

ADITIVNA PROIZVODNJA ELEKTROLUČNIM POSTUPKOM ZAVARIVANJA

Wire Arc Additive Manufacturing

Matija Bušić¹, Ivica Garašić¹, Zoran Kožuh¹, Jadranka Eržišnik¹,
Franjo Dominković, Dražen Ilić

¹ Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb

Ključne riječi: aditivna proizvodnja, MIG/MAG zavarivanje,

Sažetak:

U ovom radu predstavljena su preliminarna istraživanja primjene elektrolučnog postupka zavarivanja taljivom elektrodom u zaštiti plinova (MIG/MAG) za aditivnu proizvodnju izradaka od aluminijevih legura i čelika. U istraživanjima je korišten standardni dodatni materijal – žica za zavarivanje i standardna oprema – uređaji za MIG/MAG zavarivanje, robot i sustav za automatsko vođenje. Pri aditivnoj proizvodnji navarivanjem aluminijeve legure EN AW 5183 ispitivan je utjecaj promjene frekvencije impulsne struje na geometriju izrađenog uzorka i nastanak nepravilnosti u navarenim slojevima. Uočena je potreba za preciznijim vođenjem električnog luka u simetriji sa svakim prethodnim prolazom. Pogreškom u vođenju dolazi do većeg razlijevanja taline prema jednom rubu i nepravilnog slaganja slojeva što u konačnici dovodi do nakošenog izgrađenog zida. U ispitivanju aditivne proizvodnje MAG postupkom čelika uz odabir određenih konstantnih parametara variran je način prijenosa metala i brzina navarivanja kako bi se došlo do optimalnih parametara kojima se mogu izraditi zidovi, odnosno stijenke sa prihvatljivom geometrijom i mikrostrukturom. Prijenosom metala kratkim spojevima dobiva se ujednačenija geometrija navara po čitavom presjeku. Uspoređujući zidove dobivene impulsnim strujama, vidljivo je da brzina navarivanja utječe na širinu zida.

Abstract:

This work presents preliminary research of applying MIG/MAG welding technology for additive manufacturing of aluminium and steel products. A standard filler material (welding wire) and standard welding equipment for MIG/MAG, welding robot and automatic guiding system have been used in this experiment. In research of wire arc additive manufacturing of aluminium alloy EN AW 5183 the influence of impulse frequency on the geometry of manufactured sample and imperfection occurrence has been examined. Necessity for guiding arc in a symmetry with previous pass has been observed. When error in guiding occurs the molten pool runs on one edge and after solidification results with skewed wall. In research of wire arc additive manufacturing of steel an ideal set of parameters for producing wall structures with appropriate geometry and microstructure has been determined with variation of metal transfer and welding speed. The uniform geometry of the wall across the whole section has been produced with a short arc metal transfer. When walls produced with an impulse welding have been compared it is clear that welding speed influences on the width of the wall.

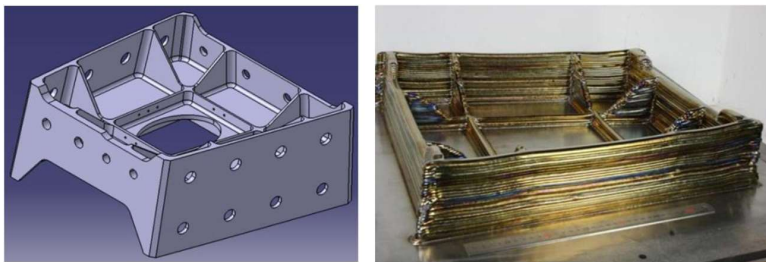
1. Uvod:

Aditivna proizvodnja (engl. Additive Manufacturing) dio je proizvodnog strojarstva koji se bavi izradom predmeta nanošenjem čestica u tankim slojevima [1]. Postupci aditivne proizvodnje tj. proizvodnje dodavanjem bitno se razlikuju od konvencionalnih proizvodnih postupaka kao što su tokarenje, brušenje, glodanje i sl. Aditivna proizvodnja započela se razvijati kako bi se smanjila cijena određenih proizvoda i utrošak materijala potrebnog za proizvodnju. Mnoga istraživanja usmjerena su na aditivnu proizvodnju metalnih komponenti složene geometrije i to od materijala poput

aluminijevih legur, legura titana i nikla. Najzastupljeniji postupci aditivne proizvodnje su: stereolitografija, trodimenzionalno naštrcavanje (3D printanje), taloženje rastaljenog materijala, proizvodnja laminiranih objekata te selektivno sinteriranje laserskom zrakom ili elektronskim mlazom [2].

Proizvodni proces u aditivnoj proizvodnji započinje nastajanjem CAD (engl. Computer Aided Design) modela ili digitaliziranjem već postojećeg objekta. Zatim se model pretvara u niz horizontalnih poprečnih presjeka. Uređajem za aditivnu proizvodnju izrađuje se konačni proizvod sloj po sloj. Ako se izrađuje proizvod od metala obično je na kraju potrebna i završna strojna obrada odvajanjem čestica.

Mnogi istraživači nastoje proizvodne tehnologije koje se koriste za zavarivanje metala unaprijediti i primijeniti za aditivnu proizvodnju metalnih izradaka. Jedna od mnogih novo razvijenih tehnologija je i WAAM (engl. Wire + Arc Additive Manufacture) [3]. Ova tehnologija koristi električni luk kao izvor topline kojom se tali „sirovi“ materijal u obliku žice. Žica se dovodi pomoću standardnog dodavača direktno na mjesto taljenja [3]. Gibanje električnog luka i dodavača žice po određenoj putanji može biti izvedeno pomoću robotskog sustava ili CNC portalnog stroja što znači da za WAAM proizvodnju nije potrebno instalirati novu opremu nego je moguće koristiti postojeću opremu za zavarivanje. Prilikom WAAM procesa kapljice metala se talože jedna do druge u slojevima. Rezultat takvog taloženja kapljica sloj po sloj je ravan metalni zid čija najmanja širina iznosi od 1 do 2 mm. Do danas su provedena istraživanja izrade dijelova od titanovih i aluminijevih legura te raznih čelika težine i više od 10 kg, te dužine veće od 6 m. Proizvedeni su različiti dijelovi poput dijela kućišta zaustavnog trapa aviona od Ti-6Al-4V legure (slika 1-), segmenata avionskog krila, čeličnih košuljica projektila i sl [3, 4].



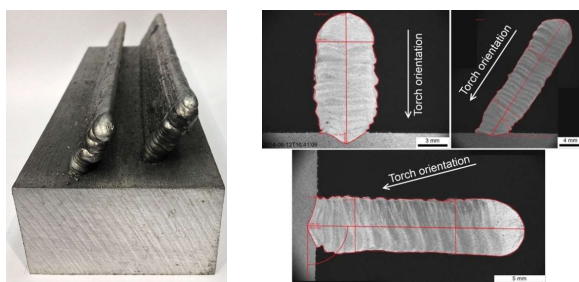
Slika 1- Dio kućišta zaustavnog trapa aviona od Ti-6Al-4V legure izrađen WAAM tehnologijom (lijevo CAD model, desno gotov objekt) [4]

Na britanskom institutu za zavarivanje TWI pomoću CMT (engl. Cold Metal Transfer) procesa oblikovani su zidovi i šuplje strukture navarivanjem u više prolaza sa vertikalnim i horizontalnim odstojanjem (primjer na slici 2.). Potvrđeno je da se standardnim CMT gorionikom mogu izrađivati jednaki prolazi zauzimanjem različitih položaja u prostoru. Ispitivanjem je dokazano da se izradak iz aluminijeve legure EN AW-5183 može izraditi uz brzinu deponiranja od 0,94 kg/h korištenjem dodatnog materijala promjera 1 mm. Analizom izrađenih objekata potvrđeno je da je kvaliteta depozita vrlo dobra, bez prisutnosti poroznosti sa vrlo dobrom međuslojnom povezanosti i pravilnosti bez obzira na promjenu položaja i nagiba pištolja. Veći raspon različitih oblika navara primjenjen je u ispitivanjima uz varijaciju širine od 1 do 5 mm i varijaciju visine od 1 mm do 3 mm [5]. Navedeno je ispitivano u svrhu predviđanja ponašanja procesa pri izradi proizvoda sa vrlo tankim stijenkama i smanjivanju broja prolaza potrebnih da bi se izradio određeni oblik proizvoda.

Potencijal primjene WAAM tehnologije kao aditivnog proizvodnog procesa nalazi se i u izradi proizvoda od legura sa višom cijenom ili legura koje su inače teže strojno obradive. Budući da je cijena sirovog materijala veća kao prednosti WAAM tehnologije ističu se proizvodnja bez otpada i isplativa proizvodnja manjih serija, te također nije potrebna izrada dodatnih alata kao što su kalupi,

matrice, kokile i sl. Od nedostataka WAAM procesa bitno je spomenuti moguću pojavu zaostalih napreznja i deformacija nastalih prilikom višeg unosa topline i neujednačenu geometriju.

Kod WAAM postupka za aluminijske legure treba obratiti pozornost na stvaranje pora i moguće pukotine u materijalu. Da bi se izbjegli mogući problemi koristi se kontrola mikrostrukture, žica mora biti kvalitetna i dobro skladištena, a prema zahtjevima pojedinih aluminijskih legura provodi se naknadna toplinska obrada. Da bi se aluminijska legura mogla pravilno nanijeti WAAM postupkom potrebno je slijediti osnovne smjernice kao i kod zavarivanja.



Slika 2- Uzorci ispitivanja CMT aditivne proizvodnje izrađeni na TWI-u [5]

Svrha provedenog ispitivanja bila je odrediti primjenjive parametre MIG/MAG odnosno postupka navarivanja za aditivnu proizvodnju izradaka od aluminijske legure EN AW 5183 te u drugom slučaju čelika S 235. U ispitivanju je korišten standardni dodatni materijal – žica za zavarivanje i standardna oprema – uređaji za MIG/MAG zavarivanje, robot i sustav za automatsko vođenje. U ispitivanju aditivne proizvodnje MIG postupkom aluminijske legure uz odabir određenih konstantnih parametara ispitivan je utjecaj promjene frekvencije impulsne struje na geometriju izrađenog uzorka i nastanak nepravilnosti u navarenim slojevima. U ispitivanju aditivne proizvodnje MAG postupkom čelika uz odabir određenih konstantnih parametara variran je način prijenosa metala i brzina navarivanja kako bi se došlo do optimalnih parametara kojima se mogu izraditi zidovi, odnosno stijenke sa najboljom geometrijom i mikrostrukturom.

2. Eksperiment

2.1. Navarivanje aluminijske legure EN AW 5183

Za izradu uzoraka MIG postupkom korišten je OTC Welbee Inverter P400 pulsni MIG/MAG uređaj za zavarivanje sa sinergijskim funkcijama. Za pomicanje pištolja po trajektoriji navarivanja korišten je modularni automatski uređaj Bug-O Systems MDS - 1002 kojim se omogućuje konstantna brzina i linijsko vođenje. U eksperimentu je korištena žica za zavarivanje ESAB OK Autrod 18.16/5183 promjera 1,2 mm. Ova žica obično se koristi za zavarivanje aluminijskih legura legiranih magnezijem. U tablici 1. prikazan je orijentacijski kemijski sastav navedene žice prema uputi proizvođača.

Tablica 1- Orijentacijski kemijski sastav žice za zavarivanje ESAB OK Autrod 18.16/5183

Mg	Zn	Fe	Cu	Ti	Si	Mn	Al	Cr
4,90%	0,01%	0,13%	0,01%	0,10%	0,04%	0,65%	94,20%	0,08%

Oblikovano: Lijevo

Uzorci su navarivani na „žrtvenom materijalu“, limu iz legure EN AW 5083 H111 debljine 10 mm. Svaki prolaz bio je dužine 100 mm te je između navarivanja provedeno čišćenje aluminijskom četkom. Međuprolazna temperatura, mjerena je pomoću uređaja za infracrveno mjerenje temperature FLUKE 568 IR, iznosila je maksimalno 50°C. Udaljenost sapnice od radnog komada postavljena je na 15 mm i prije svakog prolaza je ponovno podešavana. U eksperimentu je korištena lijeva tehnika

rada da bi se dobio što manji unos topline radi izbjegavanja pogrublivanja zrna u strukturi i razlijevanja taline tijekom depozita viših slojeva. Razlijevanje taline kod WAAM postupka nije poželjno jer je upravo potrebno dobiti veći navar u visinu, a ne u širinu. Pištolj je postavljen pod kutem od 15° u odnosu na okomicu na površinu navarivanja. Brzina gibanja pištolja bila je 340 mm/min. Za zaštitni plin odabran je 100% Argon te je postavljen protok od 15 l/min. Za metodu zavarivanja izabrana je funkcija DC WAVE PULSE koja omogućava podešavanje frekvencije impulsa zavarivanja. Ova funkcija ciklički izmjenjuje dva impulsa zavarivanja te zavar izgledom više podsjeća na onaj dobiven TIG postupkom. S odabirom DC WAVE PULSE metode zavarivanja, omogućava se korištenje WAVE FRQ funkcije u kojoj se podešava frekvencija impulsa. Frekvencija je pri izradi prvog uzorka iznosila 6 Hz, kod drugog 12 Hz, te kod trećeg 9 Hz. Ručnim visinomjerom mjerena je visina depozita nakon svakog prolaza na središnjem dijelu uzorka. U tablici 2. prikazani su rezultati mjerenja visine i jakosti struje u svakom prolazu za sva tri uzorka. Na slici 3. prikazani su uzorci 2. i 3. nakon izvedenog posljednjeg prolaza.

Tablica 2- Parametri navarivanja i visina uzorka nakon svakog prolaza

Br. prolaza	Jakost struje [A]	Visina uzorka [mm]		
		uzorak 1. (6 Hz)	uzorak 2. (12 Hz)	uzorak 3 (9 Hz)
1	240	/	/	/
2	210	7,7	7,8	8,0
3	150	11,0	11,2	11,5
4	150	13,5	14,8	15,0
5	135	15,8	16,9	16,3
6	120	17,9	19,0	18,2
7	120	19,5	21,1	20,7
8	112	21,1	23,6	22,2
9	112	26,6	25,0	24,7
10	112	25,9	27,9	26,8
11	112	27,2	29,7	28,6
12	112	29,8	31,1	30,2
13	112	32,0	32,8	31,5
14	112	34,6	34,1	33,0
15	112	36,2	36,2	35,9
16	112	38,1	38,5	38,1
17	112	39,2	40,8	39,5

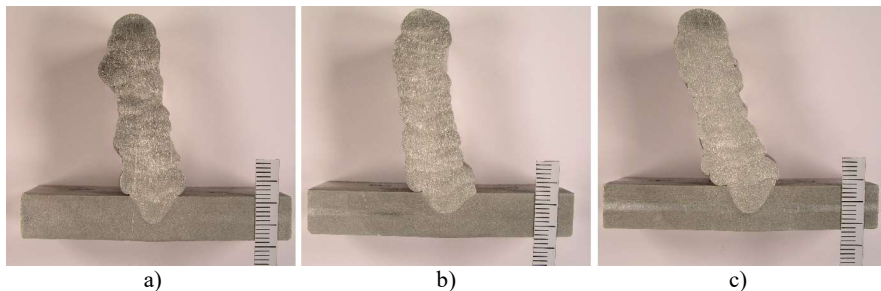
Oblikovano: Lijevo

Oblikovana tablica



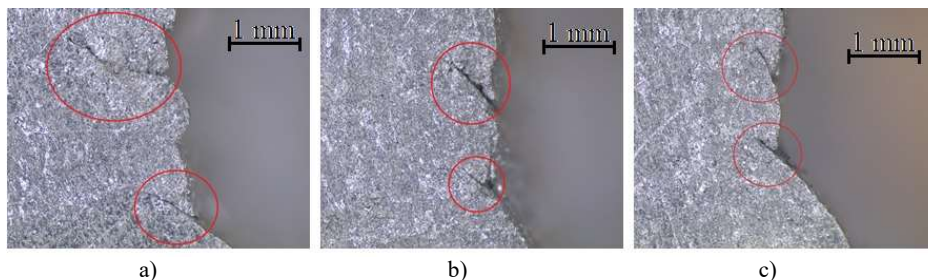
Slika 3- Uzorci 2. i 3. nakon izrade posljednjeg prolaza

Iz svakog uzorka izrađeni su makroizbrusci kako bi se utvrdila homogenost struktura i eventualna pojava nepravilnosti u navarenim prolazima. Nakon izrezivanja tračnom pilom uzorci su brušeni brusnim papirom sve do gradacije P 4000. Nakon takve pripreme makroizbrusci su nagriženi Kellerovim reagensom. Na slici 4. prikazani su makroizbrusci uzoraka 1.,2. i 3.



Slika 4- Makroizbrusci [6]: a) uzorak 1, b) uzorak 2, c) uzorak 3.

Kao što se vidi iz makroanalize uzoraka korištenim automatski uređajem za linijsko vođenje ne može se točno pratiti linija gibanja električnog luka u svakom prolazu te dolazi do većeg razlijevanja taline na jednu stranu uzorka. Analizom na mikroskopu LEICA MZ6 uvećana su navedena područja 25 puta i prikazana su na slici 5. Utvrđene su pogreške nedovoljnog vezivanja i penetracije na rubovima sva tri uzoraka [6]. Ove pogreške nastaju zbog razlijevanja taline na neprotaljenom rubu podloge odnosno prethodnog prolaza. Dužina nalijepljenog područja je u rasponu od 0,5 do 1 mm. Uključici i poroznost nisu primijećeni na izrađenim uzorcima.



Slika 5- Pogreške nalijepljivanja na prethodni sloj [6]:
uzorak 1, b) uzorak 2, c) uzorak 3.

2.2. Navarivanje čelika

Za izradu uzoraka navarivanjem čelika korišten je izvor OTC Daihen DP 400 povezan sa robotskom stanicom Almega OTC AX V6. Kao dodatni materijal korištena je puna žica EZ – SG 2 proizvođača Elektroda Zagreb d.d. (prema EN ISO 14341-A oznaka G 42 2 C/M 3Si1) promjera 1,2 mm. Ova žica koristi se za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm². Orijentacijski kemijski sastav dodatnog materijala prema uputi proizvođača prikazan je u tablici 3.

Tablica 3- Orijentacijski kemijski sastav dodatnog materijala EZ - SG2

C	Mn	Si	Cu
0,06-0,13	1,4-1,6	0,7 – 1,0	≤ 0,3

Uzorci su navarivani na limu od konstrukcijskog čelika S255JRG2 debljine 10 mm. Prije stezanja i pozicioniranja ploča na robota, provedeno je brušenje ploča ručnom brusilicom kako bi se uklonile površinske nečistoće i oksidi. Svaki prolaz bio je dužine 100 mm, te je između navarivanja provedeno čišćenje čeličnom četkom. Udaljenost sapnice od radnog komada postavljena je na 13 mm

Oblikovano: Lijevo

Oblikovana tablica

i prije svakog prolaza je ponovno podešavana. U eksperimentu je korištena neutralna tehnika rada. Korišten je zaštitni plin u sastavu 82% Ar i 18% CO₂ tj. M21 (prema normi HRN EN ISO 14175: 2008). Protok plina za sve prolaze je bio 18 l/min. Međuprolazna temperatura iznosila je maksimalno 40°C i mjerena je pomoću uređaja za infracrveno mjerenje temperature FLUKE 568 IR. Za izradu uzorka 4 korišten je prijenos metala kratkim spojevima, brzina navarivanja bila je 500 mm/min, a očitani napon je varirao od 17 do 19 V. Za izradu uzorka 5 korišten je impulsni prijenos metala, brzina navarivanja je također bila 500 mm/min, a očitavan napon varirao je od 23 do 25 V. Za izradu uzorka 6 korišten je impulsni prijenos metala, brzina je povećana na 800 mm/min, a očitavan napon varirao je od 23 do 25 V. U tablici 4. dane su vrijednosti jakosti struje u svakom prolazu kod izrade sva 3 uzorka navarivanja čelika. Također nakon svakog prolaza mjerena je i visina uzorka (tablica 4.). Nakon navarivanja, uzorci su izrezani na tračnoj pili na segmente duljine 30 mm s tim da je početak rezanja bio na udaljenosti 50 mm od početka navarivanja. Nakon rezanja slijedilo je brušenje i poliranje sve do gradacije P 4000. Za potrebe makroanalize uzorci su nagriženi u otopini nitala (3 % dušične kiseline i 97 % etilnog alkohola) u trajanju od 20 sekundi.

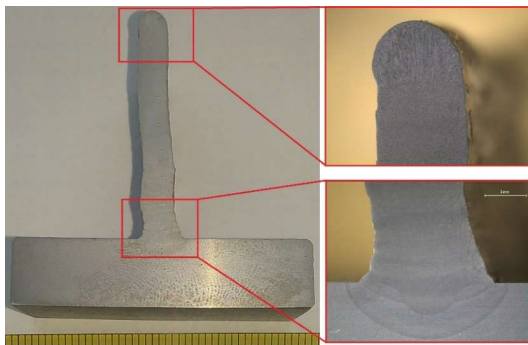
Tablica 24. Parametri navarivanja i visina uzorka nakon svakog prolaza

Br. prolaza.	uzorak 4		uzorak 5		uzorak 6	
	jakost struje [A]	visina [mm]	jakost struje [A]	visina [mm]	jakost struje [A]	visina [mm]
1	154	1,5	157	2,4	160	2,0
2	152	2,9	159	4,3	159	3,4
3	156	3,9	160	5,6	155	4,7
4	155	5,0	153	7,1	151	5,8
5	151	6,6	152	8,6	150	6,8
6	150	7,7	152	9,5	150	8,1
7	133	8,7	137	10,9	136	9,4
8	132	9,8	135	12,1	135	10,6
9	136	11,2	135	13,4	140	11,6
10	137	12,8	137	15,1	133	12,8
11	120	13,9	126	16,7	123	14,7
12	122	14,9	128	18,0	126	15,9
13	127	16,4	130	19,7	125	16,9
14	125	17,4	126	21,2	125	17,7
15	124	18,7	124	22,6	124	18,7
16	122	19,9	125	24,0	124	19,9
17	123	21,5	124	25,5	125	20,8
18	125	22,6	128	26,6	124	22,1
19	124	23,9	127	27,9	125	23,3
20	128	25,5	127	28,6	124	24,1
21	126	26,6	127	30,4	127	25,2
22	123	28,1	125	32,0	124	26,2
23	126	29,6	126	33,5	125	27,6
24	125	30,6	128	34,6	123	28,9
25	124	31,7			122	29,9
26	125	32,7			125	30,9
27	122	34,4			125	31,9
28	125	35,3			127	33,1
29					124	34,3
30					126	35,6

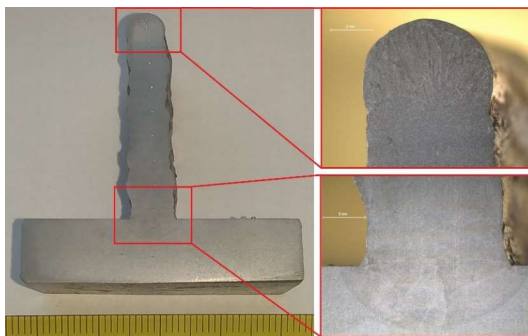
Oblikovano: Lijevo

Oblikovana tablica

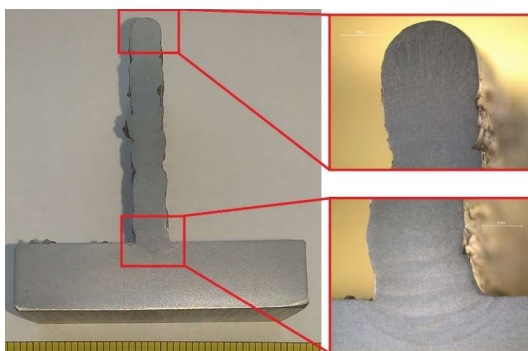
Makroanaliza je provedena na mikroskopu Leica MZ6 (slike 6, 7 i 8). Na njima se može vidjeti gruboznata mikrostruktura nastala u posljednjem prolazu. Kako svaki slijedeći prolaz dodatno unosi toplinu i u prethodni, čitava struktura do predposljednjeg prolaza je sitnozrnata, nastala normalizacijskim žarenjem. Zbog nestabilnosti taline kod navarivanja impulsnim strujama vidljivo je puno veće rasprskavanje kapljica po podlozi što uzrokuje gubitak dodatnog materijala. Zid dobiven kratkim spojem ima manje neravnu površinu od zidova izrađenih impulsnim strujama te je veća efektivna širina zida [7].



Slika 6- Makroanaliza uzorka 4 [7]



Slika 7- Makroanaliza uzorka 5 [7]



Slika 8- Makroanaliza uzorka 6 [7]

3. Zaključak

Parametri navarivanja najviše utječu na izgled i svojstva nanesenih prolaza. Ukoliko se koristi velika jakost struje dolazi do prevelikog unosa topline i talina se slijeva te dolazi do prevelikog širenja zida bez uzdizanja u visinu. Ako je struja za navarivanje manja od potrebne dolazi do naljepljivanja sloja na sloj i dobivena struktura nije adekvatna. Neujednačena geometrija navara od početka do kraja prolaza uzrokovana je smanjenim unosom topline kod većih podloga na početku navarivanja i tada je penetracija manja. Zbog toga je na početku prolaza visina navara veća. Na kraju prolaza dolazi do „bježanja“ rastaljenog metala. Kada se električni luk zaustavi, dobiva se nagnut oblik navara. Da bi se dobio geometrijski ispravan proizvod, parametri procesa vezani uz geometriju (širina prolaza, debljina zida, promjer žice, brzina dodavanja žice i brzina navarivanja) se moraju pažljivo kontrolirati kako bi se postigao odgovarajući oblik i dimenzije depozita.

Pri navarivanju aluminijeve legure u ovom eksperimentu korišten je automatski uređaj za linijsko vođenje kojim nije postignuto vođenje električnog luka u simetrali sa prethodnim prolazom. Pogreškom u vođenju dolazi do većeg razlijevanja taline prema jednom rubu i nepravilnog slaganja slojeva što u konačnici dovodi do nakošenog izgrađenog zida. Kada se jedan prolaz postavi dalje od linije vođenja svaki slijedeći otežava daljnju vertikalnu „gradnju zida“. Također, makroanalizom je utvrđeno naljepljivanje taline na strani nakošenosti zida u dimenzijama od 0,5 do 1 mm. Najveći rast strukture uz najbolji izgled geometrije postignut je odabranim konstantnim parametrima i frekvencijom od 12 Hz u DC WAVE PULSE modu rada izvora struje (uzorak 2). Taj uzorak nema vidljivih makrostrukturnih pora niti pukotina u unutrašnjosti strukture.

Robotizirani MAG postupak navarivanja za proizvodnju dijelova od ugljičnog čelika može se primijeniti za aditivnu proizvodnju. Usporedbom zidova dobivenih robotiziranim MAG postupkom kratkim spojevima i impulsnim strujama vidljivo je da način prijenosa metala ima značajan utjecaj na geometriju izgrađenog zida. Vizualnom kontrolom zidova i makroizbrusaka uzoraka ustanovljeno je da se kod zida izgrađenog kratkim spojem dobiva ujednačenija geometrija navara po cijeloj vertikali zida te da se kratkim spojevima mogu izraditi zidovi tanjih stijenki. Kod zidova izrađenih impulsnim strujama, ustanovljena je neujednačenija geometrija navara. Takav zid ima manju efektivnu širinu te dolazi do gubitka dodatnog materijala zbog značajnog prskanja kapljica. Uspoređujući broj prolaza za izradu zida određene visine, vidljivo je da se impulsnim strujama izrađuje određena visina zida sa manjim brojem prolaza. Međutim, isto tako je širina zida 50 % veća što ukazuje da ima puno više taline kod impulsnih struja. Uspoređujući zidove dobivene impulsnim strujama, vidljivo je da brzina navarivanja utječe na širinu zida. Što je veća brzina navarivanja, manji je unos topline, manje je taline, pa je manja širina zida.

4. Literatura:

[1] HRVATSKA ENCIKLOPEDIJA, mrežno izdanje, ur. S. Ravlić, Leksikografski zavod Miroslav Krleža (2015)

[2] Filetin, T.; Kramer, I.; Šercer M.: Brza izrada konstrukcijskih dijelova i alata, Suvremeni materijali i postupci, ur. T. Filetin, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju (2005), 19 – 45

[3] Williams S. W.; Martina F.; Addison A. C.; Ding J.; Pardal J.; Colegrove P.: Wire + Arc Additive Manufacturing, Materials Science and Technology, 2015

[4] Addison A.; Ding J.; Martina F.; Lockett H.; Williams S.; Zhang X.: Manufacturing of Complex Titanium Parts using Wire + Arc Additive Manufacture, Titanium Europe 2015 procc., International Titanium Association, Birmingham, UK, 2015

Oblikovano: Font: 11 točka

[5] Connect +, The Welding Institute ltd, Cambridge, UK, (2015) ½,

[6] Dominković F.: Primjena MIG postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.

[7] Ilić D.: Optimizacija prijenosa metala za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.