

Optimizacija prijenosa metala za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom

Ilić, Dražen

Master's thesis / Diplomski rad

2016

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:235:595624>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Dražen Ilić

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor: Doc.dr.sc. Ivica Garašić
Student: Dražen Ilić

Zagreb, 2016.

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

Zahvaljujem na mentorstvu, pomoći i korisnoj literaturi docentu dr.sc. Ivici Garašiću.

Posebno se zahvaljujem dr. sc. Matiji Bušiću koji me je vodio kroz diplomski rad i svojim znanjem i iskustvom uvelike doprinio uspješnoj izradi ovog diplomskog rada.

Također se zahvaljujem svojoj curi Katarini koja je bila uz mene cijelo moje fakultetsko obrazovanje i najveća moralna podrška.

Zahvaljujem se svojim roditeljima, djedu i baki, sestri i šogoru koji su me podržali financijski i moralno.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske 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 01-12-2018. Prilog
Klasa: 602-04/16-6/3
Ur.broj: 15-1703-16-391

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

DRAŽEN ILIĆ

Mat. br.: **0035187803**

Naslov rada na
hrvatskom jeziku:

**OPTIMIZACIJA PRIJENOSA METALA ZA ADITIVNU
PROIZVODNJU ELEKTRIČNIM LUKOM I ŽICOM**

Naslov rada na
engleskom jeziku:

**OPTIMIZATION OF METAL TRANSFER FOR WIRE ARC
ADITIVE MANUFACTURING**

Opis zadatka:

U uvodnom dijelu opisati načela WAAM-Wire arc additive manufacturing kao i prikladne osnovne materijale i postupke zavarivanja za aditivnu proizvodnju električnim lukom. Temeljem pregleda literaturnih izvora dati primjere primjene aditivne proizvodnje električnim lukom. Posebno analizirati koji prijenosi metala kod MAG postupka su potencijalno iskoristivi za tu namjenu.

U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je uz primjenu robotske stanice definirati primjenjive parametre MAG postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom. Kao osnovni materijal upotrijebiti žicu kvalitete G3Si. Komparativnu analizu načiniti na osnovu prijenosa metala kratkim spojevima i impulsnim strujama. U konačnici ocijeniti primjenjivost definiranih parametara za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom.

Zadatak zadan:

29. rujna 2016.

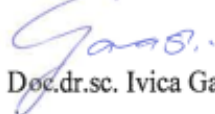
Rok predaje rada:

1. prosinca 2016.


Predviđeni datum obrane:

7., 8. i 9. prosinca 2016.

Zadatak zadao:


Doc.dr.sc. Ivica Garašić

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
POPIS KRATICA	VII
POPIS JEDINICA	IX
SAŽETAK.....	X
SUMMARY	XI
1 Uvod.....	1
2 Aditivna proizvodnja.....	2
2.1 Aditivna proizvodnja metalnih materijala.....	4
2.2 WAAM.....	7
2.2.1 Povijest razvoja procesa	9
2.2.2 Zaštita procesa dodatnom opremom	10
2.2.3 Problematika kod WAAM-a	12
2.2.4 Prednosti i nedostaci.....	13
2.3 Osnovna načela WAAM sustava.....	14
2.4 Optimizacija parametara zavarivanja	17
2.4.1 Greške kod WAAM-a	19
3 Izazovi za WAAM sustav	20
3.1 Zaostala naprezanja i deformacije.....	20
3.2 Točnost i kvaliteta površine	22
3.2.1 Točnost.....	22
3.2.2 Kvaliteta površine	23
4 Materijali kod WAAM-a.....	24
4.1.1 Titan	25
4.1.2 Aluminiij	26

4.1.3	Kombinacije materijala	26
5	Postupci zavarivanja kod WAAM-a	28
5.1	MIG/MAG.....	28
5.1.1	Načini prijenosa metala kod MIG/MAG postupka	29
5.1.2	Primjena MIG/MAG kod WAAM procesa	33
6	Primjena	36
6.1	Rotor.....	37
6.2	Potporna konstrukcija krila zrakoplova.....	38
6.3	Preklopno krilo	38
6.4	Primjer dijela velike složenosti	39
6.5	Dio kućišta zaustavnog trapa aviona	40
6.6	Rebro krila.....	41
6.7	Model krila	43
6.8	Čelični stožac	44
6.9	Okvir.....	44
7	Ekperimentalni rad.....	46
7.1	Opis eksperimenta	46
7.2	Oprema za zavarivanje	46
7.3	Podloga i dodatni materijal	48
7.4	Parametri zavarivanja	49
7.5	Priprema i izrada ispitnih uzoraka.....	55
7.6	Mjerenje tvrdoće	60
7.7	Mjerenje geometrije zidova.....	62
8	Zaključak.....	66
9	Literatura	67

POPIS SLIKA

Slika 1: Kvalitativno stanje proizvodnje metalnih dijelova aditivnim postupcima u odnosu na uobičajene postupke [3]	5
Slika 2: Podjela postupaka aditivne proizvodnje za metale [5]	5
Slika 3: WAAM zid [7].....	8
Slika 4: a) ABB robot za zavarivanje s 6 SSG; b) CNC portalni stroj za zavarivanje [8].....	9
Slika 5: Proizvodi dobiveni nizanjem sloj po sloj [9]	9
Slika 6: a) lokalni uređaj za zaštitu; b) zatvoreni šator u kojem se nalazi zaštitni plin [5].....	11
Slika 7: Zaštita procesa lokalnim uređajem [10].....	11
Slika 8: Online valjanje [7]	13
Slika 9: Osnovni koraci kod WAAM procesa [6]	15
Slika 10: Putanje gibanja (a-raster; b-zigzag, c-slijeđenje konture, d-hibridno, e-kontinuirano) [6]	16
Slika 11: Model preklapanja dviju susjednih kapljica [6].....	17
Slika 12: Omjer visina prvoga i drugog zavara s različitim udaljenostima središta [6].....	18
Slika 13: Profili metala zavara s različitim udaljenostima d (a) $d > w$, b) $d < w$, $ZP < ZD$; c) $d < w$, $ZP = ZD$, d) $d < w$, $ZP > ZD$) [3]	19
Slika 14: Poprečni presjek preklapajućeg profila metala zavara (lijevo) i valovitost površine (desno) [3]	19
Slika 15: Prikaz načina taloženja (lijevo-standardni način, desno-taloženje dijelova) [3]	21
Slika 16: Deformiranje podloge i zida (lijevo) i smanjeno deformiranje (desno) [3].....	22
Slika 17: Rezanje modela u slojeve: a) originalni model, b) model s konstantnom debljinom slojeva, c) model s varijabilnom debljinom slojeva prilagođenoj veličini modela [3]	22
Slika 18: Efekt stepenica prilikom izrade zida [3]	23
Slika 19: Kombinacija čelika i invara [13].....	24
Slika 20: Prsten dobiven kombinacijom čelika i bakra [13]	24
Slika 21: Primjeri primjene vatrootpornih materijala izrađenih WAAM-om [14]	25

Slika 22: WAAM sustav za Fe-Al legiranje [16].....	27
Slika 23: Detalj MIG postupka zavarivanja [3]	28
Slika 24: Princip prijenosa metala kratkim spojevima po fazama [19].....	30
Slika 25: Prijenos metala prijelaznim lukom [20].....	32
Slika 26: Prijenos metala štrcajućim lukom [20]	32
Slika 27: Shematski prikaz robota za WAAM sustav baziran na MAG postupku [3].....	34
Slika 28: Razlika u geometriji zavara na početku i na kraju prolaza [3]	35
Slika 29: a) Postavke opreme, b) Komponenta nakon glodanja [6].....	37
Slika 30: Potporna konstrukcija krila zrakoplova od Ti6Al4V [22]	38
Slika 31: Preklopno krilo [21].....	39
Slika 32: Dio velike složenosti [21]	39
Slika 33: Primjena paralelnog a), oscilirajućeg načina b) i kombinacija paralelnog i oscilirajućeg c) [22].....	41
Slika 34: CAD model rebara krila [22]	42
Slika 35: Proces taloženja s dva robota i okretnim stolom aluminijskog rebra [22].....	42
Slika 36: Krilo od visokočvrstog čelika [22]	43
Slika 37: Čelični stožac [8]	44
Slika 38: Okvir izrađen WAAM sustavom [21].....	45
Slika 39: Robotska stanica Almega OTC AX V6	47
Slika 40: Položaj pištolja za zavarivanje prije zavarivanja (lijevo) i generiran program (desno)	48
Slika 41: Pozicionirane i stegnute ploče prije zavarivanja.....	48
Slika 42: Zavarivanje zida.....	48
Slika 43: Mjerenje temperature međuprolaza	53
Slika 44: Zid 1	53
Slika 45: Zid 2	54
Slika 46: Zid 3	54

Slika 47: Osnovni materijal uzorka 1 (povećanje 7,88 x).....	55
Slika 48: ZUT i početak zida uzorka 1 (povećanje 12,5 x).....	56
Slika 49: Završni prolazi uzorka 1 (povećanje 12,5 x)	56
Slika 50: Osnovni materijal uzorka 2 (povećanje 7,88 x).....	57
Slika 51: ZUT i početak zida uzorka 2 (povećanje 12,5 x).....	57
Slika 52: Završni prolazi uzorka 2 (povećanje 12,5 x)	58
Slika 53: Osnovni materijal uzorka 3 (povećanje 7,88 x).....	58
Slika 54: ZUT i početak zida uzorka 3 (povećanje 12,5 x).....	59
Slika 55: Završni prolazi uzorka 3 (povećanje 12,5 x)	59
Slika 56: Područja mjerenja tvrdoće uzorka 1	60
Slika 57: Područja mjerenja tvrdoće uzorka 2	60
Slika 58: Područja mjerenja tvrdoće uzorka 3	61
Slika 59: Tvrdoća HV 10 svih uzoraka	62
Slika 60: Makroizbrusak uzorka 1 i područja mjerenja širine	63
Slika 61: Makroizbrusak uzorka 2 i područja mjerenja širine	63
Slika 62: Makroizbrusak uzorka 3 i područja mjerenja širine	64
Slika 63: Kretanje širine zida mjereno vertikalno prema gore.....	65

POPIS TABLICA

Tablica 1: Prednosti i nedostaci AM-a s tehnološkog i ekonomskog gledišta [4]	3
Tablica 2: Kategorije i njihove definicije prema ASTM [1]	4
Tablica 3: Usporedba parametara različitih postupaka aditivne proizvodnje metalnih komponenti [3]	7
Tablica 4: Greške WAAM procesa [7]	19
Tablica 5: Materijali kod WAAM-a [12]	24
Tablica 6: Prednosti i nedostaci paralelnog i oscilirajućeg načina izrade [22]	41
Tablica 7: Usporedba različitih načina proizvodnje [22]	43
Tablica 8: Karakteristika izvora struje DP 400 [23]	47
Tablica 9: Orijentacijski kemijski sastav dodatnog materijala EZ - SG2 [24].....	49
Tablica 10: Mehanička svojstva čistog metala zavara [24].....	49
Tablica 11: Parametri zavarivanja i visina zida 1 nakon svakog prolaza.....	50
Tablica 12: Parametri zavarivanja i visina zida 2 nakon svakog prolaza.....	51
Tablica 13: Parametri zavarivanja i visina zida 3 nakon svakog prolaza.....	52
Tablica 14: Izmjerene vrijednosti mikrotvrdoće HV 10	61
Tablica 15: Širine zida u određenom području	64

POPIS KRATICA

AM	Aditivna proizvodnja (od eng. Additive Manufacturing)
3D	Tri dimenzije (od eng. Three-dimensional)
Al	aluminij
Ar	argon
ASTM	Američko društvo za ispitivanje i materijale (od eng. American Society for Testing and Materials)
BTF	Omjer mase sirovca i gotovog proizvoda (od eng. Buy-to-Fly)
C	ugljik
CAD	Konstruiranje pomoću računala (od eng. Computer Aided Design)
CMT	Hladni prijenos metala (od eng. Cold Metal Transfer)
CNC	Računalom numerički upravljani strojevi (od eng. Computer Numerical Control)
CO ₂	Ugljični dioksid
Cu	bakar
EBF ³	Aditivna proizvodnja žicom i elektronskom zrakom (od eng. Electron Beam Freeform Fabrication)
EBM	Taljenje s pomoću snopa elektrona (od eng. Electron Beam Melting)
Fe	željezo
He	helij
HV10	Mjerenje tvrdoće Vickersovom metodom
LENS	Lasersko taloženje metala do gotovog oblika (od eng. Laser Engineered Net Shaping)
MIG/MAG	Elektrolučno zavarivanje u zaštiti inertnog/aktivnog plina (od eng. Metal Inert/Active Gas)
MIM	Injekcijsko prešanje metalnih čestica (od eng. Metal Injection Molding)
Mn	mangan
Mo	molibden

NASA	Američka svemirska agencija (od eng. The National Aeronautics and Space Administration)
RM	Brza proizvodnja (od eng. Rapid Manufacturing)
RP	Brza izrada prototipova (od eng. Rapid Prototyping)
RT	Brza izrada alata (od eng. Rapid Tooling)
Si	silicij
SLM	Selektivno lasersko taljenje (od eng. Selective Laser Melting)
SSG	Stupnjevi slobode gibanja
STL	STL datoteka (od eng. Standard Tessellation Language)
Ta	tantal
TIG	Elektrolučno zavarivanje volframovom elektrodom u zaštiti inertnog plina (od eng. Tungsten Inert Gas)
TOM	Tangetni preklapajući model (od eng. Tangent Overlapping Model)
W	volfram
WAAM	Aditivna proizvodnja žicom i električnim lukom (od eng. Wire and Arc Additive Manufacturing)
WLAM	Aditivna proizvodnja žicom i laserom (od eng. Wire and Laser Additive Manufacturing)
ZUT	Zona utjecaja topline

POPIS JEDINICA

Oznaka	Značenje	Mjerna jedinica
A_5	Istezljivost	%
d	Udaljenost između putanji pištolja za zavarivanje	mm
h	Visina metala zavara	mm
KV	Udarni rad loma	J
R_m	Vlačna čvrstoća	N/mm ²
$R_{p0,2}$	Granica razvlačenja	N/mm ²
\bar{x}	Aritmetička sredina	mm
x_{min}	Minimalna vrijednost	mm
w	Širina metala zavara	mm

SAŽETAK

U ovom diplomskom radu obrađen je postupak aditivne proizvodnje s električnim lukom i žicom (eng. WAAM – Wire and Arc Additive Manufacturing). Rad se sastoji od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu obrađena je aditivna proizvodnja općenito te je dan pregled dosadašnjih spoznaja i istraživanja u području WAAM-a, od povijesnog razvoja preko problematike procesa do mogućnosti i optimizacije procesa. Također su prikazani materijali i postupci zavarivanja koji su prisutni kod WAAM-a. Na kraju teorijskog dijela dan je literaturni pregled dosadašnji primjena WAAM postupka na različitim materijalima i s različitim postupcima zavarivanja.

U eksperimentalnom dijelu opisana je oprema za zavarivanje i materijal koji se koristio pri izradi zidova. Zavarivanje zidova provedeno je robotom Almega OTC AX V6 s MAG postupkom u Laboratoriju za zavarivanje. Izvedena su 3 zida, 1 izveden kratkim spojevima, druga 2 izvedena impulsnim strujama s različitim brzinama zavarivanja. Dobiveni zidovi su izrezani i pripremljeni za analizu geometrije i mjerenje tvrdoće. Dobiveni podaci su analizirani te su doneseni zaključci o utjecaju parametara zavarivanja i načina prijenosa metala na geometriju zidova.

KLJUČNE RIJEČI: aditivna proizvodnja, WAAM, MAG zavarivanje

SUMMARY

This thesis describes process of Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). The thesis consists of theoretical and experimental part.

In theoretical part Additive Manufacturing is described generally and it is given an overview of current knowledge and research of WAAM. Overview is given from historical development and process problems to the possibilities and process optimization. Materials and welding processes for WAAM are also defined. At the end of theoretical part is the list of literature and description of the examples of WAAM on different materials and with different welding processes.

In experimental part welding equipment and applied materials for welding walls are described. Welding walls are performed with robot Almega OTC AX V6 with MAG in Laboratory for welding. Three walls are built, one with short arc and two with pulsed arc with different welding speeds. Welded walls are cut and prepared for analysis of geometry and measurement of hardness. The data were analyzed and conclusions made on the effect of welding parameters and modes of transmission of metal on the geometry of the walls.

KEY WORDS: Additive manufacturing, WAAM, MAG welding

1 Uvod

Visoki zahtjevi tržišta postavljaju se na mnoge grane industrije. Povećanje kvalitete proizvoda, fleksibilnost pri razvoju i proizvodnji, sniženje troškova, skraćanje vremena izrade, personalizirana proizvodnja, izrada komponenata složene geometrije samo su neki od tih zahtjeva. U pojedinim granama industrije vlada trend napuštanja masovne proizvodnje, a umjesto nje prisutan je trend maloserijske i pojedinačne (personalizirane) proizvodnje. Klasični postupci izrade ne mogu u potpunosti odgovoriti suvremeni zahtjevima tržišta kao što su kraće vrijeme izrade, manji troškovi, manji gubitak materijala. Zbog toga se u zadnjih 30-ak godina razvijaju i primjenjuju postupci aditivne proizvodnje (AM). Glavna karakteristika tih postupaka je dodavanje materijala, najčešće sloj po sloj, do izrade komponente blizu konačne dimenzije (engl. *near net shape*) ili do konačne dimenzije (engl. *net shape*). Takav način omogućuje izradu komponenti vrlo složene geometrije koju bi klasičnim postupcima izrade bilo vrlo teško ili nemoguće izraditi.

Postoji puno aditivnih postupaka, a posebno se ističe aditivna proizvodnja metala koja se sve više primjenjuje i razvija jer je sposobna odgovoriti visokim zahtjevima tržišta. Aditivna proizvodnja gdje se koristi zavarivanje za izradu komponenti ima mnoge prednosti kao što su jeftina oprema, jednostavna kontrola procesa i visoka količina depozita. Jedan od sve prisutnijih postupaka je WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing). Ovaj postupak koristi električni luk kao izvor energije, robota koji omogućuje automatsko gibanje pištolja za zavarivanje, manipulatora, elektro-lučne izvore energije (MIG, TIG, plazma). Provode se mnoga istraživanja i objavljen je veliki broj znanstvenih radova koji opisuju postupak i obrađuju problematiku kod WAAM-a. Zbog toga još nije široko primjenjiv u industriji, ali mogućnosti koje pruža ukazuju da će u određenim granama industrije potisnuti klasične načine izrade.

2 Aditivna proizvodnja

ASTM definira aditivnu proizvodnju kao "Proces povezivanja materijala pri izradi objekata izravno iz 3D računalnih modela, najčešće sloj na sloj, što je suprotno postupcima obrade odvajanjem čestica. Sinonimi su: aditivna izrada, aditivni procesi, aditivne tehnike, aditivna slojevita proizvodnja, slojevita proizvodnja, izrada slobodnih oblika. [1]

Povijesno gledajući, suvremeni postupci aditivne proizvodnje prošli su nekoliko faza s obzirom na njihovu primjenu, a time i terminologiju. U početku primjene ti su se postupci uglavnom koristili za brzu izradu prototipova RP (Rapid Prototyping). Pojam brzo treba shvatiti uvjetno, jer je za proizvodnju potrebno od nekoliko minuta do nekoliko dana što i nije tako brzo. Međutim, uspoređujući s klasičnom proizvodnjom, aditivna proizvodnja je brža. Proizvodi načinjeni tim postupcima s kraja prošlog stoljeća uglavnom su se rabili za unaprjeđivanje procesa razvoja proizvoda. [2]

Daljnji razvoj aditivnih postupaka doveo je do brze izrade čitavih alata i kalupa ili njihovih ključnih elemenata RT (Rapid Tooling). RT omogućuje proizvodnju polimernih, keramičkih ili metalnih alata i kalupa zbog načela slojevite gradnje. Primjena RT-a dovodi do skraćanja vremena proizvodnje geometrijski najsloženijih dijelova alata i kalupa. [2]

Nastavak istraživanja i razvoja aditivnih postupaka doveo je do maloserijske ili pojedinačne proizvodnje gotovih proizvoda RM (Rapid Manufacturing). Takav način proizvodnje omogućuje izradu bez primjene dodatnih alata. [2]

Glavne prednosti pri razvoju proizvoda su smanjenje vremena izrade, troškova, gubitaka materijala, mogućnost interakcije ljudi i strojeva. Suprotno od AM, klasični postupci zahtijevaju međukorake kao što su proizvodnja specifičnih uređaja poput alata ili kalupa, podešavanje strojeva i mijenjanje alata. Kod AM je moguće dobiti direktno iz 3D CAD modela gotov proizvod što minimizira broj grešaka tijekom proizvodnje.

Kod izrade metalnih dijelova složene geometrije, aditivni postupci imaju zavidnu poziciju u odnosu na klasične procese izrade. U automobilskoj i zrakoplovnoj industriji omogućuju izradu lakših dijelova i dobivanje boljih karakteristika što direktno utječe na manju potrošnju goriva i manje troškove. Također omogućuju izradu sklopova iz jednog dijela što je klasičnim

postupcima nemoguće te se time smanjuje broj pojedinačnih dijelova. Aditivna proizvodnja je efikasan način izrade dijelova od skupih materijala poput titana i nikla i njihovih legura koji se primjenjuju u zrakoplovnoj industriji gdje se zahtjeva jako mali BTF omjer. Mogućnost potpune automatizacije procesa aditivne proizvodnje iz modela što omogućuju CAD/CAM sustavi, čime se smanjuje vrijeme proizvodnje i ljudski rad, još je jedna od prednosti AM pred klasičnim postupcima. Iako program za CNC stroj može biti automatski generiran iz CAD modela, za dijelove složene geometrije potrebno je nekoliko prihvata obratka čime se povećava vrijeme rukovanja, broj stezanja obratka i proces umjeravanja nakon prihvata [3]. Kao i svaki postupak proizvodnje, aditivna proizvodnja ima ograničenja u svojoj primjeni. Jedan od nedostataka je kvaliteta površine koja utječe na dimenzije i kvalitetu proizvedenog dijela. Tablicom 1 prikazane su prednosti i nedostaci AM-a s tehnološkog i ekonomskog gledišta. [4]

Tablica 1: Prednosti i nedostaci AM-a s tehnološkog i ekonomskog gledišta [4]

	Prednosti	Nedostaci
Tehnološke karakteristike	Direktna izrada 3D proizvoda bez upotrebe alata ili kalupa	Nemogućnost kombinacije materijala i problem s izradom velikih dijelova
	Promjena dizajna proizvoda ne uzrokuje dodatne troškove proizvodnje	Potrebna naknadna obrada površine
	Izrada dijelova složene geometrije	Mala je brzina izrade
	Velika fleksibilnost proizvodnje: dijelovi se mogu izraditi bilo kojim redom	Potrebno je veliko iskustvo i kvalificirana radna snaga
	Manji gubitak materijala	Nedovoljno iskorištene mogućnosti zbog nedostataka u dizajnu alata i smjernicama
Ekonomske karakteristike	Brzina i jednostavnost izrade novih proizvoda	Visoki troškovi sirovine i energije
	Postizanje veće cijene proizvoda kroz prilagođavanje i funkcionalna poboljšanja	Nepostojanje ekonomije razmjera (smanjenje troškova izrade ne uzrokuje povećanje obujma proizvodnje)
	Kupac nema troškove zbog redizajna proizvoda	Nedostatak kvalitetnih standarda
	Manji troškovi montaže zbog mogućnosti izrade složenih proizvoda iz jednog dijela	Ponuda proizvoda ograničena je tehnološkom izvedivošću (kvaliteta, brzina)
	Manje prepreka prilikom izlaska na tržište	Potrebna je obuka
	Nema povećanja troškova pri izradi različitih proizvoda	Potrebno je radno iskustvo i kvalificirana radna snaga

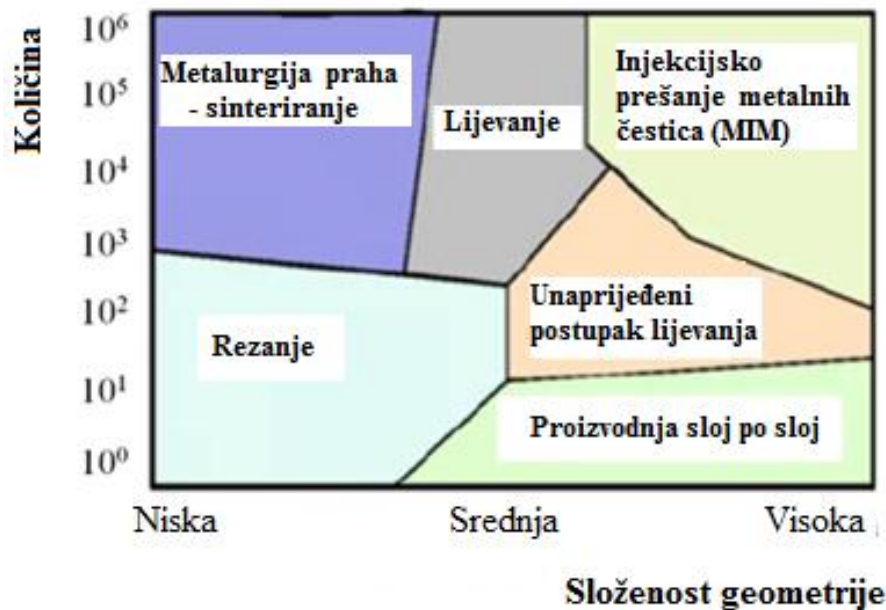
U cilju standardizacije terminologije, ASTM je izradio različite kategorije u koje se mogu smjestiti sadašnji i budući postupci aditivne proizvodnje. Tablicom 2 prikazane su kategorije koje je predložio ASTM. [1]

Tablica 2: Kategorije i njihove definicije prema ASTM [1]

Kategorija	Definicija
Vezivanje mlazom	Aditivni proces u kojem se tekuće vezivno sredstvo taloži za vezanje praškastih materijala.
Taloženje usmjerenom energijom	Aditivni proces u kojem se koristi usmjerena toplinska energija za spajanje materijala taljenjem.
Ekstrudiranje materijala	Aditivni proces kod kojeg materijal prolazi kroz mlaznicu ili otvor.
Štrcanje materijala	Aditivni proces gdje se kapljice materijala talože.
Spajanje praha koji se nalazi u komori	Aditivni proces u kojem toplinska energija spaja dijelove praha u komori.
Laminiranje ploča	Aditivni proces u kojem se spajaju ploče materijala i tako stvaraju proizvod.
Fotopolimerizacija	Aditivni proces u kojem tekući fotopolimer učvršćuje pomoću svjetla.

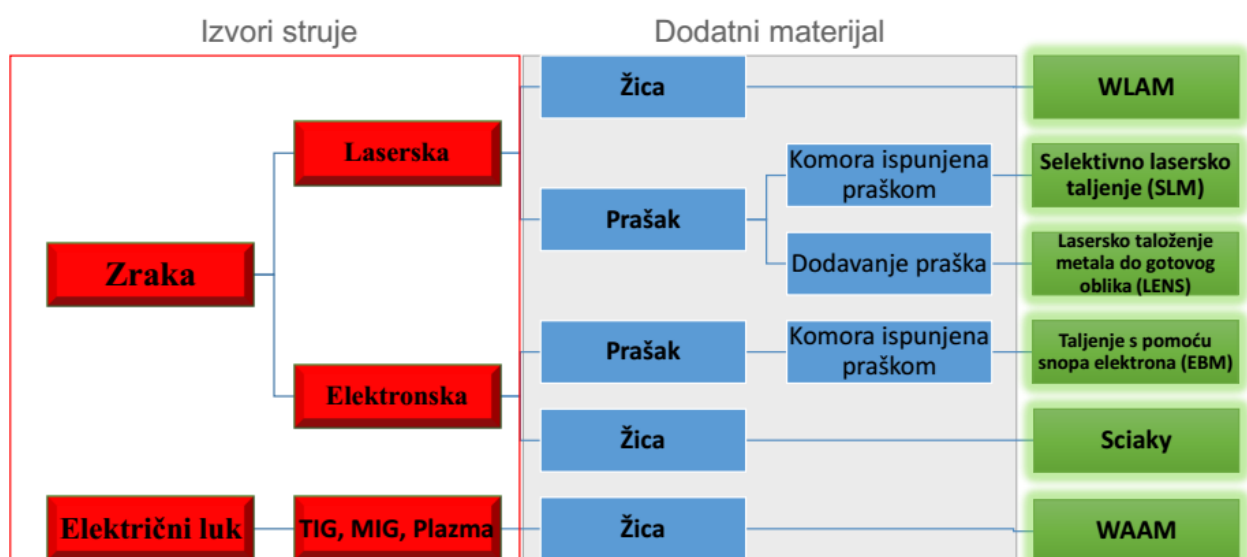
2.1 Aditivna proizvodnja metalnih materijala

U zadnjih 30 godina, aditivna proizvodnja metalnih komponenti je doživjela veliku primjenu i privukla veliku pažnju u mnogim grana industrije, posebice za izradu dijelova i prototipova. U početku se AM koristila za proizvodnju dijelova od polimera u istraživačke svrhe, a danas se koriste za izradu gotovih dijelova. Mogućnosti izrade prototipova u kratkom vremenu iz CAD modela omogućila je primjenu AM u zrakoplovnoj, autoindustriji i industriji za brzu izradu alata. Danas su mnoga istraživanja usmjerena na proizvodnju metalnih komponenti kompleksne geometrije i to s materijalima poput titana i nikla s kojima se klasičnim metodama ne može ekonomično proizvoditi. Aditivna proizvodnja metalnih komponenta u odnosu na alternativne načine proizvodnje je funkcija složenosti geometrije i volumena komponente. Slika 1 prikazuje položaj aditivne proizvodnje metalnih materijala u odnosu na ostale tehnologije. Može se zaključiti da je ona pogodna za dijelove sa srednjom do visokom složenošću geometrije i relativno malih količina proizvoda. [3]



Slika 1: Kvalitativno stanje proizvodnje metalnih dijelova aditivnim postupcima u odnosu na uobičajene postupke [3]

Kako bi se ostvarili zahtjevi zrakoplovne industrije, automobilske industrije, brze izrade alata, koriste se različiti materijali i razvijene su različite tehnike. Neki znanstvenici su aditivne postupke podijelili s obzirom na oblik materijala koji se koristi. Slikom 2 su prikazani najčešće korišteni postupci aditivne proizvodnje za proizvodnju metalnih komponenti. Prema izvoru energije, postupke možemo podijeliti u 3 grupe: laserska zraka, elektronski mlaz i električni luk. Dodatni materijal za navedene izvore struje može biti u obliku praška ili žice. Tako su se razvili različiti postupci aditivne proizvodnje metala.



Slika 2: Podjela postupaka aditivne proizvodnje za metale [5]

Najčešći procesi koji koriste prašak kao dodatni materijal su: selektivno lasersko taljenje (SLM), izravno taloženje metala (LENS), taljenje s pomoću snopa elektrona (EBM).

Selektivno lasersko taljenje je postupak kod kojeg se metalni prah u potpunosti tali što rezultira visokom gustoćom napravljenih metalnih proizvoda. Debljina sloja iznosi oko 0,02 mm. Glavni nedostaci ovog postupka je gruba površina pa je potrebna naknadna obrada i manja točnost izmjera načinjenog proizvoda. [2]

LENS postupak se temelji na načelima taloženja odnosno zavarivanja. Proces započinjem djelovanjem laserske zrake na vrlo usko područje, pri čemu dolazi do lokalnog taljenja. S pomoću mlaznice se nakon toga dodaje točno određena količina novog materijala u praškastom stanju, pri čemu nastaje novi sloj metalnog proizvoda. [2]

EBM postupkom proizvod se izrađuje sloj po sloj taljenjem sloja metalnog praha s pomoću snopa elektrona. Ovim postupkom mogu se raditi proizvodi od titana i njegovih legura, volframa, niobija, tantala, platine, cirkonija, nikla i njegovih legura. Napravljeni proizvodi moraju imati dodatke za naknadnu obradu na konačne izmjere. [2]

U procese koji koriste žicu kao dodatni materijal ubrajaju se WAAM, WLAM, Sciaky. Razlikuju se međusobno s obzirom na izvor energije. Laserski izvori su popularni zbog velike preciznosti, ali imaju jako malu iskoristivost (2 – 5 %). Elektronski izvori imaju nešto višu iskoristivost (15 – 20 %), ali zahtijevaju veliki vakuum kako bi se mogli proizvesti dijelovi za zrakoplovnu industriju. Za razliku od laserskih i elektronskih izvora, elektrolučni izvori poput MAG-a i TIG-a mogu imati iskoristivost čak do 90 % u određenim okolnostima. Uz to, oprema za elektrolučne izvore je relativno jeftina u odnosu na laserske i elektronske izvore. [3]

WLAM postupak se koristi za proizvodnju metalnih dijelova velike gustoće. Sustav za WLAM se sastoji od lasera, sustava automatskog dodavanja žice, robota ili CNC portalnog stroja. Princip rada se zasniva na laserskoj zraci koja je usmjerena prema podlozi i metalnoj žici koja se dodaje te dolazi do taljenja i stvaranja metala zavara. Pomicanjem laserske zrake i žice ili podloge, dolazi do skrućivanja metala zavara. Pomicanje se može obavljati s robotskom rukom ili pomoću CNC portalnog stroja. WLAM proces omogućuje proizvodnju komponenti od različitih metala i legura. [3]

EBF³ (Sciaky) postupak je patentirala NASA s ciljem izrade dijelova složene geometrije, izradu dijelova blizu konačne geometrije (eng. *near net shape*) koji zahtijevaju manje sirovine i

naknadne obrade u odnosu na klasične načine izrade. Princip rada se zasniva na usmjerenom snopu elektrona koji tale podlogu. Proces se odvija u viskom vakuumu, a u rastaljenu podlogu se dodaje metalna žica. EBF³ se može primijeniti kod bilo kojeg električki vodljivog materijala što uključuje i bakar i aluminij. [3]

Parametri procesa koji karakteriziraju aditivne postupke za proizvodnju metalnih materijala prikazani su tablicom 3.

Tablica 3: Usporedba parametara različitih postupaka aditivne proizvodnje metalnih komponenti [3]

PO ST UP AK	PARAMETRI			
	Hrapavost [μm]	Debljina sloja [μm]	Količina depozita [cm^3/h]	Materijali
SLM	~ 8 - 20	50	76	Nehrđajući čelici (GP1, PH117-4), legura Cr i Co MP1, Ti6Al4V, IN718, margaging čelik MS1, AlSi20Mg, Cu, Al
EBM	~ 46	70	80	Ti6Al4V, Ti6Al4V ELI, legure Cr i Co
LENS	~ 31- 60	300 - 400	240	Čelici (H13,17-4 PH, PH 13-8 Mo, 304, 316, 420) Al 4047, Ti (TiCP, Ti-6-4, Ti-6-2-4-2, Ti-6-2-4-6), IN625, IN617, legura Cu-Ni
WLAM	< 50	-	250	Ti6Al4V, legure Fe i Al
WAAM	> 180	-	320	Ti6Al4V, ER70S-6, ER4043, Ni6082, YS308L

2.2 WAAM

Skraćenica WAAM na engleskom jeziku označava Wire and Arc Additive Manufacturing, što bi u slobodnom prijevodu na hrvatski značilo aditivna proizvodnja s žicom i električnim lukom. WAAM postupak je nova tehnologija u aditivnoj proizvodnji koji pruža značajne pogodnosti. Komponenta se dobiva taloženjem materijala sloj po sloj što je potpuno različito u odnosu na klasične postupke gdje se od predimenzioniranog sirovog komada rezanjem materijala dobiva

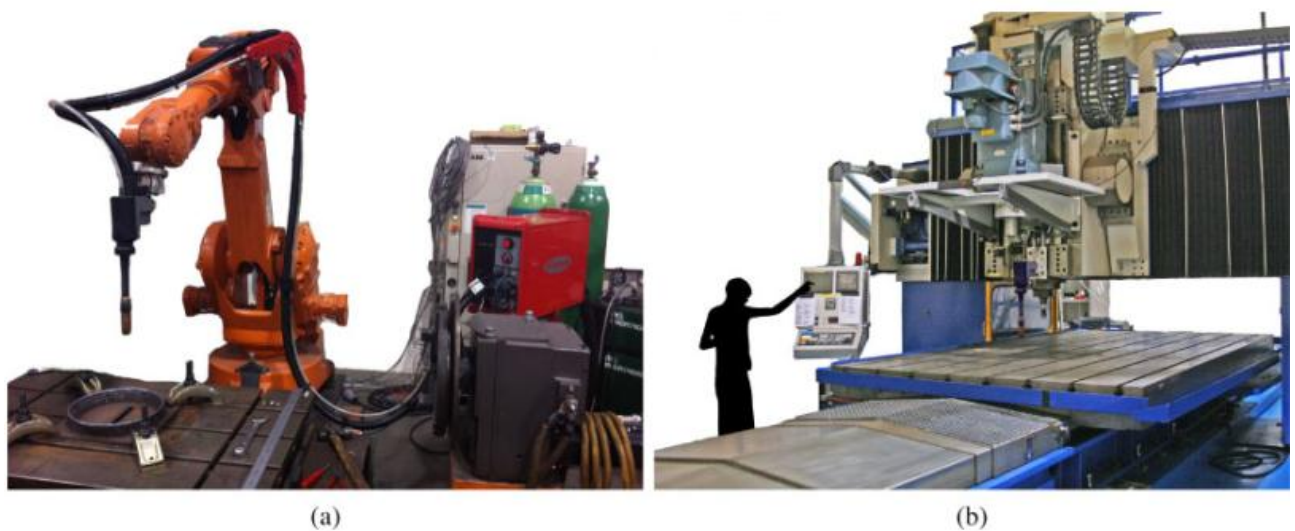
gotov proizvod [6]. Kombinacijom elektrolučnog zavarivanja i dodavanja žice, ova tehnologija omogućuje slobodu u dizajnu komponente, BTF omjer od 1,2, izradu proizvoda različitih veličina i kratkim vremenima izrade. Navedene karakteristike čine postupak pogodnim za izradu funkcionalnih dijelova po narudžbi od vrlo skupih materijala. [7]

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 - 2 mm. Količina nataloženog materijala kreće se od 50 do 130 g/min, a kod lasera ili elektronske zrake iznosi 2 do 10 g/min [6]. Metalni zid uključuje i valovitost koja nastaje tijekom zavarivanja na svakom prolazu. Ta valovitost se mora ukloniti naknadnim procesima obrade kako bi se eliminirale površinske nepravilnosti. Slikom 3 prikazan je zid napravljen WAAM postupkom. Potrebno je razlikovati pojmove ukupne širine zida i efektivne širine zida. [7]



Slika 3: WAAM zid [7]

WAAM sustav uglavnom koristi standardnu opremu za zavarivanje (izvor struje, pištolj za zavarivanje, robota ili CNC portalni stroj (slika 4) koji osigurava gibanje po zadanoj putanji, kontrolnu jedinicu koja upravlja robotom, uređaj za dodavanje žice koji upravlja količinom depozita) [8]. Izvor struje osigurava električni luk koji tali žicu. Osim navedene opreme, primjenjuju se dodatni uređaji poput zaštitnog šatora ili komore te valjak za valjanje između slojeva kako bi se poboljšala mikrostrukturna svojstva [7].

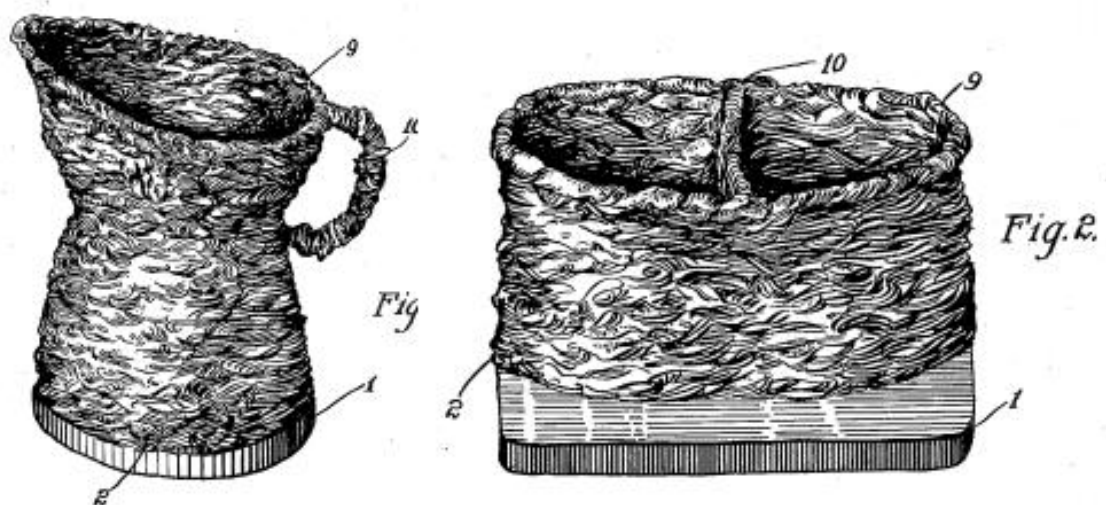


Slika 4: a) ABB robot za zavarivanje s 6 SSG; b) CNC portalni stroj za zavarivanje [8]

Budući da WAAM koristi električni luk za taljenje materijala, primjenjuju se različiti elektrolučni postupci zavarivanja. Kod WAAM postupka najčešće se koriste: MIG/MAG, TIG i plazma zavarivanje.

2.2.1 Povijest razvoja procesa

Postupak WAAM prvi je patentirao Baker 1926. godine. On je koristio elektrolučno zavarivanje za izradu 3D modela taloženjem rastaljenog materijala i nizanjem sloj po sloj. Slikom 5 su prikazani neki predmeti dobiveni na taj način. [9]



Slika 5: Proizvodi dobiveni nizanjem sloj po sloj [9]

1947. godine Carpenter je primijenio EPP postupak za taloženje sloj po sloj. 1964. godine White je izradio valjak EPP postupkom taloženjem materijala sloj po sloj [9].

1971. godine Ujiie je izradio posude pod tlakom koristeći više žica od različitog materijala čime je dobio funkcionalne zidove. Za izradu je koristio EPP, TIG i zavarivanje pod troskom [9].

1983. godine Kussmail je koristio EPP postupak za proizvodnju visoko kvalitetnih velikih dijelova od konstrukcijskog čelika (20MnMoNi5 5) za nuklearne elektrane (količina depozita do 80 kg/h, a ukupna težina 79 tona) [9].

1993. godine Prinz i Weiss su patentirali kombinaciju zavarivanja i 3D glodanja.

Od 1994. do 1998. Sveučilište u Cranfieldu je razvijalo postupke taloženje metalnih materijala za izradu dijelova za Rolls Royce. 2006. godine zrakoplovne kompanije su od Sveučilišta zatražile istraživanje o aditivnoj proizvodnji metalnih komponenti uz velike količine depozita od titana. [9]

2.2.2 Zaštita procesa dodatnom opremom

Ovisno o vrsti materijala koji se taloži, ponekad se zahtjeva zaštitna inertna atmosfera. Za materijale poput aluminijskog i čelika, zaštitni plin koji dolazi kroz pištolj za zavarivanje tijekom taloženja je dovoljan. Međutim, kod materijala otpornih na visoke temperature i titana, potrebna je dodatna zaštita prilikom taloženja sloj po sloj. Dodatna zaštita može biti u obliku lokalnog uređaja (Slika 6a). Lokalni uređaj omogućuje manju potrošnju plina i produženje autonomije sustava. Nedostatak lokalnih uređaja je što moraju biti na malim udaljenostima od mjesta zavarivanja. Osim toga, mogući ulazak okolnog zraka može uzrokovati lošu zaštitu i povećati kontaminiranje posebice na bočnim stranama WAAM zida. Stoga je potrebno izraditi dodatnu strukturu kraj zida kako bi se smanjila kontaminacija. To uključuje puno rukovanja čime se usporava proces. Uređaj je smješten u kućište od bronce ili nehrđajućeg čelika u kojem se nalazi sintetička vuna koja služi kao medij za širenje, usporavanje i distribuciju dovedenog zaštitnog plina. Metalna mrežica ili porozna ploča od bakra ili nehrđajućeg čelika koristi se na izlazu kao podrška vuni i za daljnje raspršenje plina. Slikom 7 su prikazani sastavni dijelovi lokalnog uređaja. Provedena istraživanja su pokazala da učinak takvih uređaja ovisi o udaljenosti od radnog komada. Kako bi se poboljšala zaštita, potrebno je kontrolirati turbulenciju zraka. [10]

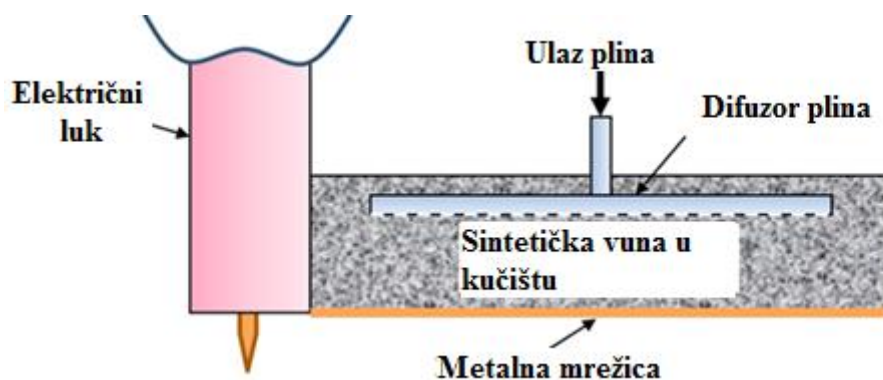
Drugi način zaštite koja se češće koristi je komora ili šator ispunjen zaštitnim plinom (Slika 6b). S praktičnog i troškovnog gledišta, šator je bolji nego komora. Šator je jeftiniji i

prilagodljiv ovisno o potrebnoj veličini, omogućuje lakše ispumpavanje zraka i naknadno upumpavanje zaštitnog plina. Šator zahtjeva tri ciklusa pumpanja kako bi razina kisika bila ispod 200ppm, a taj postupak je mnogo kraći i troši se manje zaštitnog plina nego kod komore. Prilikom primjene šatora javlja se potreba za recikliranjem zaštitnog plina jer proces taloženja može trajati nekoliko dana. Proces se mora odvijati u inertnoj atmosferi kako bi se izbjegla oksidacija materijala. Potrebno je koristiti fiksni sustav dobave plina kako bi se umanjilo vrijeme rukovanja plinskim bocama. [5, 7]



Slika 6: a) lokalni uređaj za zaštitu; b) zatvoreni šator u kojem se nalazi zaštitni plin [5]

Istraživanja su pokazala da je prilikom zavarivanja titana potrebno komponente zaštititi od oksidacije kada temperatura iznosi 427 °C. Kontaminacija površine kisikom može rezultirati smanjenom žilavosti i istezljivosti materijala. Baufeld i autori su zaštitu postigli tako da se je proces taloženja izvodio unutar hermetički zatvorene komore ispunjene argonom (99,999%). Takva komora se ne može primijeniti kod dijelova većih dimenzija jer vrijeme potrebno za montažu komore je dugo, otežano je integriranje drugih procesa (strojna obrada ili valjanje) i cijeli postupak postaje preskup. [5]



Slika 7: Zaštita procesa lokalnim uređajem [10]

2.2.3 Problematika kod WAAM-a

Komponente dobivene WAAM postupkom zbog visokog unosa topline rezultiraju pojavom [7]:

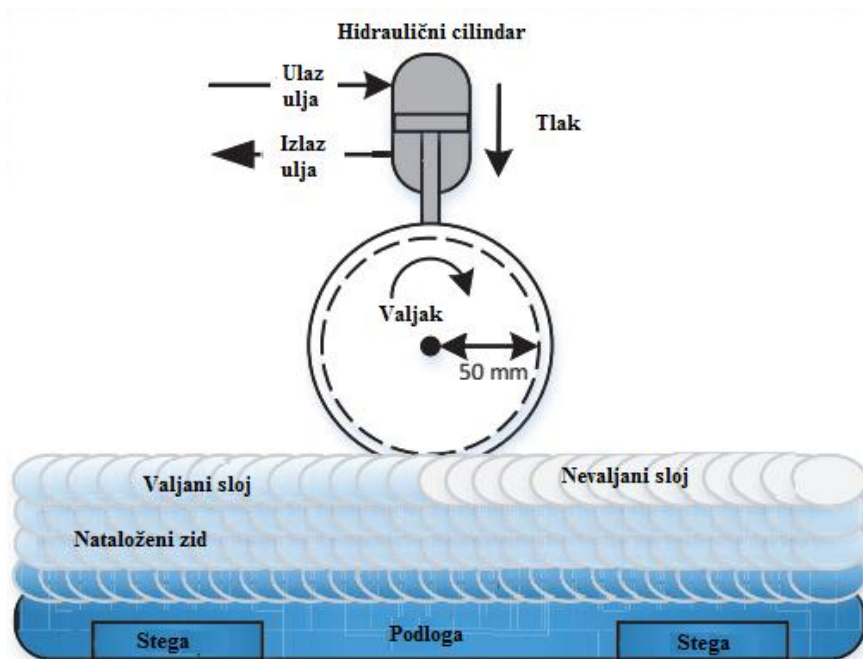
- Zaostalih naprezanja koja uzrokuju lošija mehanička svojstva komponenti
- Deformacija koje dovode do poteškoća u postizanju zahtijevanih tolerancija

Prilikom izrade dijelova WAAM postupkom razlikujemo [7]:

- Radnje prije taloženja
- Radnje za vrijeme taloženja
- Radnje nakon taloženja

U radnje prije taloženja se ubrajaju optimiranje parametara, učvršćivanje podloge i optimizacija taloženja metala sloj po sloj. Najveći utjecaj na smanjenje deformacije imaju učvršćivanje i način taloženja, dok izbor parametara malo utječe. [7]

Radnje za vrijeme taloženja su najučinkovitije za smanjenje deformacija i naprezanja. Kako bi se spriječilo deformiranje podloge prilikom izrade zida, potrebno je ostvariti taloženje materijala s obje strane podloge. Najpovoljnije je kada se s obje strane podloge nalaze komponente jednake geometrije. Tako dobivena uravnotežena komponenta ima snažan utjecaj na smanjenje deformacije, ali nema utjecaja na zaostala naprezanja. Jedan od načina uklanjanja zaostalih naprezanja je optimizacija vremena hlađenja. Optimizacija vremena hlađenja podrazumijeva pravilan odabir vremena tijekom kojeg će se postojeća toplina koristiti za predgrijavanje prije nanošenja slijedećeg sloja. Kako bi se poboljšala učinkovitost procesa i nadoknadilo vrijeme za hlađenje zida, moguće je koristiti paralelno nanošenje slojeva [7]. Drugi način uklanjanja zaostalih naprezanja koji se sve više koristi je tkz. „online“ valjanje prikazano slikom 8. „Online“ valjanje se koristi za valjanje nakon nanesenog sloja, a oprema za valjanje sastoji se od hidrauličkog cilindra koji osigurava pritisak valjka (određenog profila i veličine) na naneseni sloj. Istraživanja su pokazala da primjena "online" valjanja ima značajan pozitivan utjecaj na mikrostrukturu i smanjenje zaostalih naprezanja [7].



Slika 8: Online valjanje [7]

Ovakav način valjanja rezultira sljedećim:

- Smanjenje zaostalih naprezanja
- Smanjenje valovitosti i ujednačena visina nanesenog sloja
- Dobivanje povoljnije mikrostrukture (smanjenje veličine zrna)

Istraživanja su pokazala da valjanje utječe na: smanjenje zaostalih naprezanja, manje pukotina nastalih uslijed zamora materijala, poboljšanje mehanička svojstva (povećanje vlačne čvrstoće za 19 % i granice razvlačenja za 26 %). [7]

Radnje nakon taloženja su klasični postupci toplinske obrade nakon nanesenog posljednjeg sloja. [7]

2.2.4 Prednosti i nedostaci

Prednosti koje se ostvaruju WAAM postupkom su [5, 6, 8]:

- Izrada komponenti od skupih materijala (titan, nikal i njihove legure). Ti materijali se primjenjuju u zrakoplovnoj industriji gdje svaka komponenta mora imati što niži BTF omjer.
- Mogućnost automatizacije proizvodnog procesa čime se smanjuje vrijeme proizvodnje i ljudski rad.

- Proizvodnja komponenti sa složenom geometrijom, što je nepraktično ili nemoguće koristeći klasične postupke.
- Smanjenje gubitka materijala.
- Velika količina depozita.
- Mnogo niži troškovi proizvodnje nego kod procesa baziranih na prašku.
- Potencijalno nema ograničenja u veličini dijela.
- Mogućnost strojne obrade tijekom procesa.
- Mogućnost stvaranja funkcionalno profiliranog materijala.
- Otvorena struktura sustava omogućuje primjenu bilo kojeg proizvođača izvora struje i manipulatora.

Nedostaci WAAM-a su:

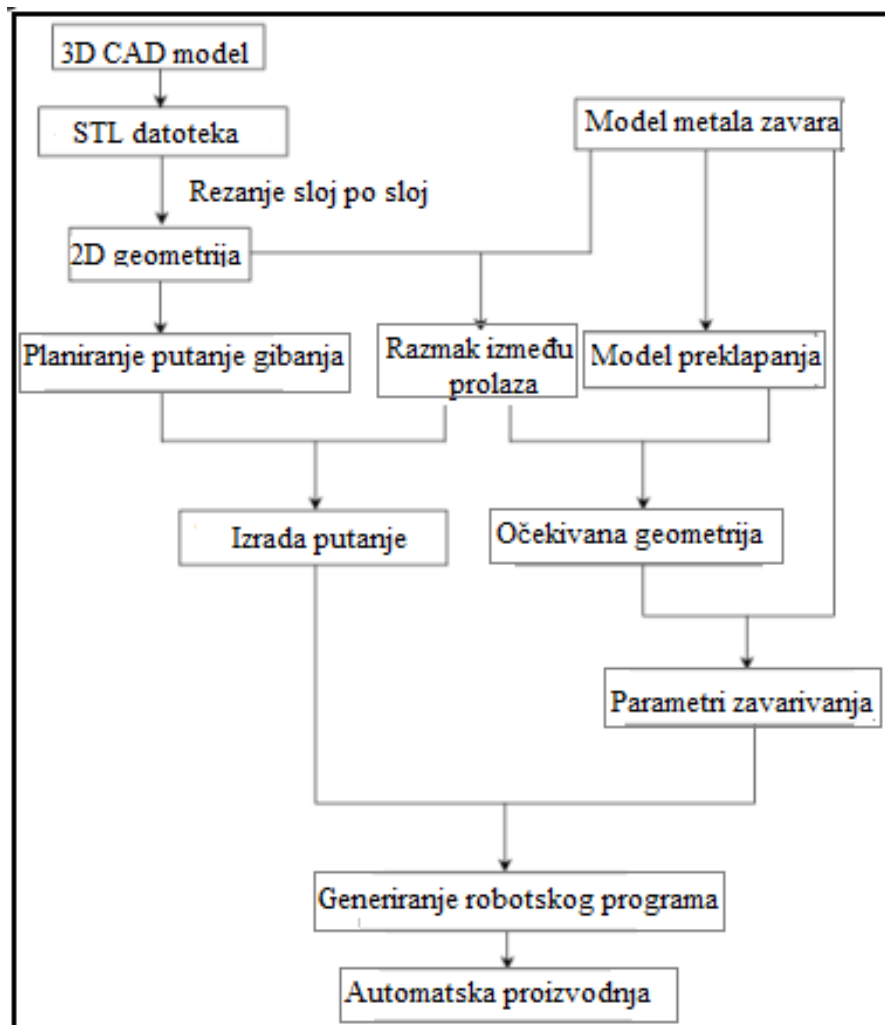
- Pojava zaostalih naprežanja i deformacija zbog visokog unosa topline
- Neujednačena geometrija zavora od početka do kraja prolaza
- Pojava poroznosti
- Potrebna naknadna obrada odvajanjem čestica

Mnoga istraživanja su provedena kako bi se riješili navedeni nedostaci. Optimiranje procesa taloženja i predgrijavanje podloge mjere su za smanjenje zaostalih naprežanja i deformacija. Neujednačena geometrija zavora od početka do kraja prolaza uzrokovana je smanjenim unosom topline kod velikih podloga na početku zavarivanja i tada je penetracija manja. Zbog toga je na početku prolaza visina zavora veća. Na kraju prolaza dolazi do bježanja rastaljenog metala. Kada se električni luk zaustavi, dobiva se nagnuti oblik zavora. Ova greška povlači za sobom poroznost prilikom izgradnje nekoliko prolaza. Da bi se dobio geometrijski ispravan proizvod, parametri procesa vezani uz geometriju (širina prolaza, debljina zida, promjer žice, brzina dodavanja žice i brzina zavarivanja) se moraju pažljivo kontrolirati kako bi se postigao odgovarajući oblik i dimenzije depozita. [6]

2.3 Osnovna načela WAAM sustava

Općenito, princip rada u aditivnoj proizvodnji zasniva se na generiranju 3D CAD modela (kompjuterskom izradom 3D modela, ili digitalizacijom kao što je to slučaj kod reverzibilnog inženjerstva). Tako dobiveni 3D modeli režu se u slojeve s pomoću matematičkih metoda i dobivaju se 2D slojevi. Nakon toga slijedi generiranje putanje gibanja za svaki 2D sloj,

postavljanje parametara taloženja za svaki sloj, generiranje operacijskog koda za opremu i konačno automatska proizvodnja. Slikom 9 su prikazani osnovni koraci kod WAAM procesa, od inicijalnog 3D modela do konačnog procesa proizvodnje. [6]

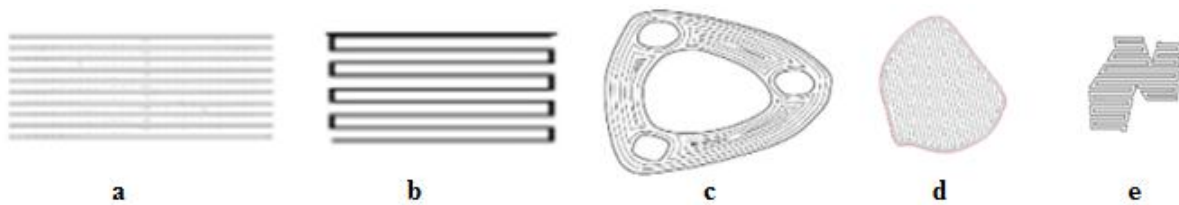


Slika 9: Osnovni koraci kod WAAM procesa [6]

STL datoteka (Standard Tessellation Language) obično se koristi za predstavljanje 3D modela u procesu planiranja. To je prikaz geometrije trodimenzionalnih površina u obliku trokuta [11]. Danas gotovo svi CAD sustavi imaju mogućnost eksportiranja STL datoteke [11]. Nakon učitavanja i prebacivanja 3D modela u STL datoteku, algoritam za rezanje reže model u slojeve određene visine.

Sljedeći korak je planiranje putanje gibanja za svaki sloj 2D konture. Postoje različite vrste putanje gibanja koje su razvijene za aditivnu proizvodnju kao što su raster, zigzag, kontura, popunjavanje prostora krivuljama i različite kombinacije navedenih putanja (hibridne putanje). Slikom 10 su prikazane različite putanje gibanja. Ovisno o karakteristikama 2D geometrije

(deblji ili tanji sloj), koriste se različite putanje gibanja. Proces kreiranja putanje je posebno važan kod WAAM-a. [6]



Slika 10: Putanje gibanja (a-raster; b-zigzag, c-slijeđenje konture, d-hibridno, e-kontinuirano) [6]

Kod raster putanje gibanje se izvodi po paralelnim pravcima u jednom smjeru. Najčešće korištena putanja gibanja je zigzag kod kojeg se gibanje izvodi po paralelnim pravcima, ali u oba smjera čime se smanjuje broj prolaza. Nedostatak raster i zigzag putanje je slaba točnost zbog diskretizacije grešaka na krajevima koji nisu paralelni sa smjerom gibanja alata. Taj problem može se riješiti s konturnim gibanjem koji slijedi rubnu konturu. [6]

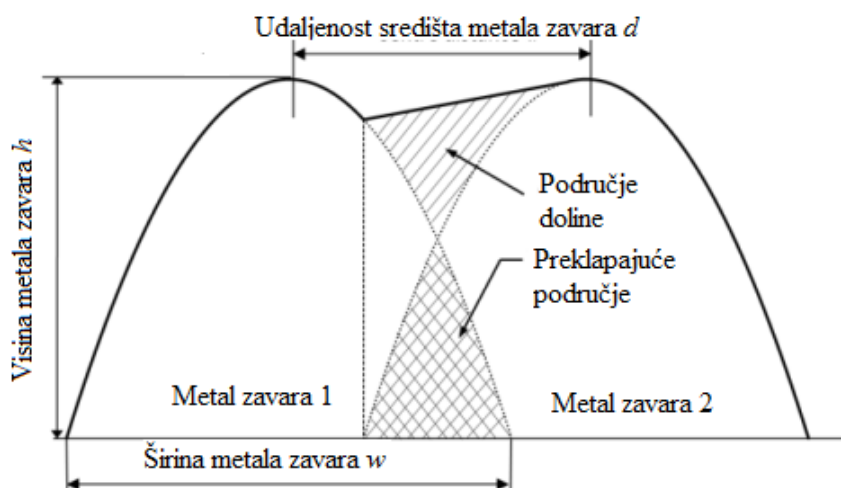
Glavni zahtjevi koji se postavljaju kod generiranja putanji kod WAAM-a su minimalan broj prolaza, što manje elemenata gibanja i dobra geometrijska točnost. Ovisno o karakteristikama 2D geometrije, odabire se različita putanja gibanja. Slijeđenje konture može generirati brojne zatvorene krivulje koje su nepovezane i zato nije pogodna za WAAM. Hibridna putanja povezuje dobre karakteristike različitih putanja. Kombinacijom zigzag i konturne putanje dobiva se putanja koja zadovoljava točnost i efikasnost u izradi zida. Još jedna metoda gibanja je kontinuirana putanja koja se još razvija. Takva putanja je sposobna ispuniti proizvoljno oblikovano područje. Na taj način se značajno smanjuje broj prolaza jer se smanjuje broj start-stop radnji prilikom zavarivanja što je za WAAM proces velika prednost.

Razni autori pokušali su opisati oblik zavara. Suryakumar je u svom istraživanju došao do zaključaka da geometrija zavara odgovara simetričnom parabolnom profilu. Cao je geometriju zavara pokušao opisati Gaussovom, parabolnom i sinusnom funkcijom i otkrio da sinusna funkcija najbolje odgovara geometriji zavara. Xiong je uspoređivao mjere profila zavara dobivenih različitim parametrima zavarivanja i to s tri različita profila (modela), kružnim lukom, parabolom i kosinus funkcijom. Pokazalo se da je optimalan model za profil zavara jako ovisi o omjeru brzine dodavanja žice i brzine zavarivanja. [6]

Jednom kada je određen obrazac putanje gibanja i površina linija gibanja, putanja gibanja se generira automatski. Povezanost putanje i predviđenih parametara zavarivanja s robotom, omogućuje generiranje robotskog koda koji sadrži informacije o gibanju robota i procesu taloženja. Konačno, komponente se automatski izrađuju. [6]

2.4 Optimizacija parametara zavarivanja

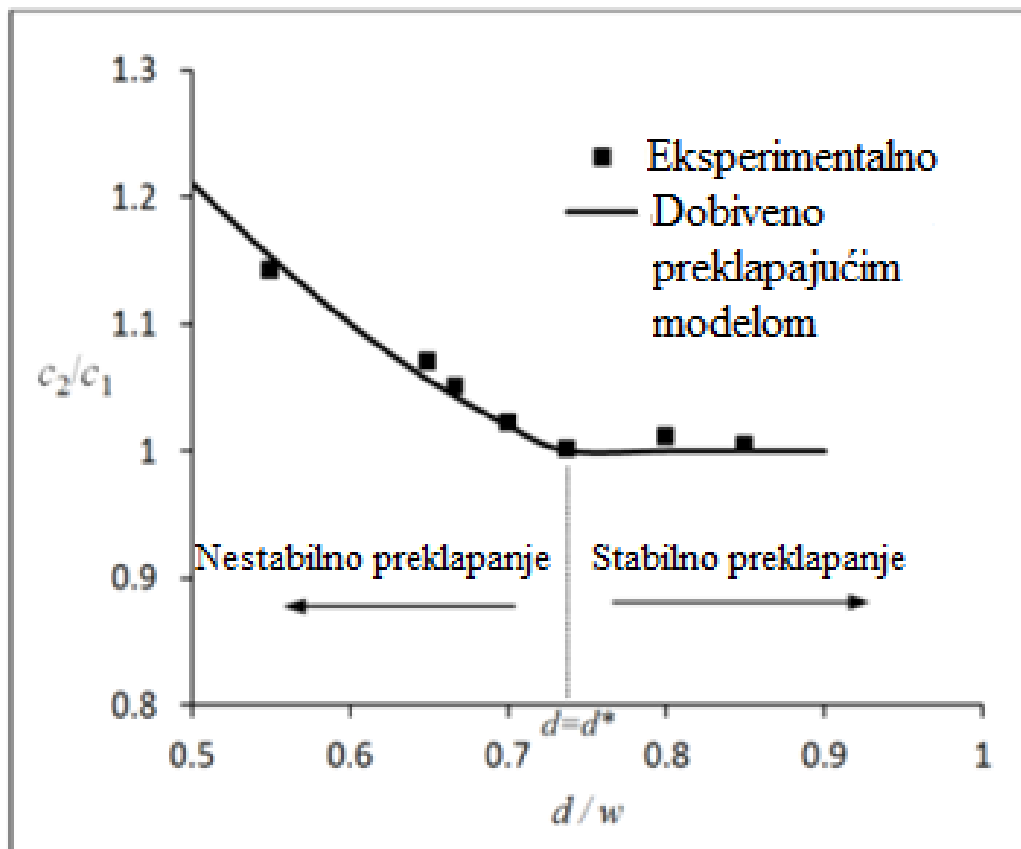
Parametri koji utječu na oblik taloženja materijala su brzina zavarivanja, brzina dodavanja žice i udaljenost između kapljica metala. Razmatranje geometrije jednog metala zavara kao i proces preklapanja kapljica je važan za postizanje visoke kvalitete površine i dimenzijske točnosti proizvedenih dijelova. Da bi se mogla predvidjeti geometrija metala zavara koji se talože jedan do drugog, koristi se tangenti model preklapanja (TOM) dviju susjednih kapljica metala zavara. Na slici 11 je prikazan presjek modela preklapanja. [6]



Slika 11: Model preklapanja dviju susjednih kapljica [6]

Udaljenost središta dva metala zavara d je jednaka udaljenosti između putanja pištolja za zavarivanje. Jedan metal zavara ima visinu h i širinu w , a udaljenost središta susjednih zavara je označeno s d . Na slici su označene dvije zone: zona preklapanja i zona doline. Zona doline ograničena je ravnom linijom koja je tangenta na metal zavara 2. Udaljenost središta metala zavara će odrediti kvalitetu i glatkoću površine. Kada je udaljenost središta d veća od širine jednog metala zavara, tada nema preklapanja između susjednih zavara. Smanjenje udaljenosti središta d , povećava se zona preklapanja, a smanjuje zona doline. Ako se udaljenost središta d smanji na određenu veličinu d^* , zona preklapanja i doline postaju jednake. Tada se dobiva najveća glatkoća površine zato jer nema područja doline između susjednih metala zavara.

Visina metala zavara h utječe na debljinu sloja WAAM-a. Smanjenjem udaljenosti središta d , preklapajuća zona raste i dovodi do povećanja debljine taloženog sloja i smanjenja površinske glatkoće. Kod preklapajućeg modela, uvjeti za stabilan proces preklapanja su određeni isključivo kroz geometrijska razmatranja i iskazana su kao $d \geq d^* = 0,738w$. Provedena su eksperimentalna ispitivanja i dobiveni rezultati su prikazani slikom 12. [6]



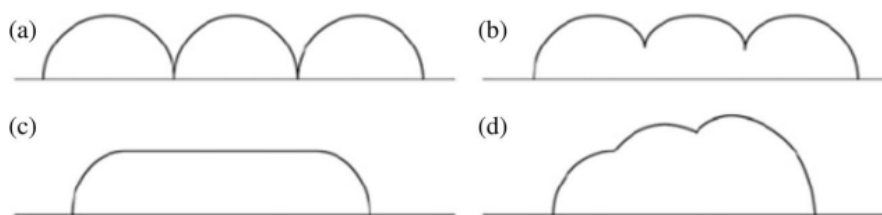
Slika 12: Omjer visina prvoga i drugog zavara s različitim udaljenostima središta [6]

Rezultati se mogu dobiti iz sljedeće jednadžbe:

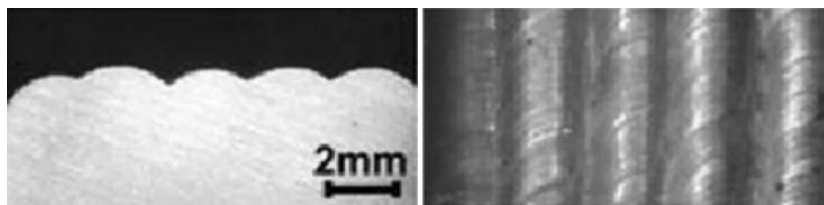
$$w \leq \frac{d}{0,738} \quad (1.)$$

Ako se d u jednadžbi 1 definira kao udaljenost između prolaza, tangentni model preklapanja se može koristiti za određivanje širine metala zavara. Tako se dobiva 2D nataloženi oblik s optimalnom glatkoćom površine. Parametri zavarivanja tako ponovno određuju geometriju zavara. [6]

Optimalna udaljenost središta metala zavara određena je po kriteriju koji kaže da će se ravna površina dobiti kada je preklapajuća zona jednaka zoni doline. Slikom 13 su prikazani primjeri preklapanja metala zavara s promjenjivom udaljenosti središta d i različitim odnosom zone preklapanja (ZP) i zone doline (ZD). Eksperimentalno je utvrđeno da se savršeno ravna površina ne može dobiti što je prikazano slikom 14. Potrebno je uočiti da se proizvodi rade u više slojeva pa se greške neravne površine nagomilavaju u okomitom smjeru čime se dobije nestabilno taloženje nakon nekoliko prolaza. [3]



Slika 13: Profili metala zavara s različitim udaljenostima d (a) $d > w$, b) $d < w$, $ZP < ZD$; c) $d < w$, $ZP = ZD$, d) $d < w$, $ZP > ZD$) [3]



Slika 14: Poprečni presjek preklapajućeg profila metala zavara (lijevo) i valovitost površine (desno) [3]

2.4.1 Greške kod WAAM-a

Greške koje se pojavljuju kod WAAM postupka su poroznost, ugorine i nadvišenje zavara.

Tablica 4: Greške WAAM procesa [7]

Greške	Uzroci
Poroznost	Nedovoljan protok zaštitnog plina, niska čistoća zaštitnog plina, pogrešni parametri, prevelika brzina zavarivanja, nečistoće u materijalu
Ugorine	Prevelika struja zavarivanja, prevelika brzina zavarivanja, pogrešan kut zavarivanja, kemijski sastav materijala, nedovoljno dodavanje žice
Nadvišenje	Prevelika brzina zavarivanja

3 Izazovi za WAAM sustav

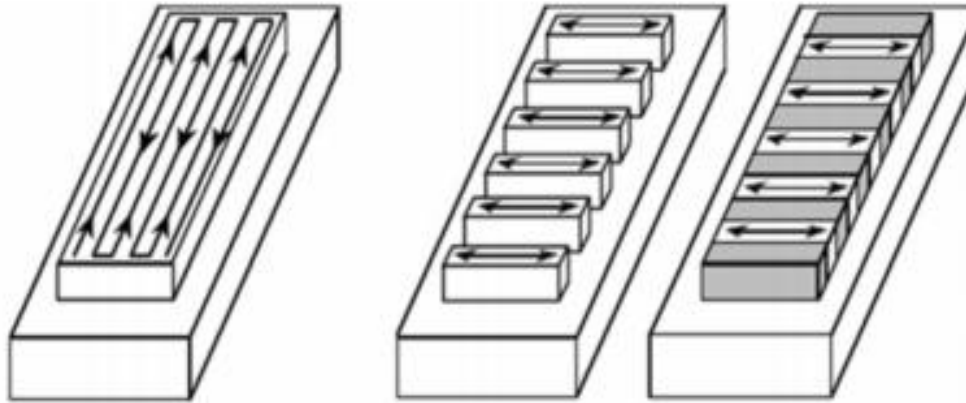
Budući da je WAAM proces obećavajuća tehnologija za proizvodnju velikih avionskih komponenti sa srednjom kompleksnošću, potrebno je riješiti nekoliko problema koji se javljaju prilikom izrade. To su zaostala naprezanja i deformacije zbog velikog unosa topline, relativno slaba točnost uzrokovana načinom izrade sloj po sloj (eng. *stair steping*) i slaba kvaliteta površine. [3]

3.1 Zaostala naprezanja i deformacije

Značajan unos topline rezultira velikim zaostalim naprezanjima i uzrokuje deformaciju podloge ukoliko nije adekvatno pričvršćena. Zaostala naprezanja su povezna sa skupljanjem materijala tijekom hlađenja i najveća su u smjeru nanošenja materijala [8].

Kontrola zaostalih naprezanja i deformacija posebice za veće dijelove jedan je od glavnih problema. Oni utječu na tolerancije dijela i uzrokuju preuranjene greške. Kod zavarivanja, naprezanja uzrokovana toplinom su rezultat nejednolikog širenja i skupljanja materijala. Ta naprezanja mogu uzrokovati deformiranje materijala ili strukture. Ako struktura nije u mogućnosti odgovoriti na deformiranje, doći će do popuštanja ili loma ili će nastati zaostala naprezanja. Ukoliko se prilikom izrade komponente ne osigura pričvršćenje podloge, zaostala naprezanja će uzrokovati deformiranje komponente. Najbolji način za smanjenje deformacija je kontrola prilikom nanošenja depozita. Provedena su mnoga istraživanja taloženja materijala u cilju smanjenja toplinskog naprezanja. Kako bi se dobila manja naprezanja, taloženje materijala moguće je dobiti u više prolaza za jednostruku strukturu mijenjanjem slijeda taloženja, taloženjem u nizu i predgrijavanjem ili hlađenjem između prolaza.

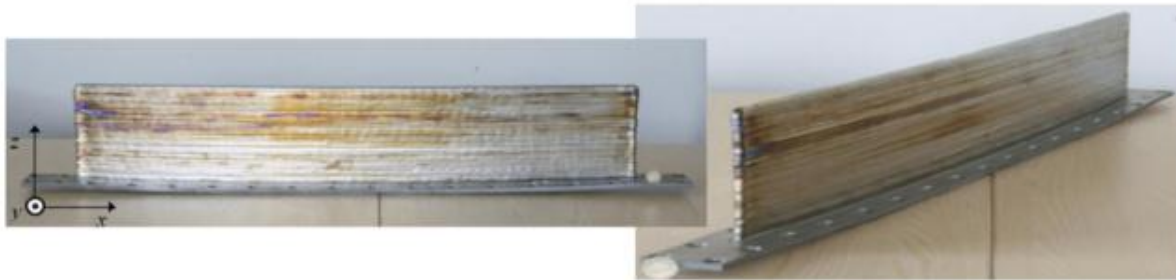
Selektivni pristup taloženja, gdje se prvo natalože serije malih dijelova određenog oblika, a nakon toga se ti dijelovi spajaju zajedno, jedan su od načina smanjenja deformacija. Dijelovi putanje postavljeni su okomito na smjer duge putanje što omogućuje sporije hlađenje. Slika 15 prikazuje dva načina taloženja. S lijeve strane prikazano je standardno taloženje, a s desne strane taloženje dijelova. [3]



Slika 15: Prikaz načina taloženja (lijevo-standardni način, desno-taloženje dijelova) [3]

Korištenje metode konačnih elemenata i provedenim eksperimentom, pokazan je utjecaj različitih putanja taloženja materijala poput linearnog gibanja u obliku rastera i spiralnog gibanja. Otkriveno je da kraće putanje uzrokuju manje izvijanje podloge. To ukazuje da oblik putanje taloženja značajno utječe na temperaturu u određenom trenutku i posljedično na raspodjelu naprezanja. Mughal i autori su razvili toplinsko-mehanički model za predviđanje zaostalih naprezanja koje uzrokuju deformiranje. Otkriveno je da kontinuirano taloženje bez hlađenja između prolaza rezultira manjim deformacijama i istovremeno služi za predgrijavanje podloge. Međutim, kontinuirano taloženje može uzrokovati pretjerani unos topline u lokalno područje što uzrokuje odstupanje od tolerancije i lošiju kvalitetu površine. Zato treba ostvariti kompromis između hlađenja među prolazima i održavanje dovoljne temperature predgrijavanja za smanjenje deformacija. [3]

Termomehanička analiza taloženja materijala prilikom izrade jednostrukog zida u više slojeva je pokazala da toplina koja se stvara tijekom zavarivanja uzrokuje vlačna zaostala naprezanja uzduž metala zavora zbog skupljanja materijala tijekom skrućivanja. Značajna deformacija komponente i smanjenje naprezanja se ostvaruje tijekom micanja stezaljki za držanje podloge. Također je otkriveno da su naprezanja kroz zid jednolika s vrlo malim utjecajem prethodnih slojeva [3]. Slikom 16 je prikazan WAAM zid gdje je s lijeve strane vidljiv utjecaj zaostalih naprezanja zbog kojeg je došlo do deformiranja u uzdužnom smjeru. Na istoj slici s desne strane je taj isti zid, ali su kod njega poduzete mjere za smanjenje zaostalih naprezanja (učvršćivanje podloge).

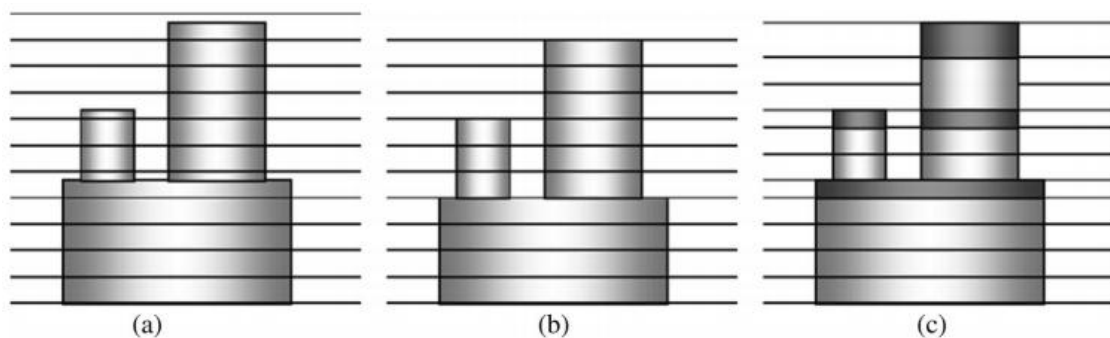


Slika 16: Deformiranje podloge i zida (lijevo) i smanjeno deformiranje (desno) [3]

3.2 Točnost i kvaliteta površine

3.2.1 Točnost

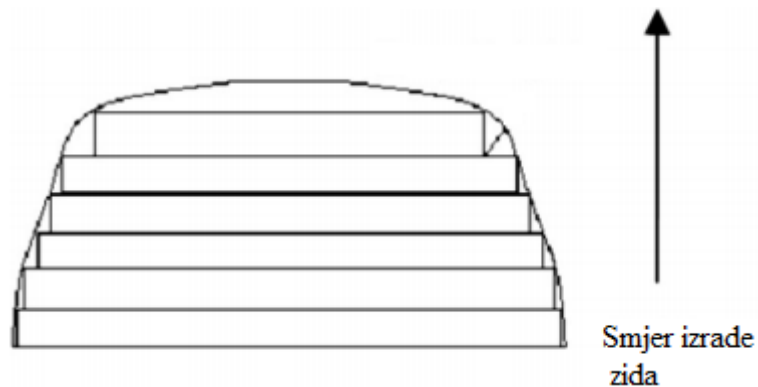
Osim deformacija koje su izazvane zaostalim naprezanjima, drugi važan čimbenik koji utječe na točnost oblika dijela je rezanje dijela na slojeve koji uzrokuje stepeničasti efekt i višak materijala. Model je izrezan s konstantnom debljinom slojeva kao što je prikazano slikom 17. Višak materijala se može dogoditi kada se model izreže na slojeve konstantne debljine (Slika 17b). Rješenje ovog problema je prilagodljiva strategija rezanja koja uključuje rezanje modela u slojeve različite debljine. Takva strategija omogućuje automatsko podešavanje debljine sloja u određenom rasponu kako bi se dobio točan oblik kao što je i model (Slika 17c). [3]



Slika 17: Rezanje modela u slojeve: a) originalni model, b) model s konstantnom debljinom slojeva, c) model s varijabilnom debljinom slojeva prilagođenoj veličini modela [3]

Efekt stepenica se pojavljuje prilikom taloženja slojeva jednake debljine čime se ne može dobiti zakrivljeni oblik profila zida. Slikom 18 su prikazane dimenzionalne greške koje su normalna pojava pri taloženju. Što je veća debljina nanesenog sloja veća će biti greška proizvedenog dijela. Stoga, točnost dijelova proizvedenih s WAAM tehnologijom je oko 10 puta lošija od onih napravljenih s tehnologijom praška. S velikom količinom depozita, WAAM proces je

efikasan za jednostavnije geometrije. Kada je potrebna visoka točnost, dijelovi napravljeni WAAM procesom zahtijevaju naknadnu obradu glodanjem. [3]



Slika 18: Efekt stepenica prilikom izrade zida [3]

3.2.2 Kvaliteta površine

Površina izrađenog dijela sastoji se od velikog broja prolaza jedan do drugoga s ili bez preklapanja. Oblik svakog prolaza više slični paraboli nego pravokutniku. Dobiva se završna površina koja se često naziva hrapavost površine. Stoga, točni modeli za opis geometrije za jedan metal zavara kao i za preklapanje više metala zavara igraju važnu ulogu u određivanju kvalitete površine proizvedenih proizvoda. Dobivanje adekvatne kvalitete površine opisano je u poglavlju 2.4.

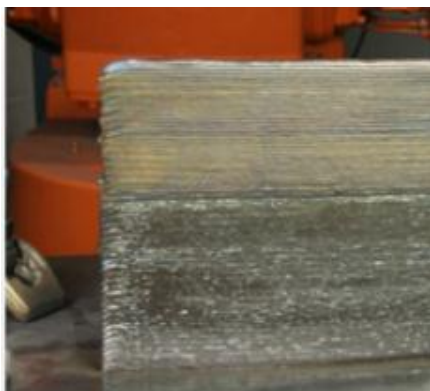
4 Materijali kod WAAM-a

Materijali koji se primjenjuju kod WAAM postupka su titan, aluminij, čelik, invar, bronca, bakar i nikal. Prilikom primjene pojedinog materijala za izradu komponente WAAM postupkom cilj je postići zadovoljavajuća mehanička svojstva i spriječiti nastanak grešaka poput poroznosti [8]. Tablicom 5 su prikazani materijali koji se najčešće primjenjuju kod WAAM postupka.

Tablica 5: Materijali kod WAAM-a [12]

Titan	Ti-6Al-4V
Aluminij	2024, 2319, 4043,5087
Vatrootporni materijali	Volfram, molibden, tantal
Čelik	ER60, ER80, ER90, ER120, maraging (250 i 350), nehrđajući (17-4 PH, 316L)
Inconel	625, 718
Bronca	-
Bakar	-

WAAM omogućuje kombiniranje različitih materijala ako su metalurški kompatibilni. Posebno se ističu ugljični i visokočvrsti čelik, invar i bakar. Slikom 19 je prikazana kombinacija čelika i invara. Slikom 20 je prikazan prsten nakon strojne obrade dobiven kombinacijom čelika i bakra. [13]

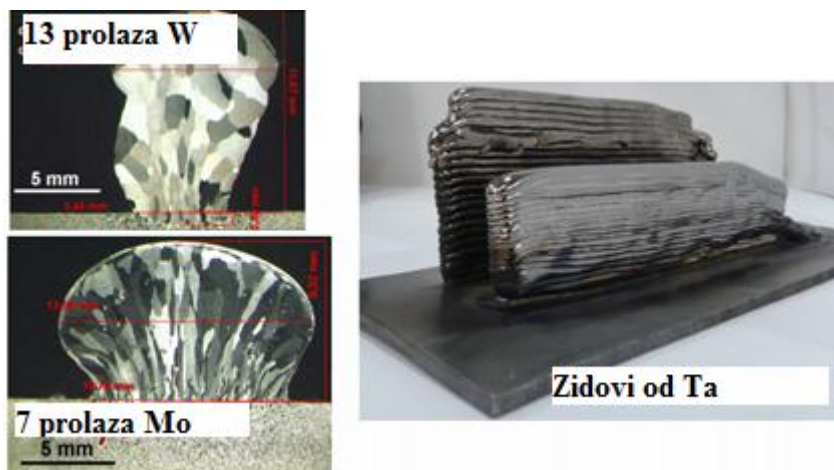


Slika 19: Kombinacija čelika i invara [13]



Slika 20: Prsten dobiven kombinacijom čelika i bakra [13]

Sljedećom slikom prikazana je primjena vatrootpornih materijala za izradu WAAM zidova.



Slika 21: Primjeri primjene vatrootpornih materijala izrađenih WAAM-om [14]

4.1.1 Titan

Titan i njegove legure imaju široku primjenu u zrakoplovnoj industriji. Jedna od najčešće primjenjivanih legura titana je Ti6Al4V koja spada u α - β leguru. Ona se često koristi kod izrade dijelova trupa i motora aviona aditivnim postupkom jer dovodi do značajnih ušteda u materijalu i vremenu izrade. U odnosu na leguru dobivenu kovanjem, otpornost na umor može biti za jedan red veličine bolji [8]. Ovu leguru karakterizira različite vrijednosti vlačne čvrstoće i produljenja u različitim smjerovima. Zahvaljujući svojim karakteristikama prilikom skrućivanja, aditivno proizvedene komponente karakterizira izdužena zrna i visoka tekstura mikrostrukture. To rezultira veću čvrstoću u smjeru paralelnom na slojeve dok je produljenje veće okomito na zid [8]. Međutim, problemi koji se javljaju kod ove legure je izdužena grubozrnata struktura. Prilikom izrade zida WAAM postupkom, primarna β zrna su onoliko visoka kolika je visina cijelog zida. Postoji nekoliko načina rješenja tog problema. Najprikladniji način za rješenje koji se koristi kod WAAM-a je valjanje nakon svakog prolaza. Takvo valjanje povećava dimenzijsku točnost zida, usitnjuje zrna čime se poboljšavaju mehanička svojstva [15]. Valjanjem se eliminiraju naprezanja u uzdužnom i poprečnom smjeru. Nakon valjanja materijal ima granicu razvlačenja od 994 N/mm^2 , vlačnu čvrstoću od 1078 N/mm^2 i produljenje od 13%. Te vrijednosti su veće nego kod kovane legure (950 N/mm^2 , 1034 N/mm^2 , 12 %). [8]

Za zavarivanje titana najčešće se koristi plazma postupak zavarivanja. Da bi kvaliteta zida bila zadovoljavajuća potrebno je koristiti zaštitu prilikom zavarivanja [7].

4.1.2 Aluminij

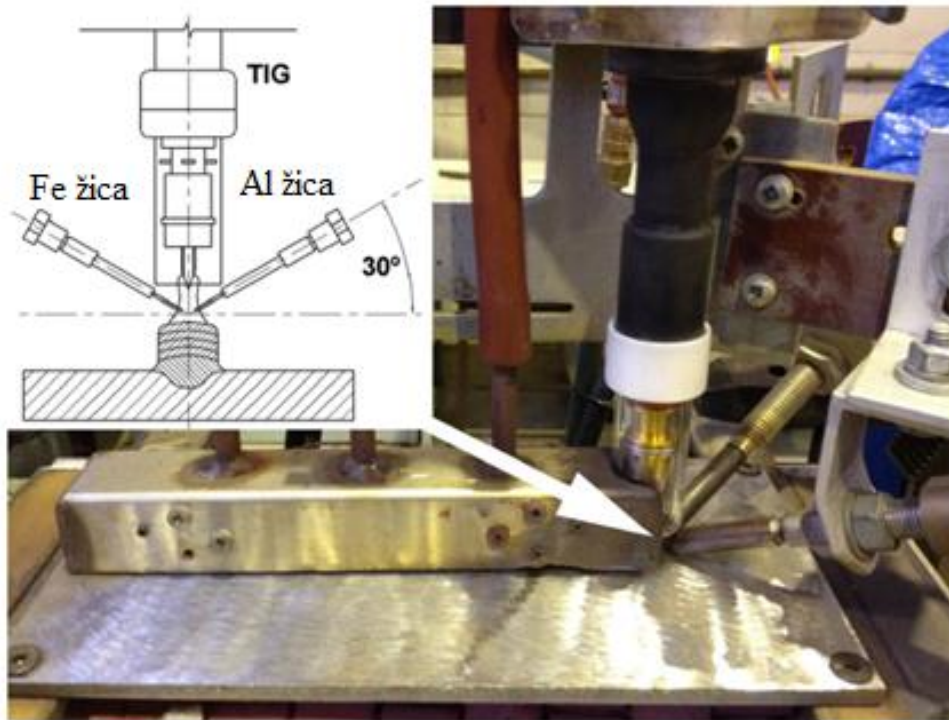
Aditivna proizvodnja s aluminijem rezultira poroznošću. To se može eliminirati korištenjem kvalitetnih žica za zavarivanje i uporabom adekvatnog postupka zavarivanja. Primjena Fronius CMT napredne pulsirajuće varijante zavarivanja donosi beneficije kao što su niski unos topline, čime se dobiva fino zrno jednake veličine u svim smjerovima i efektivno čišćenje žice i podloge od oksida. [8]

Postavka opreme za zavarivanje aluminija WAAM postupkom ne zahtjeva šator pod uvjetom da se veličina izgrađenog zida velika i vrijeme postavljanja šatora dugotrajno.

4.1.3 Kombinacije materijala

Jedna od kombinacija materijala koja se može dobiti WAAM postupkom je intermetalni spoj Fe i Al. Takva kombinacija metala odlikuje se sljedećim svojstvima: otpornost na trošenje, otpornost na oksidaciju i koroziju, mala gustoćom i niski troškovi izrade. Međutim, svojstvo lomljivosti na sobnoj temperaturi ograničava primjenu ove kombinacije metala u industriji. Iako je uloženo je mnogo napora kako bi se poboljšala žilavost na sobnoj temperaturi dodatkom legirnih elemenata i toplinskom obradom, dobivanje boljih svojstava je ograničeno. Tako dobiveni materijal spada u grupu funkcionalno građenih materijala koji je dobiven kombinacijom Fe i Al. Tako dobiveni materijal može se s jedne strane zida odlikovati visokom otpornosti na koroziju, a s druge strane viskom žilavosti dok se središte materijala odlikuje blagim prijelazom navedenih svojstava [16]. Primjer izgradnje takvog zida prikazan je slikom 22. Postavka WAAM sustava sastoji se od invertorskog izvora struje za TIG postupak i odgovarajućeg pištolja za zavarivanje. Kao dodatni materijal korištene su 2 žice promjera 0,9 mm. Jedna žica je izrađena od kaljenog željeza čistoće 99,5 %, a druga od aluminija gradacije 1080 [16]. Dodavanje žica je istovremeno s dodavačem žice u zavareni spoj. Kut između dodavača žica i pištolja za zavarivanje je 60 °, a kut između dodavača svake žice i podloge je 30 ° kako bi se osigurala stabilnost procesa. Duljina električnog luka je 3,5 mm, a iznos struje zavarivanja je 140 A čime je postignut stabilan i koncentriran električni luk s dovoljnim unosom topline. Zaštitni plin je čisti argon. Osim primarne zaštite kroz sapnicu pištolja, postoji i sekundarna zaštita lokalnim uređajem kroz koji prolazi argon čiji protok iznosi 9 L/min. Sekundarna zaštita traje i nakon gašenja električnog luka oko 60 sekundi kako bi se smanjila mogućnost oksidacije. Podloga je od ugljičnog čelika DH36 koji se primjenjuje u brodogradnji i debljina podloge iznosi 5,5 mm. Ovaj čelik ima dobru zavarljivost te osigurava stabilnost

procesa taloženja nekoliko prvih slojeva. Temperatura među prolazima iznosi 400 °C kako bi se izbjegle pukotine [16].



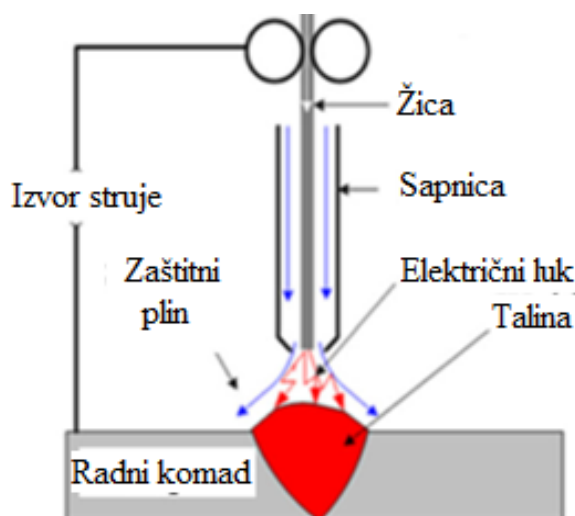
Slika 22: WAAM sustav za Fe-Al legiranje [16]

5 Postupci zavarivanja kod WAAM-a

Za WAAM sustav se mogu primijeniti različiti postupci zavarivanja, a koji će se postupak odabrati ovisi o vrsti materijala koji se zavaruje, širini zida, visini zida, kvaliteti površine zida. Najčešće primjenjivi postupci kod WAAM-a su TIG, MIG i plazma zavarivanje. Uspoređujući TIG i MIG, TIG postupak generira neznatno prskanje i rastaljeni metal je manje aktivan, što je poželjno prilikom taloženja materijala različitih kemijskih sastava. Plazma zavarivanje se najčešće koristi kod titana. Prednost MIG postupka zavarivanja je to što je dodatni materijal sastavni dio procesa dok su kod plazme i TIG postupka potrebni dodavači žice.

5.1 MIG/MAG

MIG/MAG je elektrolučni postupak zavarivanja kod kojeg se električni luk uspostavlja između kontinuirane elektrode (metalne žice) i radnog komada. Toplina dobivena električnim lukom koristi se za taljenje osnovnog i dodatnog materijala. Proces se odvija se u zaštitnoj atmosferi inertnog (Ar, He) ili aktivnog (CO_2 i mješavine) plina koji štite talinu. Kod MIG postupka se primjenjuje inertan zaštitni plin, a kod MAG postupka aktivan. Žicu namotanu na kolute pogonski sustav dodaje konstantnom brzinom kroz polikabel i pištolj u električni luk. Zaštitni plin koji se pohranjuje u boce pod tlakom također prolazi polikabelom i pištoljem kako bi stvorio zaštitnu atmosferu prilikom zavarivanja. Postupak MIG/MAG zavarivanja može biti poluautomatiziran (dodavanje žice je automatizirano, a vođenje pištolja ručno) ili u potpunosti automatiziran/robotiziran. Slikom 23 prikazan je detalj MIG/MAG postupka zavarivanja. [17]



Slika 23: Detalj MIG postupka zavarivanja [3]

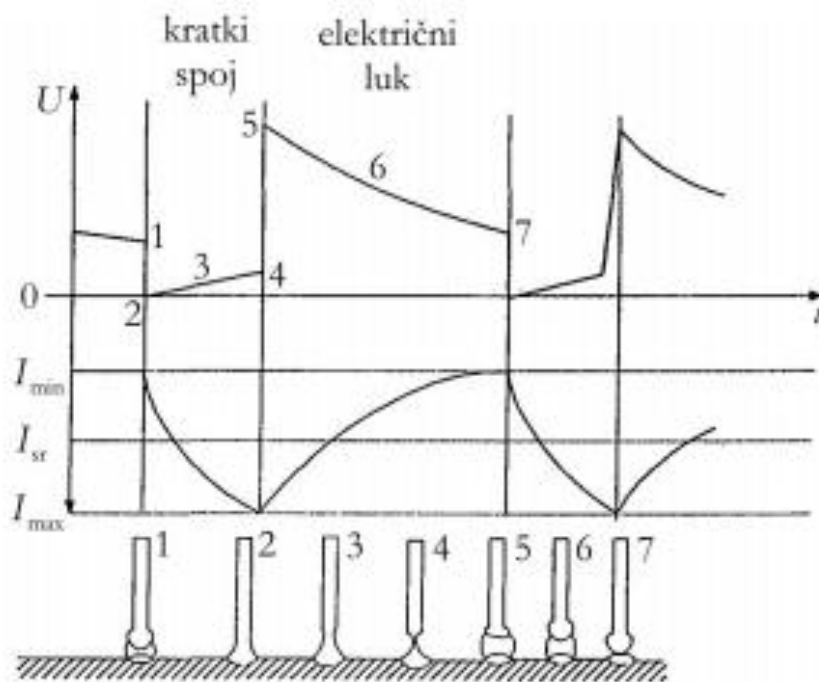
Osnovnu opremu za MIG/MAG zavarivanje čine: izvor istosmjerne ili izmjenične struje s ravnom statičkom karakteristikom (CV – eng. Constant Voltage), polikabel, uređaj za hlađenje, mehanizam za dovod žice, boca sa zaštitnim plinom, pištolj za zavarivanje te regulator protoka zaštitnog plina. Iz izvora struje idu dva vodiča od kojih je jedan priključen na radni komad, a drugi na pištolj za zavarivanje. Električna struja preko kontaktne vodilice prolazi žicom koja se kontinuirano i automatski odmeta s koluta pomoću pogonskog elektromotora. Istovremeno zaštitni plin dolazi na mjesto zavarivanja iz boce putem polikabela kroz sapnicu pištolja. Pištolji za zavarivanje mogu biti hlađeni zrakom (za zavarivanje tankih limova žicama promjera do oko 1,2 mm) ili vodom (zatvoreni vodeni sustav hlađenja za veće jakosti struje ili kod korištenja žica veće toplinske provodljivosti). [17]

5.1.1 Načini prijenosa metala kod MIG/MAG postupka

Prijenos metala predstavlja proces slobodnog leta rastaljene kapljice od vrha elektrode kroz električni luk do taline metala zavara. Kod MIG/MAG zavarivanja prijenos metala igra veliku ulogu jer odabirom parametara zavarivanja moguće definirati odgovarajući prijenos metala. Dobro poznavanje procesa prijenosa metala vrlo je bitno kako bi se postigla visoka kvaliteta i produktivnost procesa zavarivanja. Parametri koji utječu na promjenu u načinu prijenosa metala su: kemijski sastav i promjer dodatnog materijala, sastav zaštitnog plina, jakost struje i njen polaritet te duljina električnog luka (napon). Pri elektrolučnom zavarivanju taljivom elektrodom postoje tri načina prijenosa dodatnog materijala. Materijal se može prenositi slobodnim letom kapljica, premošćivanjem i uz zaštitu troskom. Zbog specifičnosti pojava i duljine električnog luka kod prijenosa premošćivanjem razlikujemo prijenos metala kratkim spojevima i prijenos metala mješovitim lukom (krupnokapljičasti prijenos), a kod prijenosa slobodnim letom kapljica štrcajući i impulsni luk. Prijenos metala kratkim spojevima, mješovitim i štrcajućim lukom spadaju u prirodne prijenose, dok impulsni prijenos kapljica spada u kontrolirani prijenos metala. Osim impulsnog, kao trenutno najraširenijeg kontroliranog načina prijenosa metala, postoje još i razne vrste modificiranih načina prijenosa metala: CBT – eng. Controlled Bridge Transfer, STT – eng. Surface Tension Transfer, CMT – eng. Cold Metal Transfer, Rapid Arc Transfer, itd. Zbog sve većeg broja i primjene novorazvijenih kontroliranih načina prijenosa metala, sve se više pažnje posvećuje modificiranju postojećih klasifikacija koje uključuju samo prirodne načine prijenosa metala [18].

5.1.1.1 Prijenos metala kratkim spojevima

Kod prijenosa metala kratkim spojevima dolazi do taljenja kontinuirano dobavljane žice pomoću električnih kratkih spojeva koji se ponavljaju periodički. Prijenos metala kratkim spojem karakteriziraju male struje zavarivanja (50 A – 170 A), mali napon (13 V – 21 V) te zaštitni plin CO₂ ili mješavine (CO₂+Ar, CO₂+Ar+O₂). Glavne značajke su mali unos topline i činjenica da se sav prijenos dodatnog metala odvija pri fizičkom kontaktu elektrode i osnovnog materijala odnosno taline. Period pri kojem se odvaja jedna kapljica metala dijeli se na fazu kratkog spajanja i fazu električnog luka. Do odvajanja kapljice dolazi u prvoj fazi u kojoj se vrh elektrode nalazi u fizičkom kontaktu s rastaljenim metalom pri čemu raste jakost struje što dovodi do povećanja magnetske sile koja stišće kapljicu taline i vrška žice, a javlja se na kraju elektrode zbog djelovanja elektromagnetskog polja.



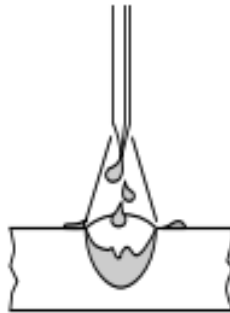
Slika 24: Princip prijenosa metala kratkim spojevima po fazama [19]

Na slici 24 su prikazane sve pojave tijekom prijenosa metala kratkim spojevima. Točka 1 prikazuje stanje kada je žičana elektroda udaljena od radnog komada te u tom trenutku postoji električni luk. Napon na luku ima zadanu vrijednost. Točka 2 prikazuje stanje kada elektroda stupi u kontakt s radnim komadom te u električnom krugu nastane kratki spoj. U tom trenutku napon je jednak nuli, a struja počinje eksponencijalno rasti (brzina rasta je ograničena induktivnim otporima kruga). Točka 3 i 4 opisuju stanje polaganog povećanja napona zbog

povećanja otpora budući da u strujnom krugu otpor ima konačnu vrijednost. Razlog povećanja otpora je pojačano zagrijavanje slobodnog kraja žice zbog povećanja struje. Zbog povećanja struje povećava se i "pinch efekt". On dovodi do smanjenja presjeka žice (izazivajući povećani otpor i zagrijavanje) i konačno do otkidanja zagrijanog vrha žice. U točki 5 dolazi do prekida kratkog spoja i ponovno se uspostavlja električni luk. Struja počinje eksponencijalno padati na nominalnu vrijednost. Skok napona je nešto veći od nominalnog i s vremenom se smanjuje na nominalnu vrijednost što je prikazano točkama 6 i 7. Sve gore opisane faze se zbivaju dok se žičana elektroda jednolikom brzinom giba prema radnom komadu. Kada žica premosti razmak nastao otkidanjem vrha, ponavlja se ciklus od točke 1. Broj ciklusa po sekundi varira u ovisnosti o promjeru žice i pri stabilnim parametrima ima 20 - 200 kratkih spojeva u sekundi. Mali unos topline omogućuje kratkim spojevima svestranu primjenu, od zavarivanja tankih i debelih materijala te zavarivanja u svim položajima. Posebno je pogodan za zavarivanje korijena kod zavarivanja cjevovoda te kod zavarivanja tankih limova u svim položajima. Prijenos kratkim spojevima može se prepoznati po karakterističnom pucketanju ako se radi s pravilnim parametrima. Glavni nedostaci prijenosa metala kratkim spojevima su veća količina štrcanja i mali učin taljenja, ali i velika vjerojatnost pojave naljepljivanja [19].

5.1.1.2 Prijenos metala prijelaznim lukom

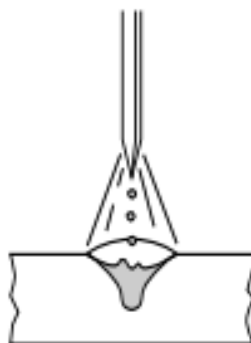
Prijenos metala prijelaznim lukom kombinacija je prijenosa štrcajućim lukom i u manjoj mjeri kratkim spojevima. Prijenos se vrši uz veće struje zavarivanja (od 170 A do 235 A) i napone (od 22 V do 25 V), ovisno o promjeru žice. Takvi parametri uzrokuju pojavu većih kapljica koje se nepravilno odvajaju s vrha elektrode i padaju u talinu. Posljedica toga je više prskanja zbog povremenih pojava slučajnih kratkih spojeva, teško se kontrolira, položaj zavarivanja je ograničen na horizontalne položaje, lošije je kvašenje taline što može uzrokovati nepotpuno spajanje materijala i nastajanje pukotina, a zavar je izbrazdan i nepravilan. Ovaj prijenos metala posebno je izražajan kod zavarivanja u zaštiti ugljičnog dioksida ili mješavina s njegovim snažnim utjecajem. Zbog nabrojanih nedostataka prijenos metala prijelaznim lukom se izbjegava te se pokušava minimalizirati u praksi [18, 20]. Slikom 25 prikazan je prijenos metala prijelaznim lukom.



Slika 25: Prijenos metala prijelaznim lukom [20]

5.1.1.3 Prijenos metala štrcajućim lukom

Prijenos metala štrcajućim lukom karakterizira slobodan let puno malih kapljica kroz atmosferu luka od elektrode prema radnom komadu. Elektroda ni u jednom trenutku ne dolazi u dodir s osnovnim metalom. Sile koje djeluju u električnom luku otkidaju kapi i usmjeruju ih (radijalno u odnosu na elektrodu) prema radnom komadu prije nego vrh elektrode može dodirnuti radni komad. Koristi se relativno visok napon (od 24 V do 40 V), struja (od 200 A do 600 A). Broj kapljica metala otkinutih u sekundi može biti i više od nekoliko stotina. Promjer kapljice je manji od promjera žice kojom se zavaruje. Veliki unos topline i velika količina nataljenog materijala svojstveni su ovom prijenosu, pa se primjenjuje kod zavarivanja debljih dijelova u vodoravnom položaju. Nije pogodan za zavarivanje u prisilnim položajima. Kao zaštitne atmosfere uglavnom se koriste plinske mješavine s argonom. Prednosti prijenosa metala štrcajućim lukom su velika količina nataljenog materijala, velika penetracija, mogućnost korištenja većih promjera žice te malo nepoželjnog prskanja. Nedostatci ovakvog prijenosa su opasnost od progaranja kod tanjih materijala (koristi se kod materijala od 3 mm i debljih) i opasnost od slijevanja velike količine rastaljenog materijala u prisilnim položajima zbog djelovanja gravitacijske sile. Slikom 26 prikazan je prijenos metala štrcajućim lukom. [19]



Slika 26: Prijenos metala štrcajućim lukom [20]

5.1.1.4 Prijenos metala impulsnim strujama

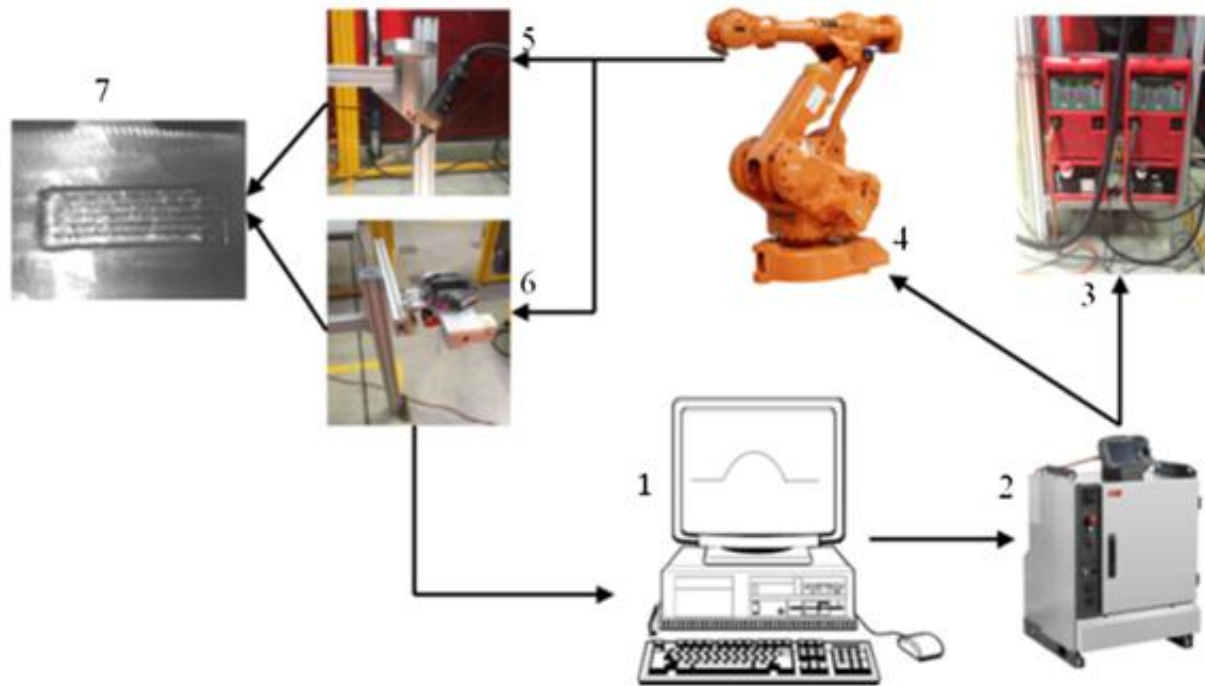
Impulsni način prijenosa metala spada u kontrolirane načine prijenosa. Možemo reći da je ovaj način prijenosa visoko kontrolirana varijanta štrcajućeg načina prijenosa. Struja varira između neke maksimalne vrijednosti (vršna impulsna struja) i minimalne vrijednosti (osnovna impulsna struja). Zadatak osnovne struje je održavanje električnog luka, a impulsna struja osigurava odvajanje po jedne kapi po svakom impulsu. Impulsnim načinom prijenosa kapljica osigurava se stabilan i miran električni luk, praktički bez rasprskavanja kapljica. Ovisno o načinu proizvodnje impulsa kod zavarivanja, mogu se koristiti sinusoidni oblik impulsa, pravokutni oblik te drugi oblici impulsa poput trapeznog ili trokutastog. Kod prijenosa impulsnim lukom metal se prenosi bez kratkih spojeva, a najvažnije sile koje utječu na prijenos su elektromagnetska sila i sila površinske napetosti. Upravo je mogućnost upravljanja elektromagnetskom silom omogućila razvoj impulsnih struja. Prosječna struja zavarivanja kod impulsnog zavarivanja manja je od kritične struje koja rezultira nepravilnim i neprihvatljivim prijenosom metala u grubim kapima. [18]

Kod impulsnog zavarivanja podešavanje parametara je nešto složenije budući da treba uskladiti 5 osnovnih parametara zavarivanja (jakost vršne i osnovne struje, širinu impulsa, frekvenciju impulsa i brzinu dodavanja žice) koji utječu na način i stabilnost prijenosa metala kroz električni luk. Zavarivanje impulsnim načinom prijenosa metala zadržava prednosti, a otklanja poteškoće koje se javljaju kod štrcajućeg luka tako da se može primijeniti u svim položajima, te za materijale koji su osjetljivi na količinu unosa topline. Također je primjenjiv u cijelokupnom rasponu od niskih do visokih struja zavarivanja. [18]

5.1.2 Primjena MIG/MAG kod WAAM procesa

Najčešće primjenjivan postupak kod WAAM-a je MIG/MAG. Prilikom zavarivanja elektroda je okomita na podlogu na koju se zavaruje. Općenito, širina zavara kreće se u rasponu od 4 do 10 mm. [6]

Shematski prikaz tipičnog robotskog sustava WAAM baziranog na MAG postupku zavarivanja dan je slikom 28. Računalo (1) se koristi za programiranje procesa i prikupljanje rezultata. Upravljačka jedinica (2) se koristi za koordiniranje gibanja robota i zavarivačkog procesa. Izvor struje za MAG (3) služi za kontrolu procesa zavarivanja. Industrijski robot (4) provodi gibanje pištolja za zavarivanje (5) i nakon toga laserski (6) mjeri dobiveni profil. Radni komad s nataloženim materijalom prikazan je pod 7. [3]



Slika 27: Shematski prikaz robota za WAAM sustav baziran na MAG postupku [3]

CMT je modificirana varijanta MIG postupka razvijena u tvrtki Fronius koja omogućuje kontrolirani prijenos kapljice metala. To uključuje veću preciznost, manji unos topline i zavarivanje bez prskanja. Navedene koristi odnose se na aluminij i čelik, dok za titan to ne vrijedi jer dolazi do bježanja luka što rezultira povećanjem površinske hrapavosti. CMT je našao široku primjenu u aditivnoj proizvodnji zbog svojih dobrih karakteristika, a to su velika količina depozita i niski unos topline. [3]

Problemi koji se javljaju kod zavarivanja MAG postupkom koji je dio WAAM sustava su da geometrija zavara nije jednolika po cijeloj duljini, posebice na početku i na kraju prolaza. To dovodi do neujednačene geometrije, loše kvalitete površine i dimenzijske netočnosti komponente. Slika 28 prikazuje primjer tankog zida dobivenog taloženjem gdje se može vidjeti značajna razlika u geometriji na početku i na kraju prolaza. Zhang i suradnici su pokušali riješiti taj problem mijenjanjem parametara zavarivanja na početku i na kraju prolaza. Prilikom uspostave luka na početnom dijelu putanje zavarivanja, jakost struje i brzina zavarivanja su smanjene značajno, a na kraju putanje su jakost struje i brzina zavarivanja postupno smanjuju. Iako se ovom metodom geometrija zavara može kontrolirati, postupak namještanja parametra je dugotrajan i dobiven je empirijski. Alternativan način je optimiziranje putanje gibanja pištolja za zavarivanje primjenom kontinuirane putanje koja će minimizirati broj prolaza za svaki sloj. Dokazano je da je taj način bolji. Međutim, kontinuirana putanja zanemaruje drugu

stranu, a to su zaostala naprezanja i deformacije. Prema tome, daljnja istraživanja bi trebala biti usmjerena u pronalaženju kompromisa između zaostalih naprezanja i deformacija i poboljšanja geometrije zavara. [3]



Slika 28: Razlika u geometriji zavara na početku i na kraju prolaza [3]

6 Primjena

WAAM proces se primjenjuje za izradu srednjih do velikih dijelova (>400mm) i dijelova srednje složenosti. U zrakoplovnoj industriji postoji veliki broj dijelova koji se izrađuju strojnom obradom iz bloka materijala i imaju veliki BTF omjer. On se definira kao omjer volumena ili mase početnog sirovca V_i i volumena ili mase konačnog proizvoda V_f što je prikazano jednadžbom:

$$BTF = \frac{V_i}{V_f} \quad (2.)$$

On ovisi o tome koliko se početnog materijala nalazi u konačnoj komponenti. Mnoge komponente za zrakoplov su napravljene iz blokova materijala što je karakterizirano velikim gubitkom materijala. Danas se zahtjeva postizanje što nižeg BTF omjera kako bi bilo što manje otpada materijala. [5]

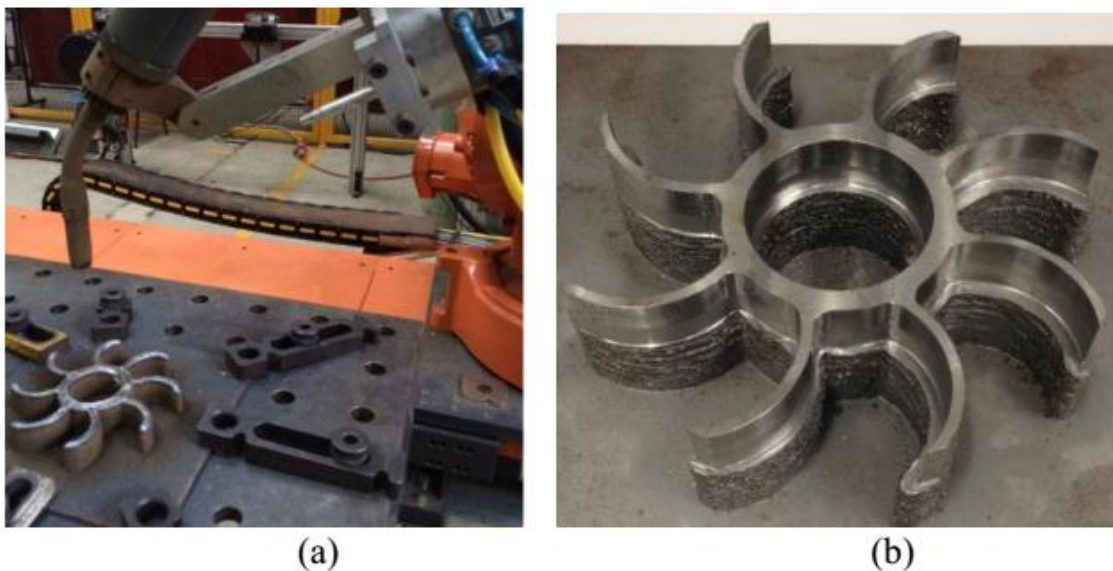
U suradnji sa zrakoplovnom industrijom, pokazalo se da WAAM proces može biti alternativna metoda proizvodnje tih dijelova. Zrakoplovne komponente često imaju složenu geometriju i izrađene su od skupih materijala (legure titana i nikla) pa se zahtjeva što niži BTF omjer. Near net shape proizvodnja s viškom materijala od 1 mm na svakoj površini za završnu obradu osigurava točnost i kvalitetnu površinu, a istodobno se smanjuje BTF omjer. Tako je WAAM proces postao broj 1 u izradi takvih komponenti za zrakoplovnu industriju. [21]

Osim u zrakoplovnoj industriji, WAAM tehnologija ima široku primjenu u automobilske industriji i za brzu izradu alata. U automobilske industriji se aditivna proizvodnja koristi kao uspješni alat u konstrukciji i izradi prototipova zato jer se može skratiti vrijeme razvoja i smanjiti proizvodni troškovi.

Sljedećim primjerima dan je literaturni pregled nekih dijelova koji su napravljeni WAAM tehnologijom.

6.1 Rotor

Na Sveučilištu Wollongong izrađen je jednostavan rotor. Procesom planiranja generirana je putanja gibanja i odabrani su parametri zavarivanja. Razmak između prolaza postavljen je na 4 mm, a debljina lopatica je 4 mm. Udaljenost središta preklapanja prolaza je konstantna i iznosi 4 mm. Brzina dodavanja žice je 5 m/min, a brzina zavarivanja mora biti veća od 0,76 m/min (odabrano 0,8 m/min). Predviđena debljina sloja je 1,77 mm, pa je ta dimenzija korištena kod programiranja robota. Tijekom procesa zavarivanja između prolaza provodilo se odgovarajuće vrijeme hlađenja podloge. Napravljeno je 40 prolaza u vertikalnom smjeru čime je dobivena debljina rotora od 70 mm. Provedena je naknadna obrada površine glodanjem. Slikom 29a je prikazana oprema, a slikom 29b proizvedena komponenta. [6]

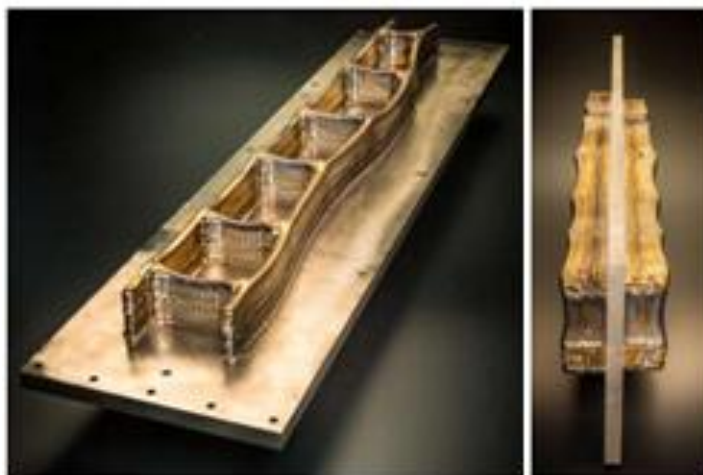


Slika 29: a) Postavke opreme, b) Komponenta nakon glodanja [6]

Provedba ovog eksperimenta dovodi do sljedećih zapažanja. Stanje i temperatura podloge i geometrijski oblik podloge imaju značajan utjecaj na točnost taloženja i kvalitetu površine sljedećih slojeva. Ako površina sloja nije ravna, zbog varijacije u duljini žice prilikom nanošenja sljedećeg sloja doći će do loše kvalitete površine. Zato se preporuča međuoperacija glodanja s vremena na vrijeme. Međutim, ponovno precizno učvršćenje komponente na stol za zavarivanje predstavlja problem. Zato se za proizvode visoke točnosti koristi integrirani sustav za glodanje gdje se eliminiraju eventualne greške prihvata komada. [6]

6.2 Potporna konstrukcija krila zrakoplova

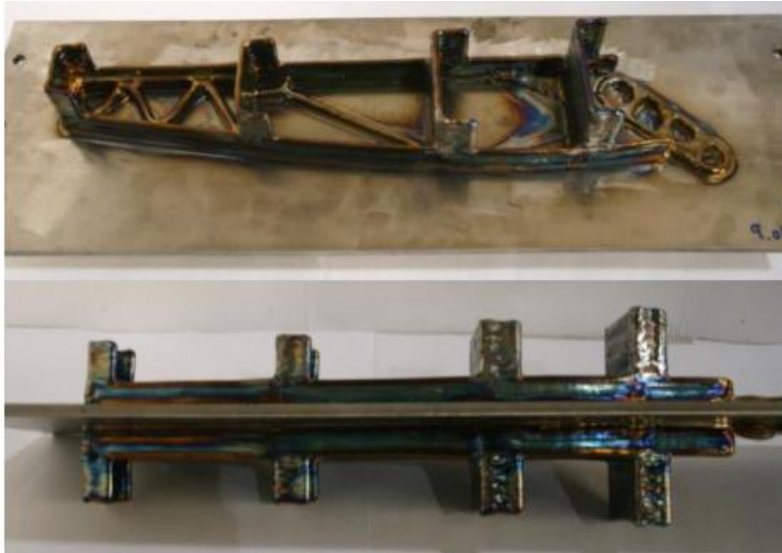
Za BAE Sutave napravljena je potporna konstrukcija krila zrakoplova od legure titana Ti6Al4V duljine od 1,2 m prikazana slikom 30. Krilo je napravljeno robotskim sustavom koji ima 7 osi gibanja, a postupak zavarivanja je plazma. Krilo se sastoji od ravnih i zakrivljenih površina koje su okomite na podlogu. Dva krila izrađuju se istovremeno i to naizmjenično s jedne pa nakon toga s druge strane podloge. Razlog primjene takve strategije je smanjenje deformacija. Još jedan od načina kontrole deformacija je primjena taloženja uzduž kraće putanje. S obzirom na naprezanja prisutna tijekom procesa taloženja, savijanje se može očekivati u uzdužnom smjeru [22]. Potrebna je naknadna toplinska obrada za eliminaciju zaostalih naprezanja prije odvajanja dijelova od podloge [22]. Količina nataloženog materijala iznosi 0,8 kg/h, a BTF omjer 1,2. U usporedbi s klasičnim načinom izrade iz bloka materijala, ušteda u troškovima je 29 % [8].



Slika 30: Potporna konstrukcija krila zrakoplova od Ti6Al4V [22]

6.3 Preklopno krilo

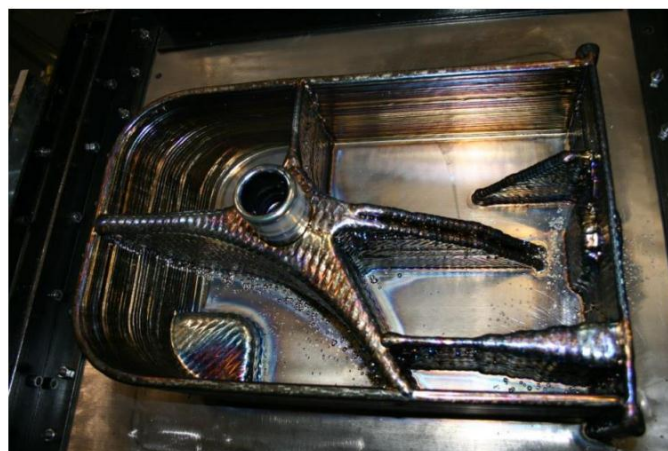
Na zahtjev tvrtke Fokker Aerostructures izrađeno je preklopno krilo prikazano slikom 31. Izrada takvog dijela predstavlja nove izazove u visini, debljini zida i nekoliko kompleksnih presjecišta. Zahtjev je bio da se smanji širina nataljenog materijala na 3,5 mm. Izrađena su dva dijela, drugi je izrađen na tanjoj podlozi kako bi se smanjio BTF omjer. Za izradu je bilo potrebno 9 h, masa dijela je iznosila 9 kg, a BTF omjer 6,3. Ova ista komponenta dobivena je strojnom obradom iz sirovca mase 53 kg, a BTF omjer iznosi 37. Masa dobivenog proizvoda iznosi 1,43 kg. [21]



Slika 31: Preklopno krilo [21]

6.4 Primjer dijela velike složenosti

Tvrtka GKN Aerospace je tražila izradu dijela velike složenosti s WAAM postupkom (slika 32). Takav dio sadrži nekoliko značajki koje do tada nisu bile prisutne u izgradnji WAAM postupkom ili su predstavljale problem prilikom izrade klasičnim postupcima. Dio od legure Ti6Al4V je izrađen simetrično s obje strane podloge. Masa depozita gotovog dijela je 40 kg. Zbog velike količine depozita, dio se je radio s dvije žice istovremeno. Količina depozita vanjske žice je 0,65 kg/h, a unutarnje do 1,25 kg/h. Vrijeme izrade je trajalo dva tjedna. BTF omjer je 1,3. Razornim ispitivanjem otkrivene su greške nedovoljnog protaljivanja koje nisu očekivane. [21]



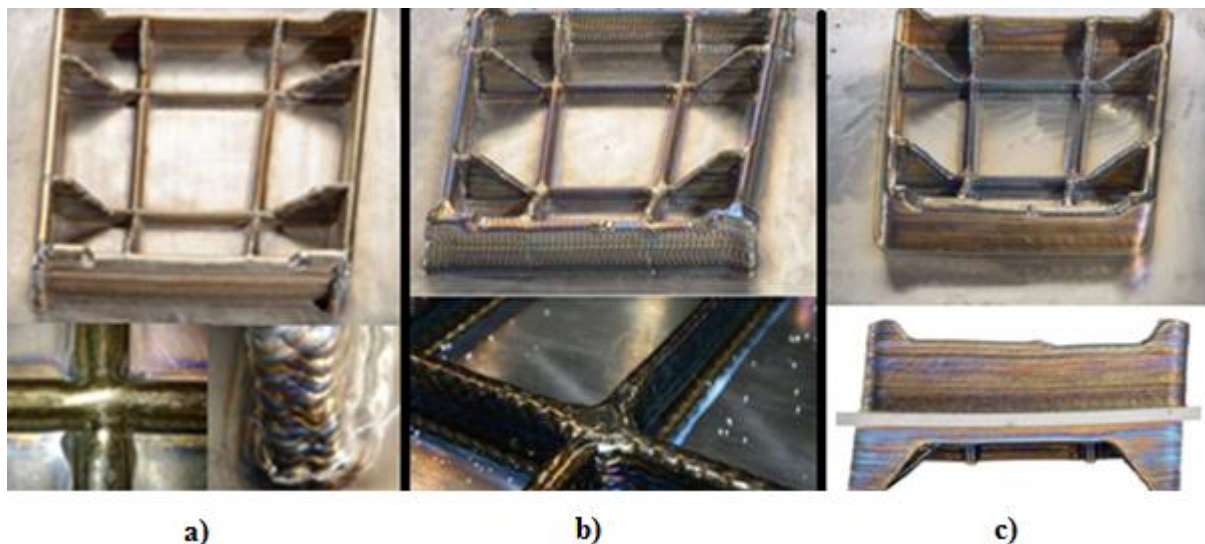
Slika 32: Dio velike složenosti [21]

6.5 Dio kućišta zaustavnog trapa aviona

Dio je napravljen od Ti6Al4V legure, a težina nataložene komponente iznosi 24 kg. Količina nataljenog materijala kojom je dio izrađen iznosi 0,8 kg/h i izrađen je s obje strane podloge čime je osigurana simetričnost. Dio se sastoji od T spojeva, preklopnih spojeva, spojeva pod različitim kutem. BTF omjer iznosi 1,2, a ušteda materijala WAAM postupkom iznosi 220 kg. [8]. Konačni proizvod ima težinu od 21 kg [21]. Vrijeme taloženja materijala za izradu dijela iznosi 24 h od čega 30% otpada na vrijeme hlađenja [21].

Kod izrade ovog dijela htio se pokazati utjecaj načina izrade na kvalitetu taloženja. Za postizanje najbolje kvalitete taloženja, izabiru se različiti načini izrade kako bi zadovoljili različita svojstva dijela. Kod WAAM procesa koriste se dva načina izrade, paralelni način i oscilirajući.

Kod izrade ovog dijela podloga je sastavni dio komponente. Komponenta je napravljena bez rupa, debljine stjenki su veće kako bi se mogla napraviti završna strojna obrada. Različiti broj prolaza je korišten kako bi se postigla različita debljina stjenke. Primjerice, tanji unutarnji zidovi su građeni jednim prolazom (8 mm), a najdeblji zid je građen s 4 paralelna prolaza (oko 22 mm). Primijenjeni su paralelni i oscilatorni način izrade. Prilikom primjene paralelnog načina (slika 33a) pojavile su se greške: nadvišenja na preklopmima prolaza i pukotine u kutu vanjskog zida. Nadvišenje je uzrokovano površinskom napetosti rastaljenog titana i povećanjem brzine hlađenja na preklopu prolaza. Nastanak pukotine je uzrokovan visokom čvrstoćom titana gdje je prilikom hlađenja došlo do skupljanja nataloženog materijala. [22] Oscilirajući način izrade (slika 33b) omogućuje jednostavno mijenjanje širine zida mijenjanjem širina oscilacija. Na taj način se može lako riješiti problem preklapanja prolaza tako da se na njima izgradi okrugli dio. Međutim, u usporedbi s paralelnim načinom ovaj način stvara mnogo grublju valovitu površinu [22]. Kombinacija paralelnog i oscilirajućeg načina (slika 34c) primijenjena je za izradu trećeg dijela. Vanjski dijelovi komponente izrađeni su paralelnim načinom, unutarnji sa svim preklopmima oscilatornim načinom. Vanjski rubovi dijela su napravljeni s radijusom kako bi se spriječila pojava pukotina. Prednosti i nedostaci su prikazani tablicom 6. [22]



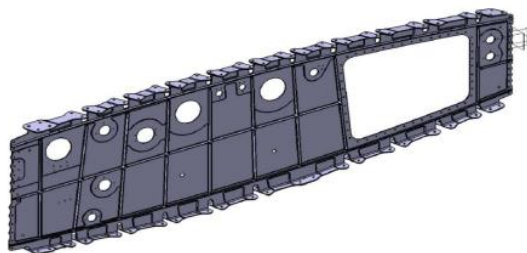
Slika 33: Primjena paralelnog a), oscilirajućeg načina b) i kombinacija paralelnog i oscilirajućeg c) [22]

Tablica 6: Prednosti i nedostaci paralelnog i oscilirajućeg načina izrade [22]

Način izrade	Prednosti	Nedostaci
Paralelni prolazi	Male površinske valovitosti (0,3 - 0,5 mm)	Diskretne veličine debljine zida
	Sposobnost za izradu zakrivljenih površina	Mala količina depozita: oko 0,7 kg/h za Ti64
Oscilirajući prolazi	Kontinuirano mijenjanje širine zida	Velike površinske valovitosti (0,7 - 1,00 mm)
	Velika količina depozita: do 1,2 kg/h za Ti64	Teško primjenjivi za zakrivljene površine

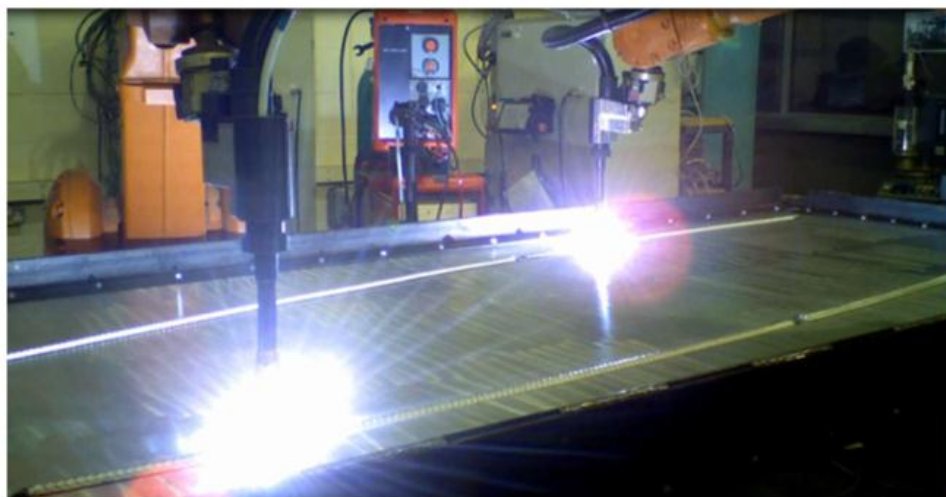
6.6 Rebro krila

Na ovom eksperimentu je pokazan kompromis između BTF omjera i složenosti dijela. Strategiju izrade bilo kojeg proizvoda treba donijeti na temelju različitih aspekata kao što su BTF omjer, složenost geometrije, rizik od grešaka itd. CAD model rebra krila je dan slikom 34. To je dvostrana struktura s mrežom po sredini strukture i nogama na krajevima. Debljina podloge je 4 mm. [22]



Slika 34: CAD model rebara krila [22]

Aluminijsko rebro krila dugo 2,5 m prikazano je slikom 35. Rebra krila izrađuju se WAAM sustavom na obje strane podloge simetrično pa su korištene okretaljke za okretanje. Količina nataljenog materijala od 1,1 kg/h dobivena je CMT postupkom zavarivanja. Zbog veličine dijelova, taloženje materijala radi se s dva robota istovremeno [8]. Slikom 35 je prikazan proces taloženja rebara.



Slika 35: Proces taloženja s dva robota i okretnim stolom aluminijskog rebara [22]

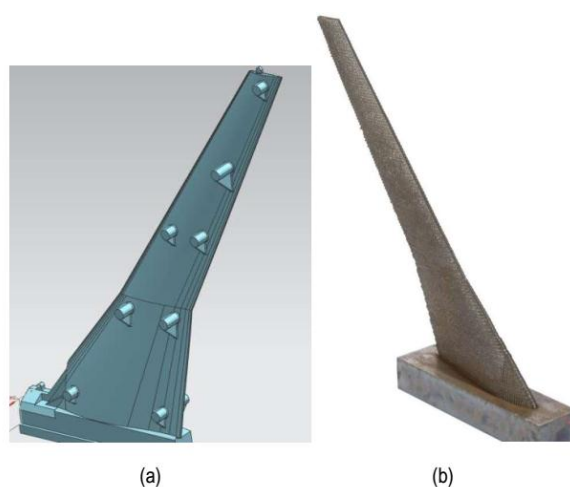
Komponenta je izrađena na dva načina. Prvi način koristi 4 mm tanku ploču na kojoj su WAAM postupkom napravljena rebra u obliku mreže i noge na obje strane podloge, a drugi način je ploča od 22 mm debljine na kojoj su izrađene samo noge. Usporedba je dana tablicom 7. WAAM postupak omogućuje smanjenje BTF omjera do 2,7. Međutim, takav način izrade uključuje visoki rizik od pojave deformacija, složenost taloženja prilikom izrade mreže i visoki rizik od nastanka pukotina na preklopima zbog velike brzine skrućivanja aluminijske legure. Također je potrebno izraditi posebno učvršćenje kako bi se kompenzirala deformacija podloge. Zbog toga je izabran način sa pločom od 22 mm. [22]

Tablica 7: Usporedba različitih načina proizvodnje [22]

	Strojna obrada	WAAM (podloga 4 mm)	WAAM (podloga 22 mm)
BTF omjer	45	2,7	12,3
Deformacija podloge [mm]	-	1,4	0,04
Složenost taloženja	-	visoka	srednja
Rizik od grešaka	-	visoka	srednji

6.7 Model krila

Model krila napravljen je u svrhu testiranja u zračnom tunelu na zahtjev Društva za istraživanje zrakoplova. Model je izrađen od visokočvrstog čelika WAAM sustavom s CMT postupkom zavarivanja s količinom depozita od 3,5 kg/h. Krilo je visoko 0,9 m. Donja polovica krila izrađena je šuplja kako bi se mogli ugraditi uređaji za testiranje. Krilo je naknadno strojno obrađeno s točnošću od 0,05 mm. Primijenjen je oscilirajući način izrade zbog promjenjive debljine stijenke. Jedan od glavnih problema pri izradi krila je akumulacija topline. Nakon svakog sloja, odvijao se je proces hlađenja ručno dvije minute zrakom. Cijeli dio je građen 28 h, od tog 20 h taloženja i 8 sati hlađenja između prolaza. Kako bi se poboljšala efikasnost i učinkovitost procesa, predlaže se izrada još jednog dijela istovremeno [8, 22]. Slikom 36a je prikazan model krila, a 36b izrađeno krilo.



Slika 36: Krilo od visokočvrstog čelika [22]

6.8 Čelični stožac

Slika 37 prikazuje čelični stožac izrađen CMT postupkom. Količina depozita iznosi 2,6 kg/h, debljina zida je 2,5 mm, a obrađeni dio će imati 2 mm. BTF omjer iznosi 1,25. [8]



Slika 37: Čelični stožac [8]

6.9 Okvir

Na zahtjev tvrtke BAE Systems izrađen je okvir na podlozi kako je prikazano slikom 38. Okvir je karakteriziran zakrivljenim zidom, različitim debljinama zida i zidovima pod pravim kutom, preklopnim spojevima, izradom s obje strane podloge. Masa nataloženog materijala iznosi 9 kg, a vrijeme izrade 11 h. Neke karakteristike koje su dobivene ovim dijelom [21]:

- simetrično izrađena komponente s obje strane podloge omogućuju kontrolu deformacija (slika 38 gore)
- Unutrašnji zidovi dobiveni oscilirajućim načinom izrade omogućuju izradu radijusa (slika 38 sredina)
- Vanjski zidovi dobiveni paralelnim prolazima pojednostavljuju preklope i zakrivljenja (slika 38 dolje)



Slika 38: Okvir izrađen WAAM sustavom [21]

7 Eksperimentalni rad

7.1 Opis eksperimenta

Eksperimentalni rad proveden je s ciljem određivanja optimalnih parametara zavarivanja MAG postupkom i odabira načina prijenosa metala pri izradi WAAM zidova. Uvidom u literaturu i probama su određeni parametri zavarivanja kratkim spojevima i impulsnim strujama. Eksperimentalan rad proveden je u laboratorijima Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Eksperiment se sastoji od sljedećih dijelova: pripreme podloge za zavarivanje, zavarivanje zidova kratkim spojevima i impulsnim strujama i pripremom uzoraka te ispitivanja i analize pripremljenih uzoraka.

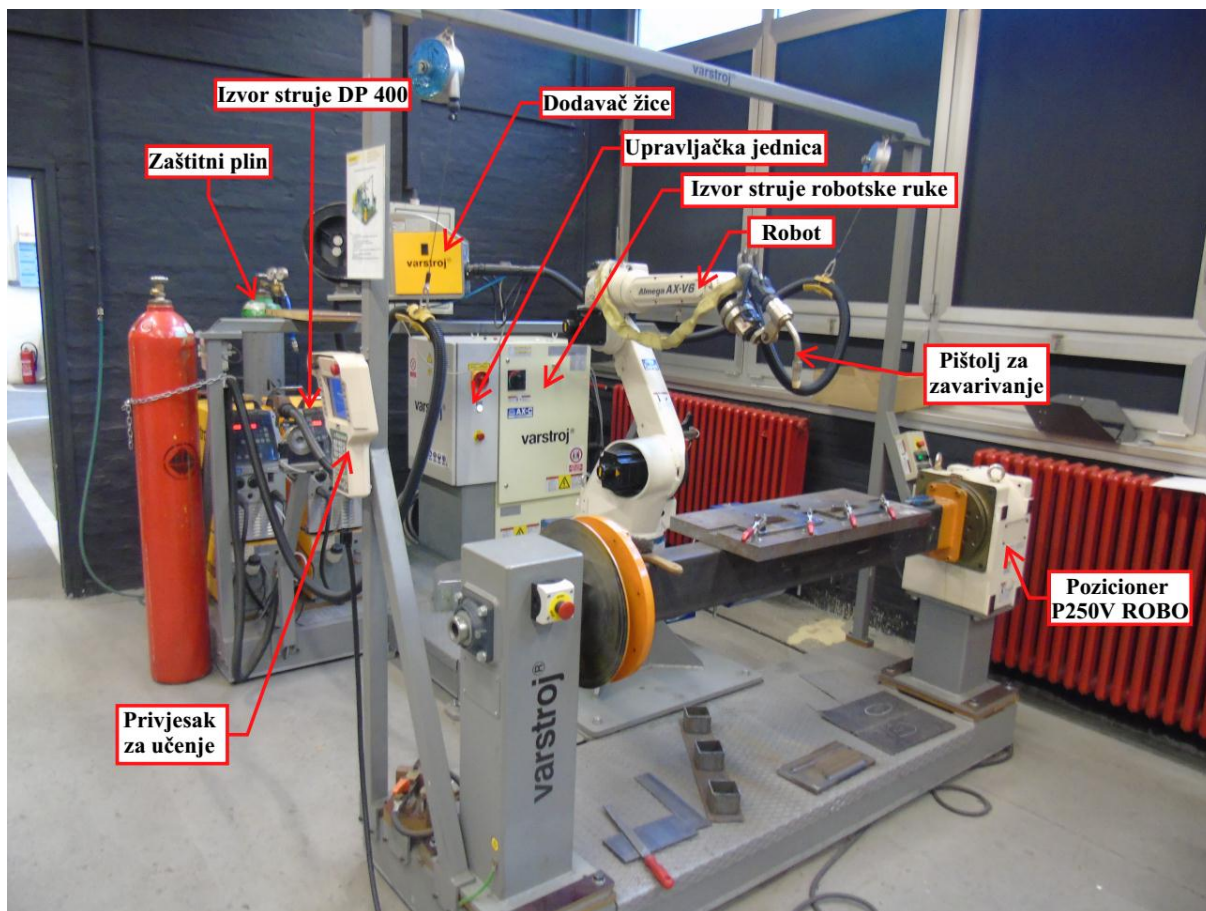
Priprema podloge, zavarivanje uzoraka i rezanje uzoraka provedeno je u Laboratoriju za zavarivanje. Primijenjeno je robotizirano MAG zavarivanje robotom Almega OTC AX V6. Zavarivanje je izvedeno na pločama od konstrukcijskog čelika S235JRG2. Napravljena su 3 zida svaki visine 350 mm s promjenjivim parametrima zavarivanja. Nakon zavarivanja, uzorci su izrezani i pripremljeni za mjerenje tvrdoće i analizu geometrije.

7.2 Oprema za zavarivanje

Zavarivanje zidova provedeno je robotskom stanicom Almega OTC AX V6 koja je prikazana slikom 39. Glavni dio robotske stanice je robot OTC Almega AX V6 koji se sastoji od 6 rotacijskih stupnjeva slobode gibanja. Privjeskom za učenje se izvršava on-line programiranje koje se sastoji od definiranja putanji gibanja i tehnoloških parametara zavarivanja. Uz prikazane dijelove, robotska stanica ima i "shock" senzor koji reagira u slučaju kolizije robota s objektima iz okoline, uređaj za čišćenje savnice, rezanje žice i nanošenje sredstva protiv naljepljivanja kapljica, elektrodučni senzor AX-AR, te izvor struje za TIG zavarivanje.

Važna komponenta robotske stanice je izvor struje tvrtke OTC Daihen DP 400 čije su karakteristike prikazane tablicom 8. Ovim izvorom struje moguće je MIG/MAG konvencionalno zavarivanje, MIG/MAG impulsno zavarivanje i REL zavarivanje obloženim elektrodama. Generiran program i početni položaj robota prije zavarivanja prikazan je slikom

40, pozicionirane i stegnute ploče prikazane su slikom 41, a slikom 42 prikazano je zavarivanje zida.



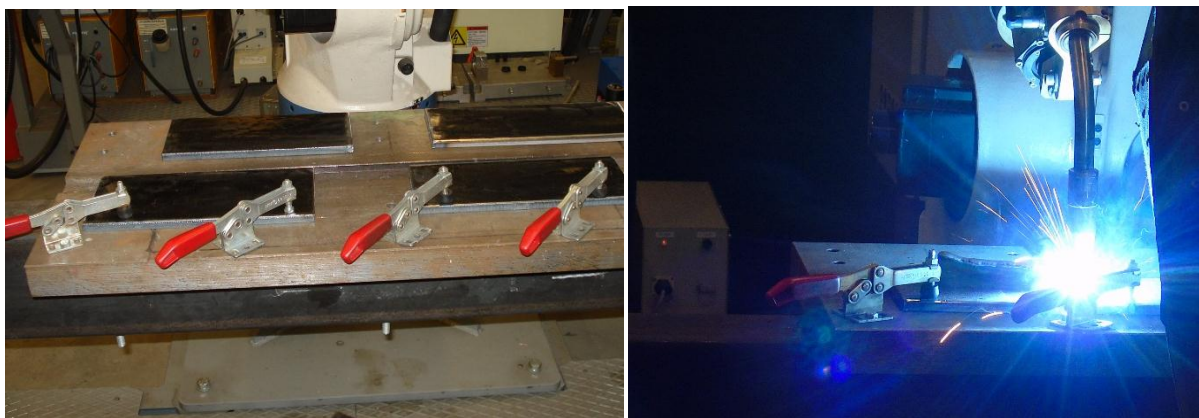
Slika 39: Robotska stanica Almega OTC AX V6

Tablica 8: Karakteristika izvora struje DP 400 [23]

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



Slika 40: Položaj pištolja za zavarivanje prije zavarivanja (lijevo) i generiran program (desno)



Slika 41: Pozicionirane i stegnute ploče prije zavarivanja

Slika 42: Zavarivanje zida

7.3 Podloga i dodatni materijal

Za podlogu je izabrana čelična ploča od konstrukcijskog čelika S235JRG2 (prema HRN EN 10025-2: 2004). Debljina izabranih podloga iznosila je 10 mm. Prije stezanja i pozicioniranja ploča na robota, provedeno je brušenje ploča ručnom brusilicom za skidanje površinskih nečistoća i oksida.

Za MAG zavarivanje korištena je puna žica EZ – SG 2 proizvođača Elektroda Zagreb (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. Kemijski sastav dodatnog materijala dan je tablicom 9, a mehanička svojstva su prikazana tablicom 10.

Tablica 9: Orijentacijski kemijski sastav dodatnog materijala EZ - SG2 [24]

Orijentacijski kemijski sastav [%]			
C	Mn	Si	Cu
0,06 – 0,13	1,4 – 1,6	0,7 – 1,0	≤ 0,3

Tablica 10: Mehanička svojstva čistog metala zavara [24]

Mehanička svojstva čistog metala zavara			
Rp _{0,2} [N/mm ²]	Rm [N/mm ²]	A ₅ [%]	KV (- 40 °C) [J]
> 430	500 – 600	> 22	≥ 47

Korišten je zaštitni plin M21 (oznaka M21 prema normi HRN EN ISO 14175: 2008) što znači 18 % CO₂ i 82 % Ar. Protok plina za sve prolaze je bio 18 L/min.

7.4 Parametri zavarivanja

Tijekom izrade zidova očitavani su parametri zavarivanja i mjerena je visina pomičnim mjerilom nakon svakog prolaza. Unesena toplina računa se prema sljedećem izrazu [25]:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v_z} \times \frac{60}{1000} \quad (3.)$$

Gdje je:

Q – unos topline u zavar [kJ/cm],

k – stupanj iskorištenja postupka zavarivanja (kod MAG postupka iznosi 0,8),

U – napon zavarivanja [V],

I – jakost struje zavarivanja [A],

v_z – brzina zavarivanja [cm/min],

Za izradu zida 1 korišten je prijenos metala kratkim spojevima, brzina zavarivanja bila je 50 cm/min, očitani napon je varirao između 17 i 19 V. Ostali parametri zavarivanja, visina nakon svakog prolaza i unesena toplina su prikazani tablicom 11.

Tablica 11: Parametri zavarivanja i visina zida 1 nakon svakog prolaza

Prolaz	Visina [mm]	Očitana jakost struje [A]	Očitani napon [V]	Brzina žice [m/min]	Unesena toplina [kJ/cm]
1.	1,5	154	18,6	3,0	2,75
2.	2,9	152	18,4	3,0	2,68
3.	3,9	156	17,8	3,0	2,67
4.	5,0	155	17,9	3,0	2,66
5.	6,6	151	17,9	3,0	2,59
6.	7,7	150	18,0	3,0	2,59
7.	8,7	133	18,2	2,8	2,32
8.	9,8	132	18,4	2,8	2,33
9.	11,2	136	17,9	2,8	2,34
10.	12,8	137	18,1	2,8	2,38
11.	13,9	120	18,0	2,6	2,07
12.	14,9	122	18,1	2,6	2,12
13.	16,4	127	17,9	2,6	2,18
14.	17,4	125	17,8	2,6	2,14
15.	18,7	124	17,7	2,6	2,11
16.	19,9	122	17,4	2,6	2,04
17.	21,5	123	17,5	2,6	2,07
18.	22,6	125	17,3	2,6	2,08
19.	23,9	124	17,5	2,6	2,08
20.	25,5	128	17,5	2,6	2,15
21.	26,6	126	17,3	2,6	2,09
22.	28,1	123	17,4	2,6	2,05
23.	29,6	126	17,6	2,6	2,13
24.	30,6	125	17,2	2,6	2,06
25.	31,7	124	17,4	2,6	2,07
26.	32,7	125	17,3	2,6	2,08
27.	34,4	122	17,6	2,6	2,06
28.	35,3	125	17,5	2,6	2,10

Zid 2 izrađen je impulsnim strujama, brzina zavarivanja je bila također 50 cm/min kao i kod zida 1, očitani napon je varirao između 23 i 25 V. Ostali parametri zavarivanja, visina nakon svakog prolaza i unesena toplina su prikazani tablicom 12.

Tablica 12: Parametri zavarivanja i visina zida 2 nakon svakog prolaza

Prolaz	Visina [mm]	Očitana jakost struje [A]	Očitani napon [V]	Brzina žice [m/min]	Unesena toplina [kJ/cm]
1.	2,4	157	24,8	5,0	3,74
2.	4,3	159	24,5	5,0	3,74
3.	5,6	160	24,6	5,0	3,78
4.	7,1	153	24,5	5,0	3,60
5.	8,6	152	24,7	5,0	3,60
6.	9,5	152	24,6	5,0	3,59
7.	10,9	137	23,6	4,5	3,10
8.	12,1	135	23,5	4,5	3,05
9.	13,4	135	23,6	4,5	3,06
10.	15,1	137	23,8	4,5	3,13
11.	16,7	126	23,2	4,2	2,81
12.	18,0	127	23,5	4,2	2,87
13.	19,7	130	23,1	4,2	2,88
14.	21,2	126	23,3	4,2	2,82
15.	22,6	124	23,4	4,2	2,79
16.	24,0	125	23,6	4,2	2,83
17.	25,5	124	23,3	4,2	2,77
18.	26,6	128	23,4	4,2	2,88
19.	27,9	127	23,3	4,2	2,84
20.	28,6	127	23,3	4,2	2,84
21.	30,4	127	23,4	4,2	2,85
22.	32,0	125	23,3	4,2	2,80
23.	33,5	126	23,4	4,2	2,83
24.	34,6	128	23,5	4,2	2,89

Zid 3 zavarivan je također impulsnim strujama kao i zid 2, brzina zavarivanja je bila 80 cm/min, očitani napon je varirao između 23 i 25 V. Ostali parametri zavarivanja, visina nakon svakog prolaza i unesena toplina su prikazani tablicom 13.

Tablica 13: Parametri zavarivanja i visina zida 3 nakon svakog prolaza

Prolaz	Visina [mm]	Očitana jakost struje [A]	Očitani napon [V]	Brzina žice [m/min]	Unesena toplina [kJ/cm]
1.	2,0	160	25,1	5,0	2,41
2.	3,4	159	24,3	5,0	2,32
3.	4,7	155	24,3	5,0	2,26
4.	5,8	151	24,2	5,0	2,19
5.	6,8	150	24,1	5,0	2,17
6.	8,1	150	24,3	5,0	2,19
7.	9,4	136	23,8	4,5	1,94
8.	10,6	135	23,8	4,5	1,93
9.	11,6	140	23,8	4,5	2,00
10.	12,8	133	23,9	4,5	1,91
11.	14,7	123	23,2	4,2	1,71
12.	15,9	126	23,2	4,2	1,75
13.	16,9	125	23,5	4,2	1,76
14.	17,7	125	23,3	4,2	1,75
15.	18,7	124	23,4	4,2	1,74
16.	19,9	124	23,5	4,2	1,75
17.	20,8	125	23,4	4,2	1,76
18.	22,1	124	23,4	4,2	1,74
19.	23,3	125	23,4	4,2	1,76
20.	24,1	124	23,5	4,2	1,75
21.	25,2	127	23,4	4,2	1,78
22.	26,2	124	23,6	4,2	1,76
23.	27,6	125	23,4	4,2	1,76
24.	28,9	123	23,3	4,2	1,72
25.	29,9	122	23,3	4,2	1,71
26.	30,9	125	23,4	4,2	1,76
27.	31,9	125	23,4	4,2	1,76
28.	33,1	127	23,5	4,2	1,79
29.	34,3	124	23,4	4,2	1,74
30.	35,6	126	23,5	4,2	1,78

Tijekom zavarivanja svih prolaza u svim stanjima pokusa nagib pištolja bio je neutralan. Slobodni kraj žice je bio 13 mm. Tijekom zavarivanja održavana je međuprolazna temperatura ispod 40 °C mjerena uređajem Fluke IR Thermometer koji mjeri temperaturu beskontaktno (slika 43).



Slika 43: Mjerenje temperature međuprolaza

Dobiveni zidovi prikazani su sljedećim slikama.



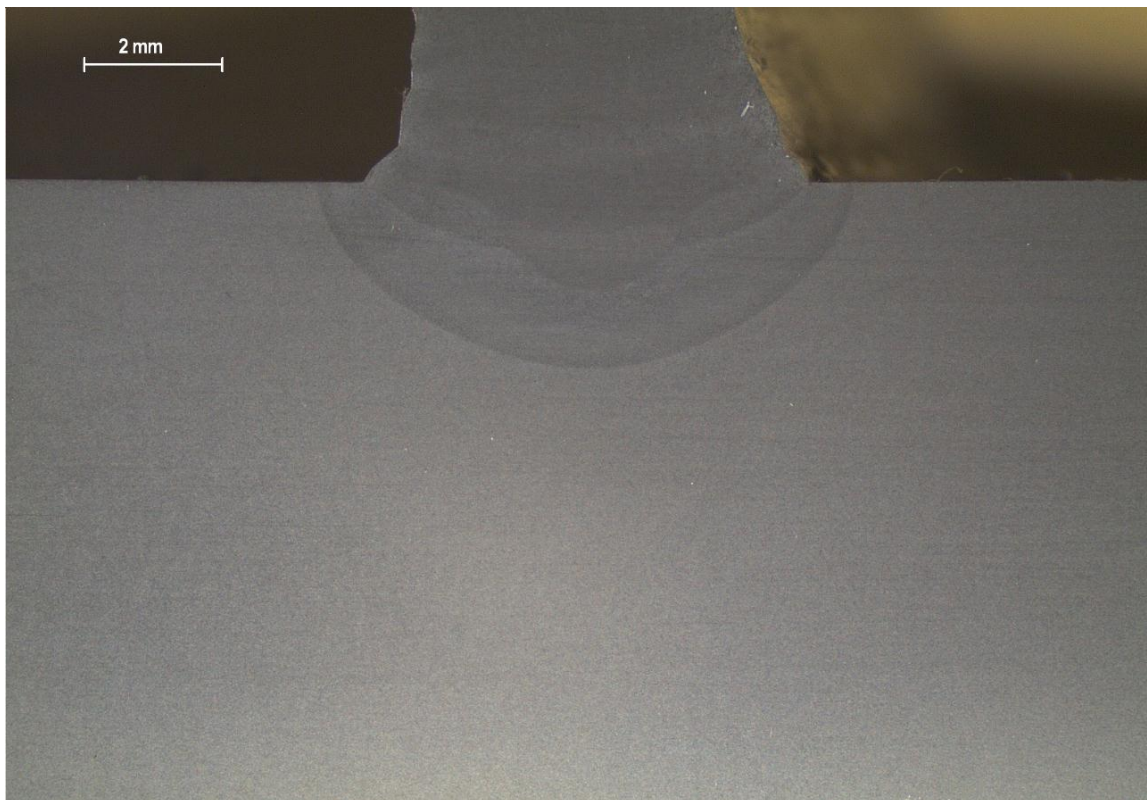
Slika 44: Zid 1

*Slika 45: Zid 2**Slika 46: Zid 3*

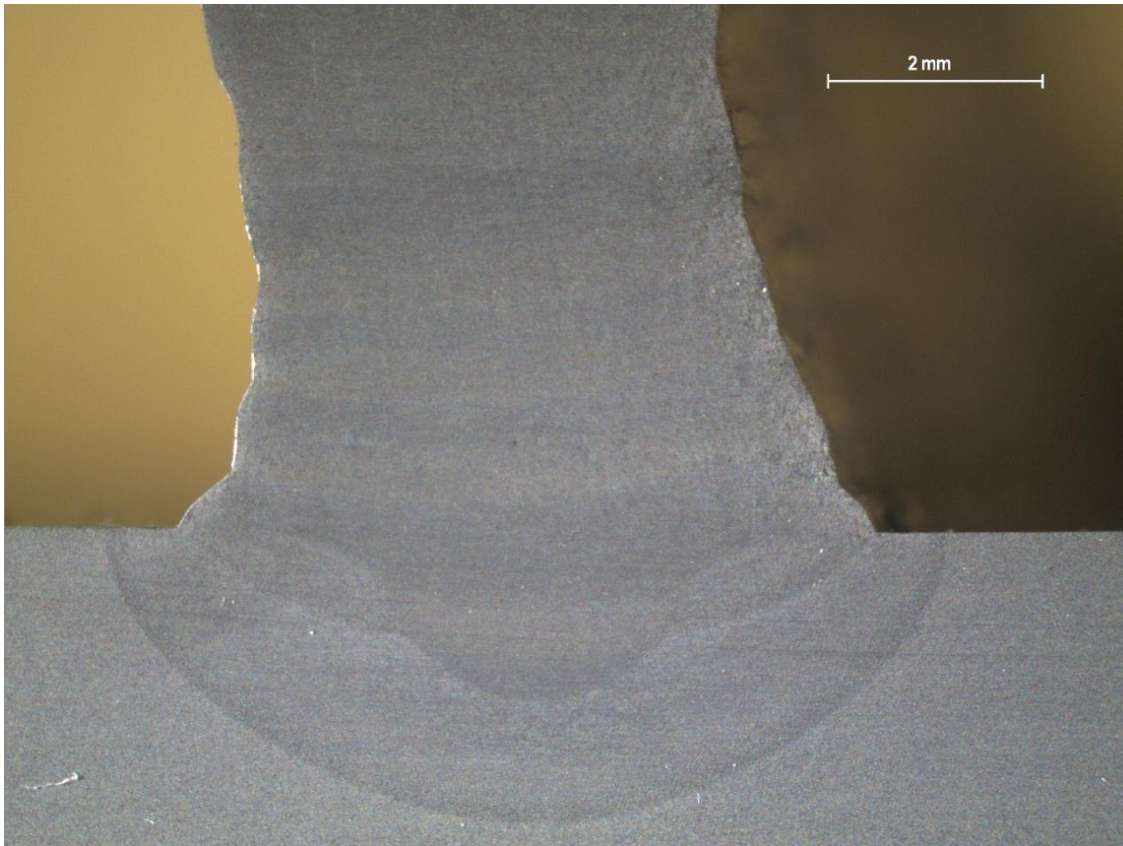
Kod svih zidova visina varira od najviše na početku do najniže na kraju zavarivanja. Na početku zbog uspostave električnog luka je struja nešto viša u odnosu na one prikazane u tablicama. Zbog više struje ima i više taline pa imamo i veću visinu zida. Na kraju zavarivanja dolazi do bježanje taline pa imamo nagli pad visine zidova. Zbog nestabilnosti taline kod zavarivanja 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.

7.5 Priprema i izrada ispitnih uzoraka

Nakon završetka zavarivanja sva tri zida, bilo je potrebno izraditi ispitne uzorke. Prvo su zidovi izrezani na tračnoj pili na segmente duljine 30 mm s tim da je početak rezanja bio na udaljenosti 50 mm od početka zida. Nakon rezanja slijedilo je ručno grubo brušenje brusnim papirom smanjujući veličinu zrnatosti i to redom: P120, P320 i P600. Daljnje fino brušenje uzoraka provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju, Fakulteta strojarstva i brodogradnje na uređaju Pohenix Alpha Grinder Polisher. Fino brušenje je provedeno brusnim papirom, a brzina brušenja je bila 300 okretaja/min za sve hrapavosti brusnog papira. Tijekom svih faza finog brušenja korištena je voda kao rashladno sredstvo. Primijenjeni su brusni papiri od najveće hrapavosti do najmanje i to sljedećim redom: P320, P500, P1000, P2000, P4000. Nakon finog brušenja uzorci su isprani vodom kao bi se uklonile eventualne nečistoće. Za daljnju makrostrukturnu analizu uzorci su nagriženi u 3 %-tnoj otopini nitala (3 % dušične kiseline i 97 % etilnog alkohola) u trajanju od 20 sekundi. Nagrizanje je provedeno u Laboratoriju za zaštitu materijala, Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Nakon toga, uzorci su snimljeni mikroskopom Leica MZ6. Mikroskop je povezan na računalo, a program Leica Application Suit omogućuje izradu slika.



Slika 47: Osnovni materijal uzorka 1 (povećanje 7,88 x)



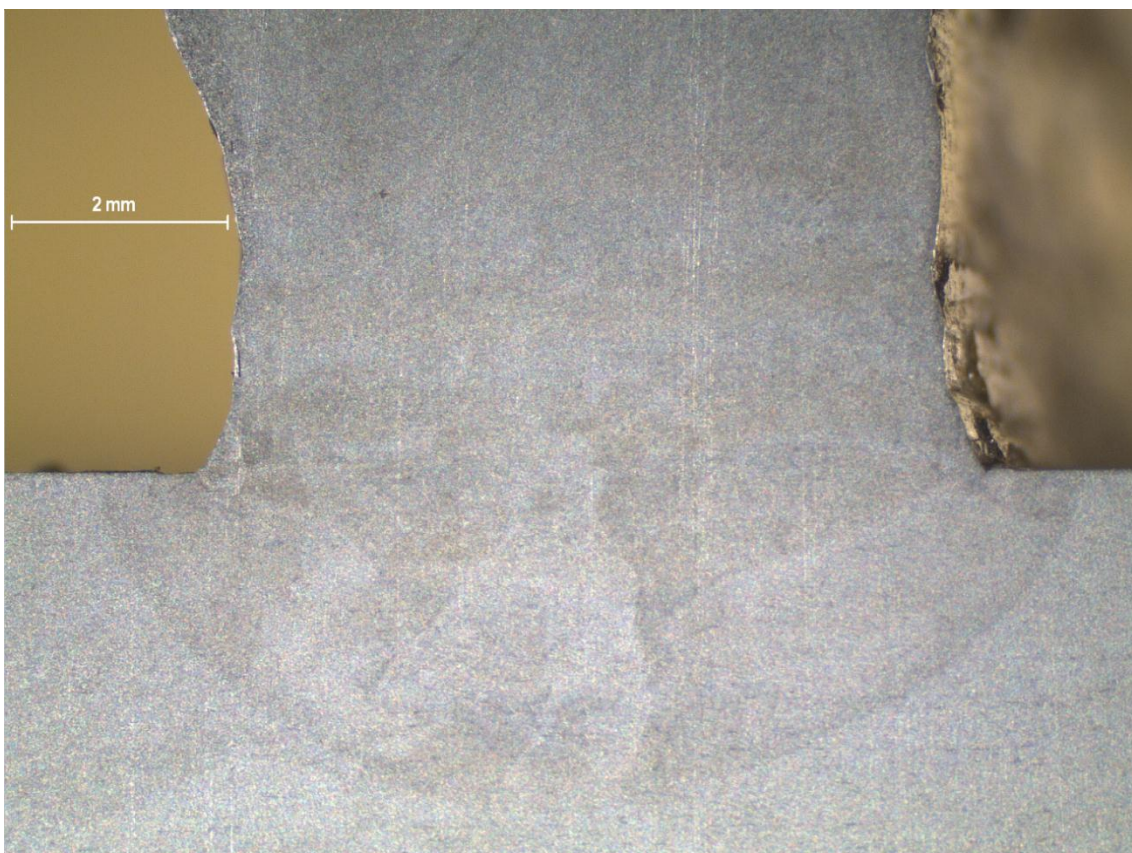
Slika 48: ZUT i početak zida uzorka 1 (povećanje 12,5 x)



Slika 49: Završni prolazi uzorka 1 (povećanje 12,5 x)



Slika 50: Osnovni materijal uzorka 2 (povećanje 7,88 x)



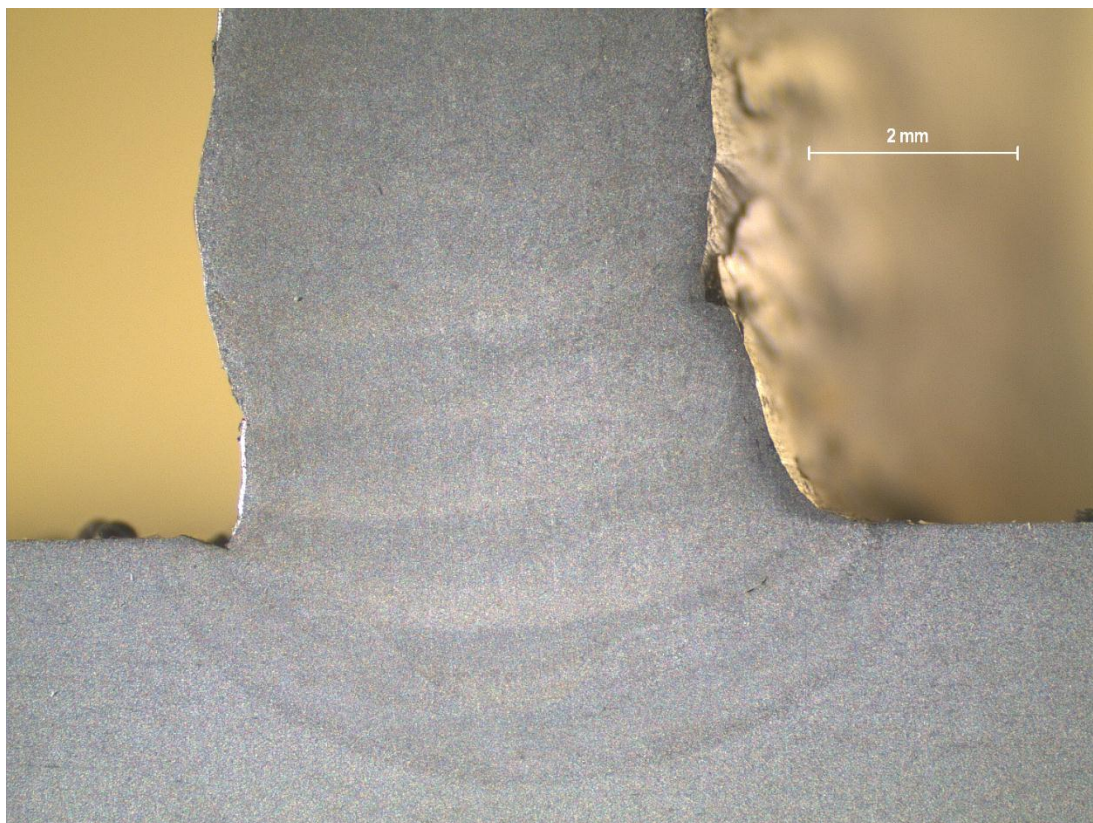
Slika 51: ZUT i početak zida uzorka 2 (povećanje 12,5 x)



Slika 52: Završni prolazi uzorka 2 (povećanje 12,5 x)



Slika 53: Osnovni materijal uzorka 3 (povećanje 7,88 x)



Slika 54: ZUT i početak zida uzorka 3 (povećanje 12,5 x)



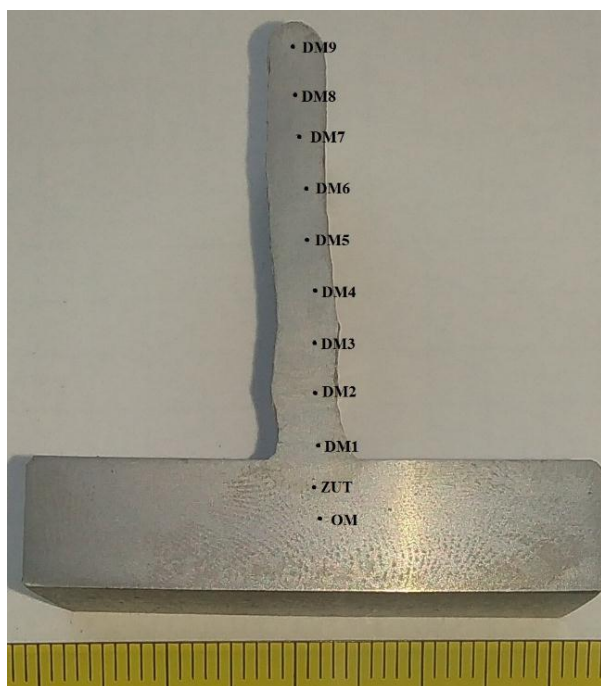
Slika 55: Završni prolazi uzorka 3 (povećanje 12,5 x)

Slike 47, 48, 49 prikazuju uzorak 1, slike 50, 51, 52 prikazuju uzorak 2 i slike 53, 54, 55 prikazuju uzorak 3. Slike 47, 50, 53 prikazuje osnovni materijal i nekoliko početnih prolaza. Slike 48, 51, 54 prikazuju početne prolaze. Iz navedenih slika se mogu vidjeti zone utjecaja topline na podlozi i nakon svakog prolaza. Završni prolazi prikazani su slikama 49, 52, 55. Na njima možemo vidjeti grubozrnatu mikrostrukturu, dok je kod ostalih prolaza sitnozrnatu strukturu zbog normalizacije koja se događa prilikom zavarivanja sljedećeg prolaza.

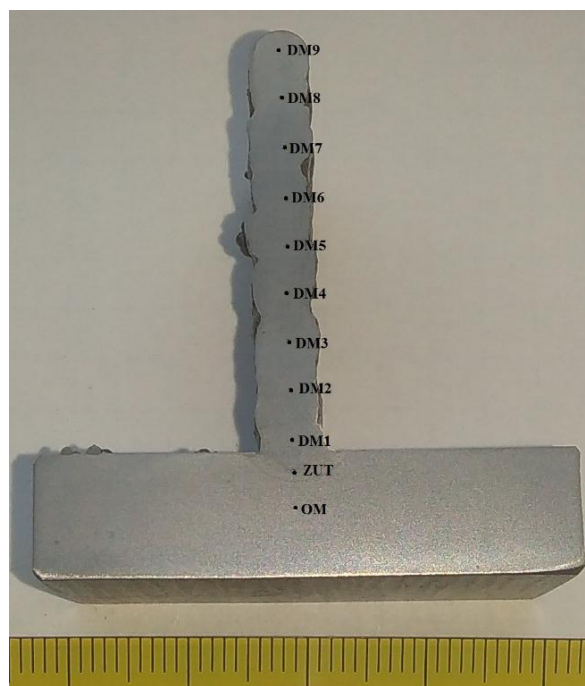
7.6 Mjerenje tvrdoće

U svrhu analize utjecaja parametara zavarivanja i načina prijenosa metala provedeno je ispitivanje tvrdoće HV 10 u osnovnom materijalu, zoni utjecaja topline i dodatnom materijalu po vertikalnoj liniji u razmacima od 4 mm. Na svakom uzorku provedeno je 11 mjerenja. Sila primijenjena za mjerenje tvrdoće iznosila je 98,04 N. Uređaj koji se koristio je tvrdomjer REICHTER proizveden u Njemačkoj 1977. godine. Raspored mjernih točaka tvrdoće dani su slikama 56, 57, 58. Tablica 14 prikazuje dobivene vrijednosti mjerenja za sva 3 uzorka. Dane oznake označuju zone u zavarenom spoju:

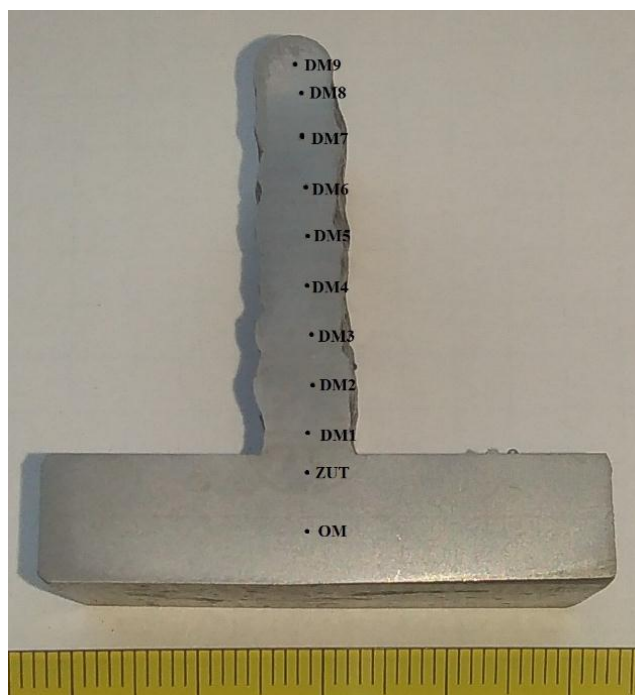
OM – osnovni materijal, ZUT – zona utjecaja topline, DM – dodatni materijal.



Slika 56: Područja mjerenja tvrdoće uzorka
1



Slika 57: Područja mjerenja tvrdoće uzorka
2

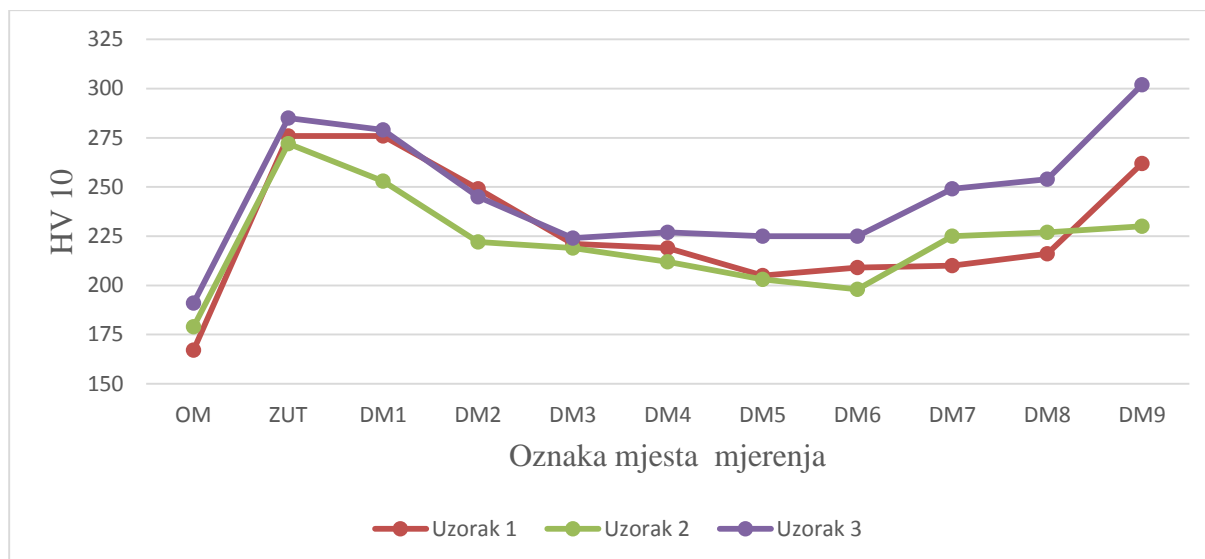


Slika 58: Područja mjerenja tvrdoće uzorka 3

Tablica 14: Izmjerene vrijednosti tvrdoće HV 10

Uzorak	OM	ZUT	DM1	DM2	DM3	DM4	DM5	DM6	DM7	DM8	DM9
1	167	276	276	249	221	219	205	209	210	216	262
2	179	272	253	222	219	212	203	198	225	227	230
3	191	285	279	245	224	227	225	225	249	254	302

Dobiveni podaci pokazuju da je najmanja vrijednost tvrdoće u osnovnom materijalu dok se najveće vrijednosti postižu u zonama utjecaja topline i u završnim prolazima dodatnog materijala. Razlog povišenja tvrdoće je različit intenzitet hlađenja u ZUT-u i završnog prolaza. Intenzitet hlađenja u ZUT-u je veći zbog boljeg odvođenja topline koji omogućuje podloga. Kod završnog prolaza također je veći intenzitet odvođenja topline jer se radi o malim debljina nataloženog materijala. Kod svih ostalih prolaza imamo naknadnu normalizaciju sljedećim prolazom pa su tvrdoće u dodatnom materijalu približno iste. Grafički prikaz tvrdoće svih uzoraka dan je slikom 59.

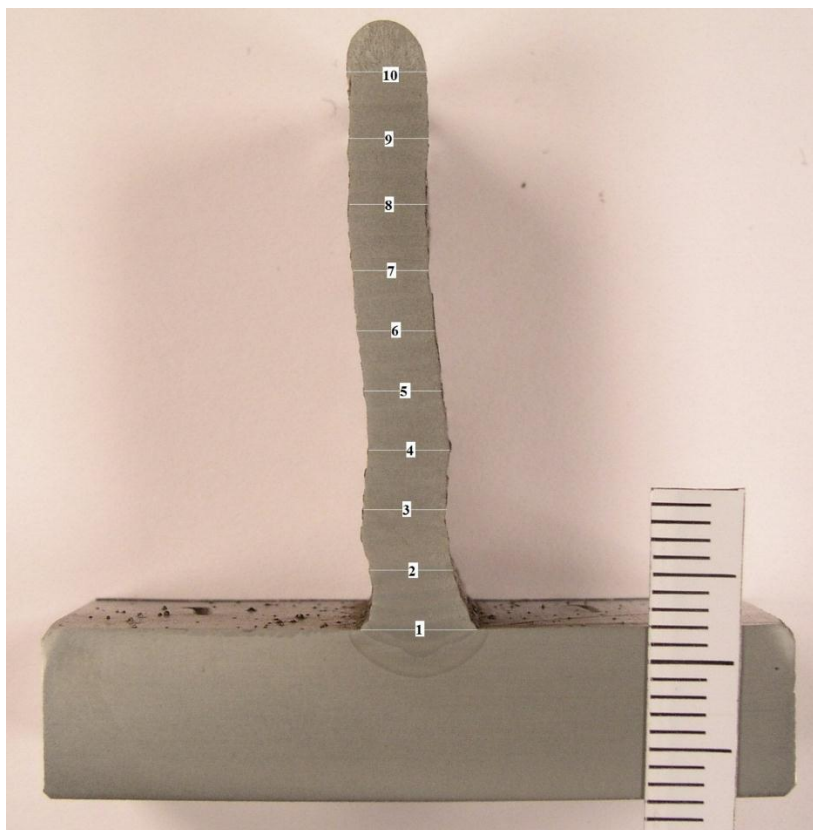


Slika 59: Tvrdoća HV 10 svih uzoraka

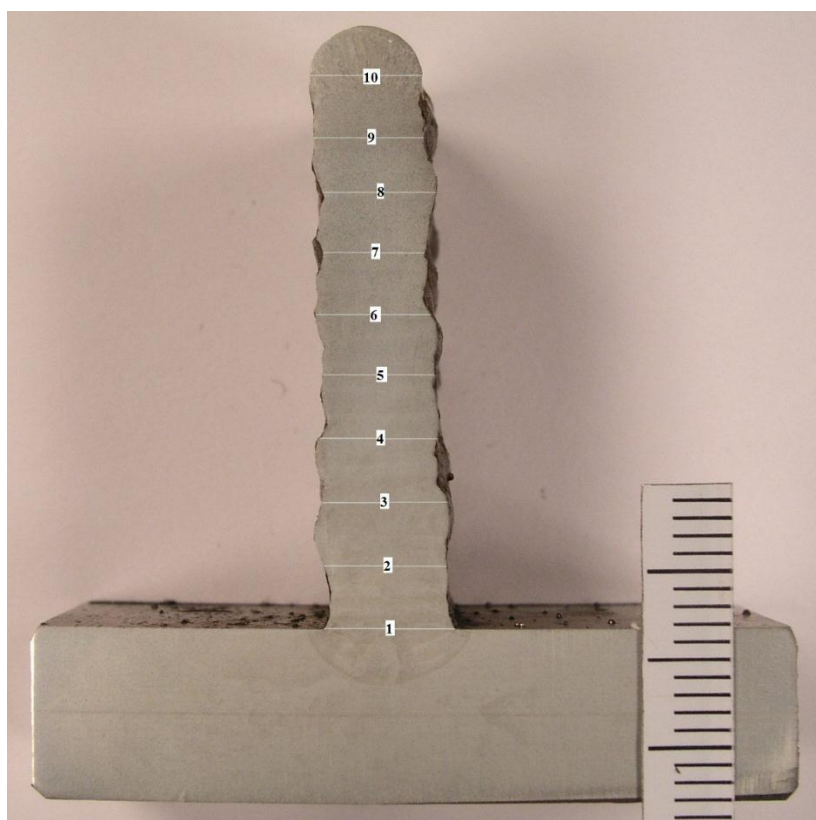
Slika pokazuje da se krivulja tvrdoće kod svih uzoraka ponaša po istom obrascu. Kod svih uzoraka najmanja tvrdoće je u osnovnom materijalu. U zoni utjecaja topline dolazi do značajnog porasta tvrdoće kod svih uzoraka. Nakon toga dolazi do pada tvrdoće u dodatnom materijalu zbog smanjenog unosa topline. Na kraju svih uzoraka dolazi ponovno do značajnog povišenja tvrdoće zbog grubozrnate strukture završnih prolaza. Usporedbom uzorka 2 i 3 koji su izvedeni istim načinom prijenosa materijala vidimo da je tvrdoća uzorka 3 veća od tvrdoće uzorka 2 u svim točkama mjerenja. Budući da je kod uzorka 3 manji unos topline, slijedi da s manjim unosom topline raste tvrdoća. Uspoređujući tvrdoću uzorka 1 i 2 vidimo da je utjecaj načina prijenosa metala nije značajan.

7.7 Mjerenje geometrije zidova

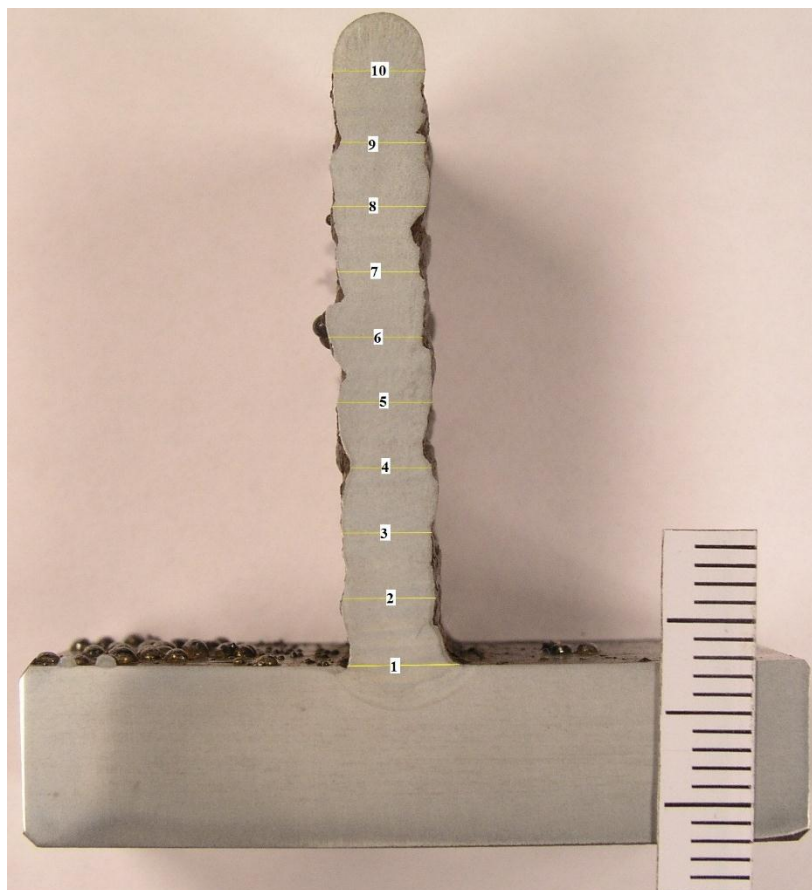
Pripremljeni uzorci su snimljeni pomoću fotoaparata Canon C – 5050 Zoom i podvrgnuti analizi geometrije zavara. Za analizu geometrije zavara koristio se program ImageJ s kojim je mjerena širina zidova na nekoliko mjesta i širina zone utjecaja topline na podlozi svakog uzorka. Princip rada programa ImageJ je pretvaranje piksela u odabrane mjerne jedinice. To se ostvaruje pomoću naredbe *Set Scale*. Prije samog mjerenja se definira odnos milimetara i piksela pomoću mjerne skale koja se nalazi na fotografiji zajedno s ispitnim uzorcima. Makroizbrusci uzoraka i područja mjerenja širine zidova prikazani su sljedećim slikama. Tablicom 15 prikazane su širine zidova.



Slika 60: Makroizbrusak uzorka 1 i područja mjerenja širine



Slika 61: Makroizbrusak uzorka 2 i područja mjerenja širine



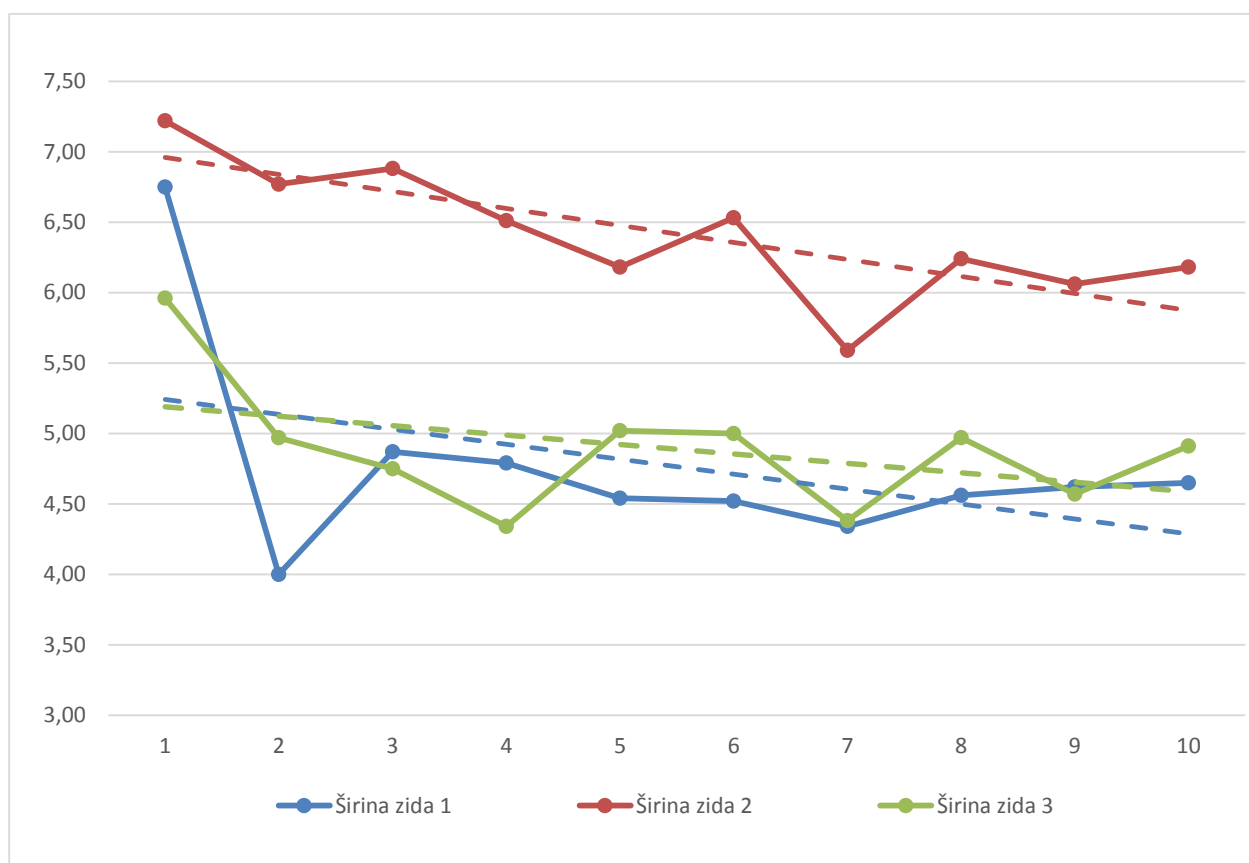
Slika 62: Makroizbrusak uzorka 3 i područja mjerenja širine

Tablica 15: Širine zida u određenom području

Područje mjerenja	Širina zida 1	Širina zida 2	Širina zida 3
1	6,75	7,22	5,96
2	4,00	6,77	4,97
3	4,87	6,88	4,75
4	4,79	6,51	4,34
5	4,54	6,18	5,02
6	4,52	6,53	5,00
7	4,34	5,59	4,38
8	4,56	6,24	4,97
9	4,62	6,06	4,57
10	4,65	6,18	4,91
\bar{x}	4,78	6,44	4,88
x_{min}	4,00	5,59	4,34

Iz tablice je vidljivo da je širina prvog prolaza kod svih uzorka veća u odnosu na ostatak zida. Prosječna širina zida uzorka 1 dobivenog kratkim spojevima je u odnosu na prosječnu širinu zida uzorka 2 dobivenog impulsnim lukom za iste parametre zavarivanja manja. To pokazuje da se kratkim spojevima može ostvariti veća stabilnost i kontrola taline prilikom zavarivanja. Uspoređujući širinu zida uzorka 2 i uzorka 3 koji su dobiveni impulsnim lukom, ali je brzina zavarivanja kod uzorka 3 bila veća, vidljivo je da kod uzorka 2 ima puno više taline pa dolazi do njenog razlijevanja tijekom zavarivanja čime dobivamo veću širinu zida. Širine zida uzorka 1 i 3 su približno jednakih vrijednosti iz čega zaključujemo da impulsni načina prijenosa omogućuje veće brzine zavarivanja. Minimalne vrijednosti ukazuju na efektivnu širinu zida koju bi mogli dobiti nakon strojne obrade.

Iz slike 63 je vidljivo da je kod svih uzoraka padajući linearni trend širine zida s porastom njegove visine.



Slika 63: Kretanje širine zida mjereno vertikalno prema gore

8 Zaključak

Od svih procesa aditivne proizvodnje, WAAM je primjenjiv za izradu srednje do velikih dijelova što može zahvaliti relativno visokoj količini depozita, neograničenom volumenu izrade, niskim BTF omjerima i niskim troškovima ulaganja u opremu i materijal. Glavni razlog razvoja WAAM je smanjenje gubitka materijala i brža izrada proizvoda. Zbog navedenog, WAAM postupak je u mogućnosti zamijeniti klasične metode izrade dijelova (kovanje, strojna obrada) u raznim industrijama posebice u avioindustriji.

Robotizirani MAG postupak zavarivanja za proizvodnju dijelova od ugljičnog čelika se može 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 dobivenog zida. Vizualnom kontrola zidova i makroizbrusaka uzorka ustanovljeno je da se kod zida dobivenog kratkim spojem dobiva ujednačenija geometrija zava za cijeloj vertikali zida te se kratkim spojevima mogu dobiti zidovi tankih stjenki. Kod zidova dobivenih impulsnim strujama, ustanovljena je neujednačenija geometrija zava te puno nestabilnija talina prilikom zavarivanja. 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 s impulsnim strujama dobijemo zid u manje 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 zavarivanja utječe na širinu zida. Što je veća brzina zavarivanja, manji je unos topline, manje je taline, pa manja je širina zida.

Mjerenjem tvrdoće ustanovljena je pojava očvrnuća u zoni utjecaja topline i u završnim prolazima. Razlog pojave povišene tvrdoće u završnim prolazima je grubozrnata struktura, dok je kod ostalog dijela zida prisutna sitnozrnata struktura zbog normalizacije koje se događa prilikom zavarivanja sloj po sloj. Promatrajući sva tri zida, vidljivo je da visina i širina zida varira te da je potrebna naknadna strojna obrada kako bi dobili primjenjiv proizvod.

Na temelju provedenog istraživanja i dobivenih rezultata preporuča se daljnja istraživanja usmjeriti na izradu dijelova od različitih metala kao što su aluminij i titan te odrediti optimalne parametre zavarivanja za proizvodnju. Također istraživanja treba usmjeriti prema primjeni valjanja nakon svakog prolaza kako bi se dobila ujednačenija geometrija zida i izradi dijelova složenije geometrije.

9 Literatura

- [1] ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies ASTM International, 2012.
- [2] Godec D., Šercer M.: Aditivna proizvodnja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [3] Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H.: Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, International Journal Advanced Manufacturing Technology, 465-481, 2015.
- [4] Weller C., Kleer R., Piller F. T., Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited, International Journal of Production Economics, 43-56, 2015.
- [5] Martina F., Williams S.: Wire+arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparison, Welding Engineering and Laser Processing Centre, Cranfield University, 2015.
- [6] Ding D., Pan Z., Cuiuri D., Li H.: Process Planning Strategy for Wire and Arc Additive Manufacturing, University of Wollongong, 2014.
- [7] Busachi A., Erkoyuncu A. J., Martina F., Ding J.: Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications, Elsevier, 48-53, 2015.
- [8] Williams S. W., Martina F., Addison A. C., Ding J., Pardal G., Colegrove P.: Wire + Arc Additive Manufacturing, Materials Science and Technology, 2016.
- [9] Williams S.: Large Scale Metal Wire + Arc Additive Manufacturing of Structural Engineering Parts, Welding Engineering And Laser Processing Centre, Cranfield University, 2016.
- [10] Ding J., Martina F.: Development of a laminar flow local shielding device for Wire + Arc Additive Manufacture, Journal of Materials Processing Technology, 2016.
- [11] Pilipović A.: Aditivne tehnologije za mala i srednja velika poduzeća, Additive Technologies for the SMEs, Zagreb, 2013.
- [12] Williams S.: WAAMMat, Welding Engineering And Laser Processing Centre, Cranfield University, 2016
- [13] Williams S.: Use of WAAM for manufacture of reconfigurable tooling with conformal features, Welding Engineering And Laser Processing Centre, Cranfield University, 2015.

- [14] Williams S.: Wire + Arc Additive Manufacture of non ferrous alloys – current status and material properties, Welding Engineering And Laser Processing Centre, Cranfield University, 2016.
- [15] Donoghue J., Antonysamy A.A., Martina F., Colegrove P.A., Williams S.W., Prangnell P.B.: The effectiveness of combining rolling deformation with WAAM on β -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V, Materials Characterization, 2016.
- [16] Pan Z., Cuiuri D., Roberts J., Li H.: Fabrication of Fe-FeAl Functionally Graded Material Using the Wire-Arc Manufacturing Process, Metallurgical and Materials Transactions B, 2015.
- [17] O'Brien, A. (Ed.): Welding handbook (9th edition) Volume 2, Welding processes and American Welding Society, Miami, USA, 2004.
- [18] Jurica M.: Utjecaj zaštitnog plina i načina prijenosa metala na svojstva zavarenog spoja čelika X80, Doktorski rad, 2015.
- [19] Kralj S., Kožuh Z., Andrić Š.: Zavarivački i srodni postupci, Priručnik, Zagreb, 2015.
- [20] ...http://www.lincolnelectric.com/assets/global/products/consumable_miggmawwires-superarc-superarc1-56/c4200.pdf.
- [21] Addison A., Ding J., Martina F., Lockett W., Williams S.: Manufacture of Complex Titanium Parts using Wire+Arc Additive Manufacture, Titanium Europe 2015, Birmingham, 2015.
- [22] Ding J., Martina F., Williams S.: Production of large metallic components by additive manufacture – issues and achievements, Welding Engineering And Laser Processing Centre, Cranfield University, 2015.
- [23] ...http://www.varstroj.si/welding-machines_ang/mig-mag-welding_ang/vs_eng/vps-4000-digit-eng.html.
- [24] ...<http://www.ezg.hr/proizvodi/wire/EZSG2.html>.
- [25] HRN EN 1011-1: 2009: Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 1. dio: Opće smjernice za elektrolučno zavarivanje, 2009.
- [26] ...<http://www.dtzi.hr/upload/pdf/5.%20SEMINAR/3.%20RAD.pdf>, dostupno 25.10.2016.
- [27] Hönnige J. R.: Control of Residual Stress, Distortion and Mechanical Properties in WAAM Ti64 Parts, Cranfield University, 2016.
- [28] The WAAMMat team: WAAM Technology, Welding Engineering And Laser Processing Centre, Cranfield University, 2015.