

# Utjecaj gravitacije na geometriju izratka pri navarivanju MIG/MAG postupkom u aditivnoj proizvodnji

---

Maleš, Ante

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:365375>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-07**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

**Diplomski rad br. 112/STR/2024**

**Utjecaj gravitacije na geometriju izratka pri navarivanju  
MIG/MAG postupkom**

**Ante Maleš, 0035207604**

Varaždin, rujan 2024. godine





**Sveučilište  
Sjever**  
Odjel Strojtarstvo

Diplomski rad br. 112/STR/2024

**Utjecaj gravitacije na geometriju izratka pri navarivanju  
MIG/MAG postupkom**

**Student**

Ante Maleš, 0035207604

**Mentor**

Matija Bušić, doc.dr.sc.

Varaždin, rujun 2024. godine

## **Sažetak**

U teorijskom dijelu opisane su procesne faze i vrste WAAM postupaka. Prikazana je ekonomska usporedba s konvencionalnim tehnologijama te problemi s kojima se inženjeri suočavaju. U završnom dijelu prikazani su proizvodi koji su izrađeni WAAM tehnologijom.

U eksperimentalnom dijelu ispitan je utjecaj gravitacije na geometriju izratka navarivanja WAAM postupkom. Navareni zidovi od nehrđajućeg čelika su navareni vodoravnim (PA) i nadglavnim (PE) položajem. Opisan je cjelokupni postupak navarivanja te priprema uzoraka za ispitivanje, a rezultati ispitivanja su analizirani i komentirani.

Ključne riječi: WAAM, nehrđajući čelik, vodoravni položaj, nadglavni položaj (PE), utjecaj gravitacije

## **Summary**

In the theoretical part, process phases and types of WAAM procedures are described, along with an economic comparison with conventional technologies and the challenges engineers face. The final section showcases products made using WAAM technology.

In the experimental part, the influence of gravity on the geometry of the workpiece during WAAM welding was examined. Stainless steel walls were welded in horizontal (PA) and overhead (PE) positions. The entire welding process and sample preparation for testing are described, and the test results are analyzed and commented on.

Key words: WAAM, stainless steel, horizontal position (PA), overhead position (PE), gravity influence

# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Strojarstvo		
PRISTUPNIK	Ante Maleš	JMBAG	0035207604
DATUM	27.08.2024.	KOLEGIJ	Suvremene proizvodne tehnologije
NASLOV RADA	Utjecaj gravitacije na geometriju izratka pri navarivanju MIG/MAG postupkom u aditivnoj proizvodnji		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Effect of gravity on product geometry during MIG/MAG cladding in additive manufacturing		
MENTOR	dr. sc. Matija Bušić	ZVANJE	docent
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc. dr. sc. Boris Jalušić, predsjednik povjerenstva		
	2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva		
	3. doc. dr. sc. Zlatko Botak, član povjerenstva		
	4. doc. dr. sc. Tanja Tomić, zamjenski član		
	5.		

## Zadatak diplomskog rada

BROJ	112/STR/2024		
OPIS	<p>U teoretskom dijelu diplomskog rada na osnovi podataka iz literature potrebno je opisati postupak aditivne proizvodnje pomoću MIG/MAG tehnologije navarivanja. Definirati aditivnu proizvodnju metalnih izradaka i usporediti različite tehnologije aditivne proizvodnje. Posebno detaljno opisati aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom (engl. Wire Arc Additive Manufacturing). Navesti primjere proizvoda koji se mogu izrađivati ovom tehnologijom te usporediti takvu izradu sa konvencionalnim proizvodnim tehnologijama.</p> <p>U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je automatiziranim MIG postupkom, pomoću žice za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika, izraditi više izradaka uz primjenu različitih parametara procesa i uz promjenu utjecaja gravitacije pri navarivanju. Iz izrađenih objekata izraditi uzorke za ispitivanje geometrije poprečnog presjeka te provesti mjerenje efektivne širine svakog od izradaka. Na temelju analize rezultata izmjerenih vrijednosti donijeti vlastiti zaključak o provedenom eksperimentu.</p> <p>U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.</p>		
ZADATAK URUČEN	POTPIS MENTORA M. Bušić		



### IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski/specijalistički rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjige, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom odnosno nezakonitim privržanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Ante Males (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog/specijalističkog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom Utjecaj govtacke na gospodarstvo kroz novi zakonik o uslohu pituljke (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nezovoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
(upisati ime i prezime)

A. Males  
(vlastoručni potpis)

Sukladno članku 58, 59. i 61. Zakona o visokom obrazovanju i znanstvenoj djelatnosti završne/diplomsko/specijalističke radove sveučilišta su dužna objaviti u roku od 30 dana od dana obrade na nacionalnom repozitoriju odnosno repozitoriju visokog učilišta.

Sukladno članku 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice razstavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.



# Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Aditivna proizvodnja .....	3
2.1. Procesne faze u aditivnoj proizvodnji .....	4
2.2. Klasifikacija aditivnih tehnologija.....	5
2.3. Proizvodnja proizvoda metalnih materijala aditivnom proizvodnjom .....	6
3. WAAM .....	8
3.1. Prednosti i nedostaci.....	9
3.2. Problemi WAAM tehnologije .....	11
3.3. Ekonomska isplativost WAAM-a.....	12
3.4. Materijali .....	15
3.4.1. Titan .....	15
3.4.2. Nikal .....	17
3.4.3. Magnezij.....	17
3.4.4. Aluminij .....	18
3.4.5. Čelik.....	18
4. Industrijska primjena WAAM-a .....	20
4.1. Zrakoplovna industrija.....	20
4.2. Automobilaska industrija .....	22
4.3. Brodogradnja.....	23
4.4. Svemirska industrija .....	24

## 1. Uvod

U današnje moderno doba postavljaju se sve viši standardi u svim proizvodnim industrijama. Postoji stalna potreba za snižavanjem troškova, povećanjem kvalitete proizvoda, smanjenjem gubitka materijala te smanjenjem vremena proizvodnje. Navedene zahtjeve teško je postići uz postojeće klasične tehnologije. Upravo zbog toga razvijaju se novi postupci poput aditivnih tehnologija. Aditivna proizvodnja pokazuje veliki potencijal za smanjenje visokih troškova koji su prisutni u proizvodnji s konvencionalnim postupcima. Glavna karakteristika aditivnih postupaka je dodavanje materijala sloj po sloj, tako se izrađuju proizvodi vrlo kompleksne geometrije koji se klasičnim tehnologijama teško mogu izraditi. Izrada proizvoda aditivnom proizvodnjom sastoji se od dvije faze: virtualne i fizičke. Virtualna faza odnosi se na izradu 3D CAD modela. Izrada proizvoda izravno iz 3D CAD modela omogućili su inženjerima brži razvoj proizvoda te veću fleksibilnost u dizajnu. Inicijalno, ovi postupci koristili su se za izradu polimernih proizvoda, a s vremenom su se uvodili i drugi materijali. Aditivna proizvodnja uključuje mnoštvo postupaka, a u ovome radu naglasak će biti na postupcima proizvodnje metala. Aditivna proizvodnja metala postaje sve prisutnija u suvremenim industrijama budući da ispunjava gotove sve zahtjeve koje tržište postavlja. Postoje različiti postupci, a klasificiraju se po izvoru energije i stanju dodatnog materijala.

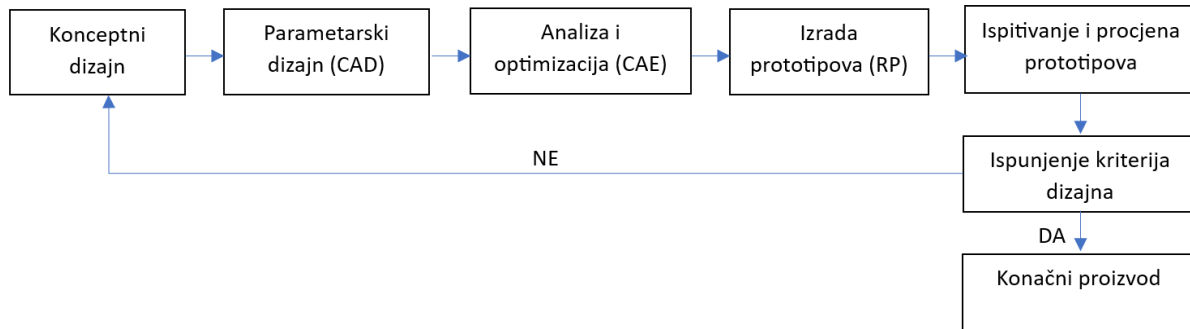
Zahvaljujući modernim industrijama neprestano postoji potreba za istraživanjem i razvojem novih naprednih tehnologija, pa tako i aditivnih. Najbolji primjer je zrakoplovna industrija koja ima izrazito rastuću potrebu za sirovim materijalom. Budući da se u zrakoplovnoj industriji koriste izuzetno skupi materijali poput titana, potrebno je voditi računa o što boljoj iskoristivosti takvih materijala. Jedan od načina za bolju iskoristivost materijala je primjena odgovarajućih aditivnih tehnologija. Valja imati na umu da većina aditivnih tehnologija koriste polimerne materijale ili metale u praškastom obliku zbog čega proizvodi nerijetko imaju greške poput poroznosti, šupljina ili jednostavno slabijih mehaničkih svojstava. Postupak koji odgovara na većinu takvih problema s kojim se susreću ostale aditivne tehnologije naziva se aditivna proizvodnja sa žicom i električnim lukom - WAAM (*Wire and Arc Additive Manufacturing*). Iako se sam postupak prvi put pojavio 1925. godine, ova tehnologija relativno je nova te je izuzetno zanimljiva za istraživanje zadnjih 20-ak godina. WAAM je brzo stekao popularnost budući da se ovim postupkom mogu proizvesti proizvodi svih vrsta materijala koji su se koristili u zavarivanju s puno manje poroznosti te

smanjenim udjelom strojnih obrada. Postupak se izvodi s postojećom opremom za zavarivanje, električnim lukom kao izvorom energije i žicom za zavarivanje kao dodatnim materijalom [1].

WAAM se najčešće primjenjuje u već spomenutoj zrakoplovnoj industriji, ali i u drugim industrijama poput: automobilske, brodske i svemirske. U ovom radu u teorijskom dijelu opisane su procesne faze i vrste WAAM postupaka. Prikazana je ekonomska usporedba s konvencionalnim tehnologijama te problemi s kojima se inženjeri suočavaju. U završnom dijelu prikazani su proizvodi koji su izrađeni WAAM tehnologijom. U eksperimentalnom dijelu ispitan je utjecaj gravitacije na geometriju izratka navarivanja WAAM tehnologijom.

## 2. Aditivna proizvodnja

Aditivna proizvodnja prvi puta se javlja 1980-ih s pojavom brze izrade prototipova RP (*Rapid Prototyping*). Brza izrada prototipa omogućuje skraćeno vrijeme za razvoj proizvoda, snižavanje troškova te izradu oblika kompleksne geometrije. Usprkos navedenim pozitivnim karakteristikama RP se i dalje sporo primjenjuje u industriji zbog nedostatka informacija, standardizacije, troškova investicije te ograničenog materijala i radnog volumena [2,3]. Korist od RP imaju znanstvenici, liječnici, studenti i profesori te umjetnici. RP omogućuje znanstvenicima i studentima brzu izradu modela te u konačnici analizu modela za teorijsko razumijevanje. Liječnici mogu izraditi model oštećenog dijela tijela kako bi mogli analizirati te planirati bolji postupak liječenja. Na slici 1 prikazan je ciklus razvoja brze izrade prototipova [2].



Slika 1 Ciklus razvoja proizvoda [2]

Razvojem aditivnih postupaka pokušale su se iskoristiti prednosti ovih postupaka. Primijećeno je da se kod nekih konvencionalnih postupaka poput lijevanja zahtjeva prilagođeni alat za izradu dijelova. Takvi alati znaju biti skupi te je potrebno duže vrijeme za izradu te u konačnici za isporuku. Zbog toga paralelno s razvojem RP razvijala se brza proizvodnja kalupa i alata RT (*Rapid Tooling*) čineći tako zajedno brzu proizvodnju RM (*Rapid Manufacturing*). Od 2009. godine prema normi ASTM F42 uvodi se izraz aditivna proizvodnja AM (*Additive Manufacturing*) [4]. Aditivna proizvodnja prema ASTM-u definirana je kao proces povezivanja materijala pri izradi predmeta izravno iz 3D računalnih modela. Može se reći da su AM postupci suprotni postupcima obrade odvajanjem čestica, budući da se najčešće izvode tako da se dodatni materijal dodaje sloj po sloj [5]. Na temelju 3D CAD modela ovim postupcima se mogu izraditi proizvodi kompleksne geometrije u relativno kratkom vremenu. Međutim, mehanička svojstva, dimenzijska stabilnost te izgled površine se i dalje razlikuje u odnosu na klasične postupke [4]. U proizvodnji metalnih dijelova aditivna proizvodnja postaje superiornija u odnosu na klasične procese izrade. Poseban

porast primjene aditivne proizvodnje je izražen u automobilskoj i zrakoplovnoj industriji. Stalna potreba za dijelovima sa što manjom masom te što boljim mehaničkim svojstvima omogućuje aditivnim tehnologijama ogroman rast. U zrakoplovnoj industriji je vrlo bitan mali omjer BTF, pogotovo kad se koriste skupi materijali poput titana i nikla. BTF (*Buy to fly*) je omjer sirovca i gotovog proizvoda, a teži se da bude što bliže jedan, kako bi se što manje materijala potrošilo. Upravo u ovom segmentu aditivne tehnologije pokazuju svoju prednost nad klasičnim tehnologijama [1].

## **2.1. Procesne faze u aditivnoj proizvodnji**

Proces AM može se podijeliti u dvije faze: virtualnu i fizičku. Prije same izrade fizičkog modela potrebno je napraviti virtualnu fazu uz pomoć CAD programskih softvera, poput Solidworks, Catie i slično [6]. Svaki postupak izrade proizvoda aditivnim tehnologijama prolazi kroz sljedeće faze:

1. Izrada CAD modela
2. Pretvaranje CAD modela u STL datoteku
3. Prebacivanje STL datoteke na AM stroj
4. Podešavanje parametara AM stroja
5. Izrada proizvoda
6. Naknadna obrada, ako je potrebna
7. Uporaba [4].

Procesne faze izrade proizvoda aditivnim tehnologijama prikazan je na slici 2 [4].



Slika 2 Procesne faze AM [4]

Prvi korak za sve AM postupke je jednak, a to je izrada 3D geometrijskog modela u nekom od CAD/CAM programu. Takav model se pretvara u format datoteke standardnog triangulacijskog jezika STL (*Standard Tessellation Language*). STL datoteka pohranjuje informacije o 3D modelu. Format predstavlja neobrađenu površinu modela s trokutima. Što je struktura složenija i detaljnija, to će se više trokuta koristiti za predstavljanje modela. Uz STL format razvio se još i format AMF (*Additive Manufacturing File*) te ta dva formata predstavljaju standard za korištenje AM postupaka. AMF datoteka može opisati boju svakog pojedinog trokuta te materijal i boju pojedinog volumena. Takve datoteke se prebacuju na AM stroj te je zatim potrebno odrediti određene parametre poput: debljine sloja, snage, brzine itd. Nakon odabira parametara slijedi izrada proizvoda nanošenjem materijala sloj po sloj. Proizvod je još potrebno podvrgnuti završnoj obradi te je spreman za uporabu [4,6].

## 2.2. Klasifikacija aditivnih tehnologija

Aditivne tehnologije mogu se podijeliti s obzirom na:

1. metodologiju formiranja proizvoda (raspršivanje materijala, fotopolimerizacija, ekstruzija materijala, izravnim odlaganjem energije (DED) itd.)
2. vrstu stanja osnovnog materijala (materijali u čvrstom, tekućem i praškastom stanju)
3. medij koji se koristi za obradu (laserska zraka, x-zrake, električni luk).

Postupci koji kao osnovni materijal koriste materijale u čvrstom stanju su:

- Proizvodnja laminiranih objekata (LOM - *Laminated Object Manufacturing*)
- Taložno očvršćivanje (FDM - *Fused Deposition Modeling*)
- Aditivna proizvodnja žicom i električnim lukom (WAAM - *Wire and arc Additive Manufacturing*)
- Taljenje elektronskim snopom (EBF - *Electron Beam Free From Fabrication*)

Postupci koji kao osnovni materijal koriste materijale u praškastom stanju su:

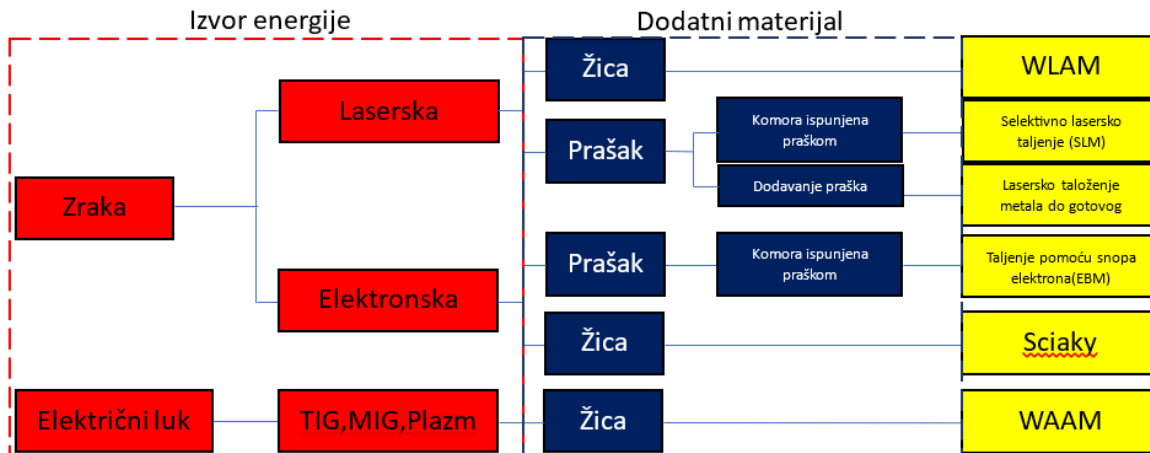
- Selektivno lasersko sinteriranje (SLS - *Selective Laser Sintering*)
- Direktno lasersko sinteriranje metala (DMLS - *Direct Metal Laser Sintering*)

Postupci koji kao osnovni materijal koriste materijale u tekućem stanju su:

- Stereolitografija (SLA - *Stereolithography*)
- Digitalno lasersko procesiranje (DLP – *Digital Light Processing*)
- PolyJet printanje [7].

### **2.3. Proizvodnja proizvoda metalnih materijala aditivnom proizvodnjom**

Inicijalno AM postupci bili su korišteni za proizvode od polimernih materijala. Međutim, razvojem industrije, posljedično tome i tehnologije danas je moguće koristiti AM postupke za izradu proizvoda različitih materijala uključujući i metale. Uvođenje metala kao dodatnog materijala u AM postupke bilo je izuzetno bitno budući da su metali zbog svoje strukture, mehaničkih i fizikalnih svojstva riješili dio problema s kojima su se aditivne tehnologije susretale. Aditivna proizvodnja metalnih materijala javlja se tek sredinom 1990-ih razvojem DMLS i SLS postupaka koji su kao dodatni materijal koristili metale u praškastom stanju. Daljnji razvoj aditivnih tehnologija dovodi do pojave mnogih različitih postupaka 3D ispisa s metalima, uključujući i one temeljene na žici poput WAAM postupka. WAAM postupak najviše se realizirao u zrakoplovnoj industriji zbog svoje izvrsnosti u izradi velikih komponenti te oblikovanja zavarenih materijala [8]. Razvoj ovih tehnologija izuzetno je bitan budući da omogućuju izradu proizvoda kompleksnih geometrija koji nisu bili izvedivi klasičnim postupcima. Slika 3 prikazuje podjelu postupaka AM koji koriste metalne materijale kao dodatni materijal [9].



Slika 3 Podjela AM metalnih materijala [9]

Vidljivo je da postoje tri postupka koji kao dodatni materijal koriste žicu, a to su postupci WLAM, Sciaky i WAAM. Iz slike je vidljivo da se ovi postupci razlikuju s obzirom na izvor energije, pa tako WLAM postupak ima laserski, Sciaky elektronski te WAAM elektrolučni izvor. Postoji znatna razlika u iskoristivosti navedenih postupaka. Primjerice, najmanju iskoristivost (2-5%) imaju postupci s laserskim izvorima, zatim postupci s elektronskim izvorom (15-20%), a najveću iskoristivost (90%) imaju postupci elektrolučnog izvora poput MAG-a i TIG-a [8].



### 3. WAAM

Kao što je već opisano u procesnim fazama AM postupaka, za korištenje WAAM tehnologije, potrebno je konstruirati proizvod u obliku 3D CAD modela. Mogu se koristiti poznati CAD softveri, ali i tehnologije povratnog inženjerstva. Zatim se model sprema u STL format koji služi kao osnova za „rezanje“ komada po visini u dvodimenzionalne slojeve te se kontura svakog sloja koristi za generiranje putanje pištolja za zavarivanje [1]. Proces se odvija tako da se kapljice metala talože jedna na drugu što rezultira ravnim metalnim zidom najmanje širine 1 – 2 mm uključujući i valovitost. Valovitost može se vidjeti na slici 4, a definirana je kao razlika ukupne širine zida i efektivne širine zida. Naknadnom obradom potrebno je ukloniti valovitost kako bi se uklonile površinske nepravilnosti [10].



Slika 4 WAAM zid [10]

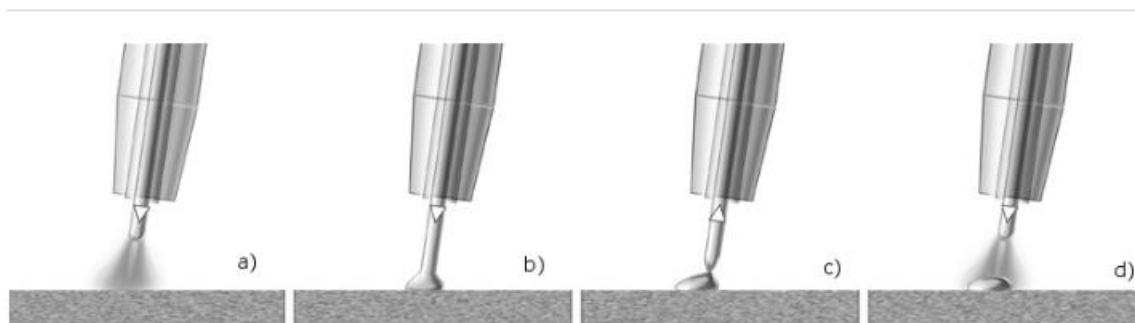
Brzina taloženja iznosi oko 1 kg/h što je znatno više od brzine 0,2 kg/h koja se postiže prahom. Za izvođenje procesa koristi se postojeća oprema za zavarivanje poput: izvora struja, robot, pištolj za zavarivanje, uređaj za dodavanje žice. Kao izvor energije za taljenje materijala koristi se električni luk te je zbog toga moguće koristiti različite postupke zavarivanja poput: MIG/MAG, TIG i plazma zavarivanja [7].

MIG/MAG postupak najviše se primjenjuje budući da mu nije potreban dodavač žice već je dodatni materijal koaksijalan s pištoljem za zavarivanjem. Električni luk stvara se između

elektrode odnosno dodanog materijala i radnog predmeta. Postoje četiri osnovna načina prijenosa dodatnog materijala MIG/MAG postupkom:

- prijenos kratkim spojem
- prijenos prijelaznim lukom
- prijenos štrcajućim lukom
- prijenos impulsnim strujama [11].

Osim navedenih načina prijenosa dodatnog materijala postoje i druge varijante kontroliranog prijenosa metala, poput hladnog metalnog prijenosa CMT (*cold metal transfer*) koji je baziran na kontroliranom prekidanju kratkog luka. Ovim načinom ostvaruje se veća preciznost uz znatno manji unos topline te se prijenos materijala ostvaruje bez prskanja. Ono što je inovativno u ovom procesu je kretanje dodatnog materijala. Električni luk tali dodatni materijal koji se kreće prema talini. Kada dodatni materijal dođe do taline električni luk se gasi te se struja smanjuje. Zatim slijedi odmicanje žice te odvajanje kapljice dodatnog materijala. Ovim postupkom najčešće se izrađuju proizvodi od čelika i aluminija [12]. Na slici 5 prikazan je CMT način prijenosa dodatnog materijala.



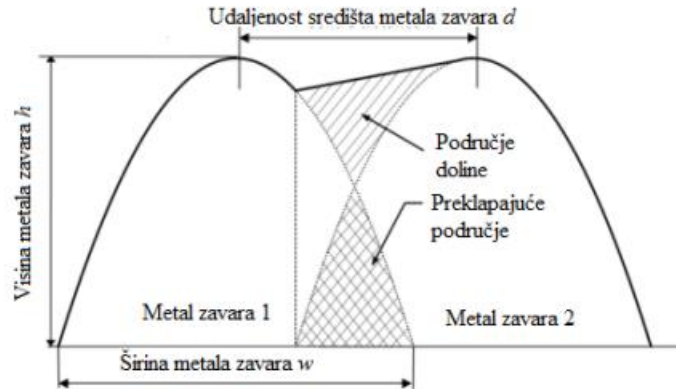
Slika 5 CMT metoda [13]

### 3.1. Prednosti i nedostaci

Uspoređujući WAAM postupak s drugim AM postupcima primijećene su mnoge prednosti. Prednost koja se ističe u odnosu na druge AM postupke je manji trošak opreme jer je za izvođenje ovog postupka potrebno samo kombinirati postojeću opremu za zavarivanje robotom ili CNC stroj. Također, korištenjem žice kao dodatnog materijala ostvaruju se manji troškovi materijala te je izbor istih puno veći nego kod ostalih AM postupaka. Zatim, WAAM postupak ističe se i po svojoj brzini, pa tako brzina taloženja dodatnog materijala može postići brzinu do 130 g/min. Moguće je

postići i veću brzinu, međutim veća brzina uzrokuje lošiju preciznost proizvoda. Kao što je već spomenuto, ovaj postupak upotrebljava se u zrakoplovnoj industriji gdje je vrlo bitan BTF omjer odnosno omjer mase ili volumena sirovog materijala i mase ili volumena gotovog proizvoda. BTF omjer prikazuje iskorištenost materijala, što je iznos bliže broju jedan to je bolje iskorišten sirovi materijal. WAAM postupkom postiže se nizak BTF omjer od približno dva što ujedno znači veću iskoristivost sirovog materijala. Nadalje, veličina proizvoda koji se mogu izraditi ovim postupkom ograničeni su samo veličinom osnovne ploče ili komore za stvaranje zaštitne plinske atmosfere. Naposljetku, ovim postupkom pogodno je proizvoditi i funkcionalno slagane materijale FGM (*Functionally Graded Materials*). FGM su materijali koji imaju različit sastav i strukturu kroz volumen. Najpoznatiji takav materijal je Fe<sub>3</sub>Al koji se proizvodi od praškastog materijala zbog čega se često javljaju poroznost i šupljine, što WAAM postupak uspješno reducira [1].

Usprkos svim navedenim prednostima WAAM postupak ima i nekoliko nedostataka. Najprije, WAAM postupak pogodniji je za izradu većih proizvoda jednostavnije geometrije, nego manjih, kompleksnijih proizvoda. Također, primijećena je anizotropnost mehaničkih svojstava, odnosno različitih vrijednosti mehaničkih svojstava na različitim smjerovima. Tako se primjerice javlja veća čvrstoća te manja duktilnost u smjeru nanošenja slojeva. Problem s kojim se susreću sve aditivne tehnologije uključujući i WAAM je modeliranje geometrije slojeva (*bead modelling*). To je skup operacija koji povezuje varijable vezane za planiranje i generiranje putanje s odabirom optimalnih parametara kako bi se dobila najbolja moguća geometrija slojeva. Svaki pojedinačni sloj i njihov način preklapanja znatno utječe na kvalitetu proizvoda. Ako se preklapanje ne izvede na kvalitetan način pojavljuju se problemi poput suvišnog preklapanja ili nedovoljnog vezivanja slojeva. Kao odgovor na ovaj problem istraživači su predstavili rješenje u obliku tangentskog modela preklapanja (eng. *Tangent Overlapping Model*, TOM) susjednih kapljica zavara. Na slici 6 prikazana je skica TOM-a [1].



Slika 6 Tangentni model preklapanja (TOM)[8]

Područje doline ograničeno je tangentom na zavar dva. Ako je udaljenost središta  $d$  veće od širine zavora  $w$  tada ne dolazi do preklapanja. Smanjenjem udaljenosti središta raste područje preklapanja, a područje doline se smanjuje. Ako se udaljenost središta  $d$  smanji na udaljenost gdje bi područje preklapanja i područje doline bilo jednako tada bi se dobila najbolja površina jer ne bi bilo područja doline između susjednih zavora. Prevelikim smanjenjem udaljenosti  $d$  područje preklapanja raste te se povećava debljina taložnog sloja, a samim time smanjuje se površinska glatkoća [8].

Problemi poroznosti, šupljina, taloženje viška materijala te nedovoljno taloženje materijala također znaju biti prisutni nakon obrade WAAM postupkom. Prilikom obrade debljih proizvoda najčešće se pojavljuju poroznost i šupljine, a problemi s taloženjem javljaju se kod proizvoda kod kojih se križa putanja taloženja. Kao rješenje za taj problem sugerira se formiranje dva slova L koja se dodiruju svojim kutom te tako ne dolazi do preklapanja slojeva [1].

### 3.2. Problemi WAAM tehnologije

Kao i kod svakih tehnologija postoje određeni problemi prilikom izrade predmeta WAAM tehnologijom. Najčešće greške koje se javljaju su: poroznost, ugorine i nadvišenje zavora. Poroznost nastaje kada plinovi ostanu zarobljeni u talini, a nastaje zbog nedovoljnog protoka zaštitnog plina, pogrešnog odabira parametara ili zbog samih nečistoća u materijalu. Ugorine su nedostaci u obliku udubljenja, a nastaju zbog pogrešnog odabira parametara poput prevelike struje i brzine. Nadvišenja su također posljedica pogrešnog odabira parametara odnosno prevelike brzine zavarivanja [14].

Budući da se WAAM postupkom unosi znatna količina topline posljedično tome nastaju određeni problemi u vidu zaostalih napreznja i deformacija. Zaostala napreznja javljaju se prilikom hlađenja odnosno sakupljanja materijala te imaju negativan utjecaj na mehanička svojstva proizvoda. Postoje određene metode ublažavanja ovog problema poput: „*back to back*“, optimizacije orijentacije izrade te međuprolaznog valjanja. „*Back to back*“ je metoda kojom se taloži dodatni materijal s obje strane podloge kako bi se spriječilo deformiranje podloge te smanjila zaostala napreznja. Slika broj 7 prikazuje proizvod izrađen „*back to back*“ metodom [14].



**Slika 7 Back to back metoda [14]**

Optimizacija orijentacije izrade očituje se u izboru smjera taloženja dodatnog materijala. Taloženjem kraćih slojeva rezultira manjim napreznjima i deformacijama. Redukciju zaostalih napreznja postizemo i predgrijavanjem podloge. Predgrijavanjem se smanjuje razlika u temperaturi između prvog sloja i podloge te se tako usporava vrijeme hlađenja. Ako se predgrijavanje ne provede, prvi sloj će imati manju širinu budući da će doći do bržeg hlađenja uzrokovanog temperaturom podloge [14].

### **3.3. Ekonomska isplativost WAAM-a**

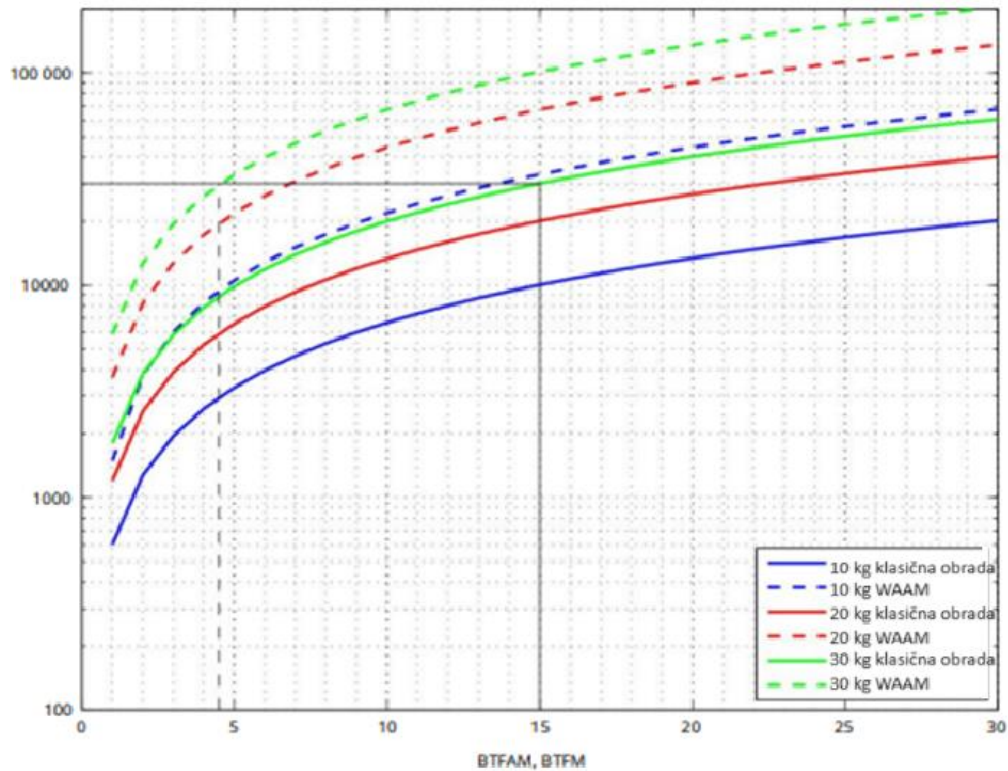
Uspoređujući WAAM postupak s klasičnim tehnologijama potrebno je uzeti u obzir niz čimbenika poput: BTF omjera, stope taloženja te trošak materijala. Svaki od navedenih postupaka ima specifične troškove koji se odnose na jedinicu mase ili vremena. Primjerice 1 kg titanske žice ili 1 h rada glodalice smatraju se specifičnim troškom. WAAM postupak ima fiksne i varijabilne troškove. Fiksni troškovi su: WAAM hardver (robot, izvor energije za zavarivanje, alat, plamenik itd) i WAAM softver (mogućnost automatskog programiranja, osnovni paket za rezanje). Pod varijabilne troškove ubrajaju se: električna energija za robota, hlađenje i izvor napajanja; zaštitni

plin te dodatni materijal. Prema istraživanju F. Martina i S. Williams sa sveučilišta u Cranfieldu 2015. godine ukupna cijena rada po satu WAAM postupkom s titanskom žicom iznosio je 96 € dok je za klasične postupke iznosio 70 €. U svom istraživanju uspoređivali su ekonomsku isplativost WAAM postupka u odnosu na klasične strojne obrade. U tablici 1 prikazani su određeni parametre koji su se koristili u ovom istraživanju [9].

**Tablica 1 Parametri istraživanja [9]**

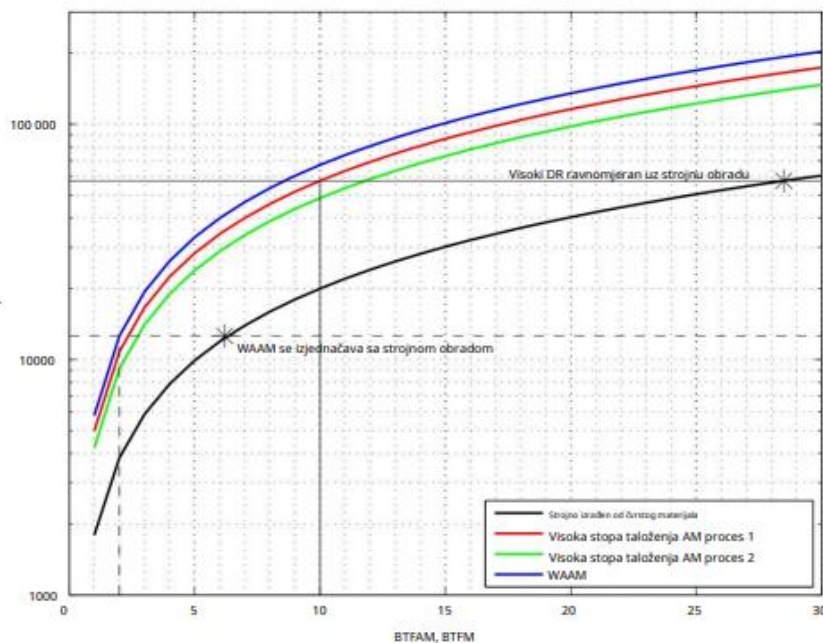
Parametri	Vrijednost	Mjerna jedinica
Trošak kovanog titana	70	€/kg
Trošak titanske žice	152	€/kg
Satnica za klasične tehnologije	70	€/h
Satnica za WAAM	96	€/h
Start/stop	1,29	
Stopa uklanjanja materijala	9,4	kg/h

Slika 8 prikazuje graf ukupnog troška za tri različita izratka od 10 kg, 20 kg i 30 kg koje su izradili WAAM i klasične strojne obrade u ovisnosti o BTF omjeru. Primjerice, iz grafa je vidljivo da ako je izradak od 30 kg izrađen klasičnim strojnim obradama imao BTF omjer 15, tada je WAAM postupak isplativiji ako mu je BTF omjer manji od 4,5. Dakle, ako BTF omjer WAAM-a iznosi 1,5 troškovi su manji za 69 % [9].



Slika 8 Usporedba WAAM-a s konvencionalnim tehnologijama [9]

Rezultati navedenog istraživanja pokazali su da je trošak izrade modela od titana WAAM postupkom manji u odnosu na trošak izrade modela klasičnim strojnim obradama. Na slici 9 prikazana je usporedba WAAM-a s drugim postupcima aditivne proizvodnje poput Sciaky postupka. Sciaky postupak ima veliku brzinu taloženja od 10 kg/h, međutim njegov BTF omjer je veći od 10 te je zbog toga manje ekonomski prihvatljiv. Iz grafa je vidljivo da WAAM samo treba postići  $BTF < 8$  kako bi bio isplativiji od drugih aditivnih tehnologija, a kako je BTF omjer za WAAM najčešće oko dva može se zaključiti da je 78 % jeftiniji [9].



Slika 9 Usporedba WAAM-a s drugim AM [9]

### 3.4. Materijali

Ako se usporede s drugim postupcima aditivne proizvodnje metala, WAAM postupak ima manju brzinu hlađenja te veći unos topline, zbog toga se ovim postupkom mogu koristiti većina komercijalno dostupnih materijala. Osim toga, WAAM postupak omogućuje izradu proizvoda sastavljenih od više struktura materijala poput FGM. Sve žice koje se koriste u industriji zavarivanja koriste se i za WAAM postupak. Najčešće korišteni materijali koji se koriste WAAM postupkom su: čelik, aluminij, titan te legure na bazi nikla i magnezija [15].

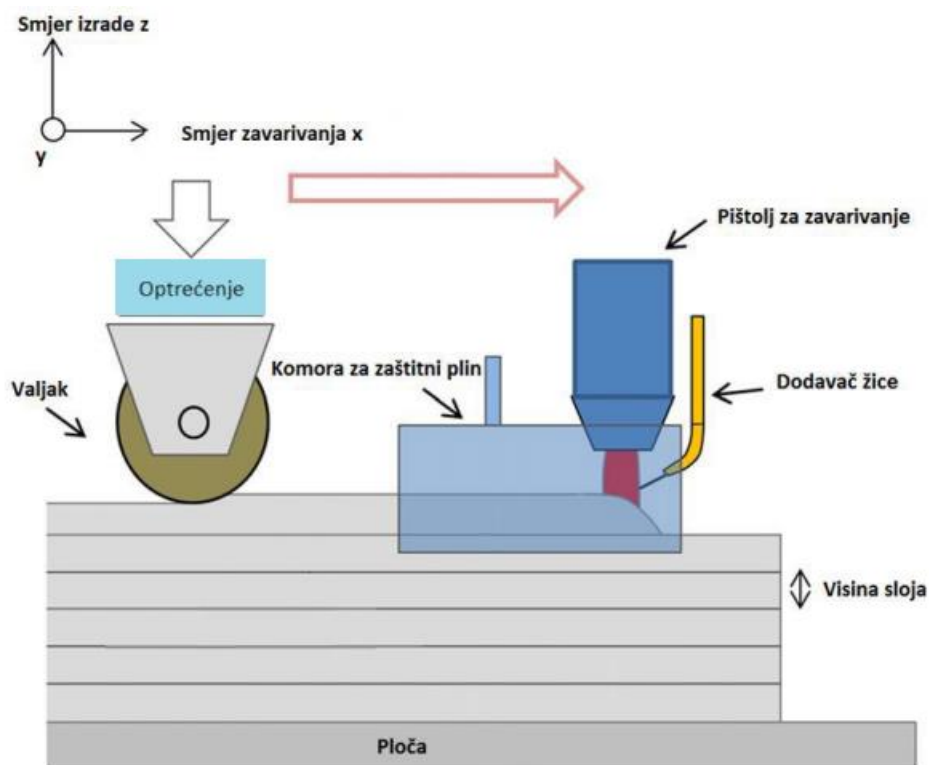
#### 3.4.1. Titan

Cijena osnovnog materijala titana izuzetno je visoka, a iskoristivost materijala poluproizvoda klasičnim strojnim obradama jako je niska [15]. Titan, osim što je skup za samu nabavu i obradu, i njegova proizvodnja ima negativan utjecaj na okoliš. Stoga, potrebno je biti vrlo odgovoran prilikom korištenja ovog materijala. Zbog toga se javlja potreba za aditivnom proizvodnjom legura titana u svim industrijama [9].

Legure na bazi titana imaju izuzetno visoku čvrstoću, žilavost te dobru otpornost na koroziju zbog svoje čvrste oksidne prevlake. Također, pokazuju dobru otpornost na visoke temperature bez



bitnog gubitka mehaničkih svojstava. Najčešća primjena spomenutih legura zabilježena je u zrakoplovstvu i biomedicini. Najčešće korištena titan legura u WAAM postupku je Ti6Al4V. Navedena legura spada u  $\alpha$ - $\beta$  legure budući da se sastoji od dvije faze: heksagonalne (hcp) i plošno centrirane kubne (bcc) [16]. Problem koji je primijećen kod ove legure je izdužena grubozrnata mikrostruktura. Primjerice, prilikom izrade zida WAAM-om primarne  $\beta$  strukture često su visoke kao i visina izrade zida. Kako bi se usitnilo zrno i poboljšala mehanička svojstva potrebno je valjati svaki sloj nakon izrade. Skica međuprolaznog valjanja prikazana je na slici 10 [17].



Slika 10 Međuprolazno valjanje [17]

Ovisno o materijalu koji se taloži ponekad postoji potreba za inertnim okruženjem. Za materijale kao što su aluminij i čelik, dovoljna je zaštita koju daje sapnica za zavarivanje tijekom taloženja. Za titan i materijale za rad pri povišenim temperaturama potrebno je napraviti određenu zaštitu. Trenutno najbolja zaštita je utiskivanje argona u komore ili šatore, međutim šator se za sada čini kao praktičnije i jeftinije rješenje. Na slici 11 prikazan je šator ispunjen argonom [9].



Slika 11 Šator za zaštitu [9]

### 3.4.2. Nikal

Legure na bazi nikla uglavnom se koriste u zrakoplovnoj i nuklearnoj industriji. Ključne karakteristike ovih legura su visoka čvrstoća na povišenim temperaturama te vrlo dobra otpornost na koroziju. Zbog svoje FCC kristalne rešetke prikladan je za rad na visokim temperaturama. Legure na bazi nikla imaju visoku cijenu i slabu obradivost te se zbog toga javlja potreba za aditivnom proizvodnjom. Najčešće korištena legura na bazi nikla WAAM postupkom je Inconel [16]. Slično kao i legura titana Ti6Al4V, Inconel je pokazao smanjenu čvrstoću nakon WAAM obrade u odnosu na kovani materijal te je također potrebna naknadna obrada valjanjem nakon svakog sloja kako bi se dobila zadovoljavajuća mehanička svojstva [18].

### 3.4.3. Magnezij

Magnezij ima jako dobar omjer čvrstoće i težine te se predstavlja kao alternativa aluminiju u automobilske industriji. Ima gusto slagane heksagonalne HCP kristalne rešetke te zbog toga ima slabiju duktilnost. Dugi niz godina, magnezij je bio zapostavljen zbog svoje zapaljivosti, međutim istraživanjem Mg-Al legura smanjila se osjetljivost na zapaljivost. Magnezijeve legure dobro podnose dinamička opterećenja i lako se lijevaju te se zbog toga upotrebljavaju i u zrakoplovnoj industriji. Na slici 12 prikazan je uzorak magnezijeve legure AZ61A koji je izrađen WAAM TIG postupkom [15,16].



Slika 12 Uzorak magnezijeve legure izradene WAAM-om [16]

#### 3.4.4. Aluminij

Tehnički aluminij ima vrlo dobra mehanička svojstva, no u eksploataciji se većinom koristi u legiranom obliku. Zbog svoje male težine, visoke čvrstoće te dobre otpornosti na koroziju aluminijeve legure gotovo su nezamjenjive u zrakoplovnoj i automobilskoj industriji. Kako se u tim industrijama sve više ulaže u razvijanje aditivne proizvodnje tako se počela razvijati aditivna proizvodnja aluminijevih legura [19].

Zavarljivost aluminija ovisi o legiranim elementima, ali najveća poteškoća koja se javlja prilikom elektrodučnog zavarivanja je tanki zaštitni sloj aluminijevog oksida koji ga štiti od korozije. Talište aluminijevog oksida je mnogo više u odnosu na talište aluminija te ga je prije zavarivanja potrebno ukloniti [16].

WAAM postupak aluminijevih legura ima određena ograničenja kao što su poroznost i pukotine. Poroznost predstavlja glavni problem te može uzrokovati lošija mehanička svojstva poput čvrstoće i duktilnosti. Međutim, poroznost u velikoj mjeri ovisi o izboru postupka te o parametrima poput brzine zavarivanja i unosa topline. Na poroznost utječe i kvaliteta žice te sastav legure. Također, bitna je međuprolazna temperatura budući da se nanese materijal gradi slojevito [19].

#### 3.4.5. Čelik

Čelik je jedan od najčešće korištenih materijala u gotovo svim industrijama, zbog toga je i jedan od najproučavanijih materijala za WAAM postupak. Budući da se upotrebljavaju u svim područjima industrije, čelici u kombinaciji s WAAM-om mogu se koristiti za proizvodnju dijelova

uz nižu cijenu proizvodnje. Posebno se ističu nehrđajući čelici zbog svoje široke primjene u različitim industrijama poput kemijske, prehrambene i nuklearne gdje su potrebni dijelovi s visokom otpornošću na toplinu i koroziju [16].

## **4. Industrijska primjena WAAM-a**

Kao što je već naglašeno WAAM postupak nije pogodan za izradu malih kompleksnih dijelova već se primjenjuje za veće dijelove s manjom složenosti. Postupak je najzastupljeniji u zrakoplovnoj industriji gdje se velik broj dijelova izrađuje iz bloka materijala te je zbog toga povećan BTF omjer. Zrakoplovni dijelovi često imaju kompleksnu geometriju te su izrađeni od skupljih materijala, pa je zbog toga osobito bitan nizak BTF omjer. WAAM postupak se pokazao kao odlična alternativa klasičnim tehnologijama zbog svoje mogućnosti postizanja nižeg BTF omjera i zadovoljavajućih svojstava.

Sve veća primjena se ostvaruje u automobilskoj industriji gdje se koristi u proizvodnji dijelova motora, šasija te drugih komponenata koji zahtijevaju visoku čvrstoću i izdržljivost. Također primjenjuje se u brodogradnji, energetici, svemirskoj industriji, popravcima metalnih dijelova itd.

### **4.1. Zrakoplovna industrija**

Zrakoplovna industrija je najveći zagovaratelj korištenja WAAM tehnologije budući da se ovom tehnologijom uvelike smanjuje potrošnja sirovog materijala. WAAM omogućuje izradu laganih dijelova visoke čvrstoće, što je osobito bitno u ovoj industrijskoj grani, budući da se tako postiže manja potrošnja goriva te veća učinkovitost letenja. Osobito velike uštede se ostvaruju prilikom izrade dijelova od skupljih materijala poput titana [20].

Zrakoplovni inženjeri implementiraju WAAM za izradu kompleksnijih dijelova kod kojih dolazi do većih gubitaka sirovog materijala. Jedan od takvih dijelova je potporna konstrukcija krila zrakoplova. Obično se izrađuje od gredice te tako dolazi do gubitka više od 50 % materijala. Slika 13 prikazuje potpornu konstrukciju krila borbenog zrakoplova F35 izrađenu WAAM postupkom zavarivanjem plazmom od legure titana Ti6Al4V [20].



**Slika 13 Potporna konstrukcija krila zrakoplova [20]**

U ranije spomenutom istraživanju F. Martina i S. Williamsa uspoređeni su troškovi WAAM-a i klasičnih strojnih obrada za tri zrakoplovne komponente. Uspoređeni su troškovi izrade za: potporna konstrukciju krila, vanjski stajni trap i nosač pilona. U tablici 2 prikazane su usporedbe troškova izrade prema njihovom istraživanju. Iz tablice 2 vidljivo je da su troškovi izrade za sve dijelove manji ako se koristi WAAM tehnologija i to u rasponu 7 – 69 %. Zanimljivo je kako se vanjski sklop stajnog trapa izrađivao od titana i od visoko čvrstog čelika te su uštede vrlo slične. Na slici 14 prikazan je vanjski sklop stajnog trapa od titana i visoko čvrstog čelika [9].

**Tablica 2 Usporedba troškova WAAM-a i klasičnih postupaka [9]**

Komponente	Postupak	BTF	Troškovi (€x1000)	Smanjenje troškova
Potporna konstrukcija krila	Klasični	6,5	8,11	/
	WAAM	2,15	5,75	29 %
Vanjski sklop stajnog trapa	Klasični	12	18,14	/
	WAAM	2,3	5,6	69 %
Nosač pilona	Klasični	5,1	2,8	/
	WAAM	1,5	2,68	7 %



**Slika 14 Vanjski sklop stajnog trapa [9]**

Sustavi stajnog trapa jedni su od najkritičnijih zrakoplovnih komponenti, a namijenjeni su za potporu zrakoplovu prilikom slijetanja, kretanja i uzlijetanja. Izrađuju se od niskolegiranog čelika visoke čvrstoće EN 1.6928, kako bi se mogli zadovoljiti zahtjevi visokih opterećenja. Čelik 1.6928 je čelik visoke čvrstoće te visoke otpornosti na umor, ali je osjetljiv na zarez i lokalna opterećenja. Zbog toga izrada dijelova složene strukture klasičnim tehnologijama je izazovna za ovaj čelik. Stoga je sveučilište Cranfield provelo istraživanje izrade stajnog trapa WAAM postupkom čelikom 1.6928. Svi dijelovi izgrađeni su bez greške, međutim imali su manju čvrstoću te veću duktilnost u usporedbi s kovanim. Kako bi se poboljšala svojstva dijelova proveden je postupak toplinske obrade kaljenja te su tako postigli zadovoljavajuća mehanička svojstva [21].

## **4.2. Automobilska industrija**

Automobilska industrija također prati trendove uvođenja aditivnih postupaka u svoje proizvodne procese. Aditivnom proizvodnjom omogućuje se izrada dijelova kompleksnije geometrije uz manji trošak materijala i manje izgubljenog vremena. Također, postiže se veća fleksibilnost u proizvodnji, brži razvoj i napredniji dizajn proizvoda. WAAM se pokazao kao vrlo dobar postupak za izradu većih automobilskih dijelova složene geometrije koje je teško postići klasičnim tehnologijama poput okvira šasije automobila. Na slici 15 prikazan je optimiziran aluminijski okvir šasije električnog automobila izrađenog WAAM tehnologijom. WAAM omogućuje brzu izradu prikazanih okvira te u potpunosti zamjenjuje skupe alate ili kalupe. Usto, WAAM omogućuje optimizaciju dizajna, smanjenje težine te tako stvara bolji i konkurentniji proizvod [22].

Dakle, glavne prednosti WAAM-a u automobilskoj industriji su:

- snižen trošak proizvodnje,
- skraćeno vrijeme razvoja novih dijelova,
- mogućnost izrade laganih struktura,
- poboljšana prilagodljivost dizajna [22].



Slika 15 Šasija električnog automobila izrađena WAAM-om [22]

### 4.3. Brodogradnja

Zbog sve veće konkurencije u brodogradnji inženjeri moraju tražiti nova rješenja za smanjenje troškova i povećanja kvalitete brodskih dijelova. Aditivna proizvodnja nudi nove mogućnosti u proizvodnji brodske opreme. WAAM postupak postaje sve zastupljeniji u brodogradnji te se pokazao kao odlično rješenje za izradu zakrivljenih dijelova poput propelera i kormila [23].

Brodski propeleri obično bi se izrađivali metodom lijevanja. Međutim, lijevanje zahtijeva mnogo vremena budući da je potrebno određeno vrijeme za izradu kalupa, lijevanja te naknadne obrade proizvoda. WAAM se predstavlja kao vrlo dobra alternativa za lijevanje, budući da se izrada jednog propelera može izraditi relativno brzo. U Nizozemskom brodogradilištu Damen, izrađen je propeler promjera 1300 mm te mase 180 kg od brončane legure WAAM tehnologijom koji je prikazan na slici 16 [20,24].





Slika 16 Propeler izraden WAAM-om [24]

#### 4.4. Svemirska industrija

Već je naglašeno koliko je WAAM postupak bitan za iskoristivost materijala, što je posebno važno kada se koriste skuplji materijali poput titana. Tim koji se sastojao od Thales Alenia Space, WAAM3D, Sveučilišta Cranfield i Glenalmond Technologies je izradio prototip tlačne posude od legure titana Ti6Al4V koja će se koristiti u budućim svemirskim misijama s ljudskom posadom. Slika tlačne posude prikazana je na slici 17. Prototip je bio visok 1 m i težak 8,5 kg te je izrađen WAAM postupkom. Ustanovljeno je da se klasičnim tehnologijama zahtijeva oko 30 puta više sirovog materijala od svoje konačne mase, što znači da je korištenjem WAAM postupka uštedeno više od 200 kg Ti6Al4V po komadu. Osim uštede materijala primijećena je i znatna ušteda vremena izrade od čak 65 % [25].



**Slika 17 Izrada tlačne posude WAAM postupkom [25]**

## **5. Eksperimentalni dio**

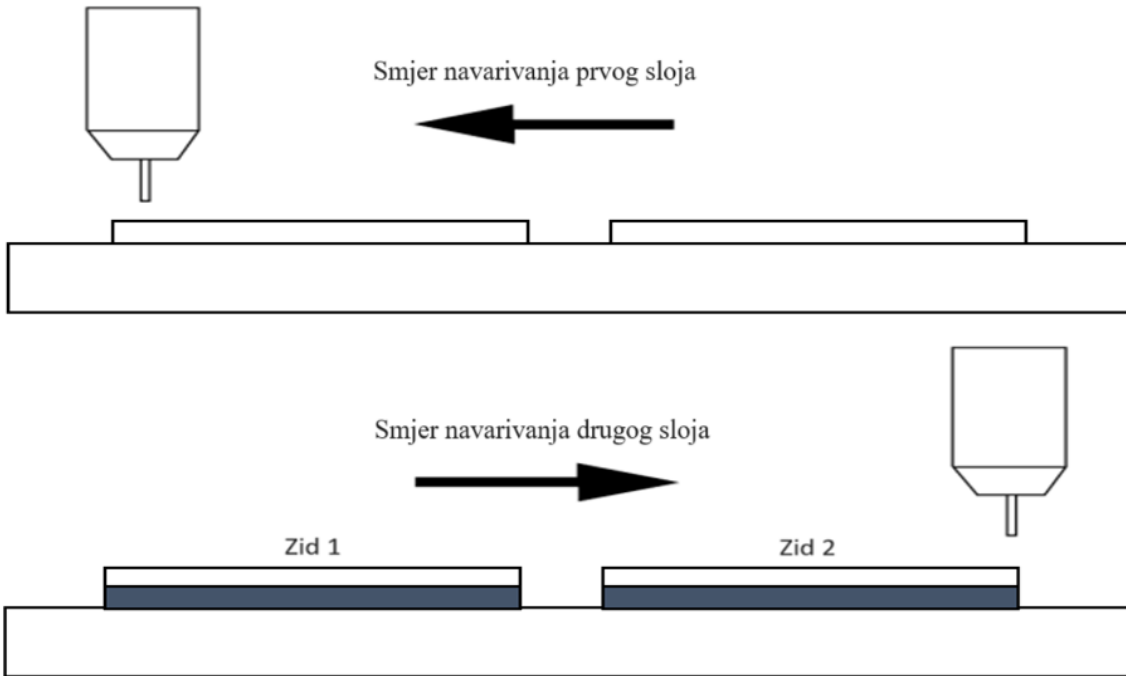
Eksperimentalni dio izveden je u laboratorijima Sveučilišta Sjever u Varaždinu. Cilj eksperimentalnog dijela bio je ispitati utjecaj gravitacije na geometriju zida od nehrđajućeg čelika navarenog WAAM postupkom. Planirano je izraditi tri zida, dva u vodoravnom i jedan u nadglavnom položaju. Iz svakog od navarenih zidova izrezali bi se uzorci te bi se podvrgnuli makrostrukturnom ispitivanju.

### **5.1. Opis eksperimenta**

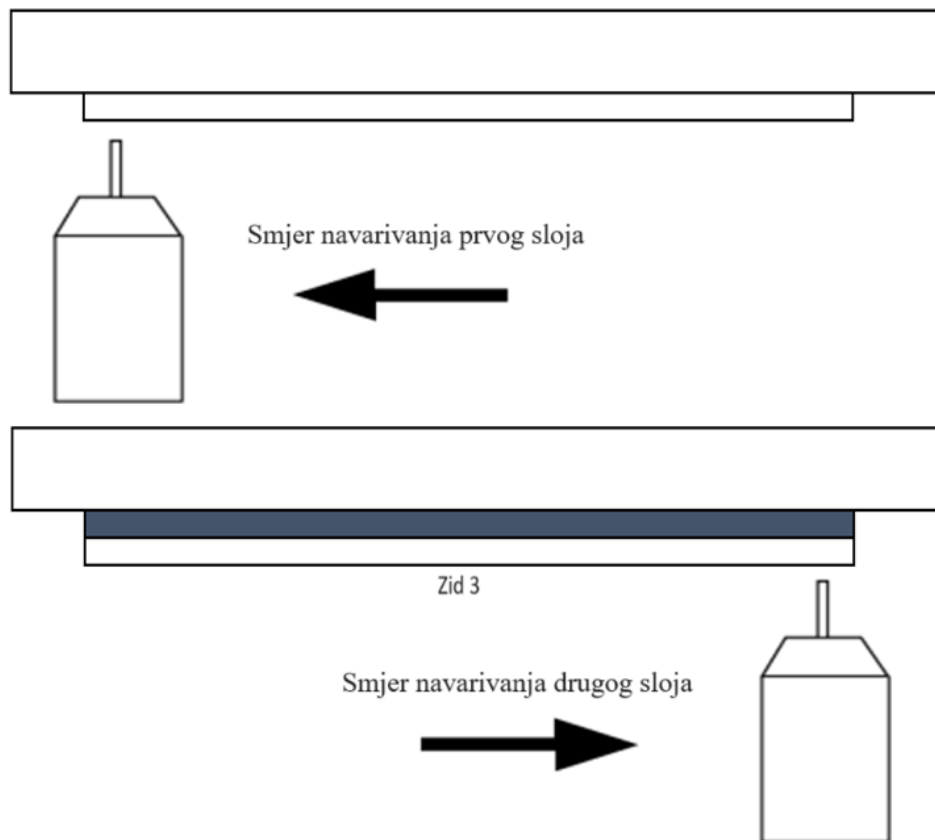
Provođenje eksperimenta zamišljeno je u više faza:

- priprema i stezanje podloge za vodoravni (PA) i nadglavni (PE) položaj
- izrada zidova WAAM tehnologijom
- izrezivanje i ispitivanje makrostrukture

Prva faza se odnosila na pripremu osnovne ploče za dva položaja zavarivanja: vodoravni (PA) i nadglavni (PE). Prije izrade zidova površina ploča brušena je ručnom brusilicom kako bi se uklonile sve nečistoće s podloge. Ispod osnovne ploče postavljeni su bakreni limovi kako bi se učinkovitije odvodila toplina. Planirana je izrada tri zida i to dva u PA položaju i jedan u PE položaju. Zidovi koji su rađeni u PA položaju rađeni su pravocrtno kako bi smanjile geometrijske nepreciznosti odnosno da se svaki sloj ravnomjerno nanese na prethodni sloj. Na slici 18 prikazan je skica procesa navarivanja dva zida u PA položaju, a na slici 19 trećeg zida u PE položaju.



Slika 18 Smjer navarivanja prva dva zida



Slika 19 Smjer navarivanja trećeg zida

Cilj zadatka je bio ispitati utjecaj gravitacije na geometriju izratka te može li se istim ili sličnim parametrima izraditi zidovi u PA i PE položaju. Planirani parametri navarivanja za sva tri zida prikazani su u tablici 3.

**Tablica 3 Parametri navarivanja**

Parametri navarivanja	Zid 1	Zid 2	Zid 3
Jakost struje [A]	180	190	180
Brzina navarivanja [cm/min]	36	36	36
Pomak po Z osi [mm]	3	3	3

Nakon izrade zidova slijedi izrezivanje uzoraka te obrada površine i ispitivanje makrostrukture istih.

## 5.2. Oprema korištena u eksperimentu

Za eksperiment korištena je oprema za: provođenja WAAM postupka, naknadnu obradu te mikroskopsku analizu. Pod opremu za WAAM postupak se podrazumijeva: izvor struje za zavarivanje te robot ili drugu vrstu uređaja za vođenje pištolja. Kao izvor struje za navarivanje korišten je *TransSteel 3000 Pulse* dok je uređaj za vođenje pištolja bio *Rail Bull*. Uređaj za vođenje pištolja je alternativa robotu te je zadužen za pravocrtno i konstantno gibanje pištolja prilikom navarivanja. Nakon svakog sloja izratka bilo je potrebno provjeriti temperaturu istog, a zato se koristio termometar *SKF TKTL 20 ThermoLaser*.

Uzorci su izrezani strojnom pilom te im je površina obrađena glodanjem na univerzalnoj glodalici. Za pripremu površina uzoraka odnosno brušenje koristio se *Metkon Forcipol IV Grinder & Polisher*. Za elektrokemijsko nagrizanje korištena je solna kiselina uz bakrenu pločicu, bateriju i hvataljku. Pripremljeni uzorci su ispitani stereomikroskopom *Olympus SZX10* kako bi se mogla analizirati makrostruktura.

### 5.2.1. Izvor struje za navarivanje

Za izvor struje za navarivanje zidova u ovom eksperimentu korišten je *TransSteel 3000 Pulse*. Ovaj uređaj predstavlja pulsni MIG/MAG uređaj za zavarivanje istosmjernom strujom. Ovim uređajem mogu se zavarivati različiti materijali. U tablici 4 prikazane su tehničke karakteristike uređaja *TransSteel 3000 Pulse*.

**Tablica 4 Tehničke karakteristike uređaja za izvor struje navarivanja [26]**

Tehničke karakteristike uređaja TransSteel 3000 Pulse	
Mrežni napon	380 / 400 V
Tolerancija mrežnog napona	-10 / + 15 %
Min. jakost struje zavarivanja	10 A
Max. jakost struje zavarivanja	300 A
Radni ciklus [10 min / 40 °C]	300 A / 40 %
Radni ciklus [10 min / 40 °C]	280 A / 60 %
Radni ciklus [10 min / 40 °C]	240 A / 100 %

Kod izbora izvora struje za zavarivanje potrebno je dobro proučiti tehničke specifikacije uređaja kako bi se odabrao pogodan uređaj za potrebe izrade proizvoda. U tablici 4 može se primijetiti tehnička karakteristika radnog ciklusa koja predstavlja vrlo bitnu karakteristiku pri odabiru uređaja za izvor struje za zavarivanje. Radni ciklus ili intermitencija pokazuje nam vrijeme u razdoblju od 10 minuta u kojem uređaj može raditi na naznačenoj jakosti struje. Primjerice, radni ciklus od 40 % na 300 A znači da stroj može raditi neprekidno 4 minute na 300 A, nakon čega će termička zaštita prekinuti dovod struje kako bi se uređaj ohladio. Radni ciklus 240 A / 100 % označuje jakost struje kod koje neće biti potrebe za naknadnim hlađenjem. Na slici 20 prikazan je uređaj TransSteel 3000 Pulse[27].

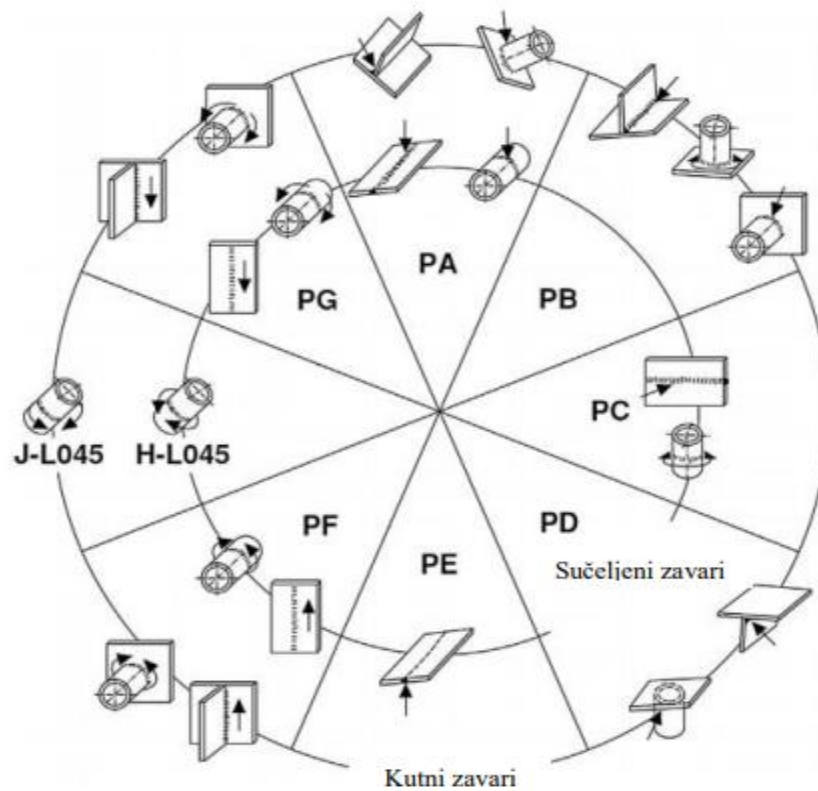


Slika 20 Uređaj TransSteel 3000 Pulse [26]

### 5.2.2. Uređaj za automatsko vođenje pištolja

Kod procesa zavarivanja poznato je da se ne može uvijek zavarivati u najpovoljnijim položajima zbog različitih ograničenja iz okoline. Ograničenja koja su prisutna u okolini zavarivača često stavljaju u nezgodne položaje te opasne situacije. Kako bi se omogućilo zavarivanje u različitim položajima razvijene su različite tehnologije, uređaji i metode. Prema ISO 6947:2019 glavni položaji zavarivanja su (slika 21):

- PA (vodoravni)
- PB (horizontalno-vertikalan)
- PC (horizontalni)
- PD
- PE (nadglavni)
- PF
- PG (vertikalan, prema dolje) [28].



Slika 21 Svi položaji zavarivanja [29]

Kako bi se olakšalo zavarivanje u navedenim položajima koriste se različiti pomoćni uređaji za vođenje pištolja za zavarivanja. U svrhu ovog eksperimenta korišten je *Rail Bull* uređaj koji je bio zadužen za precizno vođenje pištolja za zavarivanje, dizajniran je za izradu sučeljnih i kutnih zavara. Uređaj je pogodan za rad u svim navedenim položajima za zavarivanje, a u ovom eksperimentu upotrebljavao se za navarivanje u dva položaja: PA i PE. Također, korištenjem ovakvih uređaja smanjuje se gubitak dodatnog materijala odnosno povećava se iskoristivost osnovnog materijala. *Rail Bull* uređaj prikazan je na slici 22., a tehničke karakteristike uređaja prikazane su u tablici 5.





Slika 22 Rail Bull [30]

Tablica 5 Tehničke karakteristike Rail Bulla [30]

Tehničke karakteristike <i>Rail Bulla</i>	
Napon	100-240 V
Položaji zavarivanja	PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG
Promjer držača pištolja	16-22 mm; može do 35 mm
Horizontalna brzina	0-120 cm/min
Vertikalna brzina	0-110 cm/min
Horizontalna vučna sila	350 N
Vertikalna vučna sila	150 N

Prednosti uređaja za automatsko vođenje pištolja su:

- operater manje izložen toplini i parama
- pogodan za rad u različitim položajima
- pogon na 4 kotača, silikonski kotači – otporni na toplinu

- smanjen gubitak dodatnog materijala
- precizno kretanje pištolja pomoću poprečnog klizača [30].

### 5.2.3. Termometar SKF TKTL 20 ThermoLaser

Procesom navarivanja unosi se znatna količina topline u proizvod. Visok unos topline može izazvati nepoželjne deformacije te savijanje navarenog dijela. Zbog toga je izuzetno bitno pratiti temperaturu navarenog proizvoda i osigurati da ista ostane unutar optimalnog raspona kako bi se postigla željena mehanička svojstva i kvalitetan navar. Termometar je uređaj koji zavarivačima omogućuje da prate temperaturu zavarenog spoja ili navara. U ovom eksperimentu korišten je *SKF TKTL 20 ThermoLaser* koji spada u infracrvene i kontaktne termometre odnosno može mjeriti temperaturu pomoću infracrvenog detektora ili sonde. Ovaj uređaj nudi rješenje za različite primjene poput mjerenja temperature na: reflektirajućim površinama (aluminij), pokretnim dijelovima te tamo gdje ne bi trebalo biti kontakta zbog moguće kontaminacije.

Na slici 23 prikazan je *SKF TKTL 20 ThermoLaser* [31].



Slika 23 SKF TKTL 20 ThermoLaser [31]

Tehničke karakteristike prikazane su u tablici 6.

**Tablica 6 Tehničke karakteristike SKF TKTL 20 ThermoLaser [31]**

Tehničke karakteristike <i>SKF TKTL 20 ThermoLaser</i>	
Raspon temperature: pomoću infracrvenog detektora	-60 – 500 °C
Raspon temperature: pomoću sonde	-64 – 1400 °C
Sonda	TMDT 2-30 (maks. 900 °C)
Varijabla emisivnosti	0,1 – 1,0
Vrijeme odziva	500 – 1000 ms
Maksimalna snaga lasera	1 mW
Valna duljina lasera	630 – 650 nm

Iz tablice 6 vidljivo je da termometar može mjeriti temperature u rasponu od -60 do 1400 °C ako se upotrebljava sonda. Također, vidljivo je da navedeni termometar ima podesivu emisivnost 0,1 – 1,0. Postavljanjem ispravne emisivnosti objekta koji se mjeri može se poboljšati točnost mjerenja infracrvenim termometrom što je osobito bitno kod mjerenja temperature različitih materijala. Ako se termometar koristi zajedno sa sondom može se definirati točna emisivost te u konačnici točnije mjerenje temperature. Navedeno vrijeme odziva označuje da termometar brzo reagira na promjenu temperature [31].

#### **5.2.4. Uređaj za brušenje i poliranje**

Kako bi se mogla provesti makrostrukturna analiza, potrebno je uzorke podvrgnuti brušenju. Brušenje se provodi kako bi se s površine ispitnog uzorka uklonile nepravilnosti, nesavršenosti i neravnine što u konačnici omogućuje preciznije ispitivanje makrostrukture pod mikroskopom. *Metkon Forcipol IV Grinder & Polisher* je uređaj za brušenje i poliranje koji se koristio u ovom eksperimentu. Uređaj je pogodan za ručni i automatski rad budući da se brzina rotacije može podesiti. Tihi rad bez vibracije je omogućen je zahvaljujući kugličnim ležajevima, a kao standardnu značajku uključuju ulaz za vodu i fleksibilne izlaze za vodu s kontrolnim ventilima. Na prednjoj strani upravljačke ploče postavljeni su prekidači za upravljanje brzinom i vodom [32]. Na slici 24 prikazan je *Metkon Forcipol IV Grinder & Polisher*.



Slika 24 Metkon Forcipol 1V Grinder & Polisher

Tehničke karakteristike *Metkon Forcipol 1V Grinder & Polisher* su:

- stroj s jednom pločom
- brzina: 50 – 600 okr/min
- snaga motora: 0,56 kW
- promjer ploče: 200 – 250 mm [32].

### 5.2.5. Stereomikroskop

Za analizu geometrije uzoraka korišten je *Olympus SZX10* stereomikroskop. Uređaj prikazuje sliku pomoću svjetlosti koja se reflektira od uzoraka te pruža mogućnost uvećanja od 6,3x do 63x s objektivom od 1x odnosno uvećanje 123x s objektivom 2x. *Olympus SZX10* ima jedinstveni LED

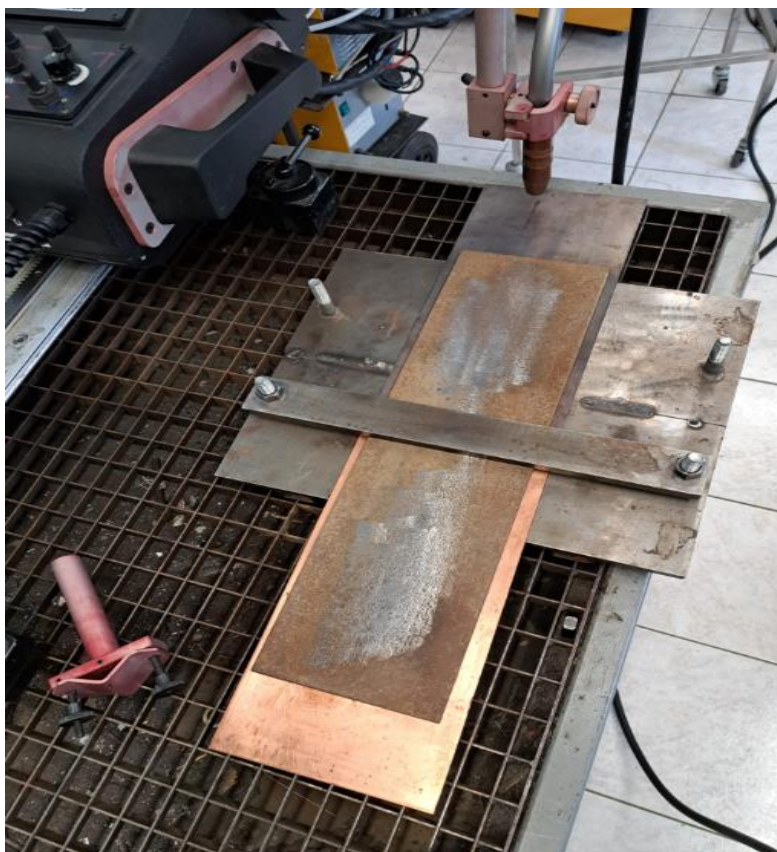
osnovni sustav koji omogućuje preciznu kontrolu propuštenog osvjetljenja to osigurava svijetle i ravnomjerne slike [33]. Na slici 25 prikazan je *Olympus SZX10* stereomikroskop.



*Slika 25 Stereomikroskop Olympus SZX10*

### **5.3. Materijali korišteni u eksperimentu**

Kako bi se mogli izraditi zidovi bilo je potrebno pripremiti čelične ploče od konstrukcijskog čelika S235 koje su služile kao podloge na koju će se isti navarivati. Prva ploča je bila dimenzije 135 x 470 mm te debljine 5 mm. Materijal ploče nije bio od prevelike važnosti, međutim ploču je trebalo izbrusiti te očistiti od nečistoća pomoću čelične četke. Ploča je bila stegnuta pomoću stezne naprave, a ispod ploče postavljene su dvije bakrene ploče debljine 1,5 mm koje su služile za odvođenje topline. Na slici 26 prikazana je ploča koja je služila kao podloga za navarivanje u PA položaju.



**Slika 26 Podloga za PA položaj**

Za izradu zida korištena je žica ER 308 LSi promjera 1 mm (prema EN ISO 14343-A oznaka G 19 9 LSi). Žica spada u austenitne nehrđajuće čelike, a najčešće se upotrebljava za zavarivanje spremnika, cijevi i opreme od nestabiliziranog ili stabiliziranog Cr-Ni čelika otpornog na koroziju koji se koristi u prehrambenoj i farmaceutskoj industriji [34]. Tipična kemijska svojstva žice prikazana su u tablici 7, a mehanička svojstva u tablici 8.

**Tablica 7 Kemijski sastav ER 308 LSi [34]**

Kemijski sastav žice ER 308 LSi					
Kemijski element	C	Si	Mn	Cr	Ni
Postotak u žici	0,01	0,7	1,9	20	9,5

**Tablica 8 Mehanička svojstva ER 308 LSi [34]**

Mehanička svojstva žice ER 308 LSi	
Vlačna čvrstoća [ $R_m$ ]	570

Granica razvlačenja [ $R_{p0,2}$ ]	450
Istezanje [A5]	38
Udarni rad loma [KV]	20 [°C] → 100 [J]

Zaštitni plin koji se koristio prilikom procesa navarivanja je Argon 4.8. Oznaka 4.8 odnosi se na kvalitetu plina izraženog s brojem devetki, pa tako prva brojka označuje broj devetki u postotku čistoće, a druga brojka označuje zadnju znamenku postotka. S toga argon 4.8 označuje 99,998 % čist plin. Argon se najčešće koristi za MIG i TIG zavarivanje budući da argon ne reagira s ostalim plinovima čak i na izuzetno visokim temperaturama [35]. Na slici 27 prikazan je boca u kojoj je zaštitni plin Argon 4.8 s protokom 16 l/min.



Slika 27 Zaštitni plin Argon 4.8

## 6. Izvođenje eksperimenta

Eksperiment je započeo navarivanjem zidova od nehrđajućeg čelika aditivnom proizvodnjom električnim lukom i žicom i to u dva različita položaja: PA i PE. Zidovi su navareni na podlogu od općeg konstrukcijskog čelika S235. Dimenzije prve ploče koja je korištena kao podloga za navarivanje su 470 x 135 x 5 mm. Za izradu zidova korišten je MIG postupak, a prijenos dodatnog materijala proveden kombinacijom kratkog spoja i štrcajućeg luka. Prije izrade zidova bilo je

potrebno unijeti parametre u uređaj za izvor struje za zavarivanje. Parametri koji se definiraju na uređaju su:

- vrsta dodatnog materijala
- promjer dodatnog materijala
- vrsta zaštitnog plina
- jakost struje
- napon

Na slici 28 prikazan je upravljačka ploča uređaja za izvor struje zavarivanja, *TransSteel 3000 Pulse*.



Slika 28 Upravljačka ploča uređaja za izvor struje za zavarivanje



Za izradu zidova koristila se žica od nehrđajućeg čelika promjera 1 mm, a kao dodatni plin koristio se Argon 4.8, protoka 16 l/min. Prije navarivanja bilo je potrebno pripremiti podlogu na koju se navaruju zidovi. Ploče su prvo brušene na mjestima na kojima je predviđena izrada zidova kako bi ih se očistilo od nečistoća. Zatim je bilo potrebno pričvrstiti ploče za dva položaja zavarivanja, najprije za PA položaj, pa zatim PE položaj. Ploče su bile pričvršćene pomoću steznih naprava kako ne bi došlo do pomicanja podloge te kako bi dobili što točniju geometriju. Ispod ploča su bile pričvršćena dva bakrena lima debljine 1,5 mm u svrhu što bržeg odvođenja topline. Prije nanošenja prvog sloja uklonjene su nečistoće pomoću metalne četke. Slika 29 prikazuje pričvršćenu podlogu za PA položaj navarivanja, a slika 30 prikazuje pričvršćenu podlogu za PE položaj.



**Slika 29 PA položaj zavarivanja**



**Slika 30 PE položaj zavarivanja**

Nakon što su podloge pričvršćene te parametri za navarivanje podešeni uslijedilo je pozicioniranje pištolja za navarivanje. Pištolj za navarivanje postavljen je u držač uređaja za automatsko vođenje pištolja *Promotech Rail Bull*. Pištolje je postavljen pod kutom od  $90^\circ$  u odnosu na ploče. Zidovi koji su navarivani u PA položaju navarivali su se pravocrtno kako bi se smanjile geometrijske nepravilnosti. Na slici 31 prikazan je pištolj za navarivanje koji je postavljen na uređaj za precizno vođenje pištolje u PA položaju. Također, na slici je vidljiva pol klema koja je povezana na radni stol te osigurava postizanje kratkog spoja između elektrode odnosno dodatnog materijala i radnog komada.



**Slika 31 Pištolj za zavarivanje postavljen u početnoj točki**

Za početak je provedeno navarivanje dva zida u PA položaju i to pomicanjem pištolja u dva smjera. Prvi sloj je navaren lijevom tehnikom, odnosno pravocrtnim gibanjem pištolja s lijeva na desno, a zatim drugi sloj s desna na lijevo. Smjer navarivanja se mijenjao budući da je došlo do većih razlika u visini na krajevima zidova. Na lijevoj strani podloge navaren je jedan sloj zida s postavljanim parametrom jakosti struje 180 A, a s desne strane navaren je sloj s postavljenim parametrom jakosti struje 190 A. Saprnicica pištolja je bila udaljena 15 mm od podloge, a nakon svakog prolaza pištolj je pomaknut okomito prema gore u odnosu na podlogu za 3 mm. Brzina navarivanja iznosila je 36 cm/min, a podešena je na uređaju za automatsko vođenje pištolja. Nakon svakog sloja primjenom metalne četke uklanjale su se nečistoće te se provjeravala temperatura navarenih zidova po cijeloj dužini sloja. Temperatura se mjerila termometrom *SKF TKTL 20 ThermoLaser*. Svaki idući sloj bi

se mogao navariti ako bi temperatura prethodnog sloja bila ispod 100 °C. Na slici 32 prikazano je mjerenje međuprolazne temperature s termometrom *SKF TKTL 20 ThermoLaser*. Na slici 33 prikazani su prvi prolazi zida za navarivanje jakosti struje 180 A i 190 A navareni u PA položaju.



**Slika 32 Mjerenje međuprolazne temperature**



**Slika 33 Prvi sloj navara u PA položaju**

Iz slike 33 je vidljivo da su oba navara jednolične geometrije duž cijele njihove dužine. Iako je na početku navara struja nešto viša zbog uspostave električnog luka u prvom sloju se ne vidi veća razlika u geometriji kroz cijelu dužinu. Već u prvom prolazu je vidljivo da navar struje 190 A širi u odnosu na navar od 180 A. U tablici 9 prikazane su prosječne jakosti struje za ova dva navara.

**Tablica 9 Prosječan iznos jakosti struje**

Broj prolaza	Navarivanje strujom 180 A Prosječan iznos jakosti struje [A]	Navarivanje strujom 190 A Prosječan iznos jakosti struje [A]
1	150	161
2	150	161
3	153	164
4	153	169
5	154	175
6	154	157
7	154	168

8	159	168
9	158	169
10	154	168
11	159	167
12	157	170
13	156	166
Prosjek	154,7	166,4

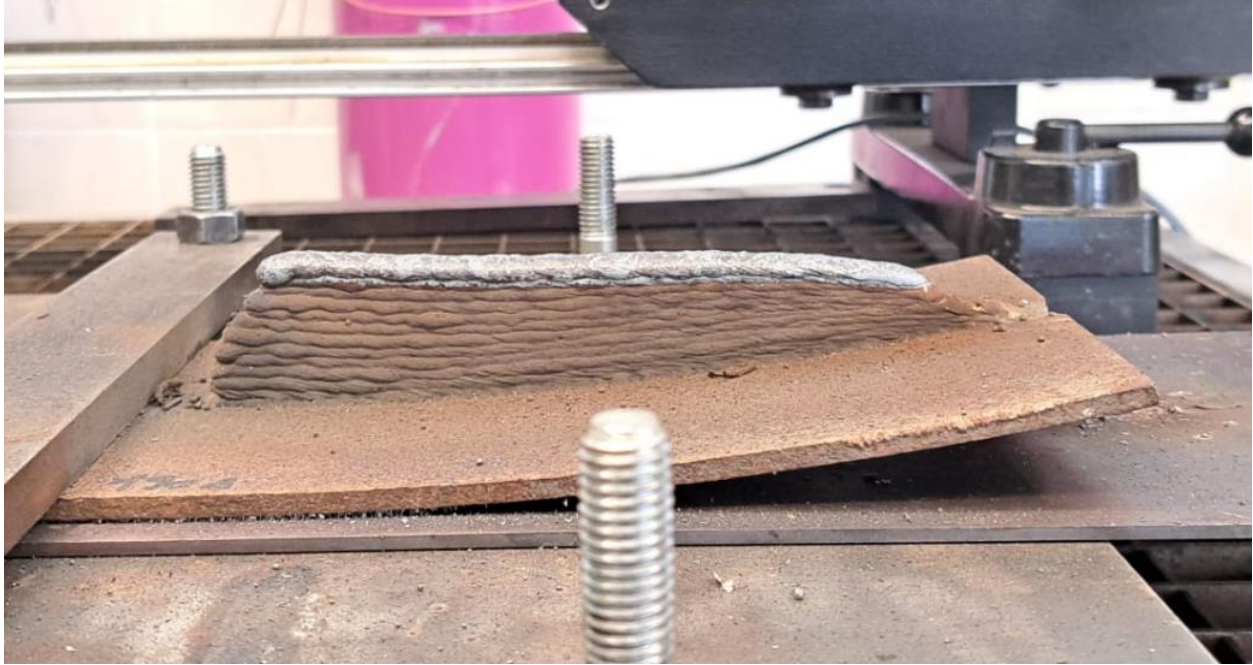
Već nakon drugog prolaza uočeno je manje savijanje podloge, koja se na svojim krajevima počela podizati od bakrenih ploča. Do takve deformacije došlo je zbog znatnog unosa topline. Budući da se zbog te deformacije znatno manje topline odvodilo, kraj podloge je stegnut sa steznom napravom. Nakon 6. sloja uočeno je znatno veće savijanje podloge koje se može vidjeti na slici 34. Također vidljiva je značajna razlika u visini početne i krajnje točke zidova te se nakon hlađenja zid navarivao u suprotnom smjeru. Prilikom izrade tog sloja došlo je do greške u upravljaču za automatsko vođenje koji se nije na vrijeme zaustavio.



**Slika 34 Savijanje podloge za navarivanje**



**Slika 35 Zid navaren strujom jakosti 180 A**



**Slika 36 Zid navaren strujom jakosti 190 A**

Na slikama 35 i 36 je vidljivo 12 slojeva budući da između 2. i 3. prolaza nije podignuta visina sapnice. Nakon što su izrađena dva zida u PA položaju započela je izrada zida u PE položaju. Planirano je izraditi zid koji bi bio napravljen jednakim parametrima kao u PA položaju. Odabrani parametri bili su:

- jakost struje 180 A
- brzina 36 cm/min
- udaljenost sapnice od podloge 15 mm
- pomak po z osi 4,5 mm





**Slika 37 Pištolj postavljen u početnoj točki u PE položaju**

Na slici 38 i 39 prikazan je prvi sloj navaren u PE položaju. Već na prvom sloju uočene se određene nestabilnosti. Prvi sloj nije toliko jednoličan te je uočena mala vertikalna valovitost prvog sloja.



**Slika 38 Prvi sloj navara u PE položaju ( $I=180\text{ A}$ ;  $v=36\text{cm/min}$ ;  $z=4,5\text{ mm}$ )**



**Slika 39 Druga perspektiva prvog sloja navara u PE položaju ( $I=180\text{ A}$ ;  $v=36\text{cm/min}$ ;  $z=4,5\text{ mm}$ )**

Nakon drugog sloja vertikalna valovitost se još povećala. Na četiri mjesta došlo je do slijevanja taline uslijed djelovanja gravitacije te je onemogućena daljnja izrada zida. Prosječan iznos jakosti struje za prvi prolaz iznosio je 160 A, a za drugi prolaz 157 A. Na slici 40 prikazan je izgled zida nakon dva sloja.



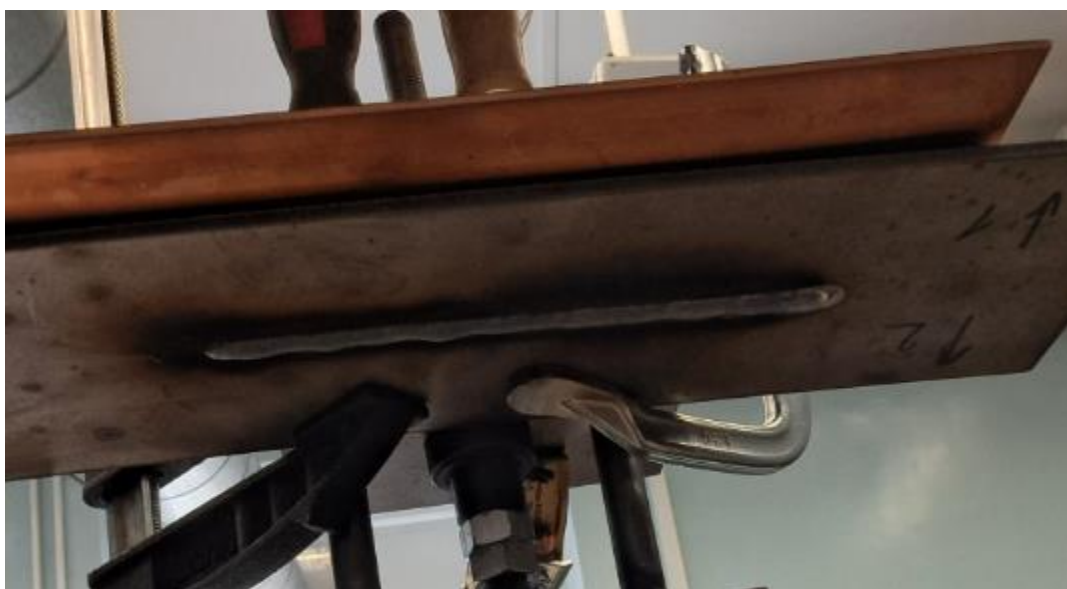
**Slika 40 Drugi sloj navara u PE položaju ( $I=180$  A;  $v=36$ cm/min;  $z=4,5$  mm)**

Nakon neuspješnog prvog pokušaja izmijenjeni su parametri brzine i udaljenosti sapnice od podloge. Odabrani parametri bili su:

- jakost struje 180 A
- brzina 44 cm/min
- udaljenost sapnice od podloge 15 mm
- pomak po z osi 3 mm



**Slika 41 Prvi sloj navara u PE položaju ( $I=180\text{ A}$ ;  $v=36\text{cm/min}$ ;  $z=4,5\text{ mm}$ )**



**Slika 42 Druga perspektiva prvog sloja navara u PE položaju ( $I=180\text{ A}$ ;  $v=44\text{cm/min}$ ;  $z=3\text{ mm}$ )**

S navedenim parametrima prvi sloj je linearniji u odnosu na prethodni, ali je uočljiva manja valovitost blizu sredine sloja. Također uočeno je da se na početku navara rastalilo više dodatnog materijala budući da je tu struja veća uslijed uspostave električnog luka. Uslijed navarivanja idućeg sloja ponovno je došlo do izraženije valovitosti. Prosječan iznos jakosti struje za prvi prolaz iznosio je 178 A, a za drugi prolaz 163 A.

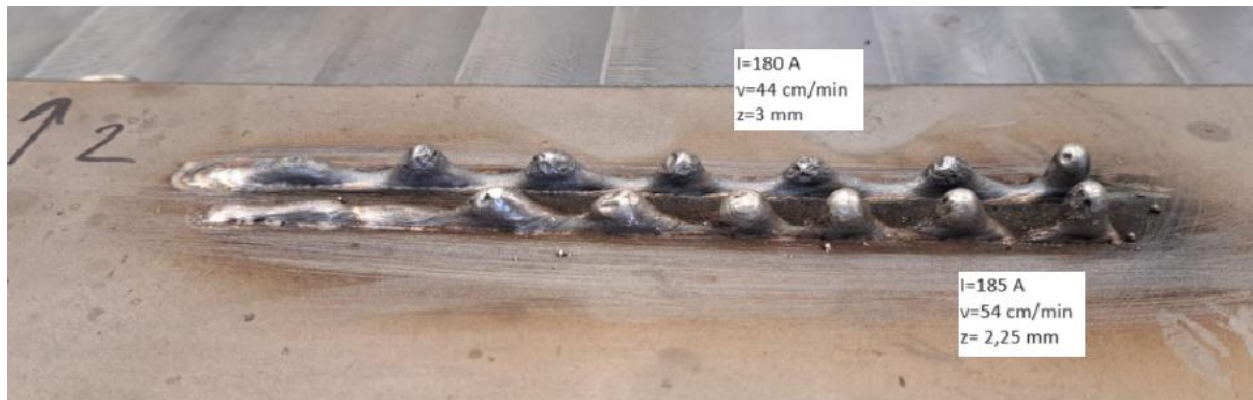
Idući parametri iznosili su:

- jakost struje 185 A
- brzina 54 cm/min
- udaljenost sapnice od podloge 15 mm
- pomak po z osi 2,25 mm

Kao i kod prethodna dva slučaja došlo je do značajnog slijevanja taline nakon navarivanja drugog sloja. Na slikama 43 i 44 prikazani su izratci s izuzetno izraženom vertikalnom valovitošću.



Slika 43 Drugi sloj navara u PE položaju

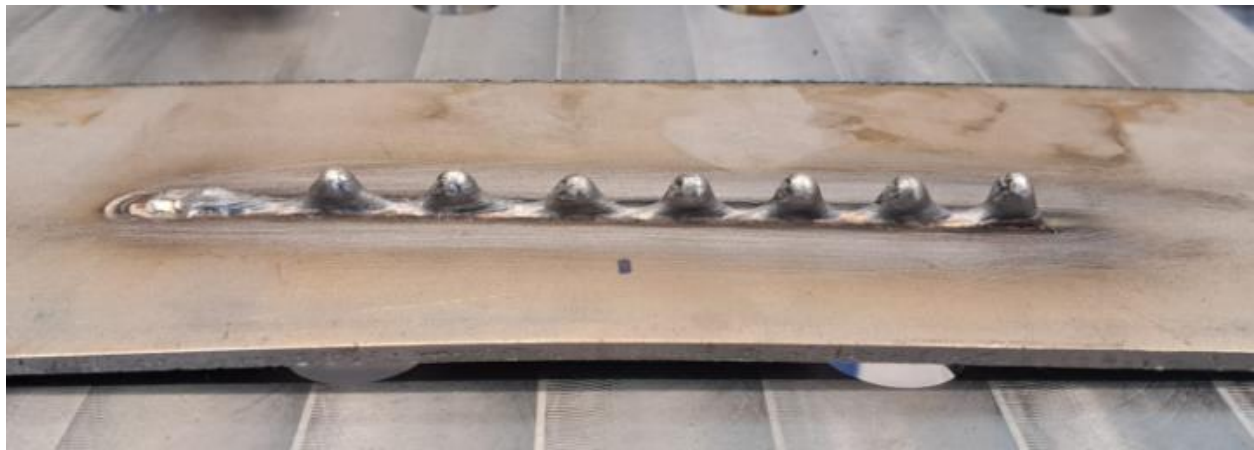


**Slika 44 Drugi sloj navara u PE položaju**

Na posljjetku odabrani su slijedeći parametri:

- jakost struje 185 A
- brzina 58 cm/min
- udaljenost sapnice od podloge 15 mm
- pomak po z osi 1,5 mm

Prosječan iznos jakosti struje za prvi prolaz iznosio je 188 A, a za drugi prolaz 183 A, što je znatno veća jakost uspoređujući s prethodnim pokušajima. Kao i kod prethodnih slučajeva nakon drugog sloja navara uslijedilo je slijevanje taline te pojave vertikalne valovitosti. Na slici 45 prikazan je posljednji navar od dva sloja.



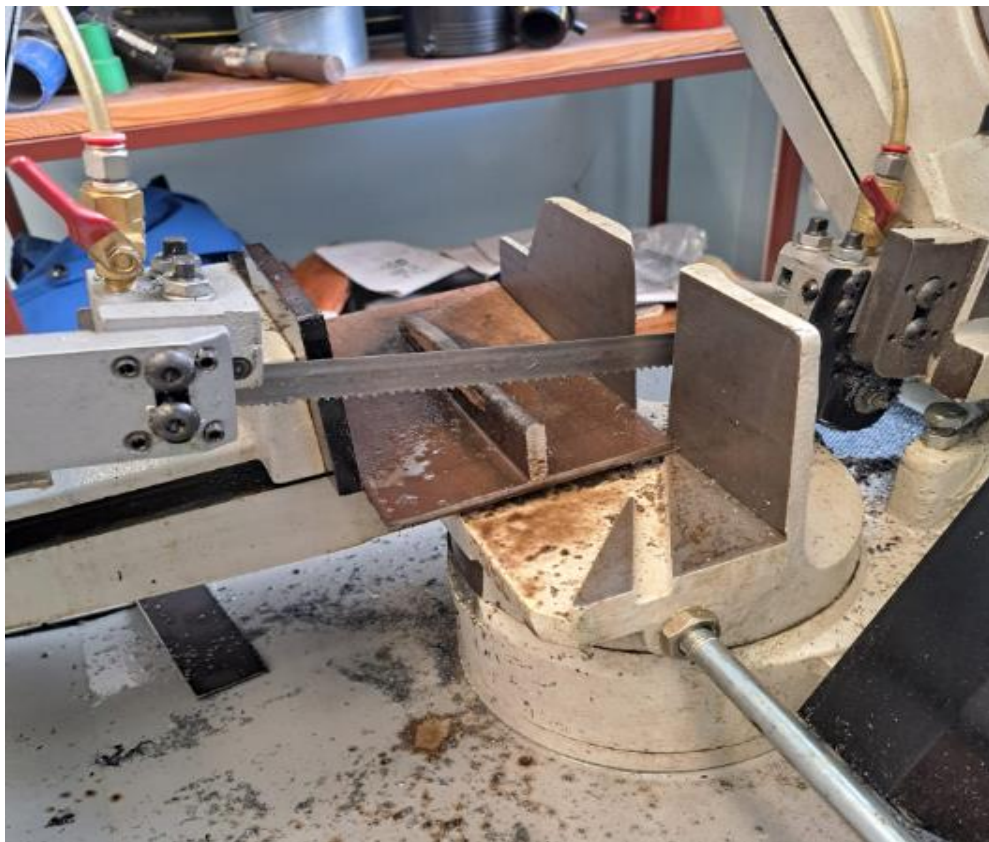
**Slika 45 Drugi sloj navara u PE položaju (I=185 A; v=58 cm/min; z=1,5 mm)**

## 6.1. Priprema i izrada ispitnih uzoraka

Nakon navarivanja zidova uslijedila je priprema ispitnih uzoraka za dva zida koja su navarena u PA položaju, budući da zidovi koji su navareni u PE položaju nisu bili prikladni za daljnja ispitivanja. Priprema uzoraka podrazumijeva:

- rezanje uzorka
- brušenje – grubo, fino
- čišćenje, odmašćivanje
- nagrivanje

Izrađen je po jedan uzorak iz svakog zida te se analizirala makrostruktura uzoraka. Uzorci su izrezani strojnom pilom, poprečno 30 mm od ruba. Na slici 46 prikazano je rezanje uzoraka na strojnoj pili, a na slici 47 površina uzoraka nakon obrade rezanja.



Slika 46 Rezanje uzoraka na strojnoj pili



**Slika 47 Površina uzorka nakon obrade rezanja navarenog strujom jakosti 180 A (lijevo) i 190 A (desno)**

Nakon što su uzorci bili izrezani te da bi se smanjilo vrijeme potrebno za obradu brušenja, površina uzoraka podvrgnuta je glodanju. Uzorci su izglodani na univerzalnoj glodalici, a površina uzoraka nakon glodanja prikazana je na slici 48. Na slici 48 vidljivo je da je površina finija u odnosu na površinu poslije rezanja pilom, ali su i dalje vidljive nepravilnosti uzrokovane glodanjem.



**Slika 48 Površina uzorka nakon obrade glodanja navarenog strujom jakosti 180 A (lijevo) i 190 A (desno)**

Zatim je uslijedila obrada površine brušenjem različitim brusnim papirima. Postupak brušenja uzorka odrađen je na uređaju uređaju za brušenje i poliranje. Brzina rotacije iznosila 120 – 160 okr/min. Tablica 10 prikazuje vrstu papira koji su korišteni za obradu uzoraka te brzinu rotacije i granulaciju brusnih zrna.



**Tablica 10 Parametri brušenja**

Broj prolaza	Oznaka brusnog papira	Prosječna veličina granula abraziva [ $\mu\text{m}$ ]	Brzina rotacije brusnog papira [okr/min]
1	P120	125	150
2	P240	58,5	160
3	P400	35	155
4	P600	25,8	155
5	P1000	18,3	140

Budući da je provedena analiza makrostrukture nije bilo potrebe za poliranjem uzoraka već je bilo dovoljno fino brušenje. Uzorci su brušeni uz pomoć ručne sile pritiska, a sam postupak je trajao 4 sata. Proces je započeo grubim brušenjem kako bi se uklonile sve nepravilnosti s površine uzorka koje su posljedica obrade glodanja. Grubo brušenje je zahtijevalo najviše vremena budući da su tad najvidljivije nepravilnosti od prethodne obrade. Kao rashladno sredstvo koristila se voda kako ne bi došlo do pregrijavanja uzorka. Postupno se prelazilo na finije abrazive kako bi se postigla što glađa i ravnija površina. S finijim brusnim papirima vrijeme obrade bilo je znatno kraće. Na slici 49 prikazan je uređaj za brušenje *Metkon Forcipol IV Grinder & Polisher*, a na slici 50 prikazani su uzorci nakon obrade brušenja.



**Slika 49** Površina uzorka nakon obrade brušenja navarenog strujom jakosti 180 A (lijevo) i 190 A (desno)

Uslijedio je postupak nagrivanja. Razlikuju se četiri osnovne vrste nagrivanja:

- Kemijsko
- Elektrolitičko
- Obojeno
- Termičko

U ovom eksperimentu proveden je postupak elektrokemijskog nagrivanja, kako bi se istaknula struktura ispitnog uzorka za makrostrukturnu analizu. Pribor korišten za elektrokemijsko nagrivanje uključivao je:

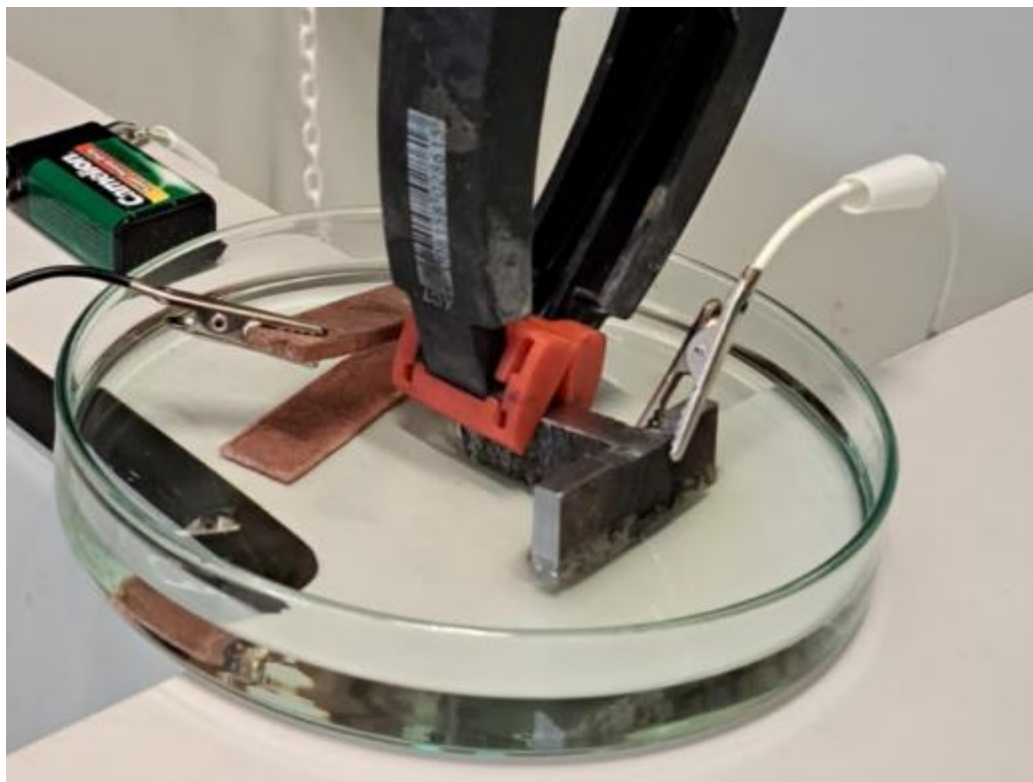
- solna kiselina; HCl 19%
- baterija; 9 V
- bakena pločica
- hvataljka
- voda
- pol kleme

Slika 51 prikazuje pribor koji je korišten za elektrokemijsko nagrivanje površine.



**Slika 50 Pribor za elektrokemijsko nagrizanje**

Pozitivni, odnosno + pol baterije, bio je povezan s ispitnim uzorkom čija se površina nagrizala, dok je – pol bio povezan s bakrenom pločicom. Slika 52 prikazuje elektrokemijsku reakciju površine uzorka u solnoj kiselini.



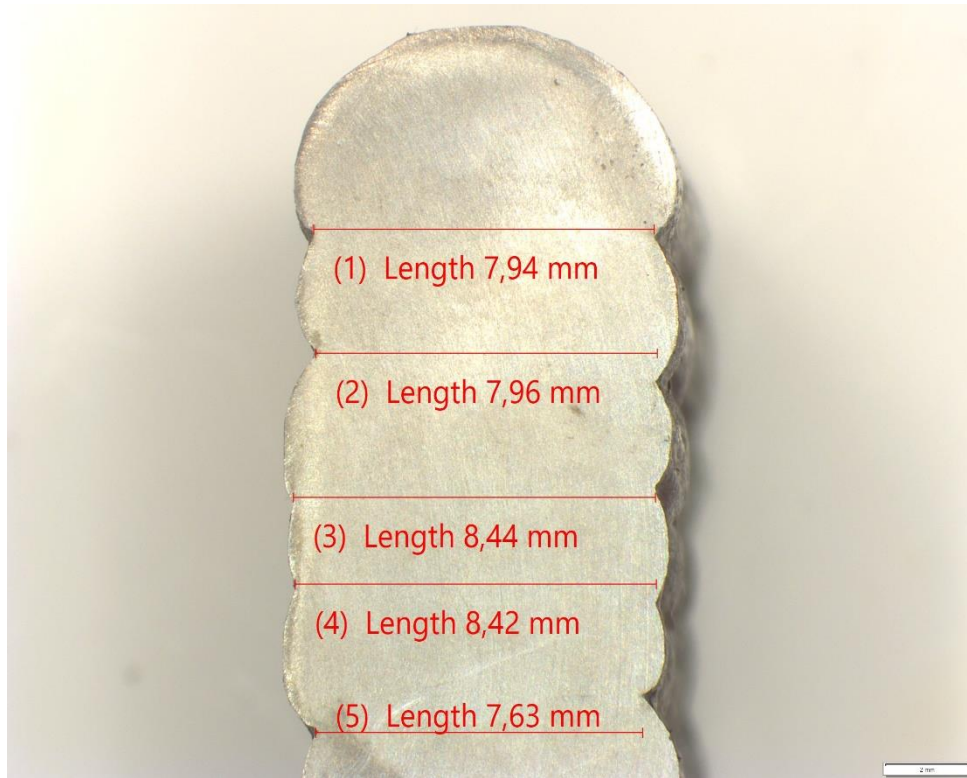
**Slika 51 Elektrokemijska reakcija površine uzorka u solnoj kiselini**

Vrijeme nagrizanja strukture površine uzorka trajalo je otprilike 120 sekundi, nakon čega je uzorak uronjen u vodu. Kontaktom uzorka s vodom prekinuta je reakcija, a uzorak je nježno obrisao ubrusom. Završetkom ovog postupka ispitni uzorci su postali spremni za makrostrukturnu analizu.

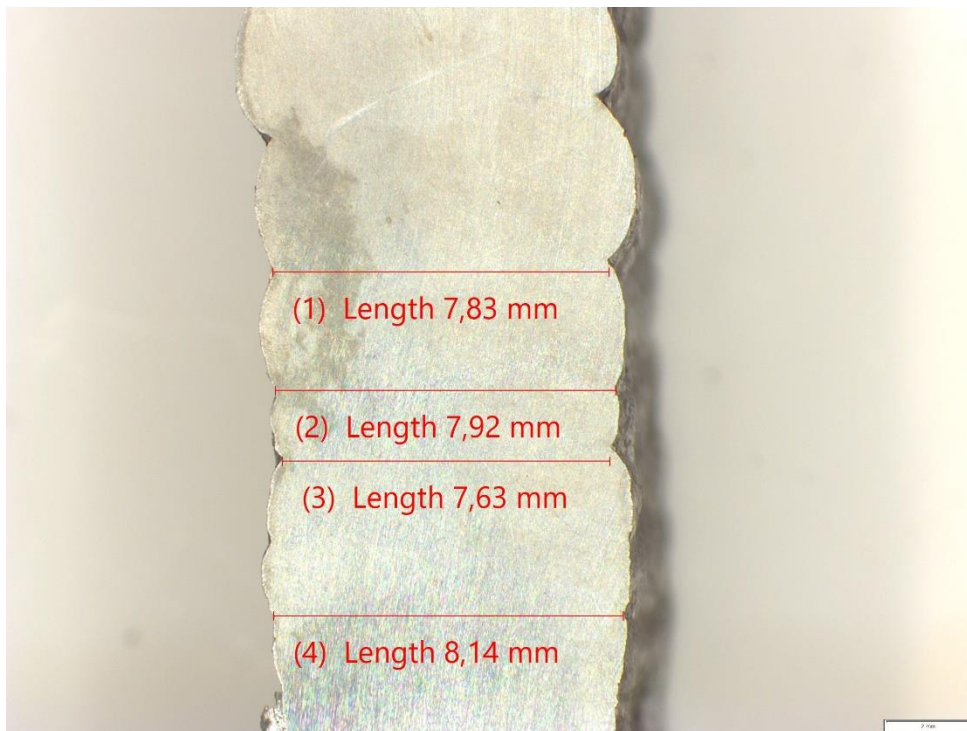
## **6.2. Mjerenje geometrije zidova**

Analiza mikrostrukture je kreirana pomoću stereomikroskopa Olympus SZX10. Ispitana su dva uzorka koja su prethodno podvrgnuta brušenju te elektrokemijskom nagrizanju. Stereomikroskop Olympus SZX10 povezan je s računalom te pomoću programa Leica Application Suit omogućuje se izrada i analiza ispitanih uzoraka. Slike ispitanih uzoraka prikazana su na slikama 53, 54, 55, 56, 57, 58

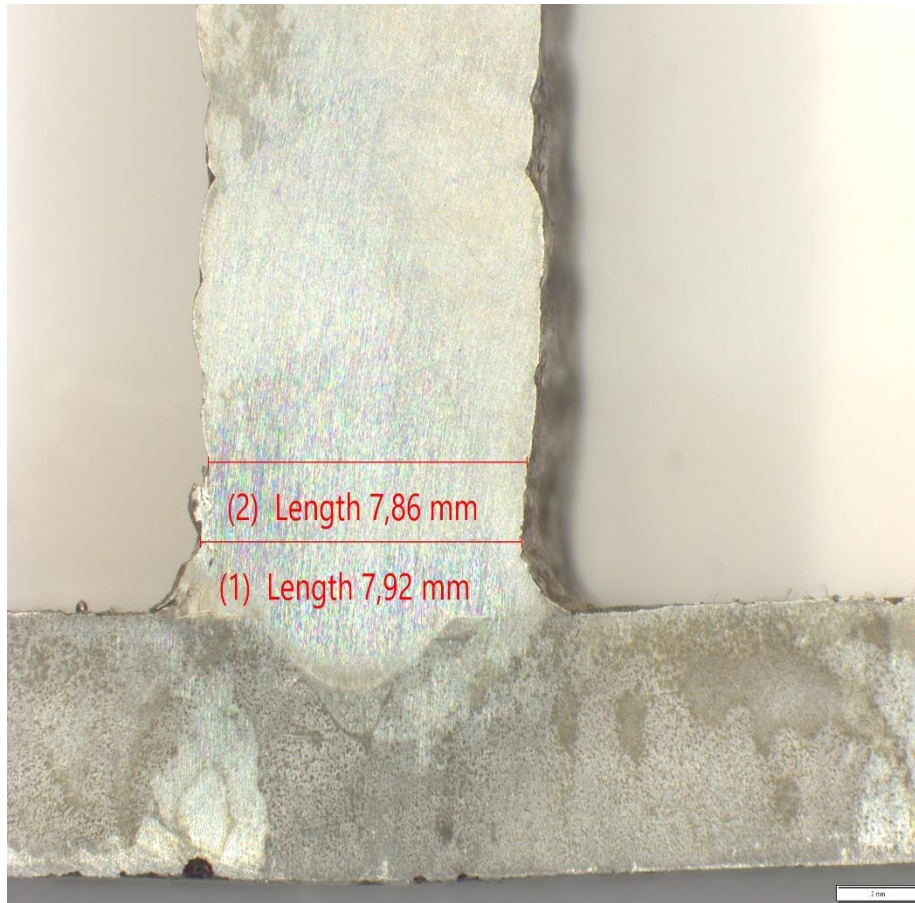
Na slikama nisu uočljive površinske nepravilnosti, a na samom dnu oba uzorka vidljiva je penetracija dodatnog materijala u podlogu. Kod oba uzoraka nije došlo do značajnog skošenja zida te su svi slojevi ravnomjerno navareni. Na slikama su prikazane kotirane efektivne širine navarenih zidova. Kod oba zida najveća efektivna širina zabilježena je na prvom sloju.



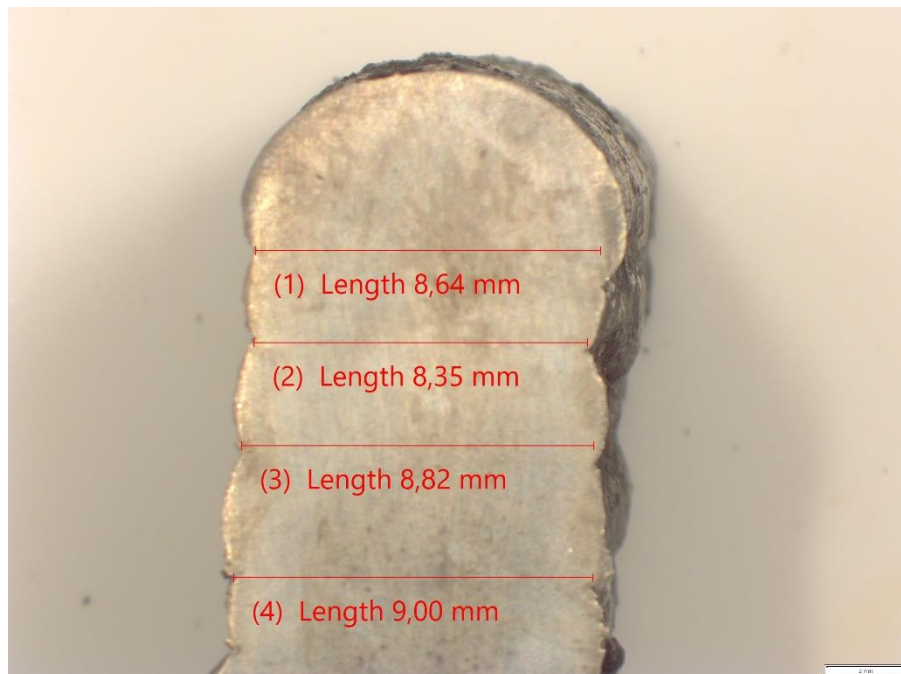
**Slika 52 Prikaz efektivne širine gornjeg dijela uzorka navarenog strujom jakosti 180 A**



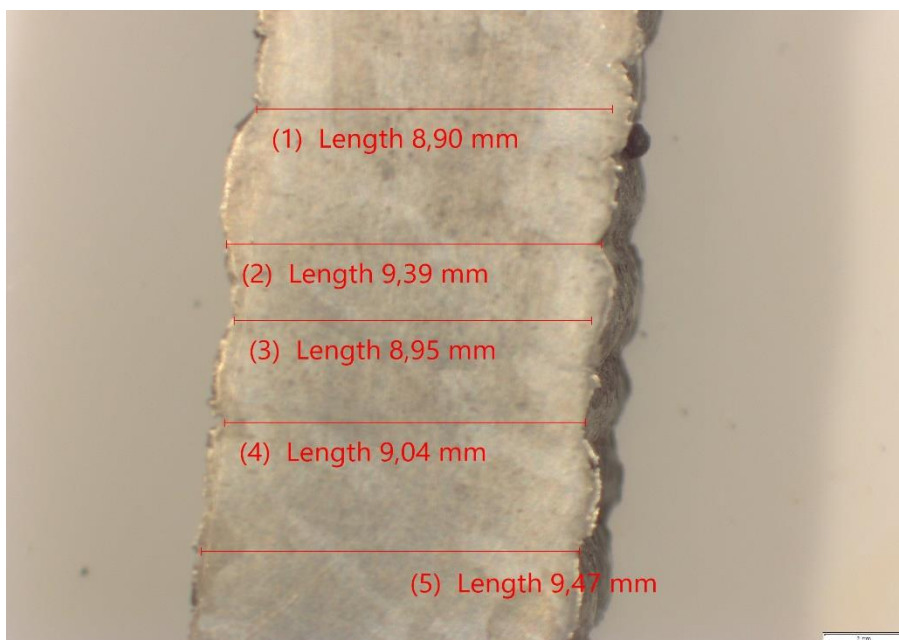
**Slika 53 Prikaz efektivne širine srednjeg dijela uzorka navarenog strujom jakosti 180 A**



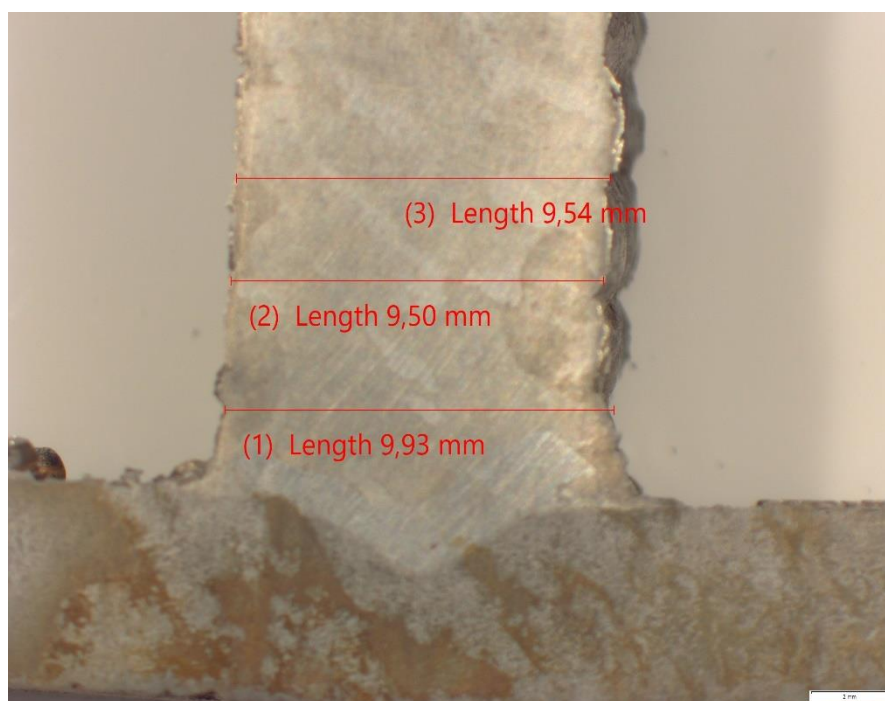
**Slika 54 Prikaz efektivne širine donjeg dijela uzorka navarenog strujom jakosti 180 A**



**Slika 55 Prikaz efektivne širine gornjeg dijela uzorka navarenog strujom jakosti 190 A**



**Slika 56 Prikaz efektivne širine srednjeg dijela uzorka navarenog strujom jakosti 190 A**



**Slika 57 Prikaz efektivne širine donjeg dijela uzorka navarenog strujom jakosti 190 A**

U tablicama 11 i 13 prikazane su vrijednosti efektivnih širina zidova navarenih strujama jakosti 180 i 190 A u PA položaju. U tablicama 12 i 14 prikazane su izdvojene vrijednosti efektivnih širina.

**Tablica 11 Vrijednosti efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 180 A**

<b>Izmjerene vrijednosti efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 180 A</b>	
<b>Sloj</b>	<b>Efektivna vrijednost [mm]</b>
1	8,54
2	7,86
3	8,14
4	8,32
5	7,63
6	7,92
7	7,83
8	7,63
9	8,42
10	8,44
11	7,96
12	7,94

**Tablica 12 Prikupljeni podaci efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 180 A**

<b>Prikupljeni podaci efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 180 A</b>	
Minimalna efektivna širina zida [mm]	7,63
Maksimalna efektivna širina zida [mm]	8,54
Aritmetička sredina efektivnih širina zida [mm]	8,05



**Tablica 13 Vrijednosti efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 190 A**

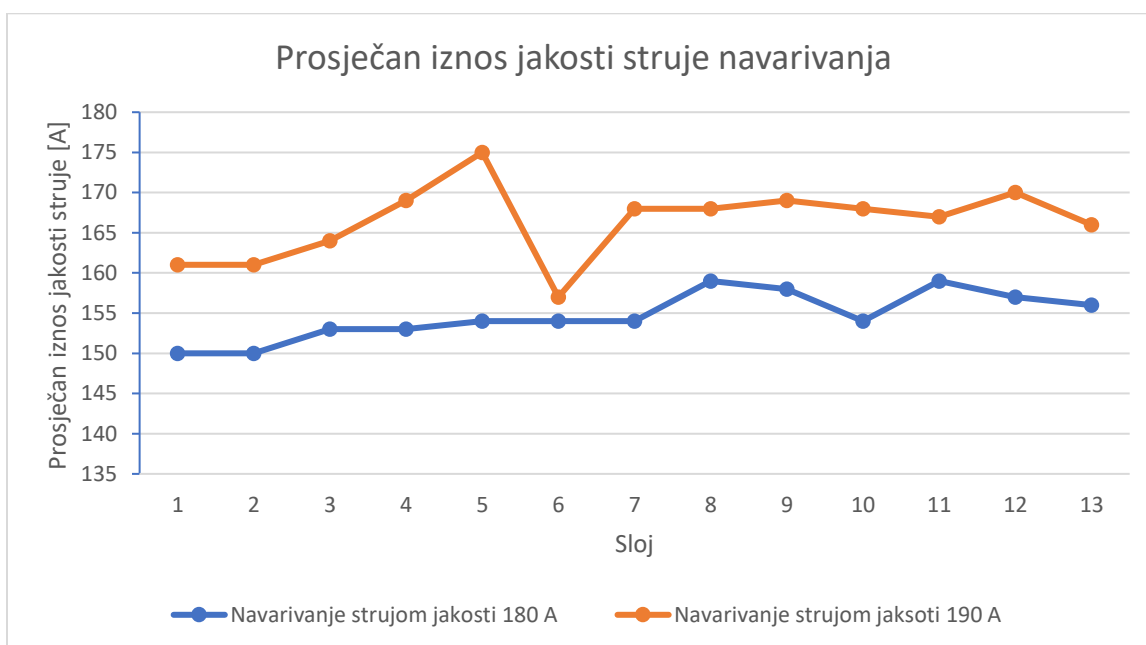
<b>Izmjerene vrijednosti efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 190 A</b>	
<b>Sloj</b>	<b>Efektivna vrijednost [mm]</b>
1	9,93
2	9,63
3	9,24
4	9,47
5	9,04
6	8,95
7	9,39
8	8,90
9	9,00
10	8,82
11	8,35
12	8,64

**Tablica 14 Prikupljeni podaci efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 190 A**

<b>Prikupljeni podaci efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 190 A</b>	
Minimalna efektivna širina zida [mm]	8,35
Maksimalna efektivna širina zida [mm]	9,93
Aritmetička sredina efektivnih širina zida [mm]	9,11

## 7. Analiza rezultata

Na slici 59 prikazan je graf prosječnog iznosa struje navarivanja za zidove navarene u PA položaju jakosti struje 180 A i 190 A. Iz grafa je vidljivo da kod zida koji je navaren strujom jakosti 180 A prosječan iznos struje varira bez značajnih odstupanja i to u rasponu 150 – 160 A. Kod zida koji je navaren strujom jakosti 190 A vidljiva su odstupanja između 5. i 6. sloja. U 6. sloju došlo je do greške upravljača te se pištolj nije na vrijeme zaustavio. Također, vidljivo je da nakon promjene smjere navarivanja (od 7. sloja) prosječna struja postaje stabilnija u rasponu 165 A – 170 A. Očekivano zid navaren strujom jakosti 190 A je navaren većim prosječnim strujama.

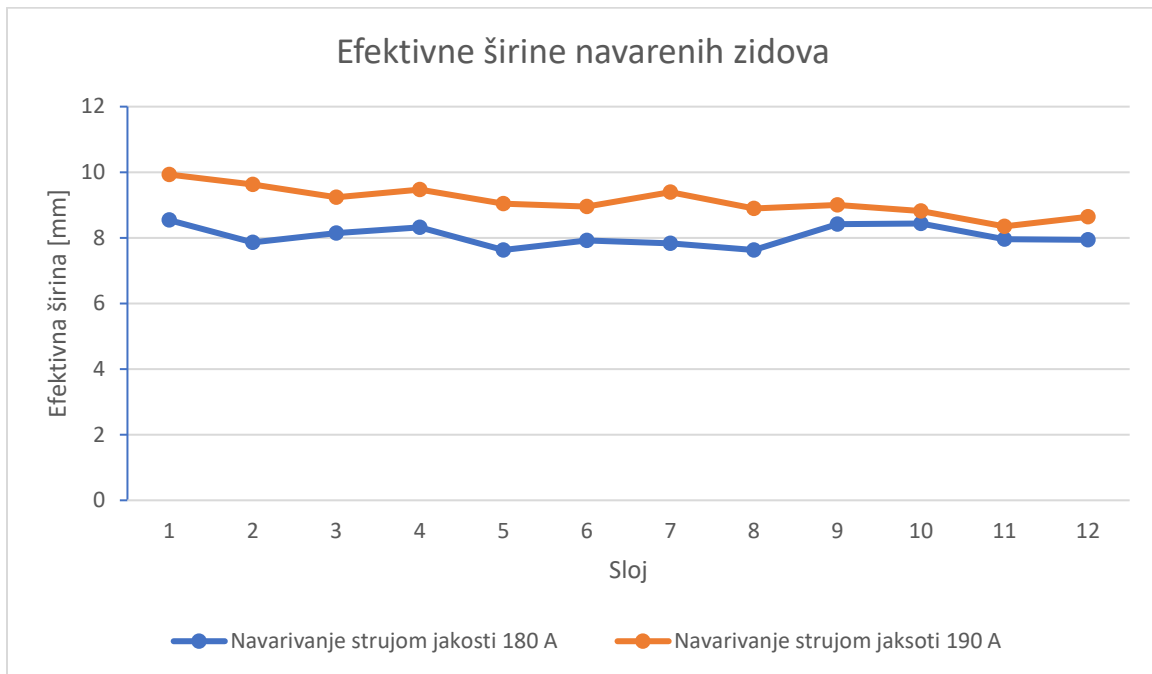


Slika 58 Graf prosječnih iznosa struja navarivanja u PA položaju

Na slici 60 prikazan je graf efektivnih širina navarenih zidova. Iz slike je vidljivo da je kod oba uzorka najveća efektivna širina na prvom sloju. Također je vidljivo da je efektivna širina veća kod uzorka od 190 A. Uzorak od 190 A navaren je većom strujom te samim tim je unesena veća količina topline. Posljedično tome dolazi do bržeg taljenja dodatnog materijala odnosno žice te većeg razlijevanja navarenog sloja. Prosječna efektivna širina zida od 190 A je za 13,2 % veća u odnosu na zid od 180 A.

Vizualnom kontrolom uočena je valovitost kod oba uzorka koja se mora ukloniti naknadnom obradom da bi se dobila ravna bočna površina i strojarski upotrebljiva struktura. Valovitost kod uzorka od 190 A je nešto veća. Zidovi koji su navareni u PE položaju nisu bili prikladni za daljnja

ispitivanja, budući da je nakon drugog sloja došlo do slijevanja taline odnosno pojave vertikalne valovitosti.



Slika 59 Graf efektivnih širina

## 8. Zaključak

Aditivne tehnologije predstavljaju značajnu inovaciju u svjetskoj industriji budući da omogućavaju značajne financijske uštede, poboljšavaju kvalitetu proizvoda, smanjuju otpad te skraćuju vrijeme proizvodnje. WAAM tehnologija predstavlja jedan od postupaka aditivne proizvodnje metala te pokazuje izuzetan potencijal u industrijama koje zahtijevaju visoku iskoristivost skupih materijala. WAAM tehnologiju karakterizira visoka količina depozita te se primjenjuje za izradu većih dijelova jednostavnije geometrije. U odnosu na druge aditivne tehnologije WAAM postupak se ističe zbog svoje ekonomičnosti budući da je za izvođenje ove tehnologije potrebna već postojeća oprema za zavarivanje. Također, uporaba žice kao dodatnog materijala omogućuje širok izbor materijala za izradu dijelova. WAAM tehnologija se primjenjuje kada postoji potreba za izradu proizvoda od visokokvalitetnih materijala poput titana i nikla budući da ovom tehnologijom se ostvaruje nizak BTF omjer. Zbog toga se primjenjuje u visoko razvijenim industrijama poput: brodogradnje, energetike, automobilske, zrakoplovne i svemirske industrije. Međutim postoje određeni nedostaci WAAM tehnologije kao što su: anizotropnost mehaničkih svojstava; nepogodan za izradu manjih dijelova kompleksnije geometrije; poroznost, šupljine, nedovoljno preklapanje; operater mora dobro poznavati i precizno upravljati parametrima procesa.

Cilj ovog istraživanja bio je ispitati utjecaj gravitacije na geometriju izratka pri navarivanju nehrđajućeg čelika WAAM postupkom. Osnovna ideja bila je izrada dva zida u PA položaju te jedan zid u PE položaju s istim parametrima navarivanja. Svi zidovi su rađeni od nehrđajućeg čelika te MIG postupkom navarivanja, a kao zaštitni plin koristio se argon. Dva zida navarena u PA položaju navarena su strujom jakosti 180 A i 190 A.

Proces navarivanja zida strujom jakosti 180 A u PE položaju nije bio uspješan zbog prekomjernog razlijevanja taline nakon drugog sloja navara. Rezultat toga je izražena vertikalna valovitost. Promjena brzine i pomaka po z osi nije znatno utjecalo na ishod te je nakon drugog sloja navara također došlo do slijevanja taline. Problem s kontrolom taline u vertikalnom položaju ukazuje na potrebu za dodatnim prilagođavanjem parametara.

Analizom makrostrukture uočeno je da uzorak koji je navaren strujom 190 A ima veću efektivnu širinu i to za 13,2 % u odnosu na uzorak od 180 A. Razlog tome je veći unos topline te veće razlijevanje materijala. Usporedimo li rezultate istraživanja Marka Blažone sa Sveučilišta Sjever koji je koristio jednake parametra, ali s jakostima struje 140 A i 150 A, utvrđeno je da efektivna

širina uzorka od 150 A bila je veća za 3,95 % u odnosu na uzorak od 140 A [36] . Zaključuje se da pri višim jakostima struje za istu razliku u jakosti struje dolazi do veće razlike u efektivnoj širini.

Kod uzorka od 180 A slojevi su ravnomjerniji zbog manjeg unosa topline te bolje kontrole taline. Valovitost je izražena kod oba uzorka, a nešto je veća kod uzorka od 190 A budući da dolazi do većeg unosa topline i manje kontrole taline.

Zaključno, zid navaren WAAM postupkom u PA položaju jakosti struje 180 A ima manju valovitost i manju efektivnu širinu u odnosu na uzorak navaren strujom jakosti 190 A u istom položaju. Navedeno se može pripisati manjim unosom topline te lakšoj kontroli taline. Navarivanje zida u PE položaju s jakosti struje 180 A nije bilo uspješno zbog prekomjernog razlijevanja taline što je uvelike posljedica utjecaja gravitacije. S toga je potrebno daljnje istraživanje i optimizacija parametara za navedeni položaj. Usprkos određenim nepravilnostima, rezultati pokazuju da uz pravilno postavljanje parametara te pažljivu kontrolu procesa, potencijal ove tehnologije je izuzetno visok.

## Literatura

- [1] N. Knezović: Aditivna proizvodnja uz pomoć električnog luka i žice kao dodatnog materijala (WAAM) - trenutno stanje i potencijal, Zavarivanje, 2018., str. 73-78
- [2] K.V. Wong, A. Hernandez: International Scholarly Research Notices: A Review of Additive Manufacturing , lipanj 2012
- [3] Z. Hercigonja, T. Krištof: International Journal of Digital Technology & Economy: Postupci brze izrade prototipova u trodimenzionalnom ispisu, br. 2, Ožujak 2018, str. 135-148
- [4] A. Pilipović: Aditivna proizvodnja, Iz svijeta plastike i gume, članak Aditivna proizvodnja, Polimeri 33, 2012, str. 3-4.
- [5] ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies ASTM International, 2012
- [6] S. Negi, S. Dhiman, R.K. Sharma: Journal of Manufacturing Technology Research: Basics, Applications and Future of Additive Manufacturing Technologies: A Review, br. 1/2, 2012, str. 76-94
- [7] S.S. Alghamdi, S. John, N.R. Choudhury, N.K. Dutta: Additive Manufacturing of Polymer Materials: Progress, Promise and Challenges, Veljača 2021., str. 5-6
- [8] D. Ding ,Z. Pan , D. Cuiuri, H. Li: Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests, International Journal Advanced Manufacturing Technology, 2015., str. 465-481
- [9] 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
- [10] A. Busachi, A.J. Erkoyuncu, F. Martina, J. Ding: Designing a WAAM Based Manufacturing System for Defence Applications, Elsevier, 48-53, 2015.
- [11] J.Z. Li, M.R. Alakahari, N.A. Rosli, R. Hasan: International Journal of Automation Technology: Review of Wire Arc Additive Manufacturing for 3D Metal Printing, Svibanj, 2019.
- [12] S. Selvi, A. Vishvaksean, E. Rajasekar: Defence Tehnology: Cold metal transfer (CMT) technology - An overview, br. 14, Veljača, 2018.
- [13] V. Wesling, A. Schram, M. Kessler: Low Heat Joining – Manufacturing and Fatigue Strength of Brazed, Locally Hardened Structures, Listopad, 2010.
- [14] F. Martina, S. Williams, A. Addison, J. Ding: Materials Science and Technology: Wire+Arc Additive Manufacturing, Svibanj, 2015.
- [15] K. Treutler, V. Wesling: The Current State of Research of Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM): A Review, Metal Additive Manufacturing and its Applications, Rujan 2021.

- [16] 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), Travanj, 2019.
- [17] Donoghue J., Antonysamy A.A., Martina F., Colegrove P.A., Williams S.W., Prangnell P.B.: The effectiveness of combining rolling deformation with WAAM on  $\beta$ -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V, Materials Characterization, 2016.
- [18] M. Chaturvedi, E. Scutelnicu, C.C.Rusu, L.R. Mistodie, D. Mihailescu, A.V. Subbiah: Wire Arc Additive Manufacturing: Review on Recent Findings and Challenges in Industrial Applications and Materials Characterization Rujan, 2021.
- [19] M. Gierth, P. Henckell, Y. Ali, J. Scholl, J.P. Bergmann: Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminum Alloy AlMg5Mn with Energy-Reduced Gas Metal Arc Welding (GMAW), Lipanj, 2020.
- [20] <https://www.fabricatingandmetalworking.com/2020/05/more-manufacturers-take-a-closer-look-at-wire-arc-additive-manufacturing-waam/>, dostupno 13.3.2024.
- [21] J. Wang, C. Diao, E. Pagone, J. Ding, S. Williams: TCT North America 9.3: Enabling WAAM in manufacturing aircraft landing gear, Travanj, 2023.
- [22] J. Li, Q. Cui, C. Panga, P. Xu, W. Luo, Jiangshan: Virtual and physical prototyping: Integrated vehicle chassis fabricated by wire and arc additive manufacturing: structure generation, printing radian optimization, and performance prediction, br.1, 2024.
- [23] A. Tasdemir, S. Nohut: An overview of wire arc additive manufacturing (WAAM) in shipbuilding industry, Srpanj, 2020.
- [24] <https://www.huntingdonfusion.com/index.php/en/technical-support/white-papers-40017/3174-waam-wire-plus-arc-additive-manufacturing-for-marine-propellers-and-aircraft-structures>, dostupno 13.3.2024
- [25] <https://www.waam3d.com/case-studies/titanium-tank>, dostupno 13.3.2024.
- [26] <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/manual-welding/migmag/transsteel/transsteel-compact/transsteel-3000-c-pulse>,
- [27] <https://proinstal.hr/sto-ciklus-rada-intermitenca-znaci-za-aparate-za-zavarivanje/>
- [28] HRN EN ISO 6947:2012: Zavarivanje i srodni postupci -- Položaji pri zavarivanju
- [29] M. Vural: Welding Processes and Technologies, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey
- [30] <https://www.promotech.eu/en/product/rail-bull-welding-cutting-track-carriage-2/>, dostupno 12.6.2024.
- [31] <https://www.reliabilitydirectstore.com/TKTL-20-ThermoLaser-p/skf-ktl%2020.htm>, dostupno 12.6.2024.

[32] <https://www.kemet.co.uk/images/downloads/Forcipol1V.pdf>, dostupno 12.6.2024.

[33] <https://www.olympus-ims.com/de/microscope/szx10/>, dostupno 12.6.2024.

[34] <https://www.magmaweld.com/mi-308lsi-uo>, dostupno 12.6.2024.

[35] <https://www.messer.hr/argon>, dostupno 12.6.2024.

[36] M. Blažona: Utjecaj parametara navarivanja na svojstva izratka pri aditivnoj proizvodnji MIG/MAG tehnologijom, Diplomski rad, Sveučilište Sjever, Varaždin, 2023.



## Popis slika

Slika 1 Ciklus razvoja proizvoda [2] .....	3
Slika 2 Procesne faze AM [4].....	5
Slika 3 Podjela AM metalnih materijala [9] .....	7
Slika 4 WAAM zid [10] .....	8
Slika 5 CMT metoda [13] .....	9
Slika 6 Tangentni model preklapanja (TOM)[8].....	11
Slika 7 Back to back metoda [14] .....	12
Slika 8 Usporedba WAAM-a s konvencionalnim tehnologijama [9] .....	14
Slika 9 Usporedba WAAM-a s drugim AM [9].....	15
Slika 10 Međuprolazno valjanje [17] .....	16
Slika 11 Šator za zaštitu [9] .....	17
Slika 12 Uzorak magnezijeve legure izrađene WAAM-om [16].....	18
Slika 13 Potporna konstrukcija krila zrakoplova [20] .....	21
Slika 14 Vanjski sklop stajnog trapa [9].....	22
Slika 15 Šasija električnog automobila izrađena WAAM-om [22] .....	23
Slika 16 Propeler izrađen WAAM-om [24] .....	24
Slika 17 Izrada tlačne posude WAAM postupkom [25].....	25
Slika 18 Smjer navarivanja prva dva zida.....	27
Slika 19 Smjer navarivanja trećeg zida .....	27
Slika 20 Uređaj TransSteel 3000 Pulse [26] .....	30
Slika 21 Svi položaji zavarivanja [29] .....	31
Slika 22 Rail Bull [30] .....	32
Slika 23 SKF TKTL 20 ThermoLaser [31] .....	33
Slika 24 Metkon Forcipol 1V Grinder & Polisher .....	35
Slika 25 Stereomikroskop Olympus SZX10.....	36
Slika 26 Podloga za PA položaj .....	37
Slika 27 Zaštitni plin Argon 4.8 .....	38
Slika 28 Upravljačka ploča uređaja za izvor struje za zavarivanje .....	39
Slika 29 PA položaj zavarivanja .....	40
Slika 30 PE položaj zavarivanja .....	41
Slika 31 Pištolj za zavarivanje postavljen u početnoj točki .....	42
Slika 32 Mjerenje međuprolazne temperature.....	43
Slika 33 Prvi sloj navara u PA položaju .....	44
Slika 34 Savijanje podloge za navarivanje .....	46
Slika 35 Zid navaren strujom jakosti 180 A .....	46
Slika 36 Zid navaren strujom jakosti 190 A .....	47
Slika 37 Pištolj postavljen u početnoj točki u PE položaju.....	48
Slika 38 Prvi sloj navara u PE položaju (I=180 A; v=36cm/min; z=4,5 mm) .....	49
Slika 39 Druga perspektiva prvog sloja navara u PE položaju (I=180 A; v=36cm/min; z=4,5 mm).49	
Slika 40 Drugi sloj navara u PE položaju (I=180 A; v=36cm/min; z=4,5 mm).....	50
Slika 41 Prvi sloj navara u PE položaju (I=180 A; v=36cm/min; z=4,5 mm) .....	51
Slika 42 Druga perspektiva prvog sloja navara u PE položaju (I=180 A; v=44cm/min; z=3 mm)....	51

Slika 43 Drugi sloj navara u PE položaju .....	52
Slika 44 Drugi sloj navara u PE položaju .....	53
Slika 45 Drugi sloj navara u PE položaju ( $I=185\text{ A}$ ; $v=58\text{ cm/min}$ ; $z=1,5\text{ mm}$ ).....	53
Slika 46 Rezanje uzorka na strojnoj pili.....	54
Slika 47 Površina uzorka nakon obrade rezanja navarenog strujom jakosti 180 A (lijevo) i 190 A (desno).....	55
Slika 48 Površina uzorka nakon obrade glodanja navarenog strujom jakosti 180 A (lijevo) i 190 A (desno).....	55
Slika 49 Površina uzorka nakon obrade brušenja navarenog strujom jakosti 180 A (lijevo) i 190 A (desno).....	57
Slika 50 Pribor za elektrokemijsko nagrivanje .....	58
Slika 51 Elektrokemijska reakcija površine uzorka u solnoj kiselini.....	59
Slika 52 Prikaz efektivne širine gornjeg dijela uzorka navarenog strujom jakosti 180 A.....	60
Slika 53 Prikaz efektivne širine srednjeg dijela uzorka navarenog strujom jakosti 180 A .....	60
Slika 54 Prikaz efektivne širine donjeg dijela uzorka navarenog strujom jakosti 180 A .....	61
Slika 55 Prikaz efektivne širine gornjeg dijela uzorka navarenog strujom jakosti 190 A.....	61
Slika 56 Prikaz efektivne širine srednjeg dijela uzorka navarenog strujom jakosti 190 A .....	62
Slika 57 Prikaz efektivne širine donjeg dijela uzorka navarenog strujom jakosti 190 A .....	62
Slika 58 Graf prosječnih iznosa struja navarivanja u PA položaju.....	65
Slika 59 Graf efektivnih širina .....	66

## Popis tablica

Tablica 1 Parametri istraživanja [9].....	13
Tablica 2 Usporedba troškova WAAM-a i klasičnih postupaka [9].....	21
Tablica 3 Parametri navarivanja.....	28
Tablica 4 Tehničke karakteristike uređaja za izvor struje navarivanja [26].....	29
Tablica 5 Tehničke karakteristike Rail Bulla [30].....	32
Tablica 6 Tehničke karakteristike SKF TKTL 20 ThermoLaser [31] .....	34
Tablica 7 Kemijski sastav ER 308 LSi [34] .....	37
Tablica 8 Mehanička svojstva ER 308 LSi [34] .....	37
Tablica 9 Prosječan iznos jakosti struje .....	44
Tablica 10 Parametri brušenja .....	56
Tablica 11 Vrijednosti efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 180 A.....	63
Tablica 12 Prikupljeni podaci efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 180 A.....	63
Tablica 13 Vrijednosti efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 190 A.....	64
Tablica 14 Prikupljeni podaci efektivnih širina zida navarenog strujom jakosti 190 A.....	64