

# Optimizacija aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom pri izradi kosog zida

---

**Grdić, Adriana**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*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:235:145929>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-30**

*Repository / Repozitorij:*

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Adriana Grdić**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Ivica Garašić

Student:

Adriana Grdić

Zagreb, 2021.

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

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

Zahvaljujem asistentu Ivanu Juriću, mag. ing. mech. na svim savjetima, pruženoj pomoći i stručnom vođenju tijekom izrade završnog rada.

Zahvaljujem roditeljima, suprugu, sestri, teti i prijateljici na razumijevanju, pomoći i podršci tijekom dosadašnjeg studiranja.

Posebno zahvaljujem svojoj dječici na nepresušnoj motivaciji.

Adriana Grdić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



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

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1	
Ur.broj: 15 - 1703 - 21 -	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Adriana Grdić** Mat. br.: 0035208851

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Optimizacija aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom pri izradi kosog zida**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Optimization of Wire and Arc Additive Manufacturing for Fabrication of Inclined Wall**

Opis zadatka:

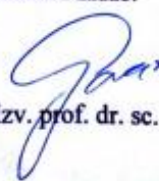
U teorijskom dijelu rada ukratko opisati aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom te navesti najčešće postupke zavarivanja koji se za tu tehnologiju koriste. Detaljno opisati svojstva i zavarljivost konstrukcijskih čelika s posebnim naglaskom na dodatne materijale koje se koriste prilikom njihovog zavarivanja. Opisati parametre teksture površine.

U eksperimentalnom dijelu rada aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom izraditi više zidova pod određenim kutom u odnosu na podlogu. Prilikom izrade ispitati utjecaj nagiba pištolja na parametre teksture površine.

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

Zadatak zadan:  
30. studenoga 2020.


Zadatak zadao:

  
Izv. prof. dr. sc. Ilica Garašić

Datum predaje rada:  
1. rok: 18. veljače 2021.  
2. rok (izvanredni): 5. srpnja 2021.  
3. rok: 23. rujna 2021.

Predviđeni datumi obrane:  
1. rok: 22.2. – 26.2.2021.  
2. rok (izvanredni): 9.7.2021.  
3. rok: 27.9. – 1.10.2021.

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Branko Bauer

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
SUMMARY .....	VII
1. UVOD.....	1
2. WAAM .....	2
2.1. Prednosti i nedostaci WAAM postupka.....	4
2.2. Postupci zavarivanja kod WAAM-a .....	5
3. KONSTRUKCIJSKI ČELICI.....	6
3.1. Zavarljivost konstrukcijskih čelika .....	6
3.1.2. Zavarljivost ugljičnih, ugljično-manganskih i mikrolegiranih čelika.....	12
3.1.3. Zavarljivost niskolegiranih čelika .....	13
3.1.4. Zavarljivost visokolegiranih čelika .....	14
3.2. Dodatni materijal za zavarivanje konstrukcijskih čelika .....	15
3.2.1. Dodatni materijali za zavarivanje ugljičnih, ugljično-manganskih i mikrolegiranih čelika .....	15
3.2.2. Dodatni materijali za zavarivanje niskolegiranih čelika .....	16
3.2.3. Dodatni materijali za zavarivanje maraging čelika.....	17
4. PARAMETRI TEKSTURE POVRŠINE .....	18
4.1. Srednje kvadratno odstupanje, $S_q$ .....	19
4.2. Koeficijent asimetrije površine, $S_{sk}$ .....	19
4.3. Koeficijent oštine površine, $S_{ku}$ .....	20
4.4. Najveća visina vrha površine, $S_p$ .....	21
4.5. Najveća udubina površine, $S_v$ .....	22
4.6. Najveća visina neravnine površine, $S_z$ .....	22
4.7. Srednje aritmetičko odstupanje površine, $S_a$ .....	23
5. EKSPERIMENTALNI DIO .....	24
5.1. Oprema za zavarivanje.....	24
5.2. Dodatni materijal za zavarivanje.....	26
5.3. Zaštitni plin .....	26
5.3. Optimiranje parametara zavarivanja .....	27
5.4. Izrada uzoraka .....	29
5.5. Priprema uzoraka za ispitivanja .....	36
5.6. Analiza uzoraka.....	37
5.6.1. Makroanaliza strukture .....	38
5.6.2. Mikrostruktura .....	39

5.6.3. Analiza tvrdoće .....	41
5.6.4. Analiza parametara teksture površine .....	44
5. ZAKLJUČAK.....	52
LITERATURA.....	53

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Shematski prikaz postupka aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom [2] ...	2
Slika 2.	WAAM zid [4] .....	3
Slika 3.	Međusobna interakcija svih faktora koji određuju zavarljivost materijal [7] .....	9
Slika 4.	Srednje kvadratno odstupanje linije, $R_q$ [12] .....	19
Slika 5.	Primjeri koeficijenta asimetrije površine, $S_{sk}$ [12] .....	20
Slika 6.	Primjer koeficijenta oštrote površine, $S_{ku}$ [12] .....	21
Slika 7.	Najveća visina vrha linije, $R_p$ [12].....	21
Slika 8.	Najveća dubina profila linije, $R_v$ [12].....	22
Slika 9.	Najveća visina neravnine linije, $R_z$ [12] .....	23
Slika 10.	Srednje aritmetičko odstupanje površine, $S_a$ [12].....	23
Slika 11.	Robotska stanica Almega OTC AX V6 .....	25
Slika 12.	Privjesak za programiranje .....	25
Slika 13.	Probe izrade kosih zidova različitim parametrima zavarivanja.....	27
Slika 14.	Gore – poroznost, dolje – nadvišenje na početku zavarivanja .....	28
Slika 15.	Određivanje kuta nagiba pištolja za zavarivanje .....	29
Slika 16.	Početni položaj pištolja i učvršćena podloga za zavarivanje .....	30
Slika 17.	Prvi prolaz zida nazivnog kuta $60^\circ$ .....	30
Slika 18.	Hlađenje zida komprimiranim zrakom (lijevo) i uređaj za beskontaktno mjerenje temperature .....	31
Slika 19.	Konačan izgled zida nazivnog kuta $45^\circ$ .....	32
Slika 20.	Očitavanje kuta za prvi zid nazivnog kuta $60^\circ$ .....	32
Slika 21.	Očitavanje kuta drugog zida nazivnog kuta $45^\circ$ .....	33
Slika 22.	Rezanje zidova tračnom pilom .....	36
Slika 23.	Grafički prikaz prirasta visine po prolazu za drugi zid .....	37
Slika 24.	Makroizbrusak prvog zida nazivnog kuta od $60^\circ$ .....	38
Slika 25.	Makroizbrusak drugog zida nazivnog kuta od $45^\circ$ .....	38
Slika 26.	Mikrostruktura zidova .....	40
Slika 27.	Uređaj za mjerenj tvrdoće .....	41
Slika 28.	Raspored mjernih točaka tvrdoće za prvi zid (lijevo) i drugi zid (desno).....	41
Slika 29.	Usporedba tvrdoće po presjeku zidova .....	43
Slika 30.	Pripremljen uzorak za ispitivanje površine i razvijlač Magnaflux SKD-S2 .....	44
Slika 31.	Prikaz postupka 3D skeniranja .....	44
Slika 32.	Vizualni prikaz gornje površine prvog zida nazivnog kuta $60^\circ$ .....	45
Slika 33.	Vizualni prikaz donje površine prvog zida nazivnog kuta $60^\circ$ .....	45
Slika 34.	Vizualni prikaz gornje površine drugog zida nazivnog kuta $45^\circ$ .....	46
Slika 35.	Vizualni prikaz donje površine drugog zida nazivnog kuta $60^\circ$ .....	46
Slika 36.	Usporedba parametra $S_q$ .....	48
Slika 37.	Usporedba parametra $S_{sk}$ .....	48
Slika 38.	Usporedba parametra $S_{ku}$ .....	49
Slika 39.	Usporedba parametra $S_p$ .....	49
Slika 40.	Usporedba parametra $S_v$ .....	50
Slika 41.	Usporedba parametra $S_z$ .....	50
Slika 42.	Usporedba parametra $S_a$ .....	51



## POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav prve grupe čelika .....	10
Tablica 2. Kemijski sastav druge skupine čelika .....	10
Tablica 3. Kemijski sastav <i>maraging</i> čelika .....	14
Tablica 4. Elektrode za zavarivanje nelegiranih čelika proizvođača Elektroda Zagreb d.d. [10] .....	16
Tablica 5. Elektrode za zavarivanje nelegiranih i niksolegiranih čelika proizvođača Elektroda Zagreb d.d. [10] .....	17
Tablica 6. Žice za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika proizvođača Elektroda Zagreb d.d. [10] .....	17
Tablica 7. Kemijski sastav dodatnog materijala EZ-SG2 [10].....	26
Tablica 8. Mehanička svojstva čistog metala zavara [10].....	26
Tablica 9. Parametri zavarivanja prvog zida nazivnog kuta od 60° .....	34
Tablica 10. Parametri zavarivanja drugog zida nazivnog kuta 45° .....	35
Tablica 11. Vrijednosti tvrdoće za prvi i drugi zid.....	42
Tablica 12. Parametri teksture površine prvog zida nazivnog kuta 60° .....	47
Tablica 13. Parametri teksture površine drugog zida nazivnog kuta 45° .....	47

## POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
A	mm	Površina
BTF	-	<i>Buy to fly</i> – maseni omjer sirovca i gotovog proizvoda
MAG	-	<i>Metal Active Gas</i> – elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u prisutnosti zaštitnog plina
TIG	-	<i>Tungsten Inert Gas</i> – zavarivanje netaljivom elektrodom u prisutnosti zaštitnog plina
EPP	-	Elektrolučno zavarivanje pod zaštitnim praškom
REL	-	Ručno elektrolučno zavarivanje
C <sub>e</sub>	-	Ugljični ekvivalent
C	-	Ugljik
Mn	-	Mangan
Nb	-	Niobij
Ti	-	Titanij
V	-	Vanadij
Al	-	Aluminij
Zr	-	Cirkonij
Mo	-	Molibden
B	-	Bor
Cr	-	Krom
Ni	-	Nikal
S <sub>q</sub>	μm	Srednje kvadratno odstupanje
S <sub>sk</sub>	-	Koeficijent asimetrije površine
S <sub>ku</sub>	-	Koeficijent oštine površine
S <sub>p</sub>	μm	Najveća visina vrha površine
S <sub>v</sub>	μm	Najveća udubina površine
S <sub>z</sub>	μm	Najveća visina neravnina površine
S <sub>a</sub>	μm	Srednje aritmetičko odstupanje površine
<i>h</i> <sub>prolaza</sub>	mm	Visina prolaza
<i>H</i>	mm	Visina zida
A	°	Stvarni kut zida

## **SAŽETAK**

Tema završnog rada je optimizacija aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom pri izradi kosog zida. Završni rad sastoji se od teorijskog i eksperimentalnog dijela.

U teorijskom dijelu ukratko je opisana aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom. Zatim su detaljno opisana svojstva i zavarljivost konstrukcijskih čelika s posebnim naglaskom na dodatne materijale koji se koriste prilikom njihovog zavarivanja. Nakon toga, opisani su parametri teksture površine.

U eksperimentalnom dijelu rada, aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom izrađena su dva kosa zida pod različitim kutom u odnosu na podlogu. Nakon toga, ispitana i analizirana je mikrostruktura, makrostruktura, tvrdoća i parametri teksture površine dobivenih uzoraka.

Ključne riječi: aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom, kosi zid, konstrukcijski čelik, parametri teksture površine.

## **SUMMARY**

The topic of this thesis is optimization of Wire and Arc Additive Manufacturing for fabrication of inclined wall. The paper consists of a theoretical and experimental part.

In theoretical part is described Wire and Arc Additive Manufacturing. Then, characteristics and weldability of construction steel is detailed explained with special emphasis on filler metals used for their welding. After that, the surface texture parameters is described.

In experimental part, two inclined walls is fabricated at different angle by Wire and Arc Additive Manufacturing. Then, microstructure, macrostructure, hardness and surface texture parameters is tested and analysed.

Key words: Wire and Arc Additive Manufacturing, inclined wall, construction steel, surface texture parameters

## 1. UVOD

Posljednjih nekoliko godina, aditivna proizvodnja potpuno je izmijenila proizvodni obrazac zahvaljujući mogućnosti izrade kompleksnih, trodimenzionalnih dijelova, koje je nemoguće izraditi standardnim proizvodnim tehnologijama. Aditivna proizvodnja definira se kao proces povezivanja materijala pri izradi objekata izravno iz 3D računalnih modela, najčešće sloj na sloj, što je suprotno postupcima obrade odvajanjem čestica. U odnosu na klasične postupke, gdje se od predimenzioniranog sirovog komada rezanjem materijala dobije gotov proizvod, komponenta dobivena aditivnim postupkom nastaje taloženjem materijala sloj na sloj. Definiciju je postavio ASTM (engl. *American Society for Testing and Materials*) 2009. godine [1].

Pored ostalih postupaka aditivne proizvodnje, WAAM (engl. *Wire and Arc Additive Manufacturing*) omogućuje izradu metalnih dijelova zahvaljujući visokoj količini depozita materijala. Osim toga, WAAM se ističe znatnom uštedom materijala prilikom izrade velikih, kompleksnih dijelova u odnosu na standardne proizvodne tehnologije te se time pojeftinjuje izrada. To je značajno kod skupih materijala, kao što su npr. titanijeve legure.

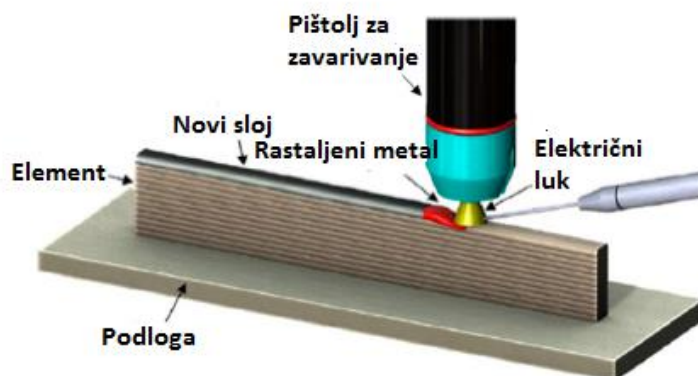
Potrebe tržišta se konstantno mijenjaju i rastu. Već je neko vrijeme prisutan trend napuštanja masovne proizvodnje, a zamjenjuje ju izrada pojedinačnih, personaliziranih proizvoda. Pored toga, nameću se novi zahtjevi poput povećanja kvalitete proizvoda, skraćenje vremena izrade, smanjenje troškova, izrada proizvoda složene geometrije itd. Odgovor na navedene zahtjeve tržišta nudi upravo WAAM postupak. Zbog povećanog interesa za aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom, danas je sve više istraživanja na tu temu kako bi navedena tehnologija što prije ušla u širu primjenu u proizvodnji.

## 2. WAAM

WAAM na engleskom jeziku označava Wire and Arc Additive Manufacturing, a na hrvatskom jezik prevodi se kao aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom. WAAM postupak zasniva se na izradi metalnih dijelova taloženjem materijala sloj na sloj. To je relativno nova tehnologija u aditivnoj proizvodnji koja pruža značajne mogućnosti i pogodnosti. Iako se uz pojam aditivne proizvodnje najčešće veže izrada polimernih dijelova, upravo WAAM omogućuje izradu i metalnih komponenti.

Prema ASTM-u, WAAM pripada kategoriji taloženja usmjerenom energijom. Toj skupini pripadaju svi aditivni procesi u kojima se koristi usmjerena toplinska energija za spajanje materijala taljenjem. Pri čemu je električni luk korišten kao izvor energije, a žica služi kao polazni materijal [1].

Robot upravlja cijelim procesom i omogućuje automatsko gibanje pištolja za zavarivanje koji stvara konačni oblik taloženjem kapljica rastaljenog metala na podlozi. Nakon što je nataložen dovoljan broj slojeva i postignuta tražena visina, radni komad se odreže od podloge i spreman je za daljnju obradu. Shematski prikaz procesa dan je na slici (Slika 1.).



**Slika 1. Shematski prikaz postupka aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom [2]**

WAAM sustav uglavnom koristi standardnu opremu za zavarivanje (izvor struje, pištolj za zavarivanje), robota ili CNC portalni stroj koji osigurava gibanje po zadanoj putanji, kontrolnu jedinicu koja upravlja robotom te uređaj za dodavanje žice koji upravlja količinom depozita [3].

Taloženjem kapljica metala u slojevima, dobiva se ravan metalni zid širine najmanje 1 do 2 mm. Količina nataloženog materijala kreće se od 50 do 130 g/min, a kod lasera ili elektronske zrake iznosi 2 do 10 g/min [3].

Zbog zavarivanja u više prolaza nastaju površinske nepravilnosti, odnosno valovitost koja se može ukloniti naknadnim procesima obrade odvajanjem čestica. Na slici (Slika 2.) prikazan je zid napravljen WAAM postupkom te razlika između ukupne i efektivne širine zida. Kod WAAM postupka veliku važnost ima BTF omjer (engl. *Buy to fly*), a on predstavlja omjer mase sirovca i gotovog proizvoda te je poželjno da je on što manje, odnosno što bliži jedinici. [4]



Slika 2. WAAM zid [4]

## 2.1. Prednosti i nedostaci WAAM postupka

Kao i kod ostalih dostupnih tehnologija, tako i kod WAAM-a postoje prednosti i neki nedostaci. Jedna od glavnih prednosti WAAM-a je mogućnost rada s velikim brojem metala. Jedini uvjet koji pritom mora biti zadovoljen je da se metal može rastaliti, odnosno mora biti zavarljiv. Neki od njih su nehrđajući čelici, legure na bazi nikla, titanijeve i aluminijske legure. Pored toga, glavna prednost je velika ušteda materijala, koja je vrlo značajna kod skupih materijala. Upravo zbog te činjenice, smatra se da će WAAM potisnuti neke standardne tehnologije obrade materijala i ući u širu primjenu u mnogobrojnim granama industrije, posebice nuklearnoj i zrakoplovnoj.

Prednosti koje se ostvaruju WAAM postupkom su [5]:

- mogućnost rada s velikim brojem metala
- izrada komponenti od skupih materijala (titan, nikel i njihove legure). Ovi materijali se primjenjuju u zrakoplovnoj industriji gdje svaka komponenta mora imati što niži BTF omjer
- mogućnost automatizacije proizvodnog procesa čime se smanjuje vrijeme proizvodnje i ljudski rad
- proizvodnja komponenti sa složenom geometrijom, što je nepraktično ili nemoguće koristeći klasične postupke
- smanjenje gubitka materijala
- velika količina depozita
- mnogo niži troškovi proizvodnje nego kod procesa baziranih na prašku
- potencijalno nema ograničenja u veličini dijela
- mogućnost strojne obrade tijekom procesa
- mogućnost stvaranja funkcionalno profiliranog materijala
- otvorena struktura sustava omogućuje primjenu bilo kojeg proizvođača izvora struje i manipulatora.



Nedostaci WAAM-a su [5]:

- pojava zaostalih naprezanja i deformacija zbog visokog unosa topline
- neujednačena geometrija zavora od početka do kraja prolaza
- pojava poroznosti
- potrebna naknadna obrada odvajanjem čestica.

Glavni nedostaci procesa su pogreške koje se javljaju tijekom zavarivanja, a to su najčešće poroznost, ugorine i nadvišenja. Poroznost nastaje zbog nedovoljnog protoka zaštitnog plina, pogrešnih parametara zavarivanja, prevelike brzine zavarivanja i nečistoća u materijalu. Posebno je izražena pojava pora nakon četvrtog prolaza, kada je veća visina zida. Tada je sapnica udaljenija od podloge pa se zaštitni plin više ne sudara s podlogom, što je poželjno jer tako dodatno štiti zavar od atmosferskih plinova. Ugorine nastaju zbog prevelike struje zavarivanja, prevelike brzine zavarivanja, pogrešnog kut zavarivanja, kemijskog sastava materijala i nedovoljnog dodavanja žice. Nadvišenja nastaju zbog prevelike brzine zavarivanja [4].

## 2.2. Postupci zavarivanja kod WAAM-a

WAAM se oslanja na temeljna načela automatiziranog načina proizvodnje, poput: elektrolučno zavarivanje plinom (engl. *Gas Metal Arc Welding* - GMAW), elektrolučno zavarivanje plazmom (engl. *Plasma Arc Welding* - PAW) i elektrolučno zavarivanje netaljivom elektrodom u zaštiti inertnog plina (engl. *Gas Tungsten Arc Welding* - GTAW) [2].

Izbor postupka zavarivanja ovisi najviše o materijalu koji se zavaruje, potom i visini i širini zida te traženoj kvaliteti površine zida. Plazma zavarivanje koristi se najčešće kod titana i njegovih legura. Prednost TIG-a u odnosu na ostale postupke je da generira neznatno prskanje i rastaljeni metal je manje aktivan, što je poželjno prilikom taloženja materijala različitih kemijskih sastava. Kod MAG-a je automatizirana dobava dodatnog materijala, dok je kod TIG-a i plazma zavarivanja potreban dodavač žice.

### 3. KONSTRUKCIJSKI ČELICI

Kao što i sam naziv govori, ovi čelici primjenjuju se za konstrukcijske dijelove strojeva i uređaja koji obavljaju neku funkciju – prenose gibanja preuzimanjem sila i momenata, spremaju i transportiraju tekućine ili plinove, zatvaraju, spajaju elemente konstrukcija itd. To su osovine, vratila, zupčanici, nosači itd [6].

Na temelju mnogostrukih zahtjeva koji se postavljaju na ove dijelove, od konstrukcijskih čelika traže se sljedeća svojstva [6]:

- a) MEHANIČKA SVOJSTVA: visoka granica razvlačenja povezana s dovoljnom plastičnom deformabilnošću – istezljivošću. Poželjno je da površina ispod dijagrama "sila - produljenje" bude što veća radi sigurnosti od pojave krhkog loma. Dovoljno visoka granica puzanja i čvrstoća pri povišenim temperaturama – ovisno o vrsti temperature i opterećenja. Dovoljna žilavost i čvrstoća pri normalnim, sniženim i niskim temperaturama; Otpornost na umor u uvjetima promjenjivog opterećenja – dovoljna dinamička izdržljivost.
- b) OTPORNOST NA TROŠENJE: što manji gubitak mase.
- c) OTPORNOST NA KOROZIJU
- d) TEHNOLOŠKA SVOJSTVA: rezljivost, zavarljivost, hladna oblikovljivost.

#### 3.1. Zavarljivost konstrukcijskih čelika

Zavarivanje je daleko najčešća tehnologija spajanja konstrukcijskih čelika pa je od tehnoloških svojstava posebno važna zavarljivost. U literaturi postoje razne definicije zavarljivosti, no najpotpuniju je postavio Međunarodni institut za zavarivanje te je usvojena i od Međunarodne organizacije za standardizaciju (ISO) i glasi: "Komponenta ili dio načinjen od metalnih materijala smatra se zavarljivim određenim postupkom kada se uz primjenu pogodne procedure zavarivanjem može postići kontinuitet metalnog materijala. Istovremeno, zavareni spoj mora zadovoljavati postavljene kriterije mehaničkih i metalurških značajki, kao i njihov utjecaj na konstrukciju koje je sastavni dio." [7]

Preduvjet dobre zavarljivosti je što manja vrijednost ugljičnog ekvivalenta  $C_e$ . Jedna od jednadžbi za njegov izračun glasi [6]:

$$C_e = \%C + \frac{\%Mn}{4} + \frac{\%Cr + \%Mo + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{10} \quad (1)$$

Prema dobivenoj vrijednosti ugljičnog parametra, može se procijeniti zavarljivost materijal [7]:

- $C_e \leq 0,25$ ; Dobra zavarljivost.
- $0,25 < C_e \leq 0,45$ ; Prihvatljiva vrijednost zavarljivosti.
- $C_e > 0,45$ ; Loša zavarljivost.

Prema formuli (1), zavarljivost je bolja što je ugljični ekvivalent manji i što je manji udio legiranih elemenata. Legiranost nepovoljno utječe na zavarljivost zbog opasnosti od spontanog zakaljivanja. Iz formule se vidi da na iznos  $C_e$  najviše utječe udio ugljika, a potom mangana. Čelike s većim ugljičnim ekvivalentom potrebno je prije zavarivanja predgrijavati, ali time se postiže sporije ohlađivanje nakon zavarivanja [6].

Problemu zavarljivosti čelika visoke čvrstoće pristupamo sa:

- 1) metalurškog stajališta
- 2) konstrukcijskog stajališta
- 3) izvedbenog stajališta.

Metalurška zavarljivost određena je svojstvima materijala, a čimbenici koji utječu na metaluršku zavarljivost čelika su [7]:

- nastajanje hladnih pukotina
- nastajanje toplih pukotina
- lamelarno trganje
- krhki lom
- povišenje tvrdoće materijala,

- starenje materijala
- nastajanje pukotina u visokočvrstim materijalima.

Fizikalna svojstva koja utječu na zavarljivost materijala također proizlaze iz svojstava samog materijala kojeg zavarujemo [7]:

- koeficijent toplinske dilatacije (toplinsko rastezanje materijala)
- toplinska vodljivost
- temperatura taljenja
- mehanička čvrstoća
- žilavost.

Konstruktivna zavarljivost određena je svojstvima oblikovanja konstrukcije i vrstom opterećenja koja se javljaju. Čimbenici koji utječu na konstruktivnu zavarljivost uključuju [7]:

- pravilnu distribuciju sila kroz dijelove konstrukcije,
- izvedbu zavora,
- debljinu radnih komada,
- utjecaj zarezanog djelovanja i
- razliku u krutosti između osnovnog materijala i metala zavora.

Pri oblikovanju konstrukcije treba voditi računa o uvjetima opterećenja kojima će konstrukcija biti izložena. Ti uvjeti obuhvaćaju [7]:

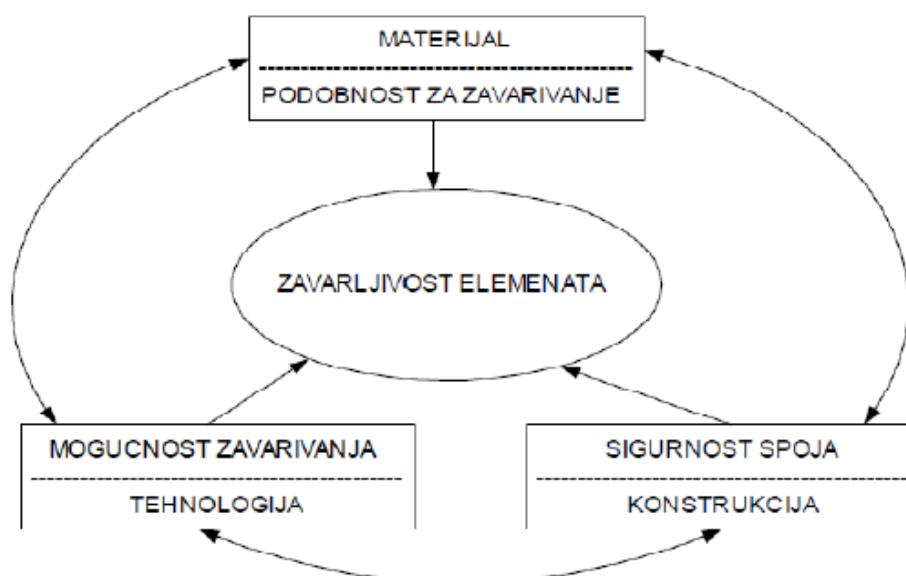
- vrstu i iznos naprezanja,
- dimenzijski iznos naprezanja,
- temperaturu i
- medij kojem je konstrukcija izložena (korozija).

Kada se govori o problemu zavarljivosti s pogleda izvedbenog stajališta, zapravo riječ je o kompletnoj proceduri zavarivanja koja uključuje [7]:

- pripremu spoja (vrsta i oblik spoja)
- postupak zavarivanja
- vrsta i oblik dodatnog materijala
- parametri zavarivanja
- redoslijed zavarivanja, broj prolaza
- predgrijavanje

- položaj zavarivanja
- obrada nakon zavarivanja
- unos topline i dr.

Kako bi konstrukcija bila zadovoljavajućih svojstava potrebna je međusobna interakcija svih navedenih faktora [7].



**Slika 3.** Međusobna interakcija svih faktora koji određuju zavarljivost materijal [7]

### 3.1.1. Podjela čelika prema zavarljivosti

Postoji nekoliko mogućih podjela konstrukcijskih čelika, s obzirom na: osnovni kemijski sastav, postupak i sadržaj legiranja, čvrstoću, namjenu, oblik itd. Prema literaturi, u radu se polazi od podjele prema ponašanju pojedinih čelika u procesu zavarivanja [9].

1. U prvoj grupi su ugljični, ugljično-manganski ili mikrolegirani čelici. To su čelici sa granicom tečenja  $R_e$  od 400 do 600 MPa. Proizvedeni su u obliku limova i traka klasičnim proizvodnim postupcima ili procesom valjanja, normalizacijskim žarenjem ili poboljšani. Kemijski sastav dan je u tablici 1 [9].

**Tablica 1. Kemijski sastav prve grupe čelika**

Kemijski element	C	Mn	Nb + Ti + V *	Al*	Zr*	Zr + Ti*	Ti*	V*
Udio elementa, %	0,12 – 0,15	≤1,5	≤0,15	≥0,015	≤0,15	≤0,20	≤0,10	≤0,15

\* ukoliko se radi o mikrolegiranim čelicima.

2. Druga grupa obuhvaća čelike sličnog kemijskog sastava kao i prva, ali sa smanjenim sadržajem perlita ili su bez perlita. Proizvode se kao termomehanički obrađeni (smanjena temperatura valjanja). Poznati su jos pod nazivom niskolegirani čelici visoke čvrstoće (HSLA – High Strength low alloy), a granica tečenja iznosi od 420 do 650 MPa. Kemijski sastav prikazan je u tablici 2 [9].

**Tablica 2. Kemijski sastav druge grupe čelika**

Kemijski element	C	C*	Mn	Mo	Cr
Udio elementa, %	≤ 0,12	≤ 0,09	≤ 2	≤ 0,3	≤ 1

\* odnosi se na besperlitne čelike

3. Treću skupinu čelika čine poboljšani ili normalizirani čelici, legirani molibdenom i borom, ili niskolegirani CrMo i NiV. Granica elastičnosti iznosi od 360 do 700 MPa. Najčešće grupe ovih čelika [9]:
- 0,5 % Mo sa dodatkom bora
  - 1,5 % Cr – 1,5 % Mo sa dodatkom bora
  - 1,5 % Ni – 0,75 % Cr - 0,70 % Mo sa dodatkom bora
  - 0,5 % Ni
  - 1,5 % Ni – 0,80 % Cr – 0,60% Mo sa/bez dodatka bakra.

4. Četvrtu grupu čine svi ostali niskolegirani čelici, sa maksimalnim sadržajem svakog legirnog elementa od 5%. Oni mogu biti normalizirani, žareni, poboljšani ili termomehanički obrađeni sa granicom tečenja od 400 do 1500, u nekim slučajevima i 2000 MPa [9].
5. Petoj skupini pripadaju visokolegirani čelici visoke čvrstoće, npr. martenzitni s 9 %Ni, 13 %Cr [9].
6. Šestu skupinu čine betonski čelici [9].
7. Sedmu skupinu čine austenitni čelici i CrNi legure namijenjene za kemijsku industriju [9].

Konstruktivski čelici su uglavnom iz prve četiri skupine te će se njihova zavarljivost u idućem poglavlju detaljnije obraditi. Konstruktivski zavarljivi čelici, odnosno čelici koji su namijenjeni za zavarene konstrukcije sa različitom otpornošću prema krhkom lomu, prema normi ISO TC 17 (tzv. nova Bonhommova klasifikacija), mogu se podijeliti u sljedeće podskupine [6,9]:

- A S235JRG1, S275JRG2. Čelici su slabije zavarljivi i nebi se trebali koristiti za zavarene konstrukcije jer ne ispunjavaju zahtjev otpornosti prema krhkom lomu. Koriste se za statički manje opterećene konstrukcije, spojene zakovicama i vijcima.
- B S235JRG2, S275JRG2, S355JRG2. Primjenjuju se za tlačno i savojno opterećene zavarene konstrukcije gdje nema opasnosti od krhkog loma.
- C S235J0G3, S275J0G3, S355J0G3. Koriste se za statički i dinamički opterećene konstrukcije gdje postoji opasnost od krhkog loma. Posebno su smireni i imaju zajamčeni udarni rad loma pro 0°C.
- D S235J2G3, S275J2G3, S355J2GR. Primjenju se za statički i dinamički opterećene odgovorne zavarene konstrukcije i pri nižim temperaturama. Posebno su smireni i normalizirani te imaju zajamčeni udarni rad loma od 27 J pri -20 °C pa su čelici otporni na krhki lom.

Zavarljivost podskupina A, B, C i D osigurava nizak maseni udio ugljika ( $< 0,2 \%C$ ) što je povoljno i zbog udranog rada loma.

### **3.1.2. Zavarljivost ugljičnih, ugljično-manganskih i mikrolegiranih čelika**

To su čelici koji pripadaju prvoj i drugoj grupi čelika prema podjeli ponašanja čelika u procesu zavarivanja. Proizvode se kao konstrukcijski zavarljivi čelici bez mikrolegura ili mikrolegirani aluminijem, titanijem, niobijem, vanadijem i cirkonijem [9].

Zavarljivost ovih čelika osigurana je smanjenim sadržajem ugljika. Zbog toga predgrijavanje najčešće nije potrebno, osim za limove debljine veće od 25 mm i vrijednost ugljičnog ekvivalenta iznad 0,41 %. Za veće vrijednost  $C_e$  i debljine limova, provodi se predgrijavanje, pri čemu temperatura ne prelazi od 100 do 150 °C [9].

Uslijed visokog unosa topline zavarivanja može se u zoni utjecaja topline (ZUT) pojaviti Widmannstättenova struktura, čije su vrijednosti zarezne žilavosti i granice tečenja niže. Zbog toga se za mikrolegirane čelike koristi manji unos topline zavarivanjem, što je povoljno i zbog sprječavanja nastanka hladnih pukotina. Problemi u ZUT-u mogu se pojaviti na temperaturama ispod  $A_1$ , tada može doći do starenja materijala [9].

Ponašanje ovih čelika kod zavarivanja ovisi o osnovnom kemijskom sastavu i sadržaju nečistoća. Uporaba mikrolegura istovremeno ispunjava zahtjev za sniženjem sumpora u čeliku i smanjenje mogućnosti pojave lamelarnih pukotina. Sniženjem sumpora postoji manja opasnost od pojave toplih pukotina. Uzrok ove pojave je izduženje sulfida pri valjanju koje se često provodi kod ove skupine čelika. Suprotno navedenim problemima, zavarljivost ugljičnih, nelegiranih i mikrolegiranih čelika je dobra [9].



### 3.1.3. Zavarljivost niskolegiranih čelika

Ovi čelici pripadaju trećoj i četvrtoj skupini podijele čelika s obzirom na ponašanje u procesu zavarivanja.

Posebnu skupinu ovih čelika čine čelici legirani borom, koji su prethodno legirani sa molibdenom, CrMo ili NiCrMo. Sadržaj bora u čelicima ne prelazi 0,004 do 0,006 %B. Bor utječe na stabiliziranje austenita pri kontinuiranom raspadu [9].

Niskolegirani molibden-bor čelici nemaju veliku čvrstoću (od 600 do 700 MPa), ali imaju vrlo dobre plastične osobine i zavarljivost. Ovaj čelik je dovoljno otporan na pojavu hladnih pukotina pri zavarivanju. Za sučeone spojeve, do debljine od 20 do 25 mm, potrebno je provoditi predgrijavanje u svrhu prevencije hladnih pukotina. Namijenjeni su za normalizirane i žarene limove [9].

Druga grupa čelika legiranih borom su niskolegirani CrMo čelici te oni imaju veću čvrstoću (od 700 do 1000 MPa), ali su slabije zavarljivi od prethodne skupine. Za njihovo zavarivanje postoje određeni uvjeti koje je potrebno ispuniti da se dobije zadovoljavajuća svojstva. To je predgrijavanje od 220 do 260 °C i ograničavanje unosa topline. U nekim slučajevima i dogrijavanje nakon zavarivanja. Osim toga, važno je napomenuti da legirani čelici smanjuju svoju temperaturu  $M_s$  (martenzit start), što treba uzeti u obzir prilikom određivanja toplinskog režima zavarivanja. S obzirom na stabilnost mehaničkih osobina i na višim temperaturama, CrMoB čelici upotrebljavaju se i za izradu kotlova koji rade na temperaturama do 480 °C.

Legirani NiCrMo čelici zahtijevaju se u poboljšanom stanju. Svi navedeni čelici imaju dovoljno zareznu žilavost i na -40 °C [9].

Pored niskolegiranih čelika legiranih borom, u ovu skupinu ubrajamo i čelike tipa 0,5 % Cr – 0,5 % Mo i 1,25 % Cr – 0,5 % Mo, 2,25 % Cr i 1 % Mo. Ove čelike karakterizira prisustvo kroma i molibdena što povećava njihovu prokaljivost, povećava temperaturu  $A_1$ , smanjuje dijelomično temperaturu  $A_3$  i temperaturu  $M_s$  pomiče bliže temperaturama do oko 400 °C. Čelici se uglavnom isporučuju u normaliziranom i žarenom ili poboljšanom stanju. Kada se ovi čelici koriste za zavarene konstrukcije, zavarljivost je osigurana relativno niskim sadržajem ugljika od 0,16 do 0,18 %C. Prije zavarivanja, provodi se predgrijavanje do 150 °C (najviše 240 °C), pri čemu toplinski režim zavarivanja obuhvaća i podatke o temperaturi nanošenja naknadnog prolaza (od 100 do 150 °C) i postupak hlađenja ili dogrijavanja [9].

Treći tip konstrukcijskih nelegiranih čelika su čelici za turbine i turbokompresore. Pri zavarivanju korijeni dio zavara izvodi se jednim od elektrolučnih postupaka zavarivanja (REL, MAG, TIG) automatizirano ili ručno, a ostali prolazi popunjavaju se zavarivanjem pod praškom (EPP). Čelici za rotore turbina su većinom niskolegirani CrMo ili NiCrMo koji se koriste u poboljšanom stanju sa granicom rečenja iznad 450 pa do 600 MPa. S obzirom na zahtijevanu čvrstoću, ovi čelici imaju veći sadržaj ugljika (od 0,25 do 0,30 %). Zbog osiguravanja sitnozrnatosti, a prije svega radi postizanja zahtijevane čvrstoće poslije žarenja, legirani su vanadijem (do 0,30 %V), u nekim slučajevima mikrolegirani Ti ili Nb. Upotreba ovih legiranih elemenata zahtijeva veliku pažnju pri zavarivanju, jer kod nesavladane tehnologije zavarivanja može doći do pojave toplih pukotina. Ako je utvrđeni toplinski režim zavarivanja, koji zahtijeva predgrijavanje od 250 do 350 °C, zatim održavanje temperature između dva uzastopna prolaza, dogrijavanje i neposredno žarenje bez međuhlađenja onda najvažniji problem održavanja homogenosti zavarenog spoja ostaje moguća pojava vrućih pukotina i pukotina uslijed žarenja [9].

#### 3.1.4. Zavarljivost visokolegiranih čelika

Ovi čelici manje se koriste za zavarene konstrukcije, a više u energetici i kemijskoj industriji. Ipak, spomenut će se i jedna skupina ovih čelika koja ima i konstrukcijsku primjenu. To su tzv. *maraging* čelici. Taj naziv dolazi iz engleskog – *martensit aging* (dozrijevanje martenzita). Primjeri konstrukcijske primjene su: mehanički visokopterećeni dijelovi zrakoplova i helikoptera, dijelovi trkaćih automobila, dinamometri i dr. Ovi čelici su po sastavu niskougljični (<0,03 %C), visokolegirani u ternarnom sustavu: Fe-Ni-Co ili podsustavima Fe-Ni-Cr ili Fe-Co-Cr s dodacima Mo, Ti, Al, Co te eventualno B i Zr. Okvirni kemijski sastav prikazan je u tablici 3. [6,9].

**Tablica 3. Kemijski sastav *maraging* čelika**

Kemijski element	Ni	Co	Mo	Ti	Al
Udio kemijskog elementa, %	< 18	7 - 14	3 - 6	0,15 - 2	0,05 – 0,2

Osim visoke granice razvlačenja ( $R_{p0,2} > 2200$  MPa), vlačne čvrstoće ( $1900 < R_m < 2900$  MPa), visoke lomne žilavosti, čelici *maraging*, imaju bolja tehnološka svojstva u odnosu na ostale visokočvrste čelike, a to su: male deformacije pri toplinskoj obradi, dobra obradljivost odvajanjem čestica te dobra zavarljivost zahvaljujući niskim udjelima ugljika, fosfora i sumpora. Za zavarivanje većine *maraging* čelika nije obavezno predgrijavanje pri zavarivanju, već se kontrolira temperatura između dva uzastopna prolaza (najviše 50 °C). Konkretni režim zavarivanja treba odrediti s obzirom na stvarni sastav čelika.

### 3.2. Dodatni materijal za zavarivanje konstrukcijskih čelika

Kvaliteta i svojstva zavarenog spoja u velikoj mjeri ovise o izboru dodatnog materijala. Najvažnije je osigurati zadovoljavajuću čvrstoću zavara koja nebi smjela biti niža od čvrstoće osnovnog metala. Pravilan izbor dodatnog materijala treba osigurati minimalno ili potpuno isključenje pojave difuzijskih slojeva krhkih struktura kao i mogućih pukotina. Općenito, treba voditi računa o izboru dodatnog materijala kod zavarivanja čelika, kako bi se osigurala tražena struktura zavarenog spoja zadovoljavajućih mehaničkih svojstava, otpornost prema selektivnoj i napetosnoj koroziji, niska osjetljivost na krhkost te otpornost na toplinski zamor [8].

#### 3.2.1. Dodatni materijali za zavarivanje ugljičnih, ugljično-manganskih i mikrolegiranih čelika

Izbor dodatnog materijala za zavarivanje ovisi o zahtjevanim osobinama zavarenog spoja. Kod ručnog elektrolučnog postupka (REL) mogu se upotrijebiti svi tipovi obloženih elektroda. Ipak, kvalitativno najbolje vrijednosti zarezne žilavosti dobiju se upotrebom bazičnih elektroda. Ukoliko je stupanj miješanja metala zavara nizak, dovoljno je zavarivanje nelegiranim elektrodama te je za čelike veće čvrstoće i sa višim sadržajem Mn dovoljno korištenje nelegiranih elektroda. Za veće zahtjeve kvalitete zavara, koriste se elektrode ili žice legirane molibdenom (od 0,30 do 0,50 %) ili MnNi, pri čemu je sadržaj Ni između 1,0 i 1,5 % (za zavarivanje pod praškom do 2 %). Za zavarivanje pod praškom poželjno je upotrijebiti prašak sa visokim sadržajem  $Al_2O_3$  i CaO. Optimalni rezultati dobivaju se ograničavanjem unosa topline na 25 do 28 kJ/cm.

Kod čelika sa smanjenim sadržajem perlita i besperlitne čelike koriste se legirani MnMo, odnosno MnNiMo dodatni materijali.

U tablici 4. dan je prikaz elektroda za zavarivanje nelegiranih čelika.

**Tablica 4. Elektrode za zavarivanje nelegiranih čelika proizvođača Elektroda Zagreb d.d. [10]**

Naziv	HRN EN ISO	AWS
ADRIA R	E 35 0 RR 12	E6013
EZ – 7 C	E 42 3 C 25	E7010
EZ – 7 C Mo	E 42 3 Mo C 25	E7010 – A1
EZ – 8 RC	E 42 0 RC 11	E6013
EZ – 10 R	E 42 0 RR 12	E6013
E7 – 10 RC	E 42 0 RC 11	E6013
EZ – 11 F	E 42 0 RR 12	E6013
EZ – 130	E 42 0 RR 53	E7024
EZ – 180 R	E 42 0 RR 73	E7024

### 3.2.2. Dodatni materijali za zavarivanje niskolegiranih čelika

Za zavarivanje niskolegiranih čelika koriste se legirani dodatni materijali.

U slučaju MoB čelika to su dodatni MnMo materijali, odnosno MnNi. U slučaju CrMoB i NiCrMoB koriste se kompleksno legirani dodatni materijali (MnNiCr, MnNiCrMo) koji daju odgovarajuću čvrstoću i prijelazne temperature. S obzirom da su navedeni materijali osjetljivi na djelovanje vodika i veće vrijednosti zaostalih naprezanja, pored predgrijavanja i dogrijavanja, potrebno je pri tehnologiji zavarivanja kontrolirati udio vodika.

Za zavarivanje čelika tipa 0,5 % Cr – 0,5 % Mo i 1,25 % Cr – 0,5 % Mo, 2,25 % Cr i 1 % Mo koriste se niskolegirani dodatni materijali MnMo, MnNiMn ili tipa MnCrMo, ovisno o zahtjevanoj čvrstoći i prijelaznoj temperaturi metala zavara.

U tablici 5. i 6. dan je prikaz elektroda i žica za zavarivanje niskolegiranih čelika proizvođača Elektroda Zagreb d.d.

**Tablica 5. Elektrode za zavarivanje nelegiranih i niksoplegiranih čelika proizvođača Elektroda Zagreb d.d. [10]**

Naziv	HRN EN ISO	AWS
EZ – 2 B	E 42 4 B 32	E7016
EZ – 50 B	E 42 4 B 42 H5	E7018 – 1
EZ – 500 B	E 46 4 B 42 H5	E7018 – 1
EZ – 500 LB	E 46 4 B 42 H3	E7018 – 1
EZ 60 B	E 50 6 1Ni B 42 H5	E8018 – G
EZ – 65 B	E 50 4 B 42 H5	E8018 – G

**Tablica 6. Žice za zavarivanje nelegiranih i niskoplegiranih čelika proizvođača Elektroda Zagreb d.d. [10]**

Naziv	HRN EN ISO	AWS
EZ – SG 2	G 42 4 C/M 3 3Si1	ER70S - 6
EZ - SG 3	G 46 4 C/M 4Si1	ER70S - 6
EZ – SG Mo	G 46 2 M 2Mo	ER80S - G
EZ – SG Ti	G 42 2 C/M 2Ti	ER70S - 2
EZ – SG CORTEN	G 42 2 C/M 0	ER80S - G
EZ – SG 100	G 69 4 M Mn3Ni1CrMo	ER100S – G
EZ – SG 120	G 89 6 M Mn4Ni2CrMo	ER120S - G

### 3.2.3. Dodatni materijali za zavarivanje maraging čelika

Kod zavarivanja 9 %Ni *maraging* čelika, ne može se upotrijebiti dodatni materijal istog sastava, jer bi metal zavara bio sklon pojavi pukotina i njegova žilavost bi bila nedovoljna s obzirom na osnovni materijal. Zato se upotrebljava dodatni materijal koji sadrži 4 do 6 %  $\delta$ -ferita, npr. 20 Cr13Ni3M0. Drugi tipovi dodatnih materijala su *Inconel*, *Hastelloy C* ili *Carbowire* na bazi nikla.

## 4. PARAMETRI TEKSTURE POVRŠINE

Jedan od glavnih pokazatelja kvalitete nekog dijela izrađenog WAAM postupkom je tekstura površine. Zbog taloženja slojeva jedan na drugi, često se javljaju površinske nepravilnosti i valovitost koje je potrebno svesti na minimum kako bi se nakon obrade odvajanjem čestica dobila što veća efektivna širina zida. Zbog toga je važno kontrolirati površinsku hrapavost u svrhu poboljšanja kvalitete procesa. Pomoću norme ISO 25178-2 definirana je sva potrebna terminologija, definicije, parametri teksture površine, njihovi matematički izrazi itd. Prema normi postoji šest grupa 3D parametara hrapavosti [11]:

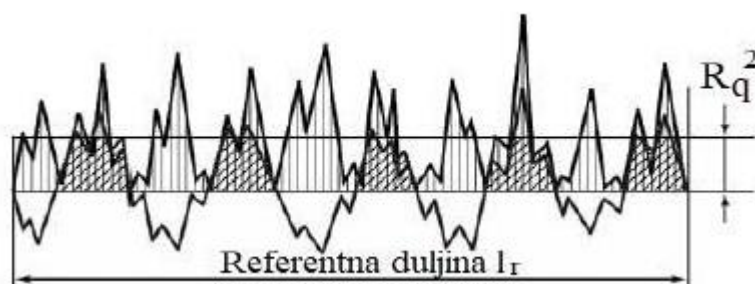
1. Amplitudni
2. Prostorni
3. Hibridni
4. Funkcionalni
5. Parametri značajke
6. Ostali 3D parametri

Za potrebe eksperimentalnog dijela završnog rada potrebni su amplitudni parametri [11]:

- Srednje kvadratno odstupanje,  $S_q$
- Koeficijent asimetrije površine,  $S_{sk}$
- Koeficijent oštine površine,  $S_{ku}$
- Najveća visina vrha površine,  $S_p$
- Najveća udubina površine,  $S_v$
- Najveća visina neravnine površine,  $S_z$
- Srednje aritmetičko odstupanje površine,  $S_a$

#### 4.1. Srednje kvadratno odstupanje, $S_q$

Srednje kvadratno odstupanje definira se kao srednje kvadratno odstupanje površine na ordinati unutar definiranog područja. To je ekvivalent standardnoj devijaciji visina. Parametar  $S_q$  je ravninsko produljenje od  $R_q$  (srednje kvadratno odstupanje linije) [12]. Na slici (Slika 4.) je dan prikaz parametra  $R_q$  te su navedene jednadžbe za oba parametra.



Slika 4. Srednje kvadratno odstupanje linije,  $R_q$  [12]

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

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x, y) dx dy} \quad (3)$$

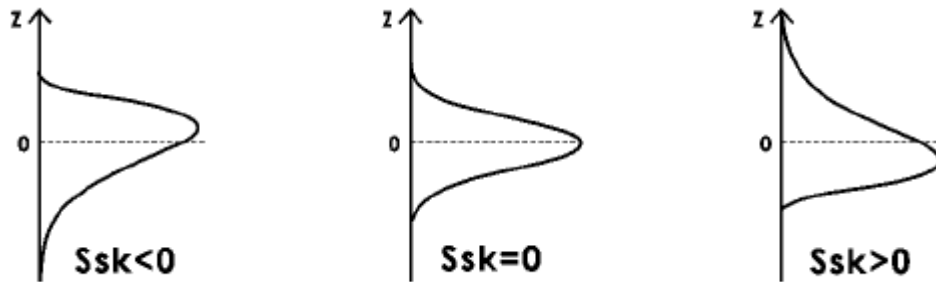
#### 4.2. Koeficijent asimetrije površine, $S_{sk}$

Koeficijent asimetrije površine je amplitudni parametar čija vrijednost predstavlja stupanj iskrivljenosti, odnosno tendenciju površinske hrapavosti u odnosu na prosječnu vrijednost ispitane površine (srednje ravnine). Primjeri ovog parametra prikazani su na slici (Slika 5.), a matematički zapis je dan jednadžbom (3) [13].

$S_{sk} < 0$ : Raspodjela visina je iskrivljena iznad srednje ravnine.

$S_{sk} = 0$ : Raspodjela visina je simetrična oko srednje ravnine.

$S_{sk} > 0$ : Raspodjela visina je iskrivljena ispod srednje ravnine.



Slika 5. Primjeri koeficijenta asimetrije površine,  $S_{sk}$  [12]

$$S_{sk} = \frac{1}{Sq^3} \left[ \frac{1}{A} \iint_A z^3(x, y) dx dy \right] \quad (4)$$

#### 4.3. Koeficijent oštine površine, $S_{ku}$

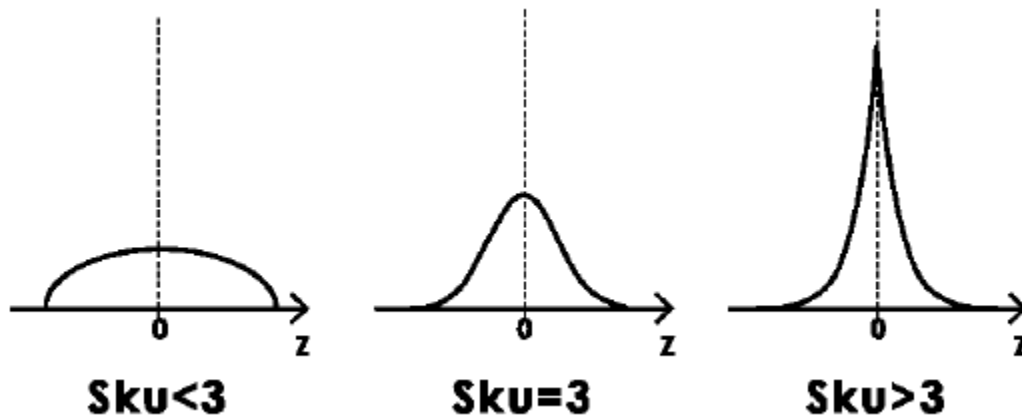
Vrijednost ovog parametra predstavlja mjeru oštine hrapavosti profila površine. Slika 6. prikazuje primjere koeficijenta oštine površine, a matematički zapis dan je jednačbom [12].

$S_{ku} < 3$ : Oblik raspodjele visina hrapavosti površine je iskrivljen iznad srednje ravnine.

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

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



Slika 6. Primjer koeficijenta oštine površine,  $S_{ku}$  [12]

$$S_{ku} = \frac{1}{S q^4} \left[ \frac{1}{A} \iint_A z^4(x, y) dx dy \right] \quad (5)$$

#### 4.4. Najveća visina vrha površine, $S_p$

Vrijednost ovog parametra predstavlja najveću visinu vrha površine određenog područja. Parametar  $S_p$  je površinsko produljenje parametra  $R_p$  (najveća visina vrha linije). Na slici (Slika 7.) je prikazan primjer najveće visine vrha linije ( $R_p$ ), te su dane njihove jednadžbe (5) i (6) [12].

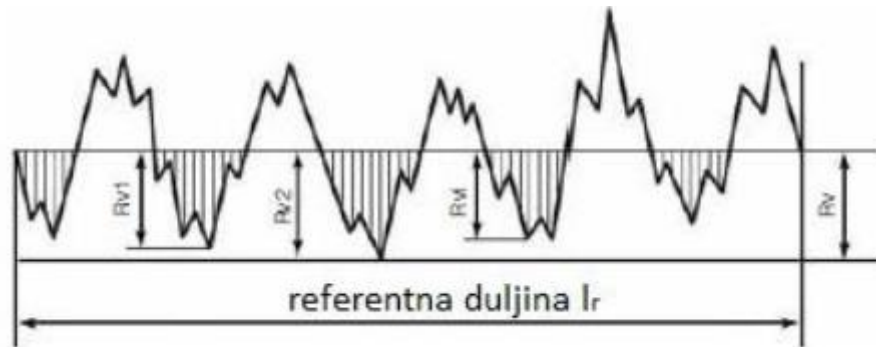
Slika 7. Najveća visina vrha linije,  $R_p$  [12]

$$R_p = \max(z(x)) \quad (6)$$

$$S_p = \max(z(x, y)) \quad (7)$$

#### 4.5. Najveća udubina površine, $S_v$

Vrijednost  $S_v$  parametra predstavlja najveću visinu udubine određenog ispitnog područja. Slika 8. prikazuje parametar  $R_v$  (najveća dubina profila linije) te je  $S_v$  površinsko produljenje parametru  $R_v$ . Matematički zapisi za oba primjera parametra dani su jednadžbama (7) i (8) [12].



Slika 8. Najveća dubina profila linije,  $R_v$  [12]

$$R_v = |\min(z(x))| \quad (8)$$

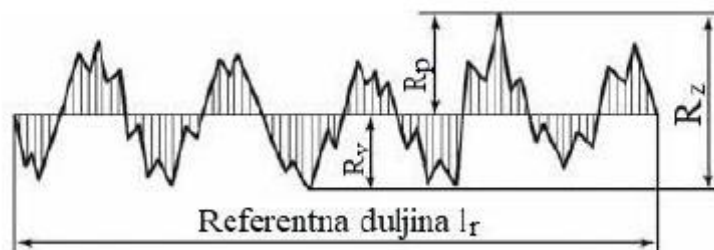
$$S_v = |\min(z(x, y))| \quad (9)$$

#### 4.6. Najveća visina neravnine površine, $S_z$

Amplitudni parametar  $S_z$  definira se kao zbroj najveće visine vrha površine i najveće udubine površine. Na slici (Slika 9.) je primjer za najveću visinu neravnine profila linije ( $R_z$ ), a matematički zapisi parametara dani su jednadžbama (9) i (10) [12].

$$R_z = R_p + R_v \quad (10)$$

$$S_z = S_p + S_v \quad (11)$$

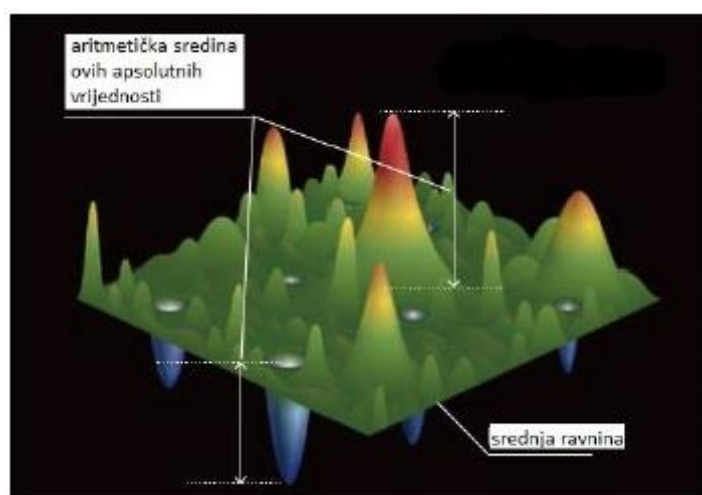


Slika 9. Najveća visina neravnine linije,  $R_z$  [12]

#### 4.7. Srednje aritmetičko odstupanje površine, $S_a$

Amplitudni parametar  $S_a$  izražava se kao apsolutna vrijednost razlike u visinama svake točke u usporedbi s aritmetičkom sredinom površine. Kao i kod svih spomenutih amplitudnih parametara, ovaj parametar je površinsko produljenje parametra  $R_a$  (srednje aritmetičko odstupanje profila linije) koji se općenito koristi za procjenu hrapavosti površine [12]. Slika 10. prikazuje srednje aritmetičko odstupanje površine. Matematički zapis dan je jednadžbom (11).

$$S_a = \frac{1}{A} \iint_A |z(x, y)| dx dy \quad (12)$$



Slika 10. Srednje aritmetičko odstupanje površine,  $S_a$  [12]

## 5. EKSPERIMENTALNI DIO

Ekperimentalni dio završnog rada proveden je u Laboratoriju za zavarivanje na Fakultetu strojarstva i brodogradnje, Sveučilišta u Zagrebu. Zadatak je bio izraditi dva kosa zida WAAM postupkom pomoću robotske stanice. Cilj rada bio je optimizirati parametre zavarivanja pri izradi kosog zida i odrediti utjecaj nagiba pištolja na teksturu površine.

Ekperimentalni dio sastoji se od sljedećih dijelova:

- predeksperimenta
- pripreme i učvršćivanje podloge za zavarivanje
- zavarivanje dva zida pod različitim kutovima
- pripreme uzoraka za analizu
- analize i ispitivanja pripremljenih uzoraka.

### 5.1. Oprema za zavarivanje

Postupak zavarivanja zidova izveden je robotiziranim MAG postupkom na robotskoj stanici Almega OTC AX V6 (Slika 11.). Robotska stanica složeni je uređaj koji se sastoji od robotske ruke sa šest stupnjeva slobode gibanja na kojoj je spojen pištolj za zavarivanje. Programiranje se izvodilo *on-line* metodom programiranja pomoću privjeska za programiranje (Slika 12). Programiranje se sastojalo od određivanja putanje pištolja za zavarivanje te tehnoloških parametara zavarivanja. Robotska stanica povezana je sa izvorom struje DP 400, dodavačem žice te zaštitnim plinom.



Slika 11. Robotska stanica Almega OTC AX V6



Slika 12. Privjesak za programiranje

## 5.2. Dodatni materijal za zavarivanje

Za izradu zidova koristila se puna žica trgovačkog naziva EZ - SG2, koji proizvodi Elektroda Zagreb d.d., promjera 1,2 mm. Ova žica koristi se za zavarivanje nelegiranih i niskolegiranih čelika čvrstoće do 590 MPa. Kemijski i mehanički sastav dodatnog materijala dani su u tablicama (Tablica 7., Tablica 8.) [10].

**Tablica 7. Kemijski sastav dodatnog materijala EZ-SG2 [10]**

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

**Tablica 8. Mehanička svojstva čistog metala zavara [10]**

Mehanička svojstva	Minimalna granica tečenja $R_e$ , MPa	Vlačna čvrstoća $R_m$ , Mpa	Istezljivost $A_5$ , %	Udarni rad loma, KV, J (-40°C)
Vrijednost	> 430	500 – 640	> 22	≥ 47

## 5.3. Zaštitni plin

Zaštitni plin koji se koristio bio je mješavina argona i ugljikova dioksida, a volumni sastav je bio u odnosu 82% Ar i 18% CO<sub>2</sub>. Prema normi EN ISO 14175 plin ima oznaku M21-ArC-18. Protok plina iznosio je od 16 do 20 l/min.

### 5.3. Optimiranje parametara zavarivanja

Predeksperimentom su utvrđeni optimalni parametri zavarivanja i način izrade zidova. Prije početka zavarivanja fiksirala se podloga za zavarivanje koja je prethodno očišćena alkoholom, kako bi se uklonile eventualne nečistoće i masnoća te izbjeglo nestabilno zavarivanje. Podloga za zavarivanje debljine 10 mm, napravljena je od konstrukcijskog čelika oznake S235. Za potrebe predeksperimenta nije mjeran kut nagiba pištolja već je zavareno nekoliko uzastopnih prolaza (Slika 13.). Cilj predeksperimenta je optimiranje parametara zavarivanja za izradu kosog zida. Prvi problem javio se nakon petog prolaza, a to je bila pojava pora. Poroznost je nastala zbog prevelikog slobodnog kraja žice jer je time talina manje zaštićena plinom. Prvih nekoliko prolaza taj problem nije se pojavljivao jer se plin izlaskom iz sapnice sudario sa podlogom za zavarivanje pa je strujanje bilo turbulentno. To je poželjno jer se tako dodatno štiti talina od atmosferskih plinova. Smanjenjem slobodnog kraja žice na 10 mm izbjegla se pojava pora u narednim prolazima. Idući problem bila je nepravilna geometrija zida na početnom dijelu zida, odnosno nadvišenje na početku prolaza (Slika 14.). Na tom dijelu, nadvišenje je nastalo zbog putanje pištolja za zavarivanje u jednom smjeru (tzv. raster). Promjenom gibanja pištolja u oba smjera po paralelnim pravcima (tzv. zig – zag) smanjile su se geometrijske nepravilnosti.



**Slika 13. Probe izrade kosih zidova različitim parametrima zavarivanja**

Najstabilniji električni luk i najbolji izgled zavora dobilo se sljedećim parametrima:

- jakost struje: 110 A
- napon: 17 V
- brzina zavarivanja: 35cm/min.



**Slika 14. Gore – poroznost, dolje – nadvišenje na početku zavarivanja**



#### 5.4. Izrada uzoraka

Podloga za zavarivanje očišćena je alkoholom i učvršćena na stol za zavarivanje. Nakon fiksiranja podloge, određen je nagib kuta i putanja gibanja pištolja za zavarivanje. Za izradu prvog zida, nagib kuta pištolja iznosio je  $60^\circ$ , a drugog  $45^\circ$ . Nagib pištolja određen je ručno, pomoću kutomjera (Slika 15). Putanja gibanja pištolja i parametri zavarivanja definirani su pomoću dva programa za pojedini zid. Jedan program definira putanju gibanja pištolja u jednom smjeru, a drugi program u suprotnom smjeru. Parametri zavarivanja identični su za oba zida i utvrđeni su predeksperimentom.

Na slici (Slika 16.) je prikazan početni položaj robota i pripremljena i stegnuta podloga za zavarivanje.



Slika 15. Određivanje kuta nagiba pištolja za zavarivanje



**Slika 16. Početni položaj pištolja i učvršćena podloga za zavarivanje**

Prvo se izrađivao zid nazivnog kuta od  $60^\circ$ . Netom prije zavarivanja mjerena je temperatura prethodnog prolaza. Temperatura se mjerila u tri točke zida (lijevo, sredina, desno) Fluke IR Thermimetar uređajem koji beskontaktno mjeri temperaturu (Slika 18.). Ukoliko je iznosila više od  $100^\circ\text{C}$ , komprimiranim zrakom hladila bi se podloga i zid (Slika 18.). Na početku izrade zidova, odvođenje topline bilo je brže zbog kondukcije pa nije bilo potrebno hlađenje. Izgled prvog prolaza prikazan je na slici (Slika 17.)



**Slika 17. Prvi prolaz zida nazivnog kuta  $60^\circ$**



**Slika 18. Hlađenje zida komprimiranim zrakom (lijevo) i uređaj za beskontaktno mjerenje temperature**

Nakon svakog prolaza mjerene je visina zida pomičnim mjerilom okomito na podlogu. Visina zida mjerena je u tri točke, a njihova prosječna vrijednost dana je u tablicama. Visina prolaza izračunata je sljedećom formulom:

$$h_{\text{prolaza}} = \frac{h}{\sin\alpha} \quad (13)$$

gdje je:

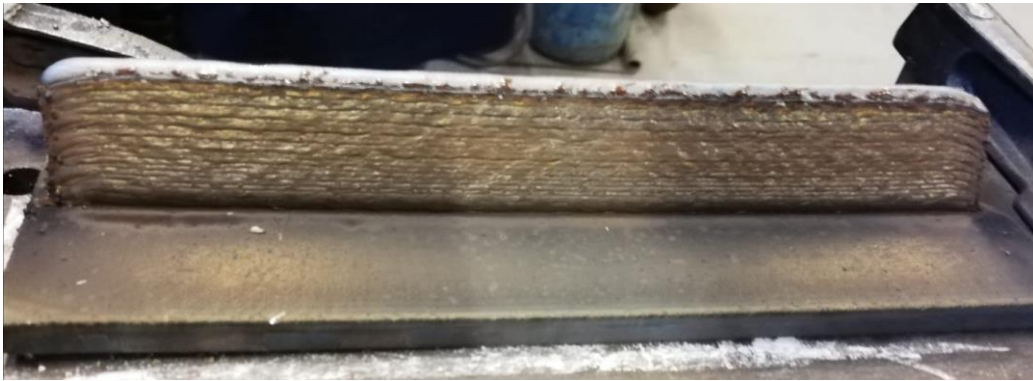
$h_{\text{prolaza}}$  – visina prolaza,

$h$  – visina zida,

$\alpha$  – stvarni kut zida.

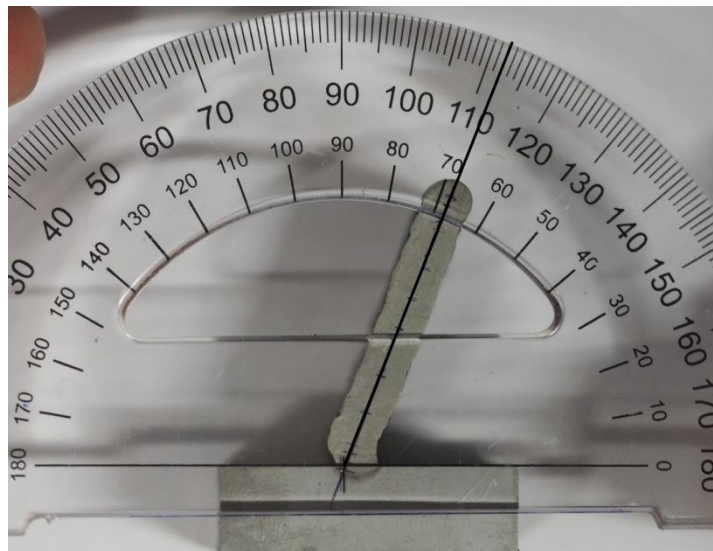
Svaki zid izrađen je od ukupno 25 prolaza.

Konačni izgled zida prikazan je na slici (Slika 19.).



**Slika 19. Konačan izgled zida nazivnog kuta 45°**

Kod nazivnog kuta pištolja od 60°, stvarni kut zida je 68°, a kod nazivnog kuta od 45°, stvarni kut zida iznosi 56°. Razlika u vrijednosti kutova nastala je zbog nedovoljno preciznog određivanja kuta nagiba pištolja te razlijevanja taline uslijed djelovanja gravitacijske sile. Očitavanje stvarnih kutova zidova prikazano je na slikama (Slika 20., Slika 21.).



**Slika 20. Očitavanje kuta za prvi zid nazivnog kuta 60°**



**Slika 21. Očitavanje kuta drugog zida nazivnog kuta  $45^\circ$**

U tablicama (**Tablica 9.**, **Tablica 10.**) navedeni su očitani parametri jakosti struje i napona, temperatura prethodnog prolaza netom prije zavarivanja te visina prolaza mjerena okomito na podlogu i izračuna stvarna visina svakog prolaza .

Tablica 9. Parametri zavarivanja prvog zida nazivnog kuta od 60°

Br. prolaza	Jakost struje, A	Napon, V	Temperatura, °C	Prosječni prirast visine zida, mm	Visina prolaza, mm
1.	102	16,9	23	2,17	2,34
2.	106	16,7	30	1,45	1,56
3.	102	17,1	70	1,10	1,19
4.	101	16,9	90	1,01	1,01
5.	102	17,3	88	1,45	1,56
6.	101	17,1	89	0,97	1,05
7.	102	17,2	89	1,33	1,43
8.	102	17,1	95	1,01	1,01
9.	100	17,6	93	0,97	1,05
10.	102	16,9	91	1,25	1,35
11.	102	17,1	87	1,38	1,49
12.	104	17,1	88	1,14	1,23
13.	102	17,3	95	1,58	1,70
14.	104	17,1	94	0,97	1,05
15.	103	17,2	92	0,95	1,02
16.	102	17,2	96	1,41	1,52
17.	103	17,1	93	1,24	1,34
18.	103	17,1	94	1,10	1,19
19.	102	17,3	89	1,35	1,46
20.	104	17,2	96	1,13	1,22
21.	102	17,1	95	1,45	1,56
22.	103	17,1	97	1,53	1,65
23.	102	17,2	80	0,93	1,00
24.	103	17,0	92	1,34	1,45
25.	103	17,1	90	0,95	1,02
Prosječne vrijednosti	102	17,1	85	1,25	1,34

Tablica 10. Parametri zavarivanja drugog zida nazivnog kuta 45°

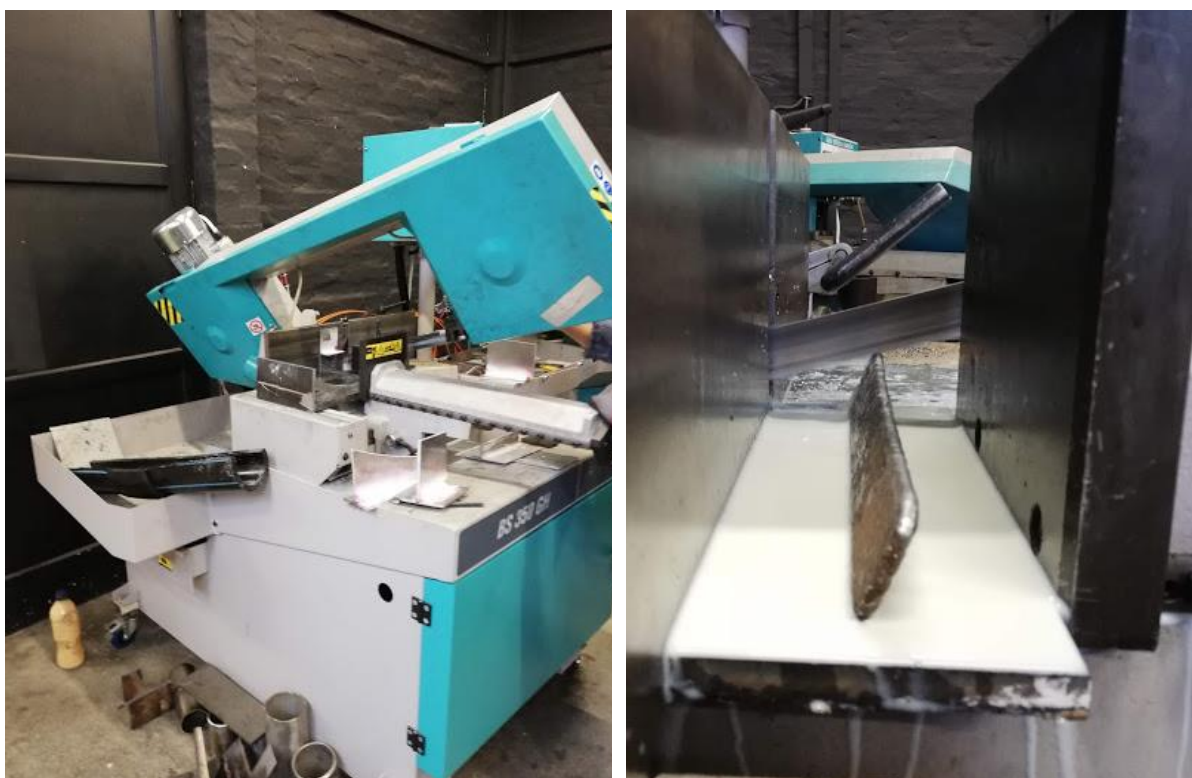
Br. Prolaza	Jakost struje, A	Napon, V	Temperatura, °C	Visina zida, mm	Visina prolaza, mm
1.	101	17,1	24	1,97	2,38
2.	104	17,0	69	1,41	1,70
3.	103	17,2	90	1,00	1,02
4.	102	17,1	96	1,37	1,65
5.	102	17,3	90	0,70	0,84
6.	101	17,1	92	1,02	1,23
7.	103	17,1	84	1,05	1,27
8.	102	17,2	95	1,13	1,36
9.	101	17,1	70	1,17	1,41
10.	101	17,1	98	0,96	1,16
11.	101	17,2	95	1,22	1,47
12.	105	17,1	95	1,08	1,30
13.	103	17,2	95	1,00	1,21
14.	102	17,1	96	1,00	1,21
15.	105	17,1	98	1,15	1,39
16.	103	17,2	90	0,99	1,19
17.	101	17,1	99	1,25	1,51
18.	103	16,9	97	1,10	1,33
19.	101	17,1	93	1,02	1,23
20.	101	17,1	95	1,10	1,33
21.	103	17,2	98	1,01	1,22
22.	102	17,1	94	0,99	1,19
23.	102	17,2	98	1,34	1,62
24.	101	17,2	97	0,95	1,15
25.	104	16,9	98	1,31	1,58
Prosječne vrijednosti	102	17,1	90	1,13	1,36

## 5.5. Priprema uzoraka za ispitivanja

Nakon izrade zidova, vršilo se rezanje zidova tračnom pilom (Slika 22.). Prvo je odvojeno 10 mm na početku zida jer je taj dio nepravilne geometrije zbog više struje kod uspostave električnog luka. Nakon toga, rezan je uzorak zida duljine 25 mm koji je služio za daljnje ispitivanje tvrdoće, makrostrukture i mikrostrukture. Ostali dio zida odrezan je od podloge za zavarivanje i služio je za analizu parametara teksture površine.

Nakon rezanja uzorka 25 mm od svakog zida, oštri rubovi skinuti su turpijom i izvršilo se grubo brušenje brusnim papirom različite granulacije. Korišteni brusni papirom imali su redom slijedeće oznake: P80, P150, P240, P280, P320, P600.

Nakon brušenja i rezanja uzorci su isprani vodom kako bi se uklonile eventualne nečistoće.

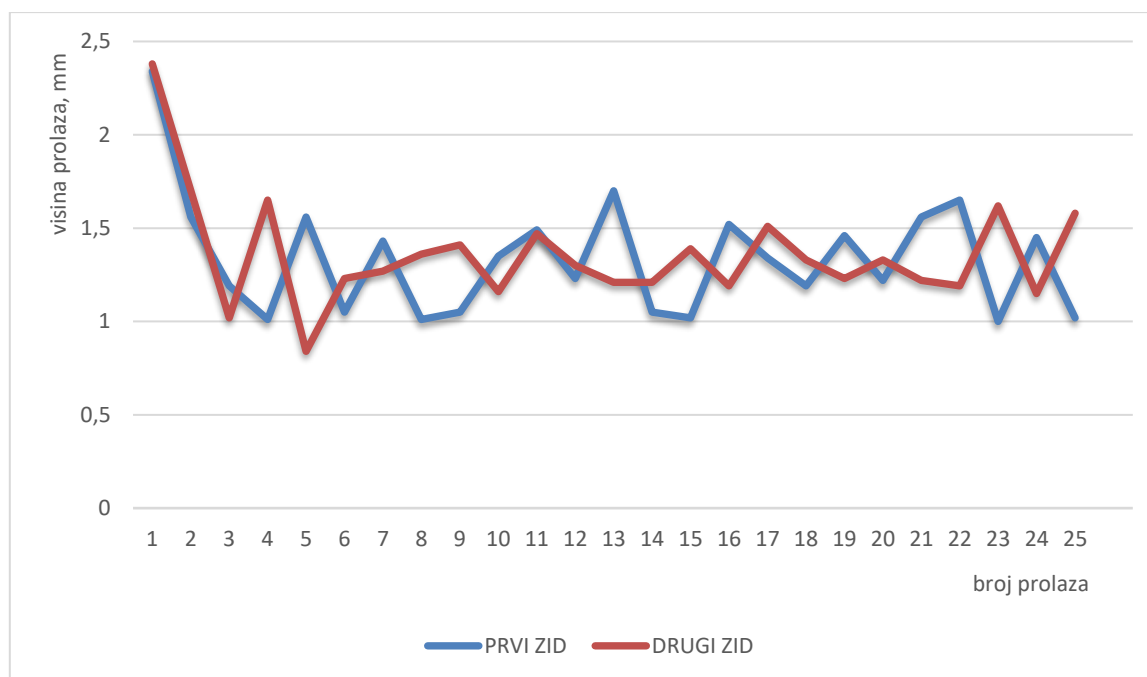


Slika 22. Rezanje zidova tračnom pilom



## 5.6. Analiza uzoraka

S obzirom na izmjerene visine zidova okomito na podlogu izračunata je i prosječna visina svakog prolaza za obadva zida. Za prvi zid nazivnog kuta od  $60^\circ$ , prosječna visina prolaza iznosi 1,34 mm, a za drugi zid nazivnog kuta  $45^\circ$ , iznosi 1,36 mm što i nije značajna razlika u visini prolaza. Na grafu (Slika 23.) može se vidjeti odstupanje u visini prvog prolaza od prosječne vrijednosti zidova. Prvi prolaz je dvostruko većeg iznosa zbog bržeg odvođenja topline, odnosno skrućivanje taline odvalo se brže nego u narednim prolazima, ali depozit materijala je isti. Zbog toga je na slikama vidljivo suženje zida na dnu (Slika 24., Slika 25.). Suženje zida na dnu, može se izbjeći snižavanjem brzine zavarivanja. Time bi se postigla ravnomjerna širina zida po presijeku.



Slika 23. Grafički prikaz prirasta visine po prolazu za drugi zid

### 5.6.1. Makroanaliza strukture

Makroanalizom uzoraka nisu uočene nepravilnosti i pogreške zavarivanja. Na uzorcima je jasno vidljiva linija staljivanja i zona utjecaja topline. Slabije je vidljiva granica između prolaza te nije uočeno nalijepljivanje slojeva. Penetracija dodatnog u osnovni materijal je zadovoljavajuća. Neovisno o promjeni nagiba kuta pištolja, kvaliteta uzoraka je ista. Makroizbrusci su prikazani na slikama (Slika 24., Slika 25.).



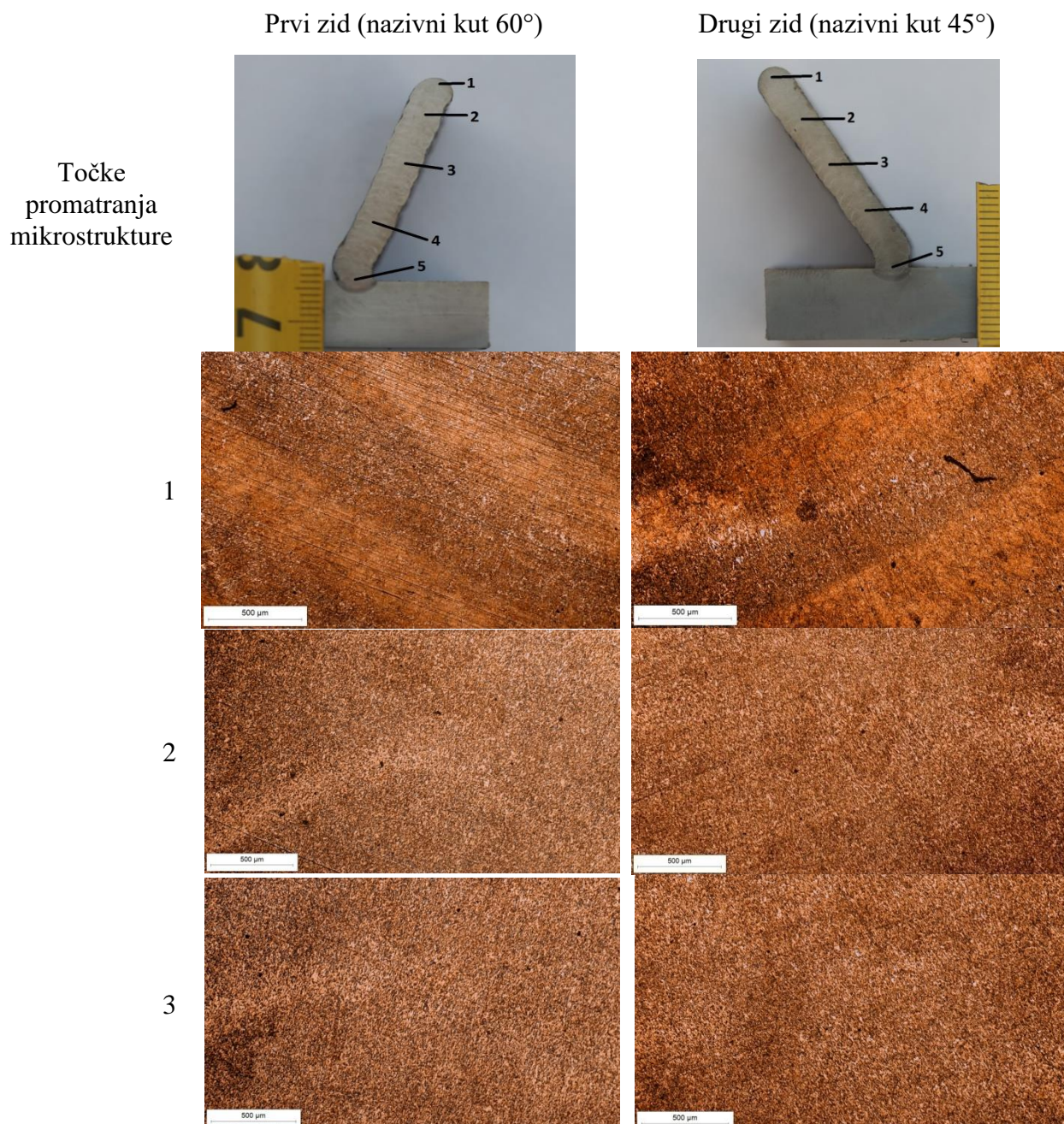
Slika 24. Makroizbrusak prvog zida nazivnog kuta od 60°

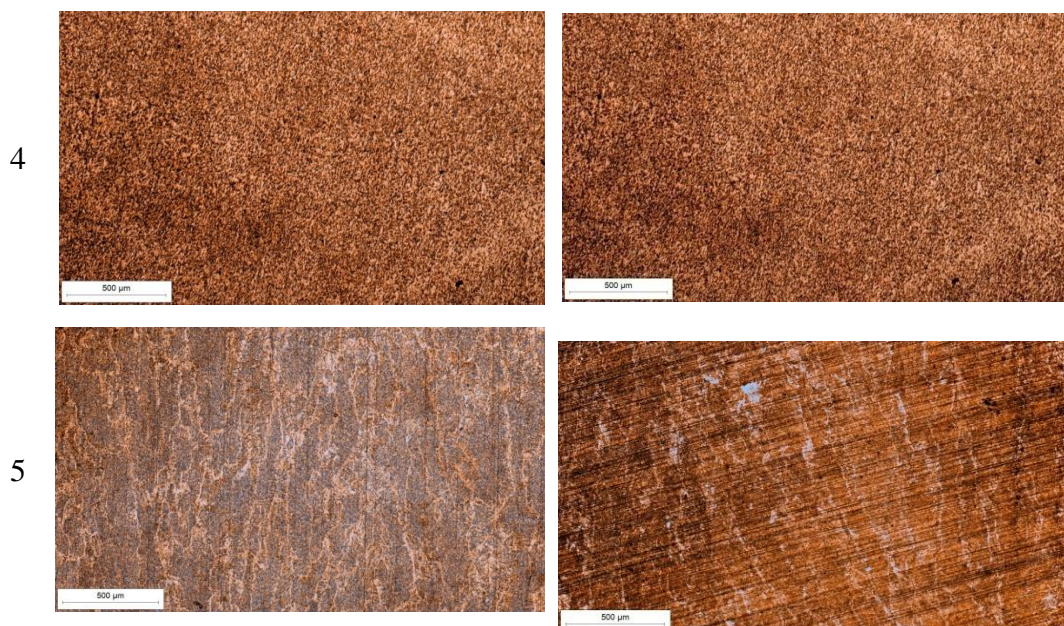


Slika 25. Makroizbrusak drugog zida nazivnog kuta od 45°

### 5.6.2. Mikrostruktura

Analiza mikrostrukture provedena je u laboratoriju Katedre za koroziju, svjetlosnim mikroskopom. Uzorci su nagriženi 3-postotnim nitalom u trajnju od 30 sekundi. Mikrostruktura dobivenih uzoraka prikazana je na slikama (Slika 26.).





**Slika 26. Mikrostruktura zidova**

Na prvoj točki promatrane mikrostrukture vide se linije prijelaza između prolaza, zrna su grublja nego na sredini uzoraka, jer nisu toplinski obrađena naknadnim prolazima. Na mikroskopskim fotografijama sredine uzorka vidi se homogenost materijala, bez nečistoća, pora i uključaka. Na prikazu mikrostrukture prvog prolaza, može se primjetiti izduženost zrna. Uspoređujući mikrostrukturu zidova, može se zaključiti da zidovi imaju jednaku mikrostrukturu.

### 5.6.3. Analiza tvrdoće

Nakon ispitivanja mikrostrukture provedeno je mjerenje tvrdoće uzoraka Vickers metodom (HV 10). Uređaj za mjerenje tvrdoće Reichter prikazan je na slici (Slika 27.). Tvrdoća je mjerena od vrha uzoraka prema osnovnom metalu kao što je prikazano na slici. Ispitivanje tvrdoće provedeno je u 13 točaka, od čega 4 na vrhu uzorka, 5 na sredini i 4 na dnu zida. Udaljenosti između mjernih točaka na vrhu zida i u zoni utjecaja topline iznose po 1 mm, a u središnjem dijelu zida 4 mm (Slika 28.).



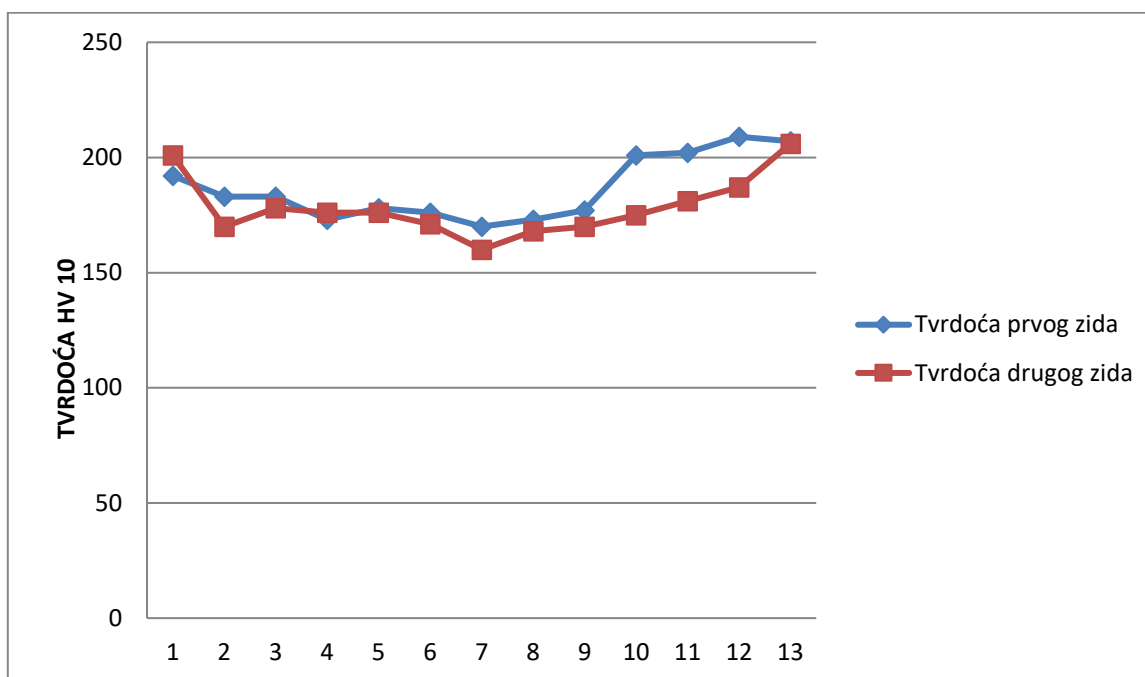
Slika 27. Uređaj za mjerenj tvrdoće



Slika 28. Raspored mjernih točaka tvrdoće za prvi zid (lijevo) i drugi zid (desno)

**Tablica 11. Vrijednosti tvrdoće za prvi i drugi zid**

<b>Tvrdoća HV 10</b>		
<b>Mjerenje</b>	<b>Prvi zid</b>	<b>Drugi zid</b>
1.	192	201
2.	183	170
3.	183	178
4.	173	176
5.	178	176
6.	176	171
7.	170	160
8.	173	168
9.	177	170
10.	201	175
11.	202	181
12.	209	187
13.	207	206



**Slika 29.** Usporedba tvrdoće po presjeku zidova

Na grafovima se vidi porast tvrdoće uzoraka na početku i na kraju zidova. Značajniji porast je na dnu zida zbog bržeg odvođenja topline. Kod posljednjeg prolaza, na vrhu, dolazi do porasta tvrdoće u odnosu na ostale prolaze, zbog toga što su prethodni prolazi svakim narednim ponovno zagrijani. Tvrdoća prvog zida nazivnog kuta od  $60^\circ$ , na dnu zida, počinje rasti prije u odnosu na drugi zid.

#### 5.6.4. Analiza parametara teksture površine

Analiza i ispitivanje parametara teksture površine izvodilo se skeniranjem površine uzoraka pomoću 3D skenera DAVID video SLS-2. Projektorom je usmjeren svjetlosni snop na površinu uzorka, a kamera je na temelju toga jednoznačno odredila prostorni položaj bilo koje točke na površini skeniranja. Skenirana je donja i gornja površina obadva uzorka (zida). Prije početka skeniranja, sve ispitne površine očišćene su alkoholom i nanesen je tanak sloj bijelog razvijaa kako bi se postigli što kvalitetniji rezultati (Slika 30.). Također, prilikom provedbe ispitivanja, nastojalo se postići zatamnjenje ispitne prostorije. Prikaz postupka 3D skeniranja dan je na slici (Slika 31.).



Slika 30. Pripremljen uzorak za ispitivanje površine i razvijaa Magnaflux SKD-S2

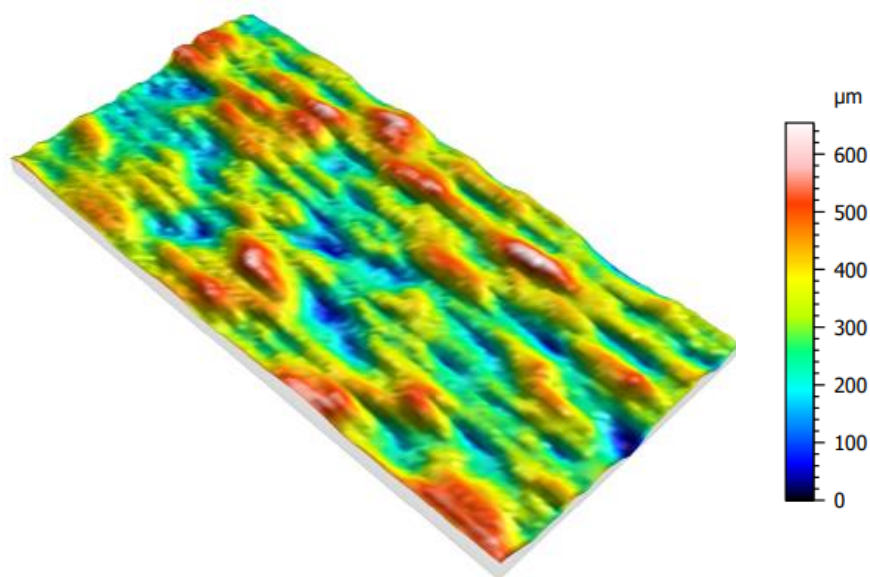


Slika 31. Prikaz postupka 3D skeniranja

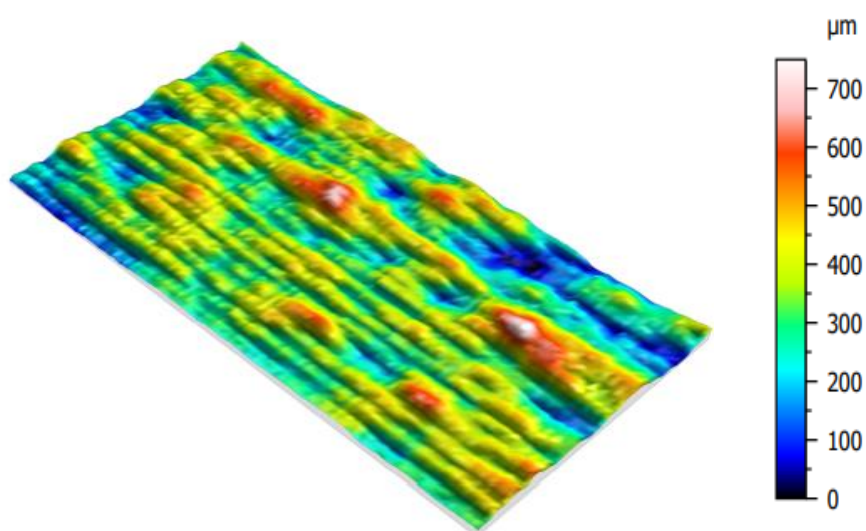


Nakon skeniranja, dobiveni uzorci obrađeni su u programu 3D builder, pri čemu su odrezani i spremljeni u *stl* format. Poslije toga, za obradu parametara teksture površine korišten je program MountainsMap. Parametri u programu MountainsMap usklađeni su sa normom ISO 25178 te su detaljno objašnjeni u poglavlju 4.

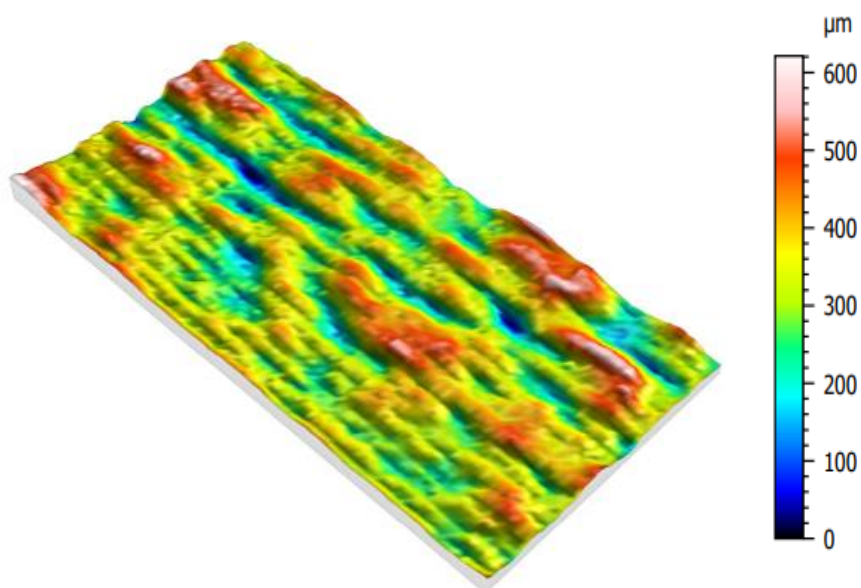
Na slikama je dan vizualni prikaz teksture površine.



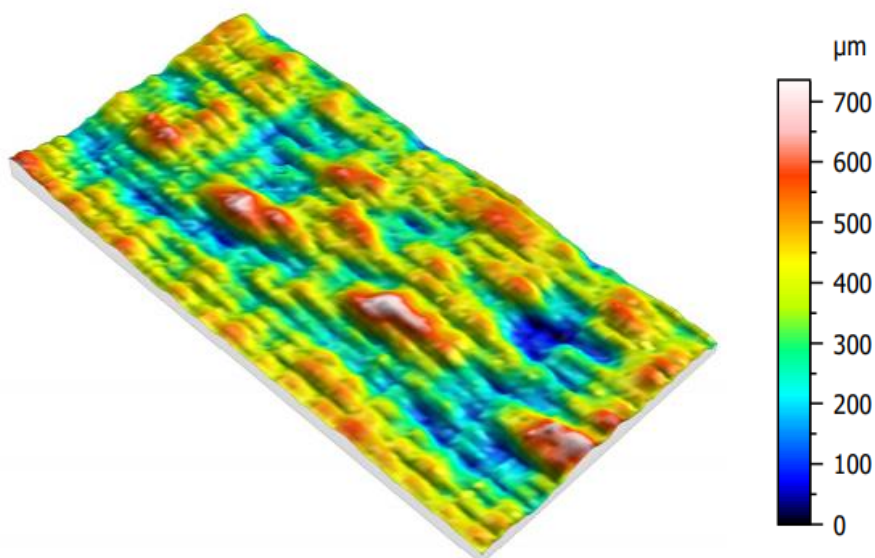
Slika 32. Vizualni prikaz gornje površine prvog zida nazivnog kuta  $60^\circ$



Slika 33. Vizualni prikaz donje površine prvog zida nazivnog kuta  $60^\circ$



**Slika 34.** Vizualni prikaz gornje površine drugog zida nazivnog kuta 45°



**Slika 35.** Vizualni prikaz donje površine drugog zida nazivnog kuta 60°

Najviši vrhovi prikazani su crveno-bijelom bojom, a niži dijelovi plavom i tamnoplavom. Na prvom uzorku značajnija je razlika između gornje i donje površine. Na gornjoj površini prevladavaju nadvišenja, a na donjoj udubine. Na drugom uzorku, razlika između udubina i nadvišenja je manja nego kod prvog uzorka, ali ipak na donjoj površini ima više udubina.

U tablicama (Tablica 12., Tablica 13.), dane su vrijednosti parametara teksture površine za obadva zida, zabilježene na gornjoj i donjoj površini prvog i drugog zida.

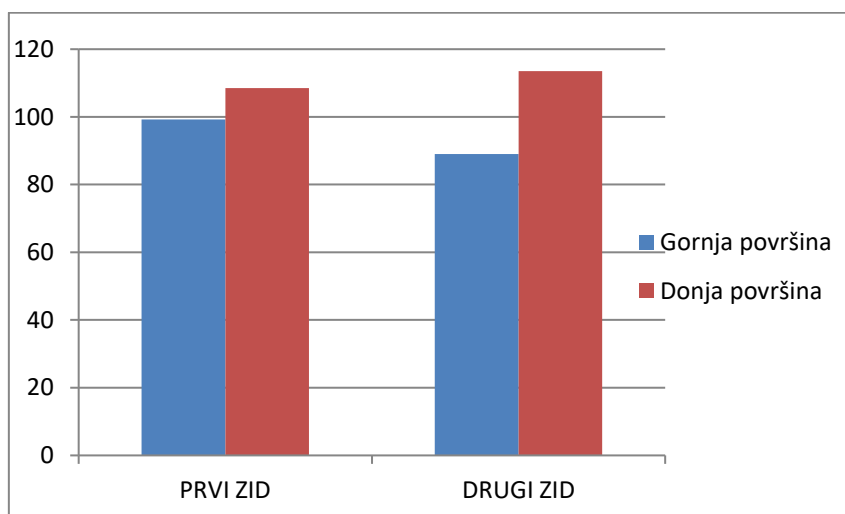
**Tablica 12. Parametri teksture površine prvog zida nazivnog kuta 60°**

Parametar teksture površine	Gornja površina	Donja površina
$S_q$	99,21 $\mu\text{m}$	108,5 $\mu\text{m}$
$S_{sk}$	0,1322	-0,01073
$S_{ku}$	2,732	3,263
$S_p$	324,2 $\mu\text{m}$	410,8 $\mu\text{m}$
$S_v$	329,9 $\mu\text{m}$	338,6 $\mu\text{m}$
$S_z$	654,1 $\mu\text{m}$	749,4 $\mu\text{m}$
$S_a$	79,90 $\mu\text{m}$	85,03 $\mu\text{m}$

**Tablica 13. Parametri teksture površine drugog zida nazivnog kuta 45°**

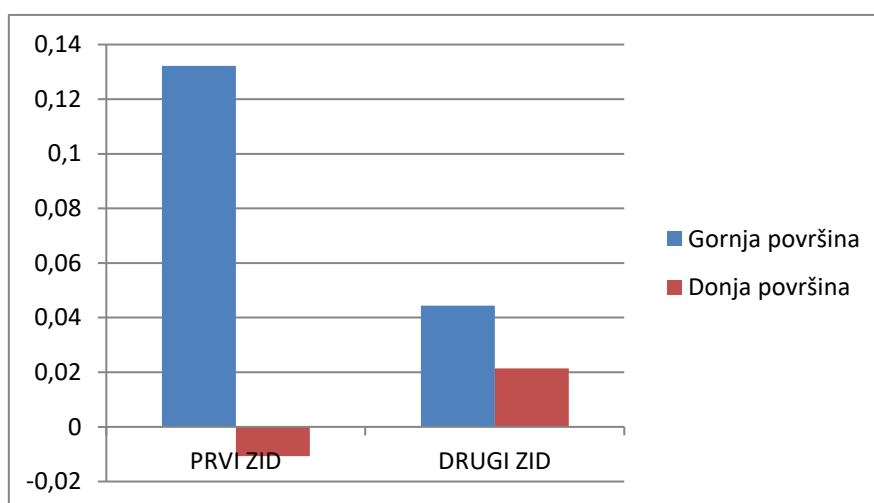
Parametar teksture površine	Gornja površina	Donja površina
$S_q$	89,05 $\mu\text{m}$	113,5 $\mu\text{m}$
$S_{sk}$	0,04437	0,0214
$S_{ku}$	3,096	2,874
$S_p$	283,9 $\mu\text{m}$	371,9 $\mu\text{m}$
$S_v$	337,3 $\mu\text{m}$	363,9 $\mu\text{m}$
$S_z$	621,2 $\mu\text{m}$	735,8 $\mu\text{m}$
$S_a$	69,95 $\mu\text{m}$	90,82 $\mu\text{m}$

Dijagramima je dan grafički prikaz odnosa svakog parametara, između gornje i donje površine svakog zida i zidova međusobno.



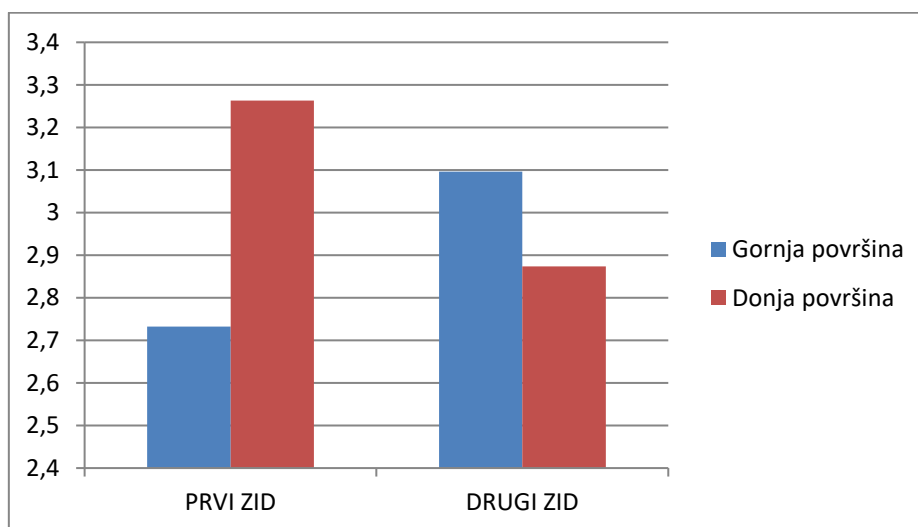
**Slika 36. Usporedba parametra  $S_q$**

Srednje kvadratno odstupanje ( $S_q$ ) najviše je na donjoj površini drugog zida nazivnog kuta  $45^\circ$ , a ujedno je i razlika između gornje i donje površine veća nego kod prvog zida.



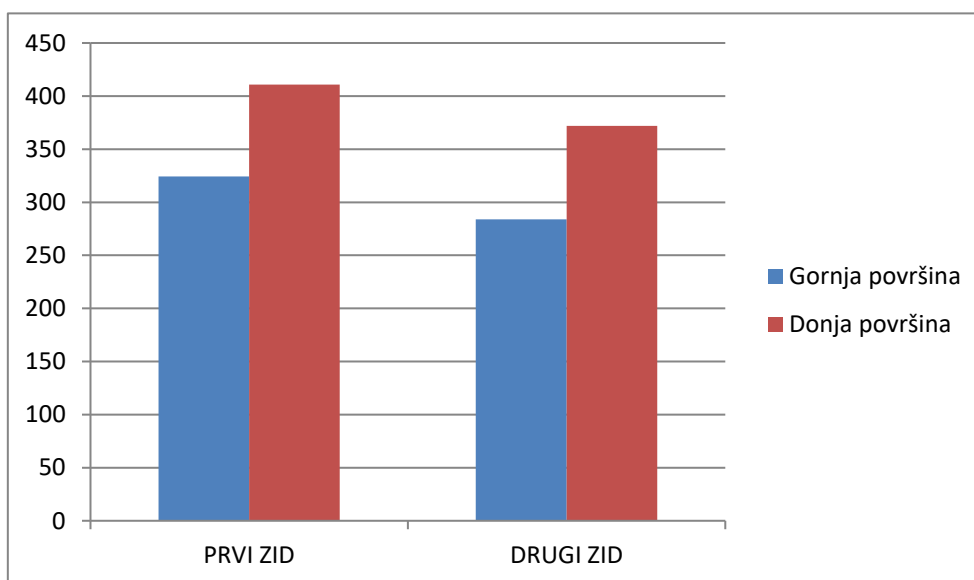
**Slika 37. Usporedba parametra  $S_{sk}$**

Vrijednost koeficijenta asimetrije površine ( $S_{sk}$ ) predstavlja stupanj iskrivljenosti površine, najveći je kod gornje površine prvog zida, te pozitivna vrijednost ovog parametra označava da na toj površini prevladavaju vrhovi, dok negativna vrijednost na donjoj površini prvog zida označava da na toj površini prevladavaju udubine. Na drugom zidu, i na gornjoj i na donjoj površini, prevladavaju nadvišenja.



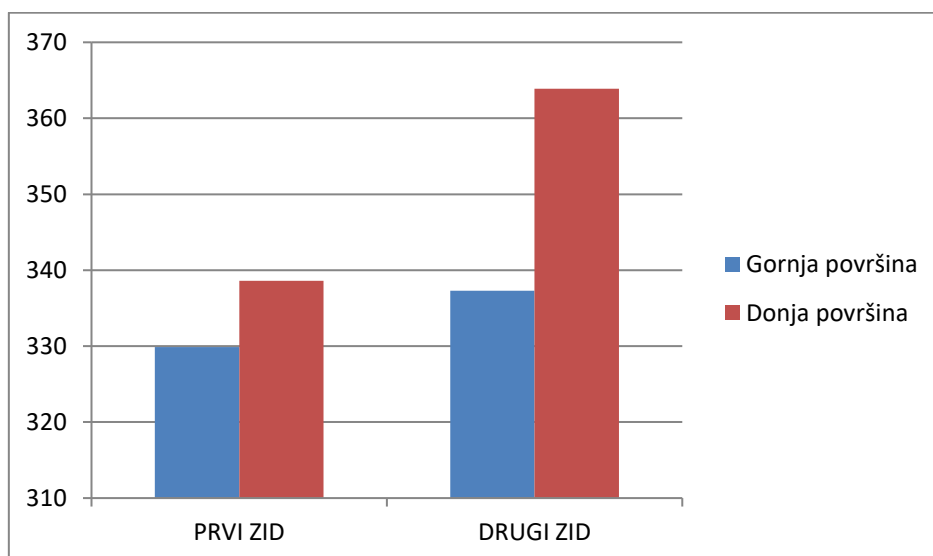
**Slika 38. Usporedba parametra  $S_{ku}$**

Koeficijent oštine površine ( $S_{ku}$ ) ukazuje, ukoliko je njegova vrijednost veća od 3, na prisutnost oštih vrhova i udubina što je prisutno kod donje površine prvog zida i gornje površine drugog zida, a njegova vrijednost ispod 3 ukazuje na postupno promjenjivu teksturu površine, bez izraženih ekstremnih vrhova i udubina, a to je prisutno na gornjoj površini prvog i donjoj površini drugog zida.



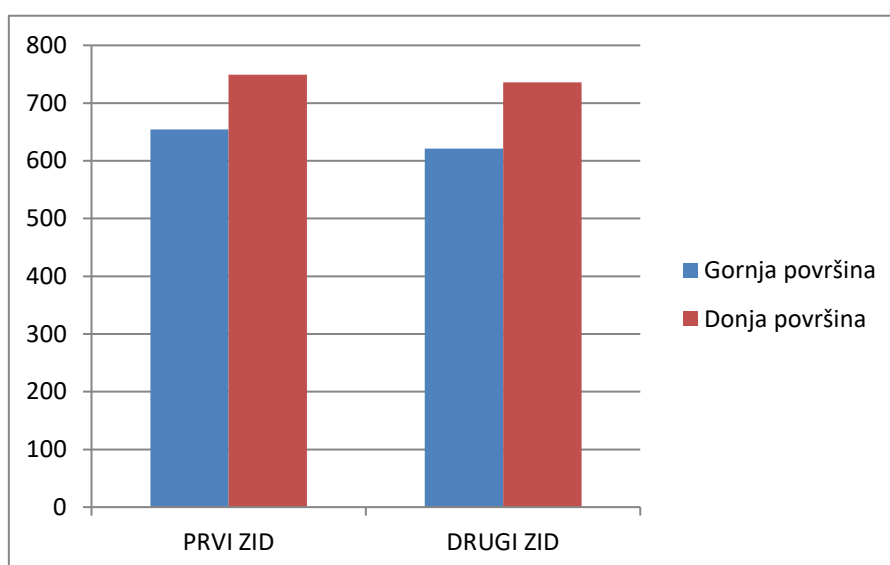
**Slika 39. Usporedba parametra  $S_p$**

Parametar  $S_p$  označava maksimalnu visinu vrha koji se nalazi da donjoj površini kod prvog i drugog zida.



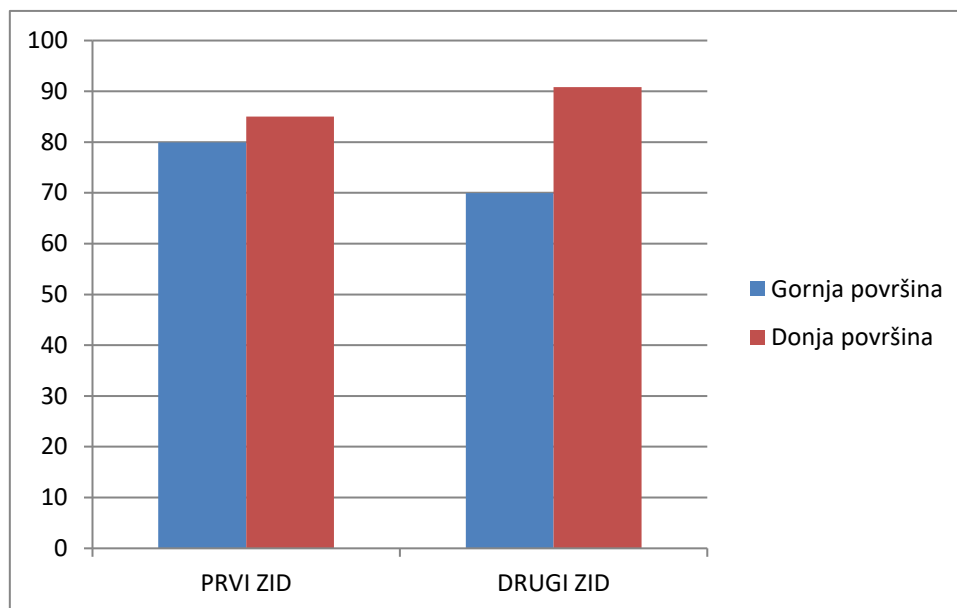
**Slika 40. Usporedba parametra  $S_v$**

Parametar  $S_v$  označava maksimalnu vrijednost udubine, te je ona najizraženija na donjoj površini drugog zida.



**Slika 41. Usporedba parametra  $S_z$**

Parametar  $S_z$  označava maksimalnu visinu zida i njegove vrijednosti su podjednake iznosa za obadva zida te donju i gornju površinu. Njegova najmanja vrijednost označava ravniju površinu pa se može zaključiti da su gornje površine ravnije nego donje.



**Slika 42. Usporedba parametra  $S_a$**

Srednje aritmetičko odstupanje površine predstavlja raziku u visini svake točke od srednje ravnine te se izražava kao apsolutna vrijednost. Što je veća vrijednost ovog parametra, to površina ima veća izbočenja, a to je ponovno, donja površina svakog zida, od kojih je lošija kod drugog zida nazivnog kuta  $45^\circ$ .

Veće nepravilnost, neravnine, izbočenja i udubljenja zabilježene su kod donje površine zidova, pogotovo kod zida nazivnog kuta od  $45^\circ$ . Zbog nagiba kutova, dolazi do curenja taline djelovanjem gravitacijske sile pa su zbog toga parametri teksture površine lošiji na donjim površinama.

## 5. ZAKLJUČAK

Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom relativno je nova proizvodna tehnologija čiji potencijal još nije ni blizu iskorišten. Neke od prednosti u odnosu na ostale tehnologije su: brza izrada dijelova, velika ušteda materijala i mogućnost izrade kompleksnih dijelova od skupih materijala. Ipak, postoje neka ograničenja zbog kojih ovaj postupak još uvijek nije ušao u širu primjenu u proizvodnji, to su npr. anizotropna svojstva materijala i zaostala naprezanja. Međutim, sve je više istraživanja i znanstvenih radova koji teže ukloniti navedene probleme.

Cilj eksperimentalnog dijela rada bio je optimizirati parametre zavarivanja pri izradi kosog zida i odrediti utjecaj nagiba pištolja na strukturu materijala, tvrdoću i parametre teksture površine. Izrađena su dva zida pod kutom od  $68^\circ$  i  $56^\circ$  pri čemu je nagib pištolja iznosio  $60^\circ$  i  $45^\circ$ . Parametri zavarivanja jednaki su za obadva zida i iznosili su:

- Jakost struje: 110A
- Napon: 17V
- Brzina zavarivanja: 35 cm/min.
- Zaštitni plin: 18% CO<sub>2</sub> i 18% Ar
- Slobodan kraj žice: 10mm.

Nakon provednog ispitivanja i analize uzoraka, može se zaključiti:

- Nije zapažena značajna razlika u prirastu visine prolaza između zidova različitog nagiba.
- Mikrostruktura i makrostruktura je homogena i konstanta, te jednaka, za obadva zida.
- Tvrdoća je konstantna duž sredine svakog uzorka, porast u tvrdoći zabilježen je na zadnjem prolazu i u zoni utjecaja topline. Nema značajne razlike u tvrdoći između zidova različitog nagiba.
- Parametri teksture površine različiti su na gornjoj i donjoj površini svakog zida. Na donjoj površini zabilježeno je više neravnina, izbočenja i udubljenja zbog djelovanja gravitacijske sile na talinu tijekom skrućivanja zavara. Zapažena je vrlo mala razlika u kvaliteti površine između zidova, pri čemu je bolja kvaliteta prvog zida nazivnog kuta od  $60^\circ$  (stvarnog kuta  $68^\circ$ ).



## LITERATURA

- [1] ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies  
ASTM International, 2012.
- [2] T.A.Rodrigues, V.Duarte, R.M.Miranda, T.G.Santos, J.P.Oliveira, Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM), 2019.
- [3] Ding D., Pan Z., Cui D., Li H.: Process Planning Strategy for Wire and Arc Additive Manufacturing, University of Wollongong, 2014.
- [4] Busachi A., Erkoyuncu A. J., Martina F., Ding J.: Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications, Elsevier, 48-53, 2015.
- [5] Ilić D., Optimizacija prijenosa metala za aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom, diplomski rad, 2016.
- [6] Filetin T., Kovačićek F., Indof J., Svojstva i primjena materijala, Zagreb, 2013.
- [7] Garašić I.: Autorizirana predavanja iz kolegija „Zavarljivost materijala“, Sveučilište u Zagrebu - Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [8] B.Mateša, I.Samardžić, M.Dunder, Zavarljivost raznovrsnih čelika i primjena Schaeffler-ovog dijagrama, Slavonski brod, 2011.
- [9] Hrivnjak I.: Zavarljivost čelika, Beograd, 1982.
- [10] <https://www.ezg.hr/zice.html>, dostupno veljača 2021.
- [11] EN ISO 25178-2:2012 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal, Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters
- [12] <https://www.keyence.com/ss/products/microscope/roughness/surface/sq-root-mean-square-height.jsp>, dostupno 24.1.2021.
- [13] Ivanda L., Utjecaj omjera brzine žice i brzine zavarivanja na geometrijske značajke pri aditivnoj proizvodnji električnim lukom i žicom, diplomski rad, 2019.