

Utjecaj omjera brzine žice i brzine zavarivanja na geometrijske značajke pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom

Ivanda, Lovro

Master's thesis / Diplomski rad

2019

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:444625>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](#)/[Imenovanje-Nekomercijalno-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-29**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Lovro Ivanda

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić, dipl. ing.

Student:

Lovro Ivanda

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se svom mentoru, izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću za svu pruženu pomoć i savjete tijekom izrade ovog rada.

Zahvaljujem asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech., na velikoj pomoći i strpljenju tijekom izrade diplomskog rada.

Također se zahvaljujem djelatnicima Laboratorija za zavarivanje na pruženoj pomoći i savjetima pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Naposljetku, zahvaljujem se obitelji i prijateljima na podršci, strpljenju i svemu što su učinili i još uvijek čine za mene.

Lovro Ivanda



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske radove studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment,
inženjerstvo materijala te mehatronika i robotika

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

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **LOVRO IVANDA** Mat. br.: **0035184196**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Utjecaj omjera brzine žice i brzine zavarivanja na geometrijske značajke pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Influence of wire feed speed and welding speed on geometrical characteristics in wire and arc additive manufacturing**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu rada potrebno je objasniti proces aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom te navesti prikladne postupke zavarivanja za takav proces. Opisati MAG postupak i detaljno navesti utjecaj pojedinih parametara zavarivanja na geometrijske značajke proizvoda pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom. Objasniti parametre teksture površine te opisati proces mjerenja i određivanja istih.

U eksperimentalnom dijelu aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom izraditi više uzoraka s različitim omjerima brzine zavarivanja i brzine žice. Prilikom izrade uzoraka potrebno je za svaki prolaz odrediti njegove osnovne geometrijske značajke. Na gotovim uzorcima ispitati parametre teksture površine te ispitati makrostrukturu i osnovna mehanička svojstva. U konačnici donijeti zaključke o utjecaju omjera brzine žice i brzine zavarivanja na geometrijske značajke proizvoda izrađenog aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom.

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

Zadatak zadan:
26. rujna 2019.

Rok predaje rada:
28. studenog 2019.

Predviđeni datum obrane:
04. prosinca 2019.
05. prosinca 2019.
06. prosinca 2019.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA.....	VIII
POPIS KRATICA	X
POPIS OZNAKA	XII
SAŽETAK.....	XIII
SUMMARY	XIV
1. UVOD.....	1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA	2
2.1. Definicija i opis AM.....	2
2.2. Počeci razvoja industrije AM	3
2.3. Faze procesa AM	5
2.4. Prednosti i nedostaci AM	7
3. ADITIVNA PROIZVODNJA ELEKTRIČNIM LUKOM I ŽICOM –WAAM.....	8
3.1. Aditivna proizvodnja metalnih materijala	8
3.2. WAAM postupak.....	9
3.3. Stvaranje i izgled WAAM zida	10
3.4. Prednosti i nedostaci WAAM postupka	11
3.5. Primjena WAAM postupka	12
4. POSTUPCI ZAVARIVANJA WAAM TEHNOLOGIJOM.....	14
4.1. MIG/MAG postupak zavarivanja	15
4.2. Oprema postupka MIG/MAG zavarivanja	17
4.2.1. Izvor struje za MIG/MAG zavarivanje	18
4.2.2. Sustav za dovod dodatnog materijala.....	19
4.2.3. Polikabel i pištolj za zavarivanje.....	22
4.2.4. Sustav za dovod zaštitnog plina	24
4.2.5. Upravljački sustav uređaja za MIG/MAG zavarivanje	24
4.2.6. Automatizirano MIG/MAG zavarivanje	25

4.2.7.	Izbor opreme	26
4.3.	Osnovni parametri MIG/MAG zavarivanja.....	27
4.4.	Načini prijenosa metala u električnom luku	29
4.4.1.	Prijenos metala kratkim spojevima	29
4.4.2.	Prijenos metala štrcajućim lukom	31
4.4.3.	Prijenos metala mješovitim lukom.....	32
4.4.4.	Prijenos metala impulsnim lukom (pulzirajući luk).....	33
5.	PARAMETRI TEKSTURE POVRŠINE	35
5.1.	Amplitudni parametri teksture površine	37
5.1.1.	Srednje kvadratno odstupanje površine, S_q	37
5.1.2.	Koeficijent asimetrije površine S_{sk}	38
5.1.3.	Koeficijent oštine površine S_{ku}	39
5.1.4.	Najveća visina vrha površine S_p	39
5.1.5.	Najveća dubina površine S_v	40
5.1.6.	Najveća visina neravnine površine S_z	41
5.1.7.	Srednje aritmetičko odstupanje površine S_a	41
6.	EKSPERIMENTALNI DIO	42
6.1.	Potrebna oprema i pribor	42
6.1.1.	Robotska stanica i oprema za manipulaciju	42
6.1.2.	Stroj za zavarivanje	44
6.1.3.	Dodatni materijal.....	45
6.1.4.	Zaštitni plin	45
6.2.	Određivanje parametara zavarivanja	46
6.3.	Parametri i osnovne geometrijske značajke zida	48
6.4.	Makroanaliza strukture	60
6.5.	Mjerenje tvrdoće.....	63

6.6.	Ispitivanje parametra teksture površine	65
6.7.	Analiza rezultata	72
6.7.1.	Analiza prirasta visine zida	72
6.7.2.	Analiza unosa topline	74
6.7.3.	Analiza BTF omjera	74
6.7.4.	Analiza tvrdoće	77
6.7.5.	Analiza parametara teksture površine	79
7.	ZAKLJUČAK.....	82
	LITERATURA.....	84

POPIS SLIKA

Slika 1.	Izrada tvorevine komplicirane geometrije postupkom aditivne proizvodnje [2].....	2
Slika 2.	Shema osnovnog principa rada stereolitografskih uređaja [5]	3
Slika 3.	Prvi komercijalno raspoloživi sustav za aditivnu proizvodnju SLA-1 [3]	4
Slika 4.	Uređaj Somos tvrtke DuPont [6].....	4
Slika 5.	Povijesni razvoj tehnologija [1]	5
Slika 6.	Faze izrade AM postupcima [7].....	6
Slika 7.	Tvorevina: a) 3D model, b) STL model (manji trokuti - glađi model), c) STL model (veći trokuti - grublji model) [8]	6
Slika 8.	Kvalitativno stanje aditivne proizvodnje metalnih dijelova u odnosu na uobičajene postupke proizvodnje [11]	8
Slika 9.	Dekorativni artikli izrađeni zavarivanjem sloj na sloj: a) posuda b) košara c) prikaz zida [12]	9
Slika 10.	Manipulacija kretanja: a) ABB robot za zavarivanje sa 6 SSG, b) CNC portalni stroj za zavarivanje [9]	10
Slika 11.	a) Prikaz ukupne i efektivne širine zida [13], b) Taloženje kapljice metala [15] ..	10
Slika 12.	Ramenjača: a) izrađena WAAM postupkom (1.2m Ti-6Al-4V) [18] , b) izrađena konvencionalnim postupcima [19].....	12
Slika 13.	Primjena: a) izrada brodskog propelera [20], b) optimizacija robotske ruke [21], c) MX3D industrijska robotska ruka (nehrđajući čelik) [21].....	13
Slika 14.	MX3D pješački most [21]: a) proces izrade, b) pogled iz zraka	13
Slika 15.	MX3D okviri bicikla: a) Arc Bike I (nehrđajući čelik), b) Arc Bike II (aluminij) [22]	13
Slika 16.	Izvedbe WAAM zavarivanja: a) MIG/MAG [24], b) shematski prikaz [23], c) plazma [24]	14
Slika 17.	Shematski prikazi: a) MIG/MAG uređaj[25], b) proces taljenja [26]	15
Slika 18.	Oprema za MIG/MAG zavarivanja [28].....	17
Slika 19.	Dijagram izlazne CV karakteristike izvora struje za zavarivanje [31]	18
Slika 20.	Dijelovi dodavača žice [30]	20

Slika 21.	Shema dodavanja žice guranjem [32]	20
Slika 22.	Shema dodavanja žice povlačenjem [32].....	20
Slika 23.	Shema dodavanja žice guranjem i povlačenjem [32]	21
Slika 24.	Usporedni prikaz tipova kotačića za izravnavanje žice [30]	21
Slika 25.	Presjek zakrivljenog pištolja za MIG/MAG zavarivanje [31]	23
Slika 26.	Presjek ravnog pištolja za MIG/MAG zavarivanje [27]	23
Slika 27.	Redukcijski ventil s mjerачem protoka [32]	24
Slika 28.	Automatizirani sustav za MIG/MAG zavarivanje [27]	25
Slika 29.	Ovisnost jakosti struje zavarivanja o promjeru i brzini žice [28]	27
Slika 30.	Slobodni kraj žice (L) i udaljenost sapnice od radnog komada (B) [26]	29
Slika 31.	Pojednostavljeni osciloskopski prikaz i shema pojava [31]	30
Slika 32.	Prijenos metala štrcajućim lukom [31]	31
Slika 33.	Shema prijenosa metala mješovitim lukom [27]	32
Slika 34.	Prijenos metala impulsnim lukom – promjena struje zavarivanja ovisno o vremenu [27].....	33
Slika 35.	Primjer profila površine [35]	36
Slika 36.	Primjer prostorne teksture površine [35]	36
Slika 37.	Srednje kvadratno odstupanje linije (R_q) [38].....	38
Slika 38.	Srednje kvadratno odstupanje površine (S_q) [39].....	38
Slika 39.	Primjeri koeficijenata asimetrije površine [37].....	38
Slika 40.	Primjeri koeficijenta oštine površine S_{ku} [37].....	39
Slika 41.	Najveća visina vrha linije (R_p) [38].....	39
Slika 42.	Najveća visina vrha površine (S_p) [39]	40
Slika 43.	Najveća dubina profila linije (R_v) [38].....	40
Slika 44.	Najveća dubine površine (S_v) [39]	40
Slika 45.	Najveća visina neravnine profila linije (R_z) [38]	41
Slika 46.	Najveća visina neravnine površine (S_z) [39].....	41
Slika 47.	Srednje aritmetičko odstupanje površine (S_a) [39]	41

Slika 48.	Robotska stanica Almega OTC AX V6	43
Slika 49.	Privjesak za programiranje robota	43
Slika 50.	EWM oprema: a) uređaj za zavarivanje Titan XQ 350 puls DW, b) uređaj za dovod žice Drive XQ EX MMA DGC [41]	44
Slika 51.	Zaštitni plin M21-ArC-18 (Ferrolin C18)	45
Slika 52.	Ispitivanje parametara: a) užli navari, b) deblji navari	46
Slika 53.	Stegnuta ploča za radni stol	49
Slika 54.	Izrađeni 1. zid	50
Slika 55.	Izrađeni 2., 3. i 4. zid	50
Slika 56.	Izrađeni 5., 6., 7. i 8. zid	50
Slika 57.	Priprema uzoraka: a) tračna pila GBS 185 Eco AutoCut, b) rezanje uzoraka	60
Slika 58.	Uzorci prije brušenja	60
Slika 59.	1. Skupina : a) uzorak 1.1, b) uzorak 1.2, c) uzorak 4.1, d) uzorak 4.2, e) uzorak 7.1, f) uzorak 7.2	61
Slika 60.	2. Skupina: a) uzorak 2.1, b) uzorak 2.2, c) uzorak 5.1, d) uzorak 5.2, e) uzorak 8.1, f) uzorak 8.2	61
Slika 61.	3. Skupina: a) uzorak 3.1, b) uzorak 3.2, c) uzorak 6.1, d) uzorak 6.2, e) uzorak 9.1, f) uzorak 9.2	62
Slika 62.	Mjerenje tvrdoće: a) tvrdomjer Reicherter, b) pozicije mjerenja	63
Slika 63.	Mjerenje tvrdoće: a) mikroskopski objektiv (200x), b) otisak dijamantnog indentora	64
Slika 64.	Skeniranje uzoraka: a) oprema, b) obojeni uzorci, c) razvijač (boja)	65
Slika 65.	Skenirane površine 1. zida: a) površina 1.1, b) površina 1.2	66
Slika 66.	Skenirane površine 2. zida: a) površina 2.1, b) površina 2.2	66
Slika 67.	Skenirane površine 3. zida: a) površina 3.1, b) površina 3.2	67
Slika 68.	Skenirane površine 4. zida: a) površina 4.1, b) površina 4.2	68
Slika 69.	Skenirane površine 5. zida: a) površina 5.1, b) površina 5.2	68
Slika 70.	Skenirane površine 6. zida: a) površina 6.1, b) površina 6.2	69
Slika 71.	Skenirane površine 7. zida: a) površina 7.1, b) površina 7.2	70

Slika 72.	Skenirane površine 8. zida: a) površina 8.1, b) površina 8.2	70
Slika 73.	Skenirane površine 9. zida: a) površina 9.1, b) površina 9.2	71
Slika 74.	Prosječan iznos prirasta visine po prolazu za svaki zid	72
Slika 75.	Cjelokupni prikaz rasta visine zidova	72
Slika 76.	Prikaz prosječne visine (h) po prolazu za zidove s omjerom 15.....	73
Slika 77.	Prikaz prosječne visine (h) po prolazu za zidove s omjerom 25.....	73
Slika 78.	Prikaz prosječne visine (h) po prolazu za zidove s omjerom 45.....	73
Slika 79.	Usporedba prosječne unesene topline u zid	74
Slika 80.	Obrađene slike: a) uzorak 1.1, b) uzorak 2.1, c) uzorak 3.1	75
Slika 81.	Obrađene slike: a) uzorak 4.1, b) uzorak 5.1, c) uzorak 6.1	75
Slika 82.	Obrađene slike: a) uzorak 7.1, b) uzorak 8.1, c) uzorak 9.1	76
Slika 83.	BTF omjer uzoraka	76
Slika 84.	Dijagram tvrdoće za skupinu zidova s omjerom 15.....	77
Slika 85.	Dijagram tvrdoće za skupinu zidova s omjerom 25.....	77
Slika 86.	Dijagram tvrdoće za skupinu zidova s omjerom 45.....	78
Slika 87.	Usporedba srednjeg kvadratnog odstupanja površine zidova (S_q).....	79
Slika 88.	Usporedba koeficijenta asimetrije površine zidova (S_{sk})	80
Slika 89.	Usporedba koeficijenta oštrote površine zidova (S_{ku}).....	80
Slika 90.	Usporedba najveće visine površine (S_z).....	81
Slika 91.	Usporedba srednjeg aritmetičkog odstupanja površine (S_a).....	81

POPIS TABLICA

Tablica 1.	Prednosti i nedostaci aditivne proizvodnje s tehnološkog i ekonomskog gledišta [10]	7
Tablica 2.	Greške u WAAM procesu [13]	11
Tablica 3.	Utjecaj induktiviteta na zavarivanje [30]	28
Tablica 4.	Prednosti i nedostaci prijenosa metala kratkim spojevima [31].....	30
Tablica 5.	Prednosti i nedostaci prijenosa metala kratkim spojevima [27].....	31
Tablica 6.	Prednosti i nedostaci prijenosa metala mješovitim lukom [31]	32
Tablica 7.	Prednosti i nedostaci prijenosa metala mješovitim lukom [31]	34
Tablica 8.	Amplitudni parametri teksture površine [36]	37
Tablica 9.	Tehničke karakteristike uređaja Titan XQ 350 puls DW [40]	44
Tablica 10.	Tehničke karakteristike sustava za dovod žice Drive XQ EX MMA DGC [41]45	
Tablica 11.	Kemijski sastav žice EZ- SG 2 [42]	45
Tablica 12.	Mehanička svojstva žice EZ- SG 2 [42].....	45
Tablica 13.	Pregled parametara zavarivanja	47
Tablica 14.	Izabrani parametri za izradu zidova	48
Tablica 15.	Značajke 1. zida.....	51
Tablica 16.	Značajke 2. zida.....	52
Tablica 17.	Značajke 3. zida.....	53
Tablica 18.	Značajke 4. zida.....	54
Tablica 19.	Značajke 5. zida.....	55
Tablica 20.	Značajke 6. zida.....	56
Tablica 21.	Značajke 7. zida.....	57
Tablica 22.	Značajke 8. zida.....	58
Tablica 23.	Značajke 9. zida.....	59
Tablica24.	Rezultati mjerenja tvrdoće HV10.....	64
Tablica 25.	Parametri teksture površine 1. zida	66
Tablica 26.	Parametri teksture površine 2. zida	67

Tablica 27. Parametri teksture površine 3. zida	67
Tablica 28. Parametri teksture površine 4. zida	68
Tablica 29. Parametri teksture površine 5. zida	69
Tablica 30. Parametri teksture površine 6. zida	69
Tablica 31. Parametri teksture površine 7. zida	70
Tablica 32. Parametri teksture površine 8. zida	71
Tablica 33. Parametri teksture površine 9. zida	71
Tablica 34. BTF omjer	76

POPIS KRATICA

Kratika	Opis kratice
2D	dvodimenzionalno
3D	trodimenzionalno
ABB	Asea Brown Boveri (švicarsko-švedska tvrtka sa sjedištem u Zürichu)
Al	aluminij
AC	izmjenična struja (engl. <i>Alternating Current</i>)
AM	aditivna proizvodnja (engl. <i>Additive Manufacturing</i>)
AMF	datoteka modela pri aditivnoj proizvodnji (engl. <i>Additive Manufacturing File</i>)
Ar	argon
ASTM	američko društvo za ispitivanje i materijale (engl. <i>American Society for Testing and Materials</i>)
BTF	omjer volumena (ili mase) sirovog materijala i gotovog proizvoda (engl. <i>Buy-to-fly</i>)
C	ugljik
CAD	konstruiranje pomoću računala (engl. <i>Computer Aided Design</i>)
CNC	računalno numeričko upravljanje (engl. <i>Computer Numerical Control</i>)
CMT	modificirani način prijenosa metala kratkim spojem (engl. <i>Cold Metal Transfer</i>)
Co ₂	ugljičkov dioksid
Cu	bakar
CV	ravna karakteristika aparata za zavarivanje (engl. <i>Constant Voltage</i>)
DxŠxV	duljina, širina i visina (dimenzije)
DDM	izravna digitalna izrada (engl. <i>Direct Digital Manufacturing</i>)
EPP	elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom
EWA	efektivna površina zida (engl. <i>Effective Wall Area</i>)
EWM	efektivna širina zida (engl. <i>Effective Wall Width</i>)
FDM	taložno očvršćivanje (engl. <i>Fused Deposition Modeling</i>)
GMAW	elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plina (engl. <i>Gas Metal Arc Welding</i>)
He	helij

ISO	međunarodna organizacija za normizaciju (engl. <i>International Organization for Standardization</i>)
LOM	proizvodnja laminiranih objekata (engl. <i>Laminated Object Manufacturing</i>)
MAG	elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (engl. <i>Metal Active Gas</i>)
MIG	elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (engl. <i>Metal Inert Gas</i>)
MIM	injekcijsko prešanje metalnih čestica (engl. <i>Metal Injection Molding</i>)
Mn	mangan
O ₂	kisik
PA	horizontalni položaj zavarivanja
REL	ručno elektrolučno zavarivanje
RM	brza (izravna) proizvodnja (engl. <i>Rapid Manufacturing</i>)
RP	brza izrada prototipova (engl. <i>Rapid Prototyping</i>)
RT	brza izrada alata i kalupa (engl. <i>Rapid Tooling</i>)
SAD	Sjedinjene Američke Države
SGC	tonografski postupak (engl. <i>Solid Ground Curing</i>)
Si	silicij
SL/SLA	stereolitografija (engl. <i>Stereolithography</i>)
SLS	selektivno lasersko srašćivanje (engl. <i>Selective Laser Sintering</i>)
SSG	stupanj slobode gibanja
STL	datoteka zapisana triangulacijom geometrije modela (engl. <i>Standard Tessellation Language</i>)
Ti	titan
TIG	elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom (engl. <i>Tungsten Inert Gas</i>)
TWW	ukupna širina zida (engl. <i>Total Wall Width</i>)
UV	ultravioletno zračenje (engl. <i>Ultraviolet</i>)
V	vanadij
WAAM	aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom (engl. <i>Wire and Arc Additive Manufacturing</i>)
ZUT	zona utjecaja topline

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A_5	%	istežljivost
B	mm	udaljenost sapnice od radnog komada
b	mm	širina
d	mm	promjer žice
h	mm	visina
HV	-	tvrdoća po Vickersu
I	A	jakost struje
k	-	koeficijent iskoristivosti postupka zavarivanja
KV	J	udarni rad loma po Charpyju (epruveta s V utorom)
L	mm	slobodni kraj žice
l	mm	duljina
m	kg	masa
Q	kJ/mm	unesena toplina
Q	l/min	protok plina
R_a	μm	srednje aritmetičko odstupanje – mjera hrapavosti površine
R_e	N/mm^2	granica razvlačenja
R_m	N/mm^2	vlačna čvrstoća
R_q	μm	srednje kvadratno odstupanje profila
R_p	μm	najveća visina vrha profila
R_v	μm	najveća dubina dola profila
R_z	μm	najveća visina neravnine (vrha i dola) profila
S_a	mm	srednje aritmetičko odstupanje površine
S_{ku}	-	koeficijent oštine površine
S_q	mm	srednje kvadratno odstupanje površine
S_p	mm	najveća visina vrha površine
S_{sk}	-	koeficijent asimetrije površine
S_v	mm	najveća udubina površine
S_z	mm	najveća visina neravnine (vrha i dola) površine
t	s	vrijeme
U	V	napon
$v_z (v_{zav})$	mm/s	brzina zavarivanja
$v_{\dot{z}}$	m/min	brzina (dodavanja) žice
ϑ	$^{\circ}\text{C}$	temperatura

SAŽETAK

Unutar diplomskog rada iznesena je tematika aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom. Rad je podijeljen na dva dijela, teorijski i eksperimentalni.

Teorijski dio rada obuhvaća osnovne teorijske postavke aditivne proizvodnje, različitih proizvodnih postupaka zavarivanja ovom tehnologijom te različitih parametara teksture površine.

Unutar eksperimentalnog dijela rada promatran je omjer brzine žice i brzine zavarivanja u odnosu na brzinu zavarivanja. Pomoću navedene tehnologije izrađeno je 9 zidova, od kojih su napravljeni uzorci na kojima su ispitivane njihove geometrijske značajke, makrostruktura te osnovna mehanička svojstva.

Naposljetku je dan zaključak.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom, MIG/MAG postupak zavarivanja, parametri teksture površine, brzina žice, brzina zavarivanja, geometrijske značajke

SUMMARY

Within the final thesis the topic of additive production with electric arc and wire is presented. The paper is divided into two parts, theoretical and experimental.

The theoretical part of the paper covers the basic theoretical assumptions of additive manufacturing, different welding production processes with this technology, and different surface texture parameters.

Within the experimental part of the paper, the ratio of wire feed speed and welding velocity to welding velocity was observed. With the mentioned technology 9 walls were made, of which samples were made and their geometrical characteristics, macrostructure and basic mechanical properties were examined.

Finally, a conclusion is given.

Key words: wire and arc additive manufacturing, GMAW, surface texture parameters, wire feed speed, welding speed, geometrical characteristics

1. UVOD

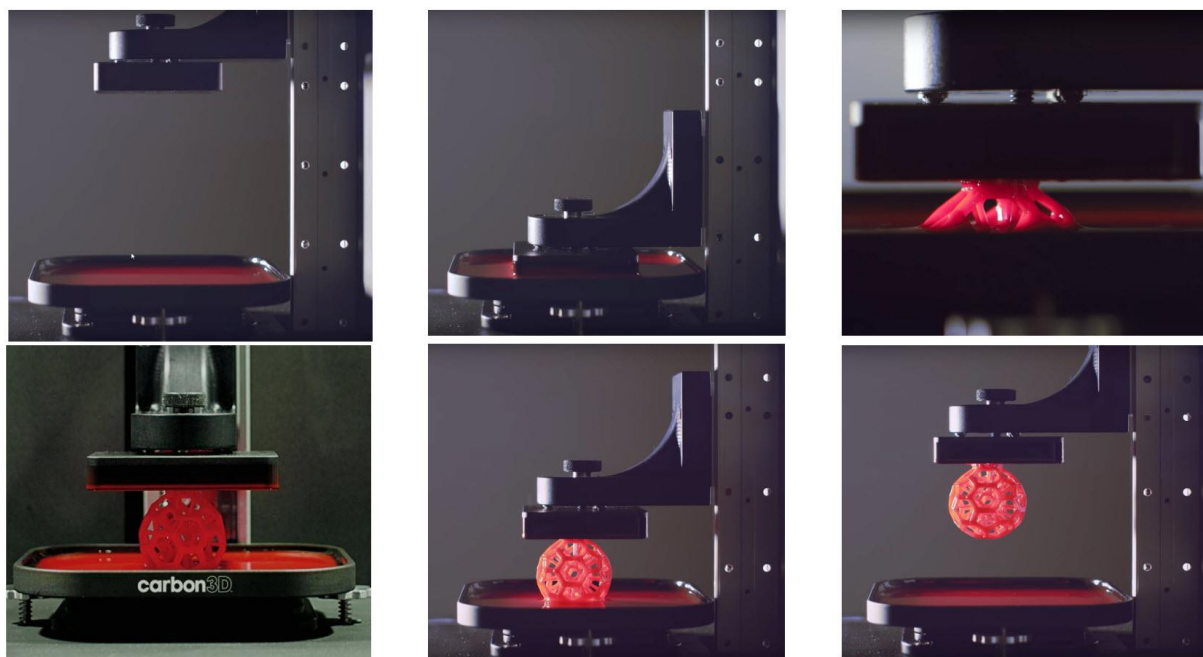
Današnje tržište je izuzetno dinamično upravo zbog globalizacije iz koje proizlazi velika ponuda i potražnja. Rezultat toga su sve složeniji i stroži zahtjevi u pogledu produktivnosti, kvalitete, razini fleksibilnosti pri razvoju i proizvodnji. Zbog toga svakom poduzeću postaje izazov proizvesti novi proizvod koji će prije svega na tržištu biti konkurentan uz što manje troškove i što kraće vrijeme razvoja i proizvodnje. Jedno od mogućih rješenja, za ovakve suvremene zahtjeve, krije se u aditivnoj proizvodnji (AM). Ova vrsta proizvodnje se u zadnjih 30-ak godina počela intenzivnije proučavati, razvijati i primjenjivati te se za nju može reći kako je obećavajuća alternativa za klasičnu proizvodnju. Glavna specifičnost na kojima se ovakvi postupci temelje je slojevito dodavanje materijala. Prednost slojevite proizvodnje je u tome što omogućuje izradu vrlo složenih geometrijskih oblika, kakve nije moguće proizvesti pomoću klasičnih proizvodnih tehnologija. Također, velika prednost je primjena ovih tehnologija u pojedinačnoj i maloserijskoj proizvodnji te je njihovom uporabom moguće proizvesti čitave sklopove višekomponentnih proizvoda u jednom proizvodnom ciklusu.

Od prve pojave aditivne proizvodnje i početka razvoja pa sve do danas razvilo se mnogo aditivnih postupaka proizvodnje. Za razliku od konvencionalnih postupaka proizvodnje aditivni postupci imaju puno bolji omjer iskoristivosti materijala. Većina postupaka aditivne proizvodnje sastoji se od izvora topline, dodatnog materijala i nekog sustava koji omogućuje kretanje i manipulaciju. Činjenica je kako većina aditivnih postupaka koristi polimerne materijale ili metal u praškastom obliku, a njihova primjena često rezultira proizvodima koji imaju razne greške (poroznost, šupljine, slaba mehanička svojstva) i nisu potpuno funkcionalni. Razvitak WAAM (engl. *Wire and Arc Additive Manufacturing*) tehnologije nudi rješenja za većinu problema s kojima se suočavaju ostale AM tehnologije.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

2.1. Definicija i opis AM

Aditivna proizvodnja (engl. *Additive Manufacturing* – AM) je proces proizvodnje koji se temelji na spajanju materijala koji se dodaje sloj po sloj u svrhu izrade određene komponente, prototipa ili gotovog proizvoda. Specifičnost ove proizvodnje je stvaranje tvorevine vrlo složene i komplicirane geometrije (Slika 1.) pomoću računalnog 3D modela u relativno kratkom vremenu. Upravo zbog komplicirane geometrije aditivna proizvodnja ima prednost nad konvencionalnim načinima proizvodnje jer je proizvodnja ponekad teška, dugotrajna, neučinkovita te čak u nekim situacijama nemoguća. Također, glavna prednost aditivne proizvodnje je što ne zahtijeva planiranje toka procesa, izradu kalupa, specifičnu opremu za rad s materijalima i transport između radnih mjesta [1].



Slika 1. Izrada tvorevine komplicirane geometrije postupkom aditivne proizvodnje [2]

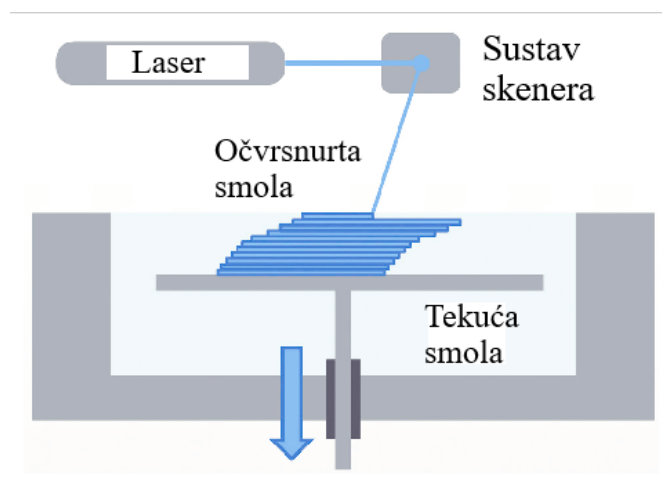
Etapa razvoja suvremenih aditivnih postupaka započela je 80-tih godina prošlog stoljeća i prošla je nekoliko faza koje su utjecale na primjenu, a time i na terminologiju. Na samome početku etape razvoja funkcija aditivne proizvodnje bila je zamišljena kao postupak brze izrade prototipova (engl. *Rapid Prototyping* – RP), a proizvodi načinjeni tim postupcima uglavnom su se koristili za unaprjeđivanje procesa razvoja proizvoda. Sljedeća faza u razvoju bila je primjena postupaka u svrhe brze izrade čitavih alata, kalupa i njihovih ključnih elemenata (engl. *Rapid Tooling* – RT). Ovi postupci aditivne proizvodnje su se bazirali na izradi polimernih,

keramičkih ili metalnih alata i kalupa koji su zbog načela slojevite gradnje omogućili bitno skraćenje vremena proizvodnje geometrijski najzahtjevnijih dijelova alata i kalupa. Na daljnji razvoj aditivnih postupaka utjecao je razvoj materijala koji su usmjerili primjenu aditivne slojevite proizvodnje prema izravnoj maloserijskoj ili pojedinačnoj proizvodnji gotovih proizvoda (engl. *Rapid Manufacturing* – RM, *Direct Digital Manufacturing* – DDM). Specifičnost ovih postupaka je proizvodnja bez potrebe za dodatnim alatima i upravo je to razlog njihovog korištenja u svrhe pojedinačne ili maloserijske proizvodnje [2].

Budući da je aditivna proizvodnja relativno novo područje koje brzo napreduje s obzirom na pojavu naprednih tehnologija i razvitak industrije, ipak se tek 2009. godine definirao pojam koji je danas poznat kao aditivna proizvodnja. Za definiciju pojma i ostale terminologije zaslužna je međunarodna komisija ASTM (engl. *American Society for Testing and Materials*) *International Committee F42*. Njihova definicija glasi: „Aditivna proizvodnja je proces povezivanja materijala pri pravljenju objekata izravno iz 3D računalnih modela, najčešće sloj na sloj, što je suprotno suptraktivnom načinu proizvodnje“ [3].

2.2. Počeci razvoja industrije AM

Razvoj postupaka aditivne proizvodnje počinje 1987. godine pojavom stereolitografije (engl. *Stereolithography* – SL/SLA), postupka razvijenog u tvrtki *3D Systems* (SAD). Postupak je omogućavao očvršćivanje kapljevitog fotopolimera osjetljivog na djelovanje ultraljubičastog zračenja u tankim slojevima pomoću lasera (Slika 2.). Prvi komercijalno raspoloživi sustav za aditivnu proizvodnju bio je *SLA-1* (Slika 3.), preteča nekad vrlo popularnog uređaja *SLA 250*. Poslije je tvrtka plasirala sustav *Viper SLA*, koji je zamijenio *SLA 250* [3].

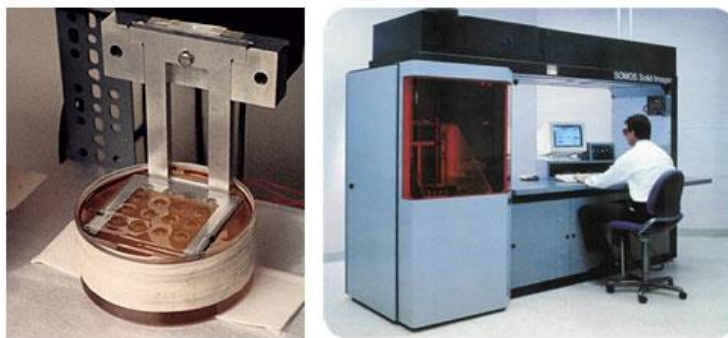


Slika 2. Shema osnovnog principa rada stereolitografskih uređaja [5]



Slika 3. Prvi komercijalno raspoloživi sustav za aditivnu proizvodnju SLA-1 [3]

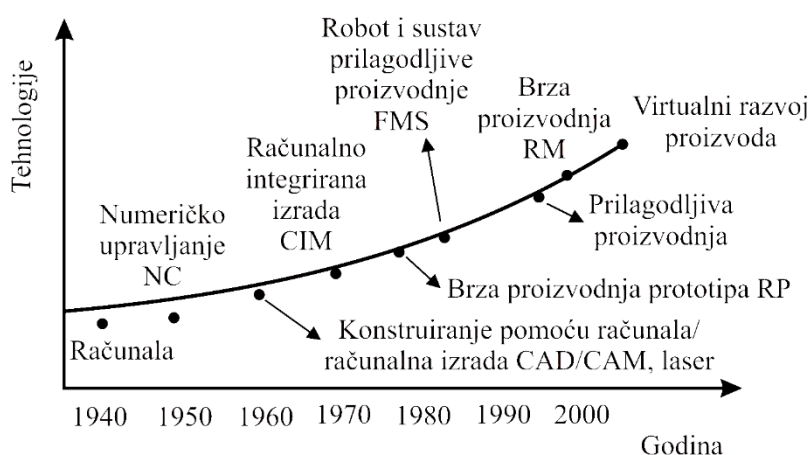
Godine 1988. tvrtke *3D Systems* i *Ciba-Geigy* udružile su se u razvoj SL materijala i ta je suradnja urodila komercijalizacijom prve generacije kapljevutih fotopolimera na osnovi akrila. Nadalje, iste je godine tvrtka *DuPont* razvila stereolitografski uređaj *Somos* (Slika 4.) i odgovarajuće fotopolimerne materijale. Nakon komercijalizacije SL postupaka u SAD-u, japanske tvrtke *NTT Dana CMET* i *Sony/D-MEC* komercijalizirale su svoje inačice stereolitografije tijekom 1988. i 1989. godine. Tvrtka *NTT Data CMET* (sada dio *Teijin Seiki*) nazvala je svoj sustav *Solid Object Ultraviolet Plotter (SOUP)*, dok je *Sony/D-MEC* (sada *D-MEC*) svoj sustav nazvao *Solid Creation System (SCS)* [3].



Slika 4. Uređaj Somos tvrtke DuPont [6]

Tijekom 1991. godine komercijalizirana su još tri nova postupka aditivne proizvodnje. To su: postupak očvršćivanja taloženjem (engl. *Fused Deposition Modeling – FDM*), koja je razvila tvrtka *Stratasys* (SAD), tonografski postupak (engl. *Solid Ground Curing - SGC*) tvrtke *Cubital* (SAD) i postupak laminiranja (engl. *Laminated Object Manufacturing – LOM*) tvrtke *Helsys* (SAD). Pri FDM postupku plastomerni se materijal ekstrudira i nanosi s pomoću mlaznice na željena mjesta sloj po sloj praveći proizvod. SGC postupak temelji se na uporabi kapljevutih polimera osjetljivih na UV zračenje. Čitav sloj proizvoda očvršćuje odjednom propuštanjem UV zraka kroz latentnu masku načinjenu s pomoću elektrostatičkog tonera na staklenoj ploči.

Pri LOM postupku riječ je o povezivanju i rezanju materijala u obliku folija ili tankih ploča s pomoću računalno upravljane laserske zrake. Tijekom 1992. godine tvrtke *DTM* i *Teijin Seiki* na tržište izbacuju prvi sustavi za selektivno lasersko srašćivanje (engl. *Selective Laser Sintering* – SLS). Pri SLS postupku toplina laserskog zračenja rabi se za taljenje praškastih materijala [3]. Nastavlja se proizvodnja različitih materijala, zatim razvoj strojeva i aditivnih postupaka raznih tvrtki. U nastavku slijedi dijagramski prikaz povijesnog razvoja proizvodnih tehnologija (Slika 5.) koje su znatno utjecale na daljnji razvoj i proizvodnju. Dakle, na ordinati su obilježena imena tehnologija, dok je na apscisi označena godina određene tehnologije [1].

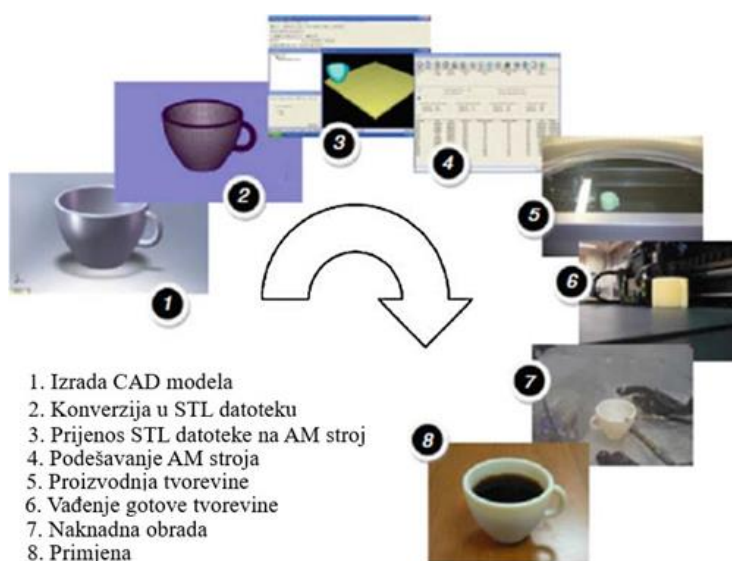


Slika 5. Povijesni razvoj tehnologija [1]

2.3. Faze procesa AM

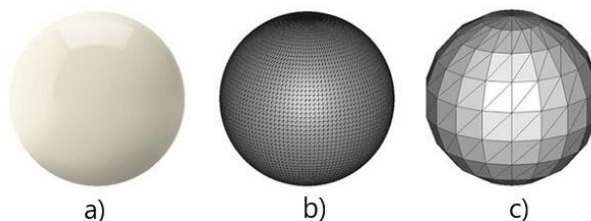
Općenito svaki novi razvoj proizvoda ne može se dogoditi preko noći te je iz tog razloga potrebna dobra organizacija i tehnika upravljanja procesa. Polazeći od tih činjenica, osnovni proces aditivne proizvodnje razrađen je od sljedećih faza [7]:

1. Izrada CAD modela
2. Konverzija CAD modela u STL datoteku
3. Prijenos STL datoteke na AM stroj
4. Podešavanje parametara AM stroja
5. Proizvodnja tvorevine
6. Vađenje gotove tvorevine
7. Naknadna obrada (ako je potrebna)
8. Primjena



Slika 6. Faze izrade AM postupcima [7]

Svaki proizvodni proces kreće od razvoja ideje, odnosno kako će izgledati i funkcionirati novi proizvod. Ideju je moguće predočiti tekstualno, skicama, reprezentativnim modelom i drugim oblicima, međutim ukoliko se koriste postupci aditivne proizvodnje potrebno je konceptualizirati opis ideje kao digitalni 3D CAD model koji se izrađuje primjenom određenog CAD programskog sustava. Gotovo svi postupci aditivne proizvodnje koriste STL datoteku (engl. *Standard Tessellation Language*) koja predmet pokazuje kao mrežu povezanih trokuta, a dobiva se iz prethodno kreiranog 3D modela. STL datoteka sadrži informacije o vanjskim površinama tijela te je pogodna za obradu u programskim sustavima kojima se definira proces izrade. STL datoteka ne podržava informacije kao što su dimenzije, boje, mjerne jedinice i materijal. Ovakva ograničenost dovela je do stvaranja nove datoteke koja je poznata pod akronimom AMF (engl. *Additive Manufacturing File*) koja uz STL postaje standard 2009. g. Dakle, model koji je kreiran kao AMF datoteka predstavlja jedan ili više objekata raspoređenih u vektore. Svaki objekt je opisan kao grupa ne preklapljenih volumena koji su opisani kao mreža trokuta koja povezuje grupu točaka. Prednost AMF datoteke jest mogućnost prikazivanja podataka o dimenzijama, vrsti materijala, boji, teksturi površine i ostale korisne značajke [7].



Slika 7. Tvorevina: a) 3D model, b) STL model (manji trokuti - gladi model), c) STL model (veći trokuti - grublji model) [8]

2.4. Prednosti i nedostaci AM

Aditivna proizvodnja je tehnologija koja pruža značajne strateške prednosti. Naime, to je tehnologija koja obećava smanjenje troškova proizvodnje, a to postiže reduciranjem rasipanja materijala i općenito vremena proizvodnje. Također, omogućava konstrukcijsku slobodu što u nekim situacijama može rezultirati uštedom mase određenih proizvoda. Zatim, mogućnost izrade složene geometrije smanjuje broj dijelova u proizvodu što olakšava proizvodnju. Niti jedan proizvodni proces nije savršen pa tako i aditivna proizvodnja. Bitan nedostatak koji utječe na kvalitetu i dimenzije proizvoda je kvaliteta površine. Tablica 1. prikazuje prednosti i nedostatke aditivne proizvodnje s tehnološkog i ekonomskog gledišta [9], [10].

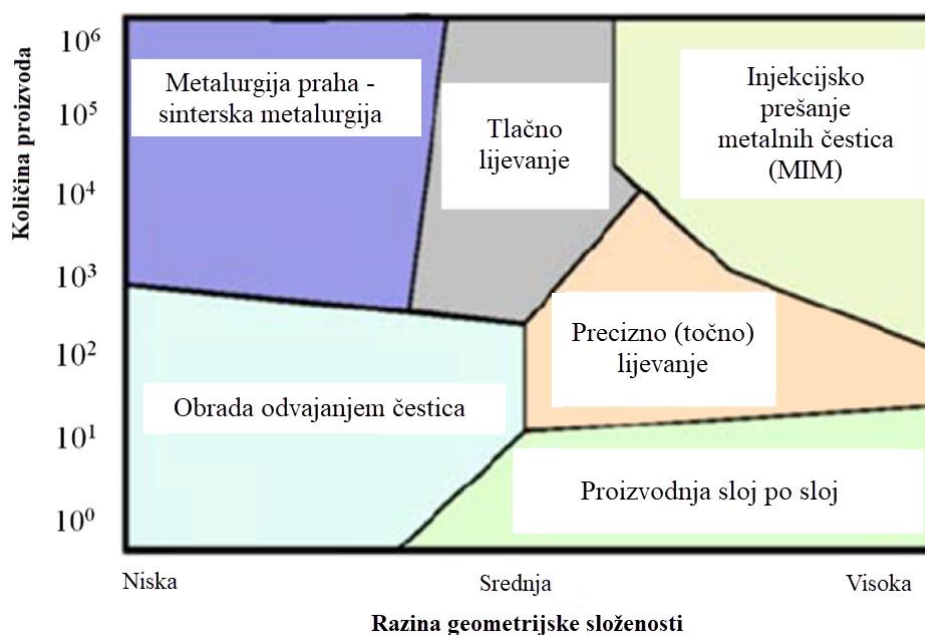
Tablica 1. Prednosti i nedostaci aditivne proizvodnje s tehnološkog i ekonomskog gledišta [10]

	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 redoslijedom.	Potrebno je veliko iskustvo i kvalificirana radna snaga.
	Manji gubitak materijala.	Manjak alata i smjernica koče kako u potpunosti iskoristiti AM postupke.
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.

3. ADITIVNA PROIZVODNJA ELEKTRIČNIM LUKOM I ŽICOM – WAAM

3.1. Aditivna proizvodnja metalnih materijala

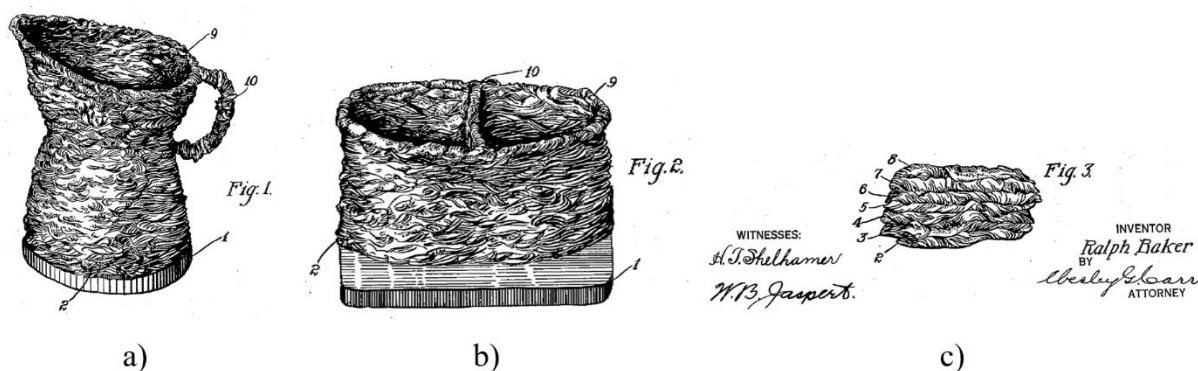
U proteklih 30 godina postojanja aditivna proizvodnja se sve više počela primjenjivati te još uvijek iz dana u dan privlači sve veću pažnju u mnogim granama industrije, a posebno za izradu dijelova i prototipova. Izvorne AM metode poput stereolitografije i 3D tiskanja koristile su se za proizvodnju polimernih dijelova u istraživačke svrhe, a danas se koriste za izradu gotovih dijelova. Mogućnost proizvodnje prototipova u kratkom vremenu iz CAD modela omogućila je primjenu AM postupaka u zrakoplovnoj, automobilskoj i u raznim drugim industrijama za brzu izradu alata. Nedavno su se mnoga istraživanja usmjerila na proizvodnju metalnih komponenti kompleksne geometrije i to s materijalima poput titana i nikla jer njihova proizvodnja konvencionalnim metodama nije ekonomična. Konkurentski položaj AM postupaka u odnosu na alternativne metode proizvodnje može se opisati funkcijom u kojoj su varijable razina geometrijske složenosti i količina proizvodnje. Slika 8. prikazuje dijagram položaja aditivne proizvodnje metalnih materijala u odnosu na ostale tehnologije te se može zaključiti da je ona pogodna za dijelove sa srednjom do visokom razinom geometrijske složenosti za relativno malu količinu proizvodnje [11].



Slika 8. Kvalitativno stanje aditivne proizvodnje metalnih dijelova u odnosu na uobičajene postupke proizvodnje [11]

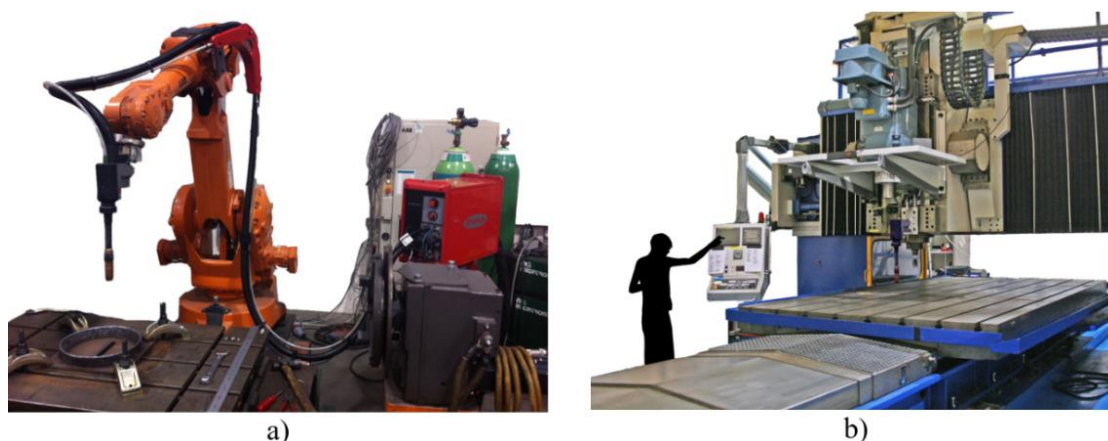
3.2. WAAM postupak

WAAM (engl. *Wire and Arc Additive Manufacturing*) je postupak aditivne proizvodnje koji koristi električni luk i žicu. Proces izrade temelji se na baznim principima aditivne proizvodnje. Tvorevina koja se izrađuje dobiva se taloženjem materijala sloj po sloj, a to se postiže kombinacijom električnog luka koji predstavlja toplinski izvor i žice koja predstavlja sirovinu, tj. dodatni materijal. Ova tehnologija počela se detaljnije istraživati 90-tih godina prošlog stoljeća iako je ovaj princip patentiran 1925. godine. Ideju principa patentirao je Amerikanac Ralph Baker koji je osmislio metodu izrade dekorativnih artikala (Slika 9.). Za razliku od suvremenog WAAM postupka koji je općenito robotiziran i automatiziran, njegova metoda je bila ručna i izvodila se pomoću elektrolučnog zavarivanja. Postupak izrade dekorativnih artikala također se izvodio taloženjem rastaljenog materijala i to na način nizanja, sloj na sloj [9], [12].



Slika 9. Dekorativni artikli izrađeni zavarivanjem sloj na sloj: a) posuda b) košara c) prikaz zida [12]

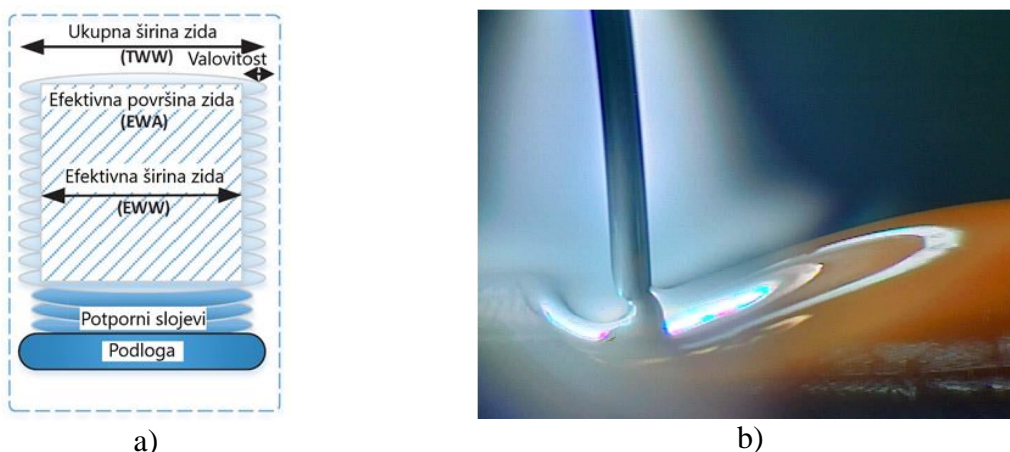
Oprema koja se odnosi na zavarivanje, a koristi se pri WAAM proizvodnji je standardna te se sastoji od: izvora struje, pištolja za zavarivanje i sustava za dovod žice, tj. dodatnog materijala. Izradu dijelova kompleksne geometrije moguće je postići točnim i preciznim navođenjem po zadanoj krivulji te se takve kretnje trenutno mogu ostvariti pomoću robotskih sustava i CNC (engl. *Computer Numerical Controlled*) portalnih strojeva koji jedini mogu osigurati ujednačenu kvalitetu proizvoda. Primjer robota i CNC portalnog stroja prikazan je na slici (Slika 10). Nadalje, najčešći elektrolučni postupci zavarivanja koji se koriste prilikom WAAM postupka su: MIG/MAG, TIG i plazma zavarivanje [9].



Slika 10. Manipulacija kretanja: a) ABB robot za zavarivanje sa 6 SSG, b) CNC portalni stroj za zavarivanje [9]

3.3. Stvaranje i izgled WAAM zida

Izrada metalnih dijelova pomoću WAAM postupka odvija se taloženjem kapljica metala. One se talože jedna do druge u slojevima i to rezultira stvaranjem metalnog zida čija najmanja širina može iznositi 1 - 2 mm. Upravo zbog taloženja metalnih kapljica, bočne površine nastalog zida imaju specifičan valovit izgled. Slika 11. prikazuje zid s površinskim nepravilnostima koje je potrebno ukloniti naknadnim procesima strojne obrade, također se vidi kako je konačna efektivna širina zida umanjena za iznos nepoželjne valovitosti. Iako se postupci strojne obrade žele izbjeći prilikom aditivne proizvodnje, neizbježni su kod WAAM postupka. Međutim, usporedimo li proizvodnju istog proizvoda na način tradicionalnog postupka odvajanjem čestica i WAAM postupak, gubitak materijala opada s 90% na 10%. Ova usporedba efikasnosti često se prikazuje pomoću BTF (engl. *Buy To Fly*) omjera koji predstavlja omjer volumena ili mase sirovog materijala i gotovog proizvoda te je poželjno da je njegova vrijednost znatno manja [13], [14].



Slika 11. a) Prikaz ukupne i efektivne širine zida [13], b) Taloženje kapljice metala [15]

3.4. Prednosti i nedostaci WAAM postupka

S ciljem što boljeg upoznavanja određene tehnologije, korisno je spomenuti prednosti i nedostatke. Dakle, prednosti koje karakteriziraju WAAM postupak su [14], [16]:

- smanjenje gubitka materijala (povoljan BTF omjer)
- velika količina depozita
- niža cijena opreme i niži troškovi proizvodnje nego kod procesa baziranih na prašku
- nema ograničenja na veličinu proizvodnog dijela
- mogućnost strojne obrade za ostvarivanje bolje kvalitete površine
- mogućnost stvaranja funkcionalno profiliranog materijala
- fleksibilnost sustava omogućava primjenu bilo kojeg postupka zavarivanja pa tako i opreme
- izrada dijelova vrlo složene geometrije
- korištenje vrlo skupih i kvalitetnih materijala poput titana, nikla i njihovih legura
- robotizacijom i automatizacijom skraćuje se vrijeme proizvodnje i smanjuje se ljudska greška (velika brzina taloženja materijala 130 g/min).

Nedostaci koji opisuju WAAM postupak su [14]:

- zbog visokog unosa topline dolazi do pojave zaostalih naprezanja i deformacija
- neujednačena geometrija zavara
- potrebna naknadna strojna obrada
- pojava grešaka (Tablica 2.).

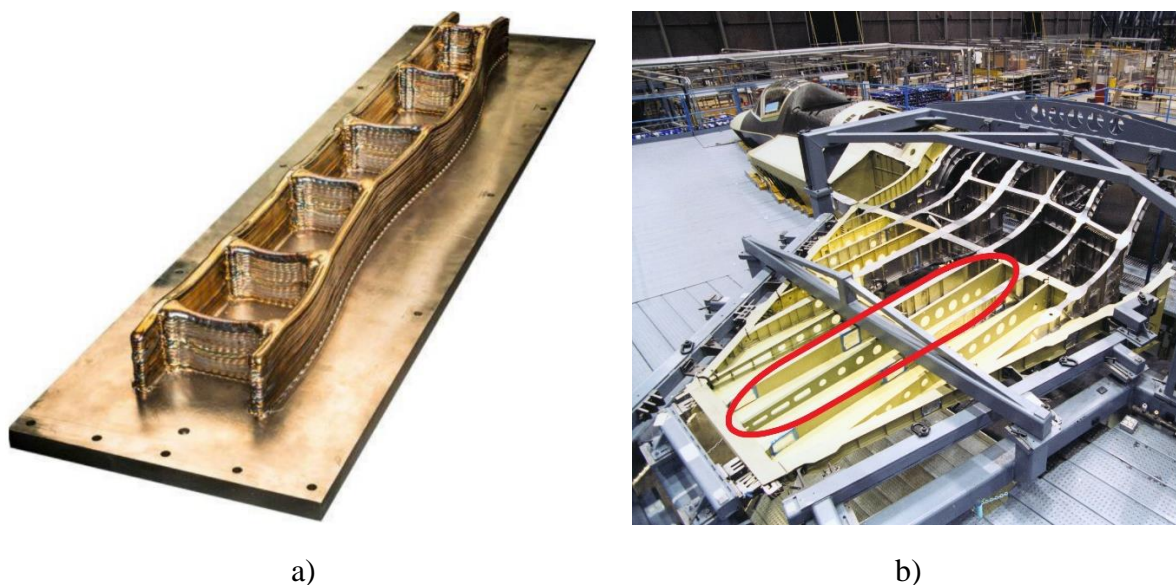
Tablica 2. Greške u WAAM procesu [13]

Greške	Uzorci
Poroznost	<ul style="list-style-type: none"> • nedovoljan protok zaštitnog plina • niska čistoća zaštitnog plina • pogrešni parametri • prevelika brzina zavarivanja • nečistoće u materijalu
Ugorine	<ul style="list-style-type: none"> • previsoka struja zavarivanja • prevelika brzina zavarivanja • pogrešan kut zavarivanja • kemijski sastav materijala • nedovoljna brzina dodavanja žice
Nadvišenje	<ul style="list-style-type: none"> • prevelika brzina zavarivanja

3.5. Primjena WAAM postupka

Moderna industrija konstanto razvija i traži nova rješenja u novim tehnologijama, a dobar primjer takve industrije je zrakoplovna industrija za koju će trebati oko 20 milijuna tona sirovog materijala za iduća dva desetljeća. Razlog takvih predviđanja su činjenice koje govore da se u ovoj grani industrije najčešće koriste materijali poput titana koji imaju izrazito lošu obradivost i nisku iskoristivost materijala, odnosno BTF omjer. Budući da se u zrakoplovnoj industriji izrađuju brojni dijelovi iz titana i to najčešće konvencionalnim načinima strojne obrade, BTF omjer je vrlo visoke vrijednosti. Danas se zahtjeva što niži iznos BTF omjera kako bi bilo što manje otpada materijala. Jedan od načina za bolje iskorištenje materijala su aditivne tehnologije iz kojih je proizašao WAAM postupak [16].

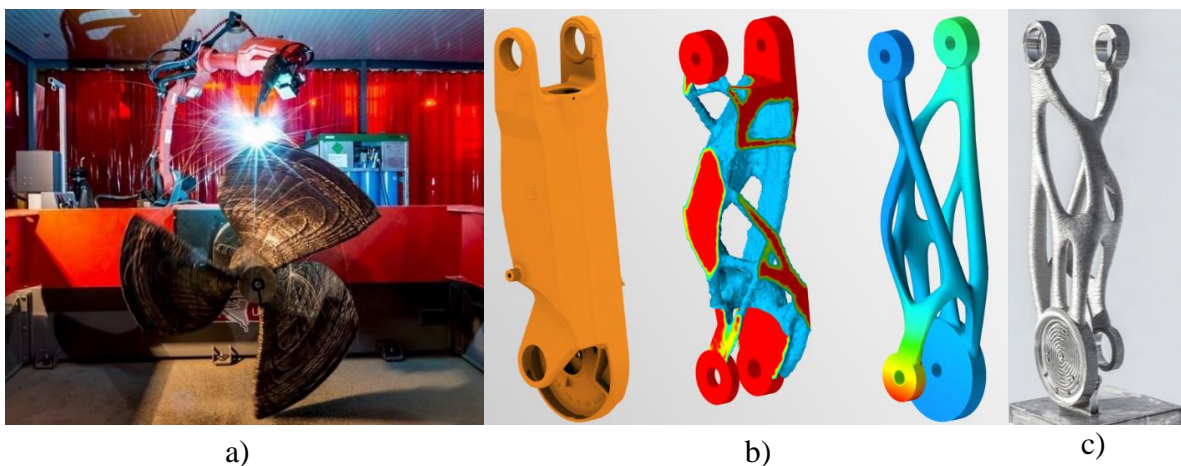
Primjer primjene WAAM postupka u zrakoplovnoj industriji prikazan je slikom (Slika 12.) na kojoj su prikazane dvije izvedbe ramenjače (glavna greda nosećega sustava krila i ostalih aerodinamički oblikovanih površina na zrakoplovu smještena duž raspona površine [17]) od kojih je jedna izrađena WAAM postupkom, a druga konvencionalnim postupcima.



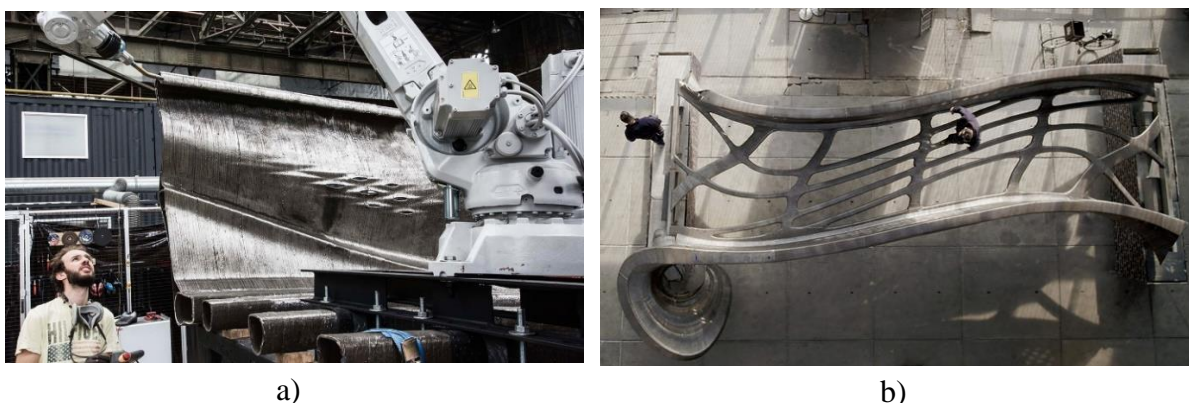
Slika 12. Ramenjača: a) izrađena WAAM postupkom (1.2m Ti-6Al-4V) [18] , b) izrađena konvencionalnim postupcima [19]

Osim u zrakoplovnoj industriji WAAM tehnologija ima široku primjenu i u ostalim granama industrije kao što je: brodogradnja, arhitektura, automobilska industrija, strojarstvo itd. Primjer primjene u brodogradnji prikazan je slikom (Slika 13. a)) na kojoj se vidi izrada brodskog propelera promjera 1300 mm i mase 180 kg. Na slici (Slika 13. b) i c)) prikazan je dio robotske ruke koji je izrađen iz nehrđajućeg čelika. Masa izrađenog dijela robotske ruke umanjena je za

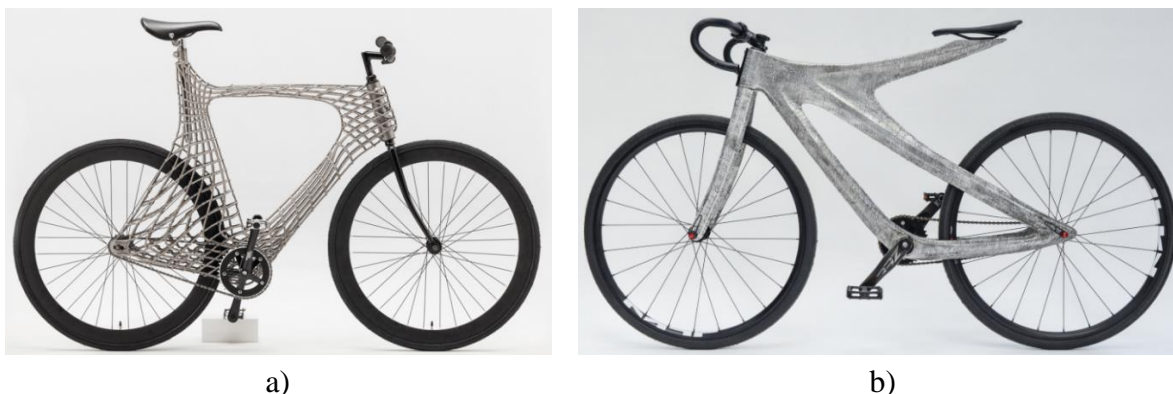
približno 50% te ovaj primjer predstavlja moguću primjenu u robotici. Slika 14. prikazuje pješački most proizveden od nehrđajućeg čelika WAAM postupkom te predstavlja primjenu u arhitekturi. Posljednja slika (Slika 15.) primjera primjene WAAM postupka, prikazuje okvire bicikla zanimljive i složene geometrije izrađene iz nehrđajućeg čelika i aluminija.



Slika 13. Primjena: a) izrada broskog propelera [20], b) optimizacija robotske ruke [21], c) MX3D industrijska robotska ruka (nehrđajući čelik) [21]



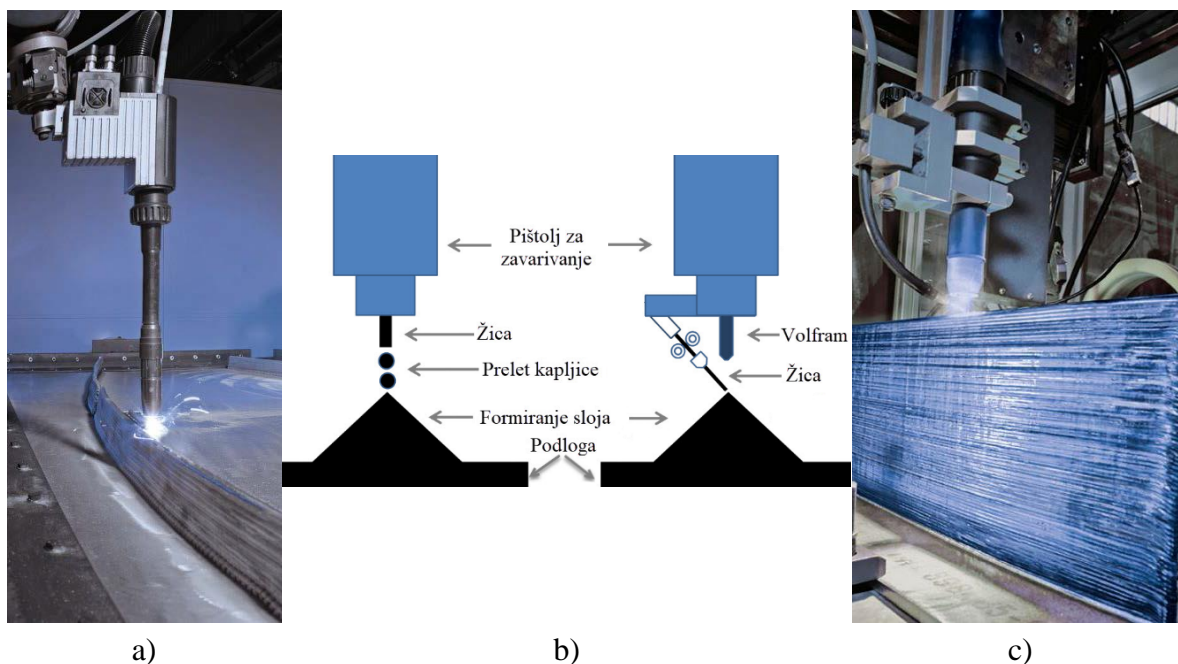
Slika 14. MX3D pješački most [21]: a) proces izrade, b) pogled iz zraka



Slika 15. MX3D okviri bicikla: a) Arc Bike I (nehrđajući čelik), b) Arc Bike II (aluminij) [22]

4. POSTUPCI ZAVARIVANJA WAAM TEHNOLOGIJOM

Među mnogim postupcima zavarivanja, postupci koji se mogu koristiti za WAAM sustave su TIG, MIG/MAG i plazma zavarivanja. Odgovor na pitanje koji postupak zavarivanja odabrati ovisi o određenim parametrima kao što su: vrsta materijala koja se zavaruje, širina, visina zida i kvaliteta površine zida. Međutim, ipak najčešće primijenjeni postupak zavarivanja u tehnologiji WAAM je MIG/MAG. Razlog tomu je činjenica da je žica koaksijalna s pištoljem za zavarivanje, što omogućuje lakše programiranje i generiranje putanje alata. Posebno je popularna inačica hladnog prijenosa metala, CMT (engl. *Cold Metal Transfer*), kod koje je potrebno strogo kontrolirati parametre zavarivanja, ali je zato moguće postići slojeve izvrsne kvalitete pa su se neki radovi bavili proučavanjem toga postupka u kombinaciji s WAAM tehnologijom. Taj postupak daje dobre rezultate prilikom uporabe čelika ili aluminija, ali kad se izrađuju proizvodi od titana, dolazi do pojave nestabilnog luka te se onda za titan češće primjenjuje TIG postupak zavarivanja. Nadalje, problem koji se pak javlja kod TIG-a je što se dodavanje žice odvija nezavisno od pištolja, na slici (Slika 16. b)) je dan shematski prikaz usporedbe MIG/MAG i TIG izvedbe. Kako bi se dobili kvalitetni i homogeni slojevi, potrebno je žicu uvijek dodavati s iste strane, što uvjetuje rotaciju pištolja te komplicira programiranje kretanja alata i generiranje njegove putanje [16].

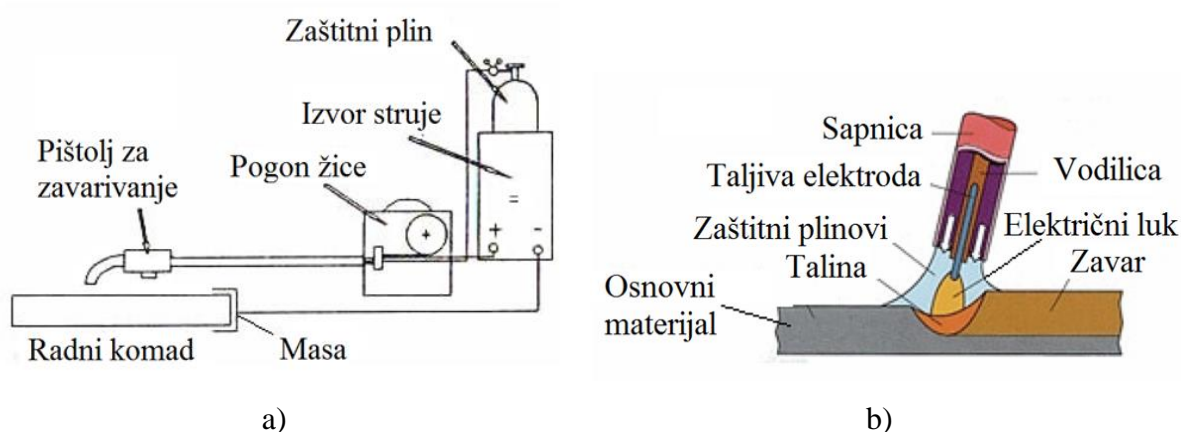


Slika 16. Izvedbe WAAM zavarivanja: a) MIG/MAG [24], b) shematski prikaz [23], c) plazma [24]

4.1. MIG/MAG postupak zavarivanja

MIG/MAG (engl. *Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) zavarivanje ili elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plina je postupak kod kojeg se električni luk uspostavlja i održava između kontinuirane, taljive elektrode u obliku žice i radnog komada. Na razini međunarodne organizacije za standarde, općeniti postupak elektrolučnog zavarivanja metalnom taljivom elektrodom sa zaštitnim plinom klasificiran je oznakom 13, dok su postupci zavarivanja s punom žicom klasificirani oznakama 131 za MIG i 135 za MAG. Spomenute oznaka kao i ostale oznake zavarivanja koje se koriste u industriji, mogu se pronaći u normi HRN EN ISO 4063 Zavarivanje i srodni postupci – Nomenklatura postupaka i referentni brojevi.

Proces zavarivanja se odvija u zaštitnoj atmosferi inertnog (Ar, He) ili aktivnog (CO₂ i mješavine) plina koji ima funkciju zaštiti električni luk, rastaljeni metal od negativnog utjecaja okoline i ionizirati vodljivi prostor za održavanje luka. Dakle, kao što se može naslutiti iz akronima postupaka, ovisno o vrsti zaštitnog plina koji se koristi u postupku taj će se naziv upotrijebiti. Uređaji su u oba slučaja načelno isti, iako ima razlika u nekim detaljima, koji naročito dolaze do izražaja kod suvremenih kompjuteriziranih programibilnih uređaja. Općeniti shematski prikaz uređaja i procesa dan je slikom (Slika 17.) [25].



Slika 17. Shematski prikazi: a) MIG/MAG uređaj[25], b) proces taljenja [26]

Električni luk se uspostavlja između taljive elektrode i osnovnog materijala. Taljiva elektroda je žica omotana na kolut, koja je ujedno i dodatni materijal, a nalazi se u pogonu za dovoz žice te se pomoću njega potiskuje konstantnom brzinom kroz pištolj na mjesto zavarivanja u električni luk [25]. Prednost MIG/MAG zavarivanja je u tome što se cijeli sustav može izvesti

poluautomatski (dodavanje žice je mehanizirano, a vođenje pištolja je ručno), automatski i robotizirano. Potpuno automatski sustav može biti izveden na način da je glava pištolja pokretna nekim mehanizmom ili na drugi način gdje je ona nepomična, ali je zato radni komad pomičan. Robotiziran MIG/MAG postupak zavarivanja je programiran, odnosno parametri su unaprijed programirani, a operater prati rad robota. Najčešći način zavarivanja u industriji je poluautomatski MIG postupak, a razlog je tomu jer je prilagodljiv svim uvjetima rada i ima veliku produktivnost [26].

MIG/MAG postupak zavarivanja pogodan je za primjenu gotovo svih bitnih komercijalnih materijala kao što su: konstrukcijski čelik, visokočvrsti čelik, nehrđajući čelik, aluminiji, bakar, titan i legure nikla. Također, ovim je postupkom moguće zavarivati spomenute materijale u svim položajima, ali naravno za ostvarivanje kvalitetnog zavara potreban je dobar odabir odgovarajuće kombinacije zaštitnih plinova, parametara zavarivanja i dodatnog materijala. Zbog svoje svestranosti, ovaj postupak je postao široko korišten te je čak u mnogim aplikacijama zamijenio ručno elektrolučno zavarivanje (REL). Povećana upotreba ovog postupka može se pripisati mnogim njegovim prednostima od kojih su najvažnije sljedeće [27], [28]:

- učinkovit postupak koji je primjenjiv za zavarivanje gotovo svih vrsta materijala
- veliki izbor parametara zavarivanja
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- veliki izbor načina prijenosa metala
- taloženje (depozit) materijala i brzina zavarivanja omogućuju veliku učinkovitost i proizvodnost
- zbog kontinuiranog dovoda žice moguće je izvoditi duge zavare bez zastoja i prekida rada
- mogućnost zavarivanja u radionici i na terenu
- mogućnost primjene raznih plinskih mješavina
- mogućnost primjene praškom punjene žice
- širok raspon debljine materijala
- minimalno čišćenje nakon zavarivanja – manje prskanje
- procesne vještine se lako podučavaju i usvajaju

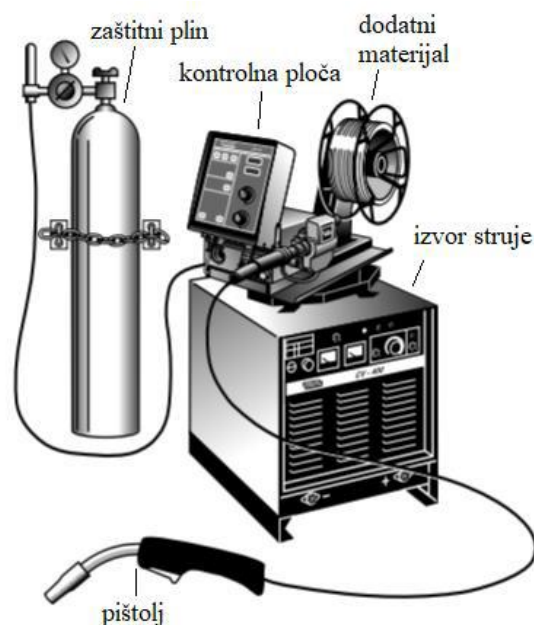
- to je postupak sa malo vodika, što ga čini dobrim izborom za materijale za zavarivanje koji su osjetljivi na vodikove pukotine
- pogodnost automatizacije postupka.

Nedostaci MIG/MAG postupka zavarivanja [28]:

- otežana zaštita plinskom atmosferom na terenu
- problemi pri dovođenju žice
- greške uslijed neodgovarajuće tehnike i loše izabranih parametara zavarivanja
- pojava rasprskavanja prilikom zavarivanja kratkim spojevima
- relativno složen uređaj.

4.2. Oprema postupka MIG/MAG zavarivanja

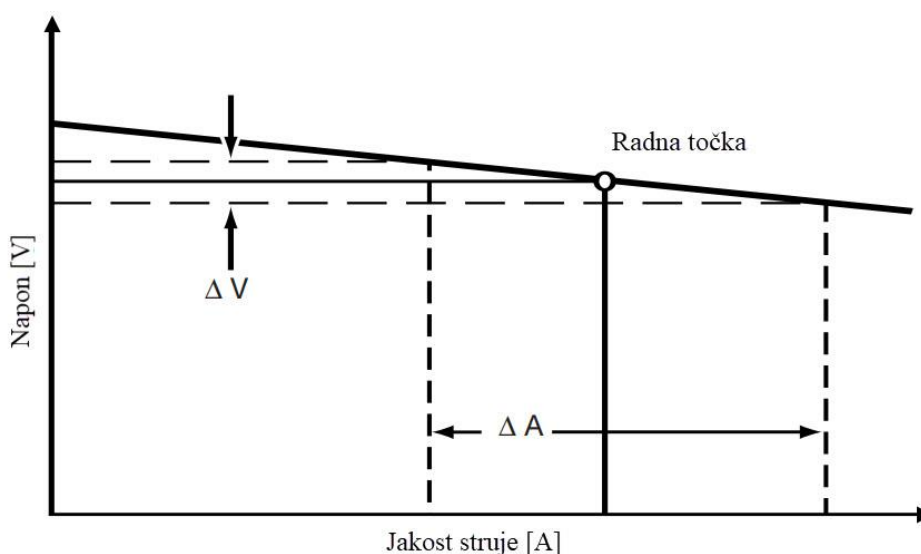
Oprema koja se koristi kod MIG/MAG postupka zavarivanja je: izvor struje, sustava za dovod dodatnog materijala, sustava za upravljanje protokom zaštitnog plina, upravljačkog sustava, pištolja za zavarivanje te odgovarajućeg sustava za hlađenje pištolja tekućinom. Izvedba složenosti uređaja može se kretati od jednostavnih do programibilnih uređaja s ugrađenim računalom i bazom podataka parametara zavarivanja. U konačnici na odabir uređaja najviše utječu zahtjevi i financijska mogućnost korisnika. Slika 18. prikazuje primjer opreme za MIG/MAG zavarivanje [29].



Slika 18. Oprema za MIG/MAG zavarivanja [28]

4.2.1. Izvor struje za MIG/MAG zavarivanje

Izvor struje za zavarivanje je važan uređaj koji dovodi električnu energiju do elektrode i osnovnog materijala gdje nastaje električni luk kojim se ostvaruje zavarivanje. Izvori struje koji se koriste za MIG/MAG zavarivanje su izvori istosmjerne struje s ravnom karakteristikom (CV – engl. constant voltage – konstantni napon), kod kojih se napon može regulirati od 12 - 45 V [29]. Karakteristika se još naziva i blagopadajuća zbog toga što krivulja ipak pokazuje blagi pad uzrokovan unutarnjim otporima izvora struje, međutim unatoč tomu ipak se uzima da je krivulja konstantna [30]. Dijagram ravne karakteristike prikazan je slikom (Slika 19.).



Slika 19. Dijagram izlazne CV karakteristike izvora struje za zavarivanje [31]31

Prema načinu podešavanja napona dijele se na [29]:

- Izvor struje s mehaničkim podešavanjem (podešavanje pomoću sklopki, stupnjevito podešavanje), koji su jednostavni, pouzdani i prihvatljivi po cijeni. Njihovi rasponi jakosti struja su granicama od 100 – 500A i primjenjuju se za klasično MIG/MAG zavarivanje.
- Izvore s elektroničkim podešavanjem (inverter). Kod njih se podešavanje napona vrši kontinuirano u cijelom području regulacije i uglavnom se izrađuju u veličinama 300 – 600A. Primjenjuju se za sve vrste MIG/MAG zavarivanja, a obavezo kod uređaja za impulsno MIG zavarivanje.

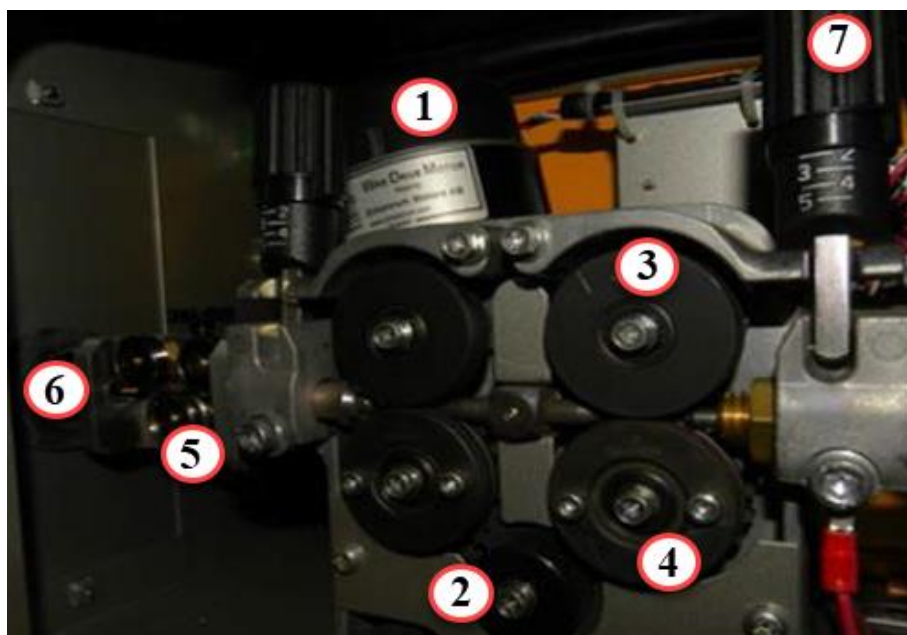
4.2.2. Sustav za dovod dodatnog materijala

Sustav za dovod žice je uređaj koji tijekom zavarivanja automatski dodaje žicu u električni luk. Ovaj uređaj posebno karakterizira MIG/MAG i EPP postupak zavarivanja, a glavni parametri na koje može direktno utjecati su slobodni kraj žice i brzina dodavanja žice. U današnje vrijeme dodavači žice se vrlo često montiraju van kućišta kao zasebne jedinice, a razlog tomu je rotacija modula s obzirom na izvor struje i bolja preglednost namotaja žice na kolutu u slučaju pogreške pri uvođenju [30][30].

Princip rada sustava za dovod žice izvodi se automatskom regulacijom pomoću izvora struje za zavarivanje prema visini napona struje, odnosno izlazna karakteristika kod takvih izvora struje je ravna. Promjenom visine električnog luka mijenja se izlazna jakost struje dok se napon mijenja u značajno manjem intenzitetu (Slika 19.). Iz tog je razloga elektromotor za dodavanje žice reguliran izlaznim naponom izvora struje koji zbog slabijeg intenziteta promjene osigurava sporiju reakciju dodavanja žice što znači i veću stabilnost procesa. Ukoliko bi proces dodavanja žice bio izmijenjen u smislu da brzina dodavača žice ovisi o intenzitetu promjene jakosti struje, tada bi svaka promjena visine električnog luka dovela do zabijanja žice u radni komad ili bi došlo do uvlačenja žice u pištolj za zavarivanje što nikako nije prikladno za vođenje procesa zavarivanja [30].

Nadalje, općeniti primjer dodavača žice prikazan je slikom (Slika 20.), a najvažniji dijelovi od kojih se sastoji su [30]:

1. Elektromotor
2. Pogonski zupčanik
3. Pogonjeni zupčanik s profilom za vođenje žice
4. Pogonjeni zupčanik s profilom za vođenje žice sa zatezačima
5. Kotačići za uvođenje u polikabel
6. Uvodnica u polikabel
7. Zatezač za kotačiće.



Slika 20. Dijelovi dodavača žice [30]

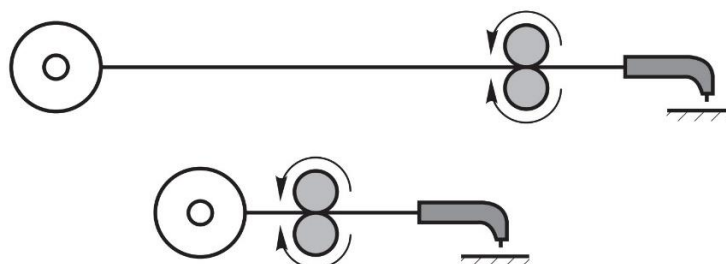
Tri najpoznatije i najčešće korištene metode za vođenje, odnosno dodavanje žice su [29]:

- Dodavanje žice guranjem („Push“) – žica se kontroliranom brzinom gura pomoću pogonskih kotačića kroz vodilicu žice u pištolj, kojeg usmjeravamo u mjesto zavarivanja. Slika 21. prikazuje princip dodavanja žice guranjem.



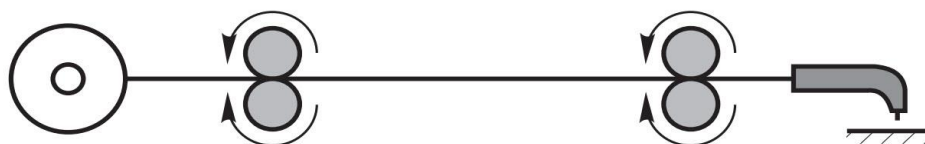
Slika 21. Shema dodavanja žice guranjem [33]

- Dodavanje žice povlačenjem („Pull“) – ova metoda je slična prvoj metodi samo što se žica kontroliranom brzinom povlači pomoću pogonskih kotačića koji se nalaze u pištolju za zavarivanje. Slika 22. prikazuje princip dodavanja žice povlačenjem.



Slika 22. Shema dodavanja žice povlačenjem [33]

- Dodavanje žice guranjem i povlačenjem („Push-Pull“) – ova metoda je kombinacija prve dvije metode, dakle žica se kontroliranom brzinom gura pomoću pogonskih kotačića kroz vodilicu žice do pogonskih kotačića u pištolju, koji žicu vuku do mjesta zavara. Slika 23. prikazuje princip dodavanja žice guranjem i povlačenjem.



Slika 23. Shema dodavanja žice guranjem i povlačenjem [33]

Funkcija kotačića za dodavanje žice i uvodnice je odmotavanje, ravnanje i uvođenje žice u bužir unutar polikabela. Budući da se koriste razne vrste žica za zavarivanje, postoje prikladni kotačići i uvodnice za određenu vrstu materijala, tj. žice. Dakle, kotačići i uvodnica se odabiru isključivo prema vrsti dodatnog materijala kojim se izvodi zavarivanje. Cilj je odabrati kotačiće veće ili jednake tvrdoće od tvrdoće žice. Time se osigurava da kotačići ne unište žicu tijekom dovođenja do sapnice pištolja za zavarivanje [30].

Četvrtasti oblik	Okrugli oblik	Okrugli oblik
- pritisak na žicu	- prati oblik žice	- prati oblik žice - dodatno narovašen
- čelik	- teflon	- teflon
- čelična žica	- aluminijska žica	- praškom punjena žica

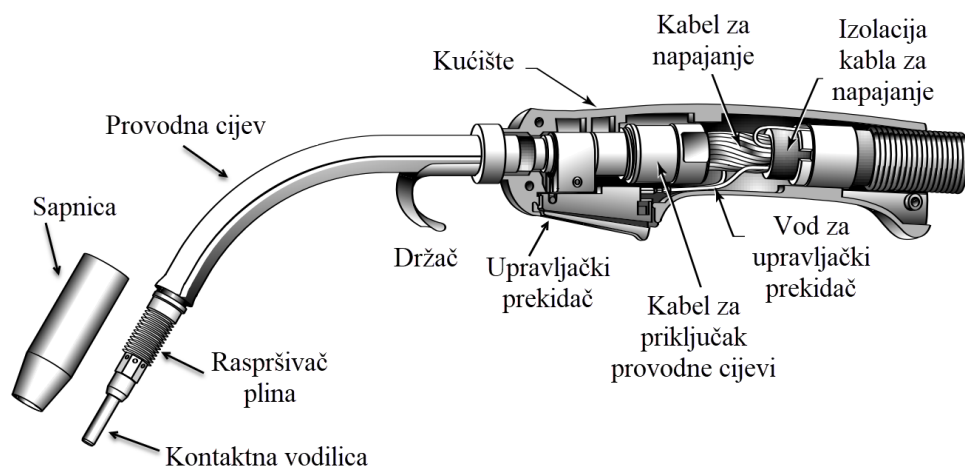
Slika 24. Usporedni prikaz tipova kotačića za izravnavanje žice [30][30]

4.2.3. Polikabel i pištolj za zavarivanje

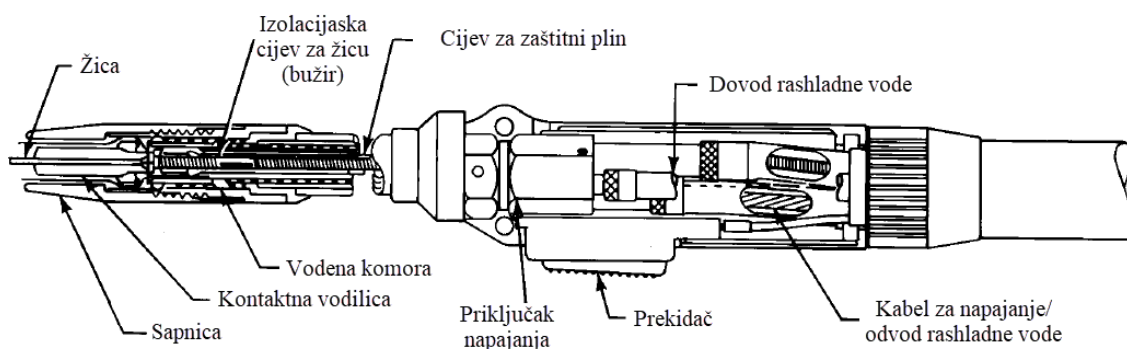
Proces zavarivanja izvršava se pomoću pištolja za zavarivanje čija je funkcija usmjeravanje električnog luka na mjesto predviđenog zavara. Na tržištu postoje razni tipovi pištolja za zavarivanje koji su konstruirani s ciljem postizanja maksimalne iskoristivosti za određenu primjenu. Općenito, podjelu pištolja za zavarivanje moguće je provesti na nekoliko načina. Ako se podjela orijentira na spektar primjene može se primijetiti kako postoji područje visoke produktivnosti, tj. područje u teškim uvjetima rada, što u kontekstu zavarivanja znači rad s visokim iznosima jakosti struje i dugim ciklusima zavarivanja, te također područje lakšeg uvjeta rada u kojemu se koriste manji iznosi struje zavarivanja i kraći vremenski ciklusi. Nadalje, na temelju izvedbe konstrukcije moguće ih je svrstati na pištolje za poluautomatski i automatski režim rada, zatim i na pištolje s ravnom ili zakrivljenom sapnicom. Također, ovisno o primijenjenoj vrsti hlađenja, pištolje za zavarivanje možemo podijeliti na pištolje hlađene zrakom ili vodom. Usporedba pištolja s različitim izvedbama hlađenja, ali jednakih karakteristika, poput ograničene maksimalne vrijednosti struje i intermitencije, prikazuje kako je pištolj hlađen pasivnim odvođenjem topline zrakom znatno teži od izvedbe s vodenim hlađenjem. Razlog tomu je potrebna veća masa kako bi se nadvladao njegov manje učinkovit način hlađenja [27].

Na slikama (Slika 25. i Slika 26.) prikazane su u presjeku izvedbe pištolja za zavarivanje te sa njih možemo dobiti predodžbu na koji je način izvedena konstrukcija i kako su povezane neke od osnovnih komponenata pištolja. Osnovne komponente od kojih se sastoji pištolj su:

- kontaktna vodilica (građena od bakra ili njegovih legura i prenosi struju zavarivanja na elektrodu/žicu)
- sapnica za zaštitni plin (strujni uređaj kojemu se poprečni presjek kanala smanjuje u smjeru strujanja)
- izolacijska cijev za žicu (podupire, štiti i usmjerava žicu kroz polikabel, a dobra vodljivost osigurava stabilan luk)
- crijevo za dovod plina
- crijevo za vodeno hlađenje
- kabel za napajanje
- upravljački prekidač



Slika 25. Presjek zakrivljenog pištolja za MIG/MAG zavarivanje [30]



Slika 26. Presjek ravnog pištolja za MIG/MAG zavarivanje [27]

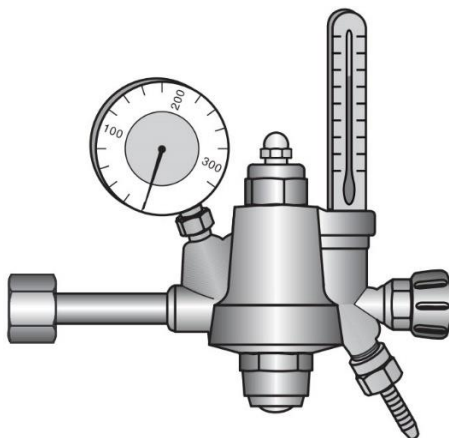
Pištolj za zavarivanje i stroj za zavarivanje su povezani polikablom koji omogućuje dovod dodatnog materijala, struje i zaštitnog plina u električni luk. U polikablu se nalazi više crijeva i vodiča čija je uloga provođenje tri fundamentalna čimbenika: materijala (dodatni/rashladni), energije (električna) i informacije (ustopostava luka). Ovisno o konfiguraciji izvora struje za zavarivanje, tj. koristimo li izvor struje sa vodenim hlađenjem ili obično zračno hlađenje pištolja, razlikuje se unutarnja izvedba polikabela. Dakle, ako se koristi izvor struje s vodenim hlađenjem polikabel sadrži dovod i odvod vode za hlađenje, te standardno kao kod običnog zračnog hlađenja dovod za žicu, dovod za plin, strujne pinove za provod signala za paljenje i gašenje luka, te novih funkcija poput zaslona i kontrola na modernim pištoljima za zavarivanje. Na količinu dobavljene energije kroz kabel utječe nekoliko čimbenika: promjer vodiča, duljina kabela, električni otpor vodiča, granična temperatura izolacije polikabela te temperatura okoliša. Kraći kablovi mogu prenijeti više struje nego duži kablovi istog promjera vodiča struje, a razlog tomu je električni otpor koji se sa duljinom povećava do mjere gdje temperatura vodiča topi izolaciju. Zbog toga postoji gradacija polikabela prema temperaturi koju mogu podnijeti

unutrašnje izolacije vodiča: 75°C, 90°C i 105°C. Također, bitno je i pripaziti na okolišnu temperaturu jer se provodnost struje smanjuje ukoliko je temperatura u pogonu na 30°C ili više, te u takvim uvjetima količina topline koju kabel može predati u prostor nije dovoljna da ga rashladi [30].

4.2.4. Sustav za dovod zaštitnog plina

Kako bi se eliminirao štetan utjecaj okoline prilikom zavarivanja koristi se zaštitni plin. Zaštitni plin se dovodi u zavar putem sustava za dovod zaštitnog plina koji se sastoji od sljedećih komponenti [29]:

- redukcijskog ventila s mjeracem protoka – priključuje se na bocu s zaštitnim plinom, a protok se podešava ručno na regulatoru protoka ventila
- elektromagnetskog ventila za otvaranje i zatvaranje protoka – sinkroniziran je s regulatorom brzine motora dodavača žice
- polikabela i pištolja za zavarivanje - kroz njih plin putuje do električnog luka.



Slika 27. Redukcijski ventil s mjeracem protoka [32]

4.2.5. Upravljački sustav uređaja za MIG/MAG zavarivanje

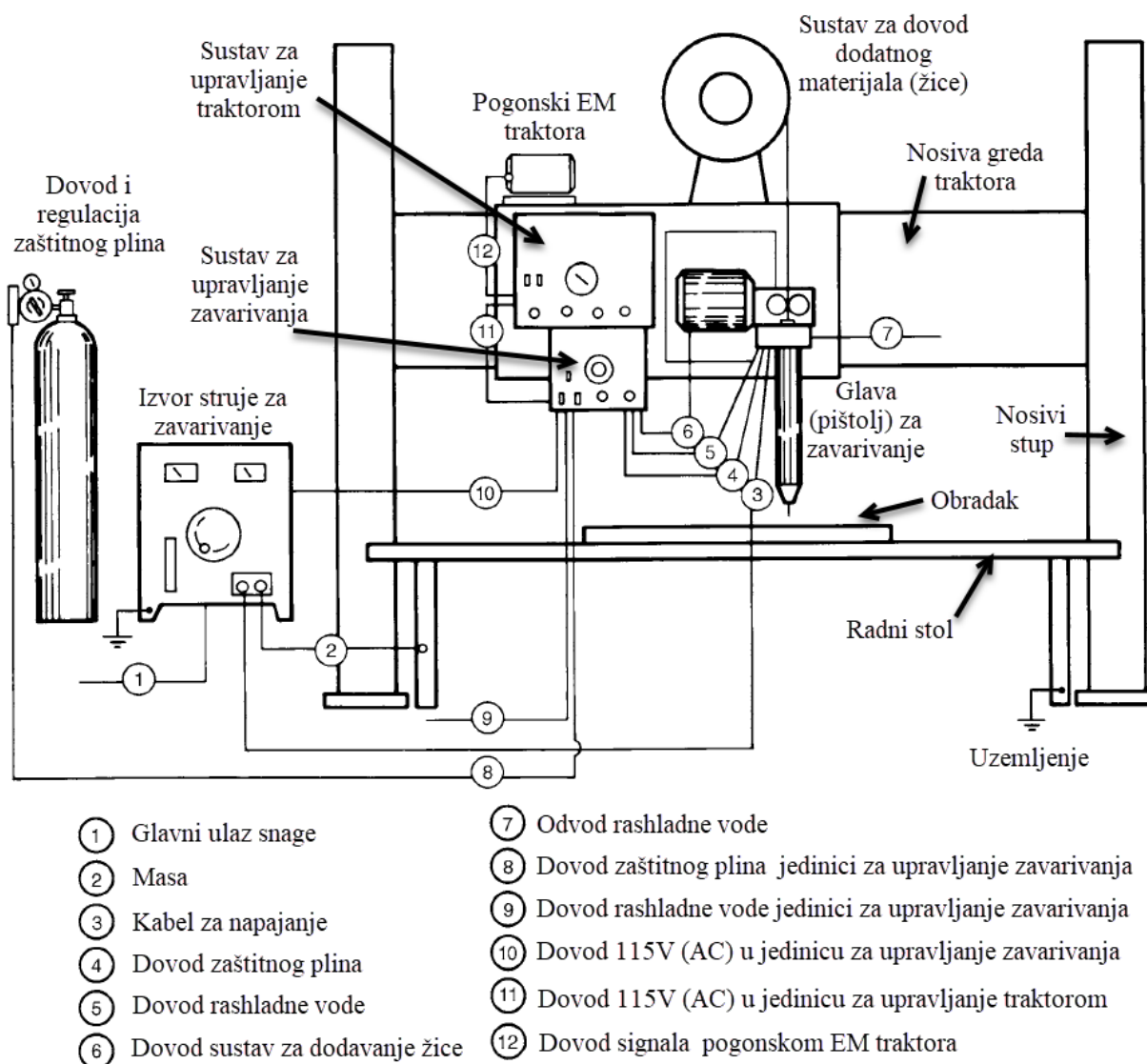
Sustav koji se brine za upravljanje procesa zavarivanja izvodi se elektronički, a njegova je zadaća kontrolirati sljedeće funkcije [29]:

- uključivanje izvora struje zbog uspostavljanja i gašenja električnog luka,
- otvaranje i zatvaranje protoka zaštitnog plina,
- cjelokupno dodavanje dodatnog materijala, dakle paljenje, gašenje i regulacija brzine.

Kod potpuno elektronički upravljanih uređaja, upravljački sklop služi za mjerenje i održavanje zadanih parametara konstantnim te također i za kontrolirani prijenos kapljica kroz električni luk (izvori za impulsno zavarivanje) [29].

4.2.6. Automatizirano MIG/MAG zavarivanje

MIG/MAG zavarivanje je postupak koji se lako automatizira i robotizira, a instalacija komponenti u takve sustave je veoma slična pa skoro i identična s komponentama iz poluautomatskih sustava. Na slici (Slika 28.) je dan primjer općenitog automatiziranog MIG/MAG sustava koji se sastoji od nosive grede na kojoj se nalazi traktor koji putuje po njoj. Traktor se pokreće pomoću elektromotora duž nosive grede, a na njemu se nalaze upravljačke kontrole za zavarivanje i pomicanje traktora, sustav za dobavu dodatnog materijala i glava (pištolj) za zavarivanje. Ovako opisan sustav omogućava zavarivanje ravnih šavova. Ukoliko se ovaj opisani sustav nadogradi s okretnim stolom radni komad bi se mogao pozicionirati na više načina, tj. dobili bi još jedan stupanj slobode gibanja [27].



Slika 28. Automatizirani sustav za MIG/MAG zavarivanje [27]

4.2.7. Izbor opreme

Prilikom odabira opreme za zavarivanje kupac bi trebao uzeti u obzir zahtjeve određene primjene u kojima će se koristiti oprema. Izbor opreme za jednonamjensku ili proizvodnju velikih količina obično se može temeljiti samo na zahtjevima te aplikacije. Naime, ako proizvodnja zahtjeva izvođenje mnoštva poslova, od kojih su mnogi možda nepoznati u vrijeme odabira opreme, kao što je to slučaj u manjim radionicama u takvim situacijama svestranost može biti vrlo važna. Dakle, zahtjeve primjene je ponekad teško predvidjeti pogotovo u poduzećima u kojima proizvodnja pokriva široko područje i gdje je izmjena različitih projekata dosta dinamična. Međutim, ukoliko kupac ima uvid u relativne buduće projekte onda mu nije problem odrediti osnovne zahtjeve primjene kao što su [27]:

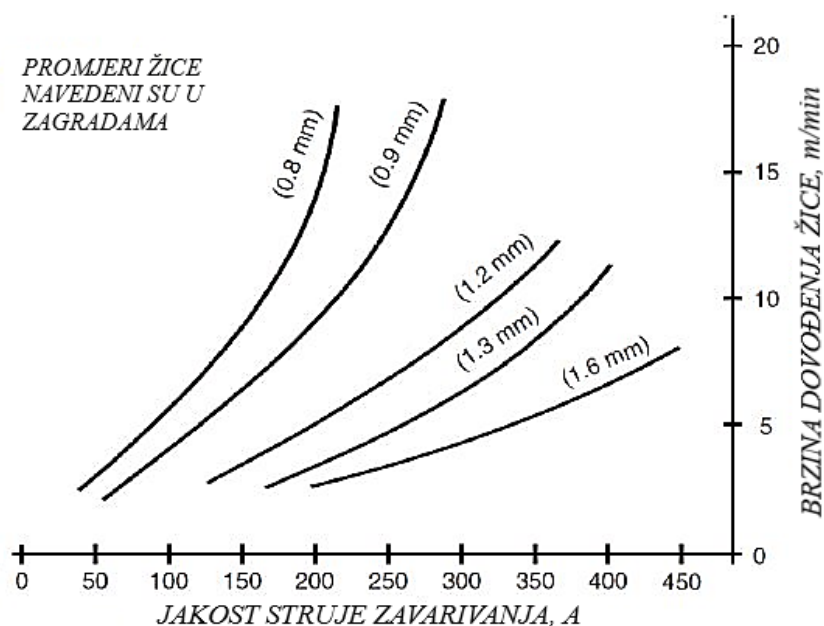
- područje izlazne snage,
- statičku i dinamičku karakteristiku izvora,
- područje brzine žice.

Također, treba uzeti u obzir i opremu koja se trenutno koristi u postrojenju. Standardiziranje određenih komponenti i nadopunjavanje postojeće opreme umanjuje zahtjeve za inventarom dijelova i omogućava u najvećoj mjeri učinkovitost cjelokupnog rada [27].

4.3. Osnovni parametri MIG/MAG zavarivanja

Najvažnija stvar kod MIG/MAG zavarivanja su parametri koje obično nije jednostavno odrediti jer ovise o nizu sljedećih faktora: debljini osnovnog materijala koji se zavaruje, tehnološkim zahtjevima, uvjetima zavarivanja, opremi koja se koristi za zavarivanje, stupnju mehanizacije, iskustvu zavarivača itd. Smjernice i primjere parametra moguće je pronaći u stručnoj literaturi, određenim standardima primjene i zavarivačkim softverima, međutim prije konkretne primjene, uvijek je potrebno napraviti provjeru izabranih parametara konkretnim pokusom. Dakle, osnovni parametri koje treba uzeti u obzir kod ovog MIG/MAG zavarivanja su [31][30]:

- jakost struje zavarivanja – ovisi o brzini i promjeru žice, a njezina vrijednost utječe na količinu rastaljenog materijala u jedinici vremena te također djelomično utječe na stabilnost električnog luka i penetraciju (Slika 29.)



Slika 29. Ovisnost jakosti struje zavarivanja o promjeru i brzini žice [28]

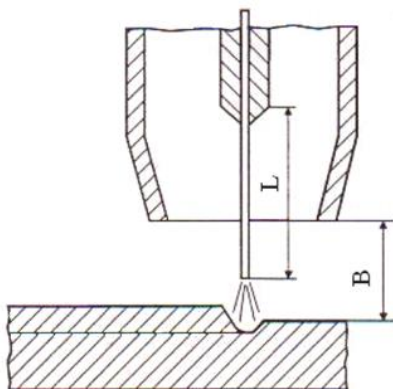
- napon električnog luka – iznos napona utječe na način prijenosa metala te ukoliko napon poraste dolazi do povećanja duljine električnog luka čime se pak dobiva širi zavar uz manju penetraciju što u konačnici mijenja izgled zavara.
- induktivitet – parametar kojim opisujemo brzinu porasta jakosti struje unutar vremenskog perioda nakon ostvarivanja kratkog spoja (isključivo se koristi za zavarivanje kratkim spojem), a njegov krajnji cilj je osigurati što ujednačeniji i prikladniji prijelaz materijala ovisno o vrsti zavarenog spoja koji se izvodi [30][30].

Tablica 3. Utjecaj induktiviteta na zavarivanje [30]

Manji induktivitet	Veći induktivitet
- manji unos toplinske energiju u kapljicu, ujedno i manji ukupni unos energije u zavareni spoj	- veći unos toplinske energije
- manja zona utjecaja topline	- veća zona utjecaja topline
- tanki limovi	- limovi srednje debljine i debeli limovi
- mogućnost zavarivanja u svim položajima	- zavarivanje u nadglavnom položaju izbjegavati
- nemirniji prijenos materijala - veće rasprskavanje i naljepljivanje kapljica	- miran prijenos materijala - manje rasprskavanje
- viskozna i gusta talina, veća površinska napetost	- neviskozna talina, manje površinske napetosti
- grubi izgled površine zavara, izražena linija staljivanja	- mekaniji prijelazi grebena zavara, povoljnija geometrija zavara
- veće nadvišenje i nepovoljnija geometrija zavara	- blaži prijelaz sa osnovnog na zavareni materijal
- pre nizak induktivitet - izraženo štrcanje	- induktivitet prevelik - nepravilan rad, teška uspostava električnog luka, vrlo brzo prekida radi prevelikog induktivnog otpora

- brzina zavarivanja - parametar koji utječe na produktivnost postupka zavarivanja, a njegov iznos ovisi o položaju zavarivanja (povećanjem brzine zavarivanja zavar postaje uži, a penetracija manja, dok smanjenjem brzine zavarivanja zavar postaje širi, a penetracija veća te iz toga možemo zaključiti kako izgled profila zavara direktno ovisi o brzini zavarivanja) [28]
- protok zaštitnog plina - parametar koji ima veliki utjecaj na oblik profila zavara (širinu i penetraciju), brzinu zavarivanja i stabilnost električnog luka. Zadaća zaštitnog plina je čuvati područje zavara od negativnog utjecaja plinova iz atmosfere. Protok zaštitnog plina regulira se u odnosu na jakost struje zavarivanja, uvjete u kojima se vrši zavarivanje i karakteristike spoja koji se zavaruje. Za veću struju zavarivanja potreban je i veći protok zaštitnog plina [28].
- slobodni kraj žice - je duljina žice od izlaza iz kontaktne vodilice do početka električnog luka, a treba iznositi ~ 13 puta promjera žice (ali ne više od 20 mm). Ukoliko dođe do znatnijeg odstupanja vrijednosti veličine L dolazi do promjene odnosa električnog luka

i struje zavarivanja. Fizikalno promatrajući, doći će do povećanja električnog otpora te će se uslijed toga žica više zagrijavati. Ako je sapnica preblizu, dolazi do onečišćenja, a može doći i do vrtloženja zaštitnog plina. Na slici (Slika 30.) prikazana je sapnica i slobodni kraj žice [26].



Slika 30. Slobodni kraj žice (L) i udaljenost sapnice od radnog komada (B) [26]

4.4. Načini prijenosa metala u električnom luku

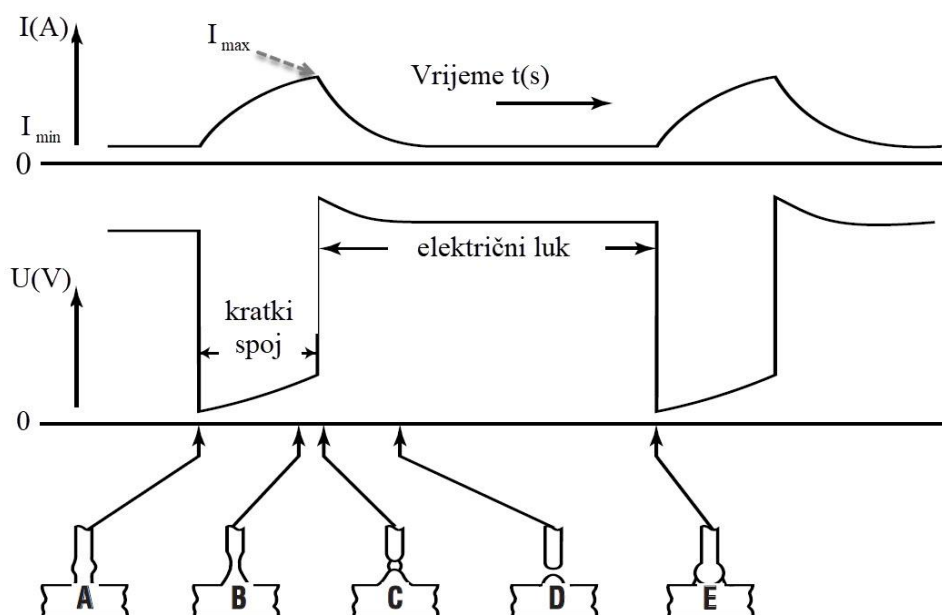
Način prijenosa metala u električnom luku ovisi o brojnim faktorima, međutim najutjecajniji su napon, jakost struje, vrsta zaštitnog plina, promjer elektrode, sastav elektrode i slobodni kraj žice. Specifičnost MIG/MAG postupka je mogućnost izbora, odnosno podešavanja načina prijenosa metala u električni luk. Dakle, najčešća četiri načina prijenosa metala u električnom luku specifična za MIG/MAG su [25], [27], [34]:

- prijenos metala kratkim spojevima (engl. *Short Arc*), oznaka MAG-k
- prijenos metala mješovitim lukom (engl. *Mixed Arc*), oznaka MAG-i
- prijenos metala štrcajućim lukom (engl. *Spray Arc*), oznaka MIG-s ili MAG-s
- prijenos metala impulsnim lukom (engl. *Mixed Arc*), oznaka MIG-p ili MAG-p.

4.4.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Prijenos metala kratkim spojem je postupak kod kojeg se kontinuirano dobavlja žica tali uslijed kratkih spojeva. Specifičnost ove vrste prijenosa metala je mali unos topline, a najveći utjecaj na uspješnost izvođenja imaju promjer elektrode i vrsta zaštitnog plina. Karakteristične vrijednosti napona (13 - 21 V) i jakosti struje zavarivanja (50 - 170 A) manje su od napona i jakosti struje zavarivanja kod ostalih načina prijenosa metala. Pri stabilnim parametrima u

sekundi se dogodi između 100 i 200 kratkih spojeva. Ovaj prijenos metala pogodan je za zavarivanje tanjih materijala (0,6 - 5,0 mm) zbog malog unosa topline. Promjeri elektroda koje se koriste pri zavarivanju kratkim spojevima kreću se između 0,6 mm i 1,2 mm. Plinovi koji se najčešće koriste su 100 % CO₂, mješavina 75 - 80 % Ar sa 20-25 % CO₂, a manje se koriste mješavine Ar i O₂ i posebne mješavine Ar, CO₂ i O₂. Slika 31. prikazuje pojednostavljeni osciloskopski prikaz procesa pomoću dviju funkcija $U = f(t)$ te $I = f(t)$ i shemu pojava [28]. Tablici 4. iznosi prednosti i nedostatke prijenosa metala kratkim spojevima.



Slika 31. Pojednostavljeni osciloskopski prikaz i shema pojava [31]

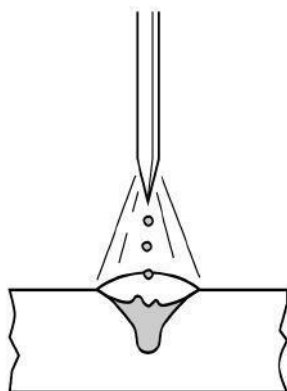
Tablica 4. Prednosti i nedostaci prijenosa metala kratkim spojevima [31][31]

Prednosti	Nedostaci
- mogućnost zavarivanja u svim položajima	- pogodan samo za tanje materijale
- manje su deformacije zbog manjeg unosa topline	- uslijed lošeg vođenja postupka zavarivanja može doći do nepostojanja čvrste veze u zavarenom spoju odnosno mogu se javiti greške poput mikronaljepljivanja
- dobro podnosi greške u pripremi zavara	- uslijed lošeg vođenja procesa dolazi do rasprskavanja i nedovoljnog protaljivanja
- visoka iskoristivost elektrode (više od 93%)	- potrebno je zaštititi područje zavarivanja od vjetra kod rada na terenu,

4.4.2. Prijenos metala štrcajućim lukom

Za ovaj način prijenosa karakteristično je da se prijenos metala s vrha elektrode vrši slobodnim letom malih kapljica kroz atmosferu luka. Niti u jednom trenutku u vremenu održavanja luka elektroda ne dolazi u dodir s osnovnim materijalom. To znači da sile koje djeluju u električnom luku otkidaju kapi i usmjeruju ih (manje ili više aksijalno u odnosu na elektrodu) prema radnom komadu prije nego vrh elektrode može dodirnuti radni komad. Da bi se ostvario ovakav način prijenosa potrebna je dosta velika energija. Naime, potrebno je ostvariti velike sile ("pinch - efekt", tj. magnetsko štipanje), a zagrijavanjem ili na neki drugi način smanjit će se sile površinske napetosti koje utječu na veličinu kapljice metala [25].

Karakteristične vrijednosti napona (25 - 40 V) i jakosti struje zavarivanja (200 - 600 A) veće su u odnosu za iznad opisan način prijenosa metala. Zaštitni plinovi koji se koriste su mješavina argona i 1,5 % O₂ i mješavina argona i CO₂ kod koje mora biti manje od 18 % CO₂. Ovaj načina prijenosa metala koristi se za zavarivanje ugljičnih čelika, visokolegiranih čelika i legura nikla. Slikom 32. prikazan je prijenos metala štrcajućim lukom [28].



Slika 32. Prijenos metala štrcajućim lukom [31]

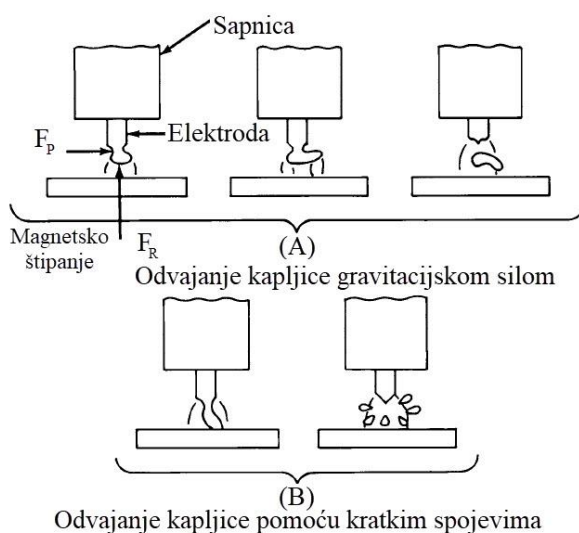
Tablica 5. Prednosti i nedostaci prijenosa metala kratkim spojevima [27]

Prednosti	Nedostaci
- ne zahtijeva naknadno čišćenje jer nema rasprskavanja	- mogućnost primjene samo na debljim materijalima
- omogućava veliki depozit uz veliku iskorištenost elektrode (više od 98 %)	- nemogućnost zavarivanja u svim položajima
- širok spektar dodatnih materijala i raspona promjera žice	- skuplji zaštitni plinovi
- vrlo lako se automatizira	

4.4.3. Prijenos metala mješovitim lukom

Prijenos metala mješovitim lukom (prijelazni luk) pojavljuje se prijenos štrcajućim lukom, ali se povremeno pojavi jedan ili više kratkih spojeva. Specifičnost koja karakterizira ovaj prijenos je neregularnost, tj. pojava kratkih spojeva je slučajna što izaziva nepredvidivo štrcanje materijala pa se parametri koji daju ovakav način prijenosa izbjegavaju. Shematski prikaz prijenosa metala dan je slikom (Slika 33.) [25].

Karakteristične vrijednosti napona (22 - 25 V) i jakosti struje zavarivanja (170 - 235 A) nešto su veće nego kod prijenosa metala kratkim spojevima što uzrokuje veće, nepravilno oblikovane kapljice (promjer im je veći od promjera elektrode). Najčešće korišteni zaštitni plin je 100 % CO₂, a moguće je koristiti i mješavinu argona i CO₂. U današnje vrijeme način prijenosa metala prijelaznim lukom potpuno je istisnut iz upotrebe zbog problema s nestabilnosti procesa uslijed izmjenjivanja načina prijenosa metala kratkim spojevima i štrcajućim lukom [28].



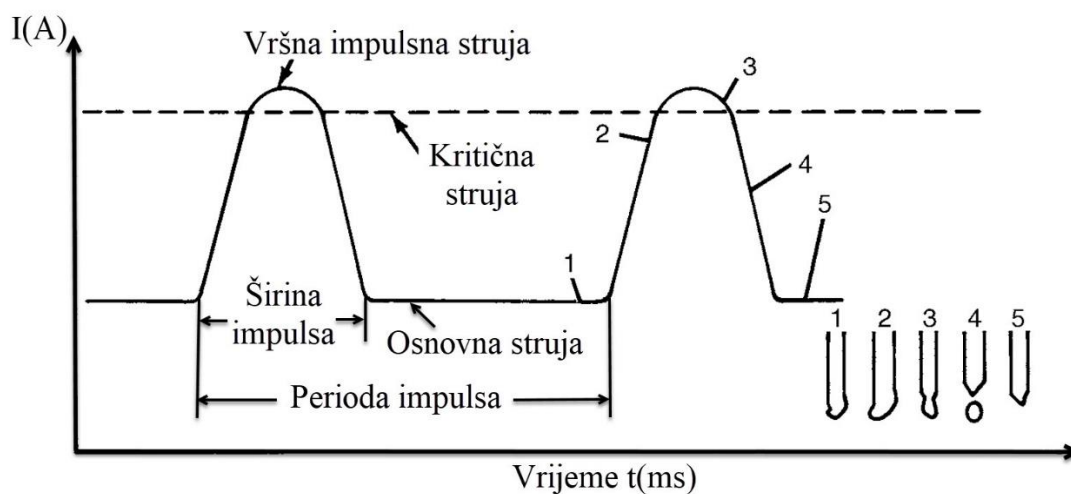
Slika 33. Shema prijenosa metala mješovitim lukom [27]

Tablica 6. Prednosti i nedostaci prijenosa metala mješovitim lukom [31]

Prednosti	Nedostaci
- jeftini zaštitni plin	- potreba za skupom naknadnom obradom nakon zavarivanja
- mogućnost zavarivanja velikim brzinama	- manja iskorištenost elektrode u odnosu na ostale postupke (87 - 93%)
- jeftina oprema za zavarivanje	- sklonost mikronaljepljivanju i nepostojanju čvrste veze u zavarenom spoju
- jeftini dodatni materijal	- jako rasprskavanje

4.4.4. Prijenos metala impulsnim lukom (pulzirajući luk)

Izvor struje generira promjenjiv oblik struje zvan impuls. Jakost struje u jednom impulsu mijenja se od vršne vrijednosti (maksimalna vrijednost jakosti struje) do vrijednosti osnovne struje. U trenutku kada iznos struje dosegne vršnu vrijednost impulsne struje odvaja se jedna kapljica dodatnog materijala koja slobodnim letom putuje duž električnog luka. Nakon odvajanja samo jedne kapljice vrijednost struje pada na osnovnu vrijednost koja osigurava stabilnost električnog luka i srednju vrijednost unosa topline. Srednja struja zavarivanja regulira se kombinacijom frekvencije impulsnog zavarivanja (koja proporcionalno raste s brzinom dovođenja žice) i brzinom dovođenja žice. Zavarivanjem impulsnim lukom moguće je zavarivati široki spektar debljine osnovnog materijala. Oblik impulsa može biti sinusoidan (najjednostavnije ga je proizvesti), trokutasti ili četvrtasti (najpovoljniji za upravljanje procesom). Na slici (Slika 34.) prikazana je ovisnost struje zavarivanja o vremenu pri prijenosu metala impulsnim lukom [28].



Slika 34. Prijenos metala impulsnim lukom – promjena struje zavarivanja ovisno o vremenu [27]

Podršavanje parametara kod ovog načina prijenosa metala prilično je komplicirano i složeno jer treba uskladiti pet osnovnih parametara koji su [29]:

- vrijednost osnovne struje (služi za onemogućavanje gašenja luka nakon prestanka impulsa i podešava se na što manju vrijednost, najčešće se kreće u granicama između 20 A i 50 A),
- vrijednost vršne struje (određuje se prema vrsti osnovnog materijala, promjeru žice i mješavini zaštitnog plina, najčešće u granicama između 250 A i 650 A),

- širina impulsa (odabire se tako da omogući odvajanje samo jedne kapljice tijekom trajanja impulsa, najčešće u granicama između 1 ms i 3 ms),
- frekvencija (parametar koji predstavlja broj kapljica u sekundi i odabire se tako da kod određene brzine žice odvajanje kapljica bude stabilno, najčešće u području između 20 Hz i 300 Hz),
- brzina dodavanja žice (parametar kojem je podređeno podešavanje svih ostalih parametara i kojim se određuje količina rastaljenog metala, ovisi o promjeru žice i kreće u granicama između 2 m/min i 15 m/min)

Podešavanje parametara obavlja se elektronički pomoću programiranih uređaja (za jednu izabranu vodeću veličinu bira se optimalna kombinacija ostalih parametara). Dodatni materijali koji se najčešće koriste su pune elektrode (promjera od 0,8 mm do 1,6 mm) i praškom punjene elektrode (promjera od 1,2 mm do 2,0 mm), a zaštitni plinovi u kojima se postiže način prijenosa metala impulsnim lukom su plinske mješavine bogate argonom (kod ugljičnih čelika mogu se koristiti i plinske mješavine s maksimalno 18 % CO₂) [29].

Tablica 7. Prednosti i nedostaci prijenosa metala mješovitim lukom [31]

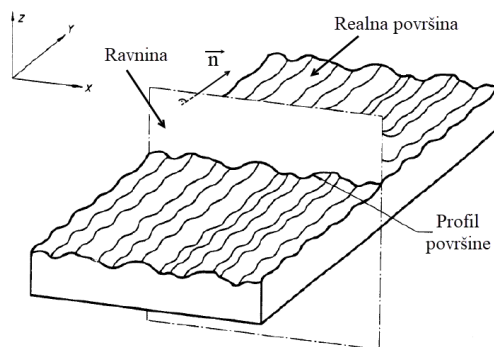
Prednosti	Nedostaci
- mogućnost primjene u svim položajima zavarivanja i za materijale osjetljive na količinu unesene topline	- skupa oprema
- moguće je istim promjerom žice zavarivati širi raspon debljine materijala	- skupe zaštitne plinske mješavine
- vrlo malo rasprskavanja	- potrebna dodatna zaštita zavarivača (veća energija električnog luka)
- mogućnost automatiziranja	
- mogućnost postizanja velikih brzina zavarivanja	- postupak zavarivanja je kompleksniji
- velika iskorištenost elektrode	- na otvorenom je obavezno potrebna zaštita od vjetra

5. PARAMETRI TEKSTURE POVRŠINE

Na tržištu, kvaliteta proizvoda predstavlja jedan od osnovnih čimbenika uspjeha. U današnje vrijeme postavljaju se sve složeniji zahtjevi pred sudionike koji osiguravaju tu kvalitetu, a to je omogućio napredak tehnologije i razvoj određenih područja znanosti koje osiguravaju uvid u puno bolju i napredniju kontrolu kvalitete. Dakle, pri samoj izradi dijelova u strojarskoj proizvodnji definiraju se sve kompleksniji zahtjevi u pogledu dopuštenih odstupanja s ciljem osiguravanja bolje zamjenjivosti i duljeg vijeka trajanja dijelova, tj. u konačnici bolje kvalitete gotovog proizvoda. Sužavanjem područja dopuštenih odstupanja kod izrade dijelova automatski se postavljaju stroži zahtjevi u pogledu obrade površine. Finija kvaliteta obrade uzrokuje povećane troškove proizvodnje zbog povećavanja relativnog vremena izrade čiji odnos nije linearan nego eksponencijalan. Stanje površine se prvenstveno ocjenjuje na temelju parametara hrapavosti čija su dopuštena odstupanja vrlo često definirana ispod vrijednosti 1 μm , tj. u području nanometarskih mjerenja. Budući da se radi o malim vrijednostima odstupanja pred proizvođačima mjerne opreme i mjeriteljskim sustavom postavljeni su vrlo visoki zahtjevi. Zbog navedenih razloga u mjeriteljstvu hrapavosti tehničkih površina posebna pažnja usmjerena je na osiguravanje mjernog jedinstva koje se odvija u okviru nekoliko područja [35]:

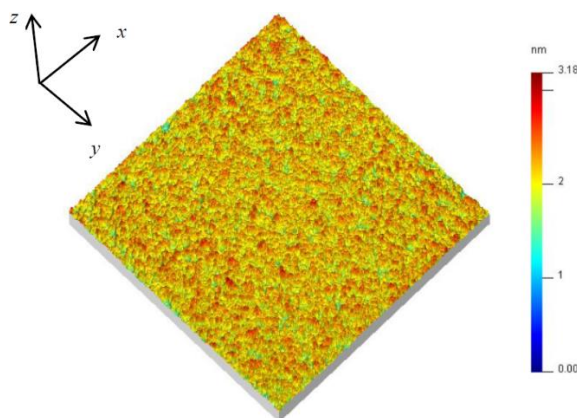
- Normizacija s ciljem definiranja jedinstvenih nacionalnih normi baziranih na ISO normama.
- Konstrukciji mjernih uređaja za ispitivanje hrapavosti tehničkih površina s ciljem osiguravanja mjerene obnovljivosti.
- Umjeravanju radnih etalona hrapavosti i uređaja s ciljem osiguravanja sljedivosti.

Mjernu površinu je moguće karakterizirati s 2D i 3D parametrima. Realna površina je definirana kao površina koja ograničava tijelo i odvaja ga od okolnog medija. Profil površine rezultat je presjeka realne površine i ravnine. Obično se odabire ravnina s normalom koja leži paralelno sa stvarnom površinom i u prikladnom smjeru. Primjer profila površine prikazan je slici (Slika 35.). Mjerenje 2D parametara profila površine je mjerenje linije površine koja se može opisati matematički kao funkcija $z = f(x)$, odnosno mjerenje okomito na smjer tragova. Riječ trag se koristi za opisivanje smjera dominantnog površinskog uzorka. U praksi se nastoji mjeriti okomito na trag, iako postoje iznimke osobito kod problema trenja ili brtvljenja [35].



Slika 35. Primjer profila površine [35]

Mjerenje prostorne teksture površine daje trodimenzionalni prikaz površine i matematički se može opisati kao funkcija $z = f(x, y)$. Primjer prostorne teksture površine je prikazan slikom (Slika 3636.). Područje uzorkovanja odnosi se na veličinu xy ravnine u kojoj se mjerenje izvodi [35].



Slika 36. Primjer prostorne teksture površine [35]

Prednosti 3D mjernog sustava mjerenja u odnosu na 2D sustav su sljedeće [35][35]:

- topografija površine je po prirodi trodimenzionalna te se stoga bolje može opisati 3D mjerenjima,
- trodimenzionalnim pristupom moguće je kvalitativno odrediti značajke površine kao što su udubine, uzdužni žljebovi, usmjerenost, anizotropija i nehomogenost te je također moguće provesti kvantifikaciju značajki površine
- parametri dobiveni 3D pristupom realniji su od onih dobivenih 2D pristupom
- mogućnost određivanja volumena brjegovova i dolova što naznačuje površine dodira (ove parametre nije moguće odrediti s 2D pristupom, a posebno su značajni za područje tribologije te omogućuju analizu funkcionalnih svojstava površina)
- statistička analiza 3D topografije površine je pouzdanija i reprezentativnija jer uzima u obzir veliki broj podataka

5.1. Amplitudni parametri teksture površine

Norma ISO 25178-2 predstavlja međunarodni standard koji se odnosi na geometrijsku specifikaciju proizvoda, odnosno teksturu površine i analizu hrapavosti površine. U njoj je egzaktno definirana sva potrebna terminologija, dakle nazivlje, definicije, parametri teksture površine, njihovi matematički izrazi itd. Norma klasificira trodimenzionalne parametre teksture površine u pet grupa [36]:

1. Amplitudni parametri (engl. Height parameters)
2. Prostorni parametri (engl. Spatial parameters)
3. Hibridni parametri (engl. Hybrid parameters)
4. Funkcijski i srodni parametri (engl. Functions and related parameters)
5. Razni parametri (engl. Miscellaneous parameters)

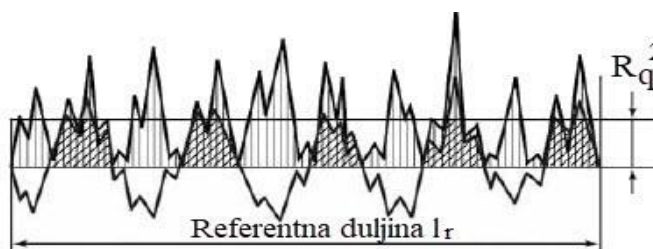
Za potrebe eksperimentalnog dijela diplomskog rada potrebni su amplitudni parametri koji su navedeni u tablici (Tablica 8.).

Tablica 8. Amplitudni parametri teksture površine [36]

Oznaka	Naziv parametra	Engl. naziv parametra
S_q	Srednje kvadratno odstupanje površine	Root mean square height
S_{sk}	Koeficijent asimetrije površine	Skewness
S_{ku}	Koeficijent oštine površine	Kurtosis
S_p	Najveća visina vrha površine	Maximum peak height
S_v	Najveća udubina površine	Maximum pit height
S_z	Najveća visina neravnine površine	Maximum height
S_a	Srednje aritmetičko odstupanje površine	Arithmetical mean height

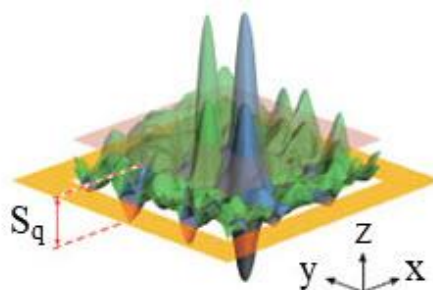
5.1.1. Srednje kvadratno odstupanje površine, S_q

S_q parametar predstavlja srednje kvadratno odstupanje površine na ordinati unutar definiranog područja, te je on ekvivalent standardnoj devijaciji visina [37]. Ovaj 3D parametar je proširen iz 2D parametra hrapavosti R_q (srednje kvadratno odstupanje linije). Na slikama (Slika 37. i Slika 38.) su prikazani primjeri za srednje kvadratno odstupanje linije (R_q) i površine (S_q), te su dane njihove jednadžbe (1) i (2) [38][39].



Slika 37. Srednje kvadratno odstupanje linije (R_q) [38]

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l_r} \int_0^{l_r} z^2(x) dx} \tag{1}$$

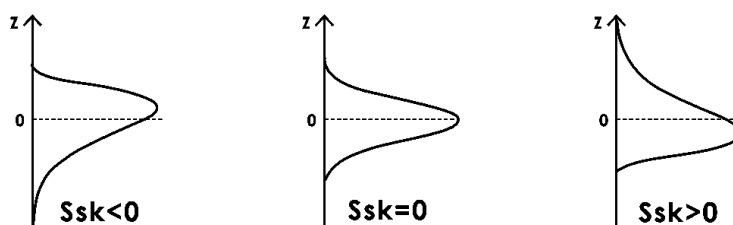


Slika 38. Srednje kvadratno odstupanje površine (S_q) [39]

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \tag{2}$$

5.1.2. Koeficijent asimetrije površine S_{sk}

Koeficijent asimetrije površine (S_{sk}) je amplitudni parametar čija vrijednost predstavlja stupanj iskrivljenosti, odnosno tendenciju površinske hrapavosti u odnosu na prosječnu vrijednost površine. Primjeri ovog parametra prikazani su slikom (Slika 39.), a matematički zapis je dan jednadžbom (3) [39][39].



Slika 39. Primjeri koeficijenata asimetrije površine [37]

$S_{sk} < 0$: Raspodjela visina je iskrivljena iznad prosječne visine ispitane površine.

$S_{sk} = 0$: Raspodjela visina je oko prosječne visine ispitane površine (normalna distribucija).

$S_{sk} > 0$: Raspodjela visina iskrivljena je ispod prosječne visine ispitane površine.

$$S_{sk} = \frac{1}{S_q^3} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy \right] \tag{3}$$

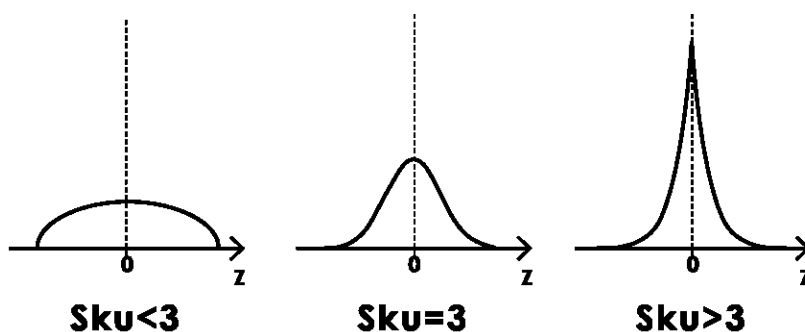
5.1.3. Koeficijent oštine površine S_{ku}

Vrijednost ovog parametra predstavlja mjeru oštine hrapavosti profila površine. Slika 40. prikazuje primjere koeficijenta oštine površine, a matematički zapis dan je jednačbom (4) [39].

$S_{ku} < 3$: Oblik raspodjele visina hrapavosti površine je zgnječen.

$S_{ku} = 3$: Oblik raspodjele visina hrapavosti površine je normalan.

$S_{ku} > 3$: Oblik raspodjele visina hrapavosti površine je šiljast.

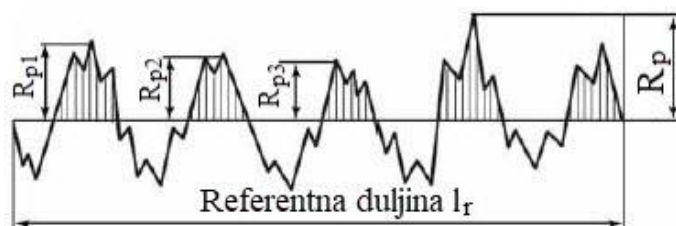


Slika 40. Primjere koeficijenta oštine površine S_{ku} [37]

$$S_{ku} = \frac{1}{S_q^4} \left[\frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy \right] \tag{4}$$

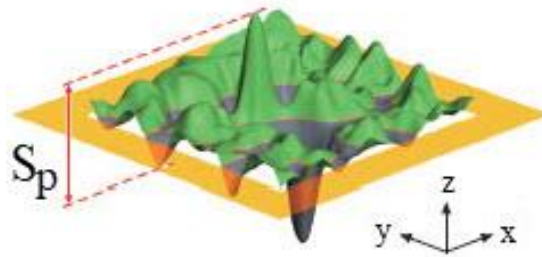
5.1.4. Najveća visina vrha površine S_p

Vrijednost ovog parametra predstavlja najveću visinu vrha površine ispitivanog područja. Ovaj 3D parametar je proizašao iz 2D parametra R_p (najveća visina vrha linije). Na slikama (Slika 41. i Slika 42.) su prikazani primjere najveće visine vrha linije (R_p) i površine (S_p), te su dane njihove jednačbe (5) i (6) [39].



Slika 41. Najveća visina vrha linije (R_p) [38]

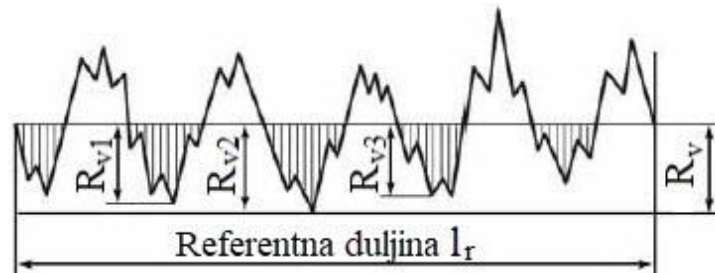
$$R_p = \max(z(x)) \tag{5}$$

Slika 42. Najveća visina vrha površine (S_p) [39]

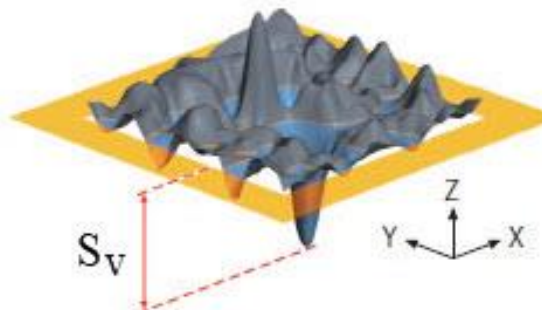
$$S_p = \max(z(x, y)) \quad (6)$$

5.1.5. Najveća dubina površine S_v

Vrijednost S_v parametra predstavlja najveću visinu udubine određenog ispitnog područja. Slika 43. prikazuje 2D parametar R_v (najveća dubina profila linije) koji je prethodnik S_v parametru. Slika 44. prikazuje primjer S_v parametra. Matematički zapisi za oba primjera parametra dani su jednadžbama (7) i (8) [39].

Slika 43. Najveća dubina profila linije (R_v) [38]

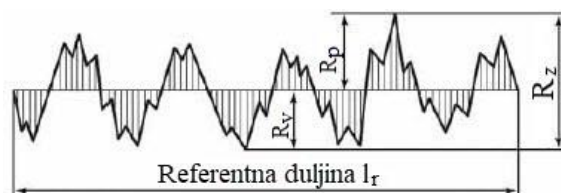
$$R_v = |\min(z(x))| \quad (7)$$

Slika 44. Najveća dubine površine (S_v) [39]

$$S_v = |\min(z(x, y))| \quad (8)$$

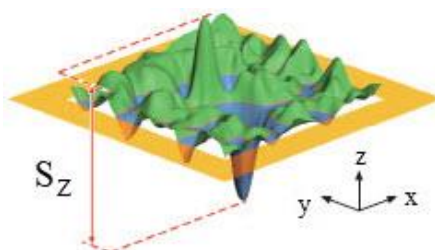
5.1.6. Najveća visina neravnine površine S_z

Amplitudni parametar S_z definiran je kao suma najveće visine vrha površine i najveće dubine površine. Na slikama (Slika 45. i Slika 46.) prikazani su primjeri za najveću visinu neravnine profila linije (R_z) i površine (S_z). Matematički zapisi parametara dani su jednadžbama (9) i (10) [39].



Slika 45. Najveća visina neravnine profila linije (R_z) [38]

$$R_z = R_p + R_v \quad (9)$$

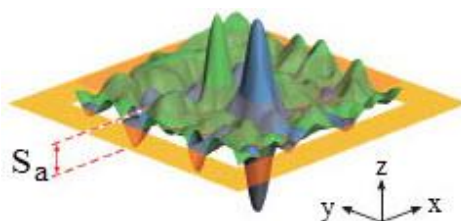


Slika 46. Najveća visina neravnine površine (S_z) [39]

$$S_z = S_p + S_v \quad (10)$$

5.1.7. Srednje aritmetičko odstupanje površine S_a

Amplitudni parametar teksture površine S_a je ekvivalent aritmetičkoj sredini izmjerene površine kada su doline zamijenjene u brjegovе, a to je ostvareno apsolutnom vrijednošću kao što je prikazano jednadžbom (11). Kao i kod svih spomenutih amplitudnih parametara, ovaj 3D parametar je proizašao iz 2D parametra R_a (srednje aritmetičko odstupanje profila linije) koji se općenito koristi za procjenu hrapavosti površine [39]. Slika 47. prikazuje srednje aritmetičko odstupanje površine.



Slika 47. Srednje aritmetičko odstupanje površine (S_a) [39]

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (11)$$

6. EKSPERIMENTALNI DIO

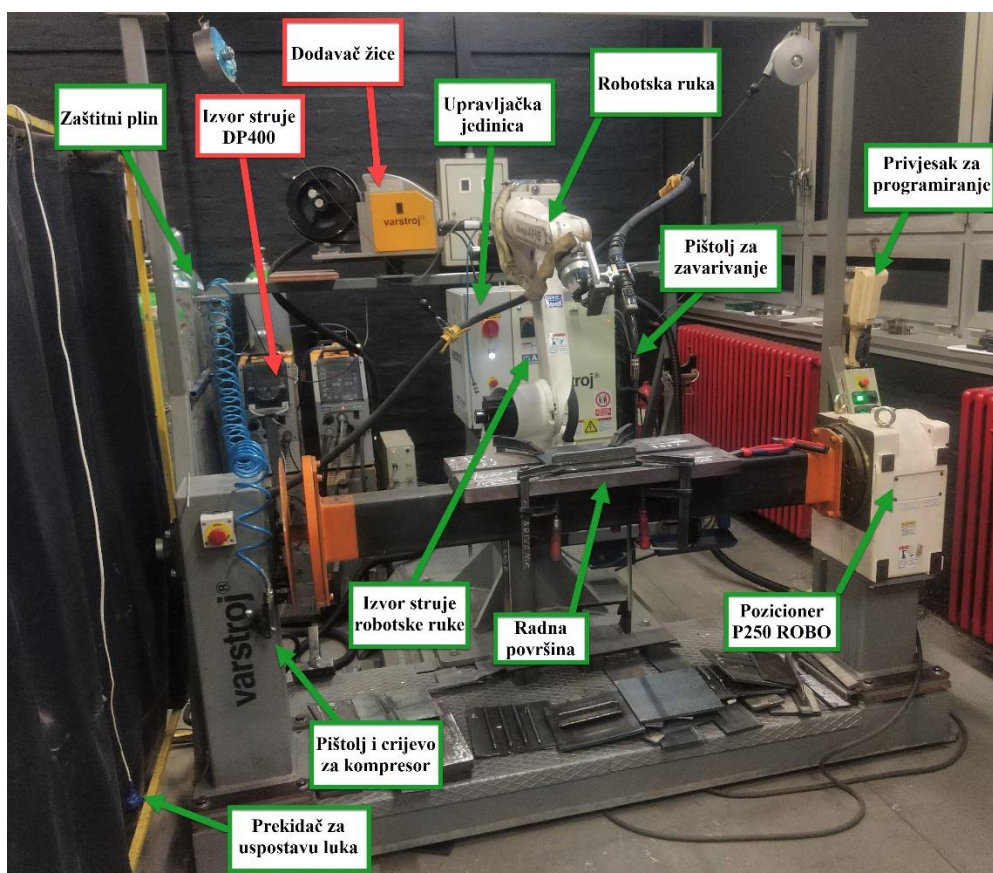
Slijedi eksperimentalni dio rada koji je proveden u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Dakle, zadatak je bio pomoću WAAM postupka izraditi više uzoraka s različitim parametrima zavarivanja, preciznije s različitim omjerima brzine žice i brzine zavarivanja u odnosu na brzinu zavarivanja. Tijekom izrade zidova za svaki prolaz bilo je potrebno odrediti njegove osnovne geometrijske značajke i parametre zavarivanja. Nakon što su zidovi izrađeni slijedilo je mjerenje i rezanje istih za izradu uzoraka. Zatim se na dobivenim uzorcima ispitala makrostruktura i tvrdoća. Nadalje, bilo je potrebno ispitati parametre teksture površine izrađenih zidova. Na temelju prikupljenih rezultata bilo je potrebno analizirati i u konačnici donijeti određene zaključke vezane na utjecaj omjera brzine zavarivanja i brzine žice zavarivanja na geometrijske značajke proizvoda izrađenog aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom.

6.1. Potrebna oprema i pribor

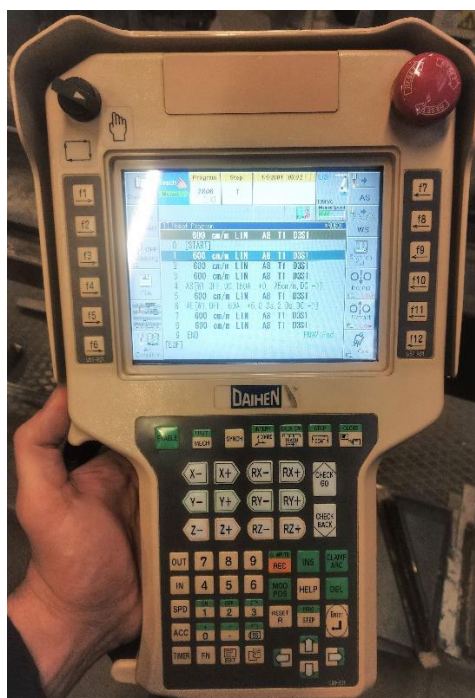
Općenito prije svakog eksperimenta poželjno je osmisliti plan rada, odnosno kojim će se redosljedom i na koji način izvoditi eksperiment. Pri izradi plana uzete su poznate informacije kao što su materijal i postupak zavarivanja. Nakon određivanja plana, postignut je uvid u svu potrebnu opremu, pribor i materijal. Stoga, sljedeći korak u eksperimentu bio je priprema opreme, pribora i potrebnog materijala.

6.1.1. *Robotska stanica i oprema za manipulaciju*

Postupak zavarivanja zidova izveden je robotiziranim MAG postupkom na robotskoj stanici Almega OTC AX V6. Robotska stanica je složeni uređaj koji se sastoji od robotske ruke sa šest stupnjeva slobode gibanja na kojoj je spojen pištolj za zavarivanje. Robotska ruka povezana je s upravljačkom jedinicom koja ima poseban izvor struje za napajanje, a programiranje se izvodi „online“ metodom pomoću privjeska za programiranje (Slika 49.). Također, ova robotska postaja je integrirana s izvorom struje DP 400 i dodavačem žice, međutim u ovome eksperimentu nisu korišteni. Za potrebe manipulacije radnog komada ova robotska stanica opremljena je s okretnim stolom P250 ROBO, no u ovome eksperimentu tijekom izrade zidova, pištolj za zavarivanje je bio u neutralnom položaju, bez nagiba i nije bilo potrebno koristiti okretati radni stol jer se navarivanje vršilo u PA položaju. Slika 48. prikazuje opisanu robotsku stanicu i sve njezine bitne dijelove, također na slici su označeni zelenom bojom dijelovi koji su korišteni.



Slika 48. Robotska stanica Almega OTC AX V6



Slika 49. Privjesak za programiranje robota

6.1.2. Stroj za zavarivanje

Budući da se eksperiment bazirao na proučavanju utjecaja omjera brzine žice i brzine zavarivanja u odnosu na brzinu zavarivanja, bilo je potrebno na temelju toga izabrati adekvatan stroj za zavarivanje. U fazi prije glavnog dijela eksperimenta, odnosno u procesu ispitivanja parametara zaključilo se da je uređaj za zavarivanje DP 400, koji je integriran s robotskom stanicom, nije idealan za rad ovog eksperimenta zbog toga što pri višim iznosima jakosti struje, stroj za zavarivanje ispostavlja 1,4 puta veću struju od zadane vrijednosti što u konačnici utječe i na brzinu žice. Iz tog razloga je izabran uređaj za MAG zavarivanje Titan XQ 350 puls DW. Ovaj uređaj je povezan sa sustavom za dodavanje žice Drive XQ EX MMA DGC. Slika 50. prikazuje prethodno spomenute uređaje, a u tablicama (Tablica 9. i Tablica 1010.) su dane njihove osnovne tehničke karakteristike.



a)



b)

Slika 50. EWM oprema: a) uređaj za zavarivanje Titan XQ 350 puls DW, b) uređaj za dovod žice Drive XQ EX MMA DGC [41]

Tablica 9. Tehničke karakteristike uređaja Titan XQ 350 puls DW [40]

Karakteristike	Vrijednosti
Raspon struje zavarivanja	5-350A
Ostvariva 100% intermitencija pri temperaturi okoline	40°C
100% intermitencija	350 A
Napon praznog hoda	82 V
Napon glavnog napajanja (tolerancija)	3 x 400 V (-25% - +20%)
Masa	128,5 kg
Dimenzije	1152 mm x 686 mm x 976 mm
Radna temperatura okoline	-25°C do 40°C

Tablica 10. Tehničke karakteristike sustava za dovod žice Drive XQ EX MMA DGC [41][41]

Karakteristike	Vrijednosti
Raspon brzina žice	0,5 – 25 m/min
Kompatibilni promjer koluta žice	D200/D300
Promjer valjčića	37 mm
Dimenzije (D x Š x V)	660 x 280 x 380 mm
Masa	13 kg

6.1.3. Dodatni materijal

U eksperimentu za izradu zidova koristila se puna žica trgovačkog naziva EZ-SG 2 (proizvođač Elektroda Zagreb d.d.), promjera 1,2 mm. Prema normi HRN EN ISO 14341-A ova žica ima oznaku G 42 4 C/M 3Si1. Ova žica je pobakrena ili pobrončana te se koristi za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 N/mm². Kemijski sastav i mehanička svojstva prikazani su tablicama (Tablica 11. i Tablica 12.) [42].

Tablica 11. Kemijski sastav žice EZ- SG 2 [42]

Kemijski element	C	Mn	Si	Cu
Maksimalan udio elementa, %	0,06 - 0,13	1,4 - 1,6	0,7 – 1,0	≤0,3

Tablica 12. Mehanička svojstva žice EZ- SG 2 [42]

Mehanička svojstva žice	Minimalna granica tečenja R_e , N/mm ²	Vlačna čvrstoća R_m , N/mm ²	Istezljivost A_5 , %	Udarni rad loma KV , J (-40°C)
Vrijednosti	> 430	500 – 640	> 22	≥ 47

6.1.4. Zaštitni plin

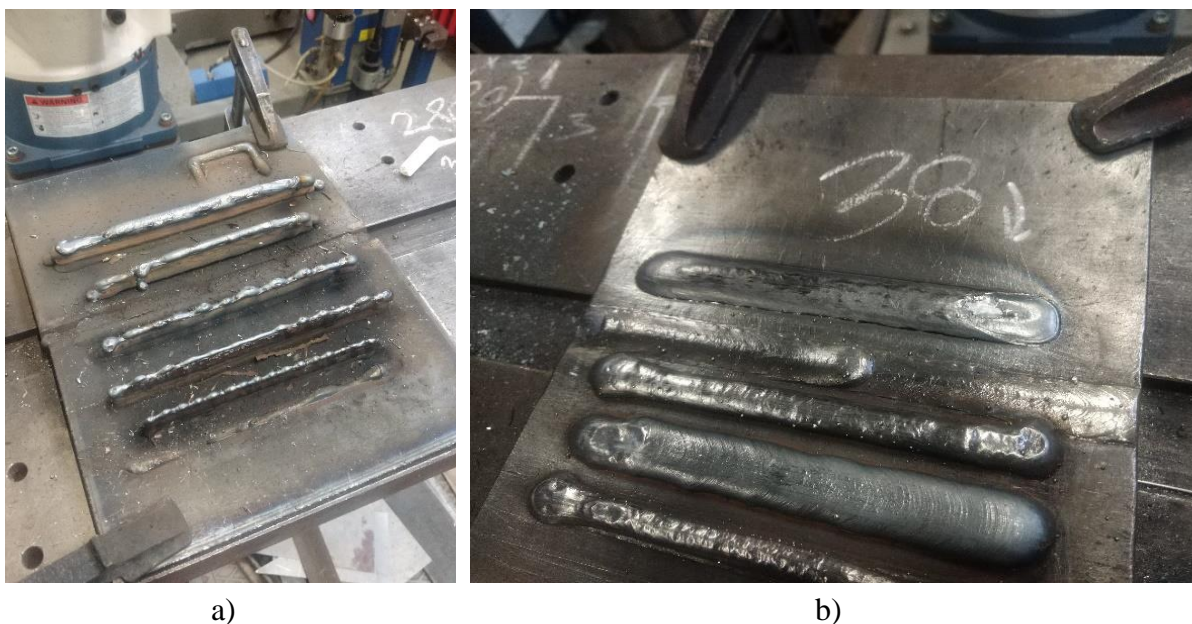
Na temelju postupka zavarivanja i dodatnog materijala odabran je plin. Zaštitni plin koji se koristio bio je mješavina argona i ugljikova dioksida, a volumni sastav je bio u odnosu 82% Ar i 18% CO₂ (Slika 51.). Prema normi EN ISO 14175 plin ima oznaku M21-ArC-18.

**Slika 51. Zaštitni plin M21-ArC-18 (Ferroline C18)**

6.2. Određivanje parametara zavarivanja

Nakon pripreme opreme, pribora i dodatnog materijala slijedilo je određivanje parametara zavarivanja. Ova faza eksperimenta bila je bitna i zahtjevna jer se htjelo ispitati granično područje u kojemu parametri navarivanja još uvijek daju dobre rezultati, tj. izgledom prihvatljive navare.

Prije samog procesa ispitivanja određeno je područje parametara koje će se ispitivati. Raspon brzine žice, tj. jakosti struje definirao je stroj za zavarivanje te je na temelju tih podataka izrađena tablica koja pokazuje određene omjere brzine žice i brzine zavarivanja. Slijedeći korak bio je sam proces ispitivanja. U procesu ispitivanja svaki prolazak navarivanja se ocjenjivao, ocjenom prihvatljiv ili neprihvatljiv i bilježio u prethodno spomenutu tablicu. Slika 52. prikazuje ploče nakon ispitivanja parametara i na njima možemo vidjeti kako su neki parametri dali uspješne, a neki neuspješne rezultate.



Slika 52. Ispitivanje parametara: a) uži navari, b) deblji navari

Rezultat cijelog procesa ispitivanja prikazan je tablicom (Tablica 13.). U njoj se nalaze polja koja predstavljaju određeni parametar zavarivanja. Polja koja su obojana zelenom bojom predstavljaju ispitane parametre s uspješnim navarom, dok crvenom bojom, šrafirana polja predstavljaju ispitane parametre s neuspješnim rezultatom navara. Prazna polja predstavljaju parametre koji nisu ispitani. Općenito brzina žice izražava se u m/min, a brzina zavarivanja u cm/min. Budući da je bilo potrebno odrediti omjere tih veličina, vrijednosti brzine zavarivanja u tablici su zapisane u m/min.

Tablica 13. Pregled parametara zavarivanja

Omjer V_z/V_{zav}	Brzina žice (v_z), m/min																							
	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
I, A	58	70	83	95	108	120	139	158	176	195	208	221	234	248	261	274	287	300	308	317	325	333	342	350
3																								
$V_{zav}, m/min$	0,5	0,67	0,83	1	1,17	1,33	1,5	1,67	1,83	2	2,16	2,33	2,5	2,67	2,83	3	3,16	3,33	3,5	3,67	3,83	4	4,16	4,33
5																								
$V_{zav}, m/min$	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
8																								
$V_{zav}, m/min$	0,188	0,25	0,313	0,375	0,438	0,5	0,563	0,625	0,688	0,75	0,813	0,875	0,938	1	1,063	1,125	1,188	1,25	1,313	1,375	1,438	1,5	1,563	1,625
10																								
$V_{zav}, m/min$	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,65	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3
15																								
$V_{zav}, m/min$	0,1	0,13	0,17	0,2	0,23	0,27	0,3	0,33	0,37	0,4	0,43	0,47	0,5	0,53	0,57	0,6	0,63	0,67	0,7	0,73	0,77	0,8	0,83	0,87
20																								
$V_{zav}, m/min$	0,075	0,1	0,125	0,15	0,175	0,2	0,225	0,25	0,275	0,3	0,325	0,35	0,375	0,4	0,425	0,45	0,475	0,5	0,525	0,55	0,575	0,6	0,625	0,65
25																								
$V_{zav}, m/min$	0,06	0,08	0,1	0,12	0,14	0,16	0,18	0,2	0,22	0,24	0,26	0,28	0,3	0,32	0,34	0,36	0,38	0,4	0,42	0,44	0,46	0,48	0,5	0,52
50																								
$V_{zav}, m/min$	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26

6.3. Parametri i osnovne geometrijske značajke zida

Cilj zadatka bio je izraditi zidove s 3 različita omjera brzine žice i brzine zavarivanja (v_z/v_{zav}) u kombinaciji s 3 različite brzine zavarivanja, što u konačnici daje 9 zidova s različitim parametrima zavarivanja. U tablici (Tablica 14.) se nalaze izabrani parametri za izradu zidova. Također, u tablici su zidovi jednakih omjera grupirani po bojama i taj način grupacije će se koristiti kroz cijelo poglavlje radi lakše usporedbe rezultata u dijagramima i tablicama. Dimenzije zidova koje su se htjele postići su 250 mm duljine i 40 mm visine.

Tablica 14. Izabrani parametri za izradu zidova

Parametri	1. zid	2. zid	3. zid	4. zid	5. zid	6. zid	7. zid	8. zid	9. zid
Omjer v_z/v_{zav}	15	25	45	15	25	45	15	25	45
Brzina zavarivanja v_{zav} , cm/min	13	8	4	37	22	12	60	36	20
Brzina žice v_z , m/min	2	2	2	5,5	5,5	5,5	9	9	9
Jakost struje I , A	70	70	70	176	176	176	274	274	274

Pomagala i instrumenti koji su bili potrebni i koji su se koristili u ovome dijelu eksperimenta su:

- pomično mjerilo (poslije svakog prolaza mjerila se visina i širina zida)
- infracrveni termometar (koristio se za kontrolu temperature međuprolaza)
- žičana, čelična - zavarivačka četka (četkom se čistio svaki prolaz)
- kompresor (koristio se za hlađenje zida na temperaturu manju od 130°C)
- kliješta za rezanje žice i stege.

Naravno, tijekom zavarivanja koristila se zaštitna oprema:

- zavarivačka maska
- zaštitne naočale
- zavarivačke rukavice
- zavarivačka kuta.

Proces izrade zidova započeo je pripremom ploče koja se stegama fiksirala za radni stol (Slika 53.). Zatim se ploča četkala i očistila od nečistoća kako bi prvi prolaz zavarivanja bio što bolji. Nakon toga, na privjesku za programiranje robota napravljena su dva programa. Oni su služili za kretanje robotske ruke, odnosno pištolja za zavarivanje. Jedan program je bio namijenjen za navarivanje u desnu stranu, a drugi u lijevu. Razlog ovakvog pristupa je izbjegavanje nepravilnosti u geometriji zida. Poslije svakog prolaza rasla je visina zida, te je zbog toga bilo potrebno prije svakog novog prolaza prilagoditi program, odnosno putanju. Tijekom procesa izrade zidova izvodilo se mjerenje i bilježenje geometrijskih značajki zidova (visina i širina). Uz to su se očitavali parametri jakosti struje i napona zavarivanja. Pomoću očitanih vrijednosti računao se unos topline prema sljedećem izrazu [43]:

$$Q = k \times \frac{U \times I}{v_z} \times 10^{-3} \quad (12)$$

Q – unesena toplotina u zavar, kJ/mm

k – koeficijent iskoristivosti postupka zavarivanja (za MAG postupka iznosi 0,8)

U – napon zavarivanja, V

I – jakost struje zavarivanja, A

v_z – brzina zavarivanja, mm/s



Slika 53. Stegnuta ploča za radni stol

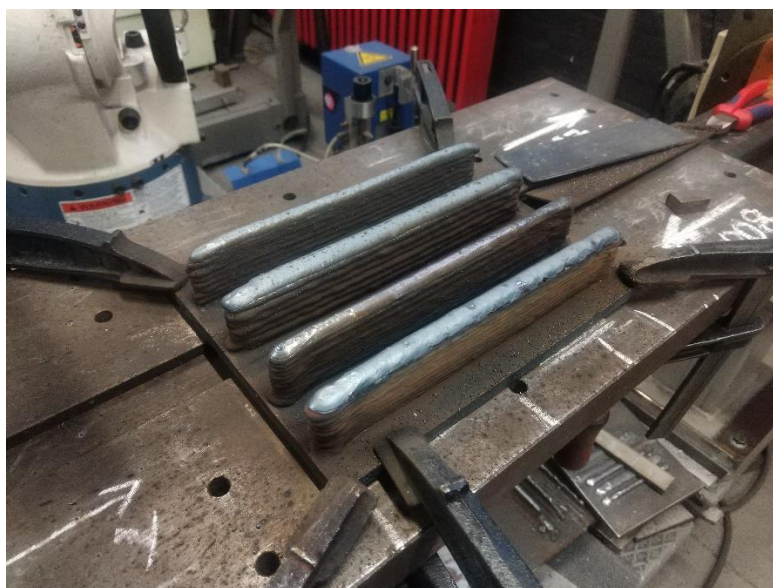
Kod zidova koji su imali male parametre jakosti struje bilo je potrebno prvi prolaz napraviti sa jačim strujama radi bolje penetracije, dakle to se odnosi na prva tri zida. Nadalje, u nastavku slijedi slikovni i tablični prikaz zidova. U tablicama su zapisane vrijednosti geometrijskih značajki, očitanih parametara i izračunate vrijednosti unesene topline po prolazu.



Slika 54. Izrađeni 1. zid



Slika 55. Izrađeni 2., 3. i 4. zid



Slika 56. Izrađeni 5., 6., 7. i 8. zid

Tablica 15. Značajke 1. zida

Jakost struje (I)				70 A					Plin				M21-ArC-18		
Brzina žice (v_z)				2 m/min					Temp. međuprolaza (ϑ)				130°C		
Brzina zavarivanja (v_z)				13 cm/min					Protok plina (q)				19 l/min		
Omjer				15					Slobodni kraj žice				10 - 13 mm		
Broj prolaza	Visina zida h , mm			Prosječna visina, mm	Prirast po prolazu Δh , mm			Prosječni prirast, mm	Širina zida b , mm			Prosječna širina, mm	Jakost struje - I , A	Napon - U , V	Unos topline - Q , J/mm
	Pozicija mjerenja				Pozicija mjerenja				Pozicija mjerenja						
	1.	2.	3.		1.	2.	3.		1.	2.	3.				
1.	3,4	3,5	3,5	3,5	3,4	3,5	3,5	3,5	6,7	7,0	7,1	6,9	151	17,7	475
2.	5,8	5,6	5,7	5,7	2,4	2,1	2,2	2,2	7,2	6,8	6,8	6,9	83	14,8	218
3.	7,5	7,2	7,5	7,4	1,7	1,6	1,8	1,7	4,0	4,5	4,7	4,4	71	14,5	183
4.	9,6	9,8	9,7	9,7	2,1	2,6	2,2	2,3	6,1	6,1	6,4	6,2	69	14,5	178
5.	12,1	12,2	12,2	12,2	2,5	2,4	2,5	2,5	6,2	7,2	7,4	6,9	82	14,7	445
6.	14,7	14,7	14,8	14,7	2,6	2,5	2,6	2,6	7,0	6,9	7,1	7,0	83	14,7	450
7.	16,9	17,3	17,5	17,2	2,2	2,6	2,7	2,5	7,3	7,0	6,7	7,0	82	14,8	448
8.	20,1	19,9	20,2	20,1	3,2	2,6	2,7	2,8	7,0	6,6	7,2	6,9	82	14,7	445
9.	22,6	22,8	23,0	22,8	2,5	2,9	2,8	2,7	7,0	6,8	6,8	6,9	82	14,8	448
10.	25,3	25,5	25,3	25,4	2,7	2,7	2,3	2,6	7,0	6,8	6,6	6,8	80	14,8	437
11.	28,2	28,1	28,2	28,2	2,9	2,6	2,9	2,8	7,7	7,0	7,4	7,4	82	14,8	448
12.	30,3	30,0	30,8	30,4	2,1	1,9	2,6	2,2	7,0	7,2	7,5	7,2	81	14,8	443
13.	33,4	33,5	33,8	33,6	3,1	3,5	3,0	3,2	7,5	6,7	7,2	7,1	81	14,8	443
14.	36,6	35,8	36,0	36,1	3,2	2,3	2,2	2,6	7,1	6,6	6,9	6,9	80	14,8	437
15.	38,5	39,1	38,7	38,8	1,9	3,3	2,7	2,6	7,6	7,0	7,1	7,2	82	14,7	445
16.	40,8	41,8	41,5	41,4	2,3	2,7	2,8	2,6	7,5	6,7	7,0	7,1	82	14,8	448
17.	43,1	44,3	44,2	43,9	2,3	2,5	2,7	2,5	7,3	7,0	6,7	7,0	81	14,7	440
18.	45,7	46,4	46,7	46,3	2,6	2,1	2,5	2,4	7,0	6,9	6,5	6,8	80	14,7	434

Tablica 16. Značajke 2. zida

Jakost struje (I)				70 A					Plin			M21-ArC-18			
Brzina žice (v_z)				2 m/min					Temp. međuprolaza (ϑ)			130°C			
Brzina zavarivanja (v_z)				8 cm/min					Protok plina (q)			19 l/min			
Omjer				25					Slobodni kraj žice (L)			10 - 13 mm			
Broj prolaza	Visina zida h , mm			Prosječna visina, mm	Prirast po prolazu Δh , mm			Prosječni prirast, mm	Širina zida b , mm			Prosječna širina, mm	Jakost struje - I , A	Napon - U , V	Unos topline - Q , J/mm
	Pozicija mjerenja				Pozicija mjerenja				Pozicija mjerenja						
	1.	2.	3.		1.	2.	3.		1.	2.	3.				
1.	4,2	4,6	4,3	4,4	4,2	4,6	4,3	4,4	6,8	6,6	8,9	7,4	180	18,1	782
2.	7,5	7,6	7,5	7,5	3,3	3,0	3,2	3,2	8,6	8,6	9,0	8,7	85	14,7	750
3.	10,1	9,5	10,7	10,1	2,6	1,9	3,2	2,6	9,0	9,3	9,2	9,2	89	14,5	774
4.	13,5	13,8	14,5	13,9	3,4	4,3	3,8	3,8	8,8	9,0	10,0	9,3	88	14,5	766
5.	16,8	16,5	16,8	16,7	3,3	2,7	2,3	2,8	8,9	8,9	9,0	8,9	87	14,7	767
6.	19,8	19,8	19,6	19,7	3,0	3,3	2,8	3,0	9,3	9,8	9,8	9,6	87	14,5	757
7.	22,6	23,0	22,9	22,8	2,8	3,2	3,3	3,1	9,0	9,1	9,3	9,1	88	14,5	766
8.	26,3	26,2	26,3	26,3	3,7	3,2	3,4	3,4	9,1	9,7	9,9	9,6	88	14,5	766
9.	29,3	29,0	29,3	29,2	3,0	2,8	3,0	2,9	9,0	9,3	8,9	9,1	87	14,5	757
10.	32,3	32,5	32,7	32,5	3,0	3,5	3,4	3,3	9,5	9,9	9,8	9,7	88	14,5	766
11.	35,4	35,4	35,7	35,5	3,1	2,9	3,0	3,0	9,0	9,1	9,3	9,1	87	14,5	757
12.	38,4	38,4	38,5	38,4	3,0	3,0	2,8	2,9	10,2	9,9	9,7	9,9	87	14,7	767
13.	41,2	41,9	42,0	41,7	2,8	3,5	3,5	3,3	9,2	8,9	9,0	9,0	85	14,7	750

Tablica 17. Značajke 3. zida

Jakost struje (I)				70 A					Plin				M21-ArC-18		
Brzina žice (v_z)				2 m/min					Temp. međuprolaza (ϑ)				130°C		
Brzina zavarivanja (v_z)				4 cm/min					Protok plina (q)				19 l/min		
Omjer				45					Slobodni kraj žice (L)				10 - 13 mm		
Broj prolaza	Visina zida h , mm			Prosječna visina, mm	Prirast po prolazu Δh , mm			Prosječni prirast, mm	Širina zida b , mm			Prosječna širina, mm	Jakost struje - I , A	Napon - U , V	Unos topline - Q , J/mm
	Pozicija mjerenja				Pozicija mjerenja				Pozicija mjerenja						
	1.	2.	3.		1.	2.	3.		1.	2.	3.				
1.	4,0	4,5	6,0	4,8	4,0	4,5	6,0	4,8	12,5	12,3	12,2	12,3	202	19,2	1330
2.	10,8	11,1	11,8	11,2	6,8	6,6	5,8	6,4	11,2	11,1	12,2	11,5	89	14,8	1581
3.	16,0	16,7	17,3	16,7	5,2	5,6	5,5	5,4	12,5	12,1	12,0	12,2	85	14,8	1510
4.	21,0	21,6	21,6	21,4	5,0	4,9	4,3	4,7	12,0	12,3	12,6	12,3	87	14,8	1545
5.	26,9	26,9	26,8	26,9	5,9	5,3	5,2	5,5	12,1	12,3	12,5	12,3	85	14,7	1499
6.	31,3	31,6	31,9	31,6	4,4	4,7	5,1	4,7	12,6	12,4	12,6	12,5	85	14,8	1510
7.	37,0	37,2	37,5	37,2	5,7	5,6	5,6	5,6	12,2	12,5	12,4	12,4	84	15,0	1512
8.	42,3	42,4	42,5	42,4	5,3	5,2	5,0	5,2	12,2	12,4	12,6	12,4	84	14,8	1492

Tablica 18. Značajke 4. zida

Jakost struje (I)				176 A					Plin				M21-ArC-18		
Brzina žice (v_z)				5,5 m/min					Temp. međuprolaza (ϑ)				130°C		
Brzina zavarivanja (v_z)				37 cm/min					Protok plina (q)				19 l/min		
Omjer				15					Slobodni kraj žice (L)				10 - 13 mm		
Broj prolaza	Visina zida h , mm			Prosječna visina, mm	Prirast po prolazu Δh , mm			Prosječni prirast, mm	Širina zida b , mm			Prosječna širina, mm	Jakost struje – I , A	Napon – U , V	Unos topline – Q , J/mm
	Pozicija mjerenja				Pozicija mjerenja				Pozicija mjerenja						
	1.	2.	3.		1.	2.	3.		1.	2.	3.				
1.	4,2	4,5	5,4	4,7	4,2	4,5	5,4	4,7	11,4	11,0	11,5	11,3	195	19,2	998
2.	6,5	6,5	6,7	6,6	2,3	2,0	1,3	1,9	8,9	9,0	7,9	8,6	193	19,0	476
3.	9,1	8,9	9,2	9,1	2,6	2,4	2,5	2,5	12,1	12,1	12,0	12,1	190	19,0	963
4.	11,9	11,6	11,7	11,7	2,8	2,7	2,5	2,7	7,9	7,3	7,2	7,5	186	19,2	463
5.	12,8	13,0	12,7	12,8	0,9	1,4	1,0	1,1	8,5	8,5	8,8	8,6	191	19,0	471
6.	14,8	14,3	14,3	14,5	2,0	1,3	1,6	1,6	7,0	8,4	8,5	8,0	191	19,2	476
7.	16,1	16,5	16,9	16,5	1,3	2,2	2,6	2,0	8,5	8,4	8,0	8,3	191	19,2	476
8.	18,6	18,6	18,7	18,6	2,5	2,1	1,8	2,1	8,3	8,3	8,4	8,3	189	19,1	468
9.	20,3	20,4	20,4	20,4	1,7	1,8	1,7	1,7	8,7	8,5	8,6	8,6	191	19,2	476
10.	22,4	22,5	22,5	22,5	2,1	2,1	2,1	2,1	8,3	8,1	8,4	8,3	186	19,3	466
11.	24,5	24,3	24,5	24,4	2,1	1,8	2,0	2,0	8,4	8,3	8,4	8,4	188	19,2	468
12.	26,2	26,1	26,3	26,2	1,7	1,8	1,8	1,8	8,4	8,5	8,5	8,5	189	19,2	471
13.	28,7	28,2	28,0	28,3	2,5	2,1	1,7	2,1	8,6	8,8	8,8	8,7	191	19,1	473
14.	30,1	29,9	30,2	30,1	1,4	1,7	2,2	1,8	8,7	8,6	8,5	8,6	188	19,2	468
15.	32,7	32,1	32,3	32,4	2,6	2,2	2,1	2,3	8,7	8,6	8,9	8,7	190	19,2	473
16.	34,4	34,0	34,9	34,4	1,7	1,9	2,6	2,1	8,3	8,9	8,6	8,6	191	19,1	473
17.	36,1	36,0	36,2	36,1	1,7	2,0	1,3	1,7	8,4	8,8	8,7	8,6	194	19,0	478
18.	37,8	37,8	37,3	37,6	1,7	1,8	1,1	1,5	8,4	8,5	8,6	8,5	191	19,2	476
19.	39,7	39,7	39,6	39,7	1,9	1,9	2,3	2,0	8,8	8,6	8,7	8,7	194	19,2	483
20.	41,5	41,5	41,3	41,4	1,8	1,8	1,7	1,8	8,8	8,7	8,5	8,7	193	19,0	476
21.	43,3	43,5	43,0	43,3	1,8	2,0	1,7	1,8	8,4	8,5	8,9	8,6	196	19,0	483
22.	45,1	45,4	45,0	45,2	1,8	1,9	2,0	1,9	8,4	8,7	8,9	8,7	190	19,2	473
23.	47,5	47,4	47,1	47,3	2,4	2,0	2,1	2,2	8,5	8,4	9,3	8,7	195	19,0	481
24.	49,0	49,1	49,0	49,0	1,5	1,7	1,9	1,7	8,5	8,9	8,9	8,8	192	19,0	476

Tablica 19. Značajke 5. zida

Jakost struje (I)				176 A					Plin			M21-ArC-18			
Brzina žice (v_z)				5,5 m/min					Temp. međuprolaza (ϑ)			130°C			
Brzina zavarivanja (v_z)				22 cm/min					Protok plina (q)			19 l/min			
Omjer				25					Slobodni kraj žice (L)			10 - 13 mm			
Broj prolaza	Visina zida h , mm			Prosječna visina, mm	Prirast po prolazu Δh , mm			Prosječni prirast, mm	Širina zida b , mm			Prosječna širina, mm	Jakost struje - I , A	Napon - U , V	Unos topline - Q , J/mm
	Pozicija mjerenja				Pozicija mjerenja				Pozicija mjerenja						
	1.	2.	3.		1.	2.	3.		1.	2.	3.				
1.	4,8	4,3	3,8	4,3	4,8	4,3	3,8	4,3	10,0	10,5	10,5	10,3	200	19,2	922
2.	6,1	6,3	6,1	6,2	1,3	2,0	2,3	1,9	10,4	10,8	10,9	10,7	194	19,0	804
3.	9,3	9,2	9,2	9,2	3,2	2,9	3,1	3,1	11,5	11,6	11,9	11,7	192	19,0	796
4.	10,9	10,9	11,3	11,0	1,6	1,7	2,1	1,8	11,7	11,9	11,9	11,8	191	19,2	800
5.	13,5	13,3	13,6	13,5	2,6	2,4	2,3	2,4	12,1	12,4	12,6	12,4	196	19,0	813
6.	15,7	15,6	15,8	15,7	2,2	2,3	2,2	2,2	11,8	12,4	12,5	12,2	190	19,0	788
7.	18,9	18,4	18,3	18,5	3,2	2,8	2,5	2,8	11,5	11,9	12,2	11,9	191	19,2	800
8.	20,6	20,4	20,4	20,5	1,7	2,0	2,1	1,9	11,4	12,1	12,7	12,1	187	19,2	783
9.	23,4	23,3	23,2	23,3	2,8	2,9	2,8	2,8	11,5	11,9	11,8	11,7	190	19,2	796
10.	25,6	25,4	25,1	25,4	2,2	2,1	1,9	2,1	11,5	11,9	11,7	11,7	189	19,2	792
11.	28,0	27,7	27,7	27,8	2,4	2,3	2,6	2,4	11,8	11,9	12,0	11,9	192	19,0	796
12.	30,1	29,9	29,9	30,0	2,1	2,2	2,2	2,2	11,9	11,6	11,9	11,8	190	19,2	796
13.	32,9	32,5	32,3	32,6	2,8	2,6	2,4	2,6	11,5	11,9	12,2	11,9	189	19,2	792
14.	34,7	34,9	34,5	34,7	1,8	2,4	2,2	2,1	11,4	11,6	11,9	11,6	187	19,2	783
15.	37,0	37,5	37,6	37,4	2,3	2,6	3,1	2,7	11,5	12,1	12,0	11,9	189	19,2	792
16.	39,3	39,9	39,9	39,7	2,3	2,4	2,3	2,3	11,5	11,3	11,6	11,5	187	19,2	783
17.	42,3	42,4	42,5	42,4	3,0	2,5	2,6	2,7	11,8	11,4	12,1	11,8	187	19,2	783
18.	44,4	44,1	44,3	44,3	2,1	1,7	1,8	1,9	11,9	11,3	11,6	11,6	186	19,2	779

Tablica 20. Značajke 6. zida

Jakost struje (I)			176 A			Plin			M21-ArC-18						
Brzina žice (v_z)			5,5 m/min			Temp. međuprolaza (ϑ)			130°C						
Brzina zavarivanja (v_z)			12 cm/min			Protok plina (q)			19 l/min						
Omjer			45			Slobodni kraj žice (L)			10 - 13 mm						
Broj prolaza	Visina zida h , mm			Prosječna visina, mm	Prirast po prolazu Δh , mm			Prosječni prirast, mm	Širina zida b , mm			Prosječna širina, mm	Jakost struje - I , A	Napon - U , V	Unos topline - Q , J/mm
	Pozicija mjerenja				Pozicija mjerenja				Pozicija mjerenja						
	1.	2.	3.		1.	2.	3.		1.	2.	3.				
1.	5,1	5,2	5,8	5,4	5,1	5,2	5,8	5,4	13,5	13,6	13,6	13,6	189	19,1	1444
2.	8,1	8,3	8,5	8,3	3,0	3,1	2,7	2,9	14,7	14,8	15,0	14,8	187	19,1	1429
3.	11,4	11,5	11,1	11,3	3,3	3,2	2,6	3,0	17,0	16,8	16,3	16,7	191	19,0	1452
4.	13,7	13,4	13,5	13,5	2,3	1,9	2,4	2,2	16,4	17,2	16,6	16,7	187	19,1	1429
5.	17,4	17,6	17,8	17,6	3,7	4,2	4,3	4,1	16,7	17,0	16,6	16,8	190	19,1	1452
6.	19,4	19,1	19,9	19,5	2,0	1,5	2,1	1,9	16,1	16,4	17,0	16,5	184	19,3	1420
7.	23,7	23,0	23,4	23,4	4,3	3,9	3,5	3,9	17,5	17,6	17,8	17,6	188	19,4	1459
8.	26,3	26,2	25,9	26,1	2,6	3,2	2,5	2,8	17,7	17,4	16,8	17,3	184	19,3	1420
9.	29,3	29,0	29,3	29,2	3,0	2,8	3,4	3,1	17,8	17,7	17,4	17,6	188	19,2	1444
10.	31,4	31,0	31,2	31,2	2,1	2,0	1,9	2,0	16,5	16,8	16,6	16,6	184	19,2	1413
11.	35,0	34,4	34,9	34,8	3,6	3,4	3,7	3,6	16,3	16,7	16,4	16,5	189	19,2	1452
12.	37,2	37,3	37,2	37,2	2,2	2,9	2,3	2,5	16,8	16,9	16,6	16,8	184	19,2	1413
13.	41,3	41,8	41,1	41,4	4,1	4,5	3,9	4,2	17,3	17,1	16,8	17,1	190	19,0	1444
14.	43,5	44,2	43,6	43,8	2,2	2,4	2,5	2,4	16,5	16,4	16,6	16,5	187	19,2	1436

Tablica 21. Značajke 7. zida

Jakost struje (I)				274 A					Plin				M21-ArC-18		
Brzina žice (v_z)				9 m/min					Temp. međuprolaza (ϑ)				130°C		
Brzina zavarivanja (v_z)				60 cm/min					Protok plina (q)				19 l/min		
Omjer				15					Slobodni kraj žice (L)				10 - 13 mm		
Broj prolaza	Visina zida h , mm			Prosječna visina, mm	Prirast po prolazu Δh , mm			Prosječni prirast, mm	Širina zida b , mm			Prosječna širina, mm	Jakost struje - I , A	Napon - U , V	Unos topline - Q , J/mm
	Pozicija mjerenja				Pozicija mjerenja				Pozicija mjerenja						
	1.	2.	3.		1.	2.	3.		1.	2.	3.				
1.	3,0	3,4	3,6	3,3	3,0	3,4	3,6	3,3	8,8	8,9	8,6	8,8	264	26,4	558
2.	4,9	4,5	4,5	4,6	1,9	1,1	0,9	1,3	9,2	9,2	9,4	9,3	270	26,2	566
3.	6,4	6,4	6,9	6,6	1,5	1,9	2,4	1,9	9,6	9,4	9,6	9,5	269	26,3	566
4.	7,3	7,9	7,9	7,7	0,9	1,5	1,0	1,1	9,9	9,9	9,5	9,8	270	26,2	566
5.	9,1	9,2	9,6	9,3	1,8	1,3	1,7	1,6	10,8	10,6	10,4	10,6	269	26,3	566
6.	10,0	10,6	9,9	10,2	0,9	1,4	0,3	0,9	11,0	11,1	10,8	11,0	268	26,3	564
7.	11,7	12,0	12,5	12,1	1,7	1,4	2,6	1,9	11,1	11,4	10,9	11,1	267	26,3	562
8.	12,7	13,8	13,6	13,4	1,0	1,8	1,1	1,3	10,8	10,6	10,4	10,6	269	26,3	566
9.	14,5	14,7	14,9	14,7	1,8	0,9	1,3	1,3	11,4	10,8	10,6	10,9	267	26,3	562
10.	15,5	16,6	16,9	16,3	1,0	1,9	2,0	1,6	11,1	10,6	10,5	10,7	269	26,3	566
11.	16,9	17,9	17,7	17,5	1,4	1,3	0,8	1,2	11,2	10,6	11,2	11,0	267	26,3	562
12.	18,9	19,7	19,6	19,4	2,0	1,8	1,9	1,9	10,7	10,9	11,0	10,9	268	26,3	564
13.	20,2	21,0	21,1	20,8	1,3	1,3	1,5	1,4	11,0	11,4	10,8	11,1	267	26,3	562
14.	21,6	21,9	22,0	21,8	1,4	0,9	0,9	1,1	10,9	11,1	11,0	11,0	266	26,3	560
15.	23,4	23,9	23,5	23,6	1,8	2,0	1,5	1,8	10,7	10,9	11,2	10,9	269	26,4	568
16.	24,5	25,4	25,3	25,1	1,1	1,5	1,8	1,5	10,7	10,9	10,9	10,8	266	26,3	560
17.	26,0	26,8	26,3	26,4	1,5	1,4	1,0	1,3	10,5	11,0	11,1	10,9	269	26,3	566
18.	27,2	28,5	27,9	27,9	1,2	1,7	1,6	1,5	10,5	11,5	11,1	11,0	266	26,4	562
19.	29,8	30,3	30,3	30,1	2,6	1,8	2,4	2,3	10,5	10,6	10,7	10,6	268	26,3	564
20.	30,9	31,5	31,7	31,4	1,1	1,2	1,4	1,2	10,2	10,6	10,7	10,5	268	26,3	564
21.	31,6	32,7	32,8	32,4	0,7	1,2	1,1	1,0	11,0	11,3	10,4	10,9	270	26,2	566
22.	32,9	34,7	33,6	33,7	1,3	2,0	0,8	1,4	11,3	10,7	10,2	10,7	266	26,3	560
23.	34,9	36,1	36,2	35,7	2,0	1,4	2,6	2,0	10,9	10,8	10,1	10,6	267	26,3	562
24.	36,1	37,5	36,9	36,8	1,2	1,4	0,7	1,1	10,7	11,5	10,8	11,0	267	26,3	562
25.	37,2	38,6	38,8	38,2	1,1	1,1	1,9	1,4	11,5	11,8	10,8	11,4	267	26,2	560
26.	38,9	39,7	39,8	39,5	1,7	1,1	1,0	1,3	11,2	11,2	10,4	10,9	264	26,3	555
27.	40,2	42,1	41,7	41,3	1,3	2,4	1,9	1,9	11,0	11,1	11,8	11,3	269	26,3	566
28.	42,0	42,9	42,9	42,6	1,8	0,8	1,2	1,3	10,7	10,5	10,4	10,5	266	26,4	562

Tablica 22. Značajke 8. zida

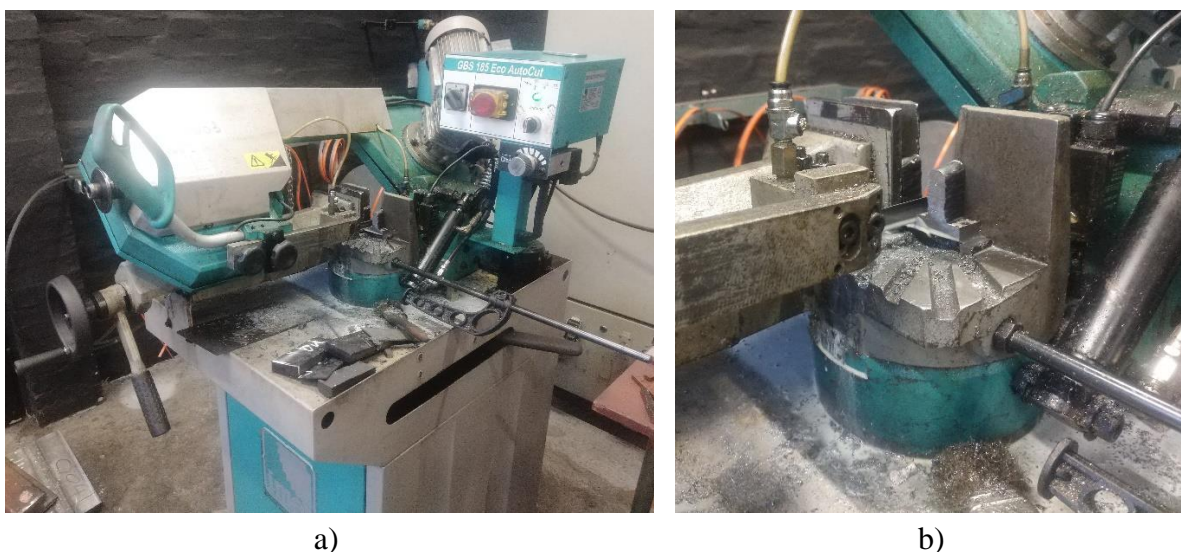
Jakost struje (I)			274 A						Plin			M21-ArC-18			
Brzina žice (v_z)			9 m/min						Temp. međuprolaza (ϑ)			130°C			
Brzina zavarivanja (v_z)			36 cm/min						Protok plina (q)			19 l/min			
Omjer			25						Slobodni kraj žice (L)			10 - 13 mm			
Broj prolaza	Visina zida h , mm			Prosječna visina, mm	Prirast po prolazu, Δh , mm			Prosječna prirast, mm	Širina zida b , mm			Prosječna širina, mm	Jakost struje - I , A	Napon - U , V	Unos topline - Q , J/mm
	Pozicija mjerenja				Pozicija mjerenja				Pozicija mjerenja						
	1.	2.	3.		1.	2.	3.		1.	2.	3.				
1.	3,9	3,8	3,7	3,8	3,9	3,8	3,7	3,8	12,3	12,1	12,3	12,2	267	26,3	936
2.	5,4	5,3	5,1	5,3	1,5	1,5	1,4	1,5	12,5	12,9	13,3	12,9	265	26,4	933
3.	7,4	7,8	7,5	7,6	2,0	2,5	2,4	2,3	13,2	12,9	13,9	13,3	264	26,3	926
4.	8,7	8,9	8,8	8,8	1,3	1,1	1,3	1,2	13,0	13,1	13,9	13,3	263	26,4	926
5.	11,8	11,5	10,9	11,4	3,1	2,6	2,1	2,6	14,5	14,2	14,3	14,3	266	26,4	936
6.	12,9	12,7	12,5	12,7	1,1	1,2	1,6	1,3	14,3	14,2	14,4	14,3	260	26,4	915
7.	14,6	14,7	14,3	14,5	1,7	2,0	1,8	1,8	14,6	14,2	15,1	14,6	266	26,3	933
8.	16,3	16,7	16,2	16,4	1,7	2,0	1,9	1,9	14,5	14,1	15,0	14,5	263	26,4	926
9.	18,4	18,2	18,0	18,2	2,1	1,5	1,8	1,8	14,6	14,1	14,7	14,5	269	26,3	943
10.	20,0	20,1	19,3	19,8	1,6	1,9	1,3	1,6	14,2	14,1	14,6	14,3	264	26,4	929
11.	22,1	22,3	21,1	21,8	2,1	2,2	1,8	2,0	14,1	14,5	14,5	14,4	269	26,3	943
12.	23,6	23,9	22,9	23,5	1,5	1,6	1,8	1,6	13,9	14,1	14,7	14,2	263	26,4	926
13.	25,9	25,6	24,7	25,4	2,3	1,7	1,8	1,9	13,1	13,2	14,5	13,6	267	26,3	936
14.	27,9	28,2	26,7	27,6	2,0	2,6	2,0	2,2	13,0	13,7	14,4	13,7	266	26,3	933
15.	30,0	30,2	28,6	29,6	2,1	2,0	1,9	2,0	13,4	13,9	14,6	14,0	266	26,4	936
16.	31,2	31,1	30,6	31,0	1,2	0,9	2,0	1,4	13,6	13,8	14,7	14,0	272	26,3	954
17.	33,3	33,9	32,4	33,2	2,1	2,8	1,8	2,2	13,4	14,0	14,6	14,0	269	26,3	943
18.	35,1	35,4	34,1	34,9	1,8	1,5	1,7	1,7	13,9	14,5	13,9	14,1	265	26,4	933
19.	36,9	37,7	36,4	37,0	1,8	2,3	2,3	2,1	13,6	14,7	13,7	14,0	269	26,3	943
20.	37,5	39,1	37,5	38,0	0,6	1,4	1,1	1,0	14,5	14,8	14,4	14,6	266	26,3	933
21.	40,4	41,4	39,7	40,5	2,9	2,3	2,2	2,5	14,6	14,4	14,6	14,5	265	26,4	933
22.	41,7	42,9	41,1	41,9	1,3	1,5	1,4	1,4	13,9	14,1	14,5	14,2	266	26,3	933

Tablica 23. Značajke 9. zida

Jakost struje (I)				274 A					Plin				M21-ArC-18		
Brzina žice (v_z)				9 m/min					Temp. međuprolaza (ϑ)				130°C		
Brzina zavarivanja (v_z)				20 cm/min					Protok plina (q)				19 l/min		
Omjer				45					Slobodni kraj žice (L)				10 - 13 mm		
Broj prolaza	Visina zida h , mm			Prosječna visina, mm	Prirast po prolazu, Δh , mm			Prosječni prirast, mm	Širina zida b , mm			Prosječna širina zida, mm	Jakost struje I , A	Napon U , V	Unos topline - Q , J/mm
	Pozicija mjerenja				Pozicija mjerenja				Pozicija mjerenja						
	1.	2.	3.		1.	2.	3.		1.	2.	3.				
1.	3	4,8	4,8	4,8	4,7	4,8	4,8	4,8	18,6	18,9	18,7	18,7	269	26,3	1698
2.	6,8	6,7	6,5	6,7	2,1	1,9	1,7	1,9	18,5	18,8	18,9	18,7	268	26,3	1692
3.	8,6	8,9	8,9	8,8	1,8	2,2	2,4	2,1	20,8	19,8	19,3	20,0	266	26,3	1679
4.	10,6	10,4	10,3	10,4	2,0	1,5	1,4	1,6	21,0	20,3	20,6	20,6	264	26,4	1673
5.	12,6	12,8	12,8	12,7	2,0	2,4	2,5	2,3	20,9	21,8	21,5	21,4	263	26,4	1666
6.	14,7	14,6	14,2	14,5	2,1	1,8	1,4	1,8	20,6	21,3	20,1	20,7	262	26,4	1660
7.	17,6	17,1	17,0	17,2	2,9	2,5	2,8	2,7	21,1	21,6	20,3	21,0	261	26,3	1647
8.	19,3	19,1	18,9	19,1	1,7	2,0	1,9	1,9	20,9	21,1	20,6	20,9	260	26,5	1654
9.	21,7	21,9	21,7	21,8	2,4	2,8	2,8	2,7	21,0	21,7	20,5	21,1	265	26,4	1679
10.	23,3	23,7	23,0	23,3	1,6	1,8	1,3	1,6	20,6	21,0	20,7	20,8	265	26,4	1679
11.	26,0	26,9	26,5	26,5	2,7	3,2	3,5	3,1	21,3	21,1	21,1	21,2	264	26,4	1673
12.	28,4	28,3	28,2	28,3	2,4	1,4	1,7	1,8	20,4	20,6	21,0	20,7	265	26,4	1679
13.	30,8	30,4	30,4	30,5	2,4	2,1	2,2	2,2	20,9	21,5	20,2	20,9	265	26,4	1679
14.	32,3	32,6	32,2	32,4	1,5	2,2	1,8	1,8	20,5	21,5	20,1	20,7	265	26,3	1673
15.	35,9	35,5	35,1	35,5	3,6	2,9	2,9	3,1	21,5	21,7	21,3	21,5	265	26,4	1679
16.	37,0	37,5	36,8	37,1	1,1	2,0	1,7	1,6	21,1	21,5	20,9	21,2	264	26,4	1673
17.	39,5	39,4	38,9	39,3	2,5	1,9	2,1	2,2	21,2	21,3	20,8	21,1	265	26,3	1673
18.	41,4	41,2	41,0	41,2	1,9	1,8	2,1	1,9	20,5	20,2	20,3	20,3	264	26,4	1673
19.	43,7	43,6	43,0	43,4	2,3	2,4	2,0	2,2	21,3	21,2	21,0	21,2	265	26,4	1679

6.4. Makroanaliza strukture

Prije samog ispitivanja makroanalize bilo je potrebno pripremiti uzorke. Iz dobivenih zidova izrezali su se uzorci. Uzorci su se rezali sa rubnih dijelova zidova i to po dva uzorka iz jednog zida. Rezanje se izvodilo pomoću tračne pile GBS 185 Eco AutoCut (Slika 57.). Nakon rezanja slijedilo je ručno brušenje uzoraka s brusnim papirom granulacije P80, P100, P180, P240, P280 i P320. Slika 58. prikazuje uzorke prije brušenja i brusne papire.



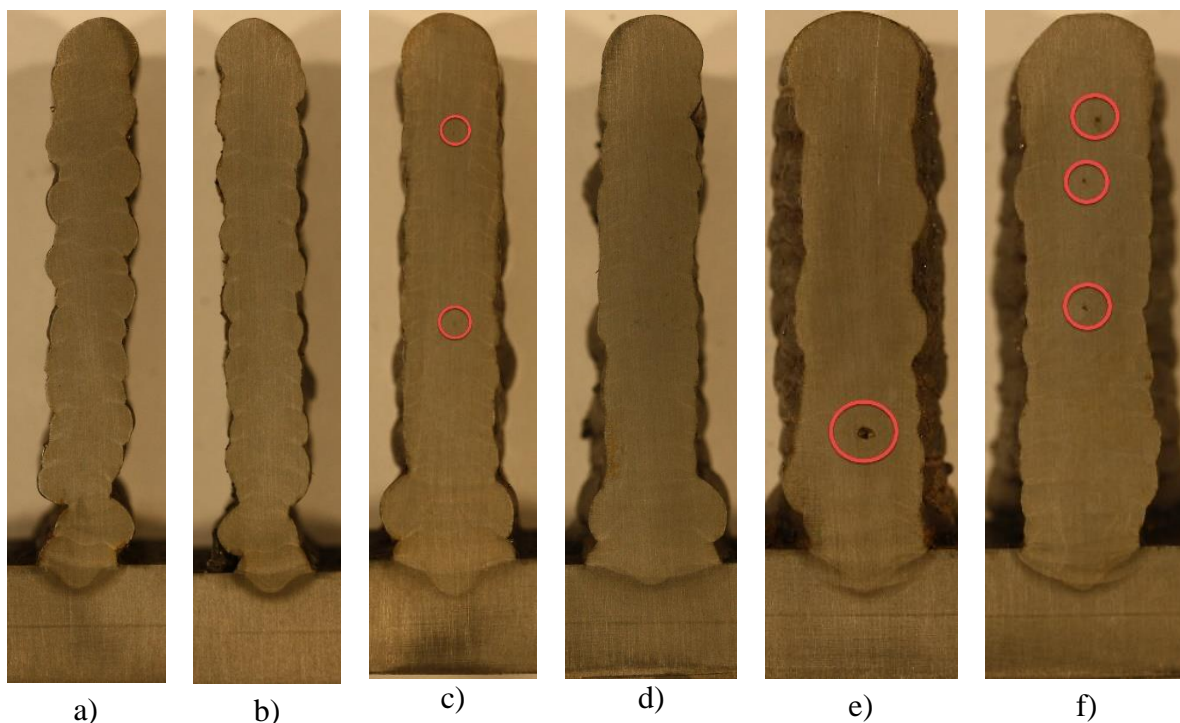
Slika 57. Priprema uzoraka: a) tračna pila GBS 185 Eco AutoCut, b) rezanje uzoraka



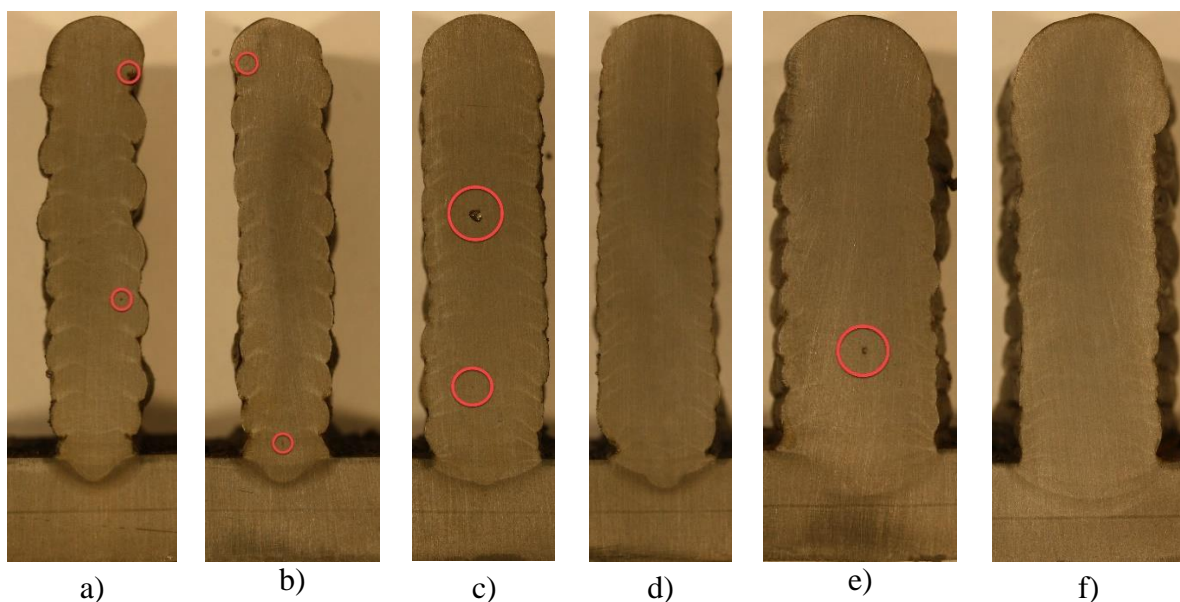
Slika 58. Uzorci prije brušenja

Nadalje, sljedeći korak je bio nagrizanje uzoraka, a nagrizanje se izvelo u 3% otopini nitala (3% dušične kiseline i 97% etilnog alkohola). Vrijeme nagrizanja za sve uzorke bilo je 35 sekundi. Nakon nagrizanja, uzorci su bili isprani vodom, a poslije ispiranja su lagano prebrisani ubrusom i u tome trenutku su bili spremni za fotografiranje. Dobivene fotografije prikazane su u nastavku. Uzorci su grupirani u tri skupine i uzorci unutar iste skupine imaju isti omjer brzine žice i brzine zavarivanja, ali različitu brzinu zavarivanja. Slika 59. prikazuje prvu skupinu uzoraka čiji omjer iznosi 15. Uzorci unutar skupine su poredani prema brzini zavarivanja i to od

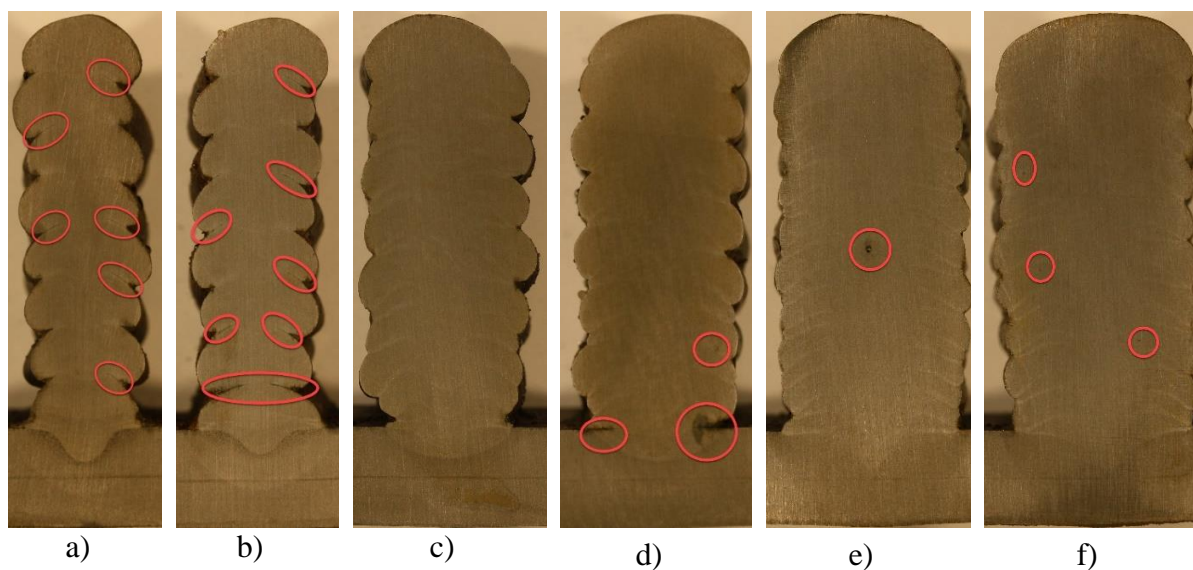
manje prema većoj gledajući s lijeva prema desno. Ovaj princip vrijedi i za ostale dvije skupine čije su vrijednosti omjera iznosile 25 i 45. Slika 60. prikazuje drugu, a Slika 61. treću skupinu.



Slika 59. 1. Skupina : a) uzorak 1.1, b) uzorak 1.2, c) uzorak 4.1, d) uzorak 4.2, e) uzorak 7.1, f) uzorak 7.2



Slika 60. 2. Skupina: a) uzorak 2.1, b) uzorak 2.2, c) uzorak 5.1, d) uzorak 5.2, e) uzorak 8.1, f) uzorak 8.2



Slika 61. 3. Skupina: a) uzorak 3.1, b) uzorak 3.2, c) uzorak 6.1, d) uzorak 6.2, e) uzorak 9.1, f) uzorak 9.2

Makroanalizom uzoraka uočeno je nekoliko nepravilnosti:

1. Šupljine i pore:
 - uzorak 2.1
 - uzorak 5.1
 - uzorak 7.1
 - uzorak 8.1
 - uzorak 9.1.
2. Uključak troske:
 - uzorak 2.2
 - uzorak 4.1
 - uzorak 7.2 (u nizu)
 - uzorak 9.2.
3. Naljepljivanje:
 - uzorak 3.1 i 3.2
 - uzorak 6.2.

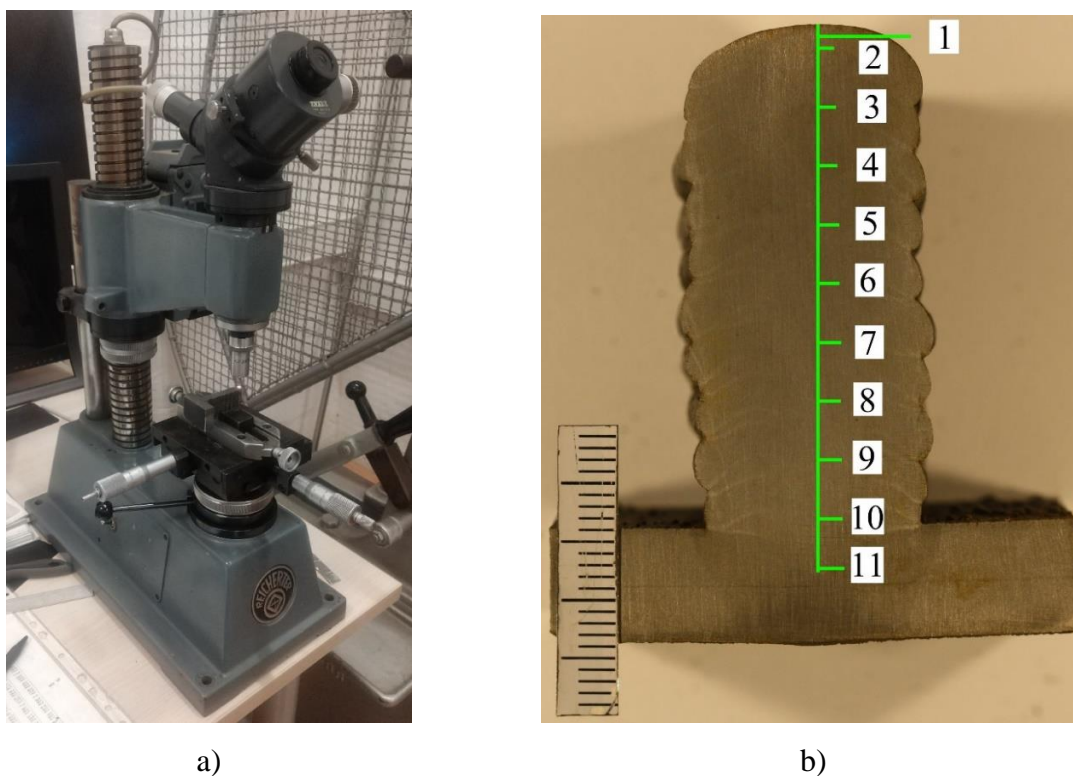
Na uzorcima je moguće uočiti prolaze zavarivanja, liniju miješanja dodatnog i osnovnog materijala kao i zonu utjecaja topline koja ja na nekim uzorcima jače izraženija.

6.5. Mjerenje tvrdoće

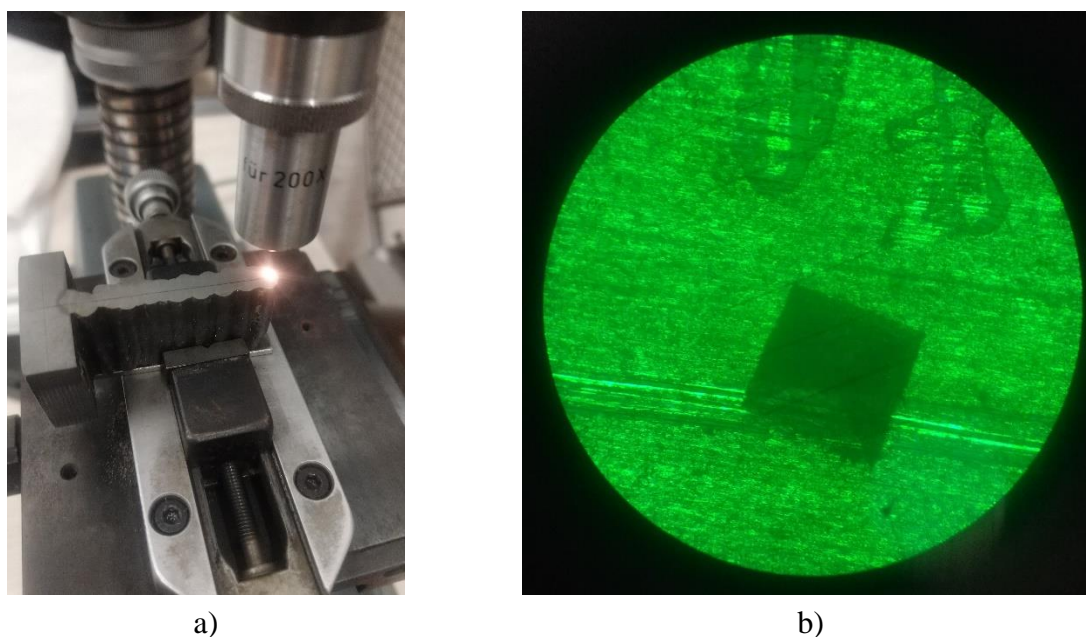
Slijedeći korak u eksperimentu bio je mjerenje tvrdoće na obrađenim uzorcima. Tvrdoća je osnovno mehaničko svojstvo materijala koje predstavlja otpornost materijala prema prodiranju drugog znatno tvrđeg tijela. To je svojstvo koje ovisi o sastavu i strukturi materijala, temperaturi tijela, brzini prodiranja i dr. Tvrdoća i vlačna čvrstoća uzajamno su vezana svojstva materijala, tako da već prema načinu mjerenja tvrdoće postoji i mogućnost međusobnoga preračunavanja rezultata mjerenja [44].

Tvrdoća se mjerila Vickersovom metodom na tvrdomjeru Reicherter koji je prikazan slikom (Slika 62. a)). Mjerila se konvencionalna tvrdoća oznake HV10 (ispitna sila iznosi 98,07 N). Ova metoda je direktna metoda ispitivanja kod koje se ispitivanje vrši nakon rasterećenja sile, a definicija tvrdoće za ovu metodu predstavlja omjer između sile i površine otiska.

Nadalje, mjerenje se izvodilo od vrha prema dnu zida kao što je prikazano na slici (Slika 62. b)). Razmaci između mjerenja su bili po 5 mm, a pri vrhu, između prvih dva mjerenja razmak je bio 1 mm. U tablici (Tablica 24.) su prikazani rezultati mjerenja tvrdoće na 9 uzoraka po 11 mjerenja. Slika 63. prikazuje postupak mjerenja tvrdoće pomoću objektiva s povećanjem od 200x i otisak dijamantnog indentora.



Slika 62. Mjerenje tvrdoće: a) tvrdomjer Reicherter, b) pozicije mjerenja



Slika 63. Mjerenje tvrdoće: a) mikroskopski objektiv (200x), b) otisak dijamantnog indentora

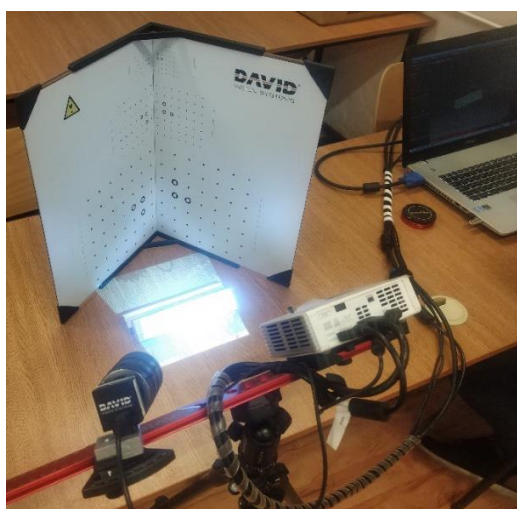
Tablica 24. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10

Pozicija mjerenja	Tvrdoća HV10								
	1. Uzorak	2. Uzorak	3. Uzorak	4. Uzorak	5. Uzorak	6. Uzorak	7. Uzorak	8. Uzorak	9. Uzorak
1.	177	185	162	181	176	175	187	173	160
2.	182	172	170	183	180	167	191	179	158
3.	158	161	161	163	156	163	163	172	163
4.	152	155	145,5	160	154	150,5	160	153	148
5.	153	145,5	151,4	156	153	147,1	169	148	143,1
6.	150,5	148,8	143,9	158	150,5	143,9	157	147,1	143,9
7.	150,5	150,5	144,7	159	149,7	143,9	156	148,8	144,7
8.	151,4	152,	144,7	159	160	145,5	160	152	140,7
9.	160	154	145,5	165	152	146,3	166	150,5	142,3
10.	167	161	162	160	156	148,8	178	155	150,5
11. ZUT	185	187	149,7	161	161	146,3	158	156	158

6.6. Ispitivanje parametra teksture površine

Posljednje provedeno ispitivanje u eksperimentu bilo je ispitivanje parametara teksture površine zidova. Za ovaj dio ispitivanja koristio se 3D skener David SLS-2 koji je prikazan slikom (Slika 64. a)). Sustav za skeniranje sadržavao je tronožac sa kliznim nosačem na kojemu su bili montirani projektor i kamera koji su bili usmjereni prema kalibracijskim pločama. Cijeli sustav za skeniranje bio je povezan s računalom na kojemu se koristio program za provođenje skeniranja (David-Laserscanner). Sustav za skeniranje radi po principu određivanja dubine prostora položaja uzorka, a to se provodi na način da projektor projicira strukturiranu svjetlost po uzorku, a kamera snima i mjeri udaljenosti svake točke na crtama.

Prije početka skeniranja zidovi su očetkani, očišćeni alkoholom i pošpricani razvijачem koji je u tom trenutku poslužio kao improvizacija za bijelu boju, a ona je potrebna radi boljeg kontrasta. Nakon toga, sustav za skeniranje se kalibrirao. Skeniranje se izvodilo u zamračenoj prostoriji kako bi se postigao jači kontrast i osvijetljene površine uzorka.



a)



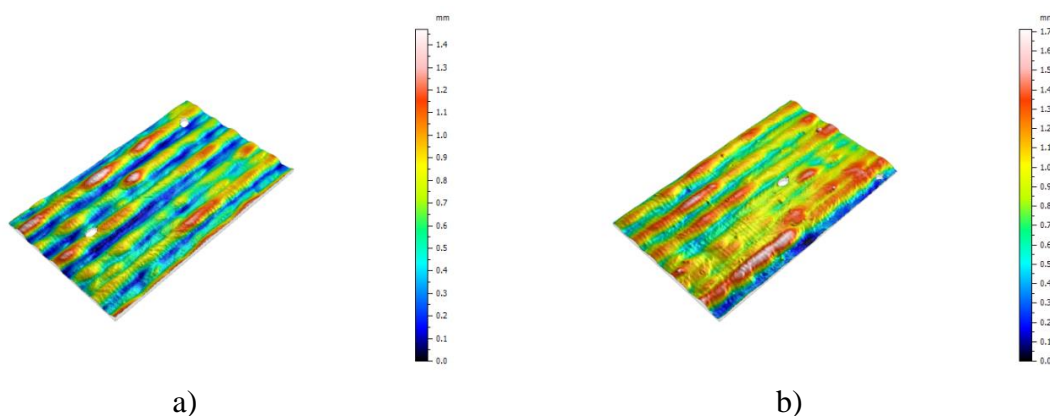
b)



c)

Slika 64. Skeniranje uzoraka: a) oprema, b) obojeni uzorci, c) razvijач (boja)

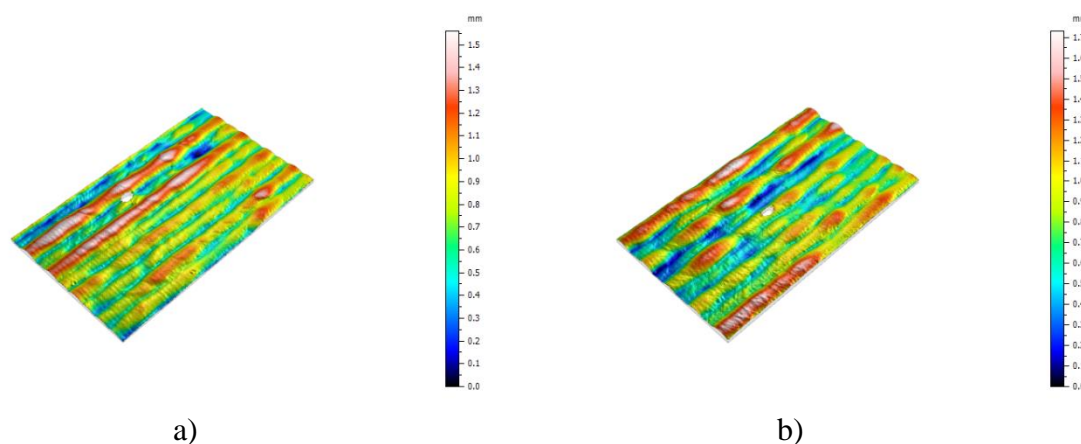
Rezultat skeniranja su snimke u STL formatu koje je bilo potrebno dva puta obraditi. Prvo su snimke bile obrađene u programu 3D Builder u kojemu su se skenirani zidovi rezali na manje segmente, točnije na dimenzije 50x30 mm. Zatim, su se takve obrađene snimke ponovno obrađivale, ali ovaj put u programu Mountains 8. To je program u kojemu su dobiveni rezultati parametara teksture površine zidova. U nastavku slijedi slikovni i tablični prikaz skeniranih zidova.



Slika 65. Skenirane površine 1. zida: a) površina 1.1, b) površina 1.2

Tablica 25. Parametri teksture površine 1. zida

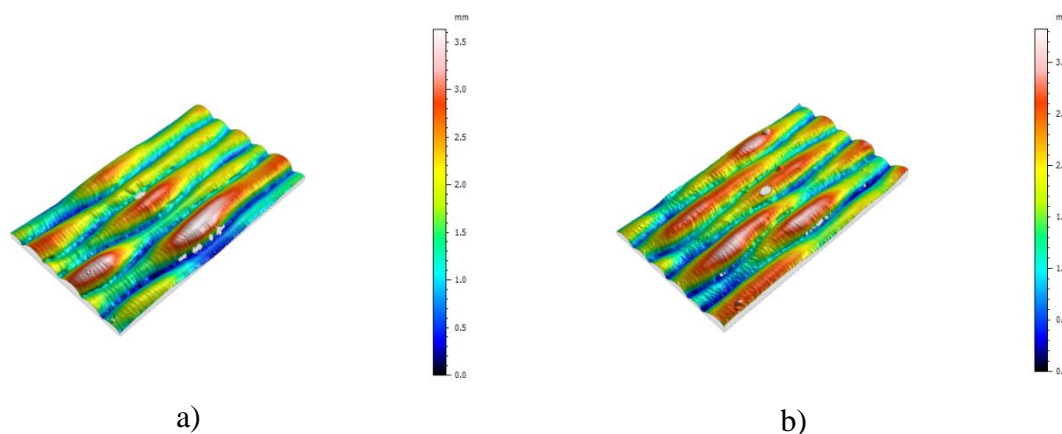
Površina 1.1							
Amplitudni parametri	Sq, mm	Ssk	Sku	Sp, mm	Sv, mm]	Sz, mm	Sa, mm
Vrijednosti	0,283	0,301	2,389	0,866	0,603	1,469	0,235
Površina 1.1							
Amplitudni parametri	Sq, mm	Ssk	Sku	Sp, mm	Sv, mm	Sz, mm	Sa, mm
Vrijednosti	0,279	-0,285	2,951	0,783	0,928	1,711	0,223



Slika 66. Skenirane površine 2. zida: a) površina 2.1, b) površina 2.2

Tablica 26. Parametri teksture površine 2. zida

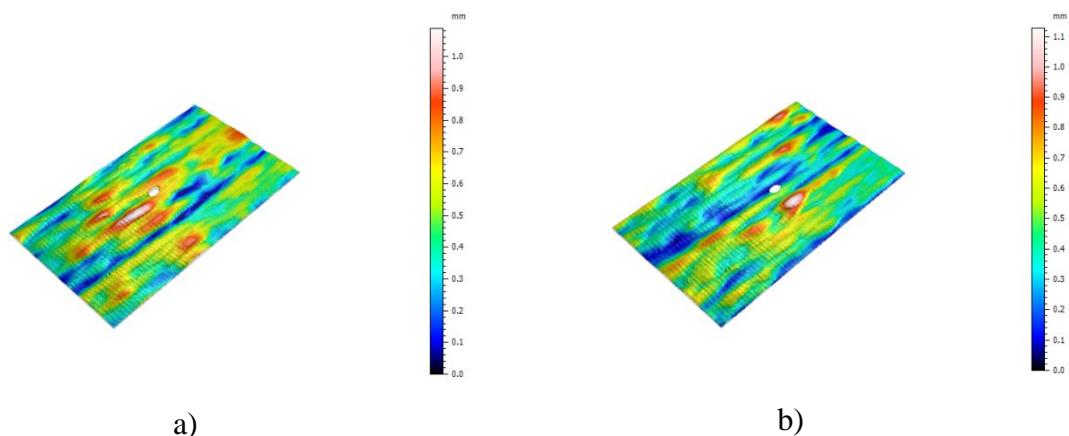
Površina 2.1							
Amplitudni parametri	Sq, mm	Ssk	Sku	Sp, mm	Sv, mm	Sz, mm	Sa, mm
Vrijednosti	0,273	0,233	2,662	0,732	0,829	1,561	0,235
Površina 2.2							
Amplitudni parametri	Sq, mm	Ssk	Sku	Sp, mm	Sv, mm	Sz, mm	Sa, mm
Vrijednosti	0,313	0,104	2,426	0,854	0,877	1,731	0,256



Slika 67. Skenirane površine 3. zida: a) površina3.1, b) površina3.2

Tablica 27. Parametri teksture površine 3. zida

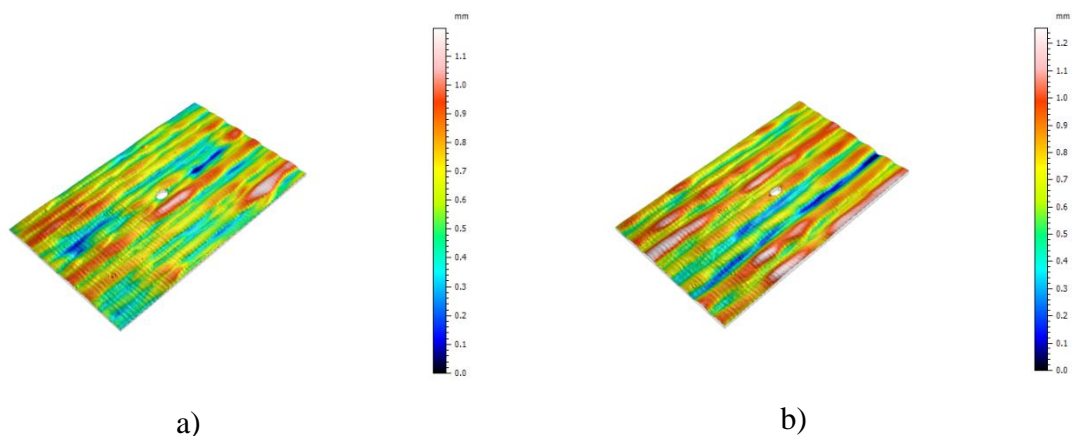
Površina 3.1							
Amplitudni parametri	Sq, mm	Ssk	Sku	Sp, mm	Sv, mm	Sz, mm	Sa, mm
Vrijednosti	0,684	0,362	2,670	1,915	1,716	3,631	0,552
Površina 3.2							
Amplitudni parametri	Sq, mm	Ssk	Sku	Sp, mm	Sv, mm	Sz, mm	Sa, mm
Vrijednosti	0,634	-0,013	2,153	1,610	1,713	3,323	0,536



Slika 68. Skenirane površine 4. zida: a) površina 4.1, b) površina 4.2

Tablica 28. Parametri teksture površine 4. zida

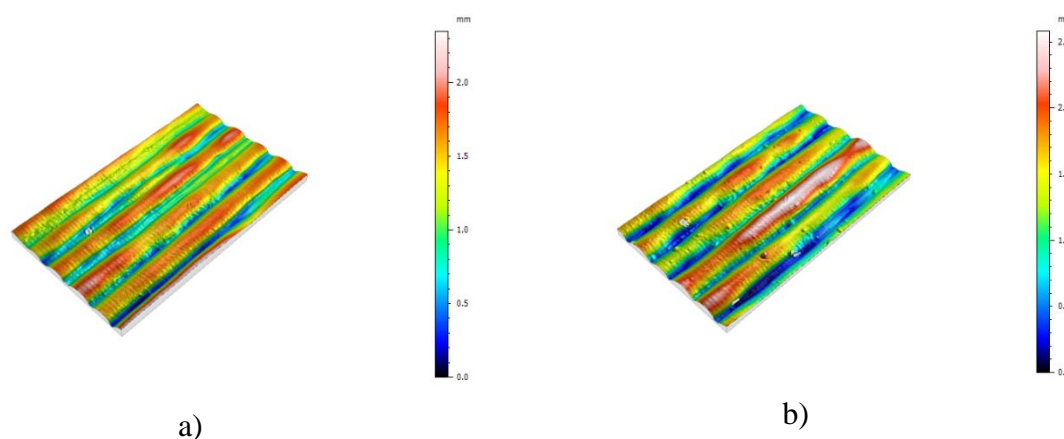
Površina 4.1							
Amplitudni parametri	Sq, mm	Ssk	Sku	Sp, mm	Sv, mm	Sz, mm	Sa, mm
Vrijednosti	0,171	0,191	3,089	0,609	0,480	1,089	0,135
Površina 4.2							
Amplitudni parametri	Sq, mm	Ssk	Sku	Sp, mm	Sv, mm	Sz, mm	Sa, mm
Vrijednosti	0,164	0,446	3,605	0,688	0,440	1,127	0,128



Slika 69. Skenirane površine 5. zida: a) površina 5.1, b) površina 5.2

Tablica 29. Parametri teksture površine 5. zida

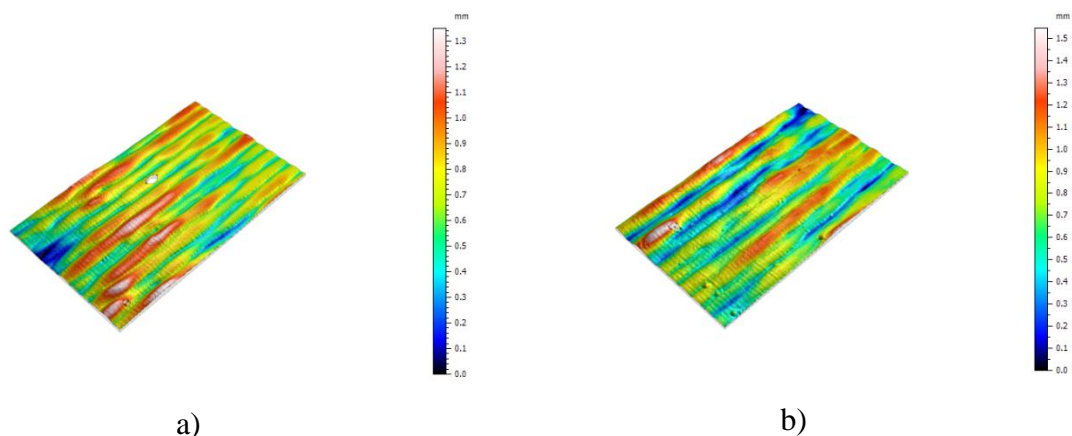
Površina 5.1							
Amplitudni parametri	Sq, mm	Ssk	Sku	Sp, mm	Sv, mm	Sz, mm	Sa, mm
Vrijednosti	0,178	0,096	2,787	0,568	0,627	1,196	0,144
Površina 5.2							
Amplitudni parametri	Sq, mm	Ssk	Sku	Sp, mm	Sv, mm	Sz, mm	Sa, mm
Vrijednosti	0,211	-0,305	3,048	0,532	0,725	1,256	0,168



Slika 70. Skenirane površine 6. zida: a) površina 6.1, b) površina 6.2

Tablica 30. Parametri teksture površine 6. zida

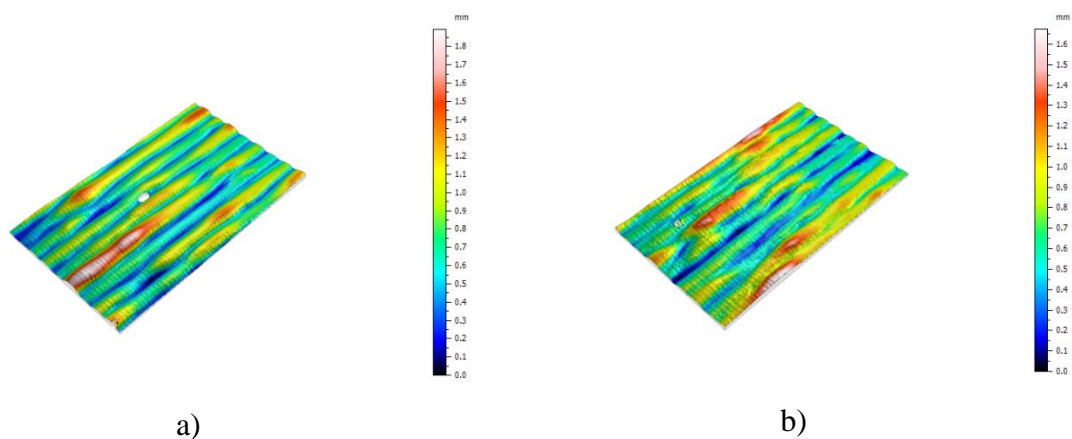
Površina 6.1							
Amplitudni parametri	Sq, mm	Ssk	Sku	Sp, mm	Sv, mm	Sz, mm	Sa, mm
Vrijednosti	0,401	-0,418	2,539	1,053	1,294	2,347	0,333
Površina 6.2							
Amplitudni parametri	Sq, mm	Ssk	Sku	Sp, mm	Sv, mm	Sz, mm	Sa, mm
Vrijednosti	0,545	-0,038	2,384	1,303	1,277	2,581	0,445



Slika 71. Skenirane površine 7. zida: a) površina 7.1, b) površina 7.2

Tablica 31. Parametri teksture površine 7. zida

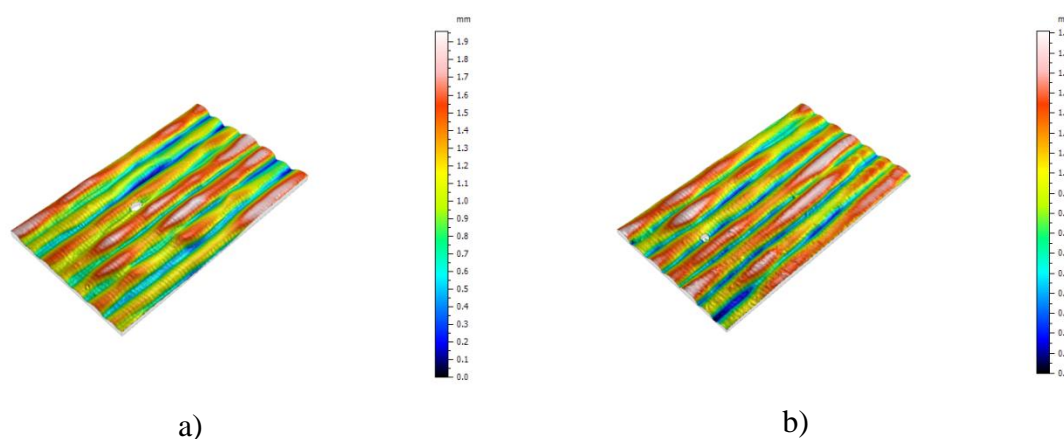
Površina 7.1							
Amplitudni parametri	Sq, mm	Ssk	Sku	Sp, mm	Sv, mm	Sz, mm	Sa, mm
Vrijednosti	0,210	-0,079	2,949	0,613	0,736	1,349	0,169
Površina 7.2							
Amplitudni parametri	Sq, mm	Ssk	Sku	Sp, mm	Sv, mm	Sz, mm	Sa, mm
Vrijednosti	0,264	0,090	2,504	0,824	0,722	1,546	0,215



Slika 72. Skenirane površine 8. zida: a) površina 8.1, b) površina 8.2

Tablica 32. Parametri teksture površine 8. zida

Površina 8.1							
Amplitudni parametri	Sq, mm	Ssk	Sku	Sp, mm	Sv, mm	Sz, mm	Sa, mm
Vrijednosti	0,301	0,650	3,616	1,112	0,781	1,893	0,235
Površina 8.2							
Amplitudni parametri	Sq, mm	Ssk	Sku	Sp, mm	Sv, mm	Sz, mm	Sa, mm
Vrijednosti	0,263	0,364	3,181	0,946	0,727	1,673	0,208



Slika 73. Skenirane površine 9. zida: a) površina 9.1, b) površina 9.2

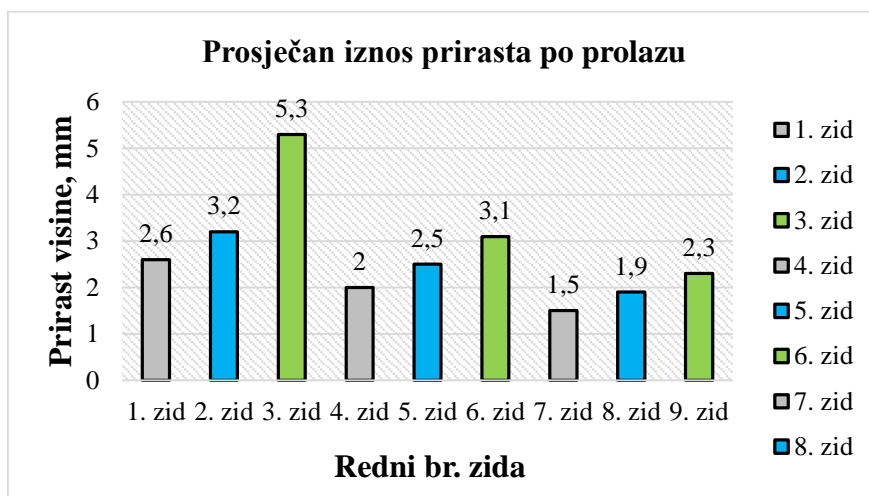
Tablica 33. Parametri teksture površine 9. zida

Površina 9.1							
Amplitudni parametri	Sq, mm	Ssk	Sku	Sp, mm	Sv, mm	Sz, mm	Sa, mm
Vrijednosti	0,366	-0,183	2,368	0,840	1,121	1,961	0,302
Površina 9.2							
Amplitudni parametri	Sq, mm	Ssk	Sku	Sp, mm	Sv, mm	Sz, mm	Sa, mm
Vrijednosti	0,332	-0,357	2,370	0,699	1,010	1,709	0,275

6.7. Analiza rezultata

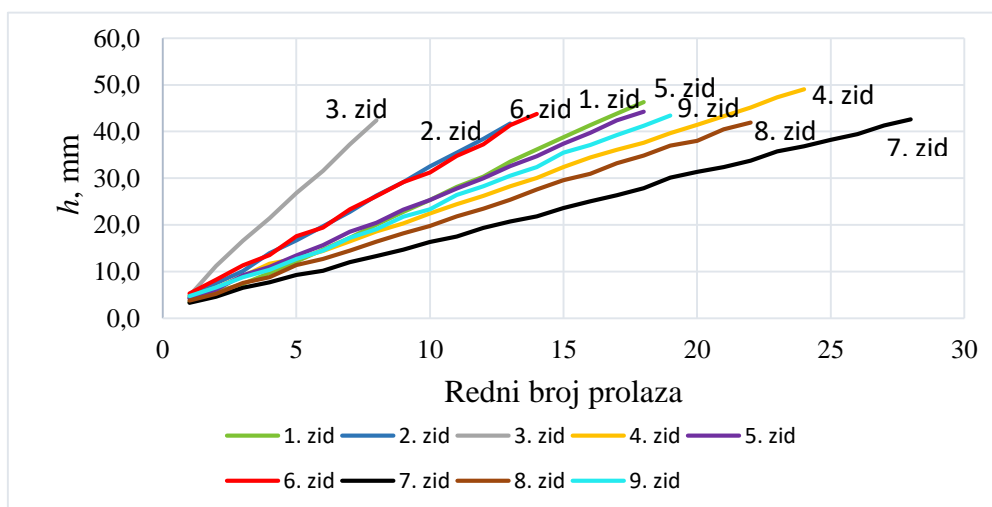
6.7.1. Analiza prirasta visine zida

U poglavlju 6.3 *Parametri i osnovne geometrijske značajke*, prikazane su tablice u kojima su rezultati mjerenja visine. Iz tih tablica (za svaki zid) je izračunata ukupna prosječna vrijednosti visine zida po prolazu. Kako bi se rezultati mjerenja visine mogli uspoređivati, napravljen je graf prikazan na slici (Slika 74.). Na njemu se vidi kako 3. zid ima najveći prirast visine po prolazu, a 7. zid najmanji prirast.



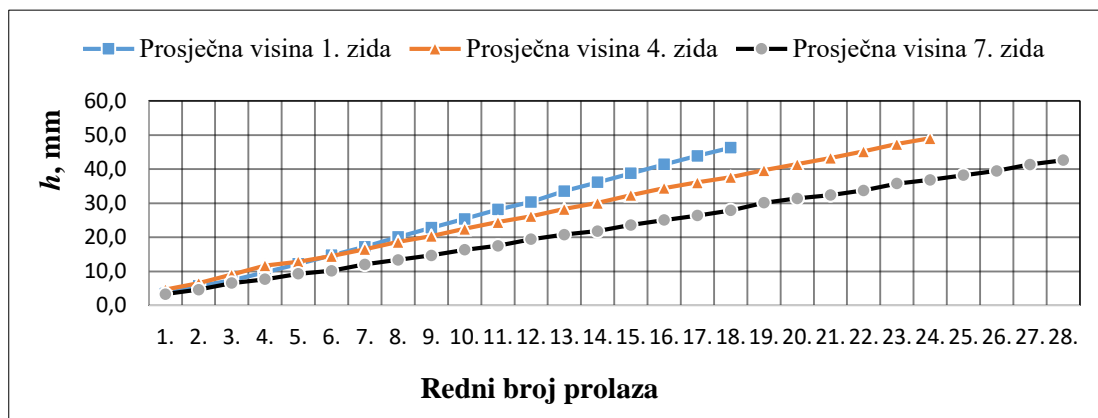
Slika 74. Prosječan iznos prirasta visine po prolazu za svaki zid

Također, napravljen je dijagram (Slika 75.) na kojemu je prikazan cjelokupni rast visine zidova po prolazu, te na njemu vidimo koji zid je imao strmiji rast visine, odnosno kojemu je trebalo manje prolaza do zadane visine.

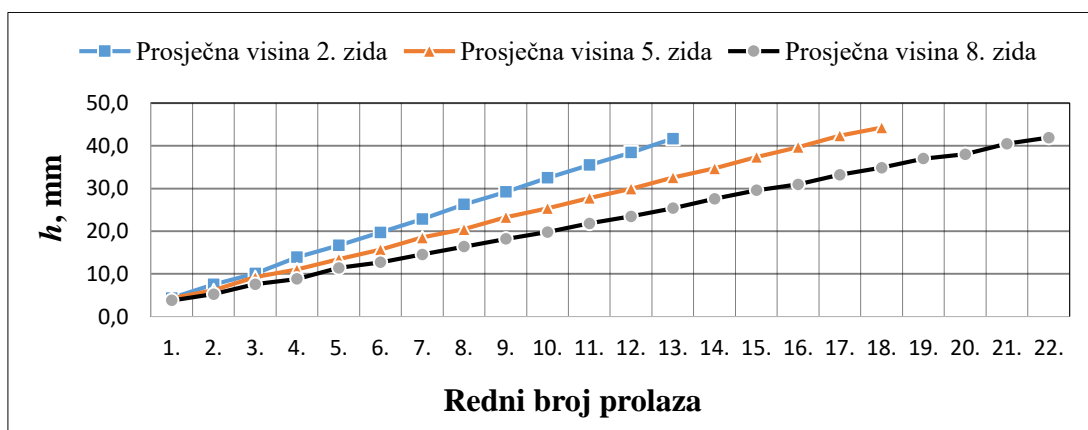


Slika 75. Cjelokupni prikaz rasta visine zidova

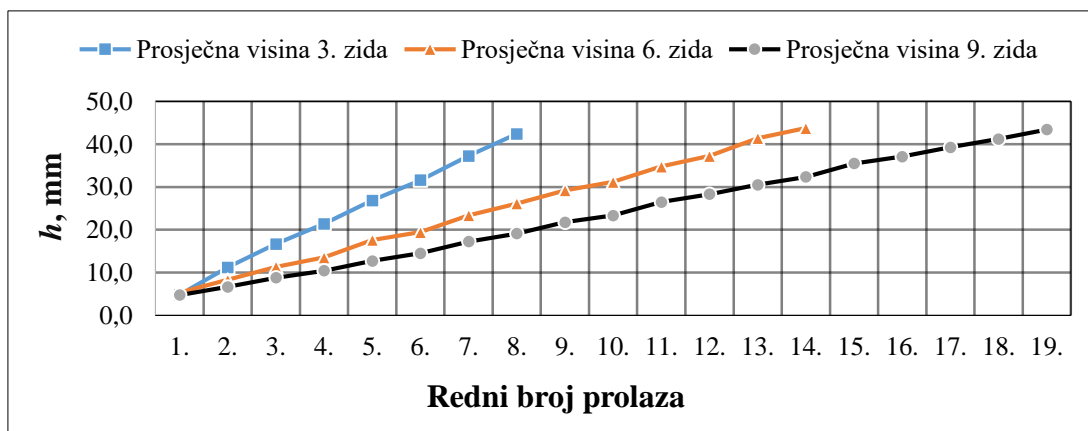
U svrhu proučavanja omjera brzine žice i brzine zavarivanja prikazani su i dijagrami sa grupiranim zidovima po zajedničkim omjerima brzina. Sa ovih dijagrama vidimo kako brzina zavarivanja utječe na brzinu rasta visine zidova.



Slika 76. Prikaz prosječne visine (h) po prolazu za zidove s omjerom 15



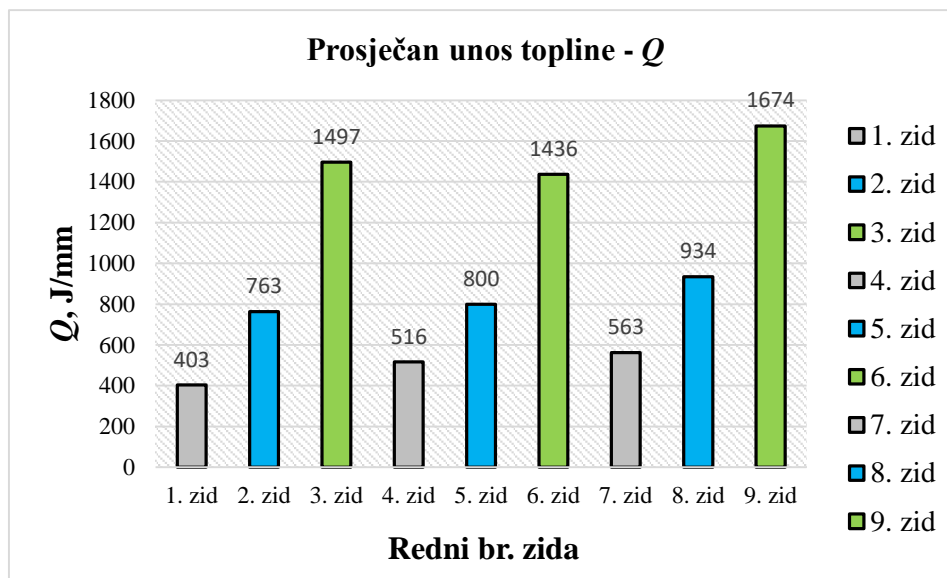
Slika 77. Prikaz prosječne visine (h) po prolazu za zidove s omjerom 25



Slika 78. Prikaz prosječne visine (h) po prolazu za zidove s omjerom 45

6.7.2. Analiza unosa topline

Očitavanjem parametara zavarivanja dobiveni su iznosi unosa topline pri pojedinom prolazu za svaki zid. Iz tih vrijednosti određen je prosječan unos topline za pojedini zid. Izračunate vrijednosti unesene su u dijagram na slici (Slika 79.).



Slika 79. Usporedba prosječne unesene topline u zid

6.7.3. Analiza BTF omjera

Analiza BTF omjera se provela na slikama koje su korištene za makroanalizu u programu ImageJ. Budući da su uzorci bili visine oko 40 mm na svaki uzorak se ucrtavao pravokutnik čija je dulja stranica bila fiksna i iznosila je 30 mm, a njegova širina bila je definirana debljinom uzoraka, tj. cilj je bio razmaknuti pravokutnik što je više moguće kako bi bilo što manje otpadnog materijala. Nakon konstruiranja pravokutnika sljedeće što se crtalo bila je sirova površina materijala. Program bi na temelju nacrtanih površina izračunao korisnu i sirovu površinu materijala. Zatim se računao BTF omjer pomoću izraza:

$$BTF = \frac{V_s}{V_k} = \frac{A_s \cdot x \cdot h}{A_k \cdot x \cdot h} = \frac{A_s}{A_k} \quad (13)$$

V_s - volumen sirovog materijala, mm³

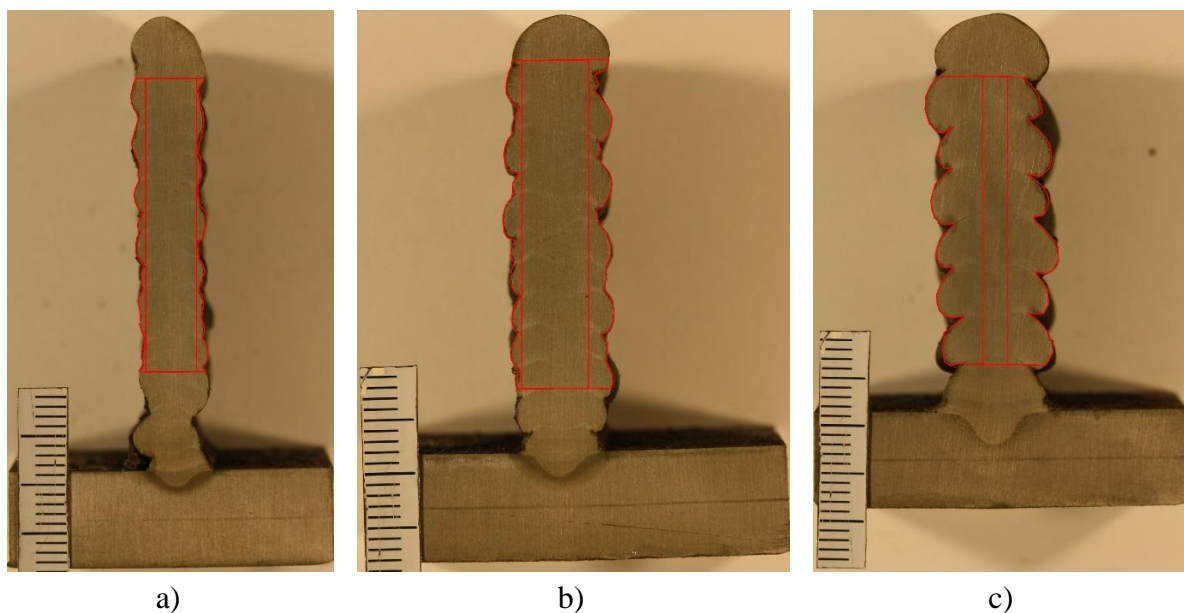
V_k - volumen korisnog materijala, mm³

A_s - površina sirovog materijala, mm²

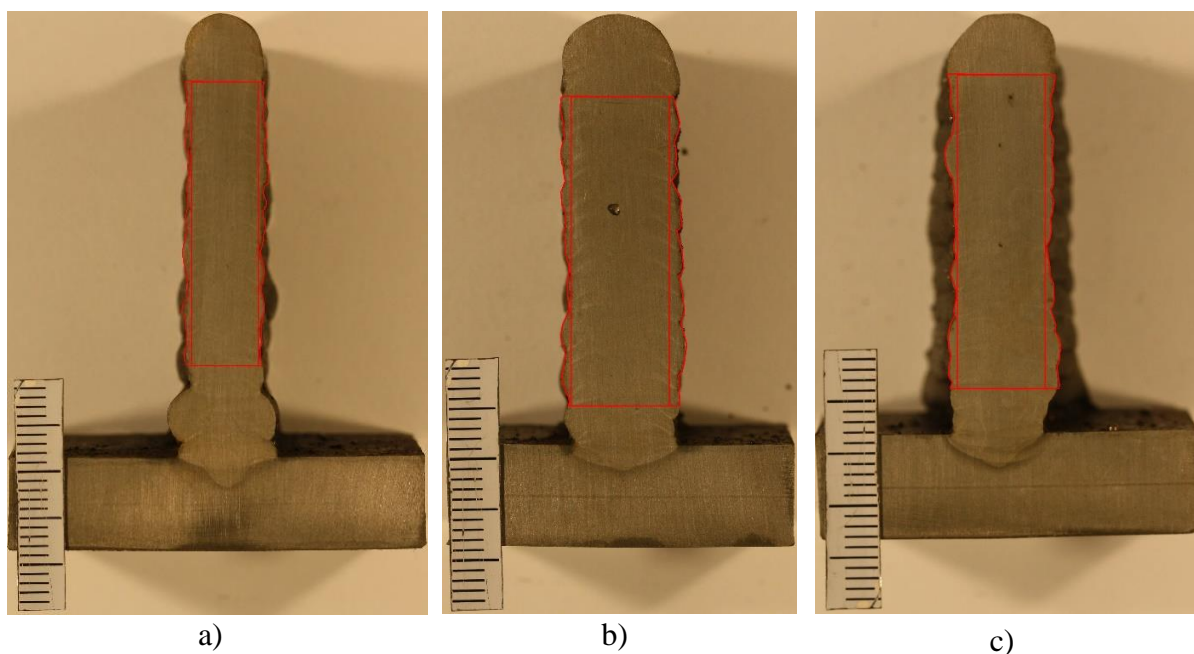
A_k - površina korisnog materijala, mm²

h - visina, mm.

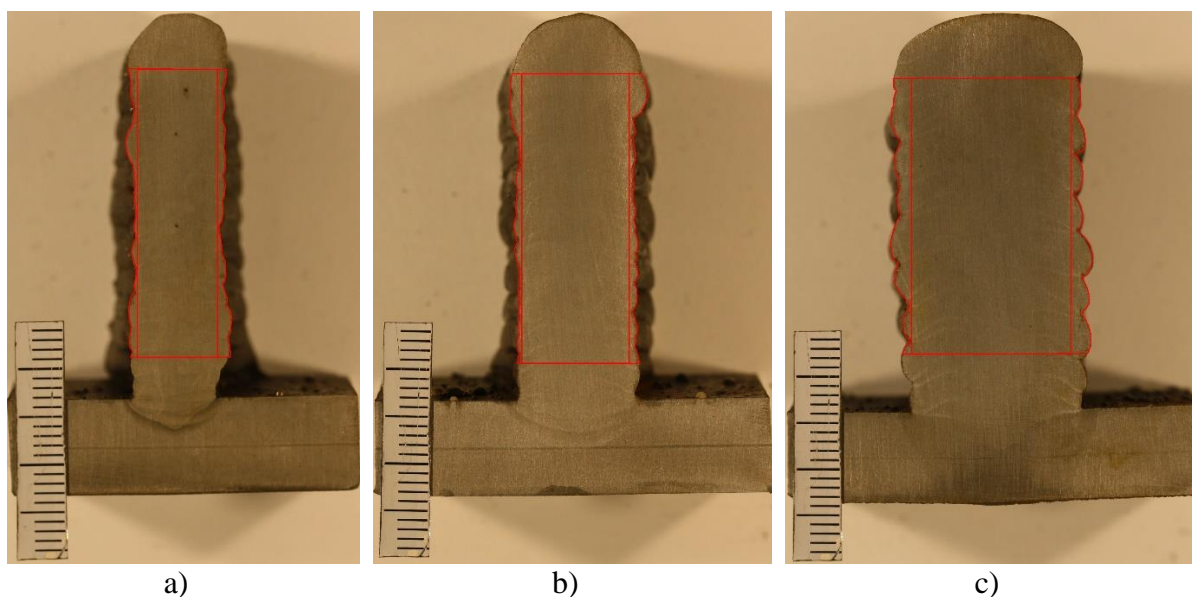
U nastavku su prikazani primjeri uzoraka (Slika 80., Slika 81. i Slika 82.) sa omeđenima površinama za računanje BTF omjera. U tablici (Tablica 34.) su zapisani sve vrijednosti površina i izračunati su svi BTF omjeri uzoraka.



Slika 80. Obradene slike: a) uzorak 1.1, b) uzorak 2.1, c) uzorak 3.1



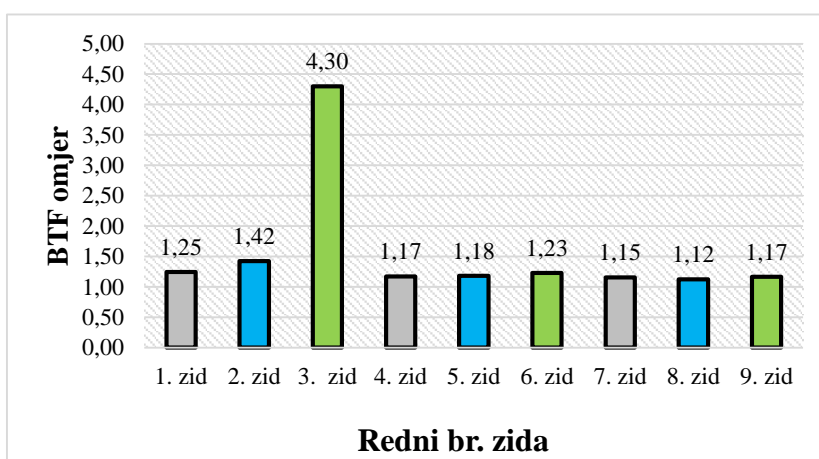
Slika 81. Obradene slike: a) uzorak 4.1, b) uzorak 5.1, c) uzorak 6.1



Slika 82. Obradene slike: a) uzorak 7.1, b) uzorak 8.1, c) uzorak 9.1

Tablica 34. BTF omjer

	1. zid	2. zid	3. zid	4. zid	5. zid	6. zid	7. zid	8. zid	9. zid
Sirova površina, mm ²	196,5	261,3	330,3	247,5	337,5	482,2	290,5	376	608,8
Korisna površina, mm ²	157,8	183,7	76,8	211,1	285,9	392,5	251,7	335,4	521,6
BTF omjer	1,25	1,42	4,30	1,17	1,18	1,23	1,15	1,12	1,17

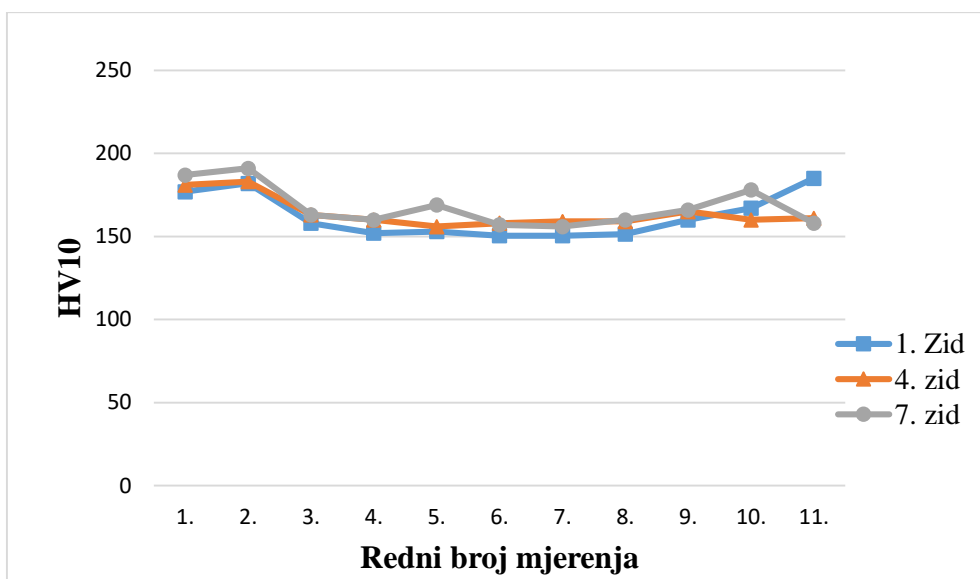


Slika 83. BTF omjer uzoraka

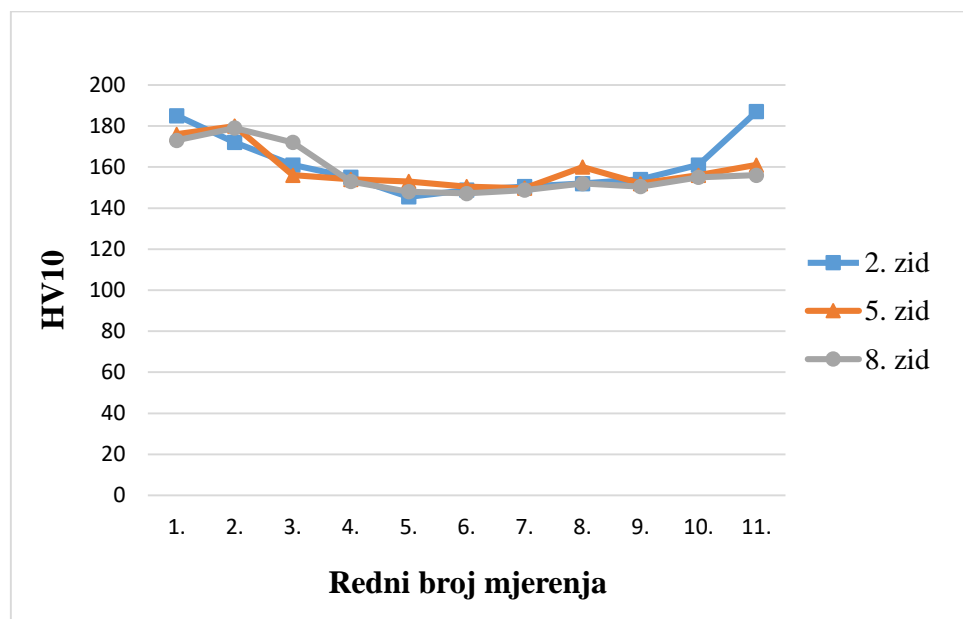
Na temelju priloženog dijagrama (Slika 83.) i rezultata može se vidjeti kako uzorak 3.1 (3. zid) ima najveću vrijednost BTF omjera. Razlog tomu je izražena valovitost i naljepljivanje koje nastalo uslijed loših parametara zavarivanja. Ostali uzorci imaju približno jednake iznose BTF omjera.

6.7.4. Analiza tvrdoće

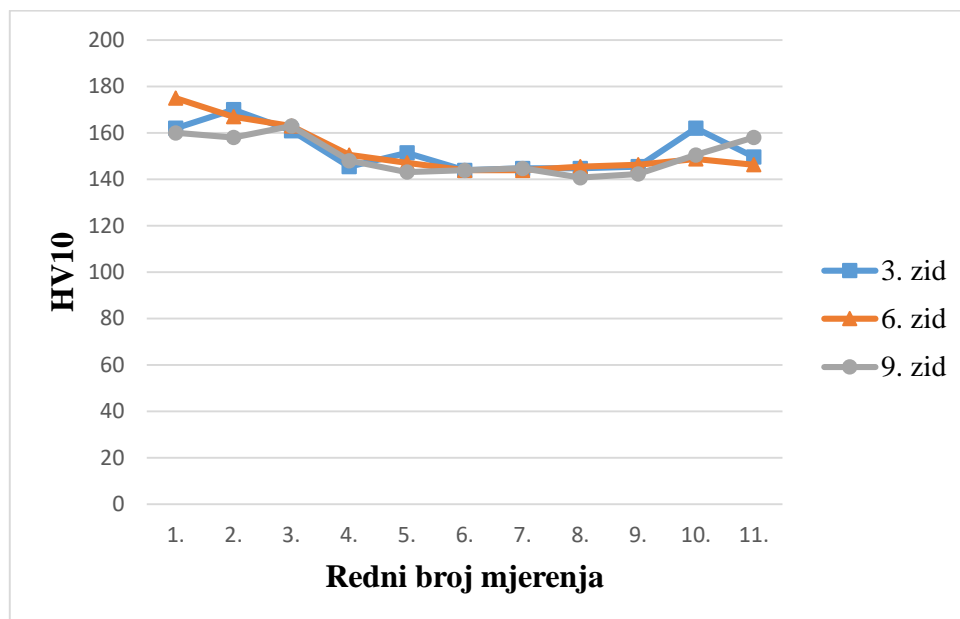
Rezultati mjerenja tvrdoće prikazani su pomoću tri grafa, a svaki graf je grupiran na temelju već spomenutih omjera brzine žice i brzine zavarivanja. Grafovi prikazuju tvrdoće zidova za određenu poziciju mjerenja. Redni broj 1. predstavlja poziciju mjerenja pri samom vrhu uzorka, a redni broj 11. predstavlja poziciju zone utjecaja topline.



Slika 84. Dijagram tvrdoće za skupinu zidova s omjerom 15



Slika 85. Dijagram tvrdoće za skupinu zidova s omjerom 25

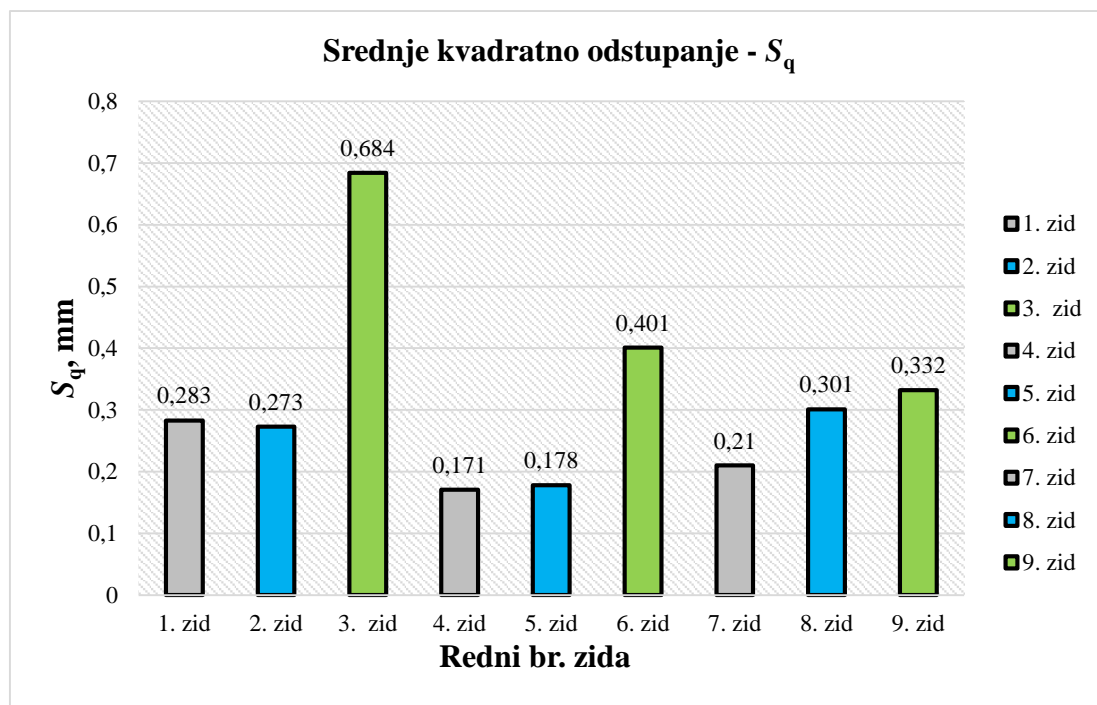


Slika 86. Dijagram tvrdoće za skupinu zidova s omjerom 45

Promatrajući rezultate, a pogotovo grafove može se vidjeti kontinuiran raspored tvrdoće po središnjem dijelu duljine uzorka. Na grafovima možemo primijetiti kako je pri vrhu zidova i u zoni utjecaja topline zabilježen porast tvrdoće. Razlog veće tvrdoće pri vrhu uzorka može se pridodati tomu što vrh uzorka nije toplinski obrađen. Usporedimo li grafove i rezultate mjerenja može se zaključiti da je utjecaj omjera brzine žice i brzine zavarivanja na tvrdoću ovih uzoraka minimalan, odnosno gotovo da ga i nema.

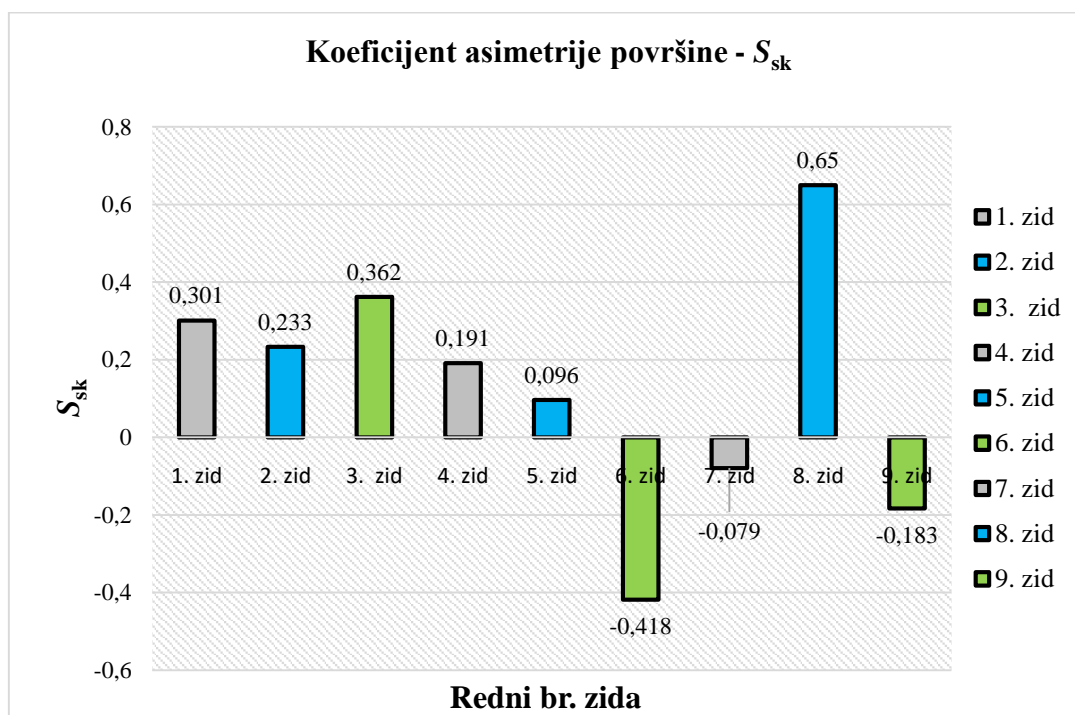
6.7.5. Analiza parametara teksture površine

Dobiveni rezultati sken analize svih 9 zidova prikazani su dijagramom na slici (Slika 87.). Lako se može uočiti da vrijednost srednjeg kvadratnog odstupanja poprima maksimalan iznos za 3. zid, dok je za 4. i 5. zid ovaj iznos minimalan. Takvi rezultati su i logični jer je na 3. zidu jače izražena valovitost površine zida uslijed prevelikog depozita materijala. Naime, omjer brzine dodavanja žice i brzine zavarivanja je premalen u odnosu na brzinu zavarivanja, pa se talina počela prelijevati jer se nije stigla skrutnuti. Kod 4. i 5. zida omjer brzine žice i brzine zavarivanja je u odnosu na brzinu zavarivanja povoljniji, pa dobivamo manja srednja kvadratna odstupanja, tj. ujednačeniju površinu uzoraka.



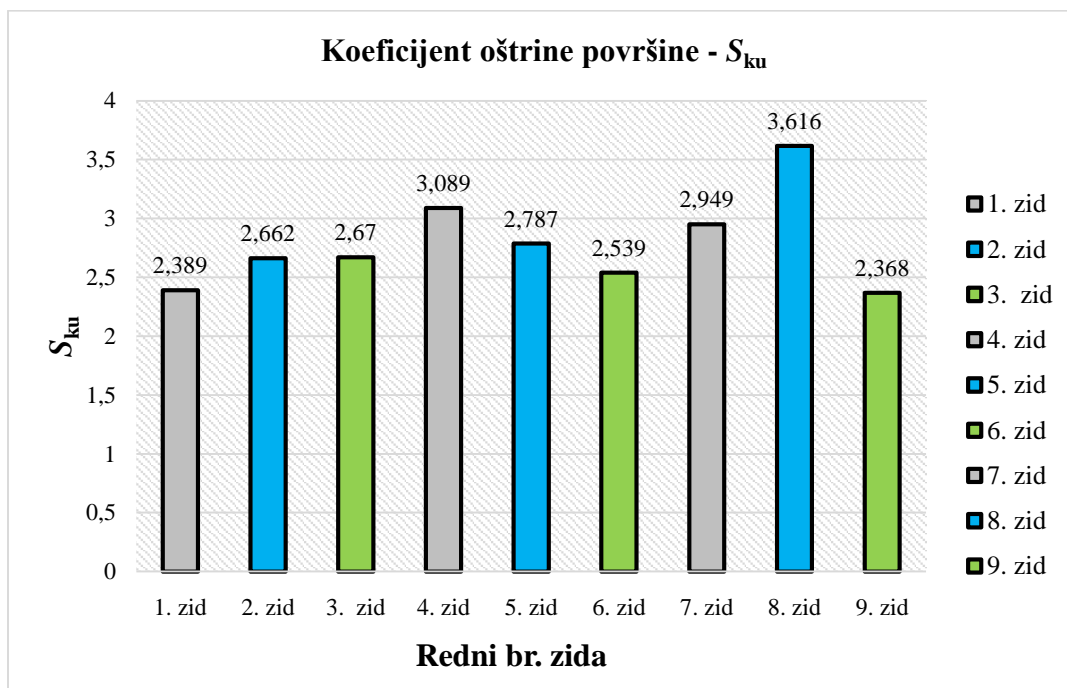
Slika 87. Usporedba srednjeg kvadratnog odstupanja površine zidova (S_q)

Sljedeći parametar je koeficijent asimetrije površine. Prema dijagramu na slici (Slika 88.) vidljivo je da zidovi 6, 7 i 9 poprimaju negativne vrijednosti ovoga koeficijenta, što znači da na njihovim površinama prevladavaju udubljenja. Ekstremne vrijednosti koeficijenta asimetrije površine javljaju se na 8. zidu na kojemu prevladavaju velika ispupčenja.



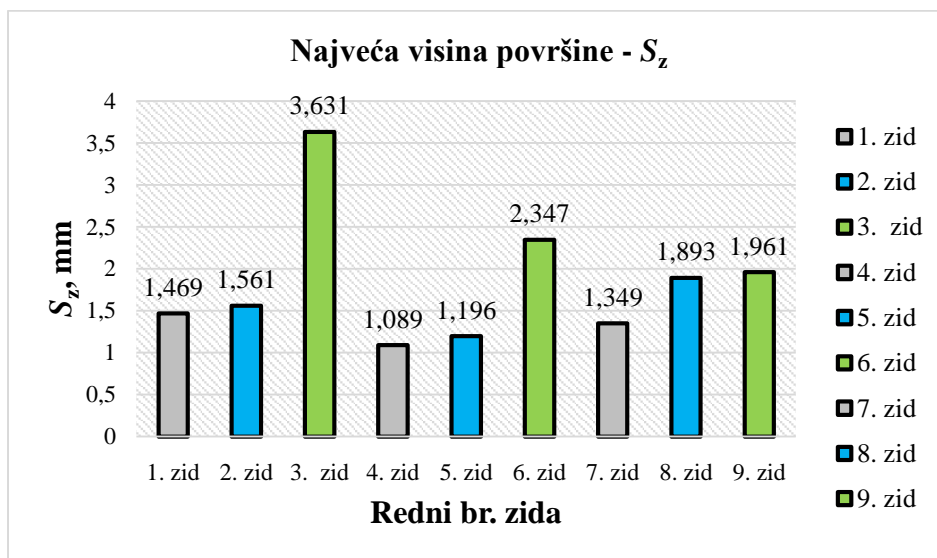
Slika 88. Usporedba koeficijena asimetrije površine zidova (S_{sk})

Sljedeći parametar je koeficijent oštine površine. Prema dijagramu na slici (Slika 89.) može se uočiti da su površine zidova 1, 2, 3, 6 i 9 zgnječene ($S_{ku} < 3$), dok je površina 8. zida šiljasta ($S_{ku} > 3$). Zidovi 4, 5 i 7 imaju normalan oblik raspodjele visina hrapavosti površine ($S_{ku} = 3$).



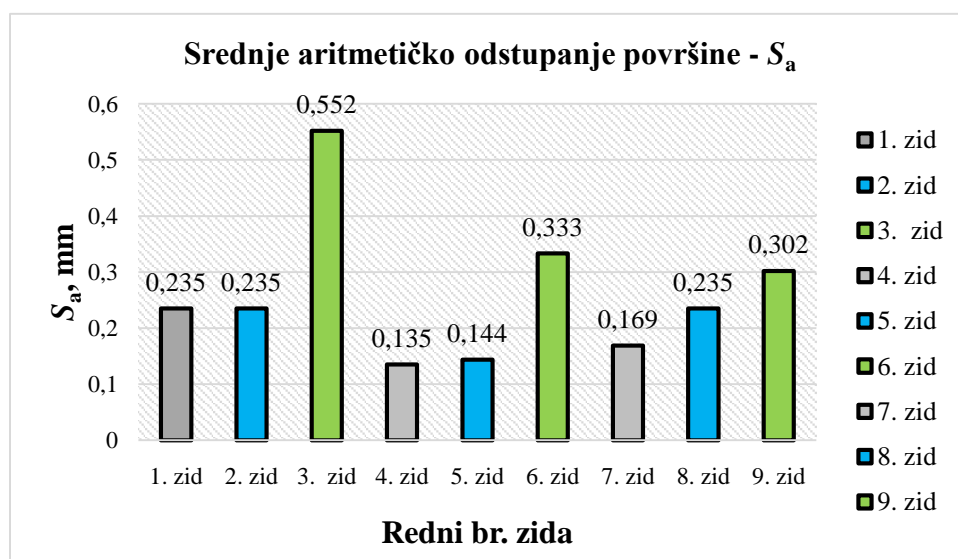
Slika 89. Usporedba koeficijenta oštine površine zidova (S_{ku})

Zatim, slijedi parametar najveće visine neravnine površine. Dobiveni rezultati prikazani su dijagramom na slici (Slika 90.). Najniže najveće vrijednosti visine neravnine površine mogu se uočiti na zidovima 4 i 5, što je i očekivano jer je površina tih zidova najujednačenija zbog povoljnih parametara zavarivanja (objašnjenje kod parametra srednjeg kvadratnog odstupanja). Također, sa dijagrama se može iščitati kako zid 3 ima najveću vrijednost najveće visine neravnine površine u usporedbi s ostalim zidovima.



Slika 90. Usporedba najveće visine površine (S_z)

Zadnji parametar koji je uključen u analizu je parametar srednjeg aritmetičkog odstupanja površine. Rezultati ovog ispitivanja prikazani su dijagramom na slici (Slika 91.). Raspodjela rezultata u dijagramu je slična dijagramu srednjeg kvadratnog odstupanja površine. (Slika 87.)



Slika 91. Usporedba srednjeg aritmetičkog odstupanja površine (S_a)

7. ZAKLJUČAK

Iako je, kada govorimo o tehnologiji aditivnog zavarivanja, riječ o relativno rasprostranjenoj tehnologiji, njen potencijal nije niti izbliza iskorišten. Naime, još uvijek se većinom radi o skupim proizvodnim postupcima, koji koriste znatno složeniju i sofisticiraniju opremu, kao i skupe materijale, zbog čega danas nije u nešto široj upotrebi. Stoji i činjenica da se radi o izrazito mladoj proizvodnoj tehnologiji, staroj svega nekoliko desetljeća, u usporedbi s ostalim proizvodnim tehnologijama koje se razvijaju više od dvije tisuće godina (kovanje, lijevanje, zavarivanje, itd.).

Među mnoštvom različitih postupaka aditivne proizvodnje, WAAM je tehnologija koja posjeduje najveći potencijal, zahvaljujući specifičnim prednostima poput brzine izrade komada, manje količine otpada te nešto nižih cijena opreme i troškova proizvodnje. Postoje određeni problemi koji još uvijek ograničavaju industrijsko širenje WAAM postupaka na još veće područje, poput anizotropnih svojstava proizvoda, problema nedovoljnog stapanja i vezivanja slojeva ili pak problema zaostalih naprezanja, međutim, istraživanja teže reduciranju i uklanjanju problema.

Cilj eksperimentalnog dijela rada bio je ispitati i analizirati utjecaj omjera brzine žice i brzine zavarivanja u odnosu na brzinu zavarivanja na geometrijske značajke proizvoda izrađenog aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom. Rezultati eksperimentalnog dijela diplomskog rada mogu se sumirati u nekoliko točaka:

- 1) tvrdoća (pa time i čvrstoća) uzoraka ostaje približno konstantna neovisno o navedenom omjeru,
- 2) navedeni omjer utječe na geometrijski oblik zida, odnosno na parametre teksture površine - srednje vrijednosti ovog omjera rezultiraju optimalnim vrijednostima parametara teksture površine i povoljnim geometrijskim oblikom zida (optimalni zidovi su 4 i 5),
- 3) navedeni omjer utječe na BTF omjer, tj. u konačnici na efektivnu širinu zida,
- 4) navedeni omjer utječe i na prirast visine po pojedinom prolazu. Treba napomenuti da više vrijednosti prirasta visine po pojedinom prolazu nisu povoljne kao što se to na prvi pogled čini. Naime, iako bi viši prirasti visine po pojedinom prolazu trebali dovesti do veće produktivnosti, odnosno manjeg broja prolaza, takvi parametri zavarivanja rezultiraju nepovoljnim geometrijskim oblikom konačnog proizvoda te brojnim greškama.

Naposljetku, predviđa se da će proizvodna tehnologija aditivnog zavarivanja doživjeti svoj puni procvat i proboj na globalnom tržištu. Aditivni pristup proizvodnji pritom će u potpunosti istisnuti pristup tehnološkog oblikovanja konstrukcije, a sloboda pri konstruiranju biti će skoro pa praktički neograničena. Također se predviđa da će navedeno u potpunosti izmijeniti cjelokupnu proizvodnu industriju, odnosno da će dovesti do nove industrijske revolucije. Sasvim je jasno da se stoga izučavanje i praćenje razvoja navedenih postupaka nameće kao ključ za uspjeh na globalnom industrijskom tržištu sutrašnjice.

LITERATURA

- [1] Pilipović Ana: Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernog prototipa, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [2] <https://phys.org/news/2015-03-revolutionary-3d-technology.html> (02.09.2019.)
- [3] Godec D., Šercer M.: Aditivna proizvodnja, FSB, Zagreb, 2015.
- [4] https://www.researchgate.net/figure/Basic-principle-of-stereolithography-apparatus-method_fig3_297605485 (03.09.2019.)
- [5] Yang L., Hsu K., Baughman B., Godfrey D., Medina F., Menon M., Wiener S.: Additive Manufacturing of Metals: The Technology, Materials, Design and Production, Springer, 2017.
- [6] <https://uvebtech.com/articles/2015/stereolithography-three-decades-of-uv-technology-innovation/> (03.09.2019.)
- [7] Gibson I., Rosen D., Stucker B.: Additive Manufacturing Technologies, 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing, Springer, 2015.
- [8] <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/> (04.09.2019.)
- [9] Williams S.W., Martina F., Addison A.C., Ding J., Pardal G., Colegrove P.: Wire + Arc Additive Manufacturing, Materials Science and Technology, 2015.
- [10] Ilić D.: Optimizacija prijenosa metala za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [11] 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, 2015.
- [12] <https://patentimages.storage.googleapis.com/83/25/a2/c6e506fcb62cf6/US1533300.pdf> (05.09.2019.)
- [13] Busachi A., Erkoyuncu A. J., Martina F., Ding J.: Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications, Elsevier, 48-53, 2015.
- [14] 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
- [15] <https://waammat.com/documents/s-williams-large-scale-metal-wire-arc-additive-manufacturing-of-structural-engineering-parts> (07.09.2019.)

- [16] Knezović Nikola: Aditivna proizvodnja uz pomoć električnog luka i žice kao dodatnog materijala (WAAM)-trenutno stanje i potencijal, Zavarivanje, Vol. 61. No. 3-4, 2018.
- [17] https://bib.irb.hr/datoteka/932665.Hrvatsko_zrakoplovno_nazivlje_Struna.pdf (10.09.2019.)
- [18] <https://www.nottingham.ac.uk/research/groups/advanced-manufacturing-technology-research-group/documents/manufacturing-metrology-team/qcam-17/bath1.pdf> (10.09.2019.)
- [19] https://www.reddit.com/r/aviation/comments/263vyf/wing_spars_on_f35_pic/ (10.09.2019.)
- [20] <https://www.additivemanufacturing.media/news/consortium-builds-ship-propeller-via-wire-plus-arc-additive-manufacturing-waam-> (10.09.2019.)
- [21] <https://mx3d.com/projects/> (25.11.2019.)
- [22] <https://mx3d.com/arc-bike-i/> (10.09.2019.)
- [23] <http://en.raycham.com/product/8.html> (16.09.2019.)
- [24] <https://www.voestalpine.com/welding/fr/Company/News/A-new-range-of-solid-wires-designed-for-Wire-Arc-Additive-Manufacturing> (16.09.2019.)
- [25] Kralj S., Kožuh Z., Andrić Š.: Zavarivački i srodni postupci, Priručnik, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [26] Levačić D.: Zavarivanje aluminijske legure AlMg4,5Mn, Diplomski rad, FSB, 2012.
- [27] O'Brien, Annette (Eds.): Welding Handbook (9th edition), Volume 2, Welding Processes, Part 1, American Welding Society, Miami, USA, 2004.
- [28] Mikulić, M.: Modificirani MAG postupci za visokoučinsko zavarivanje, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2018.
- [29] Rudan M.: Zavarivanje u zaštiti plina taljivom elektrodom (MIG/MAG), 2. Seminar DTZI, Pula, 2005.
- [30] Garašić, I.; Kožuh, Z.: Priručnik iz kolegija Strojari i oprema za zavarivanje, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2016.
- [31] https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWire-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf (17.09.2019.)
- [32] https://www.electro-cal.com/pdf/MIG_Welding.pdf (17.09.2019.)
- [33] Rudan M.: MIG zavarivanje tankih aluminijskih limova, 5. Seminar DTZI, Pula, 2008.

- [34] Rudan M.: Zavarivanje nehrđajućih čelika MIG impulsnim postupkom, 4. Seminar DTZI, Pula, 2007.
- [35] Runje B.: Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja, autorizirana predavanja, FSB, Zagreb, 2014.
- [36] EN ISO 25178-2:2012 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal, Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters
- [37] https://sernia.ru/upload/pdf_files/Introduction%20to%20surface%20roughness%20measurement.pdf (01.11.2019.)
- [38] <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/sq-root-mean-square-height.jsp> (01.11.2019.)
- [39] https://www.olympus-ims.com/en/knowledge/metrology/roughness/3d_parameter/ (02.11.2019.)
- [40] https://www.ewm-sales.com/en/MIG_MAG_welding_machines/Titan_XQ_puls/Titan_XQ_350_puls_D_W--090-005560-00001.html (03.11.2019.)
- [41] https://www.ewm-sales.com/de/Komponenten_und_Zubehoer/Drahtvorschubgeraete_Verschleissteile_und_Zubehoer/MIG_MAG/Drive_XQ/Drive_XQ_EX_MMA_DGC--090-005570-00005.html (03.11.2019.)
- [42] <https://www.ezg.hr/proizvodi/wire/EZSG2.html> (10.11.2019.)
- [43] HRN EN 1011-1: 2009: Preporuke za zavarivanje metalnih materijala – 1. dio: Opće smjernice za elektrolučno zavarivanje, 2009.
- [44] <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=62873> (20.11.2019.)