

PRIMJENA CMT POSTUPKA ZA ADITIVNU PROIZVODNJU ELEKTRIČNIM LUKOM I ŽICOM

APPLICATION OF CMT PROCESS FOR WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING

Mislav Štefok¹, Ivan Jurić¹, Ivica Garašić¹, Jadranka Eržišnik¹

¹ Sveučilište u Zagrebu; Fakultet strojarstva i brodogradnje, Ul. Ivana Lučića 5, 10000, Zagreb, Hrvatska

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

Key words: CMT process, Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM

Sažetak: Zbog konstantnog razvoja i napretka moderne industrije razvijen je te uveden u upotrebu postupak aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom (engl. Wire and Arc Additive Manufacturing – WAAM). Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom novi je koncept aditivne proizvodnje u kojem se pomoću električnog luka i žice, metalni proizvodi izrađuju taljenjem kapljicametala u slojevima. Glavne prednosti aditivne tehnologije nad konvencionalnim su smanjenje vremena izrade, troškova i gubitka materijala te činjenica da aditivni postupci ne zahtijevaju međukorake kao što su proizvodnja kalupa ili nekih specifičnih uređaja ili naprava. Ciljevi istraživanja predstavljaju novi iskorak razvoju inovativne tehnologije aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom. Optimizacija samog procesa značajno utječe na mehanička i korozivna svojstva te odabirom odgovarajućih parametara zavarivanja i prilikom određene toplinske obrade, moguće je dobiti željena svojstva finalnog proizvoda. U eksperimentalnom radu izrađena su tri uzorka aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom CMT postupkom pomoću robotske stanice, svakisa svojim setom parametara te su ispitana njihova mehanička svojstva. Cilj eksperimentalnog dijela rada je primjenom različitih parametara s konstantnim omjerom brzine žice i brzine zavarivanja dobiti značajno smanjenje broja prolaza kako bi se dostigla tražena visina. Također, pomoću 3D skeniranja određeni su parametri teksture površine te je određen BTF omjer.

Abstract: Because of the constant development and progress of modern industry, the process of wire and arc additive manufacturing- WAAM was developed and put into use. WAAM is a new concept of additive manufacturing in which with the combination of electric arc and wire, metal products are made by depositing metal materials layer-by-layer. The main advantages of additive technology over conventional ones are the reduction of production time, costs, and loss of materials, also the fact that additive processes do not require intermediate steps such as the molds production or some specific devices. The goals of the research represent a new step in the development of innovative technology for wire and arc additive manufacturing. Process optimization significantly affects the mechanical and corrosion properties of the product. It is possible to obtain for the appropriate properties of the final product with the correct selection of welding parameters and use of a certain heat treatment. In the experimental work, three samples were made by wire and arc additive manufacturing using a robotic station with CMT process, each with its own set of parameters, and their mechanical properties were examined. The aim of the experimental part of the work is to obtain a significant reduction in the number of passes to reach the required height by applying different parameters with a constant ratio of wire speed and welding speed. Also, using 3D scanning, surface texture parameters were determined. Finally, the BTF ratio was determined.

1 UVOD

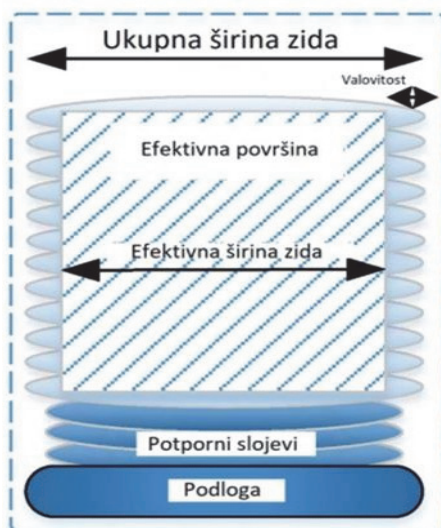
U zavarivanju je razvoj i primjena aditivne tehnologije novo područje istraživanja te postoji puno prostora za daljnje usavršavanje i unapređenje tehnologije. Za razliku od ostalih aditivnih tehnologija, aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom koristi jednostavniju opremu. Ostali postupci aditivne tehnologije zahtijevaju posebne uređaje, dok aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom koristi uobičajenu opremu za zavarivanje. Budući da koristi električni luk kao izvor topline i žicu za zavarivanje kao dodatni materijal, može ga se smatrati svojevrsnom kombinacijom zavarivanja i aditivne tehnologije, te je moguće primijeniti niz različitih tehnologija zavarivanja [1]. Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom je obećavajuća tehnologija s kojom je moguće riješiti problematiku prilikom proizvodnje predmeta kompleksne geometrije što dovodi do značajne uštede materijala jer se konačni proizvod može izraditi uz malu količinu otpadnog materijala, što postupak čini prikladnim za proizvodnju komponenti većih dimenzija načinjenih od skupih metala [2]. Usprkos velikim prednostima aditivne tehnologije nad drugim proizvodnim postupcima, veliki broj parametara utječe na kvalitetu finalnog proizvoda. Jačina struje, brzina zavarivanja, vrsta i protok plina znatno utječu na mehanička i korozivna svojstva izrađenog proizvoda kao i na geometriju slojeva [3]. Sam odabir vrste kao i protok zaštitnog plina predstavlja jedan od ključnih parametara procesa. Zaštitni plin koristi se za zaštitu rastaljenog materijala te njegov utjecaj na strukturu i mehanička svojstva konačnog proizvoda je ogroman [8]. Kao i kod zavarivanja, WAAM postupkom moguće je navarivati sve vrste metala te su razvijena primjenjiva rješenja za navarivanje

pojedinih legura aluminija, titana i drugih obojenih metala kao i nehrđajućeg čelika [9]. Primjena numeričkih simulacija u zavarivanju je novo područje istraživanja te postoji puno prostora za napredak. Numeričke simulacije potpomognute eksperimentalnim mjerenjima mogu simulirati proces aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom. Upotrebom numeričke simulacije se smanjuje broj potrebnih pokusa te je moguće provesti optimizaciju tehnologije [12]. Zaostala naprezanja i deformacije suposljedica velikih unosa topline te mogu biti uzrok loma ili deformiranja konstrukcije. Brojna istraživanja usmjerena su na ispitivanju zaostalih naprezanja na uzorcima nastalim aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom. Manji unos topline i rasprskavanje smanjuje određene probleme vezane za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, što je moguće uz primjenu CMT (engl. Cold Metal Transfer) postupka zavarivanja koji je modificirani MIG/MAG postupak [16].

2 ADITIVNA PROIZVODNJA ELEKTRIČNIM LUKOM I ŽICOM-WAAM

Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom je nova tehnologija proizvodnje, a bazira se na zavarivanju metala u slojevima. BTF (engl. buy to fly) omjer je definiran omjerom mase sirovca i gotovog proizvoda, te je u idealnom slučaju 1. Finalni proizvod proizveden aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom blizu je konačne dimenzije (engl. near net shape) te mu BTF omjer iznosi manje od 1,5, što je napredak u odnosu na konvencionalne postupke proizvodnje. Razlika između ukupne širine i efektivne širine zida je materijal koji se treba ukloniti te iz preostale efektivne površine presjeka moguće je odrediti optimalne parametre WAAM-a, odnosno moguće je odrediti efikasnost nanošenja depozita.

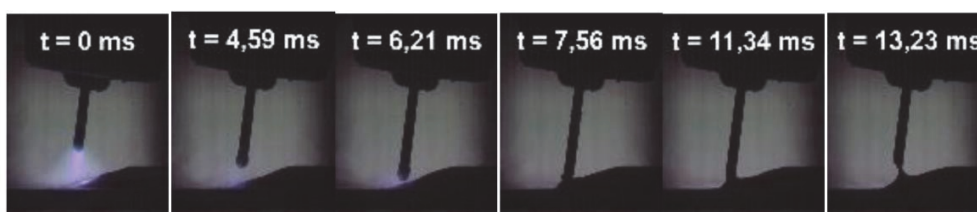
Kao i ostale proizvodne tehnologije WAAM ima neke nedostatke. Nastanak zaostalih naprezanja kao i deformacija su neizbježni, a glavni uzrok im je veliki unos topline. Također neki od nedostataka su relativno loša preciznost komada i kvaliteta površine, što zahtijeva dodatnu strojnu obradu [11].



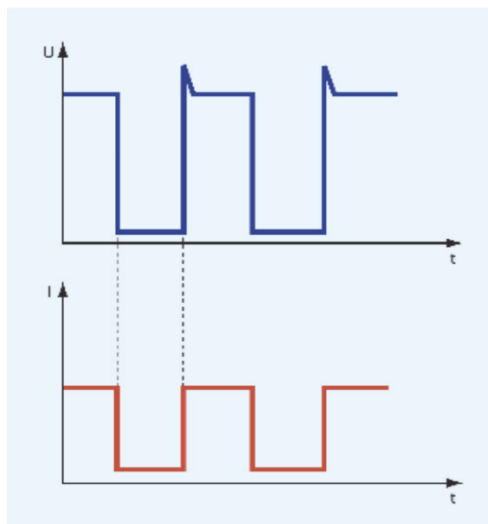
Slika 1. Shematki prikaz iskoristivosti materijala kod WAAM postupka [20]

3 COLD METAL TRANSFER

CMT je modificirani MIG/MAG postupak čiji je unos topline manji od konvencionalnog procesa. Glavna razlika od konvencionalnih postupaka je u načinu odvajanja kapljica dodatnog materijala, CMT svoj prijenos materijala temelji na prijenosu kratkim spojevima. Glavne karakteristike postupka su u digitalnom procesu prepoznavanja trenutka kratkog spoja. Žica se pomiče prema radnom komadu dok ne dođe do kratkog spoja te u tom trenutku uređaj mijenja smjergibanja žice. Kretanje žice odvija se na vrlo velikim frekvencijama što omogućuje taloženje oko 70 kapljica dodatnog materijala u sekundi. Druga značajka koja karakterizira CMT proces je prilikom kratkog spoja struja se može održati na niskim vrijednostima te je unos topline jako mali, dok konvencionalni postupci imaju visoku struju kratkih spojeva. Za postizanje ovakvog načina rada potreban je poseban pištolj za zavarivanje koji na sebi ima integriran dodatni sustav za kretanje žice koji potpomaže glavnom sustavu dobave žice koji se nalazi na izvoru struje. Postupak omogućuje odličnu kvalitetu zavara, sa smanjenim unosom topline te prskanjem svedenim na minimalnu razinu [20].



Slika 2. Princip rada CMT procesa [21]



Slika 3. Odnos struje i napona kod CMT procesa [21]

4 EKSPERIMENTALNI RAD

Eksperimentalni rad proveden je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu. Unutar eksperimentalnog rada izrađena su tri ispitna uzorka oblika zida različitih parametara s konstantnim omjerom brzine žice i brzine zavarivanja korištenjem CMT postupka zavarivanja i robotske stanice. Izvor struje korišten za eksperimentalni dio je Fronius TPS 400i CMT. Karakteristike navedenog CMT uređaja prikazane su u tablici 1. Smjer gibanja pištolja zazavarivanje naizmjenično je mijenjan, dakle, jedan prolaz je zavaren s lijeva na desno, a drugi s desna strane. Razlog tome je u izbjegavanju uspostave luka na jednoj strani te u izbjegavanju nepravilnosti geometriji u izrađenom uzorku.

Tablica 1. Karakteristike uređaja Fronius TPS 400i CMT

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

Za izradu uzoraka koristila se puna žica oznake SG2 proizvođača Elektrode Zagreb, poprečnog promjera 1,2 mm. Ova vrsta žice namijenjena je za zavarivanje nelegiranih ili nisko legiranih čelika. Kemijski sastav dodatnog materijala i njegova mehanička svojstva prikazana su u tablici 2. i 3.

Tablica 2. Kemijski sastav žice SG2

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

Tablica 3. Mehanička svojstva žice SG2

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

Plin koji je korišten za zavarivanje bio je mješavina argona i ugljikovog dioksida, trgovačkoga naziva Ferroline C18, tablica 4. Protok plina iznosio je 17 l/min.

Tablica 4. Kemijski sastav plina

Naziv proizvoda	Naziv proizvoda	Naziv proizvoda	
		Ar	CO ₂
Ferroline C18	M21	82	18

Unutar eksperimentalnog dijela rada izrađena su tri uzorka primjenom CMT postupka zavarivanja različitih parametara s konstantnim omjerom brzine žice i brzine zavarivanja. Omjer brzina zavarivanja i brzina žice prikazan u tablici 5.

Tablica 5. Parametri zavarivanja

	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
Brzina žice / m/min	5	3,5	2
Brzina zavarivanja / cm/min	33	23	13

4.1 Praćenje visine uzorka

Tijekom procesa bilježena je međuprolazna temperatura u tri točke navarenog uzorka nakon svakog prolaza, te visina uzorka na početku, sredini i samom kraju uzorka. Postupak izrade svakog ispitnog zida vođen je do visine zida od 40 mm do 45 mm. Međuprolazna temperatura držana tijekom procesa bila je oko 150 °C. Nadalje, računana je srednji prirast visine, odnosno razlika srednjih vrijednosti visina po slojevima, slika 4.

Tablica 6. Parametri uzorka 1

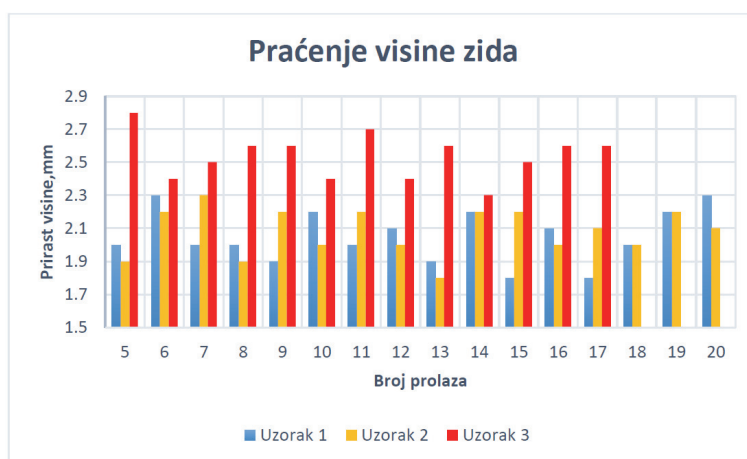
Prolaz	Struja / A	Napon / V	Visina / mm			Srednja vrijednost visine / mm	Srednji prirast visine / mm	Energija luka / kJ/cm
			1	2	3			
1	179	17,3	3,5	3,2	3,5	3,4	3,4	5,630
2	182	17,6	5,9	5,8	5,8	5,8	2,4	5,824
3	183	17,4	7,8	7,5	7,4	7,6	1,8	5,790
4	184	17,5	9,7	9,4	9,5	9,5	1,9	5,855
5	184	17,6	11,8	11,2	11,4	11,5	2	5,888
6	183	17,5	13,9	13,7	13,7	13,8	2,3	5,823
7	182	17,7	16,2	15,7	15,4	15,8	2	5,858
8	186	17,4	18	17,9	17,6	17,8	2	5,884
9	188	17,5	19,9	19,6	19,5	19,7	1,9	5,981
10	186	17,5	21,9	22,1	21,8	21,9	2,2	5,919
11	186	17,4	24,1	24	23,7	23,9	2	5,884
12	185	17,5	26,2	26	25,7	26	2,1	5,886
13	187	17,5	27,8	28,2	27,8	27,9	1,9	5,950
14	186	17,6	29,9	30,5	29,9	30,1	2,2	5,953
15	187	17,5	31,8	32,2	31,7	31,9	1,8	5,950
16	188	17,4	33,8	34,3	33,9	34	2,1	5,948
17	189	17,2	35,6	36	35,8	35,8	1,8	5,910
18	185	17,5	37,7	37,9	37,8	37,8	2	5,886
19	185	17,5	39,7	40,4	40	40	2,2	5,886
20	187	17,4	41,9	42,4	42,5	42,3	2,3	5,916
Srednja vrijednost	185,1	17,48	-	-	-	-	2,053	5,881

Tablica 7. Parametri uzorka 2

Prolaz	Struja / A	Napon / V	Visina / mm			Srednja vrijednost visine / mm	Srednji prirast visine / mm	Energija luka / kJ/cm
			1	2	3			
1	131	15,3	3,3	3,5	3,2	3,3	3,3	5,229
2	140	16,1	5,7	5,9	5,8	5,8	2,5	5,880
3	142	16	8,2	7,9	7,9	8	2,2	5,928
4	145	16,1	10	9,9	9,5	9,8	1,8	6,090
5	144	16,2	12,1	12	11,1	11,7	1,9	6,085
6	142	16,2	14,2	14,4	13,2	13,9	2,2	6,001
7	141	16,2	16,3	16,7	15,5	16,2	2,3	5,959
8	142	16,1	18,2	18,5	17,5	18,1	1,9	5,964
9	140	16,2	20,4	20,8	19,7	20,3	2,2	5,916
10	143	16	22,6	22,8	21,6	22,3	2	5,969
11	145	15,9	24,8	25,3	23,4	24,5	2,2	6,014
12	143	16,1	26,7	27,1	25,8	26,5	2	6,006
13	145	16	28,6	29,1	27,1	28,3	1,8	6,053
14	144	16,1	30,7	31,3	29,6	30,5	2,2	6,048
15	143	16,2	32,9	33,5	31,6	32,7	2,2	6,044
16	144	16,2	35	35,5	33,6	34,7	2	6,085
17	143	16,2	37,1	37,6	35,6	36,8	2,1	6,044
18	143	16,1	39	39,5	38	38,8	2	6,006
19	145	16	41,4	41,7	39,9	41	2,2	6,053
20	145	16,1	43,5	43,6	42,1	43,1	2,1	6,090
Srednja vrijednost	142,5	16,065	-	-	-	-	2,093	5,973

Tablica 8. Parametri uzorka 3

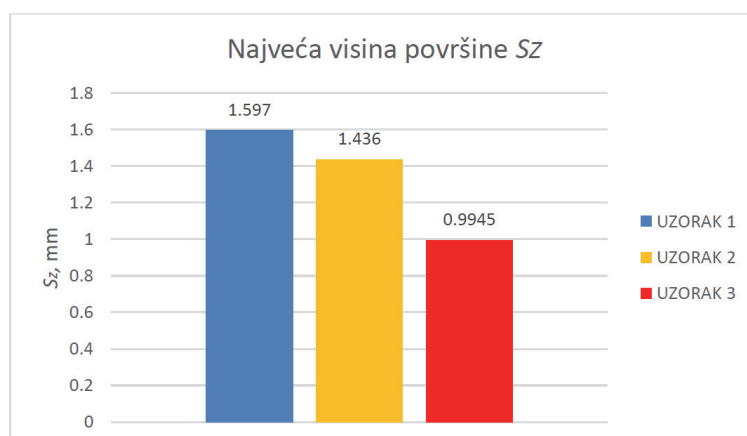
Prolaz	Struja / A	Napon / V	Visina / mm			Srednja vrijednost visine / mm	Srednji prirast visine / mm	Energija luka / kJ/cm
			1	2	3			
1	77	12,5	3,7	3,6	3,8	3,7	3,7	4,443
2	85	13,4	6,4	6	6,2	6,2	2,5	5,258
3	83	13,2	8,8	8,7	8,6	8,7	2,5	5,056
4	86	13,6	11,3	11,2	10,9	11,1	2,4	5,399
5	88	13,4	14,1	13,9	13,7	13,9	2,8	5,443
6	87	13,5	16,4	16,4	16,2	16,3	2,4	5,421
7	87	13,5	18,9	18,9	18,7	18,8	2,5	5,421
8	88	13,4	21,5	21,3	21,5	21,4	2,6	5,443
9	87	13,4	24	24,3	23,8	24	2,6	5,380
10	88	13,6	26,3	26,5	26,4	26,4	2,4	5,524
11	86	13,4	29,4	29,2	28,8	29,1	2,7	5,319
12	88	13,6	31,4	31,6	31,5	31,5	2,4	5,524
13	86	13,4	34,3	34,2	33,8	34,1	2,6	5,319
14	88	13,4	36,3	36,5	36,5	36,4	2,3	5,443
15	86	13,5	39	39	38,7	38,9	2,5	5,359
16	87	13,6	41,3	41,6	41,5	41,5	2,6	5,461
17	86	13,4	44,1	44,3	43,9	44,1	2,6	5,319
Srednja vrijednost	86,06	13,4	-	-	-	-	2,538	5,325



Slika 4. Srednji prirast visine za 3 uzorka

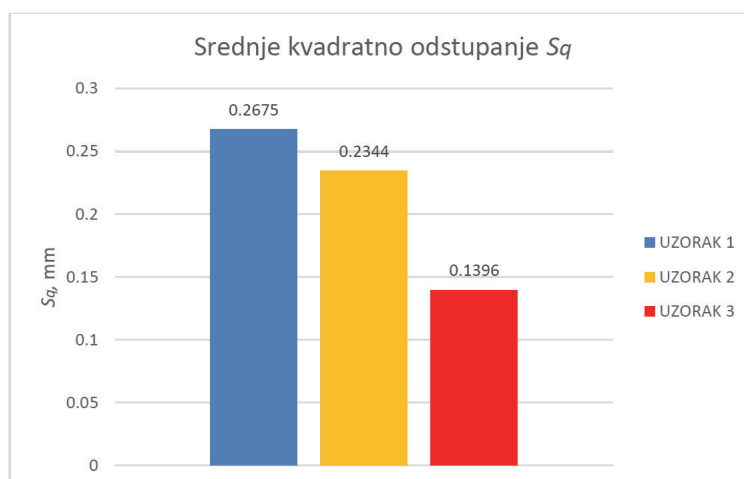
4.2 Ispitivanje parametara teksture površine

Prilikom izrade proizvoda WAAM tehnologijom bitan aspekt predstavlja tekstura površine. S_q definirano je kao srednje kvadratno odstupanje površine na ordinati unutar definiranog područja. To je ekvivalent standardnoj devijaciji visina. S_z je definiran kao suma vrijednosti najvećeg vrha i najvećeg dna unutar definiranog područja. Ispitivanje parametara teksture površine izvršeno je pomoću 3D skenera DAVID SLS-2. Iz dijagrama prikazanog na slici 5. 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 je niža vrijednost parametra S_q.



Slika 5 Dijagram vrijednosti parametra Sz

Iz dijagrama sa slike 6. može se zaključiti kako uzorak s najvećom vrijednošću parametra S_q je uzorak 1 te ga slijede uzorak 2 i uzorak 3. Radi kvalitete površine poželjnija je što niža vrijednost parametra.

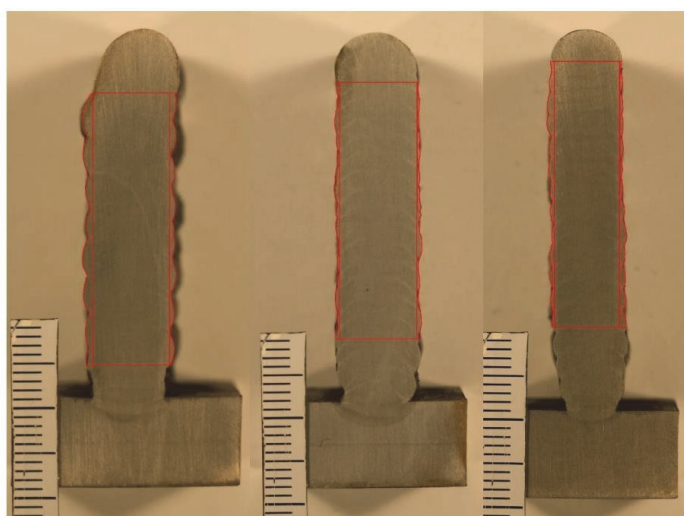


Slika 6. Dijagram vrijednosti uzorka S_q

4.3 Analiza BTF omjera

BTF omjer je mjeren pomoću ImageJ programa. Na izrađenim makroizbruscima ucrtan je pravokutnik visine 30 mm, a širine što je više moguće razmaknute, kako bi bilo što manje otpadnog materijala, te je izračunata površina tog pravokutnika. Nakon toga nacrtane su konture uzorka i izračunate njegove površine. BTF omjer računat je kao omjer površine ukupnog materijala (A_{UK}) i efektivne površine (A_{EF}) prema formuli.

$$BTF = A_{UK}/A_{EF} \quad (1)$$

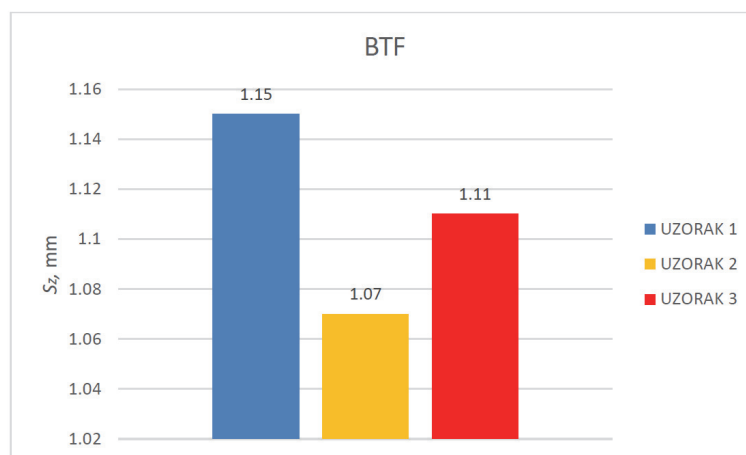


Slika 7. Izgled površine za uzorak 1 (lijevo), uzorak 2 (sredina) te uzorak 3 (desno)

Tablica 9. BTF omjeri

	UZORAK 1	UZORAK 2	UZORAK 3
Ukupna površina / mm ²	291,31	290,56	245,15
Efektivna površina / mm ²	253,61	272,36	220,13
BTF omjer	1,15	1,07	1,11

Analizom rezultata može se uočiti kako uzorak 1 ima najveći BTF omjer zbog najveće valovitosti i lošije kvalitete površine. Također može se zaključiti kako ovom metodom nije moguće staviti u ovisnost parametara teksture površine s BTF omjerom s obzirom da uzorak 3 iako ima bolju kvalitetu površine od uzorka 2 ima nepogodniji BTF omjer.



Slika 8. Dijagram vrijednosti uzorka BTF omjera

5 ZAKLJUČAK

- 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.
- Analiza parametara teksture površine provedena je da bi se mogli dobiti podaci o kvaliteti izrade površine za pojedini uzorak. Temeljem rezultata zaključuje se da uzorak 3 ima najbolju kvalitetu površine, ali i uzorak 1 i uzorak 2 imaju zadovoljavajuću kvalitetu.
- Mjerenje BTF omjera dalo je kako uzorak 1 ima najveći BTF omjer zbog najveće valovitosti i lošije kvalitete površine.
- Može se zaključiti kako ovom metodom nije moguće staviti u ovisnost parametara teksture površine s BTF omjerom s obzirom da uzorak 3 iako ima bolju kvalitetu površine od uzorka 2 ima nepogodniji BTF omjer, ali određivanjem parametara teksture površine može se upotrijebiti za približnu procjenu BTF omjera.
 - CMT postupak zavarivanja je prikladan za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom zbog svojeg niskog unosa topline i niskih vrijednosti parametara zavarivanja koje omogućuju izradu proizvoda manjih debljina.

6 REFERENCE

- [1] Nikola Knezović, Angela Topić, Kombinacija aditivne tehnologije i zavarivanja u izradi metalnih proizvoda – WAAM, 17th International Symposium INFOTEH, , 2018., 21-23, Jahorina, Bosnia and Herzegovina
- [2] Donghong Ding, Zengxi Pan, Dominic Cuiuri, Huijun Li: Wire-feed additivemufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015., 81, 465–481
- [3] Ivica Garašić, Zoran Kožuh, Matija Bušić, Ivan Jurić, Optimization of Wire and arc additive manufacturing parameters for different base materials, 2nd International Conference on Research, Innovation and Commercialization, 2018., Sarajevo, Bosnia and Herzegovina
- [4] Malcolm Dinovitzer, Xiaohu Chen, Jeremy Laliberte, Xiao Huang, Hanspeter Frei, Effect of Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process Parameters on Bead Geometry and Microstructure, Additive Manufacturing, 2019., 26, 138-146
- [5] Adebayo A, Mehnen J., Tonnellier X., Limiting Travel Speed in Additive Layer Manufacturing, 9th International Conference on Trends in Welding Research American Society for Metals, 2012., Chicago, USA
- [6] Ivica Garašić, Zoran Kožuh, Ivan Jurić, Ivan Torer, Application of MAG CBT process for Wire and arc additive manufacturing, Application of MAG CBT process for Wire and arc additive manufacturing, International conference on materials corrosion, heat treatment, testing and tribology, 2017., Zadar, Hrvatska
- [7] V. Mishra , C. Ayas, M. Langelaar, F. van Keulen, Simultaneous topology and deposition direction optimization for Wire and Arc Additive Manufacturing, Manufacturing Letters, 2021.,
- [8] Ivan Jurić, Ivica Garašić, Matija Bušić, Zoran Kožuh, Influence of Shielding Gas Composition on Structure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Inconel 625, The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society, 2019., 71
- [9] Dharmendraa, B.S. Amirkhiza, A. Lloyd, G.D. Janaki Rama, M. Mohammadia, Wire- arc additive manufactured nickel aluminum bronze with enhanced mechanical properties using heat treatments cycles, Additive Manufacturing, 2020., 36

- [10] Zidong Lin, Kaijie Song, Xinghu Yu, A review on wire and arc additive manufacturing of titanium alloy, *Journal of Manufacturing Processes*, 2021., 70, 24-45
- [11] Jurić Ivan, Garašić Ivica, Klaić Miho, Udžbinac Domagoj, Primjena dupleks čelika za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, *Zavarivanje*, 2018., 61, 137-142
- [12] Haohui Xin, Iulia Tarus, Lu Cheng, Milan Veljkovic, Nicolas Persem, Laurent Lorch, Experiments and numerical simulation of wire and arc additive manufactured steel materials, *Structures*, 2021., 1393-1402.
- [13] W. Ou, Y. Wei, R. Liu, W. Zhao, J. Cai, Determination of the control points for circle and triangle route in wire arc additive manufacturing (WAAM), *Journal of Manufacturing Processes*, 2020., 53., 84-98
- [14] Nitish P. Gokhale, Prateek Kala, Thermal analysis of TIG-WAAM based metal deposition process using finite element method, *Materials Today*, 2021., 44., 453-459
- [15] Q. Wu, Tuhin Mukherjee, Amitava, Tarasankar Debroy, Residual stresses in wire-arc additive manufacturing – Hierarchy of influential variables, *Additive Manufacturing* 2020., 35.
- [16] Jiamin Sun, Jonas Hensel, Markus Köhler, Klaus Dilger, Residual stress in wire and arc additively manufactured aluminum components, *Journal of Manufacturing Processes*, 2021., 65., 97-11
- [17] Chen Shena, Mark Reid, Klaus-Dieter Liss, Zengxi Pan., Yan Ma, Dominic Cuiuri, Stephen van Duin, Huijun Li, Neutron diffraction residual stress determinations in Fe₃Al based iron aluminide components fabricated using wire-arc additive manufacturing (WAAM), *Additive Manufacturing*, 2019, 29.
- [18] Jan Roman Hönnige, Stewart Williams, Matthew J. Roy, Paul Colegrove, Supriyo Ganguly, Residual Stress Characterization and Control in the Additive Manufacture of Large Scale Metal Structures, *Materials Research Proceedings 2 (2016)* 455-460
- [19] Blanka A. Szost, Sofiane Terzi, Filomeno Martina, Didier Boisselier, Anastasiia Prytuliak, Thilo Pirling, Michael Hofmann, David J. Jarvis, A comparative study of additive manufacturing techniques: residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V component, *Materials & Design*, 2015., 89., 559-567
- [20] Ivan Jurić, Marin Kurtela, Ivica Garašić, Jadranka Eržišnik, Matija Županić: Primjena aluminijevih legura i CMT postupka zavarivanja za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, *International conference on materials corrosion, heat treatment, testing and tribology*, 2019., Poreč, Hrvatska
- [21] Kušević, Matija, Primjena CMT postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, *Završni rad*, 2019. FSB