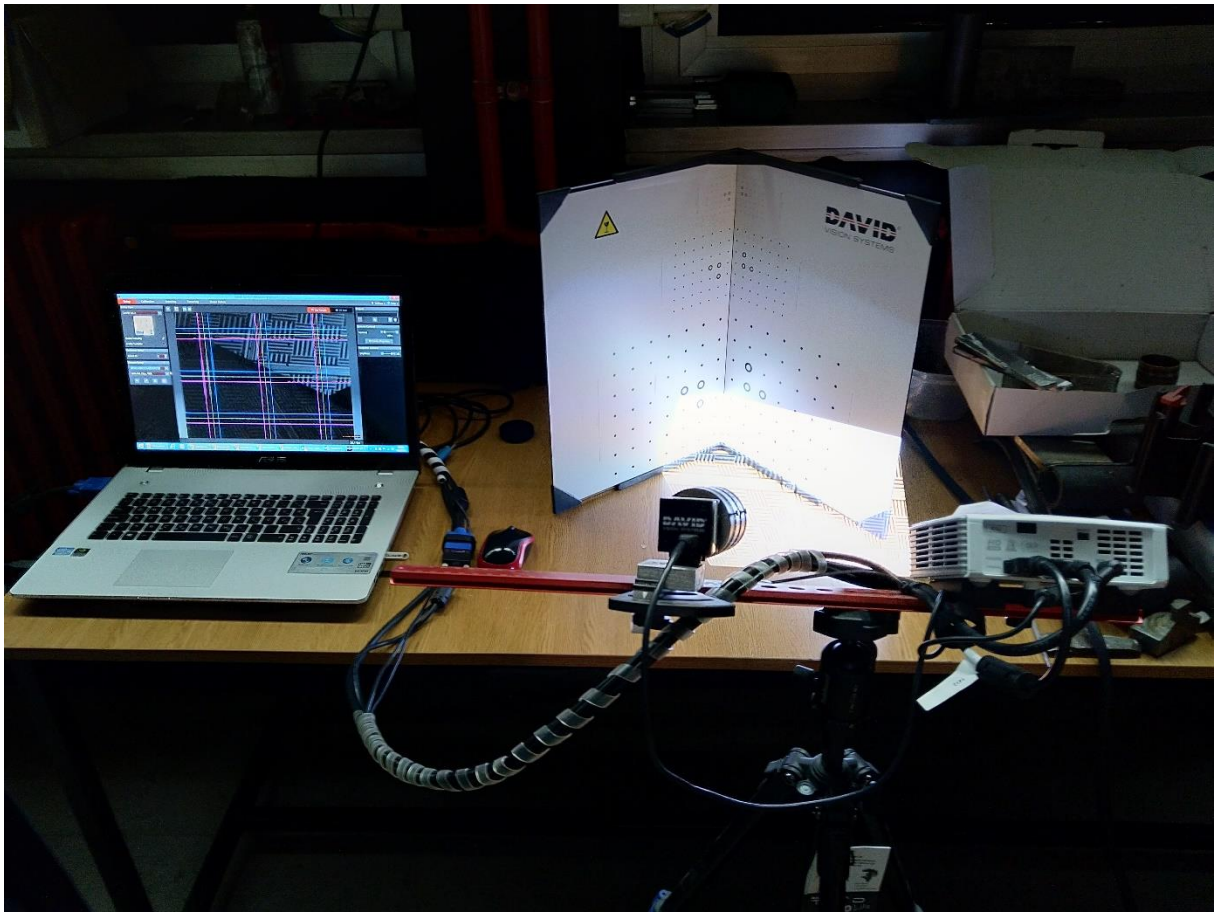
Slika 29. Prirast visine za 3 uzorka

Iz grafa je jasno vidljivo da je uzorak 3 imao najveći prirast u odnosu na uzorak 1 i uzorak 2 te je također vidljivo da je došao do zadane visine od 40 mm u manje prolaza nego preostala dva uzorka.

4.3. Ispitivanje parametara teksture površine

Ispitivanje parametara teksture površine vršilo se pomoću 3D skenera DAVID SLS-2 povezanog s računalom. Sustav se sastoji od projektora, kamere i šablone. Princip rada sustava je taj da projektor projicira svjetlosni uzorak na predmet skeniranja te pomoću kamere određuje dubinu odnosno prostorni položaj uzorka. Prije upotrebe sustav treba kalibrirati pomoću spomenute šablone te takav kalibrirani sustav se ne smije mijenjati.

Kako bi ispitivanje dalo povoljne rezultate ono se treba provoditi u zamračenoj prostoriji kako svjetlost ne bi ometala rad kamere. Prije početka ispitivanja uzorci su bili četkani kako bi se uklonili zaostale nečistoće te je očišćen s alkoholom. Slika 30 prikazuje postupak provedbe ispitivanja.

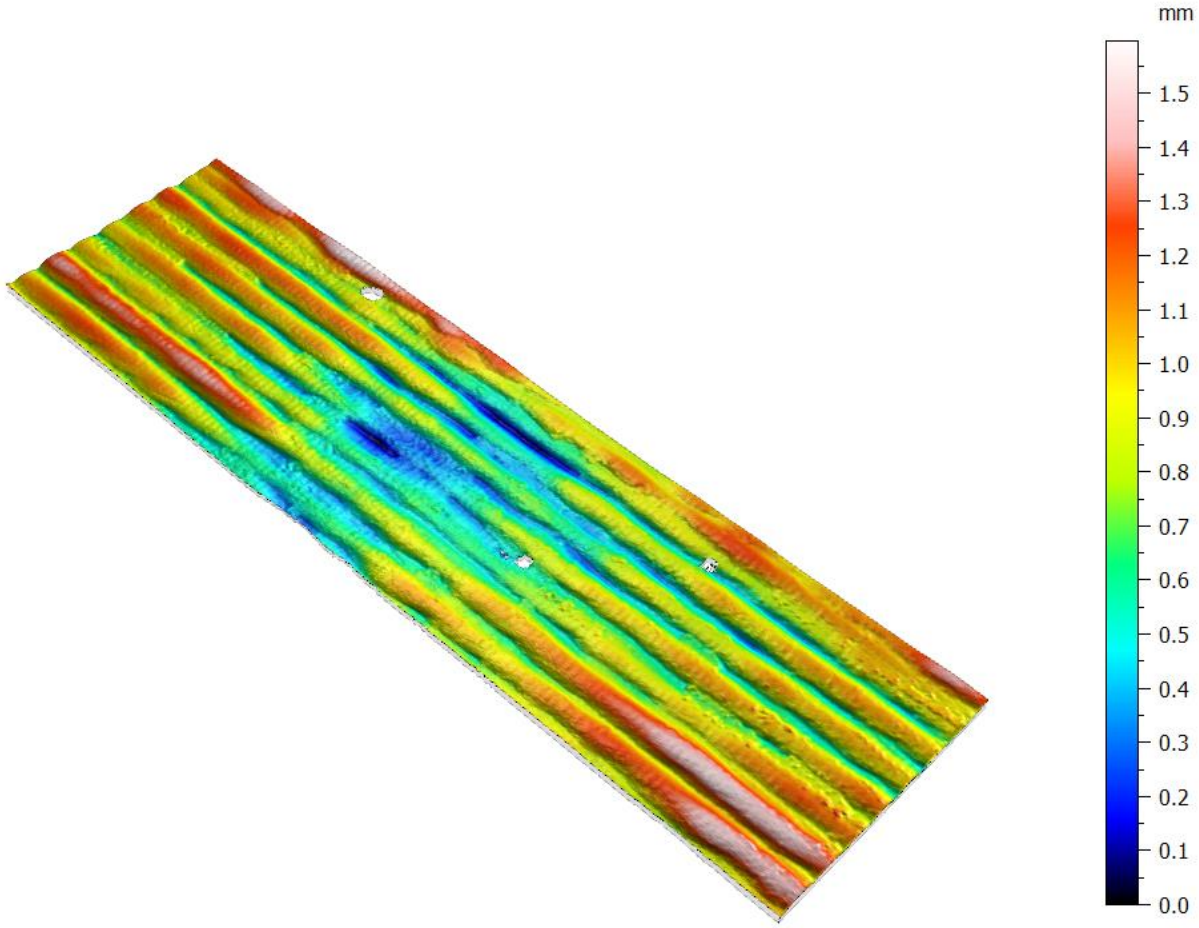


Slika 30. Skeniranje 3D uzorka

Skeniranjem su se dobile datoteke u STL formatu koje su bile obrađene u programu 3D Builder kako bi se dobile dimenzije 110x30 mm te u programu MountainsMap. Program

MountainsMap je kao povratnu informaciju vratio parametre teksture površine koji su objašnjeni u teorijskom dijelu rada.

Na Slika 31 je prikazan 3D prikaz za uzorak 1 s mjernom skalom vrhova i udubina, a na Slika 32 su prikazani parametri teksture površine za uzorak 1.

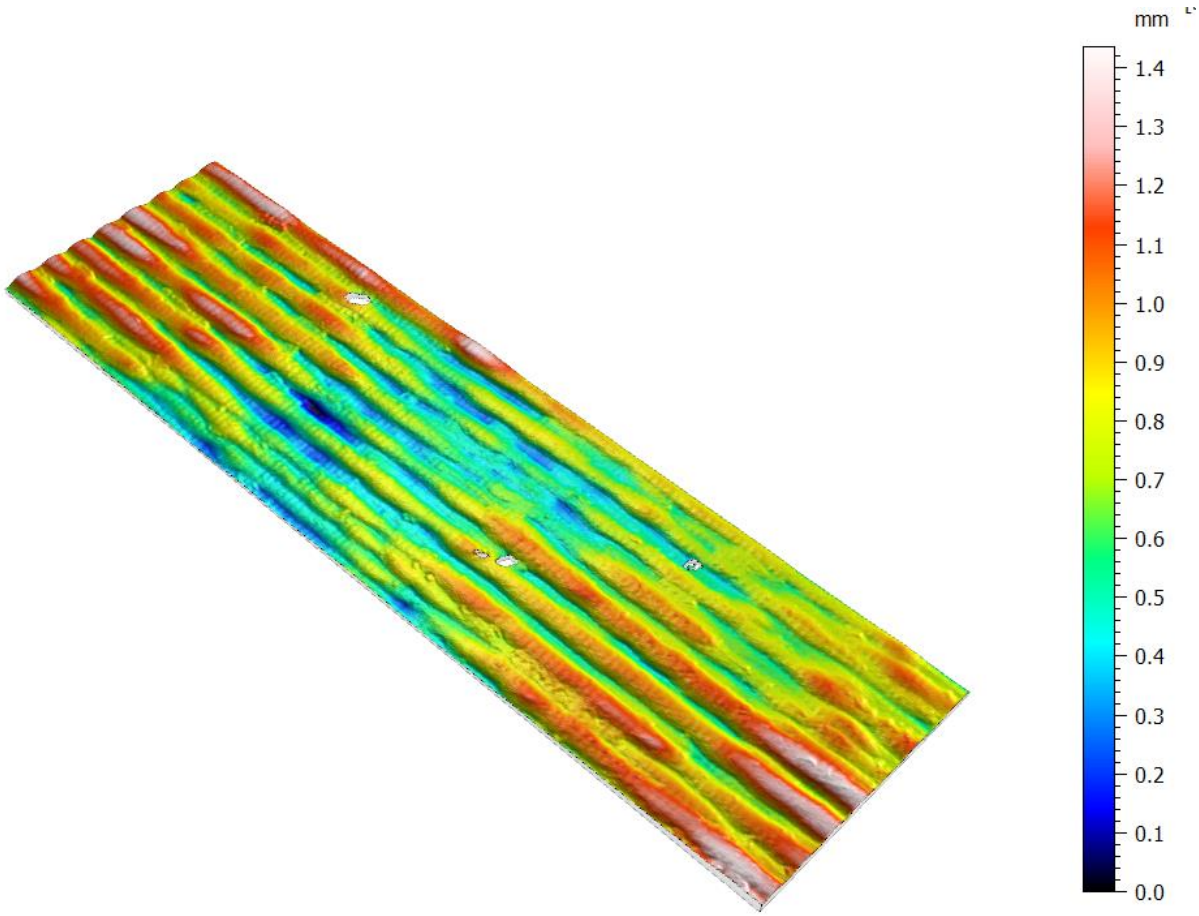


Slika 31. 3D prikaz - uzorak 1

ISO 25178 - Primary surface			[6]
F: [Workflow] Leveled (LS-plane)			
λs Filter: No λs-filtering			
Height parameters			
Sq	0.2675	mm	
Ssk	-0.04224		
Sku	2.660		
Sp	0.7473	mm	
Sv	0.8494	mm	
Sz	1.597	mm	
Sa	0.2170	mm	

Slika 32. Parametri teksture površine - uzorak 1

Na Slika 33 je prikazan 3D prikaz za uzorak 2 s mjernom skalom vrhova i udubina, a na Slika 34 su prikazani parametri teksture površine za uzorak 2.

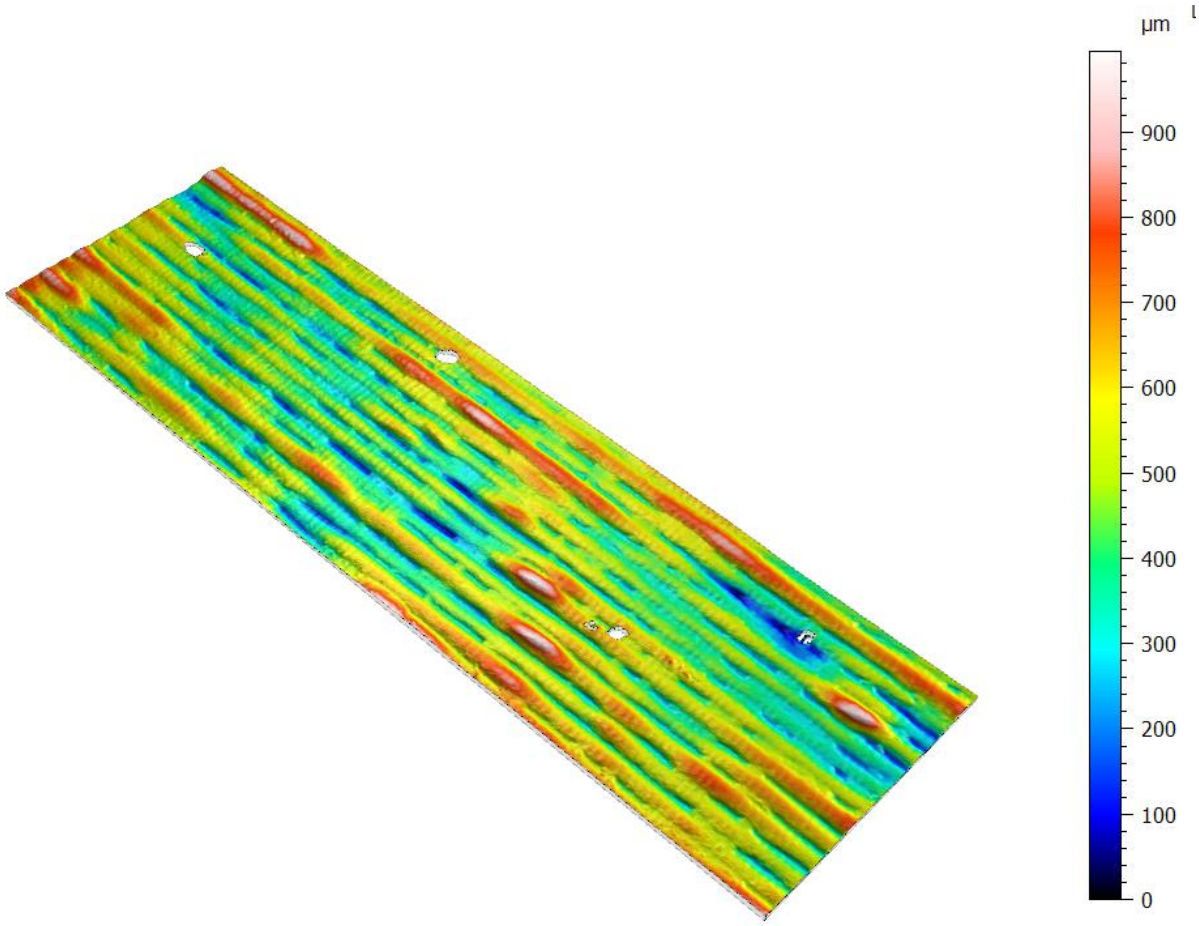


Slika 33. 3D prikaz - uzorak 2

ISO 25178 - Primary surface			[6]
F: [Workflow] Leveled (LS-plane)			
λs Filter: No λs-filtering			
Height parameters			
Sq	0.2344	mm	
Ssk	0.09727		
Sku	2.555		
Sp	0.6575	mm	
Sv	0.7784	mm	
Sz	1.436	mm	
Sa	0.1917	mm	

Slika 34. Parametri teksture površine - uzorak 2

Na Slika 35 je prikazan 3D prikaz za uzorak 3 s mjernom skalom vrhova i udubina, a na Slika 36 su prikazani parametri teksture površine za uzorak 3.



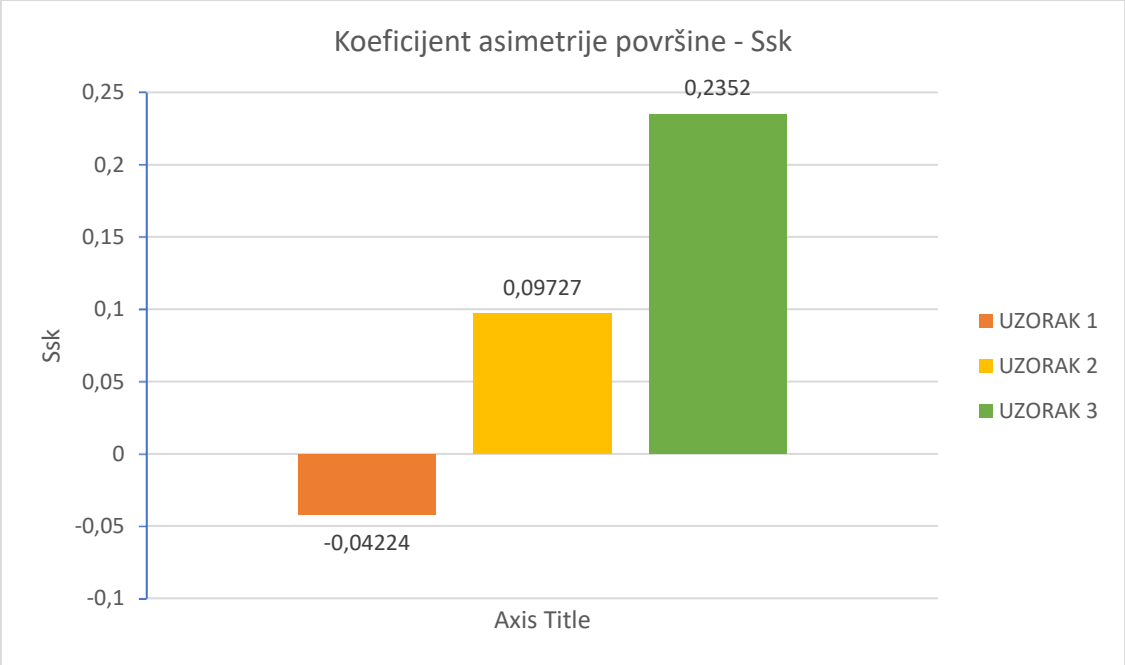
Slika 35. 3D prikaz - uzorak 3

ISO 25178 - Primary surface			[6]
F: [Workflow] Leveled (LS-plane)			
λs Filter: No λs-filtering			
Height parameters			
Sq	139.6	µm	
Ssk	0.2352		
Sku	3.059		
Sp	501.7	µm	
Sv	492.8	µm	
Sz	994.5	µm	
Sa	111.4	µm	

Slika 36. Parametri teksture površine - uzorak 3

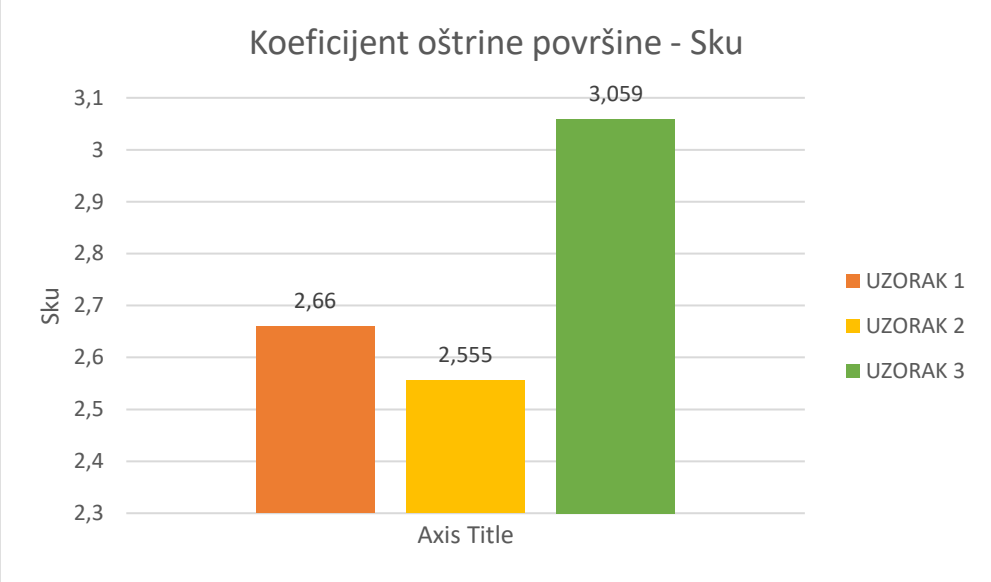
Pregledavanjem 3D prikaza za sva tri uzorka može se uočiti nepravilnost odnosno savijanje uzorka 1 i uzorka 2. Jasno se vidi kako uzorak 1 i uzorak 2 imaju od sredine prema rubovima veća nadvišenja za razliku od uzorka 3 koji cijelom dužinom ima podjednaka nadvišenja.

Analizom dobivenih rezultata može se vidjeti da uzorak 1 postiže negativne vrijednosti parametra S_{sk} što znači da po površini prevladavaju udubine. Za uzorke 2 i 3 ovaj parametar je pozitivan što znači da prevladavaju vrhovi te uzorak 3 ima izraženiju vrijednost. Na Slika 37 prikazan je dijagram vrijednosti parametra S_{sk} za sve uzorke.



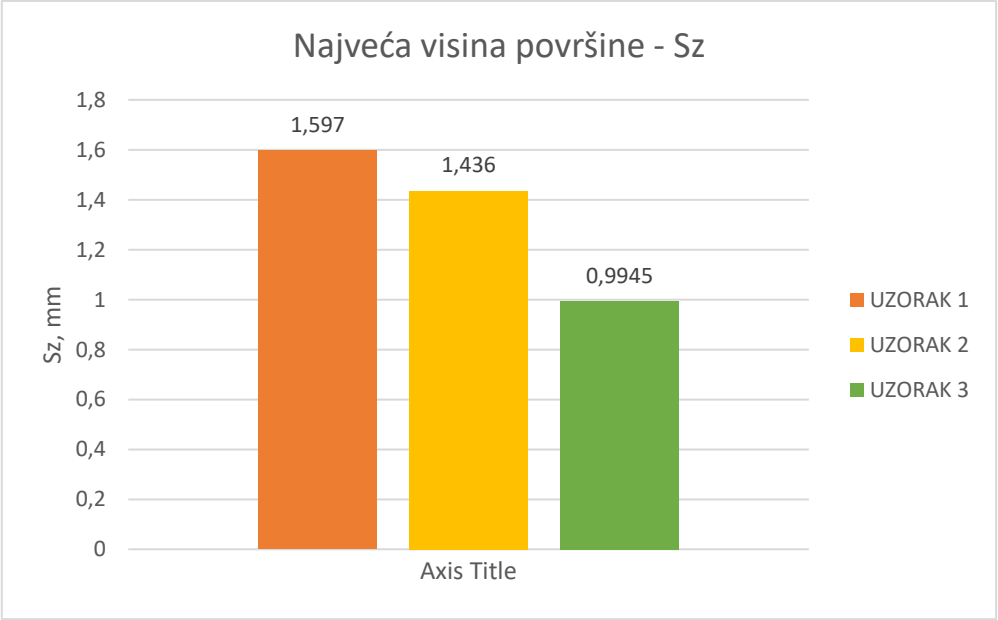
Slika 37. Dijagram vrijednosti parametra Ssk

Vrijednosti parametra S_{ku} kod uzoraka 1 i 2 nalaze se ispod 3,00 što označuje da su površine tih uzoraka bez izraženih vrhova i udubina na površini uzorka. Uzorak 3 ima vrijednost malo iznad 3,00 što označuje prisutno ekstremnijih vrhova i udubina na površini uzorka. Na Slika 38 prikazan je dijagram s vrijednostima parametra S_{ku} za sve uzorke.



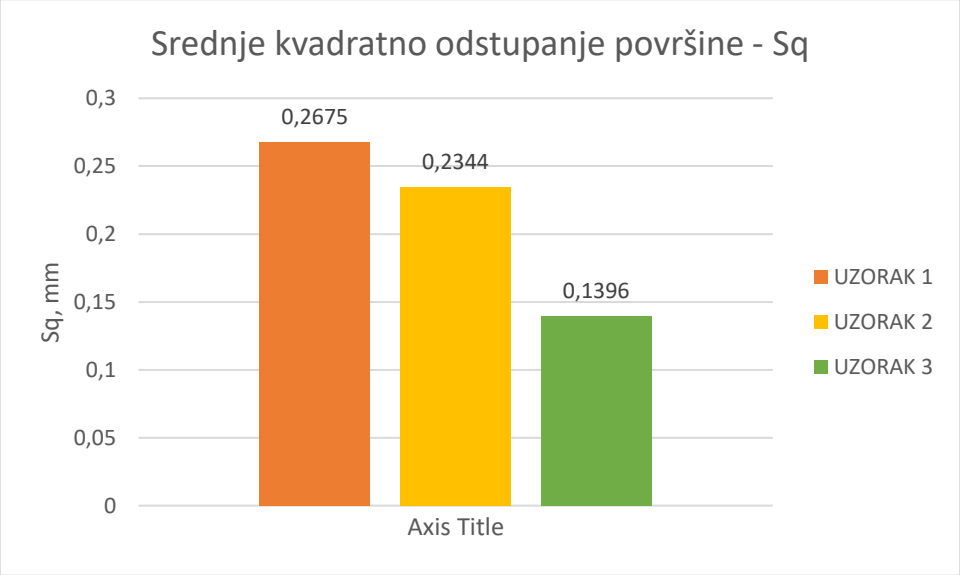
Slika 38. Dijagram vrijednosti parametra Sku

Iz dijagrama prikazanog na Slika 39 uočavamo da uzorak 1 ima najveću visinu površine odnosno najveća je suma najviše i najniže točke na površini. Slijede ga uzorak 2 te uzorak 3. Radi kvalitete površine poželjnija je što niža vrijednost parametra.



Slika 39. Dijagram vrijednosti parametra Sz

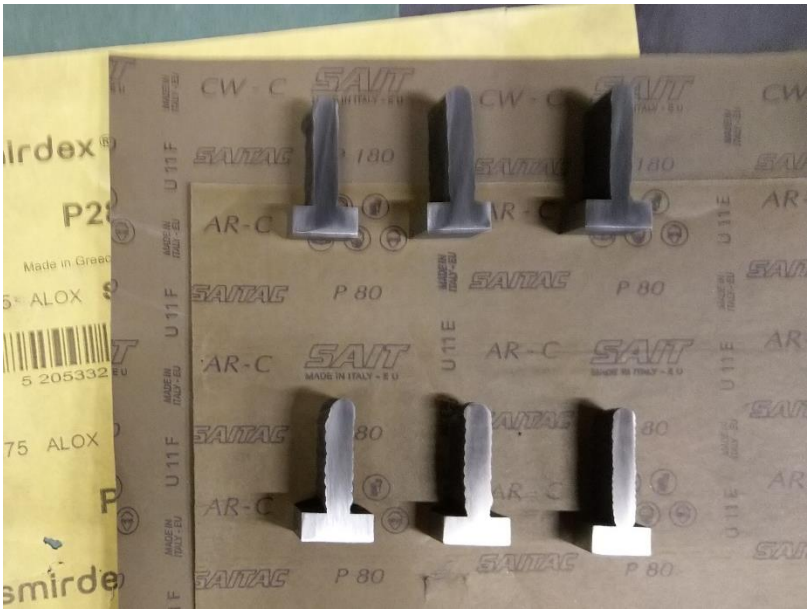
Posljednji parametar koji će se razmotriti je S_q ili srednje kvadratno odstupanje površine. Uzorak s najvećom vrijednošću parametra je ponovo uzorak 1 te ga slijede uzorak 2 i uzorak 3. Radi kvalitete površine poželjnija je što niža vrijednost parametra. Parametar Sa nije obrađen zbog činjenice navedene u literaturi da se najčešće koristi kod mehanički obrađenih površina što kod ovih uzoraka nije bio slučaj. Slika 40 prikazuje dijagram s vrijednostima parametra S_q za sve uzorke.



Slika 40. Dijagram vrijednosti uzorka Sq

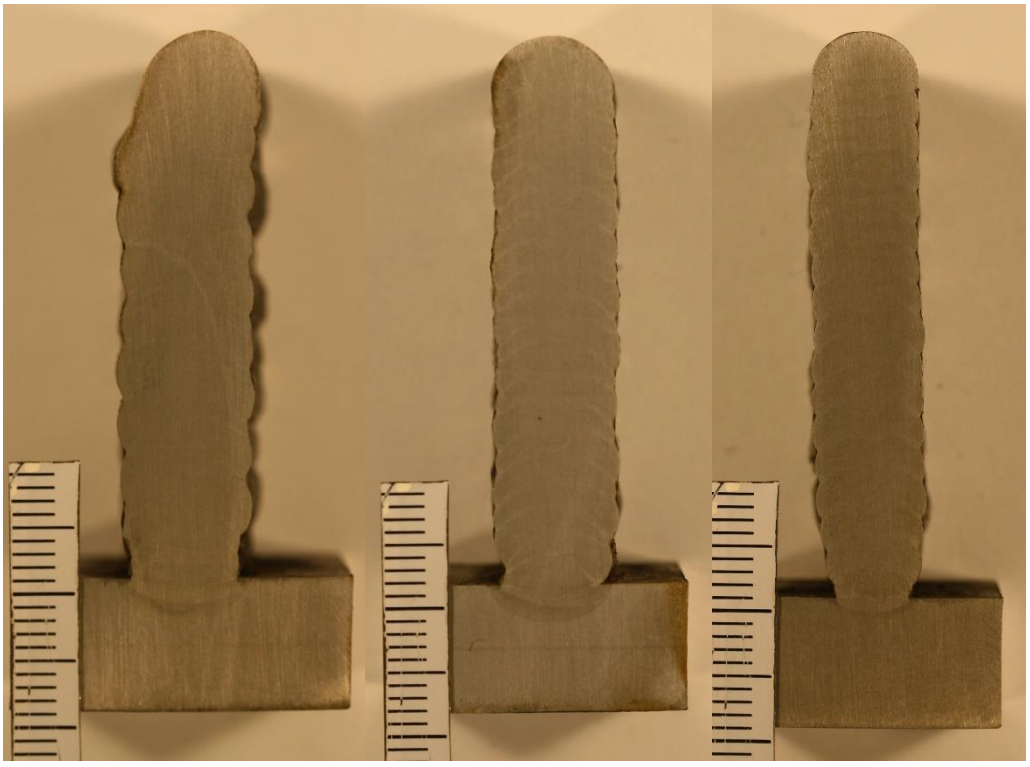
4.4. Makroanaliza strukture

Kako bi se izvršila makroanaliza strukture prvo je trebalo pripremiti uzorke. Nakon što su uzorci bili odrezani izvršilo se brušenje 2 seta uzoraka s brusnim papirima granulacije P80, P180, P280 i P320. Slika 41 prikazuje uzorke nakon izvršenog brušenja. Nakon brušenja pristupilo se nagrizanju uzoraka. Nagrizanje se vršilo u Nitalu odnosno mješavini tri postotne dušične kiseline i etanola.

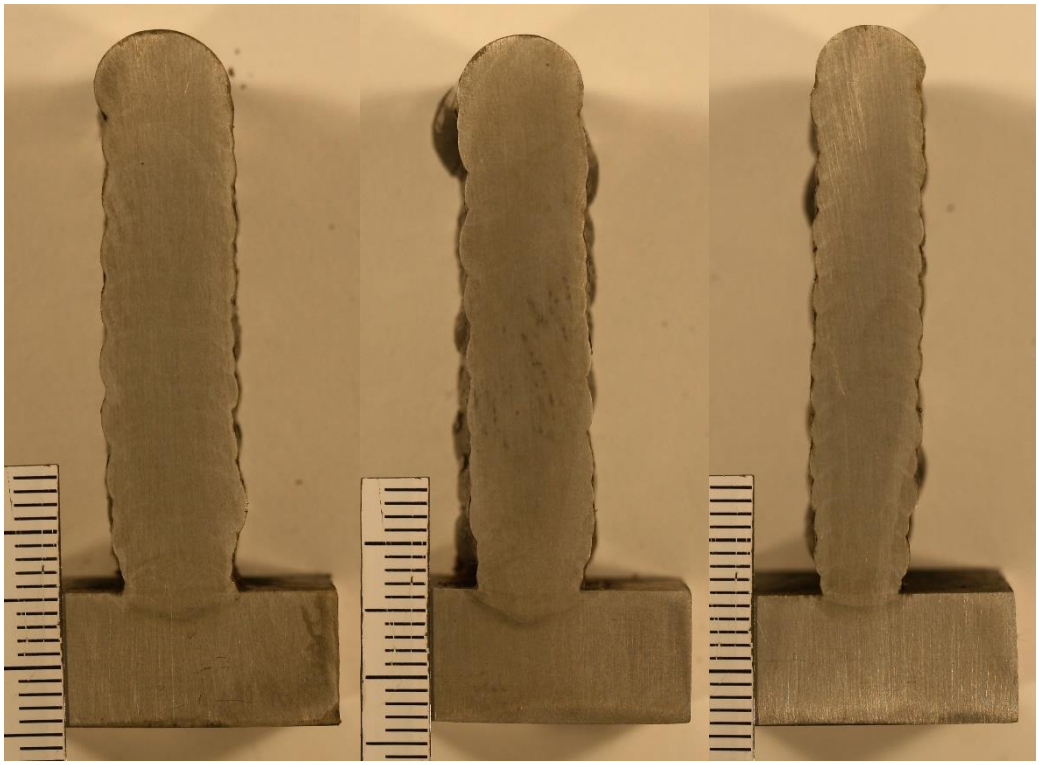


Slika 41. Uzorci nakon brušenja

Na Slika 42 je prikazan prvi set uzoraka nakon brušenja i nagrizanja dok je na Slika 43 prikazan drugi set uzoraka. Prvi set uzoraka uzet je s jedne strane zidova, a drugi set s druge strane zidova.



Slika 42. Uzorak 1 (lijevo), uzorak 2 (sredina) i uzorak 3 (desno) - 1. set

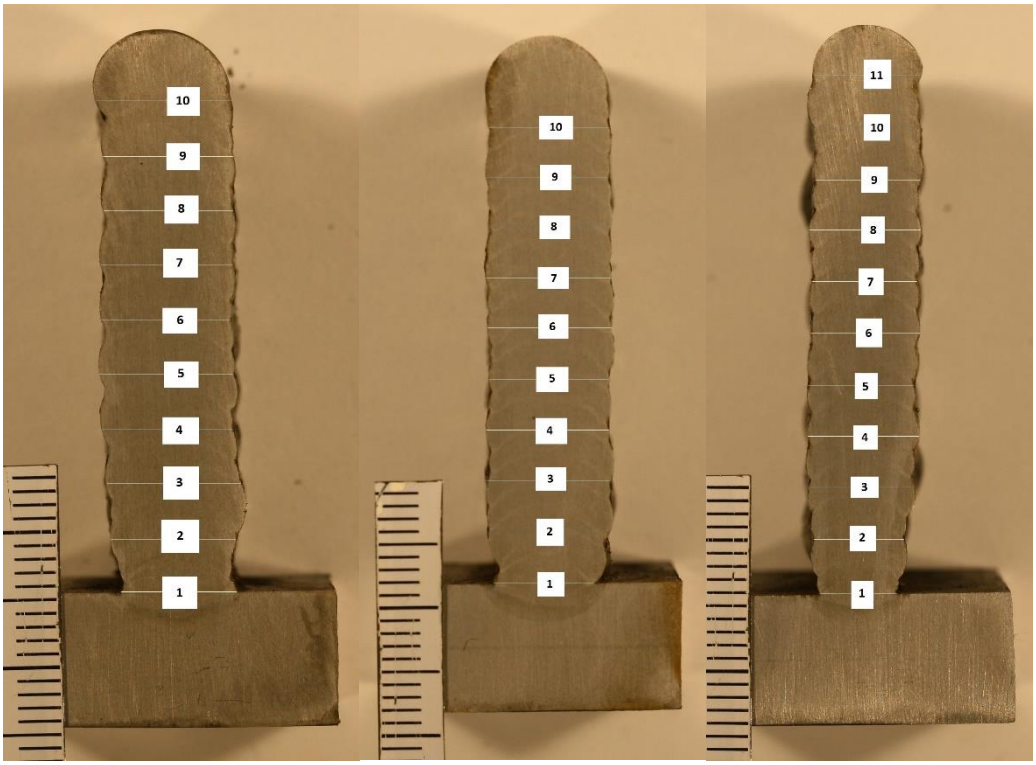


Slika 43. Uzorak 1 (lijevo), uzorak 2 (sredina) i uzorak 3 (desno) - 2. set

Makroanalizom uzoraka nisu uočene nikakve veće nepravilnosti na materijalu niti poroznosti. Na uzorcima 1 i 2 se vidi veća penetracija u odnosu na uzorak 3. Izrađeni prolazi su slabije vidljivi zbog lošeg nagrizanja ali su pravilnog oblika bez većih odstupanja. Vidljiva je linija miješanja osnovnog i dodatnog materijala kao i zona utjecaja topline. Na nekoliko uzoraka primjećuje se pojava korozije koja je nastala prilikom nagrizanja uzorka i ispiranja vodom.

4.5. Mjerenje širine zidova

Za analizu geometrije odnosno mjerenje širine zavara koristio se ImageJ program. Princip rada programa ImageJ je pretvaranje piksela u odabrane mjerne jedinice. To se ostvaruje pomoću naredbe *Set Scale.* Prije samog mjerenja definirao se odnos milimetra i piksela pomoću mjerne skale koja se nalazi na slici uz uzorke. Mjerenja su rađena svakih četiri milimetra. Slika 44 prikazuje područja na kojima su mjerene širine uzoraka, a Tablica 9 prikazuje dobivene širine.

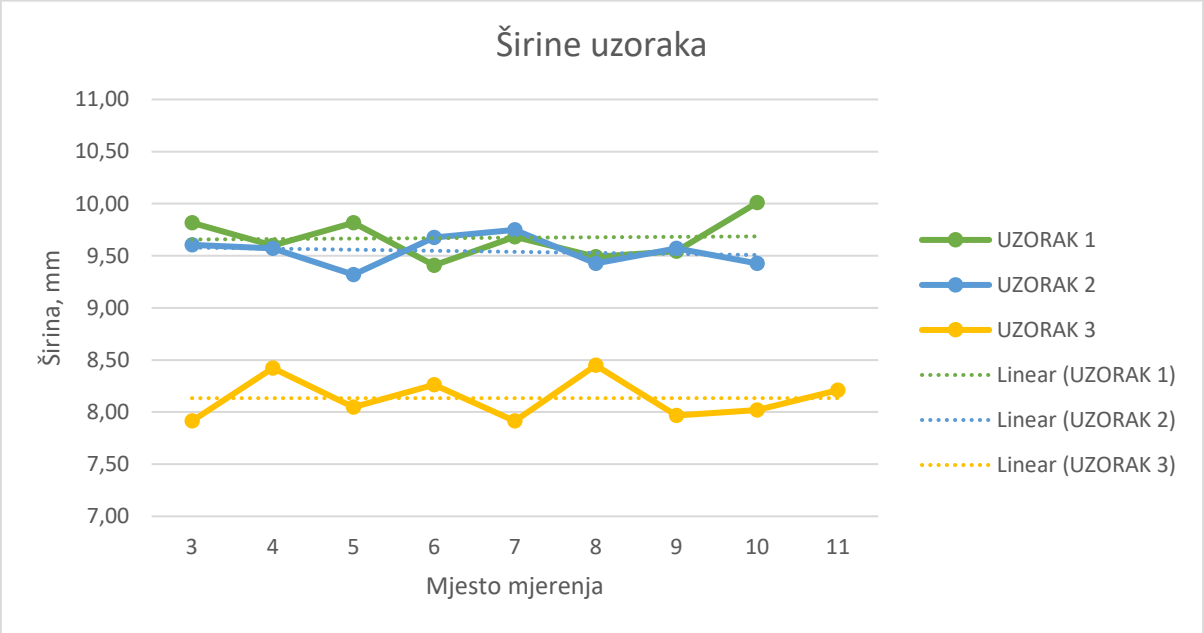


Slika 44 . Područje mjerenja širine – uzorak 1 (lijevo), uzorak 2 (sredina) i uzorak 3 (desno)

Tablica 9. Širine uzoraka

Područje mjerenja	Širina uzorka 1	Širina uzorka 2	Širina uzorka 3
1	8,43	7,81	5,83
2	9,16	9,50	6,85
3	9,82	9,61	7,91
4	9,60	9,57	8,42
5	9,82	9,32	8,05
6	9,41	9,68	8,26
7	9,68	9,75	7,91
8	9,49	9,43	8,45
9	9,55	9,57	7,97
10	10,01	9,43	8,02
11	-	-	8,21
$\bar{x}$	9,496	9,366	7,807

Iz tablice je vidljivo da je širina prvog i drugog prolaza kod sva tri uzorka manja u odnosu na ostatak zida. Prosječna širina uzorka 1 i uzorka 2 su slične uz isti omjer brzina iako su brzine zavarivanja i žice bile različite. Velik utjecaj brzina žice i brzina zavarivanja su imale na uzorak 3 koji ima zamjetnije manju širinu zida zbog puno manjeg razlijevanja taline iako je omjer brzina bio isti kao i kod uzorka 1 i 2. Slika 45 prikazuje dijagram širine uzoraka iz kojeg su uklonjena prva dva prolaza zbog grešaka te je jasno vidljivo kako nema promjene širine porastom visine uzorka, tj. širina je konstantna.



Slika 45. Širine za svaki uzorak

4.6. BTF omjer

BTF omjer se mjerio pomoću ImageJ programa tako da bi se izračunale korisne i otpadne površine. U svaki uzorak se ucrtao pravokutnik visine 30 mm te su se stranice razmaknule što više moguće kako bi bilo što manje otpadnog materijala te se izračunala površina tog pravokutnika. Nakon toga išlo se u crtanje konture uzorka i računanje njegove površine. BTF omjer se računao kao omjer površine sirovog materijala i korisne površine prema formuli:

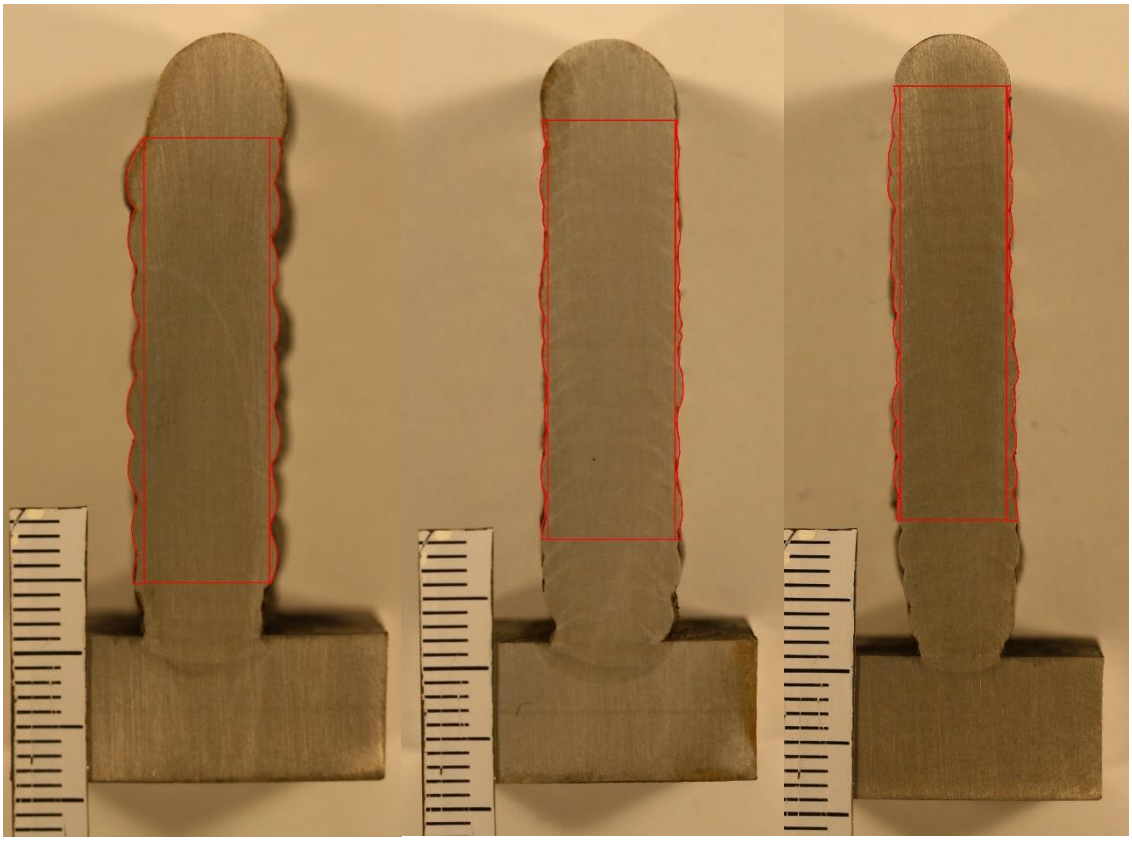
$$BTF = \frac{A_s}{A_k} \qquad (2)$$

Pri čemu je:

A_s – površina sirovog materijala

A_k – površina korisnog materijala

Slika 46 prikazuje izgled površine za računanje BTF omjera.



Slika 46. Izgled površine za uzorak 1 (lijevo), uzorak 2 (sredina) i uzorak 3 (desno)

Tablica 10 prikazuje BTF omjer izračunat pomoću površina.

Tablica 10. BTF omjer

	UZORAK 1	UZORAK 2	UZORAK 3
Sirova površina, mm^2	291,31	290,56	245,15
Korisna površina, mm^2	253,61	272,36	220,13
BTF omjer	1,15	1,07	1,11

Analizom rezultata vidljivo je kako uzorak 1 ima najlošiji BTF omjer što je donekle razumljivo zbog najveće valovitosti i lošije kvalitete površine. Uzorak 3 iako ima bolju kvalitetu površine od uzorka 2 ima veći odnosno nepogodniji BTF omjer. Razlog tomu je mala nagnutost uzorka u jednu stranu i manja širina uzorka.

4.7. Mjerenje tvrdoće

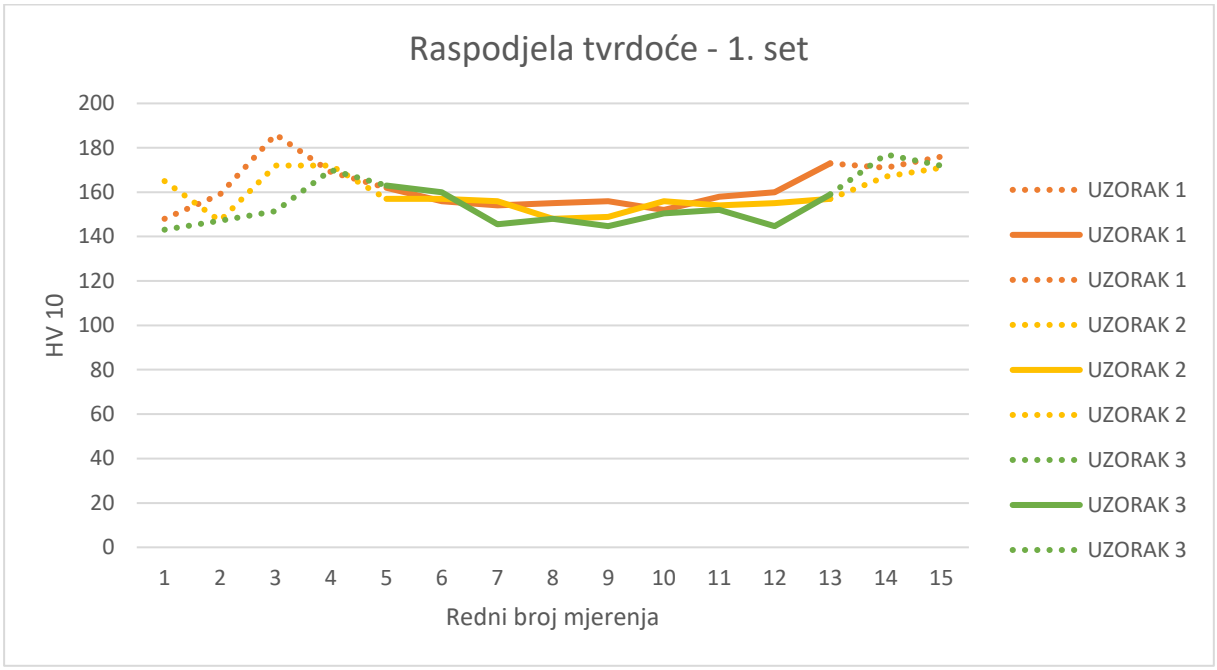
Zadnje provedeno ispitivanje u eksperimentalnom dijelu je mjerenje tvrdoće dva seta uzoraka. Mjerenje tvrdoće provedeno je na tvrdomjeru REICHERTER metodom HV 10. Tvrdoća je mjerena u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i dodatnom materijalu po vertikalnoj liniji. Razmaci između osnovnog materijala i zone utjecaja topline i unutar nje te na vrhu uzorka su bili 1,5 mm dok su razmaci u dodatnom materijalu bili 4 mm. Na svakom uzorku provedeno je 15 mjerenja. Tablica 11 prikazuje rezultate mjerenja.

Tablica 11. Rezultati mjerenja tvrdoće

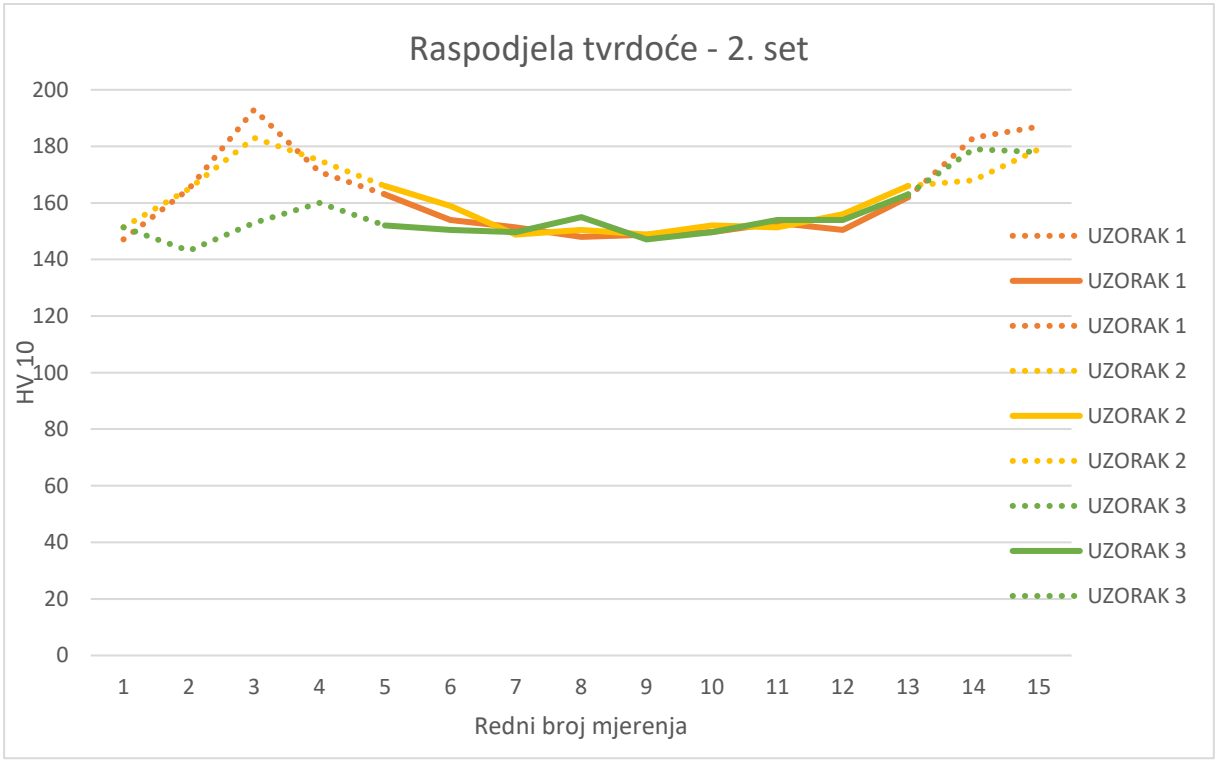
Tvrdoća HV 10							
Mjerenja		1. set uzoraka			2. set uzoraka		
		Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
OM	1.	148	165	143,1	147,1	151,4	151,4
ZUT	2.	159	147,1	147,1	165	165	143,1
	3.	186	172	151,4	193	183	153
	4.	169	172	170	171	175	160
DUŽ UZORKA	5.	162	157	163	163	166	152
	6.	156	157	160	154	159	150,5
	7.	154	156	145,5	151,4	148,8	149,7
	8.	155	148	148	148	150,5	155
	9.	156	148,8	144,7	148,8	148,8	147,1
	10.	152	156	150,5	149,7	152	149,7
	11.	158	154	152	153	151,4	154
	12.	160	155	144,7	150,5	156	154
	13.	173	157	159	162	166	163
VRH UZORKA	14.	171	167	177	183	168	179
	15.	176	171	172	187	179	178
SREDNJA VRIJEDNOST	$\bar{x}$	158,44	154, 41	151,93	153,38	155,39	152,78

Temeljem rezultata mjerenja napravljena su dva grafa za svaki set uzoraka koji prikazuju tvrdoću duž uzorka te je izračunata srednja vrijednost tvrdoće za srednji dio odnosno za dio od 5. do 13. mjerenja. Na Slika 47 prikazana je tvrdoća za prvi set uzoraka, a na Slika 48 za

drugi set uzoraka. Na grafovima isprekidanim linija označena su mjerenja čije vrijednosti imaju velika odstupanja te nisu pogodni za proizvod.



Slika 47. Raspodjela tvrdoće uzoraka - 1. set



Slika 48. Raspodjela tvrdoće uzoraka - 2. set

Analizom rezultata mjerenja vidi se gotovo kontinuirani raspon tvrdoće uzduž uzorka. U zoni utjecaja topline prisutan je znatan rast tvrdoće kao i kod vrhova uzoraka. Razlog zbog kojeg je došlo do otvrdnjavanja u području ZUT-a i vrhova zidova je intenzitet hlađenja odnosno krivulje hlađenja. Gledajući grafove može se zaključiti da su tvrdoće sva tri uzorka podjednake i kako ne ovise o omjeru brzina i parametrima zavarivanja odnosno različite brzine zavarivanja i dobave žice ne utječu na tvrdoću. Jedan od razloga zašto je raspored tvrdoće jednolik u dodanom materijalu je način izrade, odnosno izrada sloj po sloj dovodi do ravnomjernog hlađenja svakog među sloja.

5. ZAKLJUČAK

Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom novija je tehnologija koja je trenutno u fazi razvoja. Prednosti koje donosi poput automatizacije i izrade predmeta kompleksne geometrije uvelike pomažu u produktivnosti i smanjenju cijena za unikatne ili maloserijske predmete te ju čine konkurentnom na tržištu. WAAM postupak iznimno je ekonomičan u izradi predmeta od skupih materijala poput titana zbog manjeg BTF omjera odnosno manje odbačenog materijala prilikom završne obrade. U ovom radu izrađeni su uzorci jednostavne geometrije no s obzirom na njihovu kvalitetu može se zaključiti da bi ovaj postupak bio primjenjiv i za proizvode složene geometrije.

Cilj eksperimentalnog dijela rada bio je izraditi tri uzorka primjenom različitih parametara s konstantnim omjerom brzine žice i brzine zavarivanja te robotiziranog zavarivanja koristeći CMT postupak koji je omogućio izradu s manjim unosom topline i rasprskavanja. Izrađeni uzorci postigli su zadovoljavajuću razinu kvalitete, značajnijih odstupanja u geometriji nije bilo kao ni grešaka u obliku pora i uključaka. Primjenom parametara za izradu uzorka 3 primijećeno je značajno smanjenje broja prolaza kako bi se dostigla dogovorena visina u odnosu na uzorak 1 i uzorak 2, ali je to dovelo do značajnijeg smanjenja u širini uzorka. Može se zaključiti da iako je bio konstantan omjer brzine žice i brzine zavarivanja da one utječu na visinu i širinu dobivenog uzorka. Uzimanjem manjih brzina mogli bi se postići viši i tanji uzorci uz manje prolaza, ali dužim vremenom izrade dok bi veće brzine dobile šire uzorke i jednaku visinu uz više prolaza, ali bi vrijeme izrade bilo kraće.

Ispitivanje parametara teksture površine provedeno je u svrhu dobivanja podataka o kvaliteti površine uzoraka. Temeljem rezultata zaključuje se da uzorak 3 ima najbolju kvalitetu površine, ali i uzorak 1 i uzorak 2 imaju zadovoljavajuću kvalitetu. Iako je omjer brzina bio isti kod sva tri uzorka vidljivo je da su brzine imale utjecaj na kvalitetu površine. Za postizanje kvalitetnije površine moglo bi se pristupiti nekim od mehaničkih obrada, ovisno o potrebama i zahtjevima za proizvod.

Mjerenje BTF omjera dalo je donekle očekivane rezultate. Uzorak 1 koji ima najlošiju kvalitetu teksture površine imao je i najveći BTF omjer. Uzorak 2 koji je imao lošiju kvalitetu površine od uzorka 3 imao je manji BTF omjer, ali je uzorak 3 tanji i blago nagnut što je

dovelo do toga. Može se zaključiti kako brzina žice i brzina zavarivanja utječu na BTF omjer iako im je omjer kod sva tri uzorka bio isti.

Kod ispitivanja tvrdoće provedeno je 15 mjerenja za svaki uzorak. Fokus kod mjerenja tvrdoće bila je sredina uzorka koja je zapravo pogodan dio za izradu proizvoda zbog konstantnih svojstava. Iz rezultata ispitivanja vidljiv je konstantan iznos tvrdoće duž uzorka bez većih odstupanja što nam govori da je čvrstoća zida jednaka čvrstoći osnovnog materijala ili veća u zoni utjecaja topline i vrhovima zidova. Parametri zavarivanja i konstantan omjer brzina nisu utjecali na vrijednosti tvrdoće među uzorcima.

Nakon provedenog eksperimenta zaključuje se da je CMT postupak zavarivanja izuzetno prikladan za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom zbog svojeg niskog unosa topline i niskih vrijednosti parametara zavarivanja koje omogućuju izradu proizvoda manjih debljina. Prednosti postupka su niža potrošnja energije, veća preciznost i manje deformacije. Daljnje istraživanje ovog postupka moglo bi se usmjeriti na izradu proizvoda složenijih geometrija različitih debljina stijenki.

6. LITERATURA

[1] http://additivemanufacturing.com/basics/ (dostupno: 8.4.2019.)

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

[3] A. Pilipović: Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernog prototipa, Zagreb, 2012.

[4] D. Sigler: Additive Manufacturing for Electric Motors, 2013.

[5] S. Williams: Large Scale Metal Wire + Arc Additive Manufacturing of Structural Engineering Parts, 2016.

[6] A. Busachi, J. Erkoyuncu, P. Colegrove, F. Martina i J. Ding: Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence, Elsevier, 2015.

[7] N. Knezović: Aditivna proizvodnja uz pomoć električnog luka i žice kao dodatnog materijala (WAAM) - trenutno stanje i potencijal, Zavarivanje, pp. 73-78, 2018.

[8] https://www.theengineer.co.uk/worlds-first-3d-printed-marine-propeller/ (dostupno: 3.9.2019.)

[9] https://mx3d.com/projects/bridge-2-2/ (dostupno: 3.9.2019.)

[10] https://www.jorislaarman.com/work/butterfly-screen/ (dostupno: 3.9.2019.)

[11] R. Deltombe i K. B. M. Kubiak: How to Select the Most Relevant 3D Roughness Parameters of a Surface, Scanning, svez. 36, pp. 150-160, 2014.

[12] https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/parameters.jsp (dostupno 6.5.2019.)

[13] A. Schierl, J. Bruckner i K. Himmerlabuer: The CMT - Process - A Revolution in

welding technology, WELDING IN THE WORLD -LONDON-, 2005.

[14] E. Ryan, T. Sabin, J. Watts i M. 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., 2018.

[15] Y. Ali, P. Henckell, J. Hildebrand, J. Reimann, J. Bergmann i S. Barnikol-Oettler: Wire Arc Additive Manufacturing of Hot Work, Journal of Materials Processing Tech., 2019.

[16] M. Županić: Primjena aluminijevih legura i CMT postupka zavarivanja za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, 2019.

[17] https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/manual-welding/migmag/tpsi/tpsi/tps-400i (dostupno 7.9.2019.)

[18] http://www.ezg.hr/proizvodi/wire/EZSG2.html (dostupno 8.9.2019.)

[19] https://www.messer.hr/plinovi-za-zavarivanje-i-rezanje (dostupno 8.9.2019.)

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

PRILOZI

I. CD-R disc