

Primjena coldArc postupka zavarivanja za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom

Kostel, Luka

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:235:054982>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**

Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Luka Kostel

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Luka Kostel

Zagreb, 2019.

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

Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Ivici Garašiću na ukazanom povjerenju i stručnom vođenju kroz izradu diplomskog rada.

Posebno se zahvaljujem asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech, na velikom razumijevanju, strpljenju i pomoći u svim segmentima izrade ovog rada.

Također zahvaljujem djelatnicima Laboratorija za zavarivanje na pomoći pri izradi eksperimentalnog djela rada.

Luka Kostel



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: **LUKA KOSTEL** Mat. br.: **0035193683**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Primjena coldArc postupka zavarivanja za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Application of coldArc welding process for wire and arc additive manufacturing**

Opis zadatka:

U teorijskom dijelu potrebno je ukratko obraditi postupak aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom te navesti i opisati materijale za koje je taj postupak primjenjiv s naglaskom na dupleks nehrđajuće čelike. Detaljno proučiti coldArc postupak zavarivanja te navesti njegove specifičnosti i područja primjene. Sukladno normi HRN EN ISO 25178-2 obraditi osnovne parametre teksture površine.

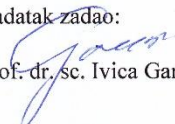
U eksperimentalnom dijelu primjenom robotiziranog zavarivanja izraditi više ispitnih uzoraka od dupleks nehrđajućeg čelika koristeći coldArc postupak i konvencionalni postupak zavarivanja. Snimiti dinamičke karakteristike tijekom zavarivanja uzoraka te na temelju istih izračunati ostvarene unose energije. Na gotovim uzorcima odrediti parametre teksture površine te analizirati rezultate. U konačnici ocijeniti primjenjivost coldArc postupka za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom.

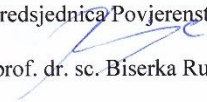
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
02. svibnja 2019.

Rok predaje rada:
04. srpnja 2019.

Predviđeni datum obrane:
10. srpnja 2019.
11. srpnja 2019.
12. srpnja 2019.

Zadatak zadao:

prof. dr. sc. Ivica Garašić

Predsjednica Povjerenstva:

prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VII
POPIS OZNAKA I FORMULA	IX
POPIS KRATICA	X
SAŽETAK.....	XII
SUMMARY	XIII
1. UVOD.....	1
2. ADITIVNA PROIZVODNJA	2
2.1 Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom - WAAM.....	6
2.2 Materijali kod WAAM postupka	9
2.2.1 Čelici	9
2.3 Prednosti i nedostaci WAAM postupka.....	12
2.4 Primjena WAAM postupka [15]	14
3. DUPLEKS ČELICI	15
3.1 Mikrostruktura dupleks čelika	17
3.1.1 Utjecaj legirnih elemenata na mikrostrukturu dupleks čelika.....	17
3.1.2 Korozijska postojanost dupleks čelika	20
3.1.2.1 Napetosna korozija.....	20
3.1.2.2 Rupičasta korozija.....	21
3.2 Opća svojstva dupleks čelika	22
3.3 Zavarljivost dupleks čelika	23
4. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE TALJIVOM ELEKTRODOM U ZAŠTITNOJ ATMOSFERI PLINA (MIG/MAG ZAVARIVANJE)	27
4.1 Kratka povijest razvoja MIG/MAG postupka zavarivanja	29
4.2 Parametri MIG/MAG postupka zavarivanja	30
4.3 Načini prijenosa metala u električnom luku	35
4.3.1 Prijenos metala električnim lukom kratkog spoja.....	35
4.3.2 Prijenos metala prijelaznim električnim lukom	36
4.3.3 Prijenos metala štrcajućim električnim lukom.....	37

4.3.4	Prijenos metala impulsnim električnim lukom	38
4.4	Modificirani načini prijenosa metala	39
4.4.1	coldArc®.....	40
4.4.1.1	Usporedba konvencionalnog prijenosa metala kratkim spojem sa coldArc kratkim spojem	42
4.4.1.2	Primjeri coldArc procesa zavarivanja	47
5.	PARAMETRI TEKSTURE POVRŠINE.....	49
5.1	Amplitudni parametri	50
6.	EKSPERIMENTALNI DIO	55
6.1	Korištena oprema i provedeni postupci	56
6.2	Rezultati dobiveni <i>coldArc</i> postupkom zavarivanja	68
6.3	Rezultati dobiveni konvencionalnim prijenosom metala kratkim spojem.....	82
6.4	Analiza i usporedba rezultata	95
7.	ZAKLJUČAK.....	102
	LITERATURA.....	104
	PRILOZI.....	107

POPIS SLIKA

Slika 1.	Faze aditivne proizvodnje [4].....	3
Slika 2.	Objekt: a) 3D model, b) STL datoteka [4]	4
Slika 3.	Podjela postupaka aditivne proizvodnje metalnih dijelova [6]	6
Slika 4.	Zid izrađen WAAM postupkom [8]	7
Slika 5.	Shematski prikaz valjanja tijekom zavarivanja [8]	8
Slika 6.	Primjer proizvoda izrađenog od dupleks nehrđajućeg čelika WAAM postupkom [13]	12
Slika 7.	Krilo izrađeno WAAM postupkom od čelika visoke čvrstoće [15].....	14
Slika 8.	Promjena strukture kristalne rešetke dodatkom nikla [17].....	18
Slika 9.	Promjena mikrostrukture dodatkom nikla [17]	19
Slika 10.	Otpornost prema napetostnoj koroziji u ovisnosti u temperaturi i koncentraciji kloridnih iona [16].....	20
Slika 11.	Inicijalna rupica na granici faza austenita i ferita [16].....	21
Slika 12.	Oprema MIG/MAG postupka zavarivanja [20]	27
Slika 13.	Jakost struje u ovisnosti o promjeru žice i brzini zavarivanja [21]	31
Slika 14.	Shematski prikaz izgleda zavara u ovisnosti o jakosti struje [24].....	31
Slika 15.	Shematski prikaz izgleda zavara u ovisnosti o brzini zavarivanja [24]	32
Slika 16.	Slobodni kraj žice [24]	32
Slika 17.	Ravna (CV) karakteristika izvora struja zavarivanja [25].....	33
Slika 18.	Utjecaj induktiviteta na jakost struje [26]	35
Slika 19.	Prijenos kapljice metala električnim lukom kratkog spoja [26].....	36
Slika 20.	Prijenos metala prijelaznim električnim lukom [26]	37
Slika 21.	Prijenos kapljica metala štrcajućim električnim lukom [26].....	38
Slika 22.	Prijenos kapljica metala impulsnim električnim lukom [26]	39

Slika 23.	Prijenos metala kratkim spojem i promjene struje i napona [30].....	42
Slika 24.	<i>coldArc</i> proces sa pripadajućim promjenama struje i napona [30]	44
Slika 25.	Usporedba električne snage kod ponovne uspostave električnog luka [30].....	46
Slika 26.	Primjer spoja nastalog <i>coldArc</i> procesom zavarivanja [30].....	47
Slika 27.	Čelični lim debljine 1,0 mm; sučeljeni spoj razmaka 1 mm; 1,0 mm G4Si1 dodatni materijal 2,0 m/min; $U = 19\text{ V}$; $I = 136\text{ A}$ [30]	48
Slika 28.	Lim AlMg3; kutni spoj na preklopnom spoju; 1,0 mm AlSi5 dodatni materijal 1,2 m/min; $U = 13\text{ V}$; $I = 55\text{ A}$ [30]	48
Slika 29.	Miješani spoj aluminija i čelika sa cinkom kao dodatnim materijalom [30]	48
Slika 30.	Površina keramičke ploče [31]	49
Slika 31.	Površina papira [31]	50
Slika 32.	Odstupanje srednjeg korijena visine neravnine površine [31]	51
Slika 33.	Parametar asimetrije rasipanja visine površine [30].....	52
Slika 34.	Parametar rasipanja oštrina vrhova površine [31]	53
Slika 35.	Maksimalna visina vrhova [31]	53
Slika 36.	Priprema lima za rezanje	56
Slika 37.	CNC stroj za plazma rezanje i izrezane pločice (podloge) za zid	57
Slika 38.	Robotska stanica Almega OTC AX V6	58
Slika 39.	EWM Titan XQ 350 puls	59
Slika 40.	Pomično mjerilo	60
Slika 41.	Označena mjesta mjerenja visine zida.....	60
Slika 42.	Infracrveni termometar	61
Slika 43.	Osciloskop korišten za mjerenje dinamičke karakteristike rijekom postupka zavarivanja.....	62
Slika 44.	Strujna kliješta.....	62

Slika 45.	Primjer grafičkog prikaza promjene napona ili struje u vremenu	63
Slika 46.	Grafički prikaz promjene struje i napona bilježen na računalu.	64
Slika 47.	Primjer obrade podataka u MS Excelu – promjena napona u vremenu	64
Slika 48.	Primjer obrade podataka u MS Excelu – promjena struje u vremenu.....	65
Slika 49.	DAVID SLS 2 3D skener	65
Slika 50.	Softver MountainsMap proizvođača Digital Surf	66
Slika 51.	Rezultat skeniranja zida sustavom DAVID SLS 2 3D skener	66
Slika 52.	Zid dobiven postupkom zavarivanja <i>coldArc</i>	68
Slika 53.	Oznake mjesta mjerenja visine zida	69
Slika 54.	Promjena napona, struje u unosa topline tijekom vremenskog intervala – prolaz 1	72
Slika 55.	Promjena napona, struje u unosa topline tijekom vremenskog intervala – prolaz 15	73
Slika 56.	Promjena napona, struje u unosa topline tijekom vremenskog intervala – prolaz 30	74
Slika 57.	Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 1	76
Slika 58.	Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 2	77
Slika 59.	Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 3	78
Slika 60.	Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 4	79
Slika 61.	Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 5	80
Slika 62.	Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 6	81
Slika 63.	Zid dobiven konvencionalnim prijenosom metala kratkim spojem	82
Slika 64.	Promjena napona, struje u unosa topline tijekom vremenskog intervala – prolaz 1	85
Slika 65.	Promjena napona, struje u unosa topline tijekom vremenskog intervala – prolaz 15	86

Slika 66.	Promjena napona, struje u unosa topline tijekom vremenskog intervala – prolaz 30	87
Slika 67.	Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 1	89
Slika 68.	Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 2	90
Slika 69.	Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 2	91
Slika 70.	Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 4	92
Slika 71.	Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 5	93
Slika 72.	Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 6	94
Slika 73.	Prosječni prirast zida po sloju	96
Slika 74.	Usporedbi prikaz promjene struje tijekom izrade jednog sloja zida	96
Slika 75.	Usporedbi prikaz promjene napona tijekom izrade jednog sloja zida.....	97
Slika 76.	Usporedbi prikaz promjene unosa topline tijekom izrade jednog sloja zida.....	98
Slika 77.	Usporedni prikaz prosječnih unosa topline po sloju, kJ/cm	99
Slika 79.	Usporedbi prikaz parametra maksimalne visine neravnina površine (S_p)	100
Slika 78.	Usporedni prikaz parametra asimetričnosti rasipanja visina površine (S_{sk}).....	100
Slika 81.	Usporedbi prikaz raspona visina površine (S_z)	101
Slika 80.	Usporedbi prikaz maksimalne dubine neravnina površine (S_v).....	101
Slika 82.	Usporedbi prikaz parametra aritmetičke sredine visina površine (S_a).....	101

POPIS TABLICA

Tablica 1. Materijali koji se koriste kod WAAM postupka [9].....	9
Tablica 2. Cijena materijala kod WAAM postupka [10]	9
Tablica 3. Kemijski sastav materijala [12].....	10
Tablica 4. Parametri zavarivanja [12]	10
Tablica 5. Moguće greške i njihovi uzroci [8]	13
Tablica 6. Parametri teksture površine – amplitudni paramteri [31].....	51
Tablica 7. Karakteristike uređaja za zavarivanje EWM Titan XQ 350 puls [32]	59
Tablica 8. Prikaz nastale visine zida uzorka 1.....	70
Tablica 9. Prosječne unesene topline slojeva i ukupna prosječna unesena toplina zida – uzorak 1	71
Tablica 10. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 1	76
Tablica 11. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 2	77
Tablica 12. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 3	78
Tablica 13. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 4.....	79
Tablica 14. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 5	80
Tablica 15. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 6	81
Tablica 16. Prikaz nastale visine zida uzorka 2	83
Tablica 17. Prosječne unesene topline slojeva i ukupna prosječna unesena toplina zida – uzorak 2	84
Tablica 18. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 1	89
Tablica 19. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 2	90
Tablica 20. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 3	91
Tablica 21. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 4	92
Tablica 22. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 5	93

Tablica 23. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 6	94
---	----

POPIS OZNAKA I FORMULA

Oznaka	Jedinica	Opis
Q	kJ/cm	Unesena toplina u radni komad prilikom zavarivanja
I	A	Jakost električne struje
U	V	Napon izvora napajanja
v	cm/min	Brzina zavarivanja
η	-	Koeficijent korisnog djelovanja električnog luka

$$Q = \frac{60}{1000} \cdot \frac{I \cdot U}{v} \cdot \eta, \quad \text{kJ/cm}$$

POPIS KRATICA

Kratika	Opis
3D	Trodimenzionalno
AMF	Datoteka modela pri primjeni za aditivne postupke (engl. Additive Manufacturing File)
AOD	Postupak razugljičenja kisikom i argonom dupleks nehrđajućih čelika (engl. argon oxygen decarburization)
ASTM	Američko društvo za ispitivanje i materijale (engl. American Society for Testing and Materials)
BCC	Prostorno centrirana kubična rešetka (engl. Body Centered Cubic Lattice)
BTF	Omjer mase sirovca i gotovog proizvoda (engl. Buy-to-fly)
CAD	Konstruiranje pomoću računala (engl. Computer Aided Design)
CMT	Modificirani postupak zavarivanja kratkim spojem (engl. Cold Metal Transfer)
CNC	Računalno numeričko upravljanje alatnim strojevima (engl. Computer Numerical Control)
Cr	Krom
Cu	Bakar
DS	Vrijednost djelotvorne sume
FCAW	Elektrolučno zavarivanje taljivom praškom punjenom žicom (engl. Flux-Cored Arc Welding)
FCC	Plošno centrirana kubična rešetka (engl. Face Centered Cubic Lattice)
GMAW	Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom pod zaštitom inertnog plina (MIG)
MAG	Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti aktivnog plina (engl. Metal Active Gas)
MIG	Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog plina (engl. Metal Inert Gas)
MMA	Elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom (engl. Manual Metal Arc Welding)

Mn	Mangan
Mo	Molibden
N	Dušik
Ni	Nikal
P	Fosfor
RM	Brza (izravna) proizvodnja (engl. Rapid Manufacturing)
RMT	Modificirani MIG/MAG postupci zavarivanja (engl. Rapid MIG/MAG Technology)
RP	Brza proizvodnja prototipova (engl. Rapid Prototyping)
RT	Brza proizvodnja kalupa i alata (engl. Rapid Tooling)
S	Sumpor
SAW	Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom pod zaštitom praška (EP)
Si	Silicij
STL	Triangulizacijska datoteka (engl. Standard Tessellation Language)
STT	Modificirani MIG/MAG postupak zavarivanja električnim lukom i žicom (engl. Surface Tension Transfer)
TIG	Elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom (engl. Tungsten Inert Gas)
W	Volfram
WAAM	Aditivna proizvodnja žicom i laserom (engl. Wire and Laser Additive Manufacturing)
ZUT	Zona utjecaja topline

SAŽETAK

U teorijskom djelu rada opisana je općenito aditivna proizvodnja, a nakon toga opisana je aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom, skraćeno WAAM. Kako se u eksperimentalnom djelu koristio dupleks čelik, isti je također opisan u teorijskom djelu rada. Dan je opis te vrste čelika, njihova zavarljivost, korozijska postojanost te opća svojstva. Kako se kod WAAM proizvodnje koristi električni luk i žica kao dodatni materijal, opisani su postupci MIG/MAG zavarivanja s posebnim naglaskom na modificiranu inačicu – *coldArc*.

U eksperimentalnom dijelu rada ispitana su površinska svojstva i određeni su parametri teksture površine uzorka izrađenog WAAM postupkom. Tijekom izrade uzoraka WAAM postupkom, ispitivana je dinamička karakteristika izvora struje u svrhu detaljnog promatranja ponašanja električnog luka tijekom zavarivanja, odnosno pratile su se promjene napona i struje tijekom formiranja i odvajanja rastaljene kapljice metala. Također, mjerila se visina nastalog zida kao i količina utrošene žice nakon dobivene predefinirane visine zida.

Ključne riječi: WAAM, *coldArc*, dupleks čelici, parametri teksture površine, visina zida

SUMMARY

Presented work consists of two parts, theoretical and experimental.

In the theoretical part, additive manufacturing is generally described after which wire and arc additive manufacturing is presented, in short WAAM. As the duplex stainless steel was used in the experiment, the same was described in the theoretical part of the paper. General description was given, as well as their weldability, corrosion resistance and general properties. Since WAAM production uses electric arc and wire as an additive, the MIG/MAG welding procedures were described with special emphasis on the modified version – *coldArc*.

In the experimental part, on the samples made by WAAM, the surface properties were examined and surface texture parameters were determined. During the production of samples with the WAAM method, the dynamics of the current source were studied for the purpose of a detailed observation of the electric arc behaviour during the welding process, i.e. changes in voltage and current were observed during the formation and separation of molten metal droplets. Also, the height of the wall was also measured to see its growth rate (mm/1 pass), and to determine how much of additional material (metal wire) was used to create a wall of predefined height (85 mm).

Key words: WAAM, *coldArc*, duplex stainless steel, surface texture parameters, wall height

1. UVOD

Aditivna proizvodnja postupak je proizvodnje proizvoda komplicirane geometrije te omogućuje korištenje širokog spektra materijala. Kratko vrijeme proizvodnje i ušteda materijala glavne su odlike ovog postupka proizvodnje. Aditivna proizvodnja već je pronašla svoje mjesto u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji, međutim, za druge primjene još je uvijek u fazi ispitivanja i razvoja.

Opsežna istraživanja se provode na postupku aditivne proizvodnje s metalnom žicom iako je postupak aditivne proizvodnje s praškom kao dodatnim materijalom daleko razvijeniji. Međutim, kod korištenja praška kao dodatnog materijala depozit materijala je vrlo nizak pa se samim time znatno produljuje vrijeme izrade proizvoda. Zbog navedenog se taj postupak, iako razvijeniji, koristi najčešće za izradu proizvoda manjih dimenzija. Rade se opsežna istraživanja na postupku koji koristi žicu kao dodatni materijal zbog visokog depozita materijala i veće brzine proizvodnje. Postupci koji koriste žicu kao dodatni materijal razlikuju se prema izvoru energije. Iz toga slijedi da je WAAM (engl. Wire and Arc Additive Manufacturing) postupak jedan od novijih postupaka aditivne proizvodnje metalnih dijelova komplicirane geometrije navarivanjem sloj po sloj, a kao izvor energije koristi električni luk.

Kod postupka aditivne proizvodnje koriste se različiti materijali. Najčešće korišteni materijali kod WAAM postupka su aluminij i titan. Iako su dobrih mehaničkih svojstava, njihova visoka cijena jedan je od glavnih razloga zbog kojeg se sve više interesa ulaže u WAAM postupak proizvodnje sa čeličnom žicom kao dodatnim materijalom.

Posebna važnost pridaje se dupleks čelicima. Dvofazna struktura dupleks nehrđajućih čelika, sastavljena od feritne i austenitne faze u podjednakim udjelima, zaslužna je za glavna svojstva koje ovi čelici imaju, a to su odlična otpornost prema interkristalnoj, napetostnoj i rupičastoj koroziji u kombinaciji sa visokom vlačnom čvrstoćom, visokom granicom razvlačenja i visokom žilavošću. Primjena dupleks čelika danas je veoma raširena.

Već je prije navedeno da se kod WAAM postupka kao dodatni materijal koristi žica u zaštiti plina. Postupak koji se uglavnom pri tome koristi je MIG/MAG postupak. Mogu se koristiti konvencionalni postupci ili modificirani postupci MIG/MAG zavarivanja. Svaki od postupaka ima svoje prednosti i nedostatke.

2. ADITIVNA PROIZVODNJA

Aditivna proizvodnja je proces kojim se formiraju slojevi nekog materijala u svrhu izrade trodimenzionalnih objekata iz prethodno izrađenih digitalnih modela. Aditivna proizvodnja pruža mogućnost izrade prilagođenih objekata u jednom koraku. Pojava naprednih tehnologija, zajedno sa zahtjevima za održivijim i učinkovitijim iskorištenjem resursa i trendovima za futurističkim strukturama, uzrokuje promjene u mjerilu i raspodjeli konstrukcija. Novi pristupi, kao što je automatizirana proizvodnja, pružaju veliko odstupanje od konvencionalnih metoda gradnje objekata. Ovakav pristup najviše je istraživao u smislu robotike. Primjena robotike nazire se kao rješenje za poboljšanje produktivnosti, kvalitete i kontrole kvalitete, radnih uvjeta i nedostatka kvalificirane radne snage. [1]

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

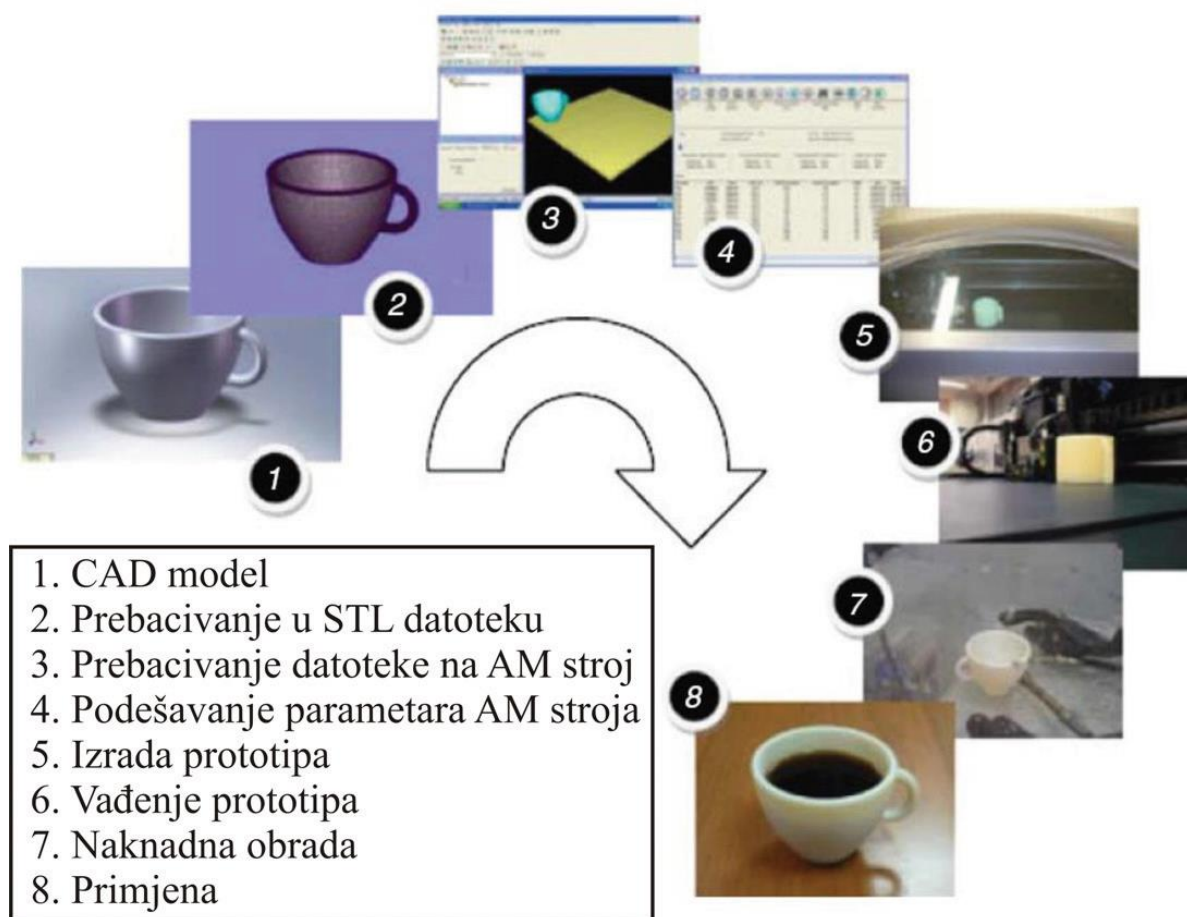
Brza proizvodnja prototipova (engl. *Rapid Prototyping – RP*) počela se razvijati 1980-ih godina i samo se upotrebljavala za izradu prototipova, dok su se paralelno razvijali postupci brze izrade proizvodnje kalupa (engl. *Rapid Tooling – RT*) koji su zajedno činili brzu proizvodnju (engl. *Rapid Manufacturing – RM*). Prema normi ASTM F42 koja je donesena 2009. godine rabi se izraz aditivna proizvodnja (engl. *Additiv Manufacturing – AM*). [3]

Aditivna proizvodnja služi za izradu modela komplicirane geometrije, prototipova, dijelova kalupa i alata. Postoji puno različitih postupaka, ali najčešće se temelje na dodavanju materijala sloj po sloj. Glavna odlika aditivne proizvodnje je direktna proizvodnja izravno iz 3D CAD modela bez planiranja procesa, izrade kalupa, itd. [4]

Princip aditivne proizvodnje uvijek je isti neovisno o postupku. Postupak proizvodnje može se podijeliti u nekoliko faza (slika 1): [4]

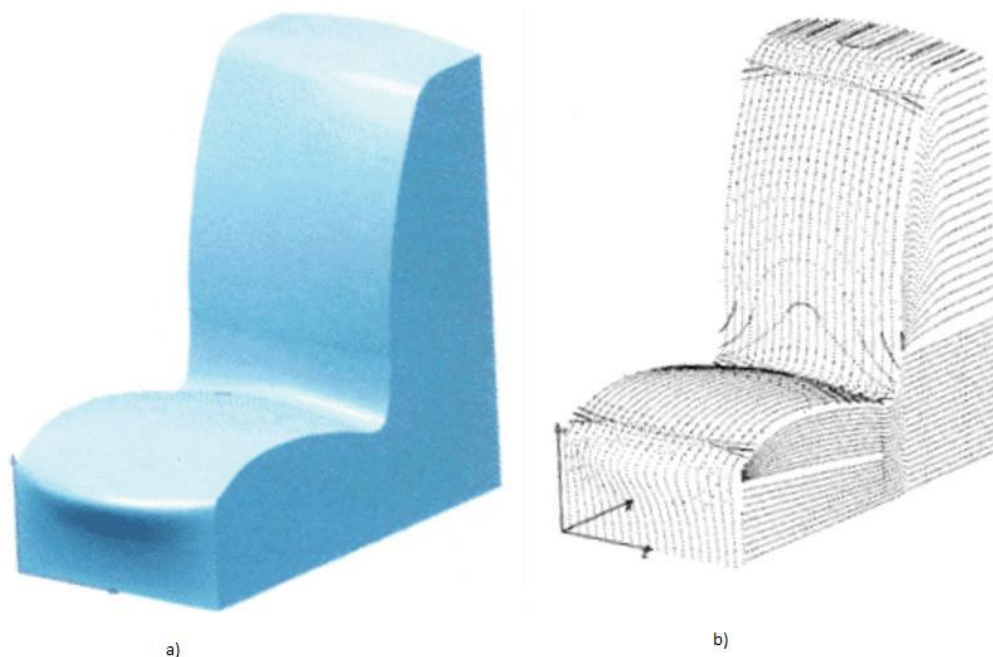
- izrada CAD modela
- pretvaranje CAD modela u STL datoteku
- prebacivanje STL datoteke na stroj za aditivnu proizvodnju
- podešavanje parametara stroja za aditivnu proizvodnju
- izrada objekta

- vađenje objekta
- naknadna obrada, ako je potrebna
- primjena.



Slika 1. Faze aditivne proizvodnje [4]

Izrada CAD modela prvi je korak postupka aditivne proizvodnje. Takav model sprema se u različitim formatima, međutim razvijen je sustav STL datoteke (engl. *Standard Tessellation Language*) koja predmete prikazuje kao mrežu povezanih trokuta (slika 2.). STL datoteka ne podržava prikaz boja, pa je 2009. godine razvijena AMF datoteka (emgl. *Additive Manufacturing File*) koja je uz STL datoteku postala standard za postupke aditivne proizvodnje. AMF datoteka opisuje objekt pomoću raspoređenih vektora. Svaki objekt opisan je kao grupa nepreklopljenih volumena, koji su opisani kao mreža trokuta koja povezuje grupu točaka. AMF datoteka podržava zadavanje opisa materijala, boje pojedinih volumena i boju svakog trokuta u mreži. [4]



Slika 2. Objekt: a) 3D model, b) STL datoteka [4]

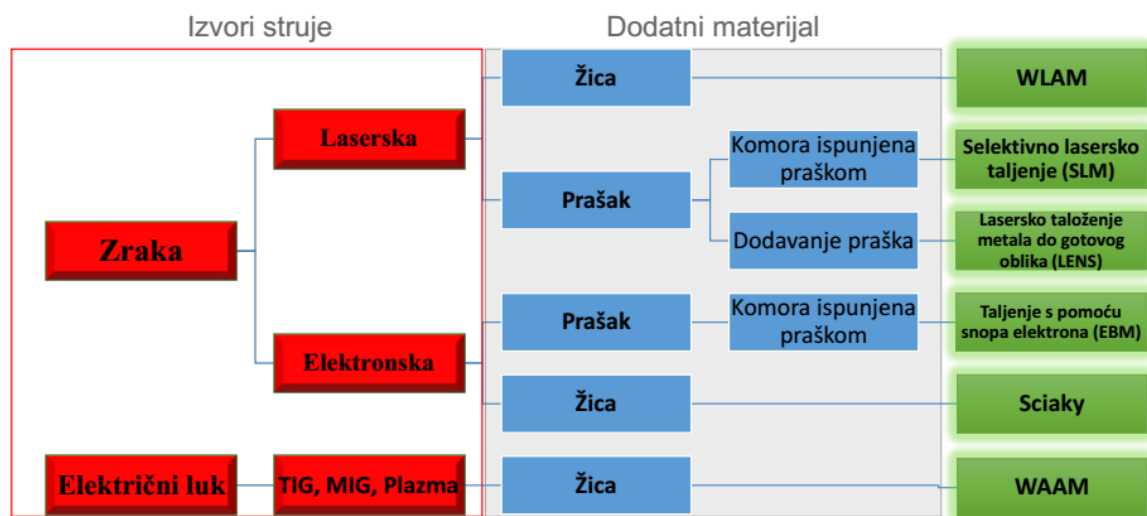
U posljednjih 30 godina, aditivnoj proizvodnji pridaje se sve više pozornosti te je doživjela veliki napredak. Aditivna proizvodnja sve se više koristi u mnogim granama industrije s posebnim naglaskom na proizvodnju pojedinačnih dijelova i prototipova. U početku se postupak aditivne proizvodnje koristio za izradu dijelova od polimera, koji su se nadalje koristili za izradu uređaja za komunikaciju ili istraživačke svrhe, a nedavno se postupak aditivne proizvodnje koristi za izradu gotovih dijelova. Mogućnost izrade prototipova u kratkom vremenu izravno iz CAD modela znatno skraćuje vrijeme izrade gotovog proizvoda. Kako bi se što bolje ispunili zahtjevi zrakoplovne i autoindustrije te industrije alata, nedavno su počela istraživanja proizvodnje metalnih dijelova složene geometrije, uključujući i materijale poput legura titana i nikla, s kojima se, koristeći klasične metode, teško može proizvoditi ekonomično. [5]

Prema ASTM F2792 [1], tipični materijali koji se koriste prilikom aditivne proizvodnje metalnih komponenata su u obliku praha ili metalne žice. Vrsta metalnog materijala može varirati ovisno o željenim svojstvima gotovog proizvoda. S obzirom na način dodavanja materijala tijekom procesa aditivne proizvodnje, trenutno popularne tehnologije aditivne proizvodnje mogu se klasificirati kao postupak AM s kontinuiranim dodavanjem metalne žice ili kontinuiranim dodavanjem metalnog praha. Postupci aditivne proizvodnje s dodavanjem

praha bolje su razvijeni jer omogućuju proizvodnju dijelova s većom geometrijskom točnošću. Tipična debljina sloja kod navedenog načina proizvodnje nalazi se u granicama između 20 μm i 100 μm , tolerancija gotovih dijelova iznosi $\pm 0,05 \text{ mm}$, a kvaliteta površine kreće se između 9 μm i 16 μm . Niska proizvodnost, odnosno depozit materijala od samo 10 g/min, glavni je nedostatak postupka, što ograničava proizvodnju većih dijelova (postupak je pogodan za dijelove malih dimenzija). [5]

Kod postupka aditivne proizvodnje metalnom žicom, koristi se čvrsta metalna žica (nije metalni prah) izrađena od materijala od kojeg se želi napraviti proizvod. Ovisno o izvoru energije za zavarivanje, postupci aditivne proizvodnje metalnom žicom mogu se podijeliti u tri grupe: zavarivanje laserom, zavarivanje elektronskim snopom i zavarivanje električnim lukom. Aditivna proizvodnja metalnom žicom imao visoku iskoristivost materijala, odnosno gotovo 100 % materijala žice koristi se za izradu metalnih dijelova. Postupak je zbog toga ekološki prihvatljiviji, a operateri nisu izloženi prahu tijekom zavarivanja, što potencijalno može imati veoma negativan utjecaj na zdravlje. U usporedbi s procesom proizvodnje kod kojeg se koristi prah, proces sa metalnom žicom ima mnogo veći depozit materijala. Tipična količina depozita materijala iznosi 2500 cm^3/h odnosno 330 g/min za nehrđajuće čelike. Postoji velika razlika između količine depozita materijala i rezolucije, pa je potrebno odabrati onaj postupak koji je pogodniji za izradu pojedinih dijelova (ovisno koji se zahtjevi stavljaju na gotov proizvod). Iz prethodnog opisa obje vrste postupka, moguće je već zaključiti da će se, ukoliko se koristi postupak s metalnom žicom, postići veća količina depozita i time će se veći dijelovi ekonomičnije proizvesti, ali znatno će se smanjiti rezolucija i geometrijska točnost proizvoda. Niska cijena i laka dostupnost metalne žice sa željenim svojstvima daje značajnu prednost u odnosu na metalni prah, koji je u prvom redu skup, a i teško je nabaviti metalni prah točno određenih svojstava. [5]

Na slici 3. prikazana je osnovna podjela postupaka aditivne proizvodnje koji se primjenjuju kod proizvodnje metalnih komponenti.



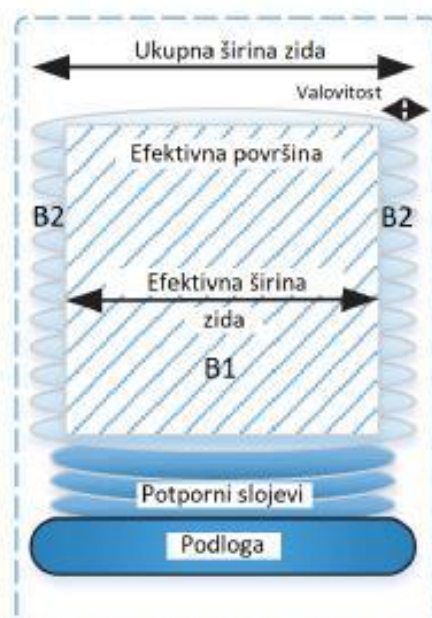
Slika 3. Podjela postupaka aditivne proizvodnje metalnih dijelova [6]

2.1 Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom - WAAM

Postupak WAAM relativno je nova tehnologija aditivne proizvodnje, a kao izvor topline koristi električni luk, te omogućava izradu metalnih komponenti navarivanjem sloj po sloj. Aditivna proizvodnja lukom i žicom najčešće se naziva WAAM, što u prijevodu sa engleskog jezika znači „Wire and Arc Additive Manufacturing“. [8] Postupak je patentiran 1926. godine, a patentirao ga je Baker. On je koristio elektrolučno zavarivanje za izradu 3D modela taloženjem rastaljenog materijala i nizanjem sloj po sloj. [6] Aditivna proizvodnja lukom i žicom pruža značajne strateške prednosti u proizvodnji. Tehnologija objedinjuje zavarivanje električnim lukom uz kontinuirano dodavanje metalne žice, što omogućuje značajnu slobodu u dizajnu budućih proizvoda. Ovi aspekti tehnologije čine WAAM posebno pogodnim za izradu velikih, personaliziranih proizvoda od materijala visoke vrijednosti. Prethodno opisani princip funkcioniranja aditivne proizvodnje primjenjuje se i kod WAAM postupka, uz razliku što se kod WAAM postupka koristi električni luk kao izvor energije za zavarivanje, a kao dodatni materijal koristi se žica izrađena od metala koji ćemo koristiti u proizvodnji. Rezultat WAAM postupka proizvodnje je zid minimalne širine 1 mm do 2 mm, što uključuje i valovitost. Valovi su zapravo višak materijala koji mora biti uklonjen u naknadnoj strojnoj obradi. Naknadna strojna obrada je potrebna kako bi se uklonile površinske nepravilnosti, a koje su definirane kao razlika između ukupne širine zida i efektivne širine zida. Uspoređujući WAAM sa

konvencionalnim postupcima proizvodnje, redukcija otpadnog materijala veoma je primjetna, tipično sa 90 % na svega 10 %. WAAM tehnologija proizvodnje ima značajne prednosti u odnosu na konvencionalne načine proizvodnje. Omogućuje dobivanje gotovog oblika proizvoda bez pretjerane naknadne strojne obrade. Na taj način se štedi dragocjen materijal, kao što je titan.

Također, depozit materijala, npr. titana, je značajno veći u odnosu na druge postupke aditivne proizvodnje i iznosi gotovo 1 kg/h u usporedbi sa postupkom aditivne proizvodnje metalnim prahom, koji u tom slučaju iznosi samo 0,2 kg/h. Na slici 4 prikazana je skica zida izrađena WAAM postupkom. Kod izrade također je bitan i tzv. BTF (engl. *Buy to Fly*) omjer, a to je omjer mase sirovca i gotovog proizvoda. Poželjno je da taj omjer bude što manji, dok je idealna vrijednost jednaka jedan.



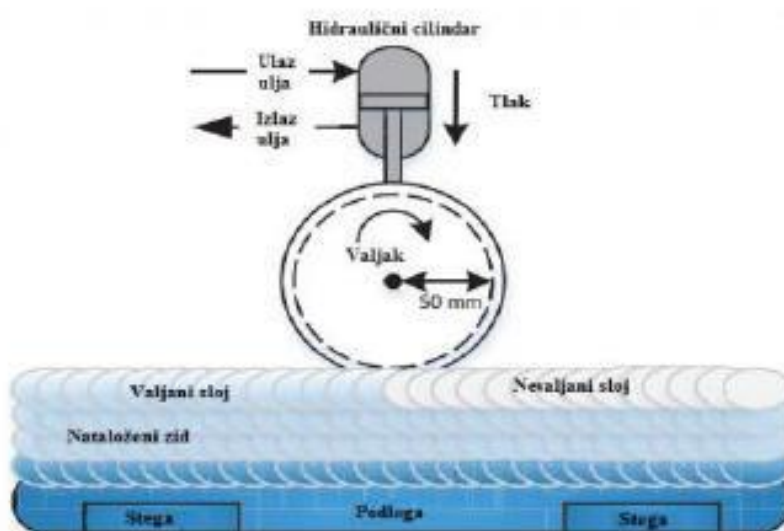
Slika 4. Zid izrađen WAAM postupkom [8]

WAAM sustavi mogu imati različite konfiguracije: kao izvor energije za zavarivanje može se koristiti TIG sustav, MIG sustav i plazma. U općenitom slučaju WAAM sustavi sastavljeni su od nekoliko osnovnih dijelova: plamenik za unos topline, robot ili CNC stroj koji ima mogućnost praćenja konture proizvoda prema računalnom modelu, upravljačka ploča, dodavač žice za kontrolu depozita materijala i moguće valjak kojim se prolazi nakon svakog nanesenog sloja kako bi se poboljšala mehanička svojstva proizvoda.

Zbog velikog unosa topline, dijelovi izrađeni WAAM postupkom izloženi su velikim zaostalim napreznjima koja značajno smanjuju mehanička svojstva proizvedenog dijela i distorziji koja otežava postizanje dimenzija proizvoda u zadanim tolerancijama.

U svrhu izbjegavanja problema koji se javljaju tijekom WAAM postupka proizvodnje, potrebno je posvetiti pažnju određenim radnjama prije zavarivanja, tijekom zavarivanja i nakon zavarivanja. Prije zavarivanja potrebna je optimizacija parametara, učvršćivanje podloge i optimizacija taloženja materijala po slojevima. Najveći utjecaj na distorziju imaju učvršćivanje podloge i optimizacija taloženja materijala po slojevima, dok parametri zavarivanja utječu u znatno manjoj mjeri. Tijekom taloženja materijala potrebno je ostvariti taloženje materijala s obje strane podloge, kako bi se postigao željeni geometrijski oblik proizvoda. Optimizacija vremena hlađenja također je potrebna tijekom zavarivanja. Unesena toplina jednog sloja koristi se kao toplina za predgrijavanje narednog sloja, a predgrijavanjem se smanjuju zaostala naprezanja.

Najveći utjecaj na zaostala naprezanja ima valjanje. Postupak valjanja provodi se tijekom zavarivanja, a sastoji se unosa pritiska u prethodno nanese sloj materijala i to pomoću hidrauličkog cilindra. Valjanjem se uz smanjenje zaostalih naprezanja, smanjuje i valovitost zida te se postiže ujednačenost nanesenog sloja, čime se dobiva povoljnija mikrostruktura zbog smanjenja veličine zrna. [8] Shematski prikaz postupka valjanja dan je na slici 5.



Slika 5. Shematski prikaz valjanja tijekom zavarivanja [8]

2.2 Materijali kod WAAM postupka

Aluminij, titan, čelik, invar, bronca, bakar i nikal su materijali koji se primjenjuju kod WAAM postupka. Neovisno koji se materijal koristi kod WAAM postupka, cilj je postići zadovoljavajuća mehanička svojstva gotovog proizvoda i spriječiti nastanak grešaka, kao što je poroznost. [9] U Tablici 1 prikazani su materijali koji se koriste kod WAAM postupka.

Tablica 1. Materijali koji se koriste kod WAAM postupka [9]

Titan	Ti-6Al-4V
Aluminij	2024, 2319, 4043, 5087
Vatrootporni čelici	volfram, molibden, tantal
Čelici	nelegirani, niskolegirani, martenzitni, nehrđajući
Inconel	625, 718

2.2.1 Čelici

U tablici 1. navedeni su materijali koji se koriste kod WAAM postupka, međutim najviše se ipak koriste titan i njegove legure i aluminij i aluminijeve legure. Iako imaju dobra mehanička i korozijska svojstva, njihova visoka cijena nameće se kao relevantni nedostatak pri izboru materijala koji će se koristiti kod WAAM postupka. U tablici 2 prikazane su cijene materijala. Zbog toga, sve veći interes pridaje se čelicima. Čelici kao konstrukcijski materijali imaju veoma dobra mehanička svojstva, korozijsku postojanost i, najvažnije, mnogo nižu cijenu u odnosu na titan i aluminij. Najviše se istražuju dupleks nehrđajući čelici.

Tablica 2. Cijena materijala kod WAAM postupka [10]

Materijal	Cijena, HRK / kg
Titan	1000-2500
Aluminij	60-1000
Čelik	20-150

Izrađena su mnoga istraživanja s različitim čeličnim materijalima kod WAAM postupka: čisto željezo, nehrđajući čelik (304, 316, 321, 347, 420, 17-4PH), alatni čelik (H13, M2, HSS), niskolegirani čelik (4140, 4340). [11] Međutim, najviše se istraživanja provodi na dupleks čelicima kod WAAM postupka.

Prema [12] provedeno je opsežno istraživanje WAAM postupka koristeći super dupleks nehrđajući čelik. U istraživanju je korištena žica promjera 1,2 mm, izrađena od super dupleks nehrđajućeg čelika te potporna ploča također izrađena od super dupleks nehrđajućeg čelika. Kemijski sastav korištenog materijala dan je u tablici 3.

Tablica 3. Kemijski sastav materijala [12]

Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N	W
Žica	0,018	0,3	0,7	0,02	0,001	25,0	9,5	3,7	0,6	0,23	0,6
Ploča	0,020	0,32	0,85	0,023	0,003	24,8	6,6	3,7	0,16	0,26	-

Svi slojevi bili su zavarivani tzv. hladnim prijenosom metala (tzv. CMT, engl. *cold metal transfer*), a to je verzija konvencionalnog MIG/MAG postupka zavarivanja. Jedna od prednosti ovog postupka je izostanak prskanja tijekom zavarivanja. Korišteni plin bio je mješavina argona sa 2 % ugljičnog dioksida i 0,03 % dušičnog oksida, protoka 20 l/min. Maksimalna temperatura među-prolaza bila je 100 °C. Parametri zavarivanja dani su u tablici 4. [12]

Tablica 4. Parametri zavarivanja [12]

Parametar	Uzorak		
	Uzorak 1	Uzorak 2	Uzorak 3
Struja, A	212	185	212
Napon, V	14	14	14
Brzina zavarivanja, cm/min	20,4	38,4	33
Unos topline, kJ/mm	0,87	0,4	0,54
Brzina žice, m/min	6,36	5,08	6,36

Nakon procesa zavarivanja provedena su ispitivanja nastalog zida. Provedena je mikroskopska kontrola nastalih slojeva zida s obzirom na unesenu toplinu. Ispitana je vlačna čvrstoća i granica razvlačenja. Zaključeno je da je zbog unosa topline došlo do pada navedenih svojstava, ali neznatno. Ispitana je tvrdoća zida i zaključeno je da je najviša tvrdoća postignuta u zoni utjecaja topline i to uzorka kod kojeg je bio najmanji unos topline. Maksimalna tvrdoća mogla bi se smanjiti većim unosom topline. Ispitana je i žilavost zida u odnosu na unos topline. Zaključeno je da žilavost nastalog zida iznosi jednu trećinu žilavosti materijala koji se koristio kao potporna ploča. Na kraju, ispitana je mikrostruktura zida. Izvedeni su sljedeći zaključci:

- kod nijednog unosa topline nisu uočene greške u zavaru
- iznosi vlačne čvrstoće i granice razvlačenja bili su visoki nakon zavarivanja, a granica razvlačenja se približila ili je pala ispod granice razvlačenja osnovnog materijala
- iznos žilavosti materijala zida nakon zavarivanja (100 J pri -20 °C) je smanjen i iznosio je 1/3 žilavosti osnovnog materijala
- volumni udio ferita u mikrostrukturi zida iznosio je oko 20 % što je redukcija od 50 % u odnosu na osnovni materijal
- uočen je nastanak kromovih nitrida i sekundarnog austenita, ali nisu pronađene intermetalne faze.

Istraživanje je pokazalo da je WAAM postupak primjenjiv na super dupleks nehrđajuće čelike, ali imperativ je da se posebna pozornost prida parametrima zavarivanja i odabiru postupka zavarivanja, te na konstrukciju samog proizvoda kako bi se izbjeglo formiranje štetnih sekundarnih faza. Posebnu pažnju potrebno je posvetiti unosu topline jer se stalnim novim unosom topline povećava opasnost na stvaranje intermetalnih faza koje štetno utječu na korozijsku otpornost i udarni rad loma. [12]

Na slici 6 prikazan je primjer proizvoda napravljenog od dupleks nehrđajućeg čelika WAAM postupkom.



Slika 6. Primjer proizvoda izrađenog od dupleks nehrđajućeg čelika WAAM postupkom [13]

Pri izradi prikazanog proizvoda korišten je postupak CMT. Provedenim istraživanjem zaključeno je da CMT postupak daje bolju kvalitetu površine u usporedbi za konvencionalnim MIG/MAG postupkom zavarivanja. Hrapavost površine dobivena ovim postupkom može se usporediti s hrapavošću koja se može dobiti s postupkom pješčanog lijevanja, vrućeg valjanja ili rezanja plamenom. Vrijednost udarnog rada loma je zadovoljavajuća, a kemijski sastav konačnog proizvoda bio je sličan s kemijskim sastavom korištenog dodatnog materijala. Dodatnim metalografskim ispitivanjem utvrđeno je da nema poroznosti, a mehanička svojstva bila su veoma slična onima prije početka zavarivanja. Što se tiče mikrostrukture, nastala mikrostruktura CMT postupkom usporediva je s mikrostrukturom koja nastaje u metalu zavara kada se koristi konvencionalna MIG/MAG metoda. [13]

2.3 Prednosti i nedostaci WAAM postupka

Neke od prednosti koje se mogu ostvariti WAAM postupkom: [14]

- mogućnost korištenja velikog broja različitih materijala; izrada komponenti od skupljih materijala kao što su nikal, titan i njegove legure
- moguća automatizacija procesa što ujedno donosi i uštedu na vremenu proizvodnje i smanjenje potrebe za ljudskim radom
- moguće je proizvoditi proizvode složene geometrije, koje nije moguće proizvesti konvencionalnim postupcima obrade
- smanjenje gubitaka materijala
- velika količina depozita

- mala početna investicija i troškovi proizvodnje
- nema ograničenja veličine komponente koja se izrađuje
- mogućnost strojne obrade tijekom procesa.

S obzirom da se prilikom WAAM postupka koristi oprema za zavarivanje, moguće je primijeniti opremu različitih proizvođača.

Mogući nedostaci WAAM postupka: [14]

- teško postizanje zadanih tolerancija proizvoda zbog deformacije dijelova
- potrebna naknadna strojna obrada
- smanjenje mehaničkih svojstava materijala zbog visokih zaostalih naprezanja
- tehnologija je relativno nova pa grešaka dolazi zbog nedovoljno iskustva u primjeni
- pojava grešaka poput poroznosti, ugorina, nadvišenja.

U tablici 5 prikazane su i opisane greške koje se mogu javiti kod WAAM postupka.

Tablica 5. Moguće greške i njihovi uzroci [8]

Greška	Mogući uzroci
Poroznost	nedostatan protok zaštitnog plina; niska čistoća plina; neprikladni parametri postupka; velike brzine zavarivanja, nečistoće materijala
Ugorine	visoka struja; prevelika brzina zavarivanja; nepravilan kut zavarivanja; kemijski sastav materijala; nedovoljna brzina dodavanja žice
Nadvišenje	Prevelika brzina zavarivanja

Kako bi se izbjegla pojava grešaka prilikom WAAM postupka, potrebno je poduzeti određene radnje prije, za vrijeme i nakon postupka, a koje značajno utječu na redukciju grešaka tijekom procesa. Najveći utjecaj ima valjanje tijekom procesa.

2.4 Primjena WAAM postupka [15]

WAAM postupak može se primjenjivati u raznim industrijama, međutim najširu primjenu ima u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji. Postupak je pogodan za izradu velikih i srednjih dijelova srednje složenosti. Također, mogu se koristiti i razne vrste materijala za proizvodnju dijelova. Na slici 7 prikazan je primjer praktične primjene WAAM postupka u zrakoplovnoj industriji.



Slika 7. Krilo izrađeno WAAM postupkom od čelika visoke čvrstoće [15]

3. DUPLEKS ČELICI

Dupleks feritno-austenitni nehrđajući čelici dobili su ime po svojoj mikrostrukturi koja se sastoji od ferita i austenita u podjednakim volumnim udjelima (50:50). Poznati su još od 1930. godine, ali zbog problema sa zavarivanjem, korozijskom postojanošću i krhkošću, nisu bili u široj primjeni do 80-ih godina 20. stoljeća. Kada su navedeni problemi riješeni, uglavnom dodavanjem dušika, počinje nagli razvoj i primjena dupleks čelika. Danas se dupleks čelici primjenjuju na mnogim mjestima zbog svojih superiornih korozijskih i vrlo dobrih mehaničkih svojstava. Zbog visokog udjela ferita oni su feromagnetični, imaju višu toplinsku vodljivost i nižu toplinsku rastezljivost u odnosu na austenitne čelike. Na mjestima gdje se traži visoka otpornost na napetosnu koroziju i rupičastu koroziju, bolji su izbor od austenitnih čelika.

Zbog relativno visoke čvrstoće dupleks čelici su optimalni izvor za konstrukcije izložene koroziji, gdje dolazi do izražaja njihova izvanredna kombinacija korozijske postojanosti i mehaničkih svojstava. Navedena svojstva omogućuju smanjenje nosivih presjeka i smanjenje ukupne mase proizvoda. Plinovodi i naftovodi se često rade baš od ovih čelika. U blažem korozivnom okruženju mogu biti dovoljno dobra zamjena za puno skuplje niklove legure.

Dupleks čelici imaju puno višu granicu razvlačenja (oko 425 MPa) u odnosu na austenitne čelike (210 MPa). Tvrdća im je također viša, a shodno tome i otpornost na abrazijsko trošenje. Većina novijih dupleks čelika ima dobru žilavost i duktilnost. Zbog velikog udjela feritne faze, pri sniženju temperature naglo prelaze iz žilavog u krhko područje. Slično kao feritni nehrđajući čelici. Donja temperatura primjene je ograničena na -40 °C. Gornja temperatura primjene dupleks čelika je oko 315 °C.

Toplinska rastezljivost dupleks čelika slična je toplinskoj rastezljivosti i ugljičnih, i niskolegiranih čelika. Ova podudarnost omogućava njihovo međusobno spajanje u nekim proizvodima (npr. tlačne posude) bez opasnosti od pojave prevelikih napetosti pri kasnijem zagrijavanju tijekom eksploatacije.

Dupleks čelici spadaju u skupinu nehrđajućih čelika. Nehrđajući čelici ili korozijski postojani čelici su visokolegirani čelici koji su otporni na kemijsku i elektrokemijsku koroziju odnosno čelici kod kojih nema međudjelovanja sa vanjskim medijem. [13]

Prvi dupleks nehrđajući čelici proizvedeni su u Švedskoj 1930. godine i korišteni su u industriji papira. Ovi su čelici razvijeni kako bi reducirali korozijske probleme koje su imali tadašnji visokouglični austenitni nehrđajući čelici. Prvi dupleks čelici imali su zadovoljavajuće karakteristike, ali su postojala ograničenja u vidu zavarivanja. Uočeno je da zona utjecaja topline (ZUT) ima smanjenu žilavost zbog previše ferita i značajno lošiju otpornost na koroziju u odnosu na osnovni materijal. Godine 1968. izumljen je proces razugličanja kiskom i argonom dupleks nehrđajućih čelika (engl. AOD – argon oxygen decarburization), čime su otvorena vrata široj primjeni novonastalih nehrđajućih čelika. Omogućeno je legiranje dupleks čelika s dušikom čime su se otklonili najveći problemi koji su se javljali u zavarenom spoju dupleks čelika. Žilavost i korozijska otpornost zone utjecaja topline znatno su se približile onima osnovnog materijala.

Kao što je slučaj kod austenitnih čelika, tako se i dupleks čelici dijele u razrede prema svojoj otpornosti na koroziju, ovisno o udjelu legiranih elemenata. Razvoj dupleks nehrđajućih čelika se nastavio, a moderni dupleks nehrđajući čelici podijeljeni su u 5 grupa prema njihovoj korozijskoj postojanosti:

- „lean“ dupleks čelici bez dodatnog molibdena; npr. 2304
- „lean“ dupleks čelici s dodatkom molibdena; npr. S32003
- standardni dupleks čelici s oko 22 % Cr i 3 % Mo; npr. 2205 koji čini 60 % primjene dupleks čelika
- super dupleks čelici s oko 25 % Cr i 3 % Mo; npr. 2507
- hiper dupleks čelici sa sadržajem Cr i Mo većim u odnosu na super dupleks čelike; npr. S32707.

3.1 Mikrostruktura dupleks čelika

Općenito je prihvaćeno da se najpovoljnija svojstva dupleks čelika postižu rasponom faza od 30 % do 70 % ferita, odnosno austenita što uključuje i zavarene konstrukcije. Međutim, dupleks čelici najčešće imaju otprilike podjednak omjer feritne i austenite faze s malo većim udjelom austenita u mikrostrukturi, to povoljno utječe na žilavost i obradivost materijala. [17]

3.1.1 Utjecaj legirnih elemenata na mikrostrukturu dupleks čelika

Legirni elementi dupleks čelika utječu na stabilnost strukture i postignuta svojstva materijala. Kao najvažniji legirni elementi mogu se izdvojiti krom i nikal.

Osim što se mora pripaziti na balans između feritne i austenitne faze, pažnja se također mora dati i legirnim elementima. Međusobni utjecaj legirnih elemenata je veoma složen pa se mora paziti na količinu svakog elementa. Količina pojedinih elemenata izravno utječe na formiranje nepoželjnih intermetalnih faza kod povišenih temperatura. Kod dupleks čelika s povišenim udjelom kroma i molibdena dolazi do stvaranja sigma i chi faze, najčešće u feritu. Dodatak dušika značajno utječe na kašnjenje formiranja tih faza, pa je zbog toga od velike važnosti da je uvijek prisutno dovoljno dušika u materijalu. [17]

Utjecaj legirnih elemenata na mikrostrukturu dupleks čelika:

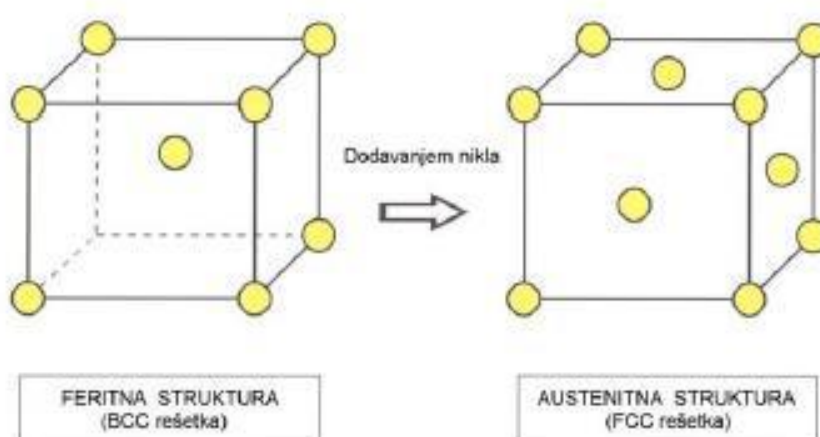
Krom – potrebno je minimalno 10,5 % kroma kako bi se formirao stabilan pasivni film koji je nužan kako bi se materijal zaštitio od blagih korozijskih uvjeta, što je jedan od osnovnih uvjeta da bi se čelik mogao nazvati nehrđajućim. Korozijska postojanost nehrđajućih čelika povećava se povećanjem udjela kroma u strukturi. Krom je kao legirni element feritotvorac, što znači da se dodavanjem kroma stabilizira prostorno centrirana kubična rešetka, odnosno BCC rešetka (engl. Body Centered Cubic). Kod većih udjela kroma, istovremeno je potrebno više nikla kako bi se formirala austenitno-feritna ili dupleks struktura. Veći udio kroma također pogoduje stvaranju štetnih intermetalnih faza (σ -faza) pa je zbog toga određena maksimalna granica do koje je moguće legiranje kromom. Uobičajeni udio kroma u austenitnim nehrđajućim čelicima je oko 16 %, a kod dupleks čelika oko 20 %. Krom također poboljšava otpornost na oksidaciju kod povišenih temperatura, odnosno utječe na formiranje i uklanjanje oksidnog sloja i obojenja koja nastaju nakon toplinske obrade ili zavarivanja. [17]

Molibden – povećava otpornost na rupičastu koroziju nehrđajućih čelika. Kada je udio kroma najmanje 18 %, molibden postaje najmanje tri puta efikasniji u poboljšanju otpornosti na rupičastu koroziju i koroziju u procjepu u atmosferama koje sadrže klorid. Molibden je kao i krom feritotvorac te također povećava mogućnost stvaranja intermetalnih faza pa iz toga razloga, molibdena u austenitnim nehrđajućim čelicima nema više od 7 %, a u dupleks čelicima više od 4 %. [17]

Dušik – povećava otpornost na rupičastu koroziju i koroziju u procjepu austenitnih nehrđajućih čelika i dupleks čelika. Također znatno povećava čvrstoću dupleks čelika. Relativno je jeftin legirni element i austenitotvorac pa može biti zamjena za nikal u stabilizaciji austenita. Do povišenja čvrstoće dupleks čelika koji sadrže dušik dolazi zbog povećanog udjela austenitne faze i redukcije intermatelnih faza. Dušik ne sprječava u potpunosti formiranje intermetalnih faza, ali dodatak dušika znatno usporava taj proces, dovoljno dugo da bi se čelici mogli lakše obrađivati i proizvoditi. Dušik se dodaje dupleks čelicima koji sadrže visoki udio kroma i molibdena kako bi se odgodilo stvaranje sigma faze.

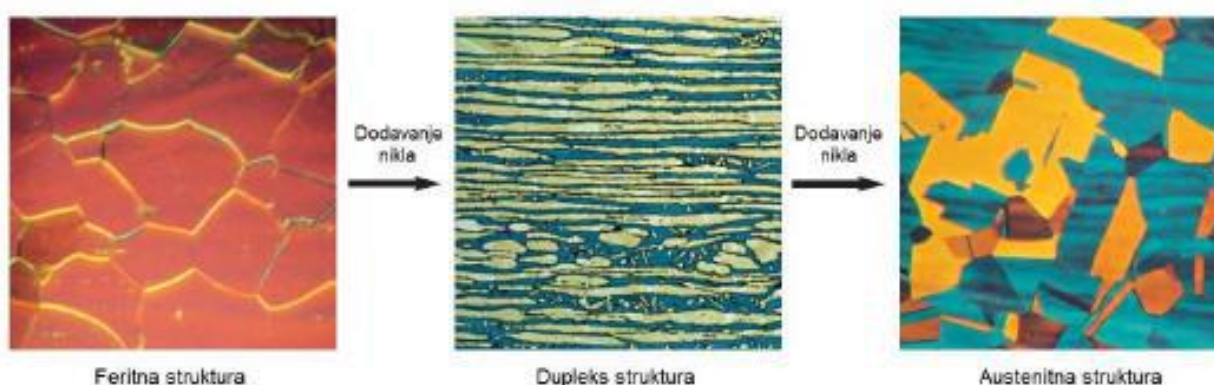
Kod dupleks čelika, dušik se dodaje do same granice topivosti, a udio nikla se namješta kako bi se dobila uravnoteženost austenitne i feritne faze. Feritotvorci, krom i molibden uravnoteženi su austenitotvorcima, niklom i dušikom kako bi se dobila dupleks struktura čelika. [17]

Nikal – nikal je stabilizator austenitne faze i potiče promjenu kristalne rešetke iz prostorno centrirane kubične rešetke (BCC) u plošno centriranu kubičnu rešetku (engl. FCC – Face Centered Cubic), a ta pretvorba prikazana je na slici 8.



Slika 8. Promjena strukture kristalne rešetke dodatkom nikla [17]

Feritni nehrđajući čelici sadrže malo ili nimalo nikla, dupleks čelici sadrže malo do srednjih udjela nikla od 1,5 % do 7 %, a austenitni čelici serije 300 sadrže do 6 % nikla. Dodatak nikla usporava formiranje inmetanih faza u austenitnim čelicima, ali je u tu svrhu kod dupleks čelika mnogo učinkovitiji dušik. Plošno centrirana kubična rešetka je razlog izvrsne udarne radnje loma austenitnih nehrđajućih čelika, a zbog njene prisutnosti u gotovo pola mikrostrukture dupleks čelika oni imaju puno veći udarni rad loma od feritnih nehrđajućih čelika. Na slici 9 može se vidjeti utjecaj nikla na promjenu mikrostrukture čelika. [17]



Slika 9. Promjena mikrostrukture dodatkom nikla [17]

Mangan – prisutnost mangana povećava otpornost na trošenje i abrazivno djelovanje te povećava vlačnu čvrstoću bez gubitaka duktilnosti. [17]

Bakar – bakar se kao legirni element manje koristi, ali kod dodatka od oko 2 % može povećati korozijsku postojanost dupleks nehrđajućih čelika te pospješiti izlučivanje ferita. [18]

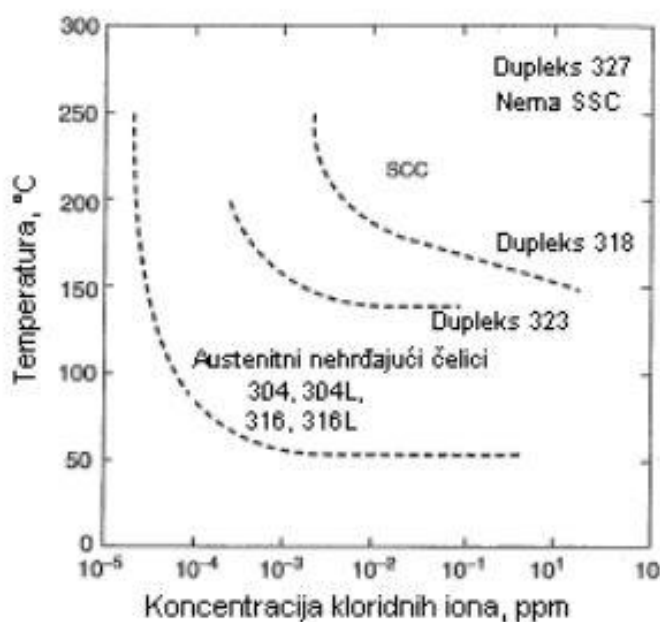
Volfram – dodatak volframa od oko 2 % dupleks čelicima poboljšava otpornost na rupičastu koroziju i koroziju u procjepu. Volfram je poznat kao element koji potiče formiranje intermetalnih faza na temperaturama od 700 °C do 1000 °C i formiranje sekundarnog austenita. [18]

3.1.2 Korozijska postojanost dupleks čelika

Dupleks čelici posjeduju odličnu korozijsku postojanost, što u kombinaciji s dobrim mehaničkim svojstvima predstavlja glavnu prednost pred drugim nehrđajućim čelicima.

3.1.2.1 Napetosna korozija

Dupleks nehrđajući čelici imaju znatno bolju korozijsku postojanost u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike. Zbog visokog udjela kroma i nižeg udjela nikla posebno su otporni prema napetosnoj koroziji u kloridnom okruženju. Na slici 10 prikazana je otpornost prema napetosnoj koroziji u ovisnosti o temperaturi i koncentraciji kloridnih iona austenitnih i dupleks nehrđajućih čelika. Iz slike je vidljivo da su austenitni čelici znatno osjetljiviji na napetosnu koroziju u odnosu na dupleks čelike. Prema slici, super dupleks čelik pokazuje najbolju korozijsku postojanost u odnosu na druge ispitane čelike. [16]

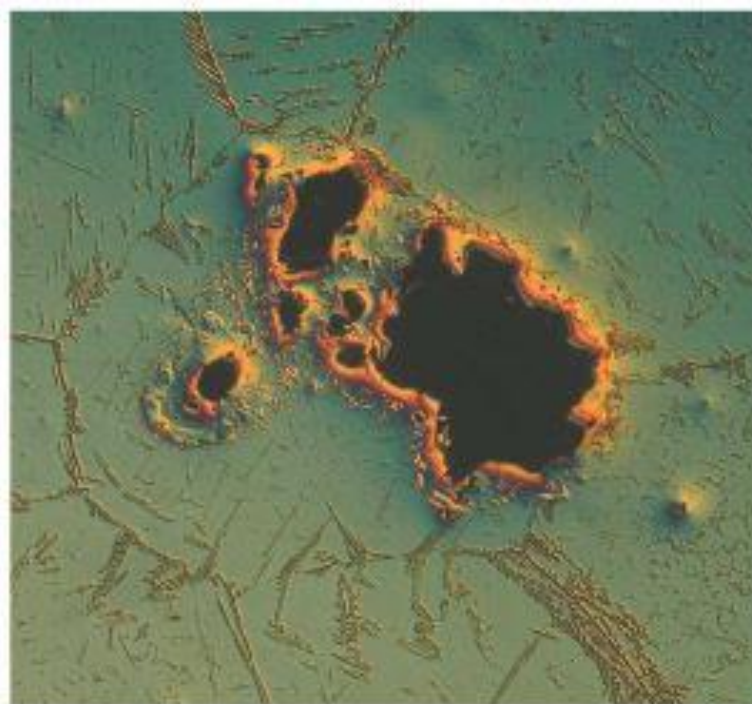


Slika 10. Otpornost prema napetosnoj koroziji u ovisnosti o temperaturi i koncentraciji kloridnih iona [16]

3.1.2.2 Rupičasta korozija

Visoki udjeli kroma, volframa, molibdena i dušika zaslužni su za jako dobru postojanost dupleks čelika prema rupičastoj koroziji. Poznavajući kemijski sastav materijala može se odrediti korozijska postojanost prema ovom tipu korozije i to preko *vrijednosti djelotvorne sume* – DS. Najveći utjecaj na DS ima dušik, dok manji utjecaj imaju molibden, volfram i krom.

Osim kemijskog sastava, mikrostruktura ima značajan utjecaj na otpornost dupleks čelika na rupičastu koroziju. Povećan volumni udio feritne faze i precipitati nitrida u krupnim feritnim zrnima, koji u određenim uvjetima mogu nastati pri zavarivanju dupleks čelika, nepovoljno utječu otpornost prema rupičastoj koroziji. Najnepovoljniji utjecaj ima sigma-faza. Na slici 11 prikazana je inicijalna rupica nastala na faznoj granici između ferita i austenita u zoni utjecaja topline (ZUT-u) dupleks čelika 1.4462. [16]



Slika 11. Inicijalna rupica na granici faza austenita i ferita [16]

Bitna značajka konkurentnosti dupleks nehrđajućih čelika na tržištu je njihova antikorozivnost. Čelici imaju veliki raspon antikorozijskih svojstava, a posebno dobro su otporni na napetosnu i rupičastu koroziju te na interkristalnu koroziju, zahvaljujući niskom udjelu ugljika. S obzirom da imaju visok sadržaj kroma, dupleks nehrđajući čelici imaju dobru korozijsku postojanost u

većini uvjeta, a što je od velikog značaja za otpornost na rupičastu koroziju i koroziju u procjepu. Visoka čvrstoća čini ga iznimno otpornim na napetosnu koroziju. Korozijska otpornost mu raste s povećanjem udjela kroma, nikla i dušika. [13]

3.2 Opća svojstva dupleks čelika

Dupleks čelici imaju izvanredna mehanička svojstva. Granica razvlačenja na sobnoj temperaturi nakon popuštanja, više je nego dvostruko veća u odnosu na standardne austenitne čelike koji nisu legirani sa dušikom. Iz toga razloga, konstrukcije mogu imati profile manjih presjeka. Kod temperature od 475 °C postoji opasnost od pojave krhkosti u feritnoj fazi pa se iz toga razloga dupleks čelici ne bi trebali primjenjivati na temperaturama višim od 315 °C. Značajan utjecaj na mehanička svojstva ima i završna toplinska obrada odnosno temperatura gašenja dupleks čelika, ponajviše zbog promjene omjera ferit/austenit, ali i zbog moguće pojave zaostalih (neotopljenih) izlučevina. [17]

Mehanička svojstva kovanih dupleks čelika veoma su anizotropna, što znači da se svojstva mijenjaju ovisno o orijentaciji testnog uzorka. Razlog tome leži u izduženim zrnima u mikrostrukturi materijala koja nastaju zbog hladnog ili toplog valjanja. Iako je struktura dupleks čelika uglavnom izotropna, nakon kovanja ili valjanja čelik se popušta pri određenim uvjetima, a nakon propisanog hlađenja zadržavaju se obje faze u materijalu – izotropna i anizotropna. Iz tog razloga se nakon obrade materijala, a na temelju orijentacije zrna, može zaključiti na koji je način materijal bio obrađivan. Čvrstoća materijala je veća u smjeru okomitom na smjer valjanja. Udarni rad loma je veći kada je bar kojim se ispituje ovo svojstvo postavljen okomito na smjer valjanja. [17]

Unatoč visokoj čvrstoći, dupleks čelici imaju dobru duktilnost i žilavost. U odnosu na ugljične čelike ili feritne austenitne čelike, prijelaz iz duktilne faze u krhku fazu je ujednačeniji. Dupleks nehrđajući čelici zadržavaju dobru žilavost i kod niskih temperatura (npr. -40 °C). Međutim, općenito gledano, duktilnost i žilavost dupleks čelika je ipak niža u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike. Austenitni čelici tipično nemaju prijelaz između duktilne i krhke faze, a žilavost zadržavaju i do kriogenih temperatura. [17]

Visoka granica razvlačenja dupleks čelika omogućuje smanjenje nosivog presjeka, međutim, zbog ovog svojstva nastaje problem proizvodnje materijala. Zbog visoke čvrstoće dupleks čelika potrebna je veća sila kako bi se deformirali, pa je efekt opruge prilikom savijanja dupleks

čelika znatno veći u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike. Zbog visoke žilavosti dupleks čelika, oni smanjuju vijek trajanja alata kod strojne obrade u odnosu na standardne austenitne čelike. Ciklusi popuštanja potrebni su između operacija obrade i savijanja materijala zbog duktilnosti dupleks čelika koja je upola manja u odnosu na austenitne nehrđajuće čelike. [17]

Dvofazna struktura dupleks nehrđajućih čelika, sastavljena od feritne i austenitne faze u podjednakim udjelima, zaslužna je za glavna svojstva koje ovi čelici imaju, a to su odlična otpornost prema interkristalnoj, napetosnoj i rupičastoj koroziji u kombinaciji sa visokom vlačnom čvrstoćom, visokom granicom razvlačenja i visokom žilavošću. [13]

Općenito, za mehanička svojstva dupleks čelika, vrijedi sljedeće: [13]

- tvrdoća dupleks čelika kreće se između 250 HV i 350 HV
- mikrotvrdoća: austenita ~ 300 HV_{0,02}, a ferita od 300 HV_{0,002} do 550 HV_{0,002}
- vlačna čvrstoća, R_m : 700 MPa do 1100 MPa
- konvencionalna granica razvlačenja, $R_{p0,2}$: 500 MPa do 800 MPa
- udarni rad loma, KV: do 170 J.

3.3 Zavarljivost dupleks čelika

Pojam *zavarljivost* podrazumijeva mogućnost stvaranja zavarenog spoja bez grešaka sa dobrim mehaničkim svojstvima i otpornošću na koroziju. Tople pukotine u zoni zavara ili u zoni utjecaja topline (ZUT) i hladne pukotine zbog difuzije vodika, jedni su od najvećih problema kod zavarivanja dupleks nehrđajućih čelika. [18]

Dupleks nehrđajući čelici imaju zadovoljavajuću zavarljivost uz odgovarajući kemijski sastav. Potrebno je pravilno odabrati postupak zavarivanja zbog dvofazne mikrostrukture ovih čelika. Potrebno je istovremeno izbjegavati prekomjernu količinu ferita u zoni utjecaja topline zbog brzog gašenja s temperature zavarivanja, a s druge strane treba izbjeći grubozrnatu strukturu i precipitaciju kromovih nitrida u zoni utjecaja topline, koji nastaju zbog presporog hlađenja s temperature zavarivanja. Sadržaj ferita u ZUT trebao bi se zadržati ispod 70 % kako bi se povećala otpornost na hladne pukotine u metalu zavara. Ako se navedena vrijednost prekorači, postoji opasnost od nastanka hladnih pukotina uzrokovanih vodikom (ako se koristi dodatni materijal koji sadrži i vodik). Kako bi se spriječilo padanje količine nikla u metalu zavara

prenisko, potrebno je izbjegavati zavarivanje sa dodatnim materijalom koji ima sniženi udio nikla. Količina nikla u metalu direktno utječe na količinu ferita, pa premala količina nikla u metalu zavariva ima negativan utjecaj na otpornost na koroziju, tvrdoći i otpornost na pukotine metala zavariva, odnosno količina ferita raste. [19]

Puno pažnje potrebno je posvetiti tehnologiji zavarivanja dupleks nehrđajućih čelika. Metoda zavarivanja ovih čelika mora biti korektno odabrana. Za uspješno zavarivanje dupleks nehrđajućih čelika potrebna je ravnoteža između samog postupka zavarivanja i kontrole distorzije. Postupci zavarivanja koji se mogu koristiti prilikom zavarivanja dupleks nehrđajućih čelika su MIG/MAG, TIG, MMA, FCAW, SAW, zavarivanje plazmom i laserom:

- MIG/MAG (engl. Metal Inert/Active Gas Welding) – elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštiti inertnog/aktivnog plina
- MMA (eng. Manual Metal Arc Welding) – elektrolučno zavarivanje s obloženom elektrodom
- TIG (eng. Tungsten Inert Gas) – elektrolučno zavarivanje netaljivom žicom u zaštiti inertnog plina
- SAW (EPP) – elektrolučno zavarivanje taljivom žicom pod zaštitom praška
- FCAW (eng. Flux – Cored Arc Welding) – elektrolučno zavarivanje taljivom praškom punjenom žicom.

Izbor dodatnog materijala od velike je važnosti kod zavarivanja dupleks nehrđajućih čelika kako bi se postigao željeni balans ferita. Izbor dodatnog materijala koji ima veće udjele određenih kemijskih elemenata, danas se postavlja kao poželjna opcija. Takvi dodatni materijali prilikom zavarivanja dupleks nehrđajućih čelika mogu dati poboljšana mehanička svojstva i poboljšanu otpornost na koroziju, uz uvjet da je izabrani postupak zavarivanja korektan te ako je primijenjena adekvatna naknadna toplinska obrada. Zavarivanje bez dodatnog materijala dopušteno je jedino ako je moguća naknadna toplinska obrada. U slučaju da se toplinska obrada ne provede, postoji mogućnost da udio ferita bude prevelik, a time se korozijska postojanost i udarni rad loma smanjuju. Tražena svojstva metala zavariva, pozicija zavarivanja i produktivnost određuju koja će metoda zavarivanja biti odabrana. [18]

Pukotine u zavaru pod utjecajem vodika nazivaju se još i hladne pukotine. Osjetljivost dupleks nehrđajućih čelika na hladne pukotine određena je sa tri faktora: osjetljiva mikrostruktura materijala, prisustvo vodika i ograničenja. Iako ferit u dupleks nehrđajućim čelicima pomaže kod eliminacije problema sa toplim pukotinama, povećava opasnost od pojave hladnih pukotina. Smatra se da je visoko feritna mikrostruktura dupleks nehrđajućih čelika podložna nastanku hladnih pukotina zbog visoke čvrstoće, male žilavosti i visoke sklonosti difuziji vodika. Vodik može dospjeti u zavareni spoj na različite načine, ali najčešće korištenjem elektroda koje su upile vlagu, iz atmosfere ili ako područje zavarivanja nije adekvatno zaštićeno zaštitnim plinom. Istraživanja su pokazala da se osjetljivost dupleks nehrđajućih čelika povećava udjelom ferita u materijalu pa je zbog toga potrebno odabrati optimalnu tehnologiju zavarivanja, kako bi se održala ravnoteža feritne i austenitne faze. Toplinska obrada nakon zavarivanja postavlja se kao jedna od opcija kojom se može spriječiti nastanak hladnih pukotina. Međutim, zbog veličine proizvoda, ovaj način uklanjanja opasnosti nastanka hladnih pukotina predstavlja određene probleme. Prema tome, najbolje rješenje za sprječavanje nastanka hladnih pukotina je uklanjanje prisustva vodika tijekom procesa zavarivanja. [17]

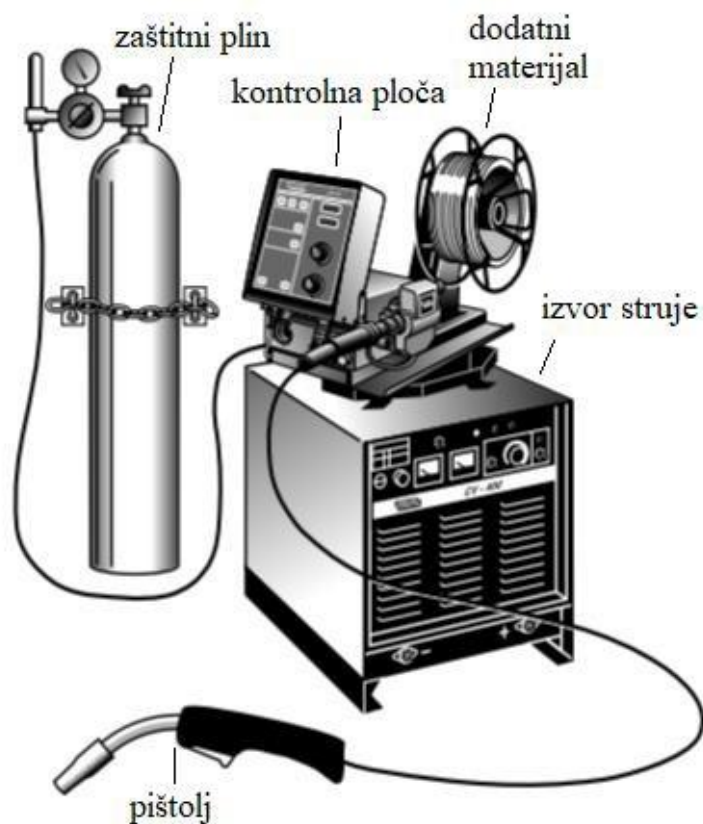
Sljedeće prikazana tehnologija zavarivanja uspješno je primijenjena za zavarivanje dupleks nehrđajućih čelika legiranih dušikom: [19]

- dodatni materijal za zavarivanje uvijek bi trebao biti legiran s dušikom s većim udjelom nikla
- vrijeme hlađenja u ZUT i metalu zavara sa temperature od 1200 °C na 800 °C ne smije biti prekratko; vrijeme hlađenja materijala nakon zavarivanja mora biti prilagođeno debljini materijala; deblji materijali (>20 mm) zahtijevaju veće unose topline
- zavarivanje bez dodatnog materijala nije preporučljivo zbog povećanja sadržaja ferita
- ako je ZUT mali te ako je sitnozrnate mikrostrukture i sadržaj ferita nije previsok, postići će se zadovoljavajuća žilavost i otpornost na koroziju
- obložene elektrode moraju se prije postupka zavarivanja držati u pećima prema uputama proizvođača ili minimalno iznad 250 °C, kako bi utjecaj vodika tijekom zavarivanja bio sveden na minimum
- vodik se ne bi trebao dodavati zaštitnom plinu kako bi se izbjegla opasnost od nastanka hladnih pukotina

-
- predgrijavanje dupleks čelika općenito nije potrebno, međutim, kod debljih materijala bilo bi poželjno i to u rasponu od 100 °C do 150 °C
 - temperatura međuprolaza ne bi trebala prijeći 150°C kod debljina materijala manjih 12 mm i 180 °C kod debljina materijala većih od 12 mm
 - u općenitom slučaju, žarenje nakon postupka zavarivanja nije potrebno, ali ako je propisano, temperatura žarenja određuje se prema specifikacijama proizvođača; naknadnim žarenjem moguće je uništiti potencijalne štetne spojeve koji su nastali u zut prilikom zavarivanja
 - potrebno je često provjeravati udio ferita.

4. ELEKTROLUČNO ZAVARIVANJE TALJIVOM ELEKTRODOM U ZAŠTITNOJ ATMOSFERI PLINA (MIG/MAG ZAVARIVANJE)

Elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti plina danas je dominantan proces zavarivanja u proizvodnji. Unatoč dugoj povijesti, neprestano se radi na razvoju i poboljšanju procesa. Prema normi *HRN EN ISO 4063 Zavarivanje i srodni postupci – Nomenklatura postupaka i referentni brojevi*, postupak zavarivanja označuje se oznakom 135.



Slika 12. Oprema MIG/MAG postupka zavarivanja [20]

Prema definiciji, elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštiti plina (engl. GMAW – Gas Metal Arc Welding) je postupak formiranja spoja metala konstantnim zagrijavanjem istog pomoću luka između osnovnog metala i dodatnog metala u obliku žice. Rastaljeni metal u spoju pod zaštitom je plina koji se kontinuirano dovodi tijekom postupka zavarivanja. U općenitom slučaju elektroda se spaja na pozitivan pol izvora struje. U općeprihvaćenoj terminologiji,

GMAW je poznatiji kao MIG (engl. Metal Inert Gas Welding) zavarivanje, a nešto manje poznati pod nazivom MAG (engl. Metal Active Gas Wleding) zavarivanje. U svakom slučaju, MIG/MAG postupak zavarivanja koristi širok spektar dodatnog materijala za stvaranje zavarenog spoja. Tu mogu spadati: ugljični čelik, nehrđajući čelik, aluminij, magnezij, bakar, nikel i slični. MIG/MAG postupak najčešće je ručni postupak zavarivanja, međutim, isti postoji i u poluautomatskoj inačici te u potpuno automatiziranoj inačici. [20]

MIG/MAG postupak zavarivanja veoma je raširen i dobro prihvaćen postupak zavarivanja jer pruža zavarene spojeve visoke kvalitete za širok raspon materijala uz nisku cijenu. Neke od prednosti MIG/MAG postupka zavarivanja su: [20]

- mogućnost zavarivanja širokog spektra materijala različitih debljina
- jednostavne komponente koje su odmah dostupne po relativno niskoj cijeni
- postupak ima visok koeficijent iskorištenja elektrode, tipično oko 93 % do 98 % u usporedbi za drugim postupcima zavarivanja
- veća efikasnost zavarivača
- mogućnost zavarivanja u svim položajima
- estetika zavara
- mala difuzija vodika i metal zavara; tipično manje od 5 mL/100 g metala zavara
- manji unos topline u usporedbi sa ostalim postupcima zavarivanja
- manje prskanja – brzo i jednostavno čišćenje.

Generalno govoreći, pozitivne strane MIG/MAG postupka zavarivanja uključuju nižu cijenu po duljini zavarenog spoja u odnosu na druge postupke zavarivanja, manja je cijena elektroda, manje su distorzije materijala tijekom postupka zavarivanja, smanjuje se stvaranje štetnih plinova tijekom zavarivanja i minimizira se potrebno naknadno čišćenje zavarenog spoja i osnovnog metala. [20]

Kao i u svakom drugom slučaju, postoje i nedostaci ovog postupka, a koji mogu biti: [21]

- otežana zaštita plinom na terenu
- problemi kod dovođenja žice

- potencijalne greške zbog neodgovarajuće tehnike ili loše izabranih parametara zavarivanja
- rasprskavanje kod zavarivanja kratkim spojevima
- složenost uređaja.

4.1 Kratka povijest razvoja MIG/MAG postupka zavarivanja

Postupka zavarivanja MIG/MAG prvi je put predstavljen u kasnim 1940.-im godinama. Na Battelle Memorijalnom Institutu, Hobart i Devers, sponzorirani od strane tvrtke Air Reduction, prvi su put predstavili proces kontinuiranog dodavanja elektrode aluminijske u zaštiti 100 % argona tijekom zavarivanja. [20]

Prijenos metala štrcajućim lukom, uz korištenje elektrode aluminijske, prvi je način prijenosa metala ovim postupkom zavarivanja. U sljedećim godinama i daljnjim istraživanjima, počeo se koristiti zaštitni plin koji je osim argona imao mali udio kisika. Kisik je poboljšao stabilnost luka i omogućio korištenje štrcajućim načinom prijenosa metala za zavarivanje metalnih materijala. Postupak zavarivanja imao je ograničenje u primjeni zbog visoke energije električnog luka u odnosu na debljinu osnovnog materijala. [20]

U ranim 1950. - im godinama, Lyubavshkii i Novoshilov predstavili su MIG/MAG postupak zavarivanja kod kojeg su korištene elektrode velikih promjera, a zaštitni plin je bio CO₂, aktivni plin. Međutim, u procesu je bilo prisutno jako prskanje i visok unos topline zbog čega je ovaj način zavarivanja postao odbojan tadašnjim zavarivačima. U kasnim 1950. – im godinama, poboljšanja na izvorima struje za zavarivanje i upotreba elektroda manjih promjera (0,9 mm do 1,6 mm) omogućili su implementaciju prijenosa metala kratkim spojevima, što je još jedan od načina prijenosa metala MIG/MAG postupkom. Prijenos metala kratkim spojevima omogućio je primjenu ovog postupka zavarivanja na materijale manjih debljina te je stvorio potencijalnu priliku za zavarivanje u svim položajima. [20]

Potaknuti potrebom za smanjenjem prskanja tijekom zavarivanja te sprječavanjem nastanka nepotpunih zavarivanja, stručnjaci iz područja zavarivanja razvili su novu ideju prijenosa metala koja se naziva prienos metala impulsnim štrcajućim lukom. Ovaj način prijenosa metala objedinio je prednosti prijenosa metala štrcajućim lukom – čist zavar bez prskanja uz niski unos topline. Ideja novog načina prijenosa metala razvila se 1960. – ih godina.

U sedamdesetim godinama prošlog stoljeća predstavljena je nova tehnologija za izvore struje za zavarivanje, što je doprinijelo snažnom razvoju MIG/MAG -P postupka zavarivanja, odnosno prijenos metala impulsnim lukom. Razvijeni su izvori struje za zavarivanje koji su koristili tiristore. Institut za Zavarivanje Ujedinjenog Kraljevstva najviše je odgovoran za razvoj i određivanje linearnog odnosa između frekvencije impulsnog luka i brzine dodavanja žice, što je u konačnici dovelo do razvoja izvora struje zavarivanja, koji kontrolira frekvenciju impulsa u odnosu na brzinu žice i istu korigiraju u odnosu na povećanje ili smanjenje brzine dodavanja žice. Također je izumljena i nova riječ koja je označila početak razvoja novih izvora struje zavarivanja – „Synergic“, odnosno sinergijsko zavarivanje. Sinergijsko zavarivanje zapravo znači kontrolu pomoću jednog upravljačkog dugmeta – u slučaju da zavarivač poveća ili smanji brzinu dodavanja žice, pred određena impulsna energija automatski se primjenjuje na električni luk. Sinergijski izvori struje zavarivanja znatno su olakšali korištenje MIG/MAG - P postupka zavarivanja. [20]

U narednim godinama provedena su mnoga istraživanja na području izvora struje zavarivanja. Lincoln Electric počinje razvoj izvora struje zavarivanja koji su temeljeni na inverterskoj tehnologiji u kombinaciji sa računalnim upravljanjem. [20]

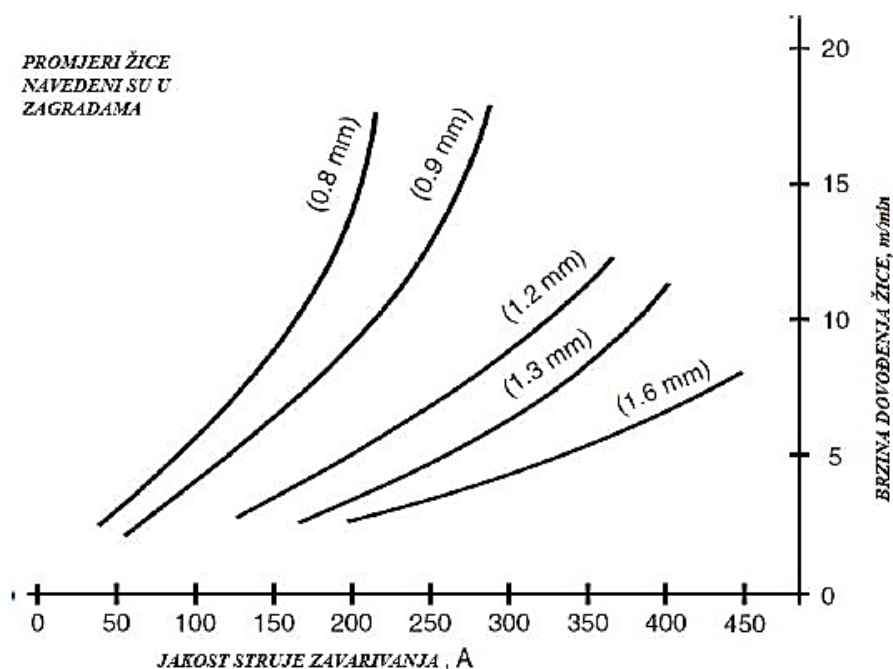
U današnje vrijeme sve se više razvijaju MIG/MAG postupci zavarivanja s različitim modifikacijama. U odnosu na konvencionalne MIG/MAG postupke, modificirani postupci omogućuju razna poboljšanja (brzina zavarivanja, veća produktivnost, smanjen utrošak energije i slično).

4.2 Parametri MIG/MAG postupka zavarivanja

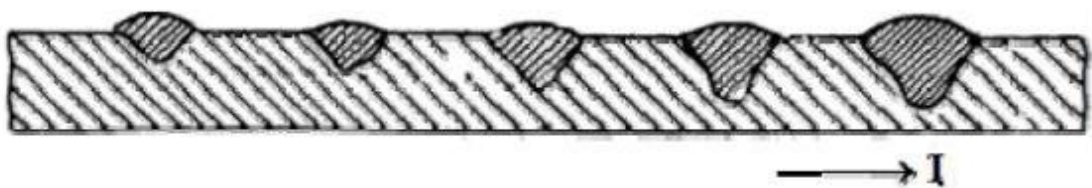
Parametre zavarivanja kod MIG/MAG postupka zavarivanja nije lako odrediti. Oni ovise o materijalu koji se zavaruje, tehnološkim zahtjevima, uvjetima u kojima se zavarivanje odvija, položaju zavarivanja, dostupnoj opremi, iskustvu zavarivača i slično. Osnovni parametri koje treba uzeti u obzir prilikom MIG/MAG postupka zavarivanja su: [22]

Struja zavarivanja – jačina struje zavarivanja ovisi o brzini dovođenja žice odnosno o koeficijentu taljenja. U stvarnosti, taj odnos nije linearan. Što je veća brzina dovođenja žice, to je veća i struja zavarivanja. U slučaju da se poveća jakost struje, uz uvjet da se ostali parametri ne mijenjaju, dolazi do povećanja penetracije i nadvišenja zavara te povećanja količine

depozita. Na slici 13 prikazana je ovisnost jakosti struje o promjeru žice i brzini zavarivanja, a na slici 14 prikazana je ovisnost izgleda zavora u odnosu na jakost struje. [23]



Slika 13. Jakost struje u ovisnosti o promjeru žice i brzini zavarivanja [21]



Slika 14. Shematski prikaz izgleda zavora u ovisnosti o jakosti struje [24]

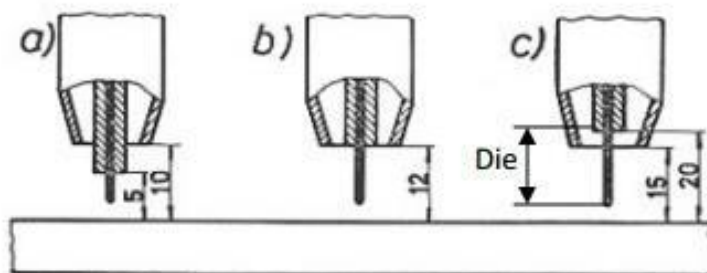
Brzina zavarivanja – pod ovim pojmom smatra se brzina kojom se električni luk pomiče duž linije spoja. O ovom parametru ovisi produktivnost postupka zavarivanja. Odabir brzine zavarivanja ovisi o položaju zavarivanja, a i izgled zavora ovisi o brzini zavarivanja. Povećanjem brzine zavarivanja zavar postaje uži, dok je penetracija manja, a smanjenjem brzine

zavarivanja situacija je suprotna: zavar postaje širi, a penetracija je veća. [23] Na slici 15 shematski je prikazan utjecaj brzine zavarivanja na izgled zavora.



Slika 15. Shematski prikaz izgleda zavora u ovisnosti o brzini zavarivanja [24]

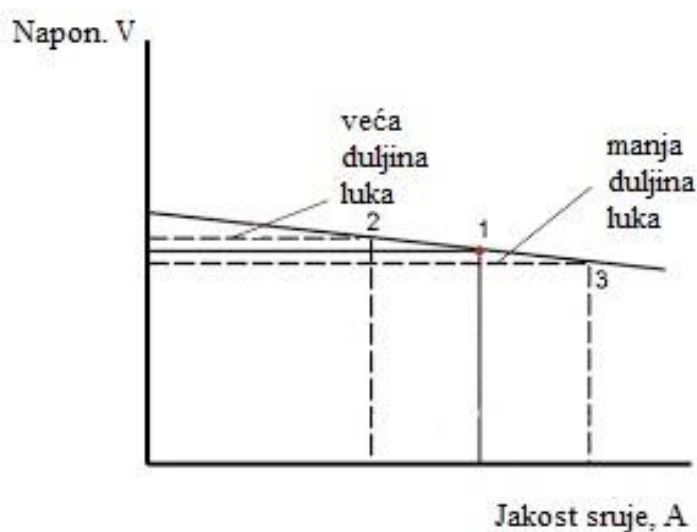
Slobodni kraj žice – duljina izvučenog kraja žice naziva se „Die“, a računa se od kraja vodilice do vrha žice. Samo taj dio žice sudjeluje u strujnom krugu. Struja zavarivanja ovisi o tome koliko je žice izvučeno, odnosno, ako je više žice izvučeno povećava se otpor žice, a to znači manju struju zavarivanja te vrijedi i obrnuto. [24] Na slici 16 shematski je prikazan slobodan kraj žice. Na primjer, zadovoljavajuća duljina slobodnog kraja žice iznosi 6 mm do 13 mm kod prijenosa metala kratkim spojem ili 13 mm do 20 (25) mm za ostale načine prijenosa metala.



Slika 16. Slobodni kraj žice [24]

Napon električnog luka – uz jakost struje zavarivanja, napon zavarivanja najznačajnija je promjenjiva veličina zavarivanja o kojoj ovisi kvaliteta zavarenog spoja. Napon se mijenja promjenom duljine električnog luka, a može se podesiti na izvoru struje za zavarivanje. Uz jakost struje zavarivanja i promjer elektrode, također se može podesiti i napon zavarivanja, ovisno o tome što se želi postići. Ne postoje točne vrijednosti napona koje je potrebno podesiti

ovisno o željenom rezultatu, međutim mogu se dati orijentacijske vrijednosti. Povećanjem napona zavarivanja povećava se duljina električnog luka, a samim time se smanjuje penetracija, a zavar postaje širi. Zavar će u tom slučaju biti estetski ljepši, međutim, mehanička svojstva možda neće biti zadovoljavajuća. Na slici 17 prikazana je CV karakteristika izvora struje zavarivanja, a na istoj se vidi kako struja ovisi o naponu zavarivanja. [23]



Slika 17. Ravna (CV) karakteristika izvora struje zavarivanja [25]

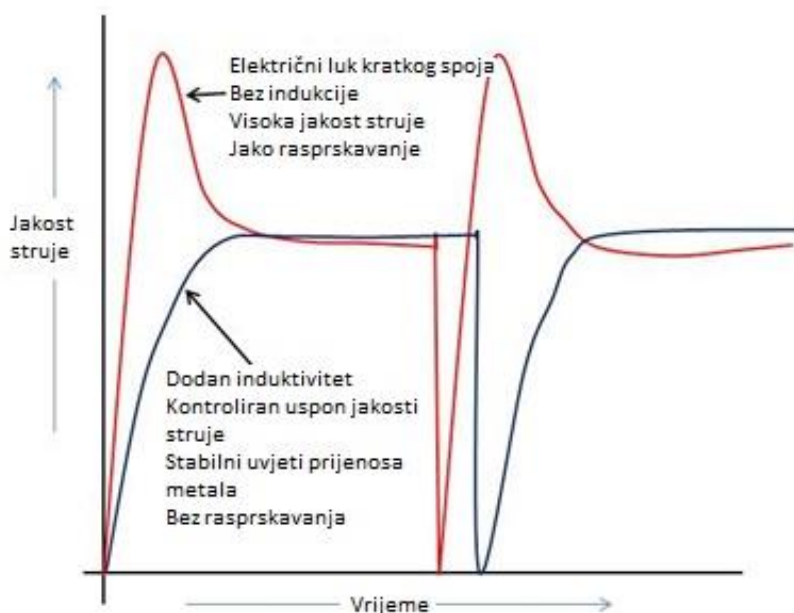
Utjecaj zaštitnog plina – većina metala i njegovih legura u rastaljenom stanju mogu reagirati sa zrakom i stvoriti metalne okside, odnosno nitride. Rastaljeni metal se kod zavarivanja može onečistiti tim oksidima i nitridima, a što dovodi do pojave grešaka u zavarenom spoju i narušava mehaničke osobine zavarenog spoja. Da bi se to izbjeglo, prilikom zavarivanja se koriste zaštitni plinovi koji štite zonu zavarivanja od dodira sa zrakom. Izbor zaštitnog plina ovisi o vrsti osnovnog materijala, postupku zavarivanja, načinu prijenosa dodatnog materijala, željenoj penetraciji, brzini zavarivanja, cijeni plina, mogućnost dostave plina, raspoloživosti opreme, itd. [23]

Induktivitet – iako su današnji moderni uređaji podešeni tako da automatski reguliraju induktivitet ovisno o nizu drugih podešenih parametara, stariji uređaji za zavarivanje oslanjali su se na konvencionalnu metodu namještanja induktiviteta grebenastim sklopkama, potencimetrima ili pomičnim kotvama. Krajnji cilj kod zavarivanja je osigurati što ujednačeniji i prikladniji prijelaz materijala ovisno o vrsti zavarenog spoja koji se izvodi. Kod induktiviteta postoji minimalni, optimalni i maksimalni induktivitet, pa treba i to uzeti u obzir prilikom namještanja. Induktivitet je vrlo suptilan i osjetljiv parametar, koji može poboljšati ili narušiti potencijalno dobar prijenos metala i samu uspostavu električnog luka. [26]

Smanjenje induktiviteta rezultira bržim porastom jačine struje, što rezultira učestalijim odvajanjem manjih kapljica tijekom zavarivanja i prijenosom metala kratkim spojem. Pohranjena energija u kapljici u tom slučaju nije dovoljna da se kapljica mirno odvoji, nego se javlja značajno rasprskavanje. Unesena energija nije dovoljna da se kapljica jednako rastali kao kod većeg induktiviteta te je napetost površine kapljice vrlo velika. Talina koja nastaje je viskozna i gusta, ne razlijeva se i pogodnija je za nadglavno zavarivanje (PE položaj) jer je veća doza sigurnosti da talina neće iscuriti. Preveliko smanjenje induktiviteta dovodi do intenzivnog rasprskavanja. [26]

Povećanje induktiviteta produljuje vremena koje je potrebno da jakost struje dosegne svoju vršnu vrijednost, a time se utječe ne brzinu formiranja rastaljene kapljice. Ovakav način prijenosa metala može se koristiti kod korijenskog prolaza isključivo u PA položaju, odnosno horizontalnom položaju kako ne bi došlo do curenja vrlo tekuće taline. Zbog većeg unosa topline i vrlo tekuće taline, stvaraju se i nježniji prijelazi između osnovnog materijala i zavarenog spoja. Većim induktivitetom dobivaju se krupnije kapljice, koje su više zagrijane zbog duljeg formiranja te zbog manje površinske napetosti nisu sklone rasprskavanju. Također je potrebno pripaziti da se uz ostale podešene parametre ne podesi prevelik induktivitet, jer to može rezultirati da zbog presporog rasta struje kapljica ne dobije dovoljno energije u određenom vremenu pa se žica može zabiti u radni komad, bez uspostave električnog luka. [26]

Na slici 18 prikazan je utjecaj induktiviteta na promjenu jakosti struje.



Slika 18. Utjecaj induktiviteta na jakost struje [26]

4.3 Načini prijenosa metala u električnom luku

Postoje četiri osnovna načina prijenosa metala u električnom luku koji su postali dominantni u industriji:

- prijenos metala električnim lukom kratkog spoja
- prijenos metala prijelaznim električnim lukom
- prijenos metala štrcajućim električnim lukom
- prijenos metala impulsnim električnim lukom.

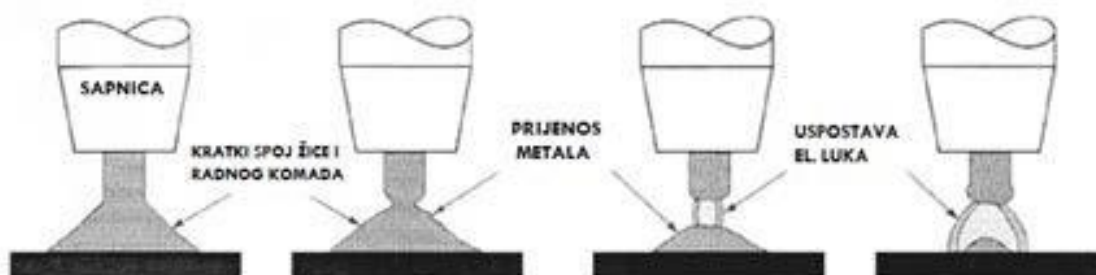
4.3.1 Prijenos metala električnim lukom kratkog spoja

Kod prijenosa metala kratkim spojem koriste se struje od 125 A do 175 A i napon od 12 V do 17 V (okvirne vrijednosti, nisu točno određene) i debljine žica od 0,8 mm do 1,2 mm. Prijenos metala električnim lukom kratkog spoja odlikuje se malim unosom topline u radni komad, zbog

čega se ovaj način prijenosa metala koristi kod zavarivanja osnovnih materijala manjih debljina, tipično 1 mm do 5 mm. Najčešće se koristi za izradu korijenskog prolaza te se koristi prilikom zavarivanja materijala koji su osjetljivi na unos topline. Način prijenosa električnim lukom kratkog spoja prikladan je za sve položaje zavarivanja. [26]

Ovaj način prijenosa metala je prijenos s malim unosom topline u radni komad. Prijenos metala nastaje kada je elektroda u kontaktu s radnim komadom pri čemu nastaje kratki spoj. Dolazi do porasta jakosti struje (kratki spoj) pa zbog toga dolazi i do povećanja magnetske sile na kraju elektrode. Nastala magnetska sila pritišće rastaljenu kapljicu koja se nalazi na vrhu elektrode. Pojava je poznata pod nazivom „*pinch*“. [20]

Na slici 19 shematski je prikazan prijenos metala električnim lukom kratkog spoja.



Slika 19. Prijenos kapljice metala električnim lukom kratkog spoja [26]

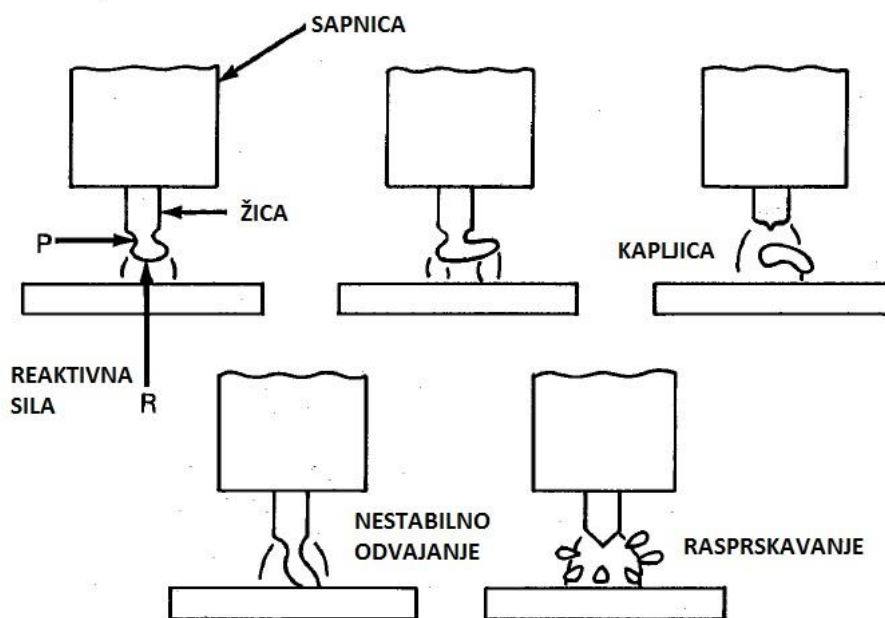
4.3.2 Prijenos metala prijelaznim električnim lukom

Prijenos metala prijelaznim (globularnim) električnim lukom koristi jakosti struje od 180 A do 230 A i napon od 17 V do 22 V (okvirne vrijednosti, nisu točno određene) i debljine žica od 0,8 mm do 1,6 mm. Unos topline kod ovakvog načina prijenosa metala je povećani pa dolazi do većeg razlijevanja i sporijeg hlađenja taline. Zbog većeg unosa topline, deformacije radnog komada su vidljive, a kapljice su većeg promjera u odnosu na promjer žice elektrode. Ovaj način prijenosa metala nije prikladan za prisilne položaje zavarivanja. Koristi se za izradu popunskih prolaza i debljina komada 5 mm i više. Zbog nepravilnog gašenja električnog luka i utjecaja zaštitnog plina, povećano je štrcanje. Zavarivanje pomoću prijelaznog električnog luka

obilježeno je mješovitim stabilnim radom u kratkom spoju te nestabilnim radom štrcajućim lukom, gdje se kapljice nepravilno formiraju te prilikom dodira sa rastaljenom talinom često nasilno štrcaju. [26]

Kapljice koje nastaju ovim načinom prijenosa metala nepravilnog su oblika i one ne prate vertikalnu putanju prilikom odvajanja od vrha elektrode. Proces je jako teško kontrolirati, a prskanje je značajno. Kapljice se odvajaju pod utjecajem gravitacije te slobodno padaju do rastaljene kupke metala s povremenom uspostavom kratkog spoja. [20]

Slika 20 shematski prikazuje prijenos metala prijelaznim električnim lukom.



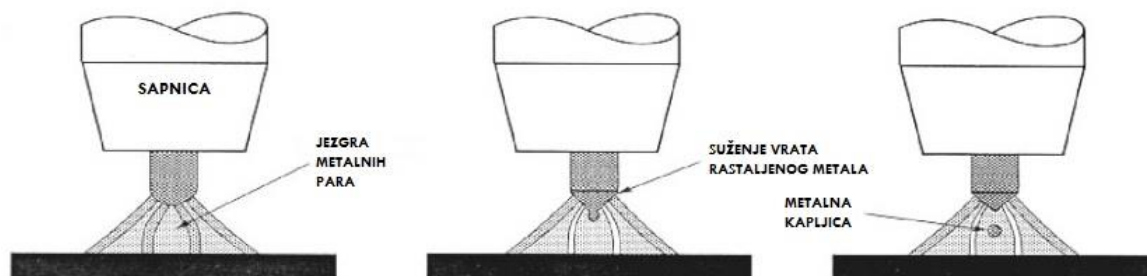
Slika 20. Prijenos metala prijelaznim električnim lukom [26]

4.3.3 Prijenos metala štrcajućim električnim lukom

Prijenos metala štrcajućim električnim lukom koristi jakosti struje od 240 A do 500 A i napon 23 V do 30 V (okvirne vrijednosti, nisu točno određene) i debljine žice od 1,2 mm do 2,4 mm. Kod ovog načina prijenosa metala unos topline je vrlo visok pa su deformacije materijala značajne. Ovaj način prijenosa metala odlikuje se konstantnom visinom električnog luka uz

minimalno štrcanje te mlazom sitnih kapljica koje ujednačeno padaju na radni komad. Prijenos metala nije prikladan za prisilne položaje zavarivanja, a koristi se za izradu popuna i završnih prolaza. Najčešće se koristi za spajanje radnih komada debljine 7 mm i više. Zbog visokog napona dolazi do potpune eliminacije kratkog spoja, a zbog visoke vrijednosti struje, jako magnetsko polje jako steže vrh žice te u iznimno kratkim intervalima proizvodi mlaz sitnih kapljica. Preporučuju se veće brzine zavarivanja i veće debljine materijala zbog opasnosti od protaljivanja. [26]

Slika 21 shematski prikazuje prijenos metala štrcajućim električnim lukom.



Slika 21. Prijenos kapljica metala štrcajućim električnim lukom [26]

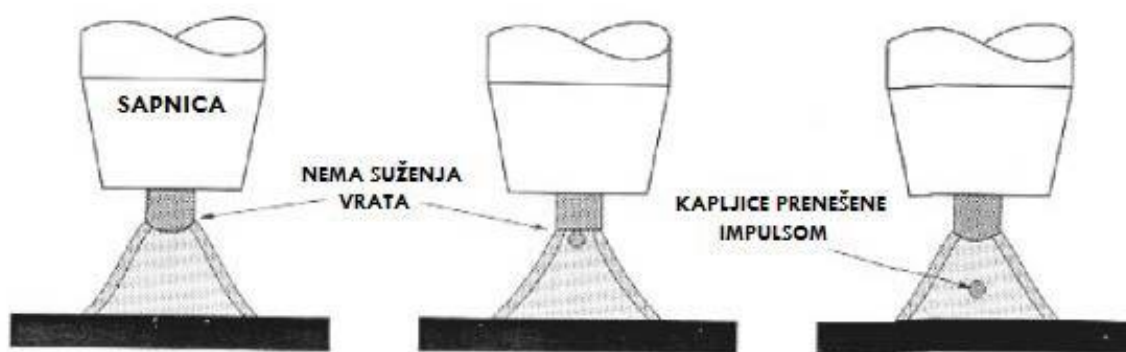
4.3.4 Prijenos metala impulsnim električnim lukom

Prijenos metala impulsnim električnim lukom koristi struje od 80 A do 500 A i napone 13 V do 30 V (okvirne vrijednosti, nisu točno određene) i debljine žice od 0,8 mm do 2,4 mm. Unos topline ovim načinom prijenosa materijala je kontroliran. Postiže se minimalno štrcanje uz konstantnu visinu električnog luka. Kapljice koje padaju u rastaljenu kupku su sitne i u kontinuiranom mlazu. Ovaj način prijenosa metala je prikladan za automatizaciju i robotizaciju. Impulsni način prijenosa metala je prikladan za sve položaje zavarivanja. Koristi se najviše za izradu popuna i završnih prolaza. U odnosu na prethodno opisane načine prijenosa metala, impulsni način prikladan je za spajanje materijala najmanjih debljina – 1 mm i više.

Kod opisanog načina prijenosa metala izvori struje proizvode dvije razine jakosti struje čije se ulazne i silazne karakteristike modificiraju prema tvorničkom programu ili prema odabiru korisnika. Niža, odnosno početna, vrijednost struje služi za održavanje električnog luka tijekom

koje se kapljica odvaja, dok viša, odnosno vršna, vrijednost struje služi da se ostvari štrcajući električni luk. Vršna struja znatno je viša od potrebne jakosti struje. Frekvencija i amplituda, odnosno oblik impulsa do vršne vrijednosti struje diktira način prijenosa metala i brzinu kojom će se formirati kapljice. Smanjivanjem srednje vrijednosti jakosti struje smanjuje se prosječna energija unesena u radni komad i brzinu stvaranja kapljica, pa se zbog toga ovim načinom prijenosa metala mogu spajati i tanki limovi. Sinergijski izvori struje za zavarivanje dolaze s pred programiranim modelima prijenosa metala, gdje je pojedini način prijenosa metala tvornički ispitan kako bi izvor dao što optimalniju kombinaciju jakosti struja i ulazno silaznih karakteristika. [26]

Slika 22 shematski prikazuje impulsni način prijenosa metala.



Slika 22. Prijenos kapljica metala impulsnim električnim lukom [26]

4.4 Modificirani načini prijenosa metala

U današnjoj praksi postoji dvadesetak postupaka MAG zavarivanja koji koriste modificirane načine prijenosa metala i to prvenstveno u području niskog unosa topline, kombinirajući kratki spoj i impuls, ali postoje i varijante koje implementiraju modificirani štrcajući luk. Neki od tih postupaka su:

- STT- Surface Tension Transfer®
- FastROOT®
- CMT-Cold Metal Transfer®

- AC MIG-Alternating Current MIG®
- RMT –Rapid MIG/MAG Technology®
- coldArc®
- Force Arc®.

Navedeni primjeri samo su neki od mnogih koji se danas primjenjuju.

4.4.1 coldArc®

ColdArc postupak zavarivanja jedan je od modificiranih inačica zavarivanja. Temelji se na MIG/MAG postupku zavarivanja te, konkretnije, na prijenosu metala kratkim spojem. Dakle, *coldArc* predstavlja modificiranu i unaprijeđenu verziju prijenosa metala kratkim spojem. U počecima samog razvoja postupaka zavarivanja, tehnologija koja se koristi danas u modernim izvorima struje za zavarivanje, nije bila dostupna. Odnosno, za podešavanje parametara i dobivanje željenih struja zavarivanja koristili su se glomazni transformatori, razne ručice i kotve za podešavanje struje zavarivanja. Izvori struje za zavarivanje u to su vrijeme bili bazirani na jednostavnim zakonima fizike te na mehaničkim sustavima podešavanja struje za zavarivanje. Iz toga razloga, mali i efikasni izvori nisu bili mogući, a mjesta za veće modifikacije bilo je jako malo. U današnje vrijeme, izvori struje za zavarivanje mnogo su moderniji, kompaktniji, efikasniji u usporedbi za nekadašnjim izvorima struje. Današnji, moderni uređaji i izvori struje za zavarivanje baziraju se na tranzistorima i inverterskoj tehnologiji za upravljanje izvorom struje za zavarivanje. Takve male i efikasne elektroničke komponente u kombinaciji sa računalnim upravljanjem omogućile su razvoj naprednih izvora struje za zavarivanje te finu i brzu kontrolu parametara zavarivanja, čak na razini mikro sekunda.

coldArc proces ima velike sličnosti sa CMT procesom zavarivanja (engl. Cold Metal Transfer). Kod CMT postupka zavarivanja koristi se kratki spoj za prijenos metala prilikom zavarivanja, međutim, CMT postupak zavarivanja je unaprijeđeni i modificirani postupak prijenosa metala kratkim spojem. Oba postupka baziraju se na inverterskoj tehnologiji, međutim, kod CMT postupka zavarivanja postoji još, osim regulacije struje zavarivanja i regulacija dodavača žice. Kod tog postupka, mehanički dio koji kontrolira dodavanje žice (mehanički dio koji povlači i dodaje žicu u ključnom trenutku) i elektronički dio koji kontrolira parametre zavarivanja u

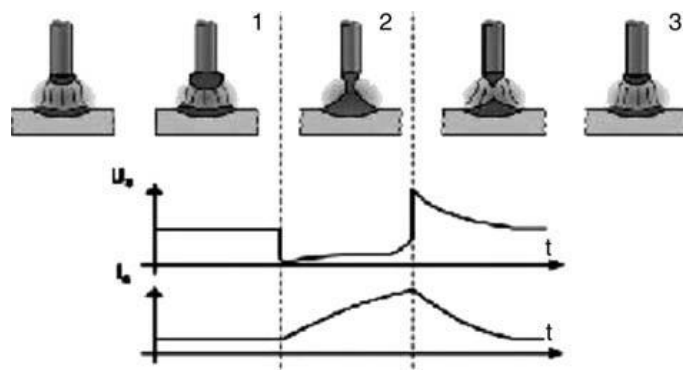
realnom vremenu tijekom samog zavarivanja, rade zajedno kako bi se postigli najbolji mogući parametri zavarivanja te u konačnici postigne željeni zavar.

Koncept *coldArc* tehnologije bazira se na kontroliranom prijenosu metala kratkim spojem. Patentirala ga je tvrtka EWM Hightec Welding GmbH, a tehnologija je predstavljena 2004. godine. *coldArc* kao modificirani MIG/MAG postupak zavarivanja objedinjuje prednosti dinamične inverterske tehnologije i brzu, digitalnu kontrolu struje. Digitalizacija procesa je od velike važnosti, iz razloga što je to jedini način kojim se može veoma brzo i vrlo precizno kontrolirati struja tijekom postupka zavarivanja u realnom vremenu. Brzina regulacije struje mjeri se u nekim slučajevima i u mikro sekundama. [29]

Prve dvije faze *coldArc* procesa zavarivanja identične su prijenosu metala konvencionalnim kratkim spojem (bez modifikacija). Promjena u odnosu na konvencionalni prijenos metala kratkim spojem događa se u fazi pojave kratkog spoja. U trenutku kada elektroda dodirne radni komad, napon naglo pada približno na nulu što rezultira naglim porastom struje. Kapljica se odvaja, a zbog visokih struja koje su prisutne u tom trenutku dolazi do nasilnog odvajanja kapljice što rezultira povećanim rasprskavanjem. Kod *coldArc* načina prijenosa metala kratkim spojem, struja se pomoću brze elektronike drastično smanjuje. Naime u trenutku kratkog spoja, struja se poveća kako bi se omogućio „*pinch*“ efekt, međutim za kratko vrijeme te nakon toga, struja se elektronički smanjuje kako bi se omogućio nenasilan i ugađeni prekid „*mosta*“, koji je nastao između elektrode i radnog komada. Na ovaj je način drastično, odnosno gotovo, eliminirana mogućnost rasprskavanja. Nakon što je kapljica odvojena, nestaje kratki spoj između elektrode i radnog komada te se ciklus ponavlja. U tom trenutku dolazi do ponovne uspostave električnog luka i neznatnog povećanja struje (poznato kao puls taljenja), kako bi se omogućilo formiranje kapljice i ugađeno odvajanje iste. [29]

4.4.1.1 Usporedba konvencionalnog prijenosa metala kratkim spojem sa coldArc kratkim spojem

Na slici 23 prikazan prijenos metala kratkim spojem sa pripadajućim prikazima promjene struje i napona tijekom procesa.

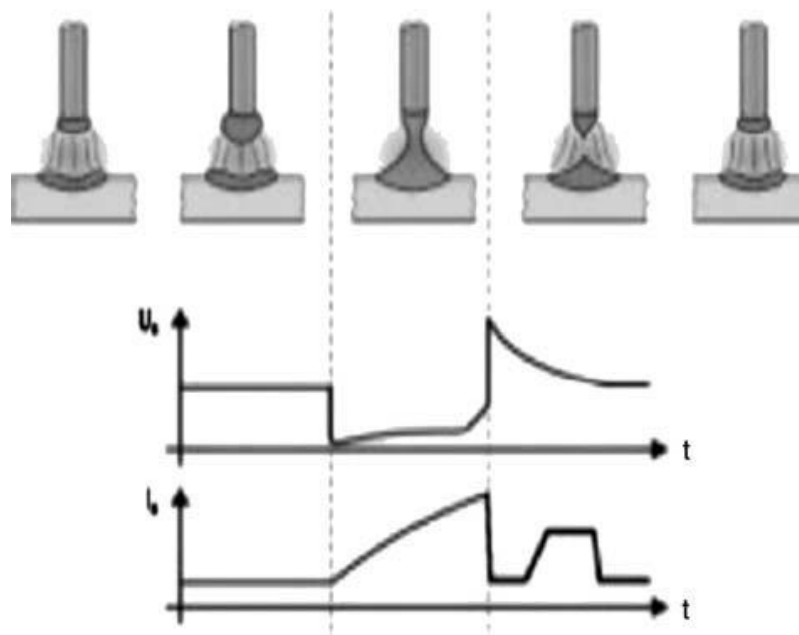


Slika 23. Prijenos metala kratkim spojem i promjene struje i napona [30]

Prijenos metala kratkim spojem koristi se kod MIG/MAG zavarivanja. To je prijenos metala malih električnih snaga, što znači da se javljaju niski naponi i struje. Nakon uspostave električnog luka formira se kapljica na vrhu elektrode, a zbog kratkog luka (niski napon) kapljica dolazi u kontakt sa radnim komadom pri čemu dolazi do gašenja električnog luka. Pod utjecajem napetosti površine zone taline te zbog „pinch“ efekta (efekt je ukratko opisan u 4.3.1), kapljica se odvaja od elektrode. Nakon što je kapljica odvojena od vrha elektrode, odnosno kada se prekine most koji je nastao između elektrode i radnog komada, dolazi do ponovne uspostave električnog luka. Na slici 23 prikazani su parametri zavarivanja tijekom prijenosa metala kratkim spojem te što se događa sa istima u pojedinim fazama procesa. Na početku uspostave kratkog spoja dolazi do smanjenja napona, jer je u tom trenutku otpor mosta koji je nastao manji u odnosu na otpor električnog luka. Istovremeno, struja počinje rasti na vrijednost struje kratkog spoja. Kada nestane spoja između elektrode i radnog komada, napon naglo poraste jer je napon potreban za ponovnu uspostavu električnog luka (ponovno paljenje luka), a napon raste zbog toga što više nema kratkog spoja. Međutim, pad napona je u toj fazi veoma spor zbog prisutne pojave indukcije u električnom krugu. Indukcija je svojstvo vodiča koje se protivi promjeni struje kroz taj vodič, što rezultira indukcijom suprotne elektromotorne sile (napona) pa je zbog toga pad napona znatno usporen. Zbog te elektromotorne sile nastaje

magnetno polje oko vodiča. Zbog navedenog, prilikom ponovne uspostave električnog luka, električna snaga je relativno visoka. U tom procesu moguće je da „most“ koji se stvorio između elektrode i radnog komada, eksplozivno ispari ukoliko se struja u tom trenutku ne regulira. Rezultat pojave je veliko rasprskavanje i mala dinamika procesa. Visoka snaga električnog luka te ostale pojave, posebno su nepoželjne kod zavarivanja radnih komada kod kojih je mali unos topline od velike važnosti. U tom slučaju, kod zavarivanja limova malih debljina koji su loše pripremljeni, može doći do razaranja materijala radnog komada (stvaraju se rupe u radnom komadu) ne mjestu ponovne uspostave električnog luka. Kod zavarivanja površina koje su prevučene nekim od zaštitnih slojeva, kao što je to npr. cink, postoji opasnost od isparavanja prevlake cinka prilikom uspostave električnog luka i zbog toga se gubi kontinuiranost procesa. Ako se zavaruju čelici visoke tvrdoće (čelici otporni na trošenje), može doći do pada te otpornosti (manifestira se kao pad tvrdoće materijala) u slučaju prevelikog unosa topline. Zbog navedenog, iako je prijenos metala kratkim spojem prikladan za zavarivanje materijala malih debljina, proces nije prikladan kod materijala koji su veoma osjetljivi na unos topline. [30]

Istraživanja i razvoj procesa niskih energija bez upotrebe modifikacija mehanike za dodavanje žice (push-pull postupak), doveli su do varijante kontrole procesa zavarivanja kod koje se sve nužne promjene događaju u samom izvoru struje zavarivanja, bez potrebe za korištenjem različitih mehaničkih uređaja. Takav MIG/MAG proces nazvan je *coldArc* i također se bazira na prijenosu metala kratkim spojem. Izvedeno ime procesa govori o cikličkim faznim promjenama koje se događaju između električnog luka i kratkog spoja. Kako je snaga električnog luka prilikom ponovne uspostave električnog luka od velike važnosti kod zavarivanja materijala malih debljina, kontrola snage električnog luka je prisutna kroz sve karakteristične faze procesa: faze električnog luka, faze kratkog spoja i posebno kod faze ponovne uspostave električnog luka. Krivulja napona se u tom trenutku ne razlikuje u odnosu na krivulju napona konvencionalnog kratkog spoja. Na slici 24 prikazan je *coldArc* postupak zavarivanja zajedno sa pripadajućim krivuljama promjene napona i struje i karakterističnim fazama procesa.



Slika 24. *coldArc* proces sa pripadajućim promjenama struje i napona [30]

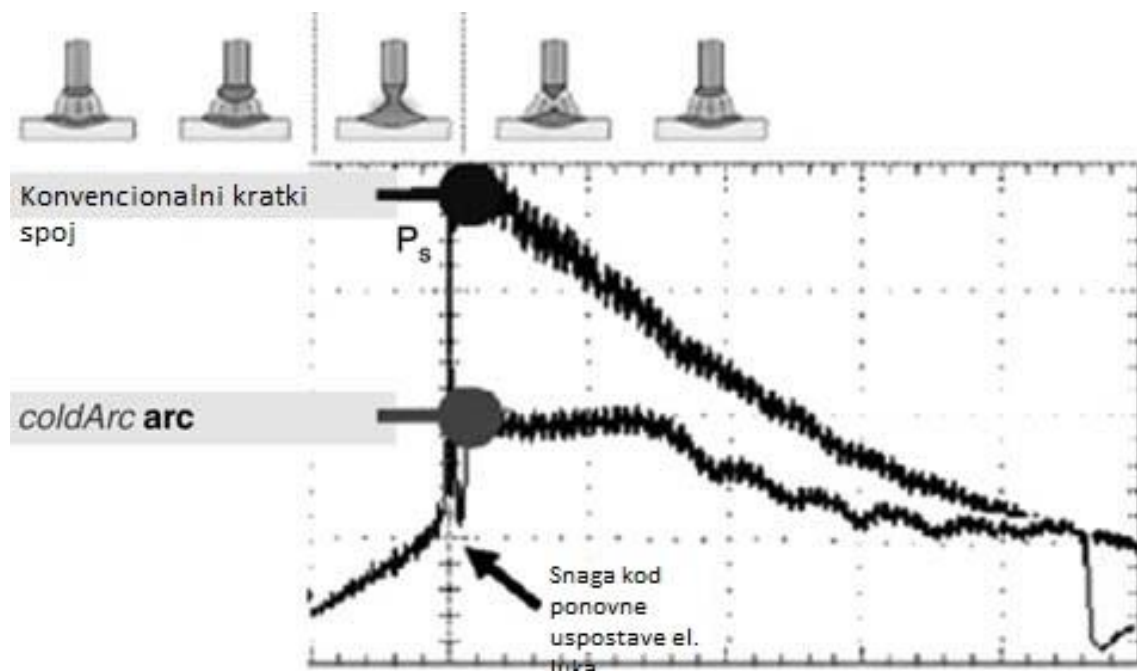
Snaga električnog luka koristi se kao indikator intenzivnosti procesa. Kako bi se to postiglo potrebno je kontinuirano mjeriti napon i napraviti potrebne promjene u parametrima zavarivanja u realnom vremenu. Procesor za obradu digitalnog signala koristi se za određivanje snage električnog luka odmah nakon ponovne uspostave električnog luka, u periodu manjem od 1 milisekunde kako bi se postigla regulirana i blaga ponovna uspostava električnog luka, tzv. soft-start. Odmah nakon uspostave električnog luka, dolazi do povećanja struje za unaprijed određeno vrijeme sve dok se ne postigne puls taljenja. Nakon toga struja se smanjuje na nisku, osnovnu vrijednost kako bi se smanjilo dodatno taljenje elektrode prije početka novog ciklusa. Nakon svakog kratkog spoja, puls taljenja generira kapljicu fiksne veličine što omogućuje ugladen i homogen proces. [30]

Na slici 24 može se vidjeti promjena napona i struje procesa *coldArc*. Promjena napona i kod konvencionalnog kratkog spoja i kod *coldArc* kratkog spoja je ista međutim razlika je u promjeni struje. Naime, prve dvije faze oba procesa su iste. Razlika je u trećoj fazi, odnosno u fazi kratkog spoja. Kao što je prikazano na slici 24, nakon uspostave kratkog spoja struja se drastično smanjuje kako bi se omogućilo ugladenje i mirno odvajanje kapljice sa vrha elektrode, čime se gotovo eliminiralo rasprskavanje tijekom procesa zavarivanja. Nakon toga struja se

vraća na svoju zadanu vrijednost, a u određenom trenutku se neznatno poveća kako bi se postigao puls taljenja i formirala se kapljica. Nakon što je jedan ciklus završio, dolazi do ponovne uspostave električnog luka. Međutim, u slučaju *coldArc* postupka, snaga električnog luka je znatno smanjena pa se time eliminiraju nepoželjne pojave koje nastaju kod konvencionalnog prijenosa metala kratkim spojem.

Prema slikama 23 i 24, jasno se vidi razlika između ova dva procesa. Jedan ciklus počinje u trenutku uspostave električnog luka pri nazivnom naponu i struji, te kako vrijeme prolazi formira se kapljica na vrhu elektrode, koja je s vremenom sve bliže radnom komadu. Zbog toga napon sve više pada, a struja sve više raste. U trenutku kada nastane kratki spoj, struja doseže svoju maksimalnu vrijednost, odnosno vrijednost kratkog spoja. Kod konvencionalnog kratkog spoja sustav neće reagirati na visoku vrijednost struje, odnosno struja će biti visoka sve dok se kapljica ne odvoji sa vrha elektrode. Kada se kapljica odvoji nestaje kratki spoj, a napon zbog toga naglo poraste. U tom trenutku dolazi do ponovne uspostave električnog luka, međutim struja je i dalje vrlo visoka, mnogo viša u odnosu na nazivnu, podešenu struju zavarivanja. Zbog toga se javljaju visoke snage koje u toj fazi mogu oštetiti radni komad, unijeti previše topline u radni komad i slično. Na slici 24 jasno se vidi što se događa kod *coldArc* postupka. Faze do uspostave kratkog spoja su u oba procesa iste, međutim, u trenutku kada se pojavi kratki spoj, elektronika unutar izvora struje zavarivanja naglo i drastično smanjuje nastalu visoku struju. Na taj se način omogućuje ugladeno i blago odvajanje kapljice sa vrha elektrode što sprječava nastanak rasprskavanja. Nakon što je kapljica odvojena dolazi do ponovne uspostave električnog luka, ali u ovom slučaju, iako je napon naglo porastao, struja neće biti visoka, odnosno elektronika uređaja održava nisku vrijednost struje. Zbog toga je električna snaga prilikom ponovne uspostave električnog luka drastično smanjena pa se time eliminiraju problemi koji nastaju prilikom konvencionalnog kratkog spoja. U nastavku ciklusa, struja se kontrolirano blago povisi kako bi nastao impuls taljenja i formirala se kapljica na vrhu elektrode, a nakon toga se opet smanjuje kako bi se taljenje elektrode držalo pod kontrolom.

Na slici 25 prikazana je krivulja snage konvencionalnog kratkog spoja i *coldArc* kratkog spoja prilikom ponovne uspostave električnog luka.



Slika 25. Usporedba električne snage kod ponovne uspostave električnog luka [30]

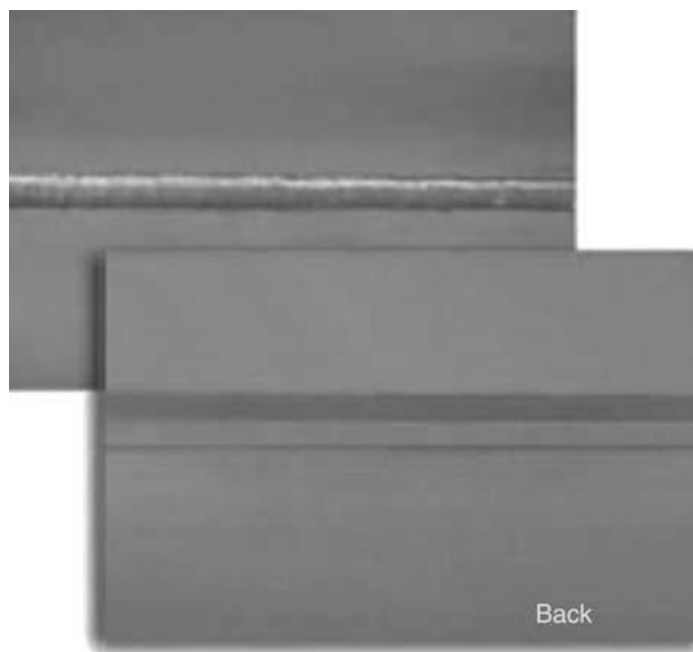
Na slici 25 jasno se vidi da je električna snaga konvencionalnog kratkog spoja prilikom ponovne uspostave električnog luka daleko veća u odnosu na *coldArc* kratki spoj. Problemi koji nastaju zbog visoke snage eliminirani su *coldArc* postupkom na efikasan način. Krivulja snage jasno prikazuje postignuti efekt.

Uspoređujući konvencionalni kratki spoj sa *coldArc* kratkim spojem, jasno je vidljiva velika prednost *coldArc* postupka. Modifikacije konvencionalnog postupka prijenosa metala kratkim spojem omogućile su bolju kontrolu parametara zavarivanja, podešavanje parametara zavarivanja u realnom vremenu. Rezultati toga su bolja kontrola unosa topline u radni komad, manje električne snage prilikom ponovne uspostave električnog luka, smanjenje rasprskavanja i potrebnog dodatnog čišćenja materijala nakon procesa zavarivanja. Iako *coldArc* ima značajne prednosti, velika mana modifikacije je cijena. Potrebna je skupa elektronika koja je dovoljno „pametna“ i brza da u realnom vremenu reagira na promjene u kombinaciji sa zahtjevnim programiranjem te dodatnim raznim senzorima.

4.4.1.2 Primjeri *coldArc* procesa zavarivanja

Ova vrsta procesa ima mnoge primjene, pogotovo u autoindustriji gdje konvencionalni kratki spoj više nije zadovoljavajući. Već i nekoliko godina unazad, razmišljalo se o upotrebi MIG/MAG postupka zavarivanja za zavarivanje limova debljine 0,7 mm te za aluminij debljine 3 mm. Limovi koji se danas koriste kod proizvodnje automobila imaju i manje debljine. Već i postoje limovi debljine 0,3 mm, a rade se i eksperimenti na materijalima debljine 0,2 mm. Spajanje limova malih debljina jedna je od tipičnih primjena *coldArc* procesa zavarivanja. [30]

Na slici 26 može se vidjeti primjer galvaniziranog čelika debljine 0,8 mm. Kod pripreme spoja, razmak između ploča iznosio je 4 mm. Ploče su spojene *coldArc* procesom zavarivanja u vertikalnom položaju krećući se od vrha prema dnu. Korištena žica bila je CuSi_3 , a parametri zavarivanja iznosili su 50 A i 13,5 V.



Slika 26. Primjer spoja nastalog *coldArc* procesom zavarivanja [30]

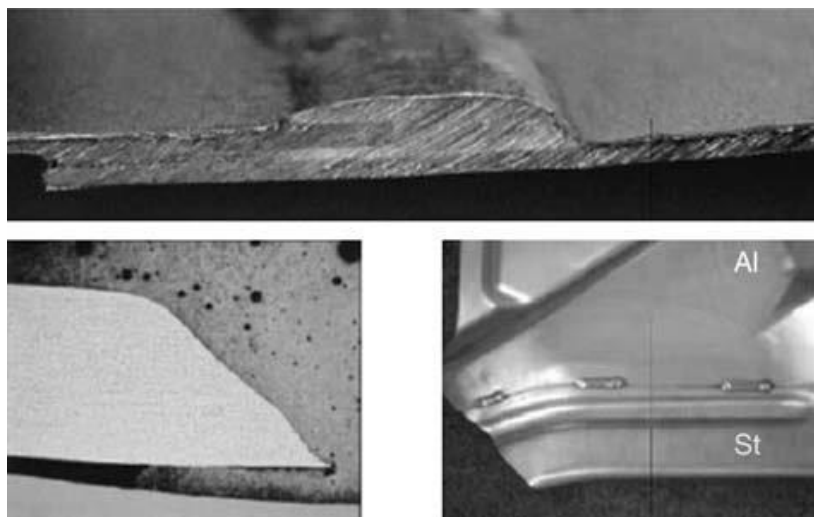
Na slikama 27, 28, 29 prikazano je nekoliko primjera spojeva napravljenih *coldArc* procesom zavarivanja.



Slika 27. Čelični lim debljine 1,0 mm; sučeljeni spoj razmaka 1 mm; 1,0 mm G4Si1 dodatni materijal 2,0 m/min; $U = 19\text{ V}$; $I = 136\text{ A}$ [30]



Slika 28. Lim AlMg3; kutni spoj na preklopnom spoju; 1,0 mm AlSi5 dodatni materijal 1,2 m/min; $U = 13\text{ V}$; $I = 55\text{ A}$ [30]



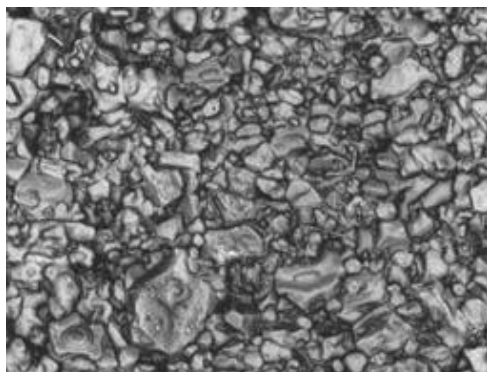
Slika 29. Miješani spoj aluminija i čelika sa cinkom kao dodatnim materijalom [30]

5. PARAMETRI TEKSTURE POVRŠINE

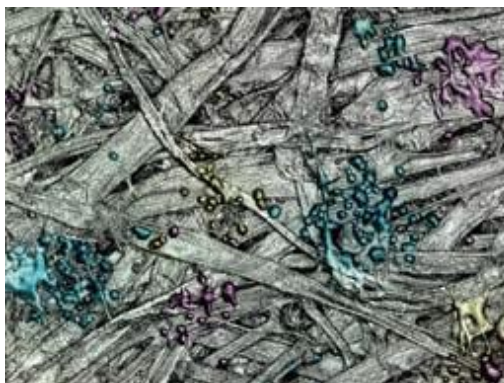
Promatrajući površine strojno obrađenih dijelova, može se uočiti da površina nije savršeno ravna, već je kompleksnog oblika. Površina tako obrađenog dijela sastavljena je od niza vrhova i žlijebova nepravilnih dimenzija, odnosno visina i dubina, a razmak ovih nepravilnosti varira. Hrapavost površine definirana je odnosom željene površine u odnosu na dobivenu površinu. Mnogo je različitih primjera u stvarnom svijetu koji potkrepljuju činjenicu da nijedna površina nije savršeno ravna. Tu, na primjer, spada i staklo, za koje se smatra da je savršeno ravna površina, međutim to nije stvarni slučaj. Iako mala, odstupanja postoje. Hrapavost površine u nekim je slučajevima i poželjna, ovisno o kojoj vrsti proizvoda je riječ i što se na kraju izrade želi postići. Tako na primjer, u slučaju dviju površina koje moraju nalijegati jedna na drugu sa što manjom zračnošću, hrapavost površine može postavljati ozbiljan problem ili ako je na površinu nekog proizvoda potrebno nanijeti premaz, hrapavost može utjecati na debljinu tog premaza. [31]

Parametri hrapavosti površine određeni su normom *ISO 25178-2 Surface Texture*, a to je skupina internacionalnih standarda koji se bave analizom hrapavosti površine. Navedena norma koristi dvije metode evaluacije površine nekog predmeta: kontaktna metoda i metoda bez kontakta (koja se oslanja na optičke instrumente za određivanje određenih parametara). Najčešće se koristi dvostruki pristup jer se na taj način eliminiraju nedostaci koje pojedina metoda ima. U slučaju kontaktne metode, rezultati mogu varirati ovisno o vanjskim utjecajima, dok kod optičkog pristupa mjerenja, rezultati variraju ovisno o načinu snimanja (skeniranja). [31]

Na slikama 30 i 31 prikazani su neki od primjera hrapavosti površine.



Slika 30. Površina keramičke ploče
[31]



Slika 31. Površina papira [31]

Prema *ISO 25178-2*, parametri teksture površine grupirani su u šest kategorija: [31]

1. amplitudni parametri
2. prostorni parametri površine
3. hibridni parametri
4. funkcionalni parametri
5. funkcionalni volumni parametri
6. parametri značajki.

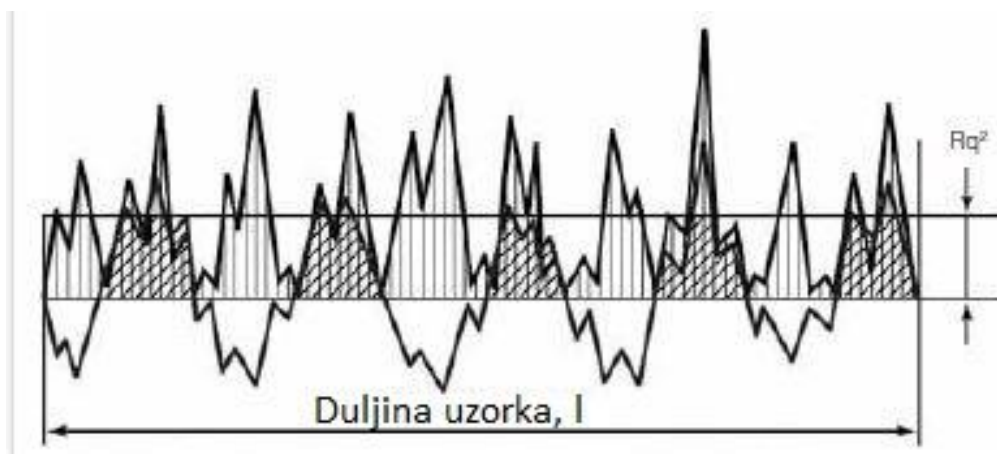
5.1 Amplitudni parametri

Amplitudni parametri opisuju varijacije vertikalnih komponentata profila.

Tablica 6. Parametri teksture površine – amplitudni paramteri [31]

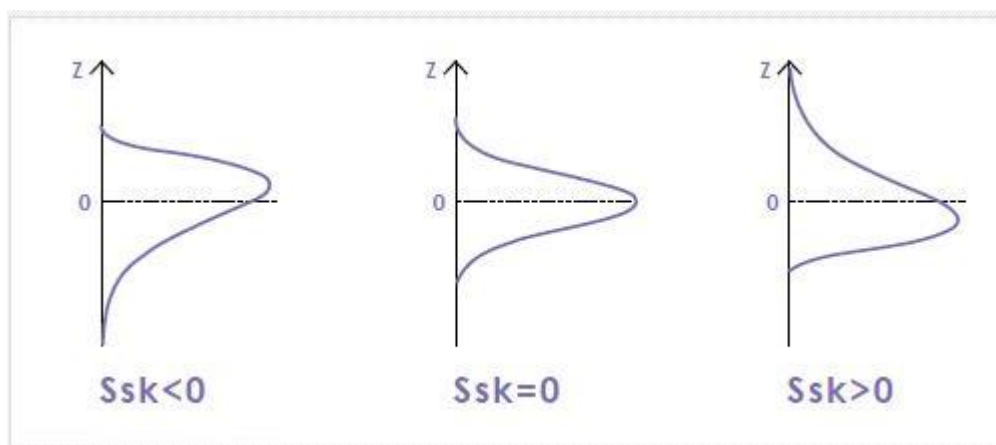
Oznaka	Engleski naziv	Hrvatski naziv/opis
Sq, mm	Root mean square height	Odstupanje srednjeg korijena visine površine
Ssk	Skewness	Parametar asimetrije rasipanja visine površine
Sku	Kurtosis	Parametar spljoštenosti površine
Sp, mm	Maximum peak height	Maksimalna visina vrha površine
Sv, mm	Maximum pit height	Maksimalna dubina dna površine
Sz, mm	Maximum height	Maksimalna razlika maksimalne visine i maksimalne dubine
Sa, mm	Arithmetical mean height	Aritmetička sredina visine površine

- Odstupanje srednjeg korijena visine površine (Sq) ekvivalent je standardnoj devijaciji visina površine. Slika 32 prikazuje odstupanje srednje korijena visine površine, što je zapravo proširenje odstupanje srednjeg korijena visine neravnine linije, oznake Rq . [31]

**Slika 32. Odstupanje srednjeg korijena visine neravnine površine [31]**

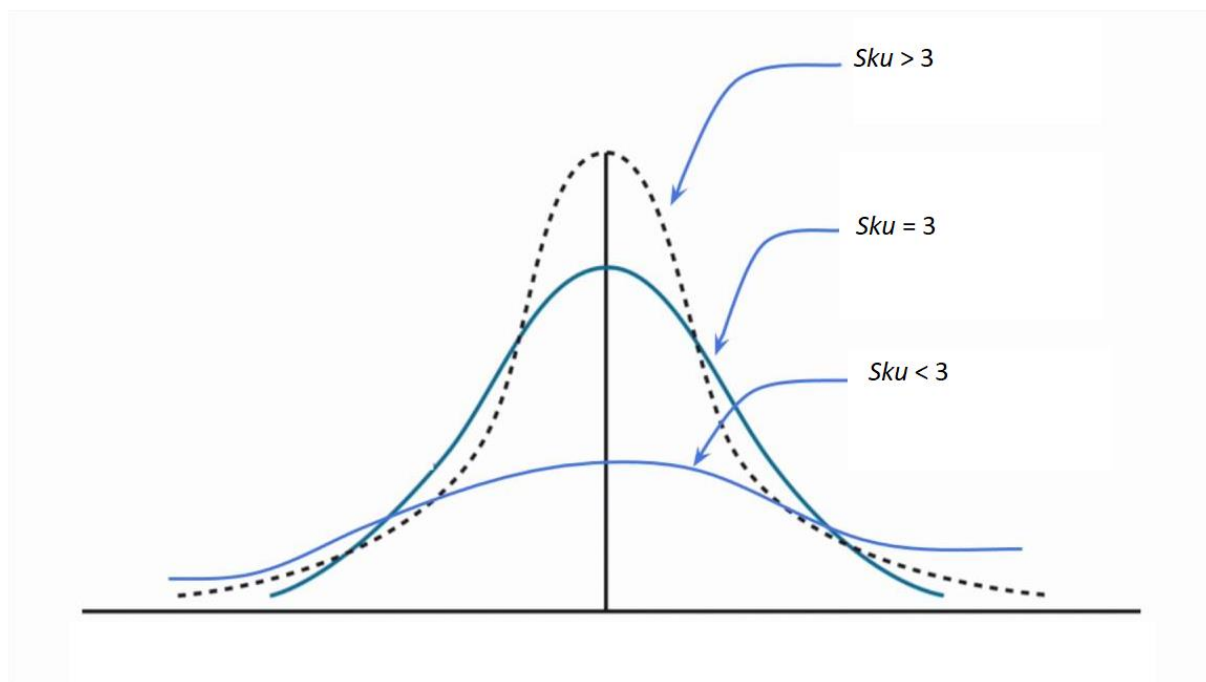
- Parametar asimetrije rasipanja visine površine (Ssk) govori o distribuciji neravnina u odnosu na očekivanje. Ako je vrijednost ovog parametra jednaka nuli, distribucija visina vrhova i žljebova jednaka je u odnosu na očekivanje, odnosno jednaka je i sa jedne i sa druge strane. Ako je vrijednost parametra veća od nule, distribucija visina nije simetrična, već je pomaknuta desno od očekivanja. Analogno vrijedi ako je vrijednost

parametra manja od nule. [31] Na slici 33 prikazan je parametar asimetrije rasipanja visine površine u odnosu na vrijednosti parametra.



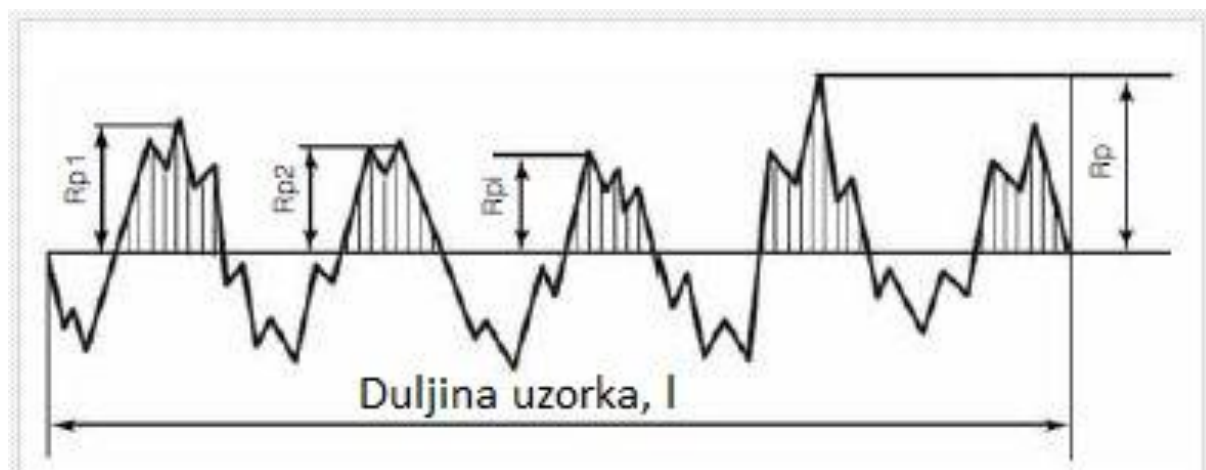
Slika 33. Parametar asimetrije rasipanja visine površine [30]

- Parametar spljoštenosti površine (Sku) je parametar koji govori o rasipanju oštrina vrhova površine. Postoje tri moguće vrijednosti ovog parametra: može poprimiti vrijednost veću od tri, manju od 3 ili pak jednaku 3. U slučaju da je vrijednost parametra jednaka tri, nastaje normalna distribucija. Ako je vrijednost parametra veća od tri dobiva se viša raspodjela podataka, odnosno kod te raspodjele više su zastupljeni podaci oko sredine krivulje, tj. oko očekivanja. Krivulja postaje šiljata. Iz slike 34 vidljivo je da u tom slučaju prevladavaju podaci koji se nalaze blizu očekivanja, dok su drugi manje zastupljeni. U slučaju da je vrijednost parametra Sku manja od 3, dobiva se „ravnija“ krivulja koja je prikazana na slici 34. Iz tako nastale krivulje može se iščitati da u raspodjeli prevladavaju podaci sa višim vrijednostima. Kao što se vidi na slici, krivulja je veoma niska i šira. [31]



Slika 34. Parametar rasipanja oštrina vrhova površine [31]

- Maksimalna visina vrhova parametar je koji govori o najvećoj vrijednosti visine neravnine na promatranoj površini. Označava se oznakom Sp . Na slici 35 prikazano je značenje parametra Sp .



Slika 35. Maksimalna visina vrhova [31]

Parametar na slici označen oznakom Rp se odnosi na profil neravnina, a oznaka Sp govori o istoj vrijednosti, ali se odnosi na površinu.

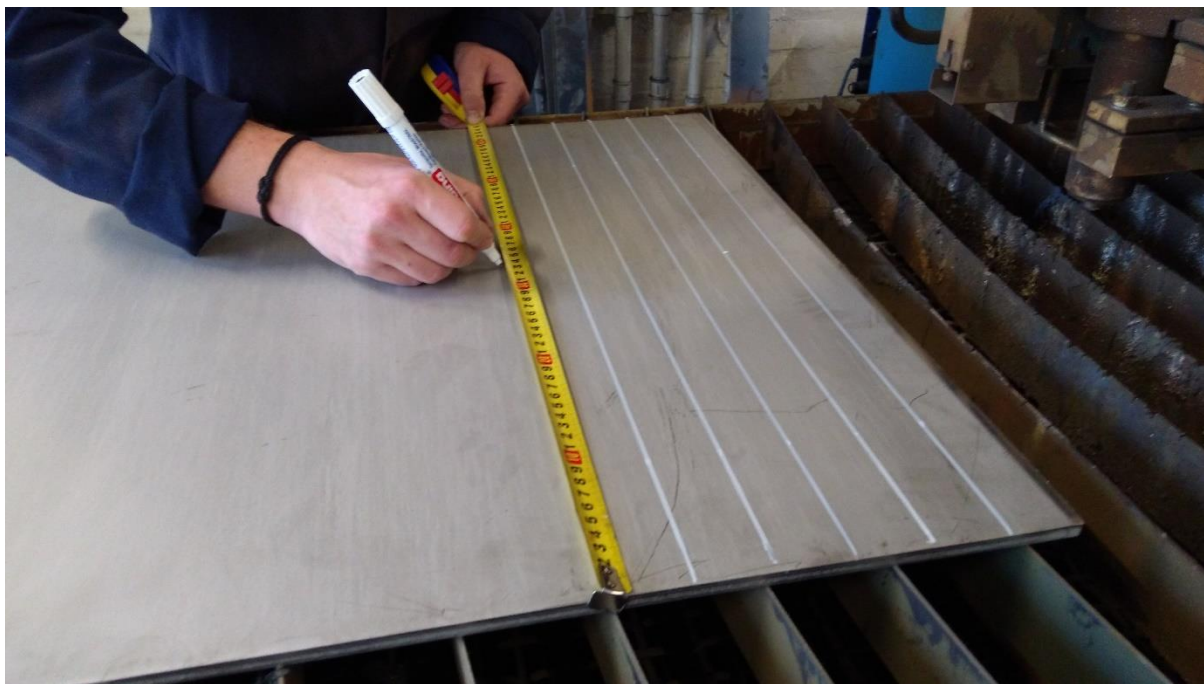
- Maksimalna dubina dna površine je parametar koji govori o najvećoj vrijednosti dubine neravnine promatrane površine. Oznaka parametra je S_v .
- Maksimalna razlika maksimalne visine i maksimalne dubine je parametar koji govori o najvećoj vrijednosti razlike između najveće vrijednosti visine i najveće vrijednosti dubine promatrane površine. Odnosno, parametar je definiran kao zbroj najveće vrijednosti visine i najveće vrijednosti dubine promatrane površine.
- Aritmetička sredina visine površine je parametar analogan parametru R_a kada se promatra linija, odnosno profil neravnina površine. Oznaka parametra je S_a i zapravo je proširenje parametra R_a na promatranu površinu. Koristi se za općenito opisivanje hrapavosti površine, a predstavlja srednje aritmetičko odstupanje profila. Srednje aritmetičko odstupanje profila jednako je srednjoj aritmetičkoj vrijednosti apsolutnih vrijednosti visine površine neravnina. [31]

6. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio izveden je u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta Strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. U eksperimentalnom djelu bilo je potrebno izraditi dva uzorka postupkom aditivne proizvodnje električnim lukom i metalnom žicom. Prvi postupak koji se koristio za izradu uzorka je postupak *coldArc*, a drugi postupak za izradu uzoraka bio je konvencionalni prijenos metala kratkim spojem. Oba postupka detaljno su opisana u prethodnim poglavljima ovog rada. Usporedno s izradom uzoraka mjerene su i dinamičke karakteristike uređaja zavarivanja. Dinamička karakteristika je karakteristika koja prikazuje promjene struje i napona tijekom samog procesa zavarivanja. Dinamička karakteristika bila je mjerena za svaki prolaz prilikom izrade zida postupkom aditivne proizvodnje. Dinamička karakteristika bila je mjerena osciloskopom. Osciloskop je uređaj koji omogućava detektiranje promjena struje i napona u kratkom vremenu, a iste prikazuje u grafičkom obliku. Za mjerenje promjena struje u napon tijekom zavarivanja, u teoriji bi bilo moguće i nekim jednostavnijim uređajima. Međutim, zbog vrlo brzih promjena struje i napona (mjeri se u milisekundama) koristi se osciloskop koji ima mogućost detekcije vrlo brzih promjena vrijednosti istih. Nakon završetka izrade jednog sloja, mjerila se temperatura nastalog sloja, kako bi se temperatura međuprolaza održavala na istoj vrijednosti (100 °C). Za mjerenje temperature koristio se infracrveni termometar. S obzirom da se u ovom slučaju radi o aditivnoj proizvodnji električnim lukom i metalnom žicom, nakon svakog sloja nastaje određena visina zida pa je nakon svakog prolaza izmjerena dobivena visina zida, koja se mjerila u tri točke uz pomoć pomičnog mjerila. Opisani postupak ponavljao se sve dok se nije dobila zadovoljavajuća i predefiniрана visina zida od 85 mm. Nakon završetka izrade zida, naknadno se napravilo 3D skeniranje površine nastalog zida u svrhu određivanja parametara neravnine nastalog zida. Sustav skeniranja opisan je u sljedećem odjeljku.

6.1 Korištena oprema i provedeni postupci

Prije početka izrade zida napravljena je priprema podloge na kojoj će se taj zid izraditi. Podloge su izrezane iz lima i jednake su dimenzije. Rezanje podloga provelo se na CNC plazma stroju za rezanje (slika 36). Parametri rezanja bili su sljedeći: $I = 80 \text{ A}$, $v = 40 \text{ cm/min}$, koristila se zračna plazma. Priprema rezanja i izrezane pločice prikazane su na slici 36 i slici 37.



Slika 36. Priprema lima za rezanje



Slika 37. CNC stroj za plazma rezanje i izrezane pločice (podloge) za zid

Za izradu uzoraka korištena je robotska stanica Almega OTC AX V6 koja je prikazana na sljedećoj slici (slika 38).



Slika 38. Robotska stanica Almega OTC AX V6

Korišteni robot je robot sa 6 stupnjeva slobode gibanja. Robotska stanica se koristi za proces aditivne proizvodnje zbog svoje točnosti pozicioniranja i mogućnosti ponavljanja radnje s vrlo malom tolerancijom, uobičajena vrijednost je 0,05 mm. Program robotske stanice napravljen je ručno, odnosno, „online“ postupkom učenja robota pomoću privjeska za učenje. Također, robotska stanica se koristi i zbog brzine zavarivanja. Eksperiment se provodio s fiksnom vrijednosti brzine dodavanja žice u vrijednosti od 4,5 m/min i s fiksnom brzinom zavarivanja od 25 cm/min. Robotska stanica ima mogućnost podešavanja brzine zavarivanja i držanje podešene brzine na točnoj vrijednosti tijekom cijelog postupka zavarivanja.

Uređaj koji je bio uparen za rad sa robotskom stanicom je EWM Titan XQ 350 puls (slika 39). Tehničke karakteristike uređaja dane su u tablici 7.



Slika 39. EWM Titan XQ 350 puls

Tablica 7. Karakteristike uređaja za zavarivanje EWM Titan XQ 350 puls [32]

	MIG/MAG	MMA	TIG
Struja zavarivanja, A	5 A – 350 A		
Intermitencija kod temperature, °C	40 °C		
100 % intermitencija, A	350 A		
Napon praznog hoda, V	82 V		
Napon glavnog napajanja, V	3 x 400 V		
Masa, kg	128,5 kg		

Uređaj ima širok raspon podešavanja parametara i postupaka zavarivanja. Baziran je na najnovijoj inverterskoj tehnologiji pa zbog toga obuhvaća čitav niz mogućih postupaka zavarivanja. Osim konvencionalnih načina prijenosa metala, uređaj raspolaže mogućnostima zavarivanja modificiranim postupcima načina prijenosa metala, a neki od njih su: *coldArc/coldArc puls*, *forceArc/forceArc puls* i mnoge druge. U eksperimentalnom djelu ovog rada korišten je postupak *coldArc*, a koji je modificirani i unaprijeđeni način prijenosa metala kratkim spojem. [32]

Nakon što je jedan sloj zida izrađen, pristupilo se mjerenju i bilježenju visine nastalog zida pomoću pomičnog mjerila. Na sljedećoj slici (slika 40) prikazano je pomoćno mjerilo korišteno prilikom provođenja eksperimenta.



Slika 40. Pomično mjerilo

Nakon mjerenja nastale visine zida, pristupilo se mjerenju temperature zida na prethodno označenim mjestima (slika 41).



Slika 41. Označena mjesta mjerenja visine zida

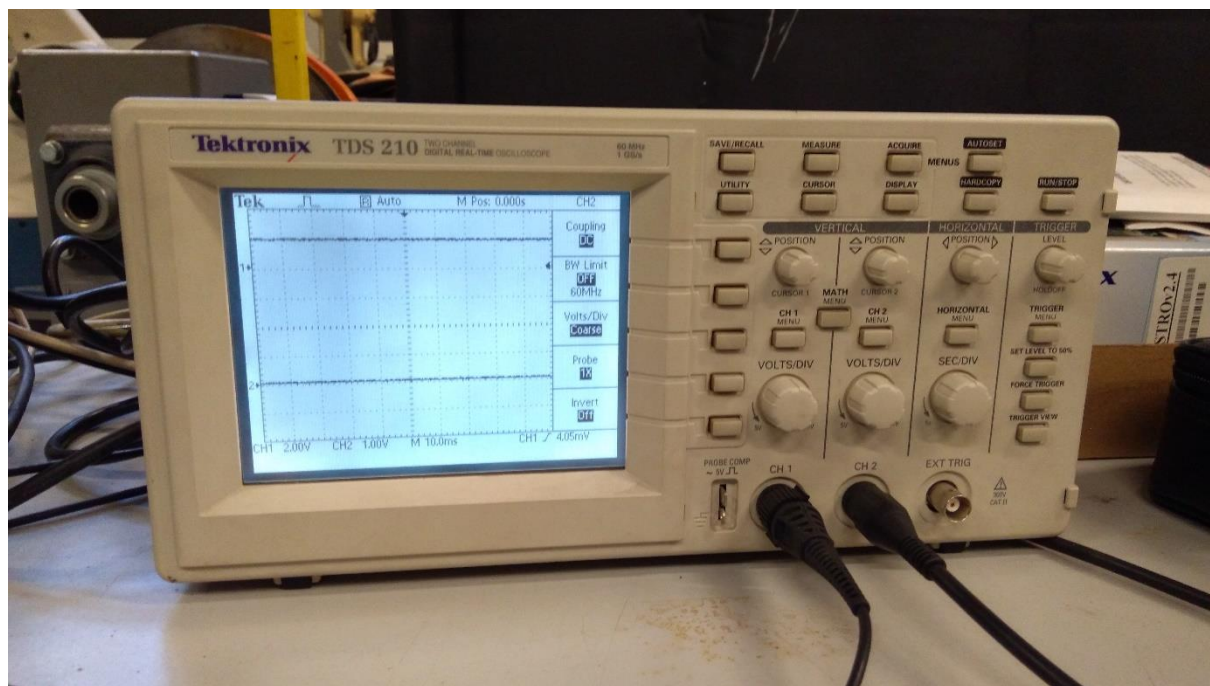
Kao što je već spomenuto, temperatura međuprolaza držala se na vrijednosti oko 100 °C kako bi se dobio ujednačen proces proizvodnje, odnosno da svi slojevi imaju iste parametre izrade. Za mjerenje se koristio infracrveni termometar koji je prikazan na sljedećoj slici (slika 42).



Slika 42. Infracrveni termometar

U slučaju da je temperatura u mjerenom trenutku bila previsoka, hlađenje se provelo pomoću zračnog kompresora ili se zid hladio prirodnim hlađenjem (što duže traje). Kada se temperatura spustila na željenu vrijednost (oko 100 °C) pristupilo se navarivanju novog sloja zida.

Tijekom postupka izrade sloja zida, praćena je dinamička karakteristika trenutno korištenog procesa zavarivanja. Promatrala se promjena struje i napona u određenom vremenu. Na slici 43 prikazan je korišteni osciloskop za praćenje dinamičke karakteristike tijekom procesa zavarivanja.



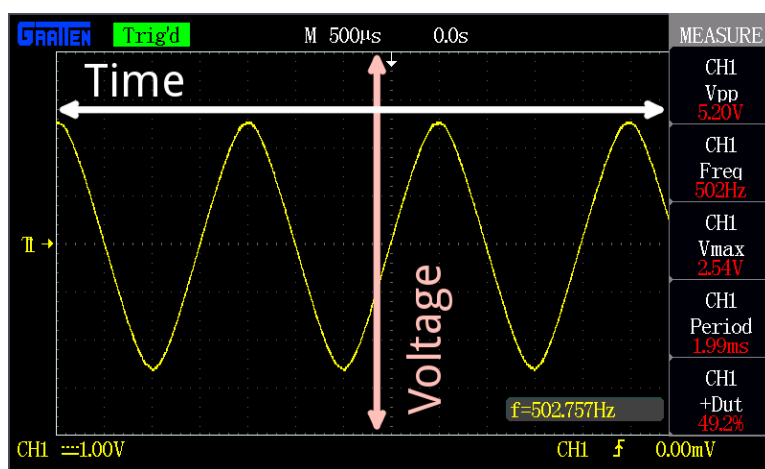
Slika 43. Osciloskop korišten za mjerenje dinamičke karakteristike tijekom postupka zavarivanja

Kako bi osciloskop mogao mjeriti promjene struje i napona u vremenu, potrebni su senzori. Kao senzori, koristili su se strujna kliješta i dvije žice koje se spajaju na odgovarajuće dijelove na uređaju za zavarivanje. Strujna kliješta, koja su prikazana na slici 44, spajaju se na polikabel odnosno, kliješta se spajaju oko kabla. Žice za mjerenje napona spojene su na minus pol i plus pol uređaja za zavarivanje.



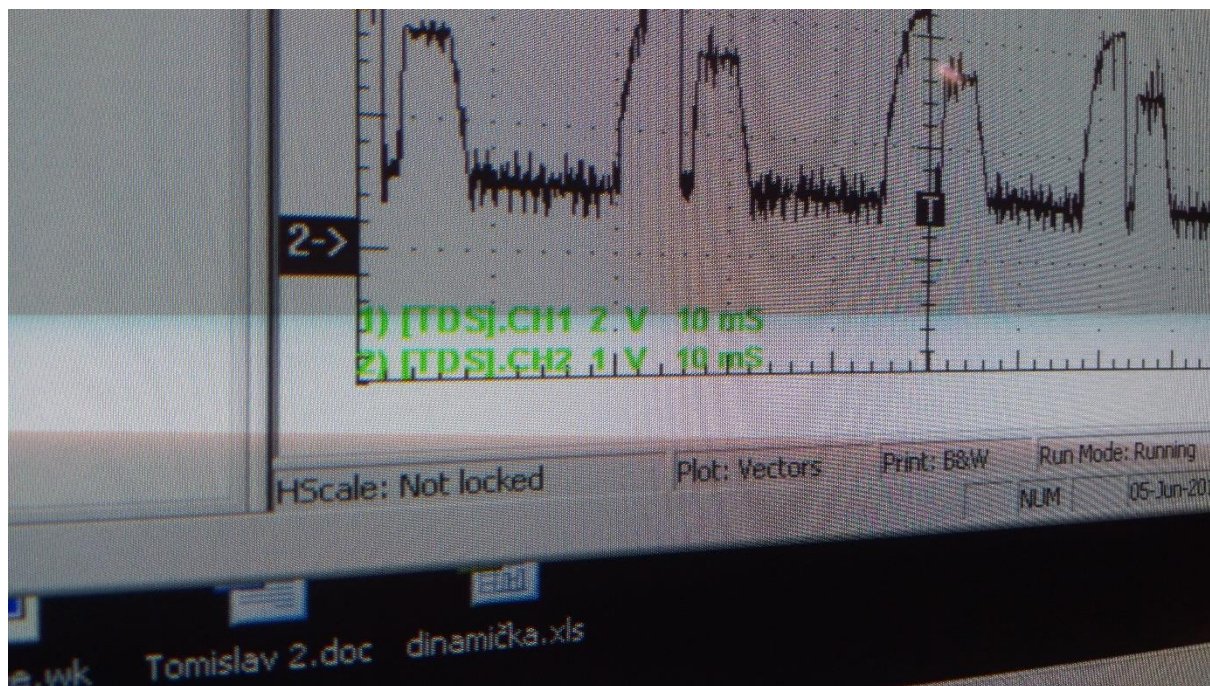
Slika 44. Strujna kliješta

Žica napona, koja je korektno spojena na uređaj za zavarivanje te žica strujnih kliješta, spajaju se sa osciloskopom na određena mjesta. Osciloskop promjene struje i napona prikazuje u obliku signala određene visine napona u vremenu pa je te vrijednosti potrebno preračunati kako bi se dobile stvarne vrijednosti struje i napona. Primjer grafičkog prikaza promjene struje i napona u vremenu na osciloskopu prikazan je na slici 45 s odgovarajućim oznakama. S obzirom da osciloskop može istovremeno mjeriti promjenu i struje i napona, senzor promjene napona bio je spojen na kanal 1 osciloskopa, a senzor promjene struje na kanal 2 osciloskopa.



Slika 45. Primjer grafičkog prikaza promjene napona ili struje u vremenu

Osciloskop također ima i opciju „hold“ koja sačuva grafički prikaz u odabranom trenutku. Osciloskop je u svakom trenutku spojen na računalu pa se i na računalu može pratiti promjena koja se događa prilikom zavarivanja (prikazano na slici 46).



Slika 46. Grafički prikaz promjene struje i napona bilježen na računalu.

Nakon završetka jednog sloja zida, vrijednosti u mjerenom intervalu vremena od 250 ms prebačene su u Microsoft Excel na daljnju obradu. Kao što je spomenuto prije, osciloskop ne mjeri stvarne vrijednosti napona i struje tijekom procesa zavarivanja nego isti dobiva signale u obliku napona koje zatim grafički prikazuje na svom zaslonu, odnosno na računalu. Zbog toga se te vrijednosti prebacuju u Microsoft Excel kako bi se obradile i u konačnici dobile stvarne vrijednosti promjene struje i napona. Na slici 47 i slici 48 prikazani su primjeri obrade podataka u MS Excelu i dobiveni konačni rezultat u obliku numeričkih vrijednosti i grafičkih prikaza.

Kanal 1: Napon, V								
Vrijeme, ms	S, Volts						Stvarni napon, V	Prosječni napon, V
0.00	-0.125	3.11999989	-0.125	3.11999989	3.11999989	311999989	31.1999989	22.01535997
0.10	-0.1249	3.11999989	-0.1249	3.11999989	3.11999989	311999989	31.1999989	
0.20	-0.1248	3.20000005	-0.1248	3.20000005	3.20000005	320000005	32.0000005	
0.30	-0.1247	3.11999989	-0.1247	3.11999989	3.11999989	311999989	31.1999989	
0.40	-0.1246	3.20000005	-0.1246	3.20000005	3.20000005	320000005	32.0000005	
0.50	-0.1245	3.11999989	-0.1245	3.11999989	3.11999989	311999989	31.1999989	
0.60	-0.1244	3.11999989	-0.1244	3.11999989	3.11999989	311999989	31.1999989	
0.70	-0.1243	3.20000005	-0.1243	3.20000005	3.20000005	320000005	32.0000005	
0.80	-0.1242	3.11999989	-0.1242	3.11999989	3.11999989	311999989	31.1999989	
0.90	-0.1241	3.11999989	-0.1241	3.11999989	3.11999989	311999989	31.1999989	
1.00	-0.124	3.20000005	-0.124	3.20000005	3.20000005	320000005	32.0000005	
1.10	-0.1239	3.20000005	-0.1239	3.20000005	3.20000005	320000005	32.0000005	
1.20	-0.1238	3.11999989	-0.1238	3.11999989	3.11999989	311999989	31.1999989	

Slika 47. Primjer obrade podataka u MS Excelu – promjena napona u vremenu

Vrijeme, ms	Kanal 2: Struja, A						Stvarna struja, A	Prosječna struja, A
	S, Volts							
0.00	-0.125, 2	-0.125, 2	-0.125	2	2	2	200	125.8911998
0.10	-0.1249, 1.96000004	-0.1249, 1.96000004	-0.1249	1.96000004	1.96000004	1.96000004	196.000004	
0.20	-0.1248, 1.96000004	-0.1248, 1.96000004	-0.1248	1.96000004	1.96000004	1.96000004	196.000004	
0.30	-0.1247, 1.91999996	-0.1247, 1.91999996	-0.1247	1.91999996	1.91999996	1.91999996	191.999996	
0.40	-0.1246, 1.96000004	-0.1246, 1.96000004	-0.1246	1.96000004	1.96000004	1.96000004	196.000004	
0.50	-0.1245, 1.91999996	-0.1245, 1.91999996	-0.1245	1.91999996	1.91999996	1.91999996	191.999996	
0.60	-0.1244, 1.88	-0.1244, 1.88	-0.1244	1.88	1.88	1.88	188	
0.70	-0.1243, 1.84000003	-0.1243, 1.84000003	-0.1243	1.84000003	1.84000003	1.84000003	184.000003	
0.80	-0.1242, 1.84000003	-0.1242, 1.84000003	-0.1242	1.84000003	1.84000003	1.84000003	184.000003	
0.90	-0.1241, 1.96000004	-0.1241, 1.96000004	-0.1241	1.96000004	1.96000004	1.96000004	196.000004	
1.00	-0.124, 1.88	-0.124, 1.88	-0.124	1.88	1.88	1.88	188	
1.10	-0.1239, 1.96000004	-0.1239, 1.96000004	-0.1239	1.96000004	1.96000004	1.96000004	196.000004	
1.20	-0.1238, 2.03999996	-0.1238, 2.03999996	-0.1238	2.03999996	2.03999996	2.03999996	203.999996	
1.30	-0.1237, 2	-0.1237, 2	-0.1237	2	2	2	200	

Slika 48. Primjer obrade podataka u MS Excelu – promjena struje u vremenu

Iz dobivenih podataka računao se unos topline.

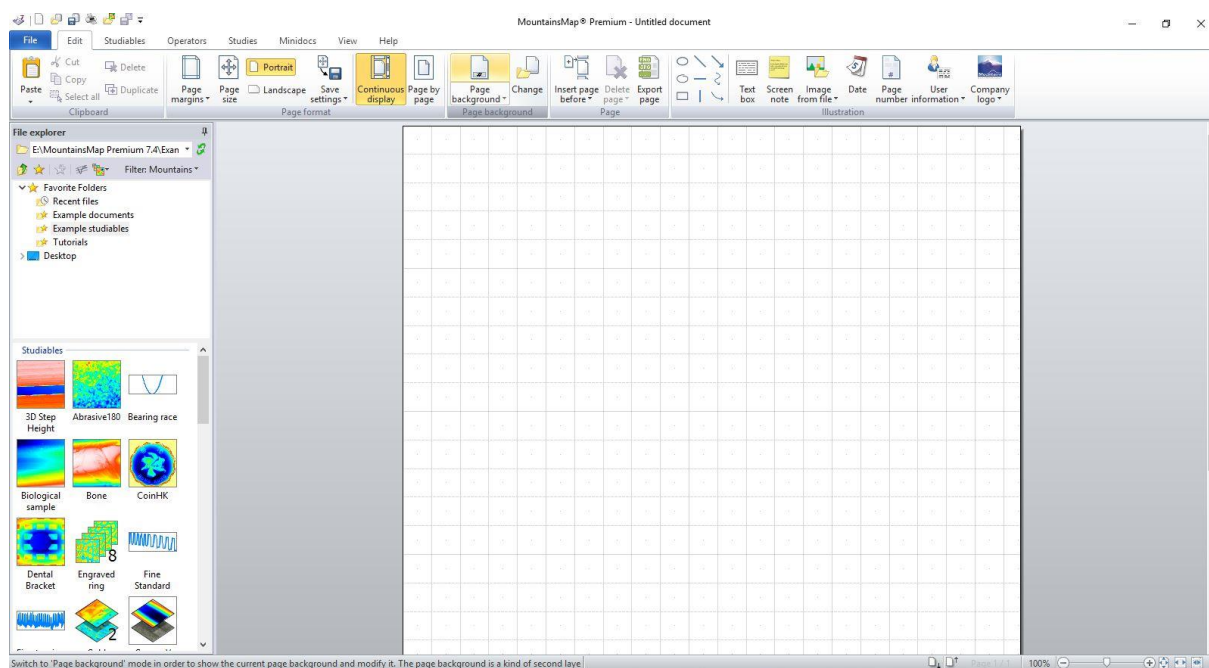
Tijekom izrade zida također se pratila i količina utrošenog materijala po prolazu kako bi se moglo zaključiti o količini utrošene žice za izradu zida.

Postupak izrade zida i sva mjerenja, provedena su za oba uzroka, odnosno zida. Napravljena su dva uzorka sa istim parametrima koristeći *coldArc* i konvencionalni način prijenosa metala kratkim spojem.

Nakon što su izrađena oba uzorka, napravljeno je 3D skeniranje površine zida u svrhu određivanja parametara neravnina površine zida. Korišteni sustav za skeniranje, pod nazivom DAVID SLS 2 3D skener proizvođača DAVID, prikazan je na slici 49, dok je analiza uzoraka provedena u softveru MountainsMap, verzija 7.4, proizvođača Digital Surf (slika 50).

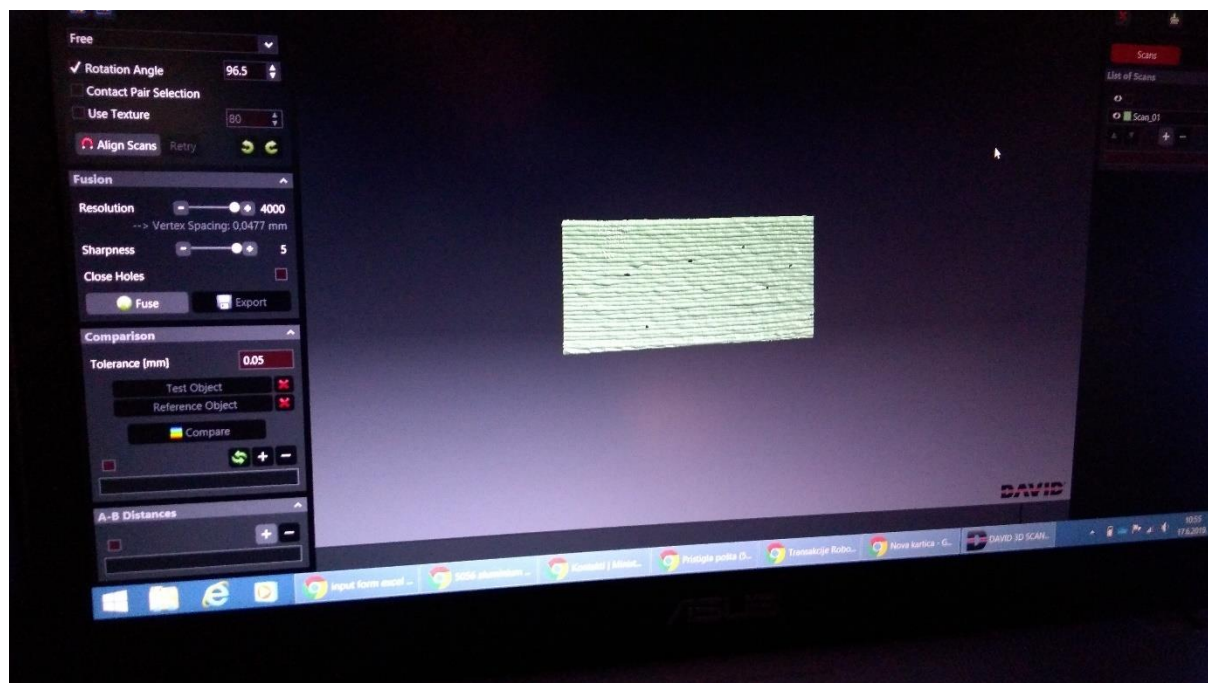


Slika 49. DAVID SLS 2 3D skener



Slika 50. Softver MountainsMap proizvođača Digital Surf

Prije samog skeniranja provedena je kalibracija sustava, a primjer dobivenih rezultata prikazani su na sljedećoj slici (slika 51).



Slika 51. Rezultat skeniranja zida sustavom DAVID SLS 2 3D skener

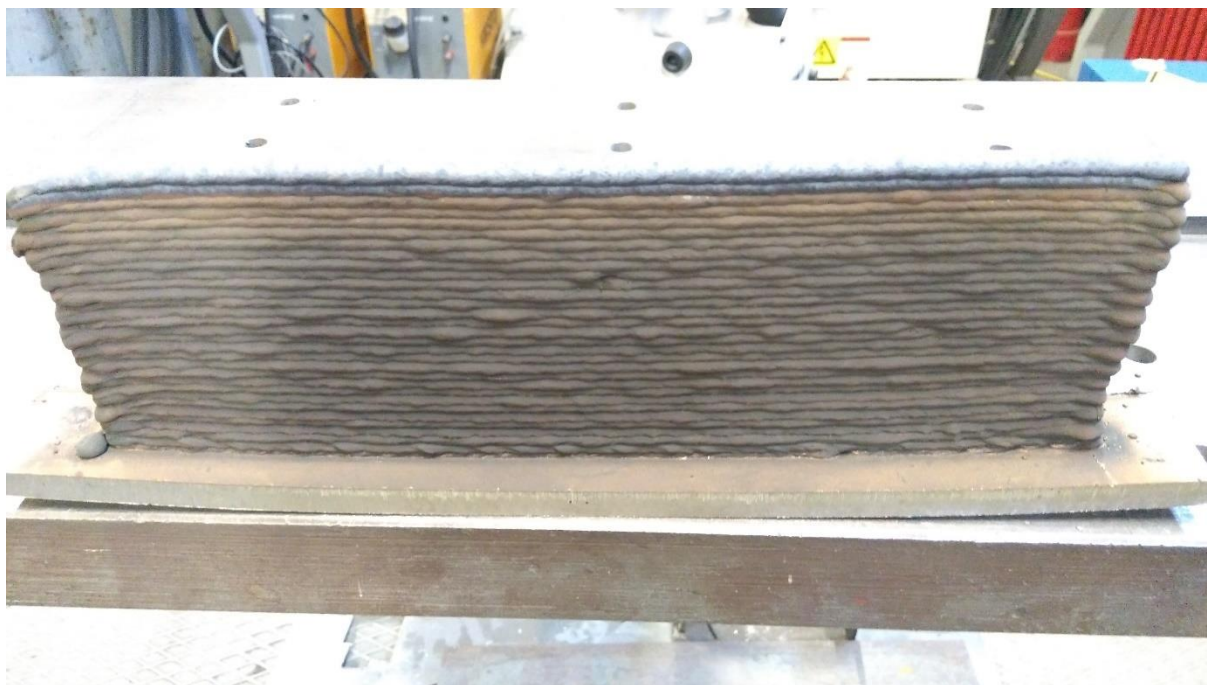
Nakon uspješnog skeniranja, iz zida prikazanog na slici 51, izrezani su uzorci koji su obrađeni u već spomenutom softveru MountainsMap (slika 50) u svrhu prikazivanja neravnina površine zida.

S obzirom da je bilo potrebno napraviti dva uzorka, odnosno dva zida s dva različita postupka zavarivanja, cijeli prethodno opisani proces ponovio se i za konvencionalni način prijenosa metala kratkim spojem.

U nastavku ovog rada prikazani su rezultati dobiveni *coldArc* modificiranim načinom prijenosa metala kratkim spojem i rezultati dobiveni konvencionalnim načinom prijenosa metala kratkim spojem (prijenos metala kratkim spojem bez modifikacija).

6.2 Rezultati dobiveni *coldArc* postupkom zavarivanja

Korištenjem robota Almega OTC AX V6 i uređaja za zavarivanje EWM Titan XQ 350 puls dobiven je sljedeći zid (slika 52).



Slika 52. Zid dobiven postupkom zavarivanja *coldArc*

Prilikom izrade zida, parametar brzine dovođenja žice, kao i parametar brzine zavarivanja, bili su konstantni, odnosno, iznosili su 4,5 m/min i 25 cm/min dok je ostale parametre (struja, napon) odredio sam uređaj za zavarivanje prema svojem unutarnjem algoritmu. Konstantnom brzinom dodavanja žice i brzinom zavarivanja, željela se postići ujednačena produktivnost prilikom izrade oba uzorka.



Slika 53. Oznake mjesta mjerenja visine zida

Na slici 53 prikazana su predefinirana mjesta mjerenja nastale visine zida. Gornje oznake 2043 i 2044, oznake su korištenog programa robota za izradu zida. Programom 2043 izrađivao se zid s desne strane prema lijevoj, a programom 2044 izrađivao se zid s lijeve strane prema desnoj. Razlog naizmjenične izrade zida leži u postizanju jednakih visina zida na oba kraja. U slučaju da bi se zid izrađivao u samo jednoj strani, npr. s desne prema lijevoj, nastao bi značajan pad visine zida na krajnjoj strani te rezultati mjerenja ne bi bili valjani.

U sljedećoj tablici (tablica 8) prikazani su obrađeni rezultati izmjerene visine zida. S obzirom da je visina zida mjerena u tri točke, izračunao se prosječni prirast visine zida po sloju. Prema dobivenom rezultatu, prosječni rast visine zida po sloju iznosi 2,78 mm. Rast visine zida u pojedinim točkama varira zbog različite visine slobodnog kraja žice te zbog savijanja podloge uslijed unosa topline prilikom izrade svakog pojedinog sloja. Krajevi podloge, iako učvršćeni, znatno su se savijali što je doprinijelo različitim visinama zida, a to se može vidjeti u i tablici 8. Ukupna duljina zida iznosila je 28 cm, a konačna visina 85 mm.

Tablica 8. Prikaz nastale visine zida uzorka 1

Plin: M12 (Ar 97,5/N ₂ 2.5)				Postupak zavarivanja: MIG/MAG coldArc				
Protok plina: 18 l/min				Prosječna visina zida, mm	Prirast zida po sloju, mm			Prosječni prirast zida po sloju, mm
Slobodni kraj žice: 10-12 mm								
Brzina zavarivanja: 25 cm/min								
Broj prolaz	Visina zida, mm							
1	3.5	3.7	3.7	3.63	3.5	3.7	3.7	3.6
2	5.9	6.1	5.5	5.83	2.4	2.4	1.8	2.2
3	9.9	8.9	8.7	9.17	4.0	2.8	3.2	3.3
4	11.7	12.2	11.1	11.67	1.8	3.3	2.4	2.5
5	14.6	14.5	14.2	14.43	2.9	2.3	3.1	2.8
6	16.9	16.8	16.8	16.83	2.3	2.3	2.6	2.4
7	21.0	21.4	21.1	21.17	4.1	4.6	4.3	4.3
8	22.3	22.5	22.6	22.47	1.3	1.1	1.5	1.3
9	25.8	25.4	25.4	25.53	3.5	2.9	2.8	3.1
10	27.6	28.0	28.1	27.90	1.8	2.6	2.7	2.4
11	31.1	31.0	31.0	31.03	3.5	3.0	2.9	3.1
12	33.4	33.5	33.6	33.50	2.3	2.5	2.6	2.5
13	36.1	36.4	36.3	36.27	2.7	2.9	2.7	2.8
14	38.8	38.9	39.4	39.03	2.7	2.5	3.1	2.8
15	41.8	41.8	41.9	41.83	3.0	2.9	2.5	2.8
16	44.6	44.8	44.9	44.77	2.8	3.0	3.0	2.9
17	47.2	47.7	47.6	47.50	2.6	2.9	2.7	2.7
18	50.0	50.3	50.5	50.27	2.8	2.6	2.9	2.8
19	52.8	53.1	53.2	53.03	2.8	2.8	2.7	2.8
20	55.9	55.8	56.1	55.93	3.1	2.7	2.9	2.9
21	58.6	59.0	59.0	58.87	2.7	3.2	2.9	2.9
22	61.2	61.9	61.7	61.60	2.6	2.9	2.7	2.7
23	63.6	64.5	64.6	64.23	2.4	2.6	2.9	2.6
24	67.0	67.5	67.5	67.33	3.4	3.0	2.9	3.1
25	69.6	70.5	70.2	70.10	2.6	3.0	2.7	2.8
26	72.5	73.0	73.0	72.83	2.9	2.5	2.8	2.7
27	75.4	76.1	75.8	75.77	2.9	3.1	2.8	2.9
28	77.5	78.8	78.5	78.27	2.1	2.7	2.7	2.5
29	81.2	81.6	80.9	81.23	3.7	2.8	2.4	3.0
30	83.7	84.7	84.5	84.30	2.5	3.1	3.6	3.1
31	85.6	86.9	86.5	86.33	1.9	2.2	2.0	2.0
					Prosječni prirast zida, mm			
					2.78			

Tijekom izrade jednog sloja zida, pomoću osciloskopa mjerenja praćena je dinamička karakteristika *coldArc* postupka zavarivanja. Kao što je već prethodno opisano i objašnjeno, vrijednosti koje osciloskop prati su promjene napona, odnosno, ulaznog signala, dakle promjena struje i napona ne mjeri se direktno. Zbog tog razloga se koristio softver MS Excel kako bi se dobivene vrijednosti osciloskopa preračunale u stvarne vrijednosti struje i napona i bile adekvatne za daljnju obradu. Primjer obrade podataka, tj. preračun dobivenih signala na osciloskopu u stvarne vrijednosti napona i struje, prethodno je prikazan na slikama 47 i 48. Nakon tako preračunatih podataka, izračunale su se i druge vrijednosti koje se tiču procesa zavarivanja. Od najvećeg interesa je bio unos topline i grafički prikaz promjene struje i napona tijekom procesa izrade zida. Unos topline govori o količini unesene topline u određenom prolazu, a grafičkim prikazom prate se promjene struje i napona u svrhu proučavanja ponašanja procesa u procesu zavarivanja. U sljedećoj tablici (tablica 9) prikazani su prosječni unosi topline za svaki sloj te prosječni unos topline za ukupno izrađeni zid.

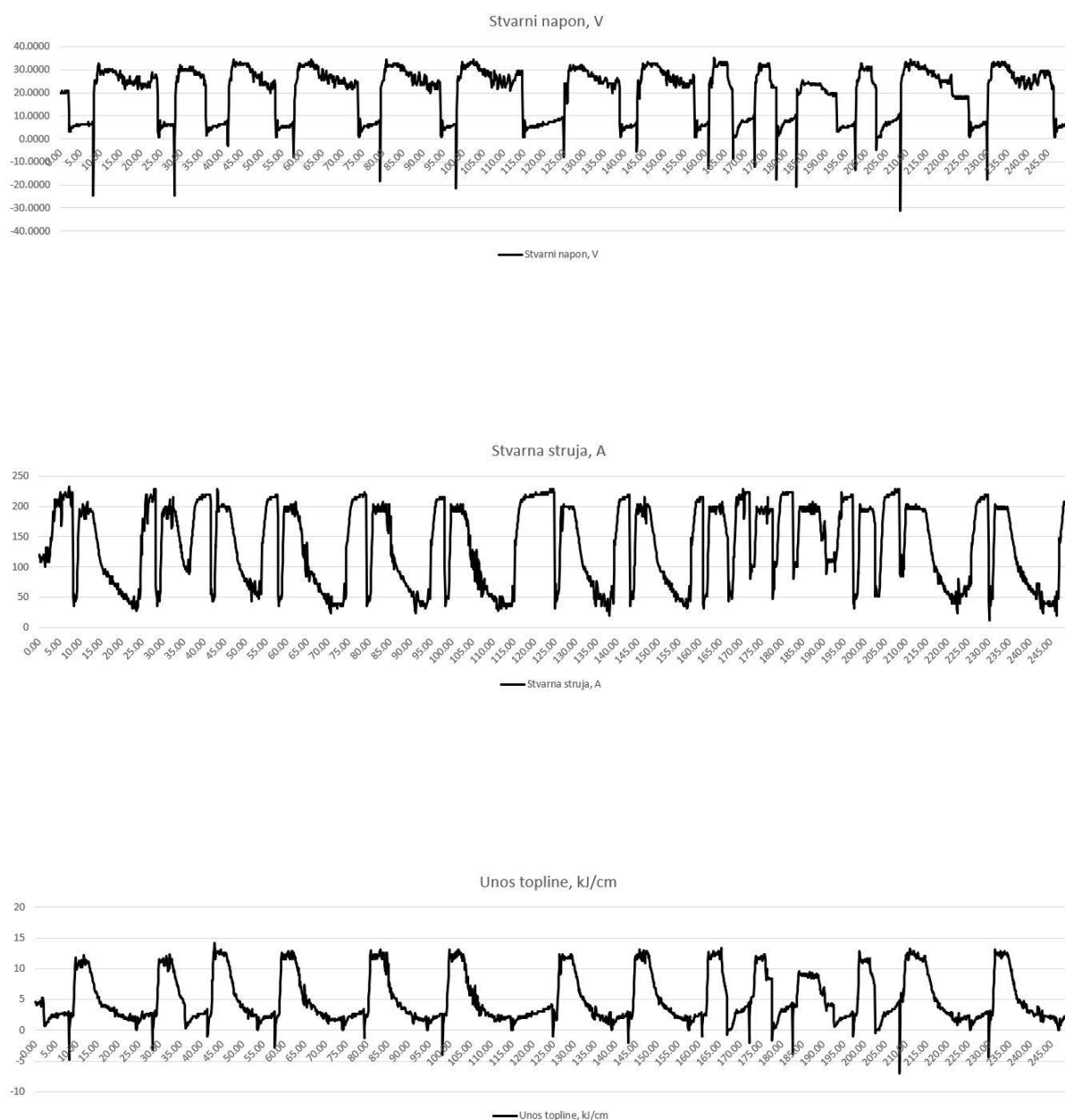
Tablica 9. Prosječne unesene topline slojeva i ukupna prosječna unesena toplina zida – uzorak 1

Sloj	Unesena toplina, kJ/cm	Sloj	Unesena toplina, kJ/cm	Prosječna unesena toplina zida, kJ/cm
1	5.19	16	5.41	5.18
2	4.62	17	4.89	
3	4.97	18	5.15	
4	5.49	19	5.03	
5	4.95	20	5.16	
6	4.68	21	5.29	
7	5.05	22	5.01	
8	5.48	23	5.5	
9	4.88	24	5.07	
10	5.18	25	5.57	
11	5.51	26	5.28	
12	5.42	27	5.32	
13	5.12	28	5.25	
14	5.56	29	4.9	
15	5.02	30	5.25	
		31	5.51	

Za praćenje ponašanja procesa tijekom zavarivanja generirani su grafički prikazi procesa koji prikazuju promjene struje, napona i unosa topline tijekom izrade sloja, odnosno određenog vremenskog intervala. S obzirom da je zid sa svojom ukupnom visinom od 85 mm napravljen od 31 sloja, dan je grafički prikaz prvog sloja, 15. sloja i 30 sloja. Na sljedećim slikama dani su grafički prikazi promjene struje, napon i unosa topline u vremenu (slika 54, 55 i 56).



Slika 54. Promjena napona, struje u unosa topline tijekom vremenskog intervala – prolaz 1



Slika 55. Promjena napona, struje u unosa topline tijekom vremenskog intervala – prolaz 15



Slika 56. Promjena napona, struje u unosa topline tijekom vremenskog intervala – prolaz 30

Unos topline izračunat je prema sljedećoj formuli:

$$Q = \frac{60}{1000} \cdot \frac{I \cdot U}{v} \cdot \eta, \quad kJ/cm \quad (1)$$

pri čemu je:

Q – unesena toplina, kJ/cm

I – jakost struje, A

U – napon, V

v – brzina zavarivanja, cm/min

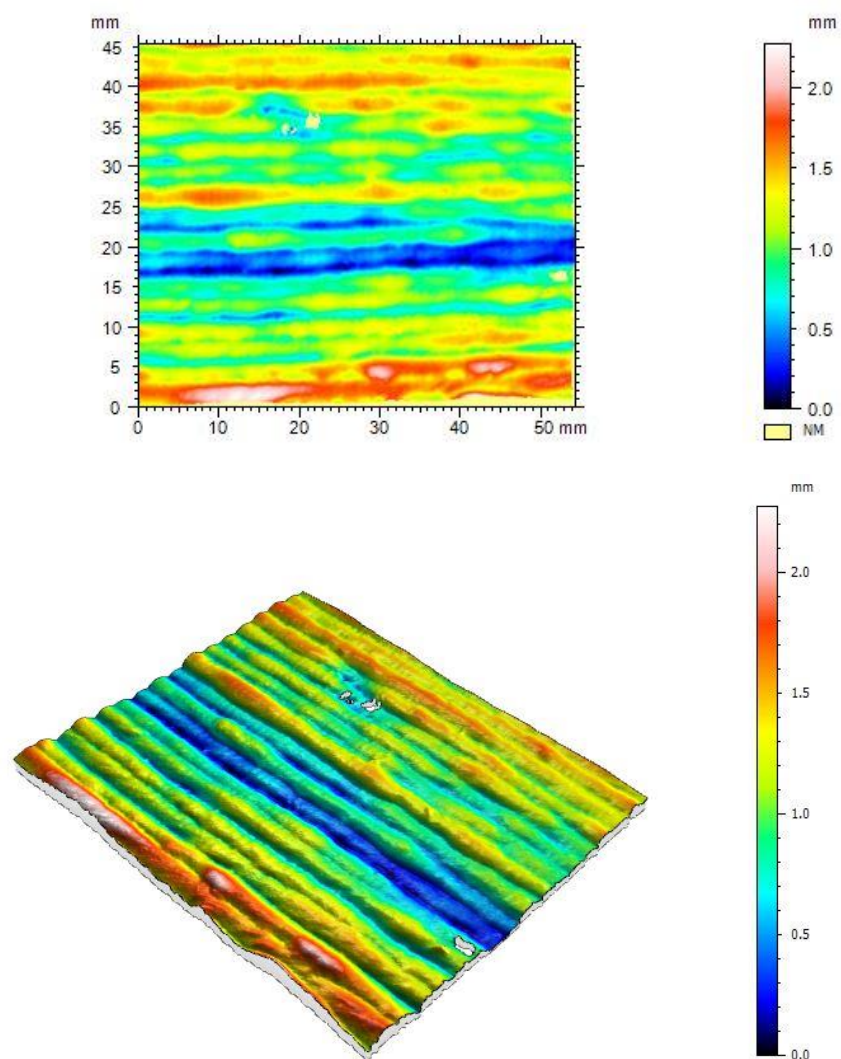
η – koeficijent korisnog djelovanja električnog luka, $\eta = 0,8$ (za MIG/MAG)

Žica koja se koristila za izradu zida izrađena je od dupleks čelika. Oznaka žice je 1.4462. U eksperimentu je također i praćena duljina utrošene žice u svrhu procjenjivanja iskoristivosti materijala tijekom *coldArc* procesa zavarivanja. Konačni rezultat utrošene duljine žice uspoređen sa drugim uzorkom, odnosno, zidom koji je izrađen konvencionalnim načinom prijenosa metala kratkim spojem. Iz prikupljenih podataka tijekom eksperimenta, ustanovljeno je da je za izradu zida *coldArc* postupkom zavarivanja utrošeno 154,26 metara žice, što daje masu zida od 1.35 kg. Prosječna duljina žice za izradu jednog sloja iznosila je 4,97 m na duljinu zida od 28 cm i vrijeme zavarivanja od 67 s. Dobivena masa određena je na temelju utrošene žice, dakle računski. Dodatno se odredila masa zida vaganjem na način da je prvo izmjerena masa podloge na kojoj se izrađivao zid, a zatim je izmjerena ukupna masa izratka. Jednostavnim matematičkim oduzimanjem došlo se do mase zida. Od ukupne izmjerene mase zida oduzeta je masa podloge zida te je dobivena konačna vrijednost mase zida. Masa podloge zida iznosila je 0,9273 kg, a ukupna masa izratka iznosila je 2,247 kg, što daje masu zida od 1,3197 kg.

Nadalje, dobiveni uzorci skenirani su već spomenutim DAVID SLS 2 3D skenerom, kako bi se odredili dobiveni parametri neravnina površine. Iz ukupne površine zida, pomoću softvera izrezana su po tri uzorka iz svake strane zida. Dobivene vrijednosti parametara prikazane su na slikama 57, 58, 59, 60, 61, 62 i tablicama 10, 11, 12, 13, 14, 15. Za svaki uzorak dani su izračunati parametri neravnina površine (prema normi ISO 25178-2), ravni pogled s grafičkim prikazom neravnina površina s mjernom skalom te pogled u izometriji sa mjernom skalom.

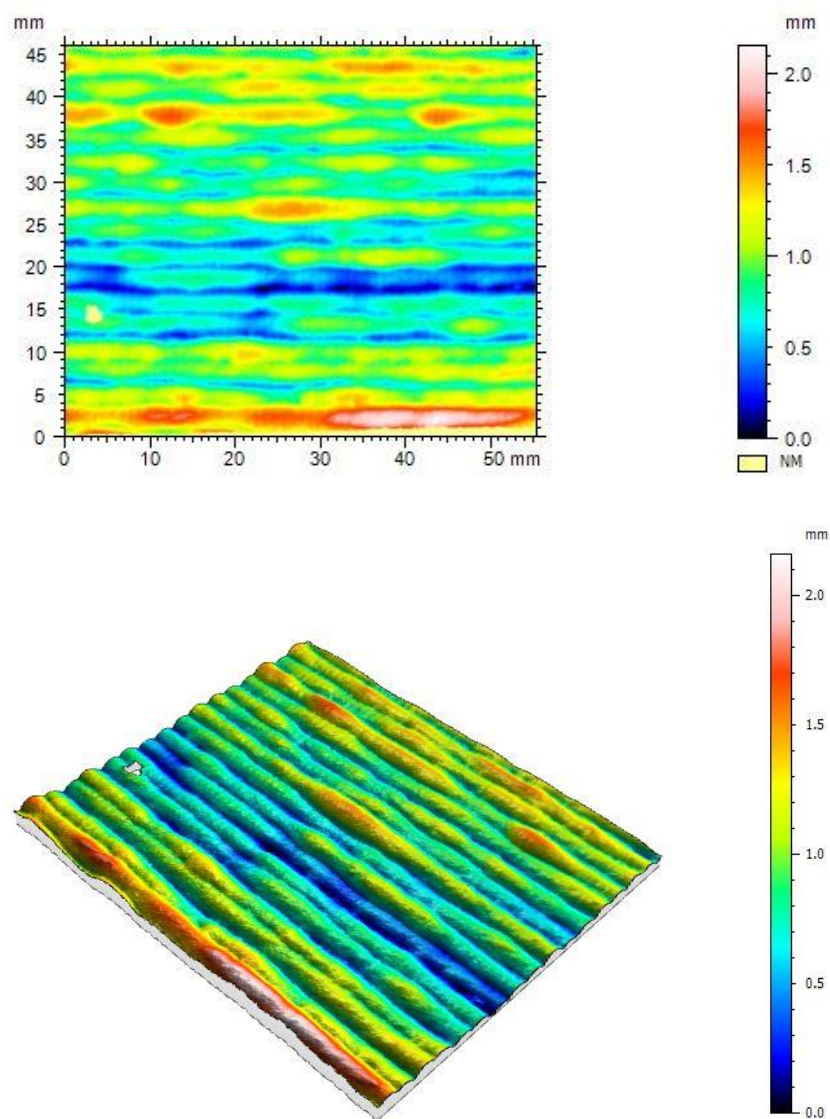
Tablica 10. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 1

Parametri teksture površine, mm	
Sq	0.367
Ssk	-0.045
Sku	2.950
Sp	1.210
Sv	1.060
Sz	2.270
Sa	0.293

**Slika 57. Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 1**

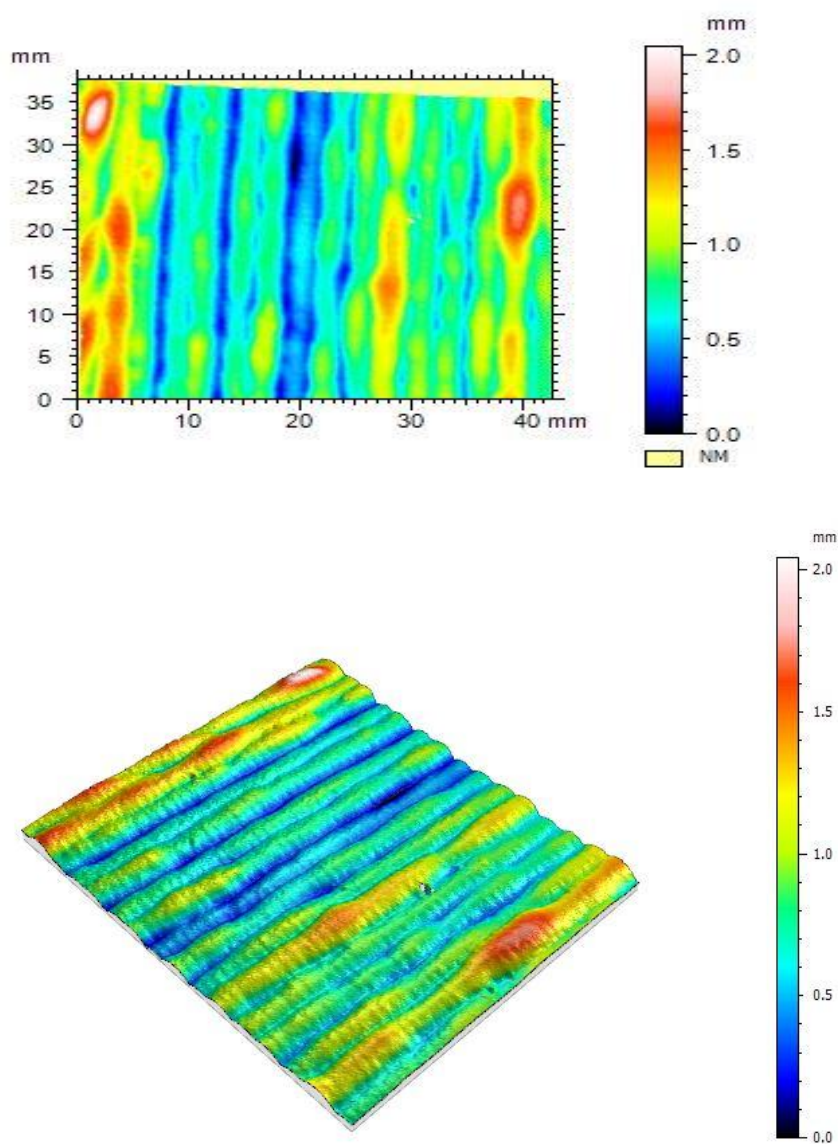
Tablica 11. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 2

Parametri teksture površine, mm	
Sq	0.330
Ssk	0.195
Sku	2.840
Sp	1.120
Sv	0.964
Sz	2.090
Sa	0.265

**Slika 58. Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 2**

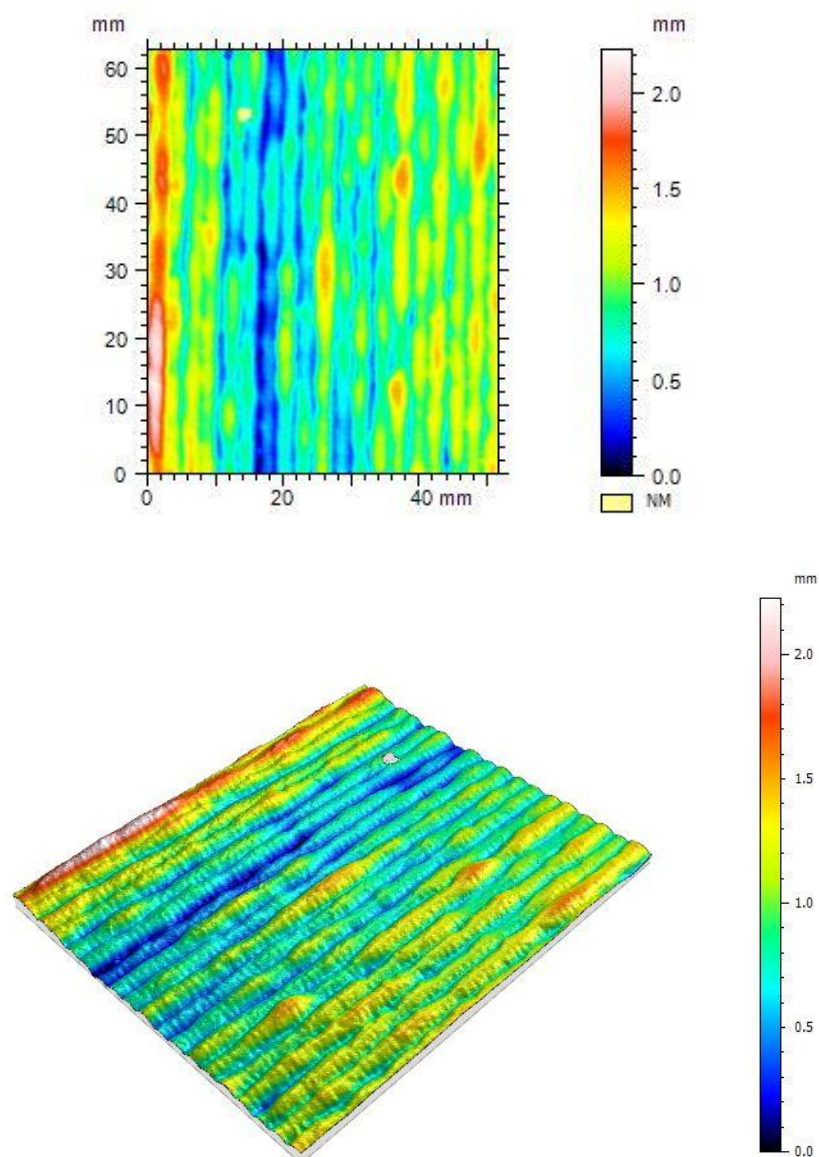
Tablica 12. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 3

Parametri teksture površine, mm	
Sq	0.346
Ssk	0.182
Sku	2.740
Sp	1.060
Sv	0.945
Sz	2.010
Sa	0.279

**Slika 59. Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 3**

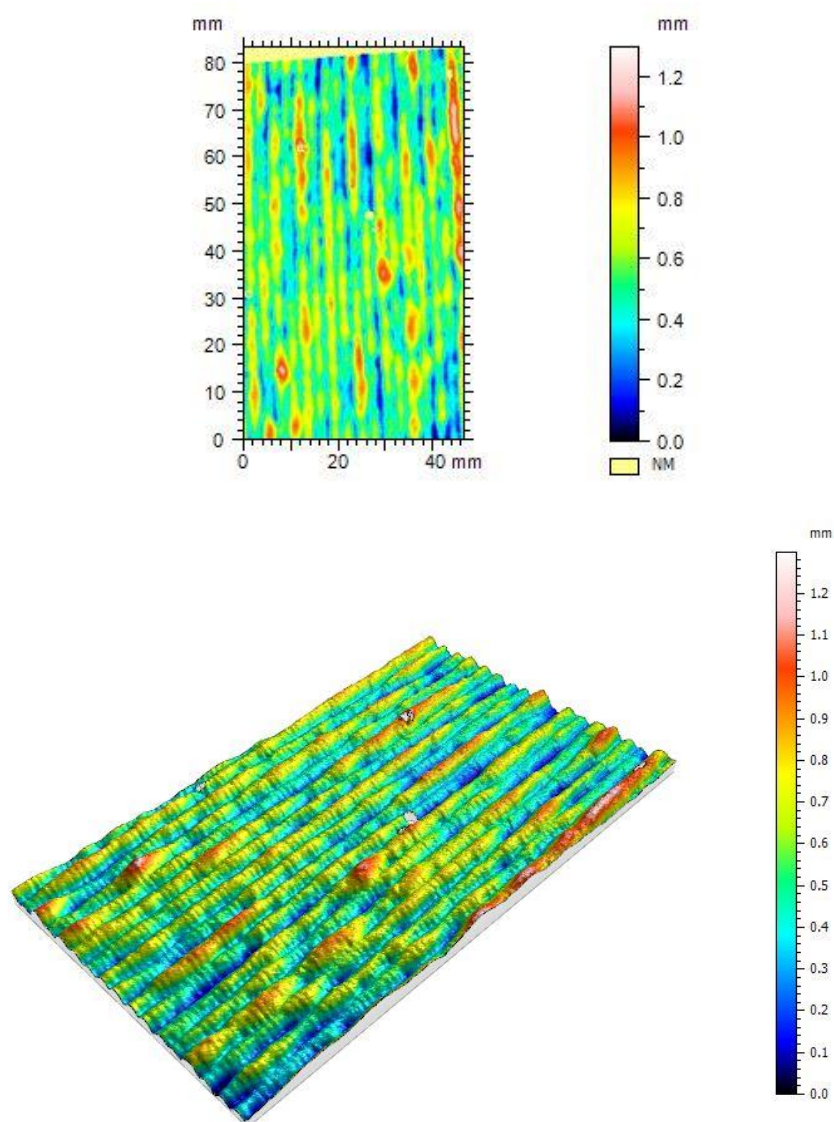
Tablica 13. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 4

Parametri teksture površine, mm	
Sq	0.401
Ssk	0.085
Sku	2.630
Sp	1.250
Sv	1.200
Sz	2.450
Sa	0.327

**Slika 60. Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 4**

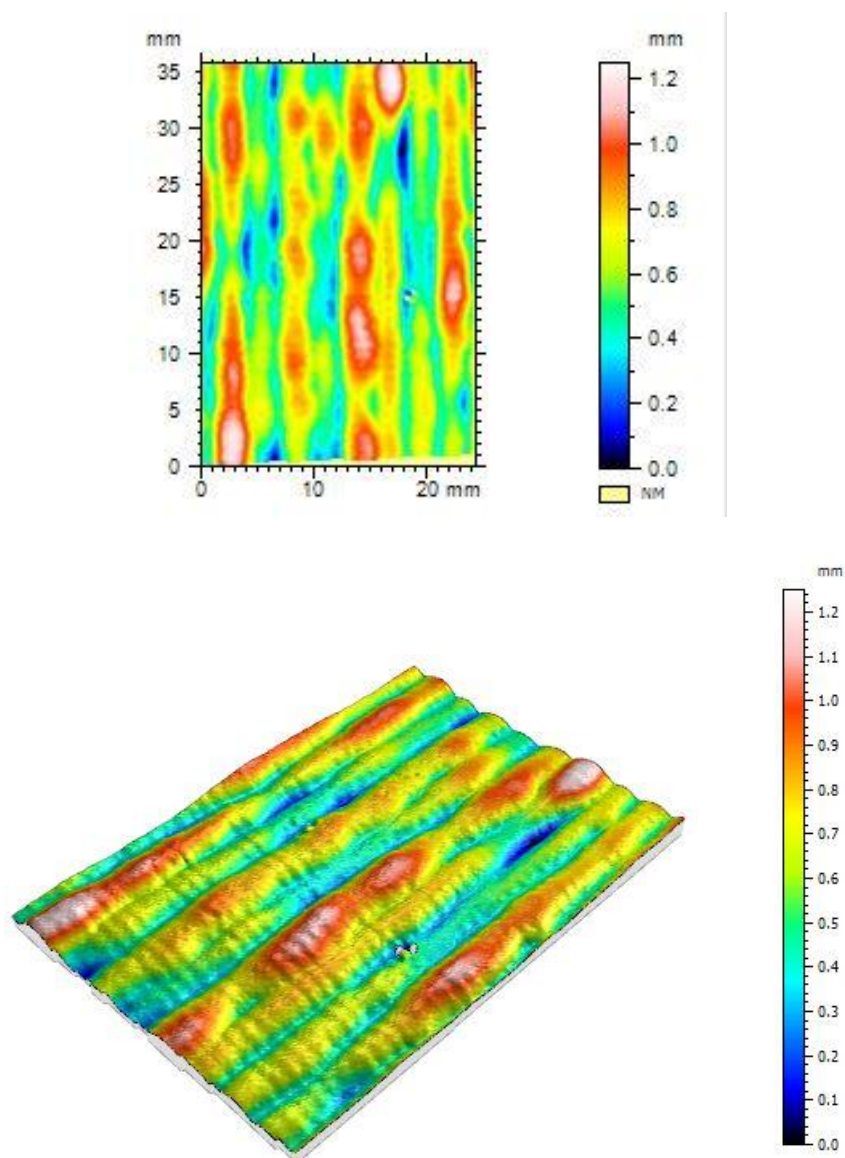
Tablica 14. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 5

Parametri teksture površine, mm	
Sq	0.198
Ssk	0.035
Sku	2.740
Sp	0.785
Sv	0.642
Sz	1.430
Sa	0.160

**Slika 61. Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 5**

Tablica 15. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 6

Parametri teksture površine, mm	
Sq	0.211
Ssk	0.167
Sku	2.600
Sp	0.652
Sv	0.637
Sz	1.290
Sa	0.172

**Slika 62. Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 6**

6.3 Rezultati dobiveni konvencionalnim prijenosom metala kratkim spojem

S obzirom da su oba uzorka, odnosno zida izrađena s identičnim parametrima (brzina dodavanja žice 4,5 m/min i brzina zavarivanja $v = 25$ cm/min), rezultati dobiveni izradom drugog uzorka biti će prikazani ukratko.

Na slici 63 prikazan je zid izrađen konvencionalnim postupkom prijenosa metala kratkim spojem.



Slika 63. Zid dobiven konvencionalnim prijenosom metala kratkim spojem

Podloga zida također je izrezana na CNC plazma stroju za rezanje. Za izradu zida korišteni su isti programi robota (2043 za sloj s desne strane prema lijevoj i 2044 za sloj s lijeve strane prema desnoj), a mjerenje visine zida provedeno je na istim mjestima kao i kod prethodnog uzorka (prikazano na slici 53). U tablici 16 prikazani su obrađeni rezultati izmjerene visine zida. S obzirom da je visina zida mjerena u tri točke, izračunao se prosječni prirast visine zida po sloju. Prema dobivenom rezultatu, prosječni rast visine zida po sloju iznosi 2,78 mm. Rast visine zida u pojedinim točkama, varira zbog različite visine slobodnog kraja žice te zbog savijanja podloge uslijed unosa topline prilikom izrade svakog pojedinog sloja. Krajevi podloge, iako učvršćeni, znatno su se savijali što je doprinijelo različitim visinama zida, a to se može vidjeti u tablici 16. Ukupna duljina zida iznosila je 28 cm s konačnom visinom od 85 mm.

Tablica 16. Prikaz nastale visine zida uzorka 2

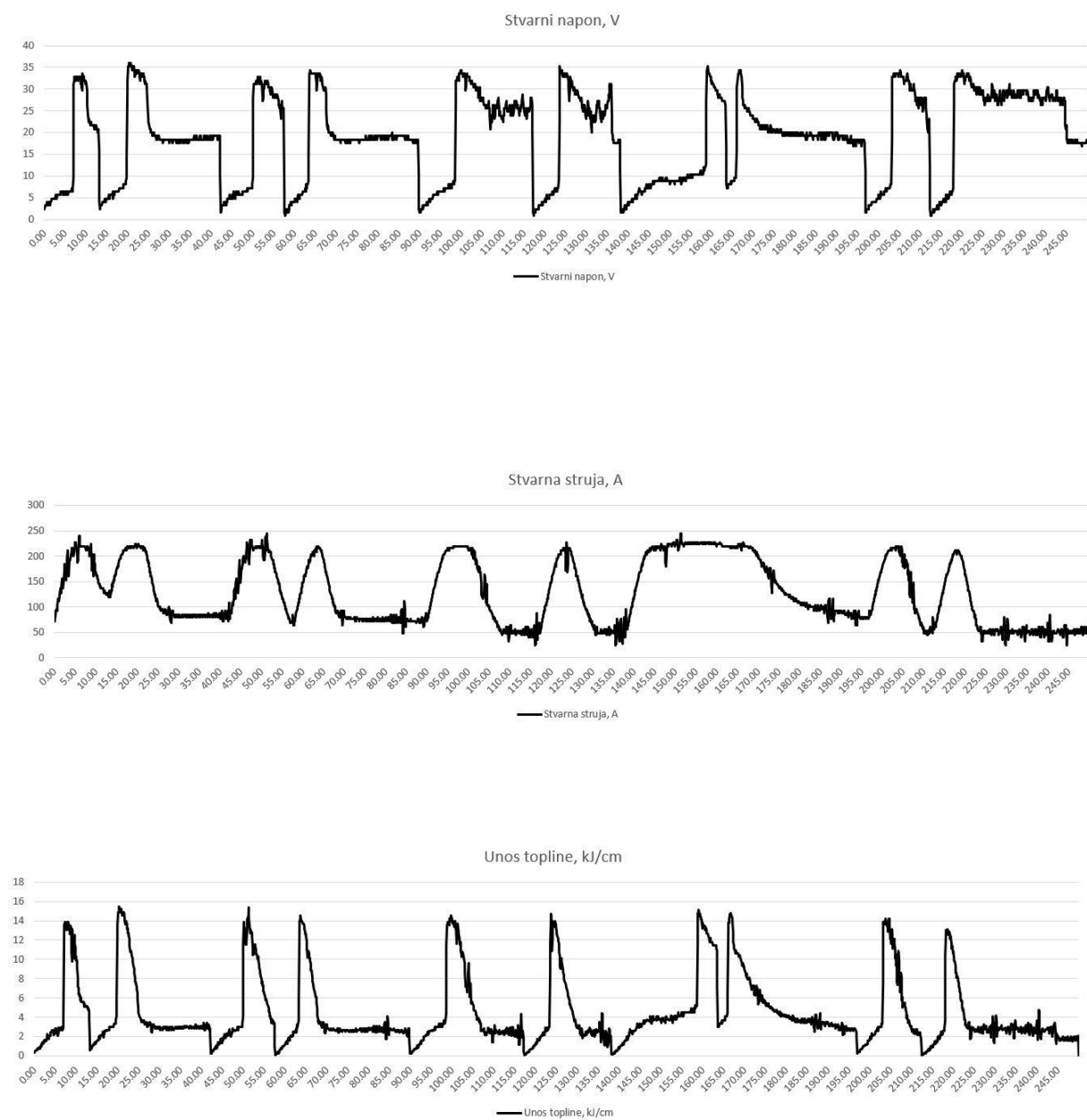
Plin: M12 (Ar 97,5/N ₂ 2.5)				Postupak zavarivanja: MIG/MAG kratki spoj				
Protok plina: 18 l/min				Prosječna visina zida, mm	Prirast zida po sloju, mm			Prosječni prirast zida po sloju, mm
Slobodni kraj žice: 10-12 mm								
Brzina zavarivanja: 25 cm/min								
Broj prolaz	Visina zida, mm							
1	4.1	4.1	4.1	4.10	4.1	4.1	4.1	4.1
2	5.6	5.3	5.3	5.40	1.5	1.2	1.2	1.3
3	8.4	9.5	8.5	8.80	2.8	4.2	3.2	3.4
4	11.0	11.0	11.1	11.03	2.6	1.5	2.6	2.2
5	13.9	13.7	13.7	13.77	2.9	2.7	2.6	2.7
6	16.8	16.1	16.6	16.50	2.9	2.4	2.9	2.7
7	21.0	21.5	21.0	21.17	4.2	5.4	4.4	4.7
8	23.9	23.9	23.6	23.80	2.9	2.4	2.6	2.6
9	25.0	25.0	25.1	25.03	1.1	1.1	1.5	1.2
10	27.8	28.1	27.7	27.87	2.8	3.1	2.6	2.8
11	30.5	30.7	30.5	30.57	2.7	2.6	2.8	2.7
12	34.0	34.1	34.7	34.27	3.5	3.4	4.2	3.7
13	36.0	36.9	36.4	36.43	2.0	2.8	1.7	2.2
14	39.0	39.6	39.0	39.20	3.0	2.7	2.6	2.8
15	41.6	42.2	41.6	41.80	2.6	2.6	2.6	2.6
16	42.4	44.9	44.9	44.07	0.8	2.7	3.3	2.3
17	46.2	47.6	46.7	46.83	3.8	2.7	1.8	2.8
18	49.4	50.0	50.0	49.80	3.2	2.4	3.3	3.0
19	51.7	52.2	52.4	52.10	2.3	2.2	2.4	2.3
20	54.5	55.8	55.0	55.10	2.8	3.6	2.6	3.0
21	57.4	58.4	57.6	57.80	2.9	2.6	2.6	2.7
22	59.4	61.6	60.5	60.50	2.0	3.2	2.9	2.7
23	61.0	64.0	63.5	62.83	1.6	2.4	3.0	2.3
24	64.6	67.0	66.0	65.87	3.6	3.0	2.5	3.0
25	68.7	70.0	68.2	68.97	4.1	3.0	2.2	3.1
26	70.7	72.4	71.2	71.43	2.0	2.4	3.0	2.5
27	72.7	75.2	73.7	73.87	2.0	2.8	2.5	2.4
28	75.4	77.9	76.5	76.60	2.7	2.7	2.8	2.7
29	78.0	80.6	79.1	79.23	2.6	2.7	2.6	2.6
30	80.0	82.7	80.8	81.17	2.0	2.1	1.7	1.9
31	82.5	85.5	83.8	83.93	2.5	2.8	3.0	2.8
					Prosječni prirast zida, mm			
					2.71			

Dinamička karakteristika prijenosa metala kratkim spojem tijekom izrade zida, također je praćena osciloskopom, a dobiveni podaci obrađeni su u MS Excel – u. Najzanimljiviji podaci također su i kod ovog uzorka bili unesena toplota te promjena struje i napona tijekom zavarivanja. U sljedećoj tablici (tablica 17) prikazani su prosječni unosi topline za svaki sloj te prosječni unos topline za ukupno izrađeni zid.

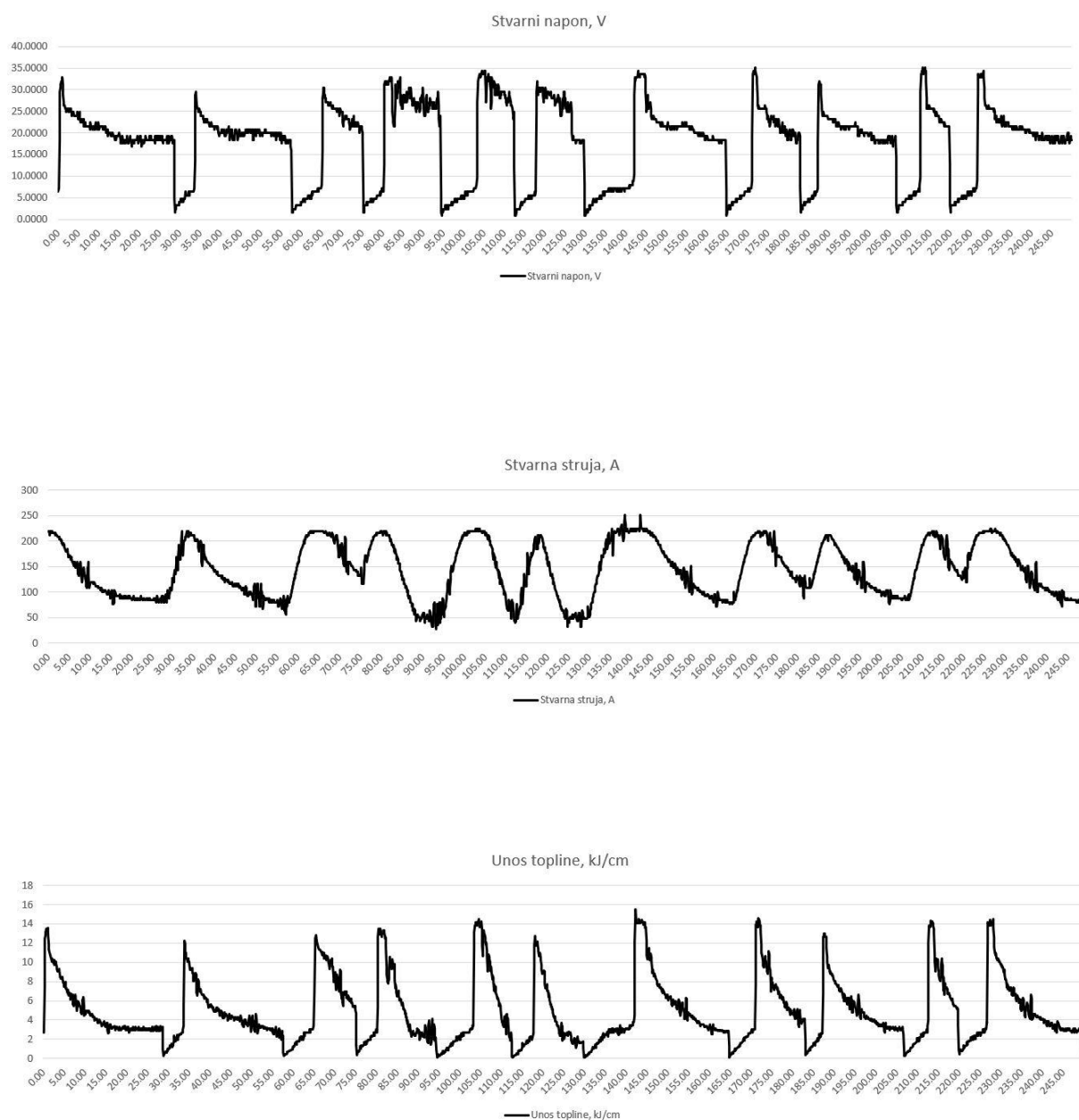
Tablica 17. Prosječne unesene topline slojeva i ukupna prosječna unesena toplota zida – uzorak 2

Sloj	Unesena toplota, kJ/cm	Sloj	Unesena toplota, kJ/cm	Prosječna unesena toplota zida, kJ/cm
1	4.39	16	4.95	4.75
2	4.99	17	5.11	
3	4.75	18	4.55	
4	4.62	19	4.66	
5	4.36	20	4.82	
6	4.68	21	4.72	
7	4.94	22	4.68	
8	4.71	23	4.65	
9	4.74	24	4.7	
10	4.62	25	4.77	
11	5.13	26	4.68	
12	4.34	27	5.04	
13	4.95	28	4.81	
14	4.81	29	4.7	
15	4.86	30	4.7	
		31	4.78	

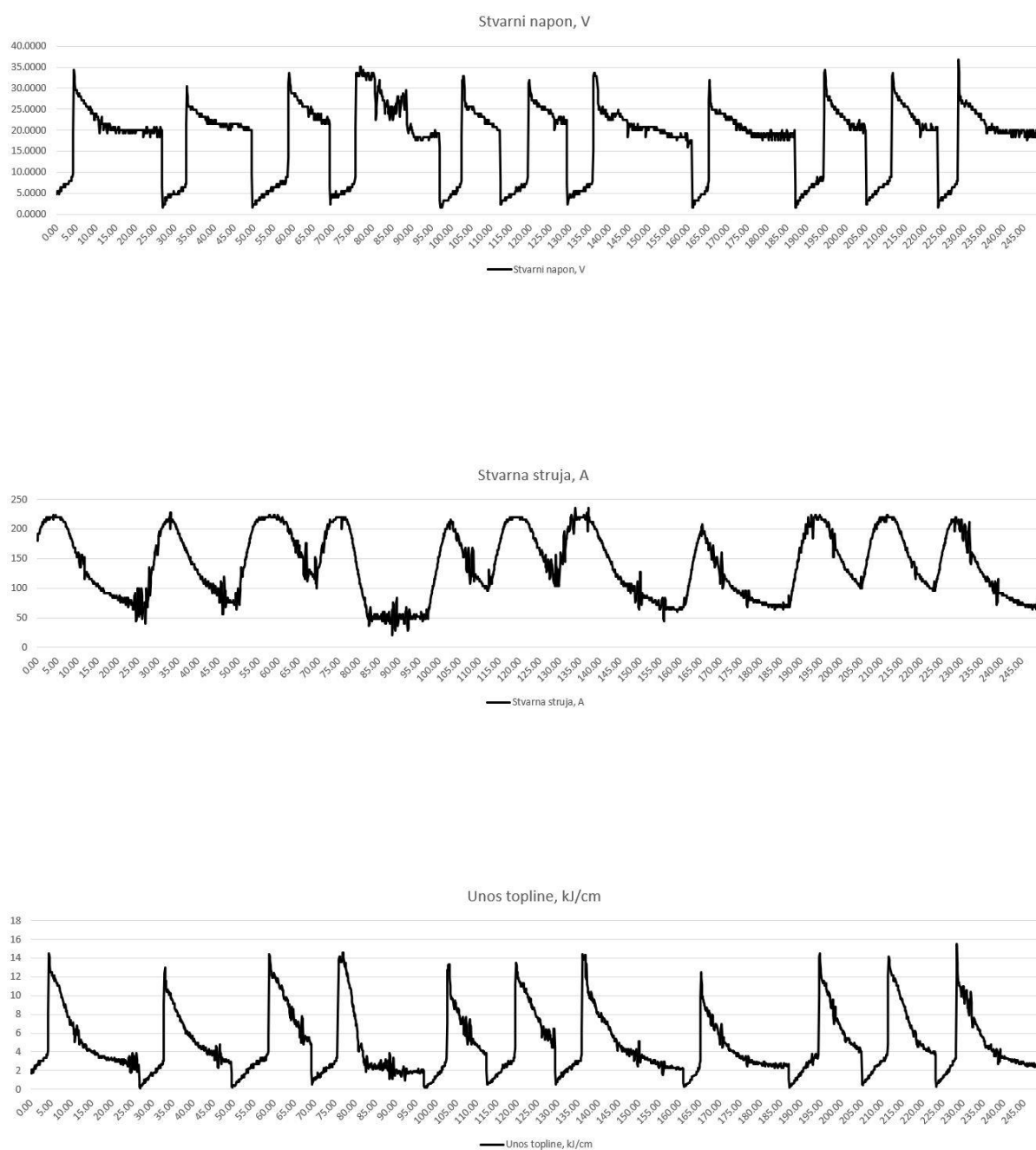
Za praćenje ponašanja procesa tijekom zavarivanja generirani su grafički prikazi procesa koji prikazuju promjene struje, napona i unosa topline tijekom izrade sloja, odnosno određenog vremenskog intervala. S obzirom da je zid, kao i kod prvog uzorka, sa svojom ukupnom visinom od 85 mm napravljen od 31 sloja, dan je grafički prikaz prvog sloja, 15. sloja i 30. sloja. Na sljedećim slikama (slika 64, 65 i 66) dani su grafički prikazi promjene struje, napon i unosa topline u vremenu.



Slika 64. Promjena napona, struje u unosa topline tijekom vremenskog intervala – prolaz 1



Slika 65. Promjena napona, struje u unosa topline tijekom vremenskog intervala – prolaz 15



Slika 66. Promjena napona, struje u unosa topline tijekom vremenskog intervala – prolaz 30

Unos topline izračunat je prema sljedećoj formuli:

$$Q = \frac{60}{1000} \cdot \frac{I \cdot U}{v} \cdot \eta, \quad kJ/cm \quad (1)$$

pri čemu je:

Q – unesena toplina, kJ/cm

I – jakost struje, A

U – napon, V

v – brzina zavarivanja, cm/min

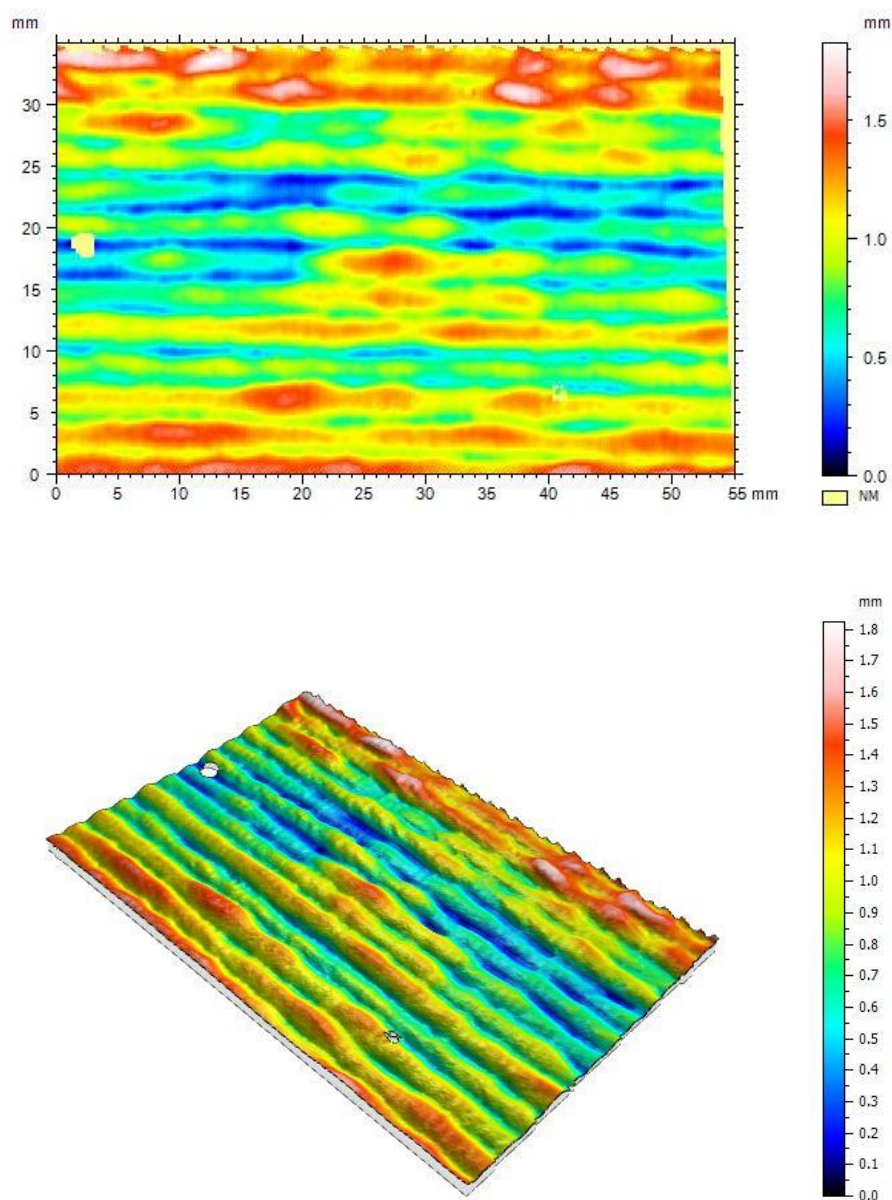
η – koeficijent korisnog djelovanja električnog luka, $\eta = 0,8$ (za MIG/MAG)

Žica koja se koristila za izradu zida izrađena je od dupleks čelika. Oznaka žice je 1.4462. U eksperimentu je također i praćena duljina utrošene žice, u svrhu procjenjivanja iskoristivosti materijala tijekom izrade zida konvencionalnim prijenosom metala kratkim spojem. Konačni rezultat utrošene duljine žice uspoređen sa drugim uzorkom, odnosno, zidom koji je izrađen *coldArc* postupkom zavarivanja. Iz prikupljenih podataka tijekom eksperimenta, ustanovljeno je da je za izradu zida konvencionalnim načinom prijenosa metala kratkim spojem utrošeno 157.14 metara žice, što daje masu zida od 1.38 kg. Prosječna duljina žice za izradu jednog sloja iznosila je 5,07 m na duljinu zida od 28 cm i vrijeme zavarivanja od 67 s. Dobivena masa određena je na temelju utrošene žice, dakle računski. Dodatno se odredila masa zida vaganjem, na način da je prvo izmjerena masa podloge na kojoj se izrađivao zid, a zatim je izmjerena ukupna masa izratka. Jednostavnim matematičkim oduzimanjem došlo se do mase zida. Od ukupne izmjerene mase zida oduzeta je masa podloge zida te je dobivena konačna vrijednost mase zida. Masa podloge zida iznosila je 0,923 kg, a ukupna masa izratka iznosila je 2,247 kg što daje masu zida od 1,324 kg.

Nadalje, dobiveni uzorci skenirani su već spomenutim DAVID SLS 2 3D skenerom kako bi se odredili dobiveni parametri neravnina površine. Iz ukupne površine zida, pomoću softvera izrezana su po tri uzorka iz svake strane zida. Dobivene vrijednosti parametara prikazani su na slikama 67, 68, 69, 70, 71, 72 i tablicama 18, 19, 20, 21, 22, 23. Za svaki uzorak dani su izračunati parametri neravnina površine (prema normi ISO 25178-2), ravni pogled sa grafičkim prikazom neravnina površina s mjernom skalom te pogled u izometriji s mjernom skalom.

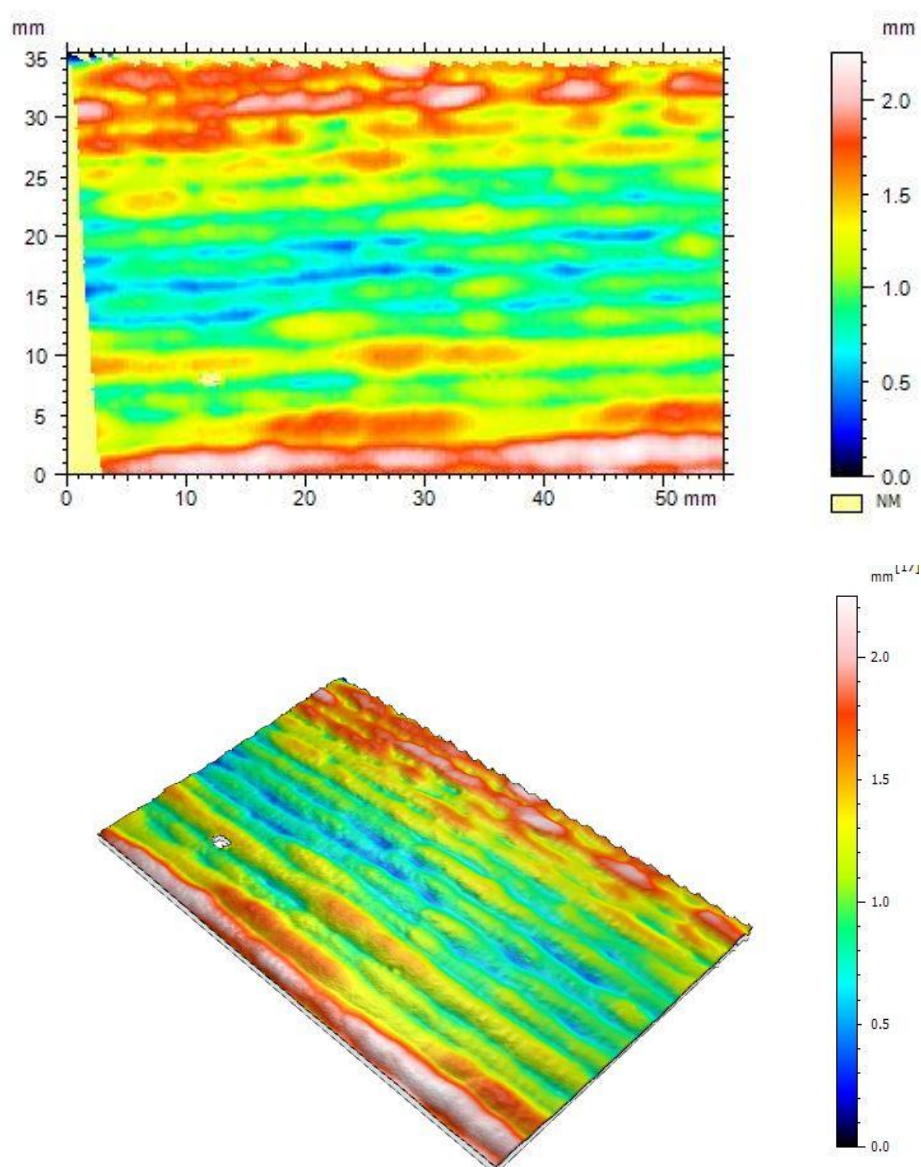
Tablica 18. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 1

Parametri teksture površine, mm	
Sq	0.338
Ssk	0.057
Sku	2.540
Sp	0.906
Sv	0.913
Sz	1.820
Sa	0.275

**Slika 67. Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 1**

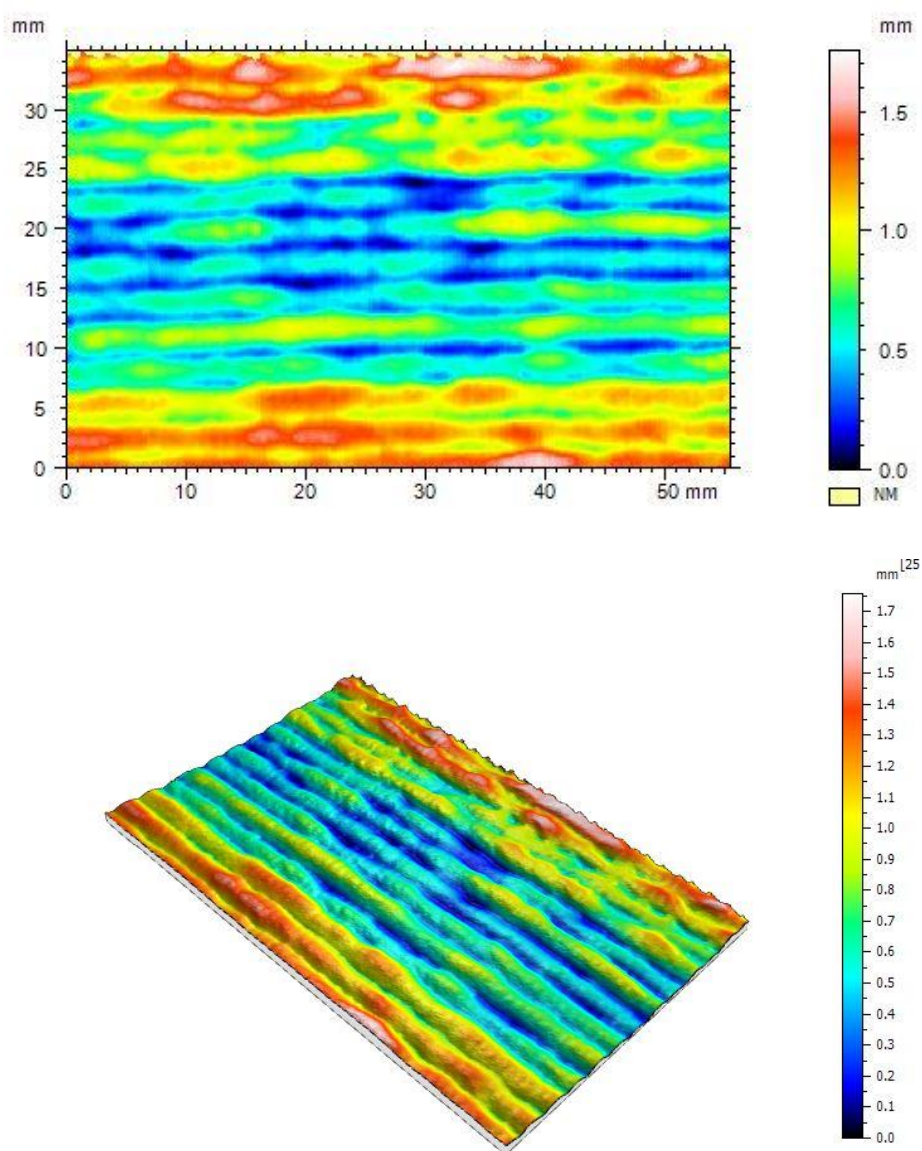
Tablica 19. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 2

Parametri teksture površine, mm	
Sq	0.391
Ssk	0.437
Sku	2.280
Sp	1.060
Sv	1.050
Sz	2.110
Sa	0.328

**Slika 68. Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 2**

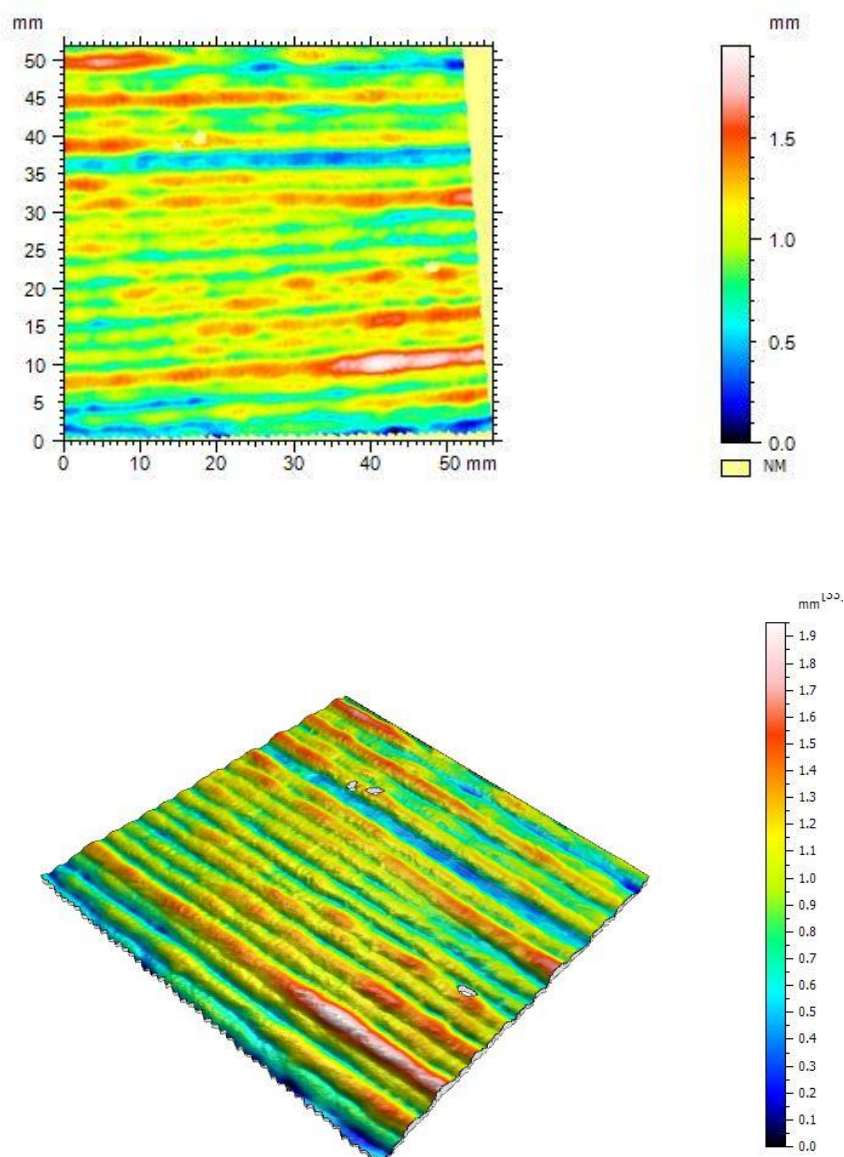
Tablica 20. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 3

Parametri teksture površine, mm	
Sq	0.340
Ssk	0.272
Sku	2.230
Sp	0.908
Sv	0.810
Sz	1.720
Sa	0.285

**Slika 69. Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 2**

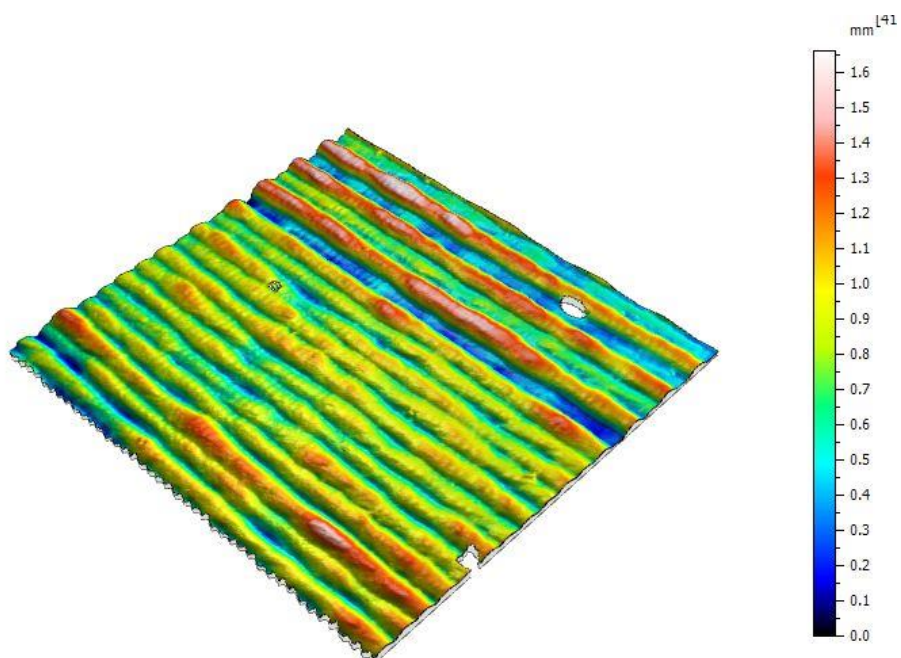
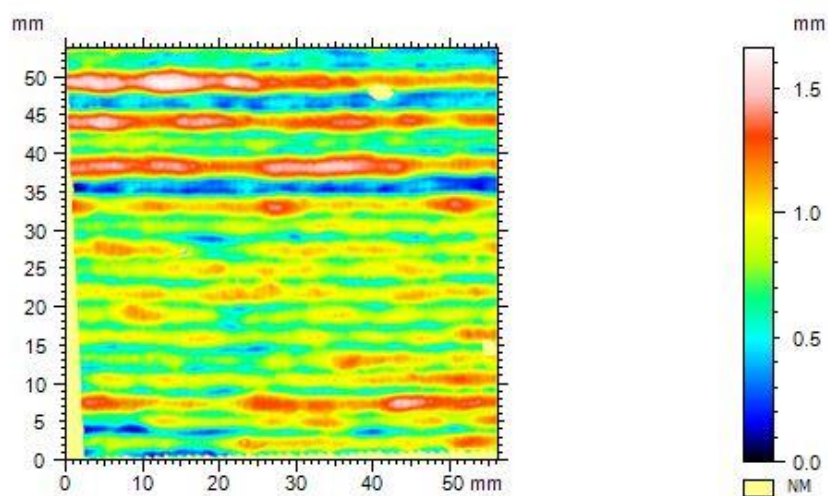
Tablica 21. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 4

Parametri teksture površine, mm	
Sq	0.303
Ssk	-0.203
Sku	3.370
Sp	1.020
Sv	1.270
Sz	2.280
Sa	0.236

**Slika 70. Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 4**

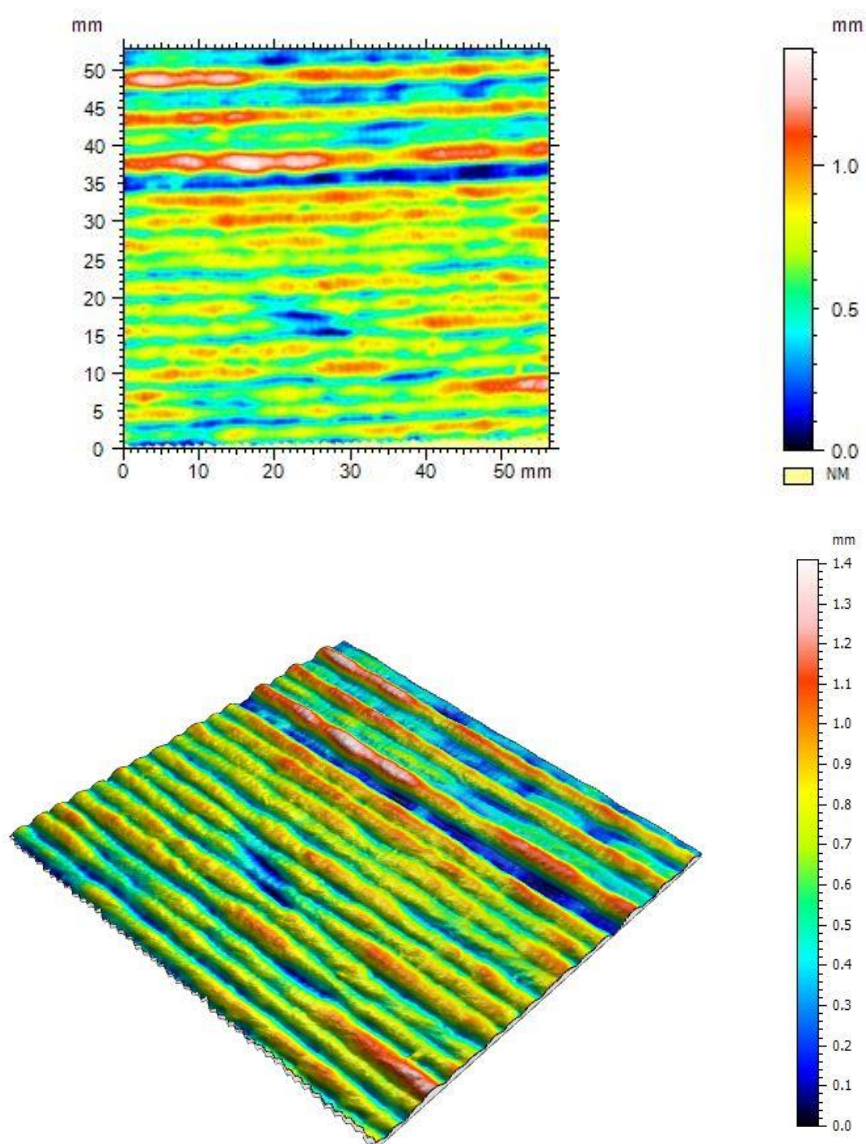
Tablica 22. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 5

Parametri teksture površine, mm	
Sq	0.494
Ssk	0.348
Sku	2.790
Sp	1.460
Sv	1.330
Sz	2.790
Sa	0.395

**Slika 71. Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 5**

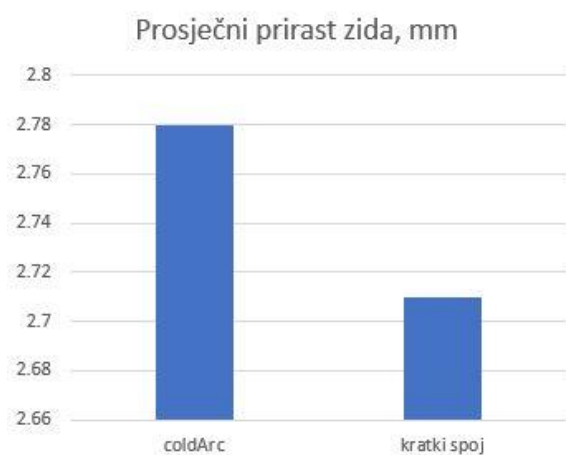
Tablica 23. Izračunati parametri teksture površine – uzorak 6

Parametri teksture površine, mm	
Sq	0.399
Ssk	0.118
Sku	2.630
Sp	1.140
Sv	1.170
Sz	2.310
Sa	0.323

**Slika 72. Grafički prikaz neravnina površine uzorka – uzorak 6**

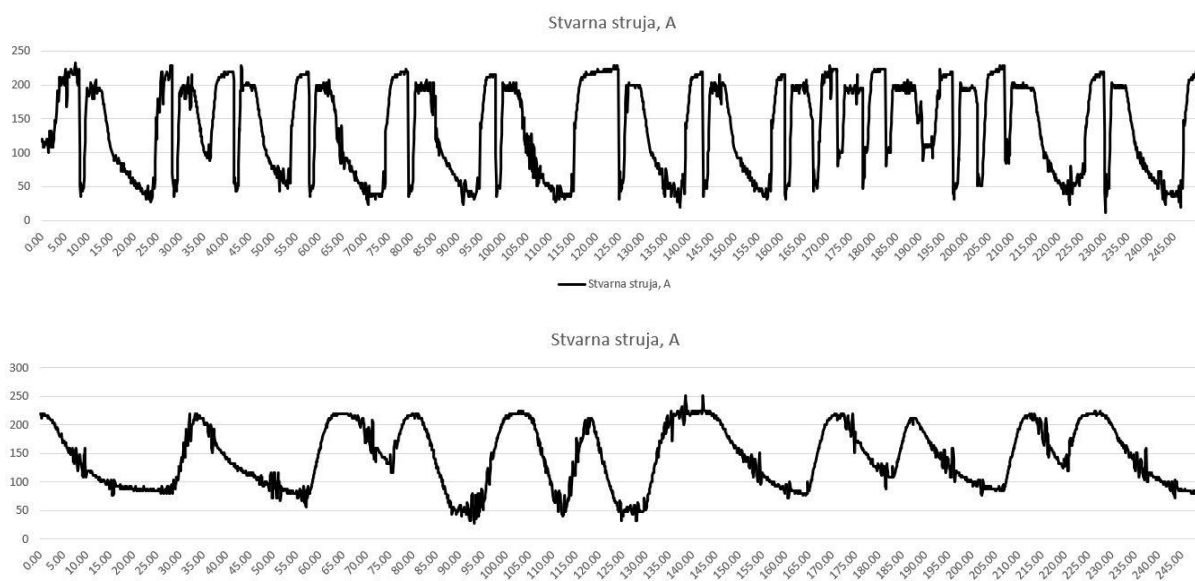
6.4 Analiza i usporedba rezultata

Mjerenjem visine zida tijekom izrade zida uočeno je da *coldArc* postupak zavarivanja ima nešto veću produktivnost, odnosno, prosječni prirast zida bio je veći u odnosu na konvencionalni prijenos metala kratkim spojem. Prosječni prirast zida po sloju *coldArc* postupkom zavarivanja iznosio je 2,78 mm (tablica 8), dok je kod konvencionalnog prijenosa metala kratkim spojem ta vrijednost iznosila 2,71 mm (tablica 16). Promatrajući ponašanje uređaja za zavarivanje tijekom postupka izrade sloja, uočeno je da za istu brzinu dodavanja žice od 4,5 m/min postoji razlika u podešenim strujama. Naime, fiksni faktor kod izrade zida, kao što je već prije spomenuto, bila je brzina dodavanja žice i brzina zavarivanja. U odnosu na brzinu dodavanja žice, uređaj prema svojem unutarnjem algoritmu podesi optimalne parametre. Za *coldArc* postupak zavarivanja, uređaj za zavarivanje podesio je vrijednost struje $I = 130 \text{ A}$ i vrijednost napon $U = 18,5 \text{ V}$ dok su iste vrijednosti kod konvencionalnog prijenosa metala kratkim spojem iznosile $I = 149 \text{ A}$ i $U = 17 \text{ V}$. Iako je brzina žice ostala konstantna, parametri zavarivanja bili su nešto veći kod konvencionalnog kratkog spoja. *coldArc* je modificirani prijenos metala kratkim spojem i zbog mogućnosti fine regulacije, uređaj tijekom postupka zavarivanja, sam održava niske struje što nije slučaj kod konvencionalnog kratkog spoja. Zbog mogućnosti fine regulacije struje, *coldArc* postupak zavarivanja gotovo eliminira rasprskavanje tijekom procesa zavarivanja što pozitivno utječe na količinu utrošenog dodatnog materijala. U ovom slučaju, to se manifestira većim prosječnim prirastom zida po sloju. Konvencionalni način prijenosa metala kratkim spojem nema regulaciju struje tijekom zavarivanja pa zbog svojeg prirodnog ponašanja tijekom zavarivanja dolazi do snažnog rasprskavanja. Rasprskavanje nije ništa drugo nego gubitak dodatnog materijala prilikom odvajanja kapljice, pa se zbog toga dio materijala gubi tijekom odvajanja kapljice. Navedeno se kod ovog eksperimenta manifestiralo u obliku manjeg prosječnog prirasta zida po sloju u odnosu na *coldArc* postupak zavarivanja. Prosječni prirasti zida po sloju oba postupka prikazani su na slici 73. Iz navedenih grafičkih prikaza jasno se vidi prednost *coldArc* postupka zavarivanja u odnosu na konvencionalni prijenos metala kratkim spojem (odnosi se na prirast zida, odnosno, iskorištenje dodatnog materijala kod WAAM postupka zavarivanja).



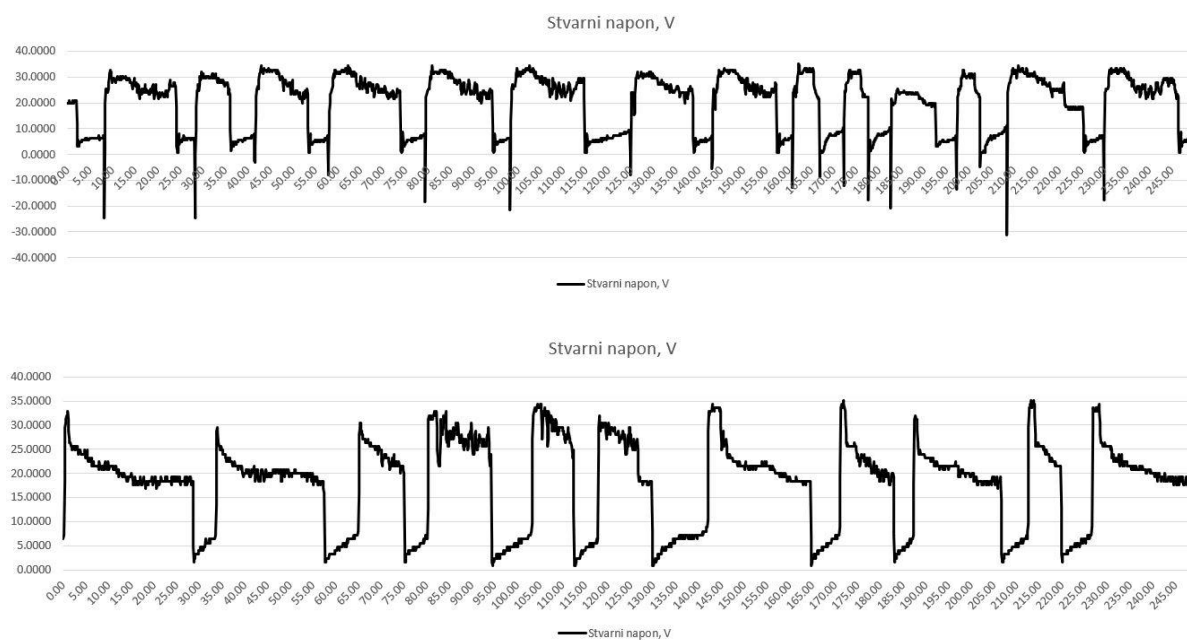
Slika 73. Prosječni prirast zida po sloju

Snimanjem dinamičke karakteristike tijekom izrade pojedinog sloja zida (31 dinamička karakteristika), kod oba uzorka te nakon obrade podataka u MS Excel – u i generiranja grafičkog prikaza, bilo je moguće pristupiti usporedbi dobivenih rezultata izradom uzoraka *coldArc* i konvencionalnim postupkom zavarivanja kratkim spojem. Na sljedećim slikama dani su usporedni prikazi snimljenih dinamičkih karakteristika za promatrane parametre (struja, napon, unos topline). Gornji grafički prikaz promjene struje, napona i unosa topline vezani su za *coldArc* postupak zavarivanja, dok donje slike prikazuju konvencionalni način prijenosa metala kratkim spojem. Grafički prikazi prikazani su za 15. sloj zida oba uzorka.



Slika 74. Usporedbi prikaz promjene struje tijekom izrade jednog sloja zida za uzorak 1 i uzorak 2

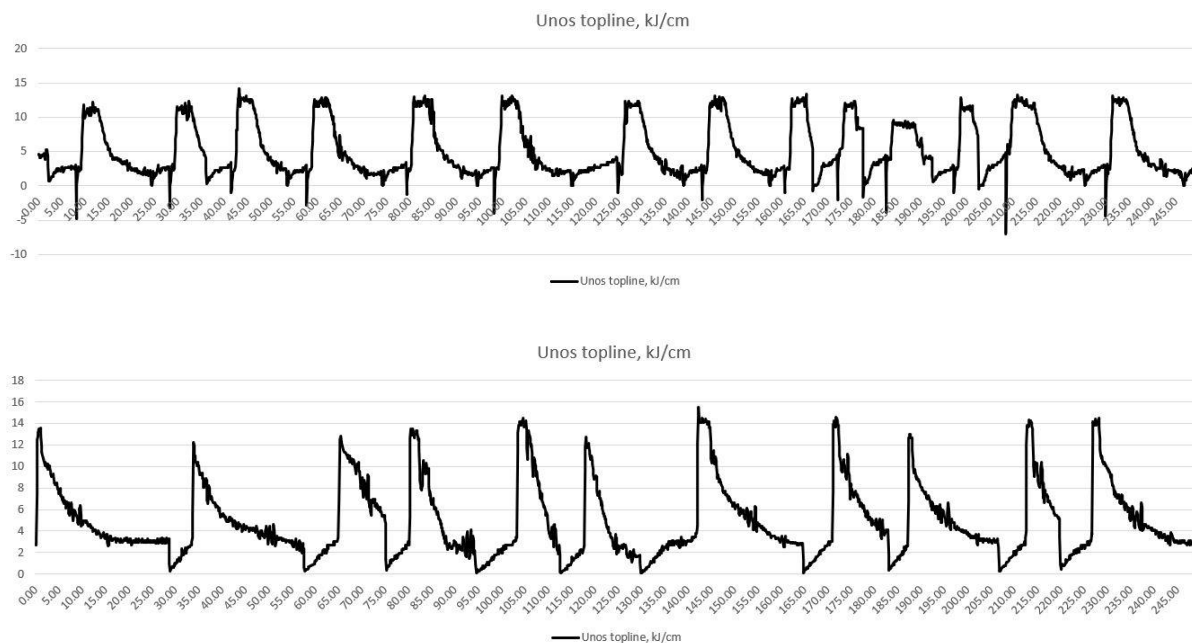
Prema prikazanim grafičkim prikazima, uočio se da su vršne vrijednosti struje kod oba postupka vrlo slične. Međutim, vršne vrijednosti struje kod konvencionalnog kratkog spoja pojavljuju se mnogo manje i traju kraće u odnosu na *coldArc* postupak zavarivanja. Navedeno se manifestiralo u obliku nešto većeg unosa topline kod *coldArc* postupka zavarivanja (zbog češćeg pojavljivanja visokih struja). Prema formuli (1), veća vrijednost struje I u brojniku formule doprinosi većoj vrijednosti unosa topline. Nadalje, s donje strane grafičkog prikaza uočava se da su minimalne struje nešto niže na strani *coldArc* postupka zavarivanja, što rezultira manjom prosječnom strujom zavarivanja po sloju u odnosu na konvencionalni kratki spoj. Kako bi se dobio potpuni uvid u ponašanje oba procesa, također je potrebno i analizirati promjene napona tijekom zavarivanja. Usporedni grafički prikazi promjene napona oba postupka zavarivanja prikazani su na sljedećoj slici, a redoslijed grafičkih prikaza napravljen je prema istom pravilu kao i za prethodno prikazanu promjenu struje.



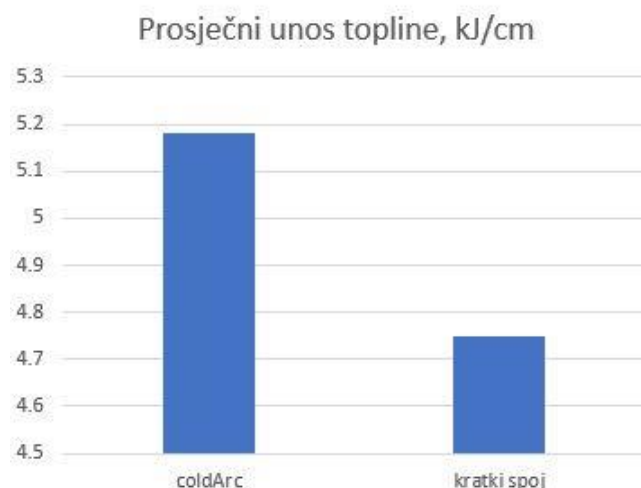
Slika 75. Usporedbi prikaz promjene napona tijekom izrade jednog sloja zida za uzorak 1 i uzorak 2

Iz navedenog grafičkog prikaza uočava se da se kod *coldArc* postupka zavarivanja napon više mijenja u odnosu na konvencionalni kratki spoj. Kod takvog modificiranog postupka uočavaju se i negativne vrijednosti napona; uređaj mijenja polaritet napona, u svrhu naglog smanjenja struje u ključnom trenutku. Negativna vrijednost napona traje vrlo kratko, ali dovoljno kako bi

se struja dovoljno brzo smanjila u određenom trenutku. Navedeno se događa unutar nekoliko milisekundi. Zbog takve promjene napona tijekom zavarivanja, prosječna vrijednost napona *coldArc* postupka zavarivanja iznosila je $U = 20,41 \text{ V}$, dok je kod konvencionalnog kratkog spoja iznosila $U = 17,87 \text{ V}$. S obzirom da se vrijednost napona također uvrštava u formulu (1) prilikom izračuna unosa topline, uočava se da je i zbog napona vrijednost unosa topline veća na strani *coldArc* postupka zavarivanja. Dakle, iako je *coldArc* postupak zavarivanja modificirani postupak zavarivanja kratkim spojem, unos topline nešto je veći u odnosu na konvencionalni kratki spoj (prosječni iznos $Q = 5,18 \text{ kJ/cm}$ u odnosu na $Q = 4,75 \text{ kJ/cm}$). Unosi topline oba postupka zavarivanja prilikom izrade uzoraka prikazani su na sljedećoj slici, a redoslijed je isti, već prema prije definiranom pravilu, dok je na slici 77 dani grafički prikaz razlika unosa topline oba postupka zavarivanja. Zanimljiv je i podatak koji se može uočiti na slikama, odnosno, grafičkim prikazima na slikama 74 i 75 (primjena napona i struje), a to je stabilnost procesa. Promatrajući karakteristike uočava se ujednačenost krivulja promjene napona i struje oba procesa što govori da su oba procesa u trenutku izrade sloja bila relativno stabilna.



Slika 76. Usporedbi prikaz promjene unosa topline tijekom izrade jednog sloja zida za uzorak 1 i uzorak 2



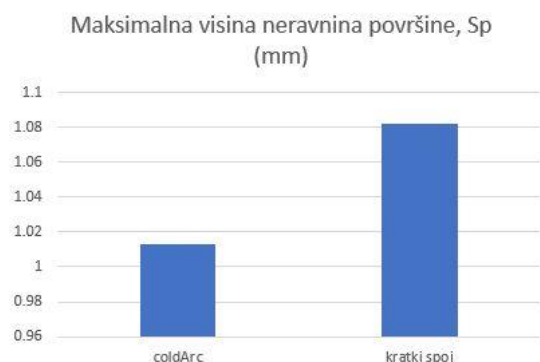
Slika 77. Usporedni prikaz prosječnih unosa topline po sloju, kJ/cm

Navedeni grafički prikazi (slika 76 i slika 77), generirani iz podataka prikupljenima snimanjem dinamičke karakteristike, potkrepljuju navedenu tvrdnju da je prosječni unos topline *coldArc* postupka veći u odnosu na konvencionalni kratki spoj.

Korišteni dodatni materijal, odnosno žica za izradu zida, već je prije navedena (1.4462, dupleks čelik). Tijekom eksperimenta promatrana je količina utrošene žice oba uzorka kod oba postupka. Za *coldArc* postupak utrošeno je 154,26 m žice, što je za 3 m manje u odnosu na konvencionalni kratki spoj kod kojeg je količina utrošene žice bila 157,14 m. Iako se postigla ista visina zida oba uzorka, razlog većeg utroška žice konvencionalnog kratkog spoja je intenzivno rasprskavanje, odnosno, gubitak materijala tijekom zavarivanja zbog prirode ponašanja tog procesa. Kako je više žice utrošeno kod konvencionalnog kratkog spoja, masa dobivenog zida također nije ista. Zid izrađen *coldArc* postupkom imao je masu od 1,35 kg (određeno računski), odnosno 1,3197 kg (određeno mjerenjem mase), dok je zid konvencionalnog kratkog spoja imao masu od 1,38 kg (određeno računski), odnosno 1,324 kg (određeno mjerenjem mase). Naravno, uz jednaku duljinu zida od 28 cm, visinu zida od 85 mm i jednako vrijeme zavarivanja od 67 sekundi. Iz prikazanih masa oba izrađena zida, vidljivo je da računski dobivena masa i izmjerena masa odstupaju unutar 2 %, što je neznatno. Usporedbom masa jasno je da postoji razlika u masama oba izrađena zida što dodatno

potkrepljuje tvrdnju da je *coldArc* postupkom zavarivanja iskoristivost materijala veća u odnosu na konvencionalni kratki spoj.

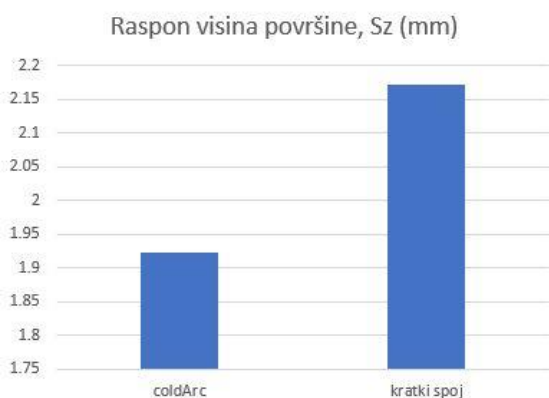
Ispitivanjem teksture površine, utvrđeno je da je prisutna izuzetna ujednačenost površine ispitivanih uzoraka zida 1 (uzorak 1: *coldArc*), odnosno, parametar asimetričnosti rasipanja visina površine (*Ssk*) bio je blizu nule, sa prosječnom vrijednošću od 0,103. Prosječna maksimalna visina neravnina (*Sp*) iznosila je 1,013 mm, dok je prosječna maksimalna dubina dna površine (*Sv*) iznosila 0,908 mm, što daje prosječni raspon visina površine (*Sz*) od 1,923 mm te prosječnu aritmetičku sredinu visina površine (*Sa*) od 0,249 mm. U odnosu na *coldArc*, kod konvencionalnog kratkog spoja dobiveni su sljedeći rezultati; ujednačenost površine zida 2 (uzorak 2: konvencionalni kratki spoj), odnosno, parametar asimetričnosti rasipanja visina površine (*Ssk*) sa prosječnom vrijednošću od 0,1715 mm, što je više u odnosu na *coldArc* postupak zavarivanja, dakle površina u toj usporedbi znatno je manje ujednačena. Prosječna visina neravnina (*Sp*) iznosila je 1,082 mm, dok je prosječna maksimalna dubina dna površine (*Sv*) iznosila je 1,0905 mm te su obje vrijednosti veće u odnosu na *coldArc* postupak zavarivanja. Iz navedenog se može uočiti da su neravnine zida nastalog konvencionalnim kratkim spojem veće u odnosu na *coldArc*. Iz vrijednosti *Sp* i *Sv* dobiva se prosječni raspon visina površine (*Sz*) od 2,172 mm te prosječna aritmetička sredina visina površine (*Sa*) od 0,307 mm. Zbog manjih raspona vrijednosti neravnina zida izrađenog *coldArc* postupkom, dobivaju se manje ukupne prosječne vrijednosti teksture površine u odnosu na konvencionalni kratki spoj. Međutim uočava se da su te razlike relativno male. Na sljedećim slikama dan je usporedni prikaz dobivenih rezultata oba postupka.



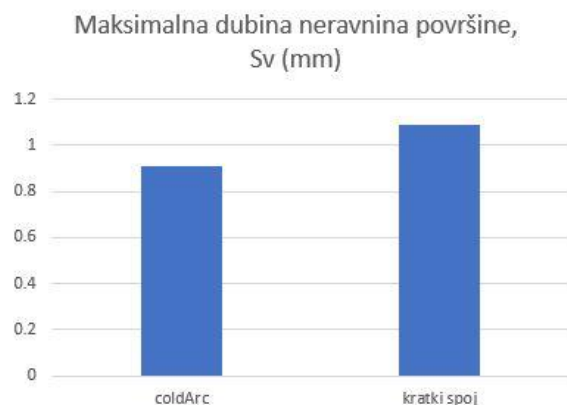
Slika 79. Usporedbi prikaz parametra maksimalne visine neravnina površine (*Sp*)



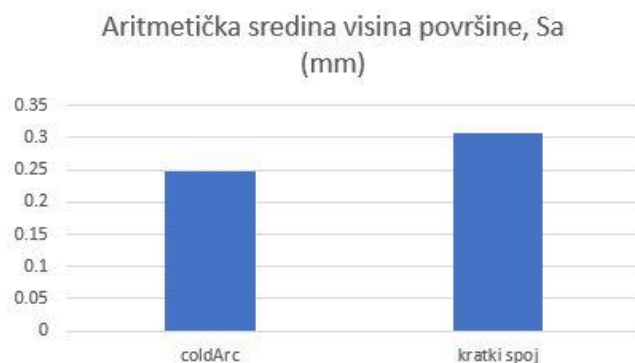
Slika 78. Usporedni prikaz parametra asimetričnosti rasipanja visina površine (*Ssk*)



Slika 81. Usporedbi prikaz raspona visina površine (Sz)



Slika 80. Usporedbi prikaz maksimalne dubine neravnina površine (Sv)



Slika 82. Usporedbi prikaz parametra aritmetičke sredine visina površine (Sa)

Opisani eksperiment proveden je s određenim parametrima, odnosno, fiksnom brzinom dodavanja žice te fiksnom brzinom zavarivanja pa se dobiveni rezultati odnose samo na te uvjete. Kako bi se dobio širi uvid u ponašanje *coldArc* postupka zavarivanja i konvencionalnog načina prijenosa metala kratkim spojem kod aditivne proizvodnje, bila bi potrebna promjena parametara. Drugim riječima, potrebno je napraviti isti zid s drugačijim parametrima zavarivanja (promijeniti brzinu dodavanja žice, brzinu zavarivanja i slično).

7. ZAKLJUČAK

Aditivna proizvodnja električnim lukom i metalnom žicom relativno je nova tehnologija koja je još u fazi istraživanja i razvoja. Aditivna proizvodnja postaje konkurentna na tržištu zbog svojih prednosti, kao što su mogućnost automatizacije i mogućnost izrade komponenti vrlo složene geometrije. S obzirom na prirodu procesa aditivne proizvodnje, WAAM se već pokazao vrlo ekonomičnim u smislu iskoristivosti materijala (značajno manje škarta prilikom izrade komponenti), pa je zbog toga WAAM vrlo konkurentan kod izrade dijelova izrađenih od skupih materijala poput titana i nikla.

Posebna važnost pridaje se dupleks čelicima. Dvofazna struktura dupleks nehrđajućih čelika, sastavljena od feritne i austenitne faze, zaslužna je za glavna svojstva koje ovi čelici imaju, a to su odlična otpornost prema interkristalnoj, napetosnoj i rupičastoj koroziji u kombinaciji s visokom vlačnom čvrstoćom, visokom granicom razvlačenja i visokom vrijednošću udarnog rada loma. Primjena dupleks čelika danas je veoma raširena. Zbog svojih jedinstvenih svojstava, ali i nešto više cijene u odnosu na ostale materijale, dupleks čelici sve se više koriste kao dodatni materijal WAAM postupka izrade komponenti. Ponajviše zbog svojih prednosti, od kojih je najznačajnija ušteda materijala.

Mjerenjem visine zida nakon izrade svakog pojedinog sloja zida, došlo se do zaključka da je *coldArc* postupak prihvatljiviji u pogledu prosječnog prirasta zida u odnosu na konvencionalni kratki spoj (konstantna brzina dodavanja žice i brzina zavarivanja). Osim većeg prirasta zida po sloju, *coldArc* je prihvatljiviji i zbog manjeg rasprskavanja tijekom procesa zavarivanja, odnosno manji je gubitak materijala. Prilog u tome ide i duljina utrošene žice za izradu zida *coldArc* postupkom. Također, masa nastalog zida je nešto manja u odnosu na konvencionalni kratki spoj, što također govori o količini utrošene žice *coldArc* postupka zavarivanja. Dakle, s obzirom na navedeno, može se zaključiti da je *coldArc* postupak zavarivanja ekonomičniji u odnosu na konvencionalni kratki spoj. Iako je zid izrađen *coldArc* postupkom zavarivanja imao manju masu, razlika u masama oba izrađena uzorka je neznatna, pa se iz toga opet može zaključiti o isplativosti ulaganja u uređaj koji ima mogućnost zavarivanja *coldArc* postupkom.

Analiza dinamičke karakteristike pokazala je da se konvencionalnim kratkim spojem unosi manje topline u izradak u odnosu na *coldArc* postupak. Manji unos topline pozitivno utječe na svojstva materijala. Iako je *coldArc* postupak zavarivanja modificirani postupak zavarivanja te

ima mogućnost fine regulacije struje tijekom cijelog procesa zavarivanja, dobivene vrijednosti unosa topline nisu se uvelike razlikovale, što svakako ne ide u prilog *coldArc* postupka zavarivanja. Uređaj za zavarivanje za takav postupak je veoma skup pa je potrebno odvagnuti isplati li se kupiti takav uređaj za WAAM postupak proizvodnje.

Analizom teksture površine uzoraka, zaključeno je da *coldArc* postupak zavarivanja daje bolje rezultate. Bolja je ujednačenost površine, manje su neravnine površine što daje i estetski ljepši izgled zida, a ujedno je i veća efektivna širina zida (*Buy to Fly* indeks). Dakle, može se zaključiti da je *coldArc* postupak prihvatljiviji za izradu zida WAAM postupkom. Međutim, dobivene vrijednosti parametara neravnina neznatno su bolje u odnosu na konvencionalni kratki spoj pa se opet postavlja pitanje isplativosti uređaja koji ima mogućnost zavarivanja *coldArc* postupkom.

S obzirom na provedeni eksperiment, općenito se može zaključiti: oba korištena postupka za izradu uzoraka imaju svoje prednosti i nedostatke. *coldArc* postupak zavarivanja u navedenim uvjetima ispitivanja dao je nešto bolje rezultate u pogledu ekonomičnosti (proizvodnosti, iskoristivosti materijala) i estetike uzoraka, međutim, nešto je lošiji u pogledu unosa topline u materijal. Iako daje bolje rezultate, *coldArc* ne daje značajno bolje rezultate pa se dovodi u pitanje isplativost kupnje uređaja koji ima mogućnost zavarivanja *coldArc* postupkom. Konvencionalni kratki spoj mogu koristiti svi uređaji za zavarivanje MIG/MAG postupkom.

U konačnici *coldArc* postupak zavarivanja primjenjiv je za aditivnu proizvodnju. Međutim, da bi se dobio širi uvid u primjenu *coldArc* postupka za aditivnu proizvodnju, eksperiment bi trebalo napraviti primjenjujući više različitih parametara. Može se koristiti drugi plin, povećati ili smanjiti brzina dodavanja žice, povećati ili smanjiti brzina zavarivanja, promijeniti debljina žice i slično.

LITERATURA

- [1] Ghaffar Hamidreza, Sayed; Corker, Jorge; Fan, Mizi: Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution, *Automation in construction* 93 (2018) 1-11
- [2] ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies ASMT International, 2012.
- [3] Pilipović A.: Polimeri: Časopis za plastiku i gumu, Vol. 33, No. 3-4, 2013.
- [4] Pilipović A.: Utjecaj parametara izrade na svojstva polimernog prototipa, Doktorski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2012.
- [5] Ding, D.; Pan, Z.; Cuiuri, D.; Li, H.; Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 81(1-4), 2015.
- [6] Ilić, D.: Optimizacija prijenosa metala za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2016.
- [7] Ćurić, T.: Utjecaj postupaka aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom (WAAM) na korozijsku otpornost dupleks čelika, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2018.
- [8] Busachi A., Erkoyuncu A., J., Martina F., Ding J.: *Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications*, Elsevier, 2015.
- [9] Williams S.: *WAAMMat, Welding Engineering And Laser Processing Centre*, Cranfield University, 2016.
- [10] Williams S.W., Martina F., Addison A.C., Ding J., Pardal G., Colegrove P.: *Wire + Arc Additive Manufacturing, Materials Science and Technology*, 2016.
- [11] Zadi-Maad, A.; Rohib, R.; Irawan, A.: Additive manufacturing for steels: a review, *Mineral Processing and Technology International Conference*, 2017.
- [12] Erikson M., Lervag M., Sorensen C., Robertstad A., Bronstad B.M., Nyhus B., Aune R., Ren X., Akselsen O.M.: Additive manufacture of superduplex stainless steel using WAAM, Trondheim, Norveška, 2018.
- [13] Karamarko, M.: Analiza mikrostrukture pri aditivnoj proizvodnji dupleks čelika električnim lukom i žicom, Završni rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2018.

- [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] Ding J., Martina F., Williams S.: Production of large metallic components by additive manufacture – issues and achievements, Welding Engineering and Laser Processing centre, Cranfield University, 2015.
- [16] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/1357631301-0-ssnc_9i10_pred_tekst.pdf, pristup 19.04.2019.
- [17] Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels, Revised edition, International Molybdenum Association, 2001.
- [18] Russell S.W., Lundin C.D.: The development of qualification standards for cast duplex stainless steel, Behaviour of Duplex Stainless Steel Casting, Vol. 2., 2005.
- [19] Folkhard E.: Welding Metallurgy of Stainless Steels, Springer-Verlag, Wien New York, 1988.
- [20] [https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable MIGGMAWWire-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf](https://www.lincolnelectric.com/assets/global/Products/Consumable_MIGGMAWWire-SuperArc-SuperArcL-56/c4200.pdf), pristup 26.04.2019.
- [21] Mikulić, M.: Modificirani MAG postupci za visokoučinsko zavarivanje, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2018.
- [22] Rudan, M.: Zavarivanje u zaštiti plina taljivom elektrodom (MIG/MAG) - Glavna obilježja i područja primjene, Društvo za tehniku zavarivanja Istra, Pula, 2005.
- [23] Uticaj parametara zavarivanja na kvalitet zavara izvedenih MAG zavarivanjem, Bajrush Bytyqi, prof., Hysni Osmani, prof., Ferit Idrizi, ass., Fojnica, 2005.
- [24] Stevanović, S.: Parametri zavarivanja i njihov uticaj na kvalitet i vizuelni izgled zavarenog spoja, Inženjer zavarivanja EWE - <http://www.alatistherm.co.rs/pdf.zavarivanje/ParametriZavarivanja.pdf> pristup 26.04.2019
- [25] https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTfqxyWyVdpTQe-qD0gapgRq10Wy3yQF_YvAg_RELxv7I7HA0RQg – pristup 26.04.2019.
- [26] Garašić, I.; Kožuh, Z.: Priručnik iz kolegija *Strojevi i oprema za zavarivanje*, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, 2016.
- [27] [https://sh.wikipedia.org/wiki/Grecov spoj](https://sh.wikipedia.org/wiki/Grecov_spoj) - pristup 22.05.2019
- [28] https://en.wikipedia.org/wiki/Welding_power_supply - pristup 22.05.2019

-
- [29] Kah, P.; Raimo, S.: Advanced gas metal arc welding processes, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Lipanj, 2013.
- [30] de Dompablo, M.: New solutions in coldArc and forceArc welding technology, Welding International, 27:1, 24-29, 2013.
- [31] <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/sq-root-mean-square-height.jsp> - pristup 29.04.2019.
- [32] <https://i.imgur.com/N0rRgKh.png> - pristup 01.05.2019
- [33] https://www.ewm-sales.com/en/MIG_MAG_welding_machines/Titan_XQ_puls/Titan_XQ_350_puls_D_W--090-005560-00001.html - pristup 16.06.2019

PRILOZI

I. CD-R disc