

# Utjecaj parametara navarivanja na konačnu iskoristivost izratka pri aditivnoj proizvodnji MIG/MAG tehnologijom

---

Tunić, Gabriјela

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:122:642031>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-07**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište  
Sjever**

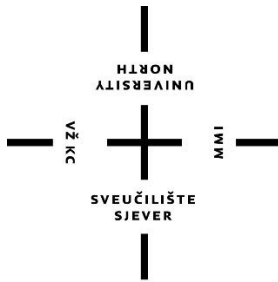
**Diplomski rad br. 123/STR/2024**

**Utjecaj parametara navarivanja na konačnu iskoristivost  
izratka pri aditivnoj proizvodnji MIG/MAG tehnologijom**

**Gabrijela Tunić, 2810/336**

Varaždin, rujan 2024. godine





# Sveučilište Sjever

Odjel za Strojtarstvo

Završni rad br. 123/STR/2024

## Utjecaj parametara navarivanja na konačnu iskoristivost izratka pri aditivnoj proizvodnji MIG/MAG tehnologijom

**Student**

Gabrijela Tunić, 2810/336

**Mentor**

doc. dr. sc. Matija Bušić, dipl.ing.stroj., IWE

Varaždin, rujun 2024. godine

# Prijava diplomskog rada

## Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za strojarstvo		
STUDIJ	diplomski sveučilišni studij Strojarstvo		
PRISTUPNIK	Gabrijela Tunić	JMBAG	0336026810
DATUM	13.09.2024.	KOLEGIJ	Suvremene proizvodne tehnologije
NASLOV RADA	Utjecaj parametara navarivanja na konačnu iskoristivost izratka pri aditivnoj proizvodnji MIG/MAG tehnologijom		
NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU	Influence of welding parameters on the workpiece final usability in additive manufacturing utilizing MIG/MAG technology		
MENTOR	dr. sc. Matija Bušić	ZVANJE	docent
ČLANOVI POVJERENSTVA	1. doc. dr. sc. Zlatko Botak, predsjednik povjerenstva 2. doc. dr. sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva 3. doc. dr. sc. Boris Jalušić, član povjerenstva 4. doc. dr. sc. Tomislav Veliki, zamjenski član povjerenstva 5.		

## Zadatak diplomskog rada

BROJ	123/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). Istražiti ekonomske i ekološke prednosti takve proizvodnje u odnosu na konvencionalne proizvodne tehnologije.</p> <p>U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je automatiziranim MIG postupkom, pomoću žice za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika, izraditi dva izratka uz primjenu različitih parametara procesa. Iz izrađenih objekata izraditi uzorke za makroskopsko ispitivanje poprečnoga presjeka. Analizirati geometriju poprečnog presjeka te izračunati efektivnu širinu izratka. Prema rezultatima ispitivanja preporučiti prikladne parametre i donijeti vlastiti zaključak o provedenom eksperimentu. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.</p>

ZADATAK URUČEN	17.09.2024	POTPIS MENTORA	M. Bušić
SVEUČILIŠTE SJEVER			

## **Predgovor**

*Veliko hvala mentoru, doc. dr. sc. Matiji Bušiću, na stručnoj podršci, smjernicama i nesebičnom dijeljenju znanja, ne samo tijekom izrade ovog diplomskog rada, već i tijekom cijelog mog studija.*

*Zahvaljujem svim profesorima i asistentima Sveučilišta Sjever na prenesenom znanju.*

*Od srca se zahvaljujem svojoj obitelji, posebno majci Mirjani, koja je tijekom cijelog mog obrazovanja bila moj neiscrpni izvor podrške, ohrabrenja i razumijevanja.*

*Od srca hvala najboljem dečku, mom dragom Luki, na neizmjernoj podršci, razumijevanju i ljubavi.*

## **Sažetak**

Ovaj diplomski rad je usmjeren na istraživanje aditivne proizvodnje koristeći MIG/MAG tehnologiju zavarivanja, s posebnim naglaskom na tehnologiju aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom. Teorijski dio rada pruža pregled stručne literature, objašnjavajući temeljne koncepte aditivne proizvodnje metalnih dijelova te uspoređujući različite tehnologije aditivne proizvodnje. Posebna pažnja je posvećena WAAM tehnologiji koja je detaljno opisana, uključujući njene prednosti i nedostatke. U radu se također analiziraju ekonomske i ekološke prednosti aditivne proizvodnje u usporedbi s tradicionalnim metodama obrade metala. Eksperimentalni dio rada je usmjeren na izradu dvaju metalnih uzoraka korištenjem MIG zavarivanja s austenitnom žicom od nehrđajućeg čelika, uz primjenu različitih parametara procesa. Uzorci su obrađeni i pripremljeni za ispitivanje, a makroskopski pregledi poprečnih presjeka su omogućili analizu geometrijskih karakteristika i izračun efektivne širine izrađenih dijelova.

***Ključne riječi:*** Aditivna proizvodnja, MIG/MAG zavarivanje, ekonomske i ekološke prednosti, geometrija izratka.

## Summary

The thesis of this paper focuses on the investigation of additive manufacturing using MIG/MAG welding technology, with a special emphasis on Wire Arc Additive Manufacturing. The theoretical part of the thesis provides a comprehensive review of the relevant literature, explaining the fundamental concepts of additive manufacturing of metal parts and comparing different additive manufacturing technologies. Particular attention is given to WAAM technology, which is thoroughly described, including its advantages and disadvantages. The thesis also examines the economical and environmental benefits of additive manufacturing in comparison to traditional metal processing methods. The experimental part of the thesis is focused on the fabrication of two metal samples using MIG welding with austenitic stainless steel wire, applying different process parameters. After the samples were processed and prepared for testing, macroscopic cross-sectional examinations were conducted in order to analyse the geometric characteristics and to calculate the effective width of the produced parts.

**Keywords:** *Additive manufacturing, MIG/MAG welding, economic and environmental benefits, part geometry.*



## Popis korištenih kratica

<b>AM</b>	eng. <i>Additive manufacturing</i> Aditivna proizvodnja
<b>AMF</b>	eng. <i>Additive Manufacturing File Format</i>
<b>ASME</b>	eng. <i>American Society of Mechanical Engineers</i>
<b>ASTM</b>	eng. <i>American Society for Testing and Materials</i>
<b>AWS</b>	eng. <i>American Welding Society</i>
<b>BJ</b>	eng. <i>Binder jetting</i> proces tiskanja vezivom
<b>BTF</b>	eng. <i>Buy To Fly</i>
<b>CAD</b>	eng. <i>Computer Aided Design</i> računalom podržano konstruiranje
<b>CNC</b>	eng. <i>Computer Numerical Control</i> računalno numeričko upravljanje
<b>DC</b>	eng. <i>Direct Current</i> istosmjerna struja
<b>DED</b>	eng. <i>Direct energy deposition</i>
<b>EBM</b>	eng. <i>Electron Beam Melting</i> taljenje pomoću snopa elektrona
<b>EN</b>	eng. <i>European Norm</i>
<b>FSC</b>	eng. <i>Fronius System Connector</i>
<b>FDM</b>	eng. <i>Fused Deposition Modeling</i> taložno očvršćivanje
<b>GMAW</b>	eng. <i>Gas Metal Arc Welding</i> zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plina ili plinskih mješavina
<b>ISO</b>	eng. <i>International Organisation for Standardization</i>
<b>Laser</b>	eng. <i>Light amplification by stimulated emission of radiation</i>
<b>LENS</b>	eng. <i>Laser Engineering Net Shape</i> izravno taloženje materijala
<b>HRN</b>	Hrvatski zavod za norme

<b>MAG</b>	eng. <i>Metal Active Gas</i> zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi reaktivnog plina
<b>MIG</b>	eng. <i>Metal Inert Gas</i> zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina
<b>MEX</b>	eng. <i>Material extrusion</i> ekstrudiranje materijala
<b>MJT</b>	eng. <i>Material jetting</i> raspršivanje materijala
<b>MPA</b>	eng. <i>Metal Powder Application</i> nanošenje metalnog praha
<b>NPJ</b>	eng. <i>Nano Particle Jetting</i> raspršivanje nanočestica
<b>PBF</b>	eng. <i>Powder Bed Fusion</i> srašćivanje praškastog materijala u slojevima
<b>PAW</b>	eng. <i>Plasma Arc Welding</i> – zavarivanje plazma lukom
<b>STL</b>	eng. <i>Standard Triangulation Language</i>
<b>SLM</b>	eng. <i>Selective Laser Melting</i> Selektivno lasersko taljenje
<b>TIG</b>	eng. <i>Tungsten Inert Welding</i> zavarivanje netaljivom volfram elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina
<b>UV</b>	eng. <i>Ultraviolet</i> ultraljubičasto zračenje
<b>WAAM</b>	eng. <i>Wire Arc Additive Manufacturing</i> aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom
<b>3D</b>	eng. <i>three dimensional</i> trodiomenzinalan

# Sadržaj

1.	Uvod.....	1
2.	Zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plina ili plinskih mješavina.....	2
2.1.	Proces i oprema MIG/MAG zavarivanja .....	3
2.2.	Parametri MIG/MAG zavarivanja .....	5
3.	Aditivna proizvodnja metalnih izradaka.....	7
3.1.	Postupci aditivne proizvodnje metalnih izradaka .....	12
3.1.1.	Prednost DED postupka .....	16
4.	WAAM .....	17
4.1.	Tehnike WAAM postupka .....	18
4.2.	Parametri .....	20
4.2.1.	Zaštitni plin .....	20
4.2.2.	Slobodni kraj žice .....	22
4.2.3.	Brzina zavarivanja .....	23
4.2.4.	Brzina dodavanja materijala.....	24
4.2.5.	Temperatura podloge .....	24
4.2.6.	Temperatura između slojeva .....	25
4.3.	Efektivna širina strukture proizvedene WAAM postupkom.....	25
4.4.	Prednosti WAAM tehnologije .....	26
4.5.	Nedostaci WAAM tehnologije.....	27
4.6.	Ekonomske i ekološke prednosti WAAM proizvodnje nu odnosu na konvencionalne proizvodne tehnologije.....	29
4.6.1.	Ekonomske prednosti.....	29
4.6.2.	Ekološke prednosti.....	31
4.7.	Optimizacija procesa.....	32
5.	Eksperimentalan dio.....	35
5.1.	Postavljanje parametara .....	39
5.2.	Postavljanje podloge .....	39
5.3.	Dodatni materijal .....	39
5.4.	Zaštitni plin .....	40
5.5.	Uređaj za vođenje .....	41
5.6.	Navarivanje .....	42
5.7.	Priprema uzoraka za ispitivanje .....	50
6.	Analiza i rezultati .....	53
7.	Zaključak.....	58
8.	Literatura.....	60

# 1. Uvod

Aditivna proizvodnja, kao dio proizvodnog strojarstva, bavi se izradom predmeta postupnim nanošenjem čestica u tankim slojevima. Za razliku od tradicionalnih metoda koje uklanjaju materijal, aditivna proizvodnja omogućuje kreiranje složenih oblika uz minimalan otpad, dodavanjem materijala sloj po sloj.

Razvoj aditivne proizvodnje je započeo krajem 20. stoljeća kao odgovor na potrebu za bržim i ekonomičnijim metodama izrade prototipa. Prvotno primijenjena u istraživačkim laboratorijima, ova tehnologija je s vremenom našla širu primjenu u industriji. Danas aditivna proizvodnja igra ključnu ulogu u brojnim industrijama, posebno u zrakoplovnoj, automobilskoj i medicinskoj, gdje omogućuje proizvodnju složenih dijelova i implantata prilagođenih specifičnim potrebama korisnika. Također se koristi u proizvodnji potrošačke elektronike te u industriji nakita, gdje omogućuje precizno oblikovanje prema posebnim zahtjevima.

Jedna od metoda aditivne proizvodnje je aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom, poznata kao WAAM (*eng. Wire and Arc Additive Manufacturing*). Ona koristi električni luk za taljenje metalne žice i postupno dodavanje materijala sloj po sloj, čime se stvara trodimenzionalni objekt. Ova tehnologija kombinira principe zavarivanja i aditivne proizvodnje, te je prikladna za izradu metalnih dijelova uz visok stupanj prilagodbe i smanjene troškove materijala u odnosu na tradicionalne metode.

Primjena WAAM tehnologije ovisi o nekoliko ključnih čimbenika. Prvi je veličina i složenost dijela koji se proizvodi, jer je ova metoda posebno pogodna za velike metalne komponente koje bi tradicionalnim metodama bile teško ili skupe proizvesti. Vrsta materijala također igra važnu ulogu; WAAM se najčešće koristi za metale poput titana, aluminija i nehrđajućeg čelika zbog njihovih specifičnih svojstava i otpornosti. Financijska isplativost u usporedbi s konvencionalnim metodama također je važna, osobito kod projekata koji zahtijevaju visoki stupanj prilagodbe ili brzu izradu prototipova. Na kraju, održivost i smanjenje otpada mogu biti presudni jer WAAM omogućuje učinkovitu upotrebu materijala i minimiziranje otpada u usporedbi s tradicionalnim metodama obrade.

## **2. Zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plina ili plinskih mješavina**

Zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plina ili plinskih mješavina, odnosno MIG (*eng. Metal Inert Gas*) zavarivanje ako je zaštitni plin inertan ili MAG (*eng. Metal Active Gas*) zavarivanje ako je zaštitni plin reaktivan; je postupak u kojem se električni luk održava između elektrode i radnog komada.

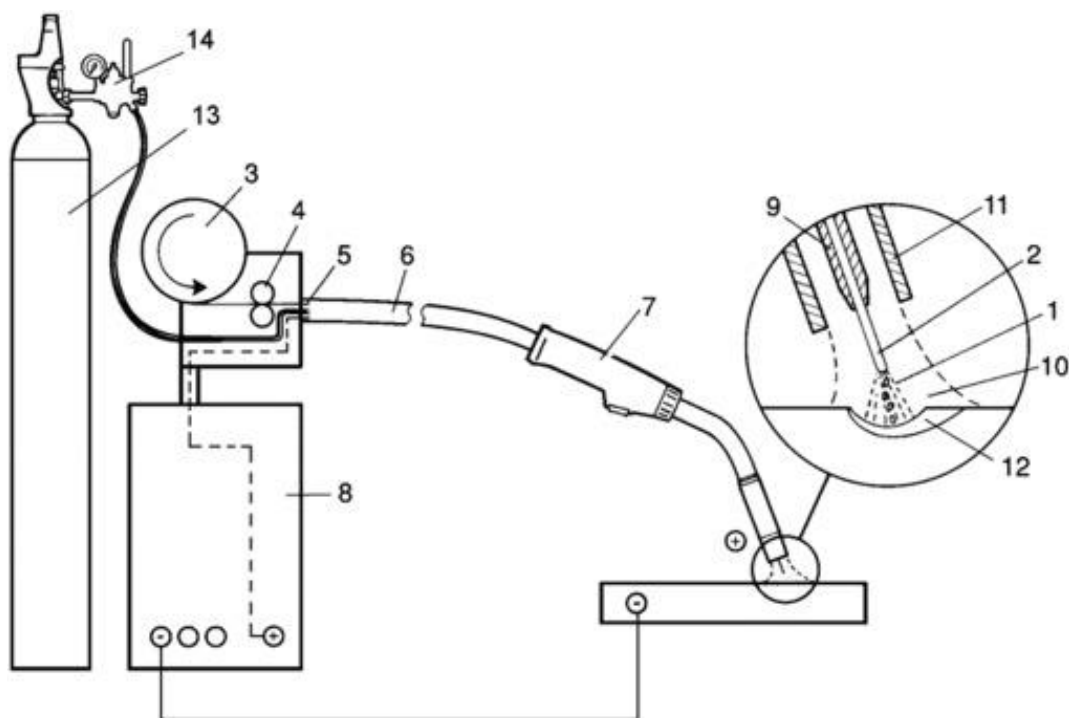
Tijekom Drugog svjetskog rata, zbog naglog porasta potrebe za proizvodnjom vojne opreme poput brodova i zrakoplova, došlo je do značajnog razvoja tehnika zavarivanja, uključujući zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plina ili plinskih mješavina, poznatije kao GMAW (*eng. Gas Metal Arc Welding*) ili MIG/MAG zavarivanje (*eng. Metal Inert Gas/Metal Active Gas*). Spomenuto je postala ključna tehnika koja je omogućila bržu proizvodnju, zadržavajući pritom visoku kvalitetu zavara. Krajem 1940-ih, MIG/MAG zavarivanje je razvijeno kako bi odgovorilo na sve veće zahtjeve industrije. Prvi proces s kontinuiranom žičanom elektrodom i argonom razvijen je u Batelle Memorial Institutu uz financijsku podršku Air Reduction Company. Početkom 1950-ih, MIG/MAG tehnika je poboljšana kroz primjenu deblje žičane elektrode i CO<sub>2</sub> plina. Međutim, zbog velikog prskanja izazvanog reaktivnim plinom, proces je naišao na određene izazove. Daljnji razvoj MIG/MAG zavarivanja 1958.-1959. je doveo do uvođenja prijenosa kratkog spoja, čime je omogućeno bolje upravljanje toplinom i lakše zavarivanje u svim položajima. Šezdesetih godina prošlog stoljeća, MIG/MAG zavarivanje je napredovalo uvođenjem pulsog prijenosa, koji je smanjio probleme s prskanjem i povećao učinkovitost procesa. Ova inovacija je omogućila energetska učinkovitost i čistoću zavara uz primjenu u svim položajima. 70 - te godine su donijele daljnja poboljšanja izvora napajanja u MIG/MAG zavarivanju. Sinkronizirani izvori napajanja, razvijeni u tom razdoblju, poboljšali su preciznost i učinkovitost procesa. Daljnji razvoj tijekom 90 – ih uz primjenu računalno vođenih sustava i strujnih invertera, dodatno je ubrzao i precizirao MIG/MAG zavarivanje. U suvremenom razdoblju, razvoj robotike i automatizacije unio je značajne promjene u MIG/MAG zavarivanje. Robotski sustavi omogućuju brže i preciznije izvođenje ovog postupka, smanjujući pritom rizik od ozljeda zavarivača. Robotsko MIG/MAG zavarivanje je postalo ključna tehnologija u mnogim industrijama zbog svoje točnosti, brzine i učinkovitosti, što dodatno smanjuje otpad i poboljšava kvalitetu zavara. Kontinuirani tehnološki napredak i integracija automatizacije u MIG/MAG zavarivanje osigurava njegovu sve veću važnost u različitim sektorima, od građevinske do automobilske i zrakoplovne industrije [1].

Danas je MIG/MAG vodeći konkurent u većini industrijskih zemalja. Koristi se za zavarivanje, navarivanje i reparaturno zavarivanje većine metalnih materijala. Primjenjuje se za zavarivanje cijevi i limova debljine od 1 mm do obično 20 mm, ali i veće [2].

## 2.1. Proces i oprema MIG/MAG zavarivanja

Osnovna oprema i proces MIG/MAG zavarivanja prikazani su na slici 1, a numerirane komponente su sljedeće:

1. električni luk
2. taljiva elektroda
3. kolut s dodatnim materijalom
4. pogonski kotačići
5. spojni ulaz
6. cijevni paket (polikabel)
7. pištolj za zavarivanje
8. izvor struje
9. kontaktna cjevčica
10. zaštitna atmosfera
11. sapnica
12. zavar.

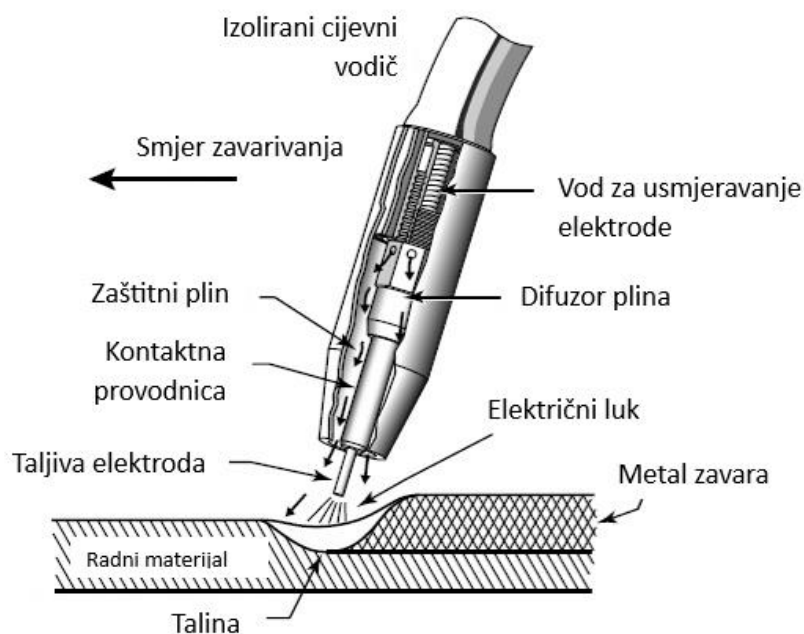


Slika 1: Oprema MIG/MAG zavarivanja [3]

Luk se formira između radnog komada i elektrode. Elektroda je u obliku žice te je namotana u kolut, zbog čega u usporedbi sa zavarivanjem štapnom elektrodom; nema potrebe za čestim mijenjanjem elektrode. Žica se kontinuirano dovodi do zavarivačkog pištolja pomoću pogonskog sistema konstantnom brzinom  $v$  od nekoliko metara u minuti kroz jednu od cijevi u cijevnom paketu. Kroz cijevni paket prolazi i plin koji služi za zaštitu luka i taline. Zaštitni plin može biti inertan, što znači da je neaktivan i ne utječe na proces koji se odvija u talini. Reaktivni plinovi su suprotni inertnim te utječu na proces u talini. Od inertnih plinova najčešće se koriste argon i helij, dok kod reaktivnih smjesa plinova. Električna energija prenosi se kroz kontaktnu cijev u zavarivačkom pištolju koja se nalazi oko elektrode. MIG/MAG zavarivanje se najčešće koristi istosmjernom strujom DC. Obično je kontaktna cijev povezana s pozitivnim polom izvora napajanja, dok je radni komad povezan s negativnim polom. Elektroda, osim što služi kao elektroda, također je i dodatni materijal za zavarivanje [4].

Budući da se elektroda dovodi automatski dok se zavarivački pištolj ručno pomiče, MIG/MAG zavarivanje se uobičajeno naziva poluautomatskom metodom. MIG/MAG zavarivanje je moguće automatizirati mehanizacijom pokreta zavarivačkog pištolja ili radnog komada.

Ključna komponenta opreme za zavarivanje je pištolj s cijevnim paketom. Njegova funkcija je dovesti zaštitnog plina, elektrode i električne struje do luka. Dizajn pištolja mora biti robustan kako bi izdržao zahtjevne radne uvjete, ali istovremeno dovoljno kompaktan i lagan da bude praktičan za rad. Zavarivački pištolj stalno je izložen visokim temperaturama i intenzivnom radu, zbog čega zahtijeva kontinuirano održavanje [3]. Zavarivački pištolj je prikazan na slici 2 [5].



Slika 2: Zavarivački pištolj [5]

## 2.2. Parametri MIG/MAG zavarivanja

Za postizanje optimalnih rezultata MIG/MAG zavarivanja, ključno je odabrati odgovarajuće parametre, uključujući: promjer elektrode  $\phi$  [mm], napon  $U$  [V], struju  $I$  [A], brzinu zavarivanja  $v$  [cm/min], induktivitet  $L$  [H], dužinu slobodnog kraja žice [mm], protok zaštitnog plina  $Q$  [l/min], položaj zavarivačkog pištolja.

Prvi važan faktor je promjer elektrode. Tanji promjer omogućuje stabilniji prijenos materijala. Promjena napona također igra ključnu ulogu; povećanje napona smanjuje frekvenciju kratkog spoja, rezultirajući većim kapljicama i većom dužinom luka, što širi zavar. S druge strane, prenizak napon može uzrokovati loše izvođenje početka zavara i nestabilan luk [3], [4].

Struja je osnovni parametar koji ovisi o debljini materijala, brzini zavarivanja i željenoj kvaliteti zavara. Induktivitet, s druge strane, ima posebnu ulogu u zavarivanju kratkim lukom. Niža vrijednost induktiviteta rezultira jasnijim i koncentriranim lukom, ali može dovesti do povećanja troske. Viša vrijednost induktiviteta može uzrokovati širi zavar, no previsok induktivitet može uzrokovati lošu stabilnost i sklonost prekidu električnog luka [3], [4].

Dužina slobodnog kraja žice također je ključna. Idealna udaljenost trebala bi biti 10-15 puta veća od promjera elektrode. Prekratka dužina povećava rizik od povratka luka, gdje se elektroda može zavariti zajedno s kontaktnim vrhom. Suprotno tome, prevelika udaljenost od radnog komada povećava rizik od prekida električnog luka, posebno pri početku zavarivanja. Povećanje produženja elektrode smanjuje struju i toplinski unos, dok količina deponiranog metala ostaje konstantna. Kontinuirano održavanje ispravne dužine žice ključno je za dosljednu kvalitetu zavara [3], [4].

Izbor zaštitnog plina također igra ključnu ulogu u procesu zavarivanja. Mješavine argona s 5-20 % ugljičnog dioksida najčešće se koriste za zavarivanje niskougljičnih i niskolegiranih čelika. Kod zavarivanja s raspršenim ili pulsirajućim lukom, niža koncentracija ugljičnog dioksida može biti povoljnija. Čisti ugljični dioksid može se koristiti za zavarivanje kratkim lukom, pružajući dobru penetraciju i sprječavajući nedostatak taljenja, no može rezultirati većom količinom troske. Za zavarivanje nehrđajućih čelika često se koristi argon s malim dodatkom ugljičnog dioksida ili kisika, dok se za aluminij, bakar i legure bakra obično koristi čisti argon ili mješavine argona s helijem. Helij povećava toplinski unos, što je korisno kod zavarivanja debelih aluminijskih ili bakrenih materijala zbog njihove visoke toplinske provodljivosti.



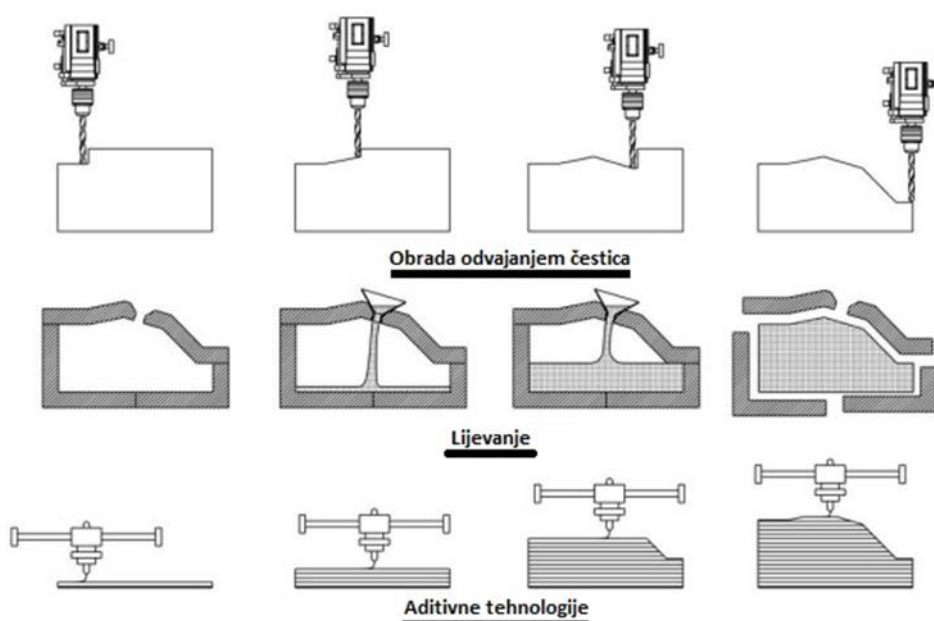
Prilagodba protoka plina specifičnom procesu zavarivanja također je važna; kod nižih struja protok od 10 litara u minuti može biti dovoljan, dok kod većih struja može biti potrebno i do 20 litara. Za zavarivanje aluminija obično je potreban veći protok plina u usporedbi s čelikom [3], [4].

Na kraju, položaj zavarivačkog pištolja u odnosu na materijal također značajno utječe na kvalitetu zavara. Ako je pištolj usmjeren suprotno od smjera zavarivanja, penetracijski profil bit će plići, dok će širina zavara biti šira. Nasuprot tome, ako je pištolj usmjeren u smjeru zavarivanja, penetracija će biti dublja, a širina zavara uža [3], [4].

### 3. Aditivna proizvodnja metalnih izradaka

Aditivna proizvodnja je dio proizvodnog strojarstva koja se bavi izradom predmeta nanošenjem čestica u tankim slojevima [6]. Brza izrada prototipova, poznata kao Rapid Prototyping ili 3D ispisivanje, predstavljala je početak aditivne proizvodnje. Ove tehnologije omogućile su stvaranje prototipova iz digitalnih modela, iz kojih su se razvijali konačni proizvodi. S vremenom je ovaj termin postao neodgovarajući zbog razvoja uzrokovanog poboljšanjem materijala, točnosti i kvalitete izrađenog uzorka, što je omogućilo direktnu proizvodnju konačnih dijelova, a ne samo prototipova. To objašnjava promjenu terminologije s brze izrade prototipova na aditivnu proizvodnju. Aditivna proizvodnja je skup različitih tehnoloških pristupa koji značajno izazivaju konvencionalne procese obrade i izrade koji su desetljećima dominirali u industriji. Aditivna proizvodnja omogućuje preciznu izradu dijelova sa složenim geometrijama koje konvencionalne metode često ne mogu postići, pružajući im konkurentne prednosti u smislu dizajna i funkcionalnosti. Kao rezultat, aditivna proizvodnja postaje sve više prihvaćena u raznim sektorima, uključujući aeronautiku, biomedicinu i automobilsku industriju, gdje je sposobnost stvaranja optimiziranih i prilagođenih dijelova izuzetno cijenjena.

Na slici 3 su prikazana tri procesa proizvodnje. Svaki od ovih procesa prikazuje različite pristupe izradi dijelova. Obrada odvajanjem čestica uklanja višak materijala kako bi se postigao željeni oblik. Proizvodnja lijevanjem oblikuje materijal unutar kalupa, dok aditivna proizvodnja dodaje materijal sloj po sloj, stvarajući proizvod od temelja.



Slika 3: Procesi proizvodnje [7]

Aditivna proizvodnja podrazumijeva niz koraka koji vode od 3D modela do gotovog proizvoda. Ovisno o svrsi proizvoda, aditivna proizvodnja se primjenjuje na različite načine i u različitim fazama. Za jednostavnije i proizvode manjih dimenzija, aditivna proizvodnja može biti korištena samo za vizualizaciju, dok kod većih i složenijih proizvoda može biti korištena za izradu konačnog proizvoda. Za proizvode koji ne zahtijevaju stroge tolerancije, aditivna proizvodnja se koristi zbog brzine izrade. Razvojem aditivne proizvodnje razvijeni su različiti procesi, ali većina uključuje osam koraka [8]. Svaki korak u ovom procesu može imati različiti utjecaj, a to će varirati ovisno o specifičnoj tehnologiji aditivne proizvodnje koja se koristi.

### 1. Izrada CAD modela

Prvi korak u procesu razvoja proizvoda je stvaranje ideje o izgledu i funkcionalnosti samog proizvoda. Kada se koristi aditivna proizvodnja, ključno je da opis proizvoda bude u digitalnom formatu koji omogućuje izradu fizičkog modela, tako početak procesa aditivne proizvodnje obuhvaća oblikovanje s pomoću računala, odnosno izradu CAD (*eng. Computer Aided Design*) modela koji detaljno opisuje vanjsku geometriju proizvoda [8]. Za ovu svrhu koristi se širok raspon CAD programa, među kojima se ističu poznati alati poput SolidWorks-a, AutoCAD-a, CATIA-e, PTC Creo-a, Fusion 360. Korištenjem ovih softverskih alata omogućuje se precizno definiranje oblika i dimenzija proizvoda, što predstavlja ključni temelj za daljnju aditivnu proizvodnju.

### 2. Pretvorba u datoteku STL ili AMF formata

Izrađeni CAD modeli spremaju se u datoteku STL (*eng. Standard Triangulation Language*) formata, koja opisuje vanjske zatvorene površine originalnog modela, prikazujući njegovu vanjsku geometriju u obliku ploha trokutastog oblika. Danas gotovo svi strojevi za aditivnu proizvodnju podržavaju STL format koji se može generirati iz gotovo svih CAD sustava, zbog čega je postao neformalan standard u aditivnoj proizvodnji. STL datoteke služe kao temelj za izračun slojeva tijekom procesa aditivne proizvodnje, omogućujući strojevima da precizno konstruiraju model u fizičkom obliku. STL datoteka nema jedinica, boju, materijal ili druge informacije o značajkama. Ta ograničenja STL datoteke dovele su do usvajanja novog formata datoteke AMF (*eng. Additive Manufacturing File Format*). Taj format je međunarodni ASTM/ISO (*eng. American Society for Testing and Materials/International Organization for Standardization*) standardni format koji proširuje STL format kako bi uključio dimenzije, boju, materijal i mnoge druge korisne značajke [8].

### 3. Prijenos datoteke na stroj za aditivnu proizvodnju

Nakon što je STL datoteka izrađena, sljedeći korak je prijenos na stroj za aditivnu proizvodnju. Prva zadaća je provjera ispravnosti dijela. Softverski alati sustava aditivne proizvodnje obično uključuju alate za vizualizaciju koji omogućuju korisnicima pregled i manipulaciju modelom. Korisnik može poželjeti premjestiti dio ili čak promijeniti njegovu orijentaciju kako bi optimizirao izradu na određenoj lokaciji unutar radne površine stroja. Često se izrađuje više dijelova u stroju za aditivnu proizvodnju istovremeno, bili oni identični ili različiti. Ključno je postaviti optimalne parametre vezane uz dimenzije, položaj i orijentaciju. Pravilno odabrani položaj i orijentacija mogu značajno smanjiti potrebu za potpornim strukturama, optimizirati korištenje materijala i poboljšati kvalitetu površine proizvoda. Rotacija modela također može utjecati na smanjenje deformacija i ubrzanje vremena izrade. Nakon što su svi parametri pravilno postavljeni, stroj može započeti precizan proces izrade dijela sloj po sloj, koristeći informacije iz STL ili AMF datoteke kako bi postigao željenu konstrukciju [8].

### 4. Podešavanje stroja

Prije početka procesa izrade, stroj za aditivnu proizvodnju zahtijeva podešavanje kako bi osigurao optimalne uvjete rada. Ova podešavanja obuhvaćaju prilagodbu debljine sloja, izvora energije, materijala te drugih relevantnih parametara. Prvotno je potrebna provjera količina materijala za izradu kako bi proces mogao nesmetano teći. Neke operacije postavljanja stroja su automatske, dok drugi aspekti poput smjera ispisa i odabira odgovarajućih procesnih parametara zahtijevaju prilagodbu. Različiti smjerovi ispisa mogu značajno utjecati na formiranje mikrostrukture materijala, što može izmijeniti mehanička svojstva kao što su granica tečenja i granica loma. Nepravilan odabir parametara može rezultirati pojavom pora, neobrađenih površina, deformacija materijala i slično. To može dovesti do odstupanja u dimenzijama, niske kvalitete površine, raslojavanja, pukotina i drugih nesukladnosti. Također, izbor energije može utjecati na brzinu hlađenja ili stvrdnjavanja, što dodatno utječe na mehanička svojstva izrađenih dijelova [8].

### 5. Izrada

Izrada dijela predstavlja uglavnom automatizirani proces, gdje stroj većinom može raditi bez potrebe za stalnim nadzorom. Tijekom ovog procesa, potreban je samo površni nadzor kako bi se osiguralo pravovremeno otklanjanje eventualnih pogrešaka koje mogu nastati. Primjeri pogrešaka su nedostatak materijala, prekidi u napajanju ili pogreške u softveru [8]. To omogućuje kontinuiranu proizvodnju s minimalnim prekidima, osiguravajući da izrađeni dijelovi budu željene kvalitete i pouzdanosti.

## 6. Uklanjanje sa stroja

Korak koji svaki izradak zahtijeva je pažljivo uklanjanje s radne površine stroja, a višak materijala koji je služio kao potporna struktura za izradu kako bi se spriječili mogući padovi ili deformacije proizvoda mora biti pažljivo odstranjen. U idealnom slučaju, proizvod proizveden aditivnom proizvodnjom bio bi spreman za upotrebu čim bude uklonjen sa stroja. Međutim, u nekim situacijama može biti potrebna naknadna obrada.

## 7. Naknadna obrada

Nakon što su dijelovi izrađeni i uklonjeni sa stroja, moguće je da će trebati dodatna obrada kako bi se osigurala potpuna funkcionalnost i estetski izgled [8]. To može uključivati naknadnu obradu s ciljem poboljšanja kvalitete površine, teksture površine, estetike, mehaničkih svojstava, uklanjanje potpornog materijala i smanjenje dimenzionalnih odstupanja.

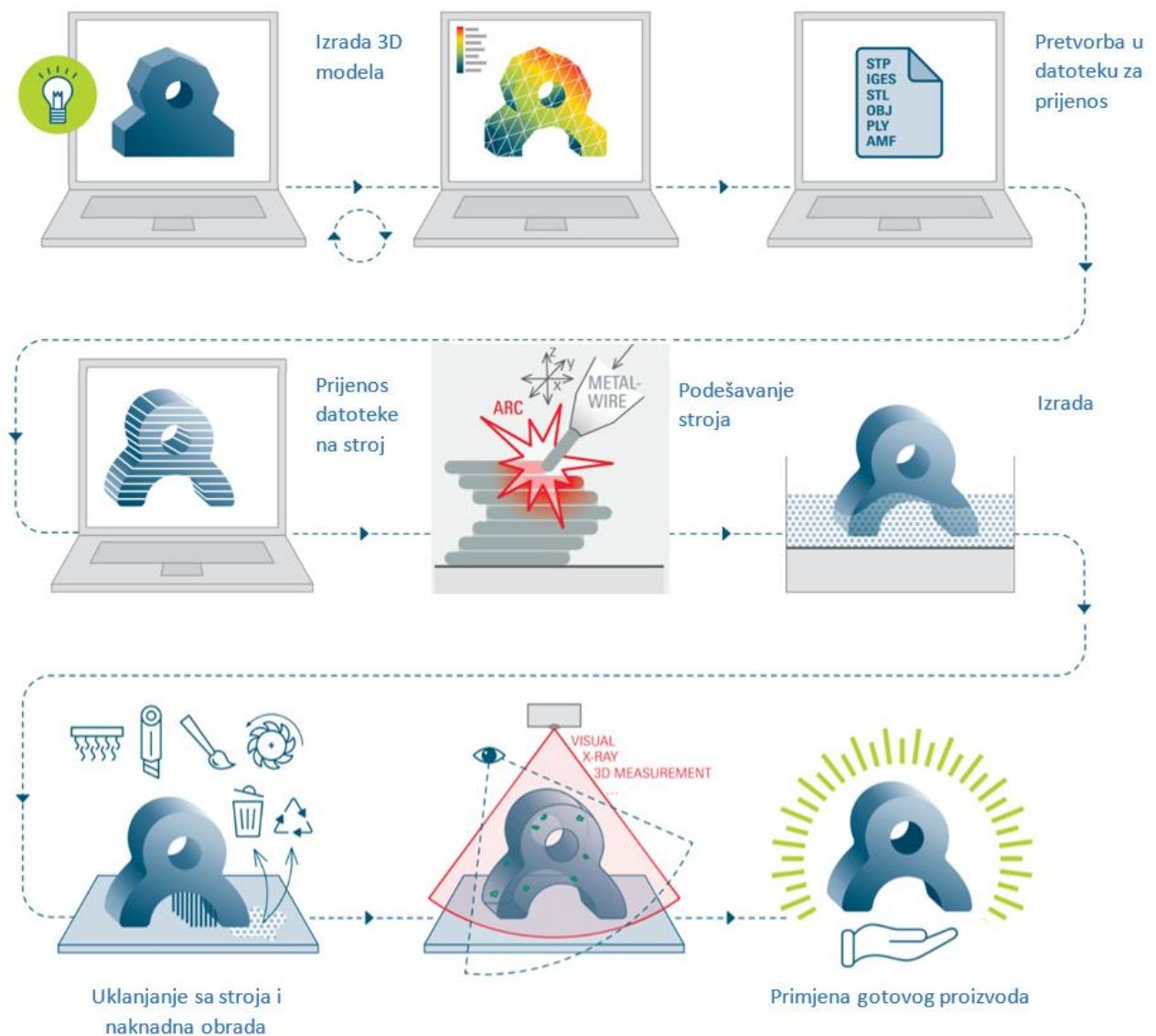
Najčešći tip naknadne obrade u aditivnoj proizvodnji je uklanjanje potpornog materijala. Potporni materijal može se klasificirati u dvije kategorije. Prva kategorija definira materijal koji okružuje dio kao prirodni nusproizvod procesa izrade, dok druga kategorija definira kao čvrste strukture koje su dizajnirane i izgrađene kako bi poduprle, zadržale ili pričvrstile dio koji se izrađuje na platformu za izgradnju. Vrsta dodatne obrade koja se koristi za poboljšanje teksture površine ovisi o željenom izgledu površine. Ako se želi matirana tekstura, jednostavno pjeskarenje može pomoći u izjednačavanju teksture površine, uklanjanju oštih rubova od stepenastog efekta i davanju općeg matiranog izgleda. Ako je potrebna glatka ili polirana završna obrada, tada se provodi brušenje i ručno poliranje. Stepenasti efekt je temeljni problem u aditivnoj proizvodnji, iako se može odabrati tanja debljina sloja kako bi se minimizirao ovaj efekt na račun vremena izrade [8].

Osim navedenih postupaka, za završnu obradu proizvoda nakon aditivne proizvodnje također se mogu koristiti metode poput tokarenja, glodanja, laserskog rezanja i obrade plazmom, što je ključno za poboljšanje dimenzijskih odstupanja i površinskih svojstava. Sve te tehnike imaju svoje prednosti i nedostatke te se primjenjuju ovisno o materijalu, obliku i potrebnim tolerancijama oblika i dimenzija. Važno je uzeti u obzir i posljedice koje odabrani postupak može imati na strukturu materijala i dimenzijsku stabilnost proizvoda.

## 8. Primjena

Nakon završetka naknadne obrade, dijelovi su spremni za primjenu. Važno je naglasiti da, iako dijelovi mogu biti izrađeni od sličnih materijala kao oni iz drugih proizvodnih procesa poput lijevanja, njihova svojstva možda neće odgovarati standardnim specifikacijama materijala. Neki procesi aditivne proizvodnje stvaraju dijelove s porama. Nadalje, određeni procesi mogu

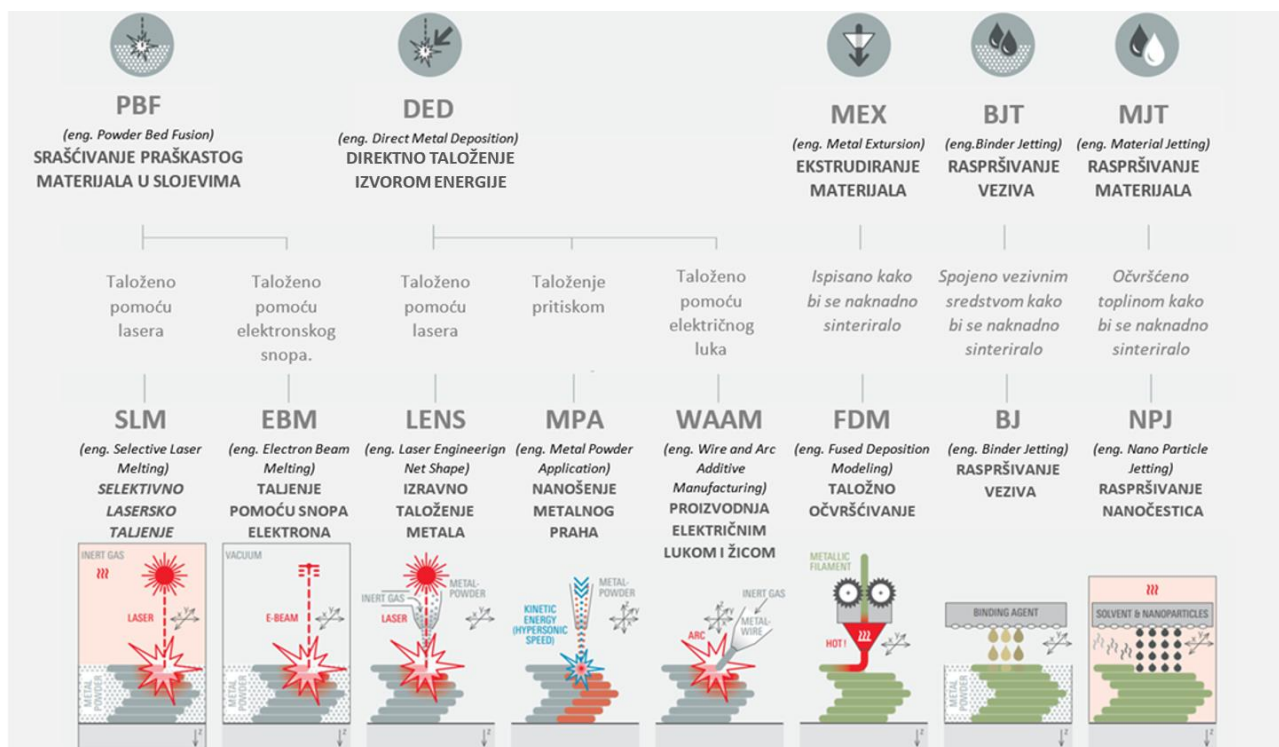
uzrokovati degradaciju materijala tijekom izrade ili nepovoljno utjecati na vezivanje i kristalizaciju materijala. U gotovo svim slučajevima, svojstva su anizotropna. Kod većine metala, brzo hlađenje rezultira drugačijom mikrostrukturom u usporedbi s konvencionalnom proizvodnjom. Stoga se dijelovi proizvedeni aditivnom proizvodnjom ponašaju drugačije od onih izrađenih konvencionalnim metodama. Ovo ponašanje može biti bolje ili gore ovisno o specifičnoj primjeni, te ih treba uzeti u obzir tijekom faze modeliranja [8]. Slika 4 prikazuje faze tj. korake u aditivnoj proizvodnji [9]



Slika 4: Koraci aditivne proizvodnje [9]

### 3.1. Postupci aditivne proizvodnje metalnih izradaka

Norma HRN EN ISO/ASTM 52900:2021: Aditivna proizvodnja - Opća načela - Osnove i terminološki rječnik, dijeli postupke aditivne proizvodnje na sedam procesa, od kojih njih pet koristi metalne materijale [10]. Na slici 5 je prikazana podjela aditivne proizvodnje metalnih materijala.

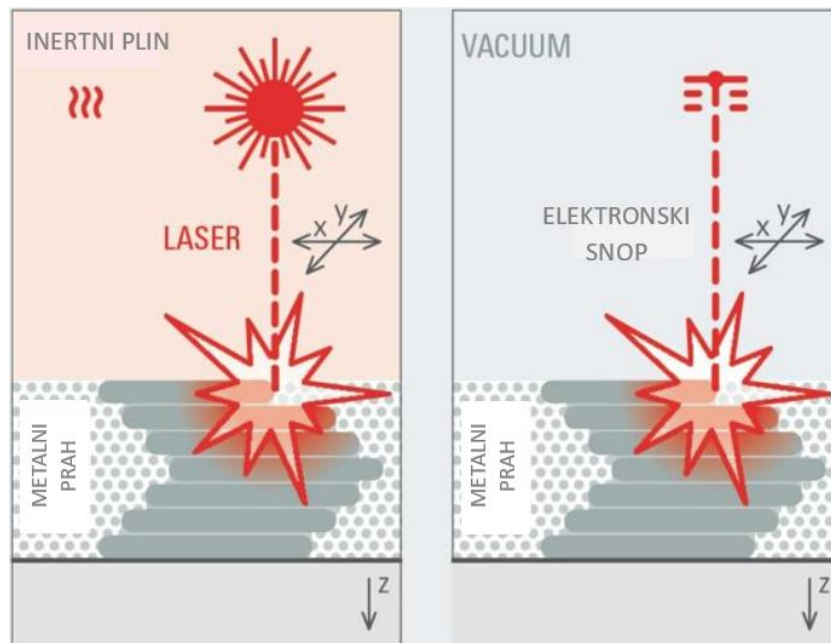


Slika 5: Podjela aditivne proizvodnje metala [9]

#### 1. Srašćivanje praškastog materijala u slojevima, (PBF, eng. Powder bed fusion):

postupak je aditivne tehnologije koji obuhvaća metode koje koriste laserske ili elektronske snopove za taljenje i spajanje materijala u obliku praha. Svaki PBF proces uključuje razmazivanje praha preko već položenih slojeva, koristeći različite mehanizme te u isto vrijeme osiguravajući novu opskrbu materijalom. U procesu, sloj materijala debljine oko 0,1 mm razmazuje se preko prethodnog, laser zatim spaja prvi sloj nakon čega se novi sloj praha razmazuje preko prethodnog, a proces spajanja slojeva se nastavlja. Ovaj postupak se ponavlja dok se cijeli model ne izradi. Preostali prah koji nije spojen ostaje na svojem mjestu i uklanja se tijekom naknadne obrade [11]. Prednosti ovog postupka uključuju širok raspon upotrebljivih materijala. Tijekom izvođenja postupka nisu potrebni potporni elementi jer okolni prah podržava ispisane slojeve. Budući da je postupak samonosiv, omogućuje stvaranje složenih geometrija.

Međutim, nedostaci postupka uključuju moguću lošu rezoluciju koja ovisi o veličini zrna praha te je postupak koji zahtijeva puno energije i općenito gledano duže vrijeme izrade [12]. Slika 6 prikazuje PBF postupak.



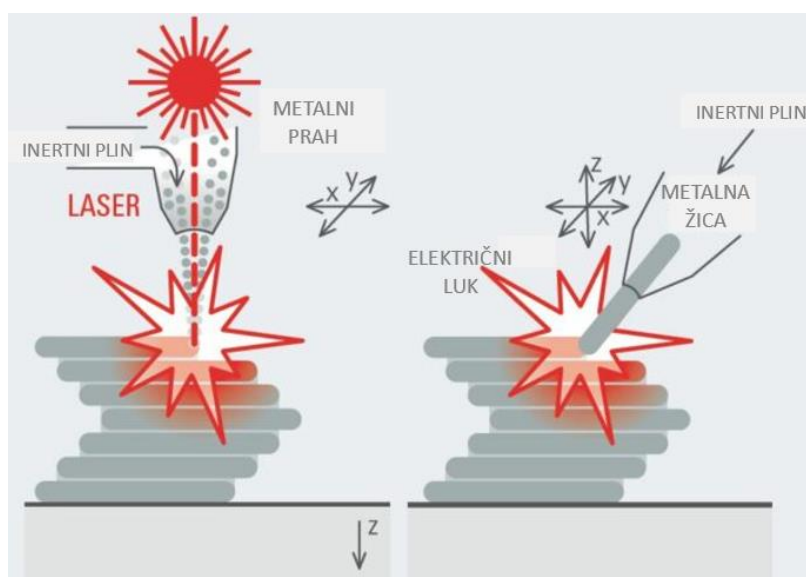
Slika 6: PBF postupak [9]

## 2. Direktno taloženje izvorom energije, (DED, eng. Direct energy deposition):

karakterizira istiskivanje žice ili raspršivanje praškastog materijala koji se potom tali pri izlasku iz mlaznice. Ovisno o procesu i korištenom materijalu, ovo se općenito postiže s pomoću lasera ili zavarivačkog luka. Procesi DED koji se temelje na prahu također omogućuju printanje dijelova visoke razlučivosti slično kao kod printanja u slojevima praha, uz prednost što ne zahtijevaju okolišno kućište, što otvara mogućnosti za proizvodnju objekata većih razmjera. Za razliku od tradicionalnih metoda ekstruzije, DED omogućuje kretanje mlaznice u različitim smjerovima, bez ograničenja na jednu os. Sustavi s četiri ili pet osi dopuštaju nanos materijala pod višestrukim kutovima, koristeći prah ili žicu koja se tijekom procesa zagrijava s pomoću lasera, električnog luka ili plazme. Ova tehnika je posebno korisna za metale, omogućavajući precizno dodavanje materijala sloj po sloj, čime se obnavljaju ili stvaraju nove značajke na objektu. Iako žica može biti manje precizna zbog svog prethodno oblikovanog stanja, pokazuje se efikasnijom u potrošnji materijala u usporedbi s prahom jer se koristi točno koliko je potrebno [11].



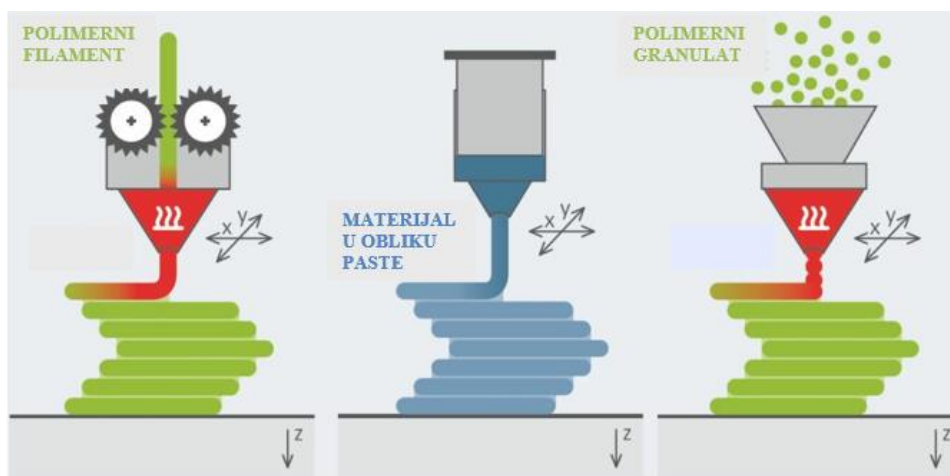
Slika 7 prikazuje DED postupak.



Slika 7: DED postupak [9]

### 3. Ekstrudiranje materijala (MEX, eng. Material extrusion):

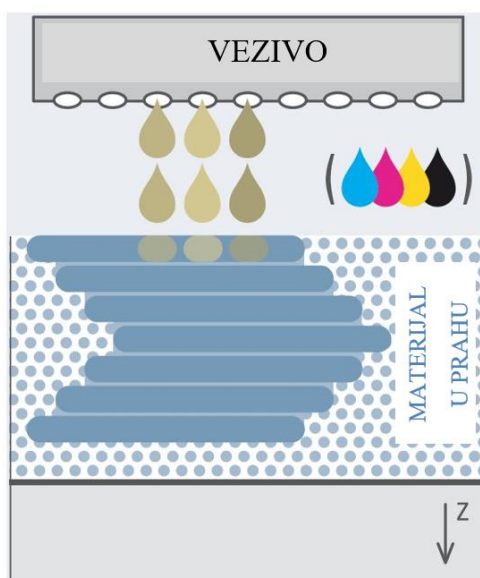
je tehnika u kojoj se materijal provodi kroz zagrijanu mlaznicu te se nanosi u slojevima. Mlaznica se horizontalno pomiče, dok se platforma vertikalno diže i spušta nakon svakog novog sloja. Materijal se istiskuje kroz mlaznicu uz stalni pritisak i neprekidan tok pri čemu je ključno održavati konstantan tlak i brzinu. Početak procesa obilježava polaganje prvog sloja prema potrebi na presjek prvog dijela izratka. Na ovaj temeljni sloj se nanose dodatni slojevi jedan po jedan. Tijekom ovog procesa, slojevi se međusobno spajaju jer je materijal u topljenom, fluidnom stanju kad se nanosi [11]. Slika 8 prikazuje MEX postupak.



Slika 8: MEX postupak [9]

#### 4. Proces tiskanja vezivom, (BJ, eng. Binder jetting):

koristi dvije vrste materijala: prah i vezivo koje služi kao ljepilo između slojeva praha i u tekućem je stanju. Glava za ispis se kreće duž horizontalnih i vertikalnih osi uređaja, izmjenjujući slojeve materijala i veziva. Kao i kod drugih tehnika proizvodnje na bazi praha, objekt koji se ispisa sam je podržan unutar komore s prahom i odstranjuje se iz nepovezanog praha nakon završetka. Tijekom procesa, prvo se praškasti materijal nanosi po radnoj površini valjkom. Zatim, glava za ispis nanosi vezivo na potrebna područja praha. Nakon toga, radna površina se spušta za debljinu jednog sloja modela, što omogućava nanos novog sloja praha preko postojećeg. Objekt se postupno formira na mjestima gdje je prah povezan s vezivom. Oko objekta ostaje nepovezan prah koji služi kao podrška tijekom izrade. Proces se ponavlja sve dok se cijeli izradak ne dovrši [11]. Slika 9 prikazuje BJT postupak.

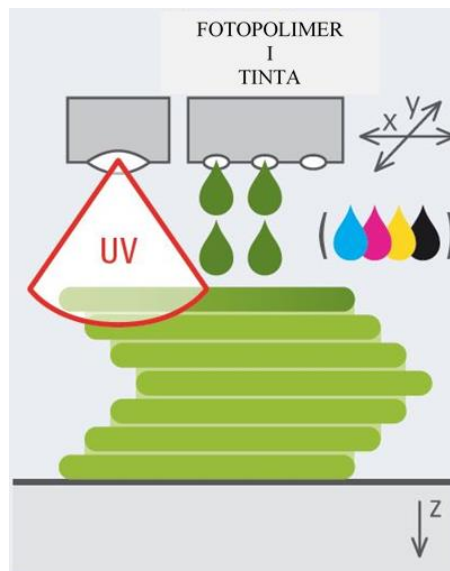


Slika 9: BJT postupak [9]

#### 5. Proces tiskanja materijala (MJT, eng. Material jetting)

funkcionira slično kao dvodimenzionalni pisači, gdje se materijal raspršuje na radnu površinu putem kontinuiranog ili pristupa kap po kap. Materijal se nanosi na površinu gdje se zatim stvrdnjava, omogućavajući izgradnju modela sloj po sloju. Mlaznica se kreće horizontalno preko radne površine, dok se slojevi materijala otvrdnjavaju s pomoću ultraljubičaste svjetlosti. Zbog potrebe za raspršivanjem materijala u obliku kapljica, izbor materijala je ograničen. Od metalnih materijala se koriste nanočestice metala, čime se postiže izuzetno tanka debljina slojeva u usporedbi s drugim aditivnim tehnologijama. Proces tiskanja materijala započinje

pozicioniranjem glave pisača iznad radne površine. Zatim se kapljice materijala apliciraju na željena mjesta koristeći termičku ili piezoelektričnu metodu. Ove kapljice se stvrđavaju kako bi formirale prvi sloj. Daljnji slojevi se nastavljaju nanositi istim postupkom. Nakon što se slojevi ohlade i otvrdnu ili budu otvrdnuti s pomoću UV svjetla, slijedi faza postprocesiranja koja uključuje uklanjanje potpornog materijala i završnu obradu površine [11]. Slika 10 prikazuje MJT postupak.



Slika 10: MJT postupak [9]

### 3.1.1. Prednost DED postupka

DED postupak ima nekoliko značajnih prednosti u odnosu na druge postupke aditivne tehnologije. Prva ključna prednost DED-a je mogućnost mnogo veće brzine taloženja, posebice kada se koristi žica kao ulazni materijal. Ova značajka omogućava bržu izradu većih prototipova, što je idealno za primjene gdje je brzina proizvodnje prioritet, poput hitnih popravaka ili proizvodnje velikih dijelova. DED sa žicom također omogućuje izradu proizvoda bez ograničenja u dimenzijama, što nije uvijek moguće kod drugih tehnologija. Cijena metalne žice koja se koristi u DED postupku, znatno je niža od cijene metalnog praha, što dodatno smanjuje ukupne troškove proizvodnje. Korištenje komercijalno dostupnih žica za zavarivanje također dodatno smanjuje troškove materijala i olakšava implementaciju DED tehnologije. Iako DED sa žicom ima nižu razlučivost i grublju površinsku obradu, potreba za dodatnom obradom može biti opravdana u kontekstu troškovne učinkovitosti i mogućnosti brže proizvodnje većih dijelova. Zbog tih karakteristika, DED sa žicom posebno je pogodan za izradu velikih, srednje složenih metalnih proizvoda [11], [13], [14].

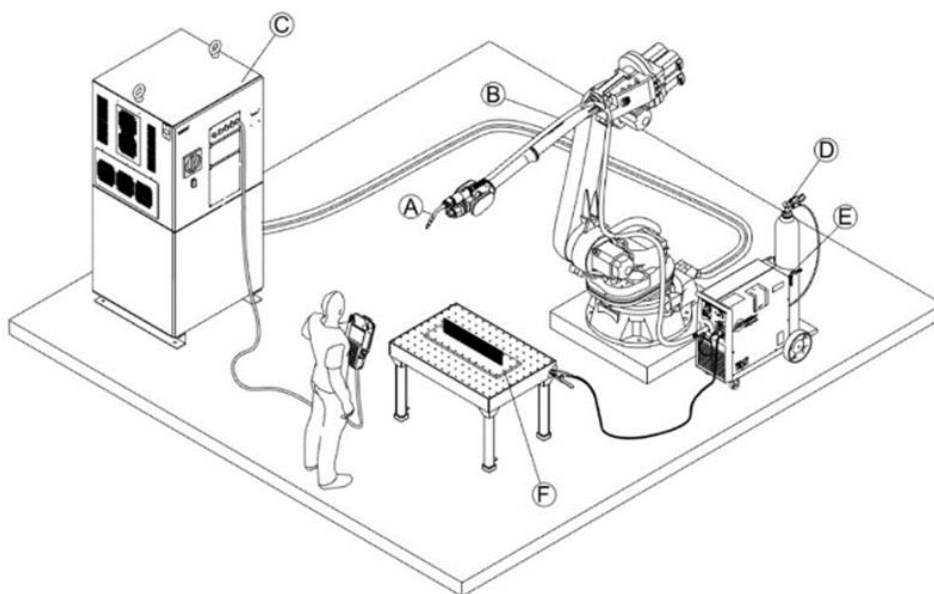
## 4. WAAM

Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom, poznata kao WAAM (eng. Wire and Arc Additive Manufacturing), predstavlja naprednu tehnologiju aditivne proizvodnje koja koristi električni luk kao izvor topline i metalnu žicu kao dodatni materijal. WAAM tehnologija jedna je od oblika DED aditivne proizvodnje.

U najširem smislu, WAAM proces koristi standardnu opremu za zavarivanje montiranu na vođeni sistem ili robotsku ruku koja omogućava precizno i kontinuirano taloženje materijala. Kako bi započeo proces zavarivanja, potreban je zatvoren strujni krug. To se postiže s pomoću zavarivačkog luka formiranog između vrha elektrode zavarivačkog uređaja i metalnog radnog komada pri čemu su oba povezana na zajednički izvor napajanja. Temeljni princip rada ovog procesa je taljenje žice električnim lukom, gdje se materijal sukcesivno polaže sloj po sloj.

Tipična oprema WAAM procesa prikazana je na slici 11, a uključuje [7]:

- A. zavarivački pištolj za TIG, PAW ili MIG/MAG zavarivanje
- B. upravljački sustav pokreta, koji najčešće uključuje robotske sustave ili numerički upravljane portale (CNC)
- C. upravljačku jedinicu koja omogućuje komunikaciju s upravljačkim sustavom i prima podatke od operatera
- D. zaštitni plin koji prolazi kroz zavarivački pištolj i štiti električni luk tijekom zavarivanja,
- E. uređaj za zavarivanje
- F. osnovni materijal na kojem započinje WAAM proces.



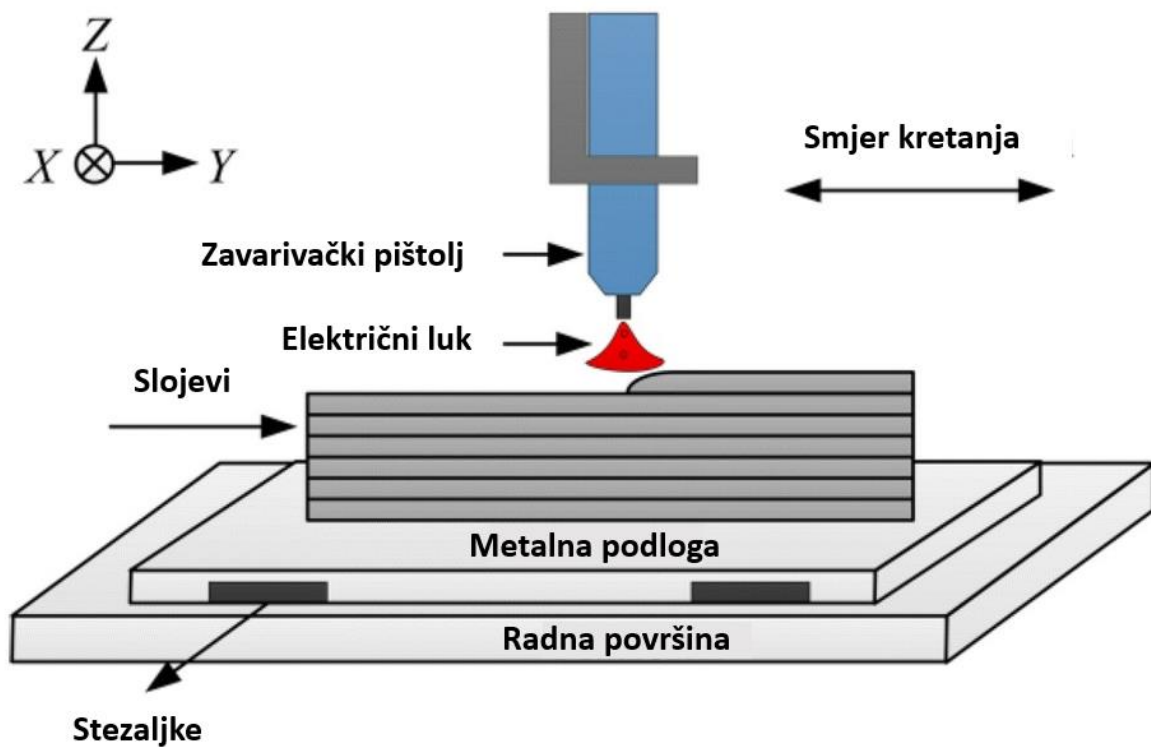
Slika 11: WAAM oprema [7]

## 4.1. Tehnike WAAM postupka

Temeljni princip rada ovog procesa je taljenje žice električnim lukom, pri čemu se materijal sukcesivno polaže sloj po sloj. Može se kategorizirati u tri glavna postupka, ovisno o korištenoj tehnici zavarivanja:

- Zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (TIG, eng. *Tungsten Inert Gas* ili GTAW, eng. *Gas Tungsten Arc Welding*)
- Zavarivanje plazma lukom (PAW, eng. *Plasma Arc Welding*)
- Zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plina ili plinskih mješavina (GMAW, eng. *Gas Metal Arc Welding*), koju dijelimo još na:
  - 3.1. u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (MIG)
  - 3.2. u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (MAG),

Svaki od ovih procesa nudi određene prednosti i nosi specifične izazove, koje definira energetska gustoća, razina kontrole procesa, brzina polaganja materijala i tipični defekti koji se mogu pojaviti tijekom proizvodnje [15]. Na slici 12 prikazan je princip WAAM postupka.



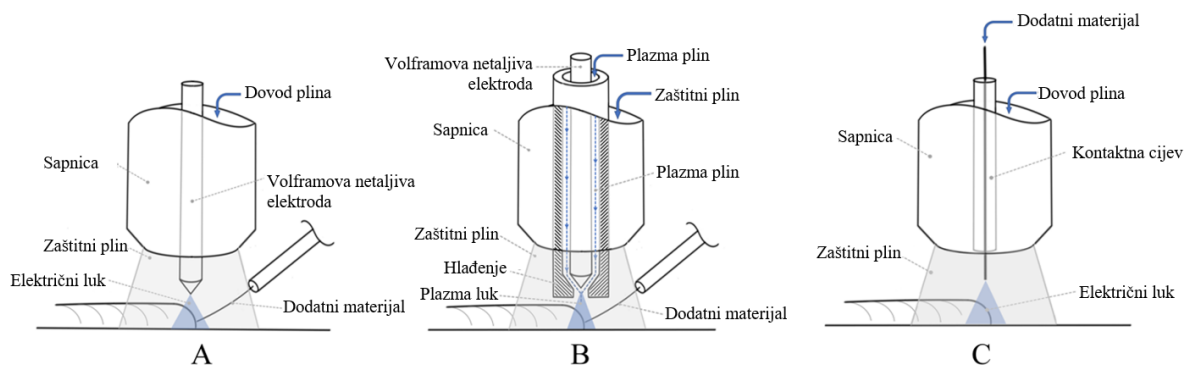
Slika 12: WAAM postupak [16]

MIG/MAG zavarivanje karakterizira koaksijalno uvlačenje žičane elektrode kroz zavarivački pištolj koji također ima sustav za dostavu zaštitnog plina. Ova dva procesa razlikuju se prema vrsti zaštitnog plina koji se koristi. MIG koristi kemijski inertne plinove, poput mješavina argona, helija ili dušika, dok MAG koristi mješavine kemijski reaktivnih plinova, kao što su CO<sub>2</sub> ili kisik, uz neaktivne plinove. Izbor plina ima izravan utjecaj na kvalitetu proizvedenog dijela. Reaktivni plin na primjer, djelomično se razgrađuje tijekom zavarivanja na visokim temperaturama. Ova razgradnja oslobađa energiju koja pridonosi određenim korisnim karakteristikama zavara, poput dublje penetracije [7].

TIG zavarivanje se razlikuje od MIG/MAG zavarivanja po načinu dodavanja materijala. Dok MIG/MAG koriste jedan zavarivački pištolj koji istovremeno sadrži dovod materijala i opskrbu plinom, TIG je ručni postupak zavarivanja u neaktivnom zaštitnom plinu ili smjesi neaktivnih plinova, pri čemu se koristi netaljiva volframova elektroda i dodatni materijal. Zbog toga, TIG postavke zahtijevaju dodatnu opremu za dodavanje materijala uz zavarivački pištolj. Shodno tim karakteristikama, TIG zaostaje u odnosu na MIG/MAG, budući da planiranje putanje mora uzeti u obzir orijentaciju volframove elektrode u odnosu na smjer kretanja.

PAW postupak koristi netaljivu volframovu elektrodu kao izvor toplote i dodatni materijal. Ovaj WAAM proces koristi visoko ioniziranu smjesu plinova, što ga čini energetski intenzivnijim u usporedbi s TIG i MIG/MAG metodama. Visoka koncentracija energije omogućuje dublje prodiranje slojeva u osnovni materijal te smanjuje područje zone utjecaja toplote, što omogućuje zavarivanje tanjih stijenki.

Slika 13 prikazuje spomenuta tri glavna postupka WAAM proizvodnje.



Slika 13: Glavni postupci WAAM proizvodnje: TIG, PAW, MIG/MAG [7]

Kao materijal u WAAM tehnologiji mogu se koristiti svi metali i legure dostupne u obliku žice ili praha. Izbor materijala je ključan za kvalitetu krajnjeg proizvoda. Prah kao sirovinu karakterizira visoka cijena, varijabilna kvaliteta i složeni procesi doziranja s učinkovitošću materijala između 40 % i 60 %. Osim toga, upotreba praha može nositi visok sigurnosni rizik, posebno pri radu s titanom ili aluminijem. S druge strane, žica nudi srednje troškove, visoku kvalitetu kod legura titana, željeza i nikla uz dobro uspostavljen proces doziranja i 100 % učinkovitost materijala [15].

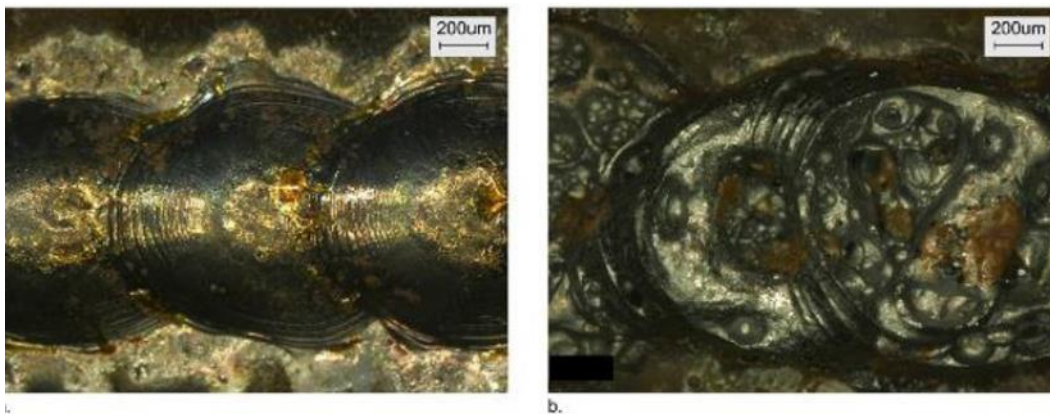
Po završetku WAAM proizvodnje, ovisno o zahtjevima površine, te tolerancijama dimenzija i oblika, može biti potrebna dodatna strojna obrada ili uklanjanje početne sirovine. Različite vrste toplinskih obrada također se mogu primijeniti kako bi se poboljšale mehaničke i mikrostrukturne karakteristike dijelova.

## 4.2. Parametri

Parametri su baza procesa zavarivanja. Razumijevanje i pravilno postavljanje parametara je ključ stvaranja dobrog zavarenog spoja kojeg odlikuju željena svojstva za primjenu u eksploataciji.

### 4.2.1. Zaštitni plin

Primarna funkcija zaštitnog plina u zavarivanju je zaštita taline od kontaminacije iz okolne atmosfere koja je uglavnom uzrokovana prisutnošću dušika, kisika i vodene pare. Ako rastaljeni metal dođe u kontakt s okolnim zrakom, prisutni kemijski elementi uzrokuju reakcije u zavarima. Kisik uzrokuje oksidaciju rastaljenog materijala. On se također može vezati s ugljikom u čeliku, stvarajući ugljični monoksid (CO) koji može ostati zarobljen u rastaljenom materijalu i dovesti do stvaranja pora. Izloženost visokim razinama dušika također može izazvati poroznost [7]. Slika 14 prikazuje nusprodukt izloženosti visokim razinama dušika; pore.



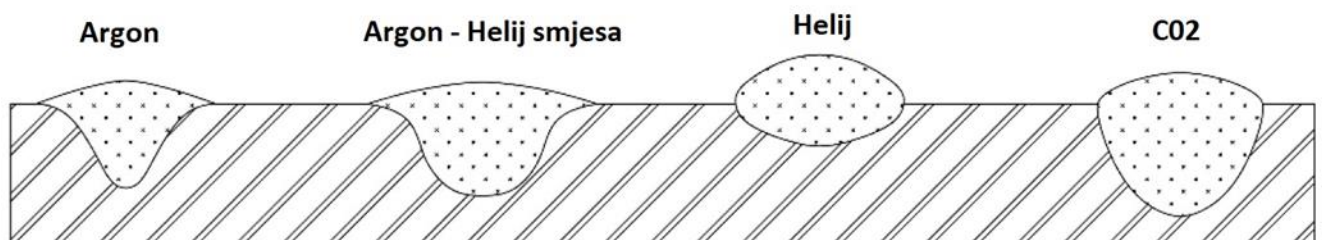
Slika 14: Zavar izložen visokim razinama dušika [7]



Osim zaštite od atmosferske kontaminacije, zaštitni plin reagira s osnovnim i dodatnim materijalima, što može utjecati na mehanička svojstva zavara poput čvrstoće, žilavosti i otpornosti na koroziju. Također, zaštitni plin izravno utječe na oblik zavara, stupanj razrjeđenja i dubinu prodiranja u osnovni materijal. Različiti zaštitni plinovi koji mogu uključivati argon (Ar), ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>), vodik (H) i helij (He), imaju različite učinke na zavar, ovisno o njihovim toplinskim svojstvima i reaktivnosti.

Zbog niske cijene, CO<sub>2</sub> se često koristi u različitim omjerima smjesa plinova, što značajno utječe na karakteristike zavara. Usporedba učinaka smjese M21 (82 % Ar i 18 % CO<sub>2</sub>) s čistim CO<sub>2</sub> pokazala je da zavari izrađeni s C1 plinom imaju šire i dublje profile, kao i veću krajnju vlačnu čvrstoću, gdje C1 zavari dosežu 1450 MPa u odnosu na 1270 MPa kod M21 smjese. Također, povećanje udjela CO<sub>2</sub> u smjesama argona i CO<sub>2</sub> kod ugljičnih čelika, u rasponu od 5 % do 20 %; rezultira većom penetracijom zavara i omogućuje brže zavarivanje. Međutim, pretjerana količina CO<sub>2</sub> može destabilizirati zavarivački luk, uzrokujući povećano prskanje i neujednačene zavare, dok smanjenje udjela CO<sub>2</sub> smanjuje dubinu prodiranja [7].

Na kraju, izbor zaštitnog plina ovisi o specifičnim zahtjevima primjene. Na primjer helij, koji je bolji vodič topline od argona, koristi se kada je potreban veći toplinski unos; primjerice za potrebe zavarivanja debljih materijala ili metala s visokom toplinskom vodljivošću (poput aluminijskog i bakra). Argon, s manjom toplinskom vodljivošću, pogodniji je za zavarivanje tanjih metalnih ploča [7]. Slika 15 prikazuje utjecaj pojedinog plina na oblik i dubinu penetracije zavara.



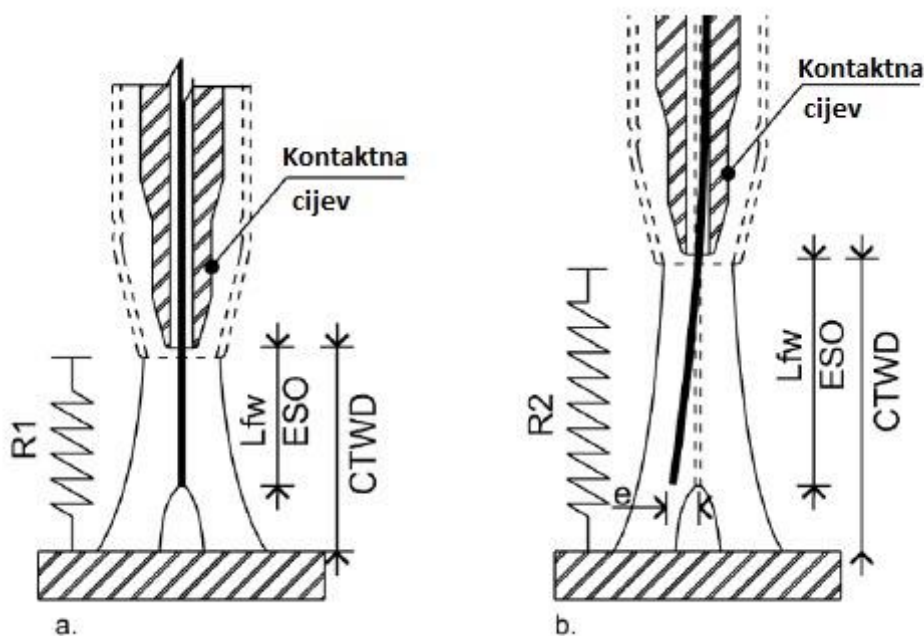
Slika 15: Utjecaj pojedinog plina na oblik i dubinu penetracije zavara [7]



#### 4.2.2. Slobodni kraj žice

Kvaliteta zavarenih struktura uvelike ovisi o procesnim parametrima koji smanjuju količinu toplinskog unosa tijekom zavarivanja. Jedan od načina smanjenja toplinskog unosa je povećanje slobodnog kraja žice, odnosno duljine elektrode između kontaktne cijevi zavarivačkog pištolja i električnog luka. Ovaj parametar se također može opisati kao udaljenost između kontaktne cijevi i radnog komada, odnosno udaljenost između vrha zavarivačkog pištolja i radnog komada.

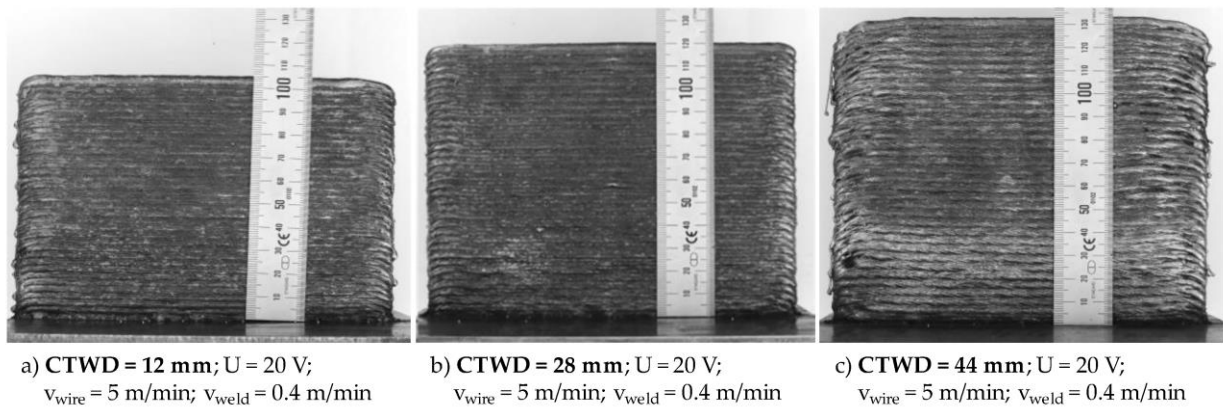
Povećanjem slobodnog kraja žice uz održavanje konstantnog napona zavarivanja, povećava se otpornost elektrode, što uzrokuje smanjenje intenziteta zavarivačke struje i posljedično, manji toplinski unos. U kontekstu WAAM tehnologije i posebno kod zavarivanja tankih metalnih limova, smanjenje toplinskog unosa je ključno ne samo za osiguranje stabilnosti zavarivačkog procesa, već i za smanjenje toplinskih deformacija na tankim limovima. Stoga se može zaključiti da dulji slobodni kraj žice može doprinijeti postizanju kvalitetnih zavara. Međutim, kao što je prikazano na slici 9, povećanjem slobodnog kraja žice povećava se i ekscentričnost vrha elektrode u odnosu na središnju os zavarivačkog pištolja, što dovodi do nestabilnosti procesa zavarivanja. Slika 16 prikazuje problem ekscentričnosti vrha elektrode [11].



Slika 16: Utjecaj slobodnog kraja žice na ekscentričnost vrha elektrode [7]

Učinci slobodnog kraja žice prikazani su kroz praktične eksperimente i teorijske modele s duljinama koje su varirale između 5 mm i 20 mm. Rezultati su pokazali da vrijednosti

zavarivačke struje opadaju prosječnom brzinom od 6,5 A/mm za teorijski model i  $7,0 \pm 1,4$  A/mm za eksperimentalni model. Također, utvrđeno je da povećanje slobodnog kraja žice dovodi do povećanja visine profila navarenih slojeva, što je posljedica formiranja krupnih kapljica metala na vrhu elektrode. Rezultat eksperimenta prikazan je na slici 17 [7].



Slika 17: Učinci slobodnog kraja žice na visinu profila [7]

### 4.2.3. Brzina zavarivanja

Brzina zavarivanja ne utječe samo na proizvodnu učinkovitost WAAM-a, već ima značajan utjecaj i na kvalitetu zavara te na penetraciju u osnovni materijal. Uz konstantnu brzinu dodavanja žice, veća brzina zavarivanja dovodi do manjeg unosa topline, što pomaže smanjiti veličinu zone utjecaja topline i deformacije, posebno kod tankih materijala. No, ako je unos topline prenizak, toplina neće biti dovoljna za taljenje osnovnog materijala, što može rezultirati slabom penetracijom [7].

Uz konstantnu brzinu dodavanja žice, smanjenje brzine zavarivanja povećava taloženje materijala po jedinici površine. Previše spora brzina zavarivanja može dovesti do prekomjernog taloženja materijala na određenom području, uzrokujući prelijevanje materijala preko osnovnog komada umjesto prodiranja u njega. Pri određenim niskim brzinama zavarivanja, materijal ima tendenciju prelijevanja preko rubova, što smanjuje kvalitetu površine zavara [18]. Nadalje, povećanje brzine zavarivanja, uz konstantan napon i struju, mijenja oblik navarenog spoja tako što smanjuje njegovu širinu zbog manjeg unosa topline po jedinici površine dostupne za topljenje žice [19].

#### **4.2.4. Brzina dodavanja materijala**

Brzina dodavanja materijala usko je povezana s brzinom zavarivanja; za određenu željenu debljinu zavara, veća brzina zavarivanja zahtijeva veću količinu dodanog materijala kako bi se održala konstantna površina po jedinici duljine nanesenog materijala. Pri konstantnoj brzini zavarivanja, smanjenje brzine dodavanja materijala rezultira zavarima s povećanom visinom i širinom, što se može objasniti povećanim volumenom rastaljenog materijala po jedinici površine [19]. Povećanje brzine dodavanja materijala može dovesti do povećanja temperature zavarivanja koja je potrebna za topljenje veće količine materijala u određenom vremenu, što može negativno utjecati na hrapavost površine i kvalitetu zavarenih zidnih struktura. Stoga, ključno je pronaći odgovarajući omjer između brzine dodavanja materijala i brzine zavarivanja kako bi se osigurala prihvatljiva kvaliteta zavara [7].

Unutar određenih granica brzine zavarivanja, omjer između brzine zavarivanja i brzine dodavanja materijala održava stabilnost procesa i pokazuje linearni odnos. Međutim, čak i uz održavanje tog omjera, veće ili manje vrijednosti mogu utjecati na geometriju zavara. Povećanje brzine dodavanja materijala i brzine zavarivanja uzrokuje primjerice pliće i šire zavare. To je posljedica većeg nakupljanja topline i povećanja volumena rastaljenog materijala, uz dodatni pritisak koji potiskuje rastaljeni materijal, što dovodi do plićeg zavara [18].

Ovisno o situaciji, potrebno je odabrati odgovarajuće parametre zavarivanja. Niže postavke zavarivanja prikladne su za užu zavar kod tanjih stijenki. Dok se za deblje stijenke može birati između nižih vrijednosti koje zahtijevaju više prolaza po sloju uz veću visinu sloja ili viših vrijednosti koje omogućuju šire zavare s manjom visinom, čime se postiže više slojeva s manje prolaza po sloju [7].

#### **4.2.5. Temperatura podloge**

Temperatura predgrijavanja podloge značajno utječe na svojstva taloženog materijala tijekom procesa zavarivanja ili taloženja. Povećanjem temperature predgrijavanja podloge, dolazi do poboljšanja toplinske vodljivosti, što omogućava materijalu da se ravnomjernije širi. Time se povećava širina taloženog zavara, dok se visina smanjuje, što rezultira glađim taloženjem. [20]

#### **4.2.6. Temperatura između slojeva**

Temperatura između slojeva ključna je za postizanje željenog oblika krajnjeg proizvoda u WAAM procesu. Pravilna međuslojna temperatura važna je za osiguravanje glatke i stabilne površine tijekom taloženja materijala. Kontrola temperature radnog komada poboljšava završnu obradu površine, smanjuje zaostala naprezanja i poboljšava mehanička svojstva proizvoda. Kako bi se postigla optimalna međuslojna temperatura, potrebno je osigurati odgovarajuće vrijeme hlađenja između slojeva. To vrijeme treba pažljivo odabrati, uzimajući u obzir kompromis između željenih karakteristika proizvoda i trajanja proizvodnog procesa [20].

#### **4.3. Efektivna širina strukture proizvedene WAAM postupkom**

Strukture proizvedene s pomoću WAAM tehnologije sastoje se od dvije glavne zone: ukupne površine zida i efektivne površine zida. Ukupna površina uključuje sve taložene materijale, dok efektivna površina predstavlja onaj dio koji je koristan za konačnu komponentu. Razlika između tih dviju zona odnosi se na površinsku nepravilnost ili valovitost, koja se smatra viškom materijala i kasnije se uklanja tijekom CNC obrade. Ova valovitost nije funkcionalni dio komponente te se uklanja kako bi se dobio precizniji i glađi konačni oblik. [21]

Učinkovitost taloženja za WAAM komponente izračunava se kao omjer efektivne površine zida prema ukupnoj površini zida, čime se dobiva jasna slika o količini materijala koji se može izravno iskoristiti u konačnoj proizvodnji. Na temelju istraživanja, WAAM obično postiže vrlo visoku učinkovitost taloženja, koja iznosi približno 93 %, što znači da je samo 7 % taloženog materijala neiskoristivo zbog valovitosti i mora se ukloniti. [22]

CNC postupci obrade odvajanjem čestica često zahtijevaju korištenje velikih početnih blokova materijala koje se obrađuju kako bi se postigao konačni oblik, što rezultira velikim količinama otpadnog materijala. S druge strane, WAAM omogućuje taloženje materijala sloj po sloj, čime se približava konačnom obliku komponente, čime se minimizira otpad i značajno smanjuju troškovi materijala.

Međutim, valovitost taloženih slojeva predstavlja izazov jer zahtijeva dodatnu CNC obradu kako bi se postigla potrebna točnost. Iako se time dodaju određeni troškovi i vrijeme, prednosti WAAM-a, poput visoke brzine taloženja i nižih troškova sirovina, čine ovaj proces vrlo konkurentnim, posebno za proizvodnju velikih i kompleksnih metalnih komponenti. Nadalje,

korištenje integriranih sustava u kojima se WAAM i CNC kombiniraju može dodatno optimizirati proces, smanjujući postavljanje i vrijeme obrade, što dovodi do brže proizvodnje i smanjenih troškova.

#### **4.4. Prednosti WAAM tehnologije**

##### **1. Velike dimenzije**

Maksimalna veličina proizvoda ovisi o dosegu zavarivačkog sustava koji se koristi. WAAM omogućuje proizvodnju dijelova dimenzija većih od jednog kubičnog metra, a upotrebom robotskih tračnica i manipulatora za zavarivanje, dimenzije se mogu dodatno povećati [23]. [24]

##### **2. Veća sloboda dizajna**

WAAM, kao i druge aditivne proizvodne metode, omogućuje izradu relativno složenih oblika. To također otvara mogućnosti za topološku optimizaciju i proizvodnju dijelova kreiranih generativnim dizajnom, čime postaju pristupačniji i jednostavniji za izradu [23]

##### **3. Niski početni troškovi**

U usporedbi s drugim DED sustavima, poput izravnog laserskog sinteriranja metala ili aditivne proizvodnje uz pomoć elektronskog snopa, WAAM nudi relativno niže troškove. Osim toga, WAAM ima veću brzinu taloženja materijala u usporedbi s drugim tehnikama aditivne proizvodnje, što dodatno doprinosi isplativosti procesa [23].

##### **4. Široka dostupnost materijala**

WAAM koristi potrošnu žicu kao osnovni materijal. Ovisno o primjeni, dostupne su razne legure u obliku žice, što omogućuje širok izbor materijala i mehaničkih svojstava za dizajn i proizvodnju dijelova [23]

##### **5. Hibridna proizvodnja**

WAAM se može kombinirati s tradicionalnim proizvodnim metodama kako bi se pridodale specifične značajke dijelovima izrađenima konvencionalnim metodama [23].

##### **6. Kombinacija materijala**

WAAM omogućuje izradu dijelova s funkcionalno stupnjevanim komponentama, gdje se mogu kombinirati različiti materijali [23].

## 7. Smanjenje otpada

Materijal se nanosi samo tamo gdje je potreban, što značajno smanjuje otpad. Ovo je posebno važno kod izrade dijelova od skupocjenih materijala poput titana ili kod dijelova koji se inače obrađuju iz blokova. Optimizacijom topologije se postiže maksimalna učinkovitost u korištenju materijala [23].

## 8. Mehanička svojstva

WAAM tehnologija može poboljšati mehanička svojstva dijelova u odnosu na dijelove izrađene tradicionalnim metodama poput lijevanja i kovanja [24]. Ova tehnologija omogućuje preciznu izradu prilagođenih dijelova s posebnim karakteristikama, kao što su povećana čvrstoća, otpornost na koroziju ili poboljšana električna vodljivost; čime se dodatno poboljšava funkcionalnost proizvedenih komponenti [25].

## 9. Ubrzavanje proizvodnje

Ova tehnologija omogućava bržu proizvodnju složenih objekata u jednom koraku, skraćujući vrijeme izrade, a često i vrijeme naknadne obrade, budući da se objekti izrađuju s gotovo konačnim oblikom [24]. WAAM može skratiti vrijeme proizvodnje velikih komponenata. Primjerice u kovanju, s više od godinu dana na samo nekoliko tjedana. Također, omogućuje brži razvoj prototipova i jednostavnije prilagodbe dizajna komponenti [25].

## 4.5. Nedostaci WAAM tehnologije

### 1. Točnost:

WAAM često proizvodi dijelove sa širim tolerancijama te zahtijeva završnu obradu kako bi se postigle funkcionalne površine [24].

### 2. Ograničen izbor materijala:

Unatoč dostupnom širokom izboru materijala, tehnologija je ograničena na materijale koji su kompatibilni s postupkom zavarivanja, što može biti ograničavajuće [24].

### 3. Hrapavost površine

Izrađeni dijelovi često imaju grubu površinsku obradu, što zahtijeva dodatne korake poput poliranja ili brušenja [24].

#### 4. Deformacije i zaostala naprezanja

Zaostala naprezanja ponekad se javljaju u dijelovima proizvedenim WAAM procesom zbog visokog unosa topline. Budući da se komponenta generira slojevito, WAAM generirana komponenta doživljava izmjenične cikluse zagrijavanja i hlađenja, što rezultira zaostalim naprezanjima i deformacijama. Ako su zaostala naprezanja dovoljno visoka, značajno utječu na mehanička svojstva dijela proizvedenog WAAM procesom [20].

#### 5. Poroznost

Ovaj nedostatak smanjuje gustoću proizvedenog dijela, a kao rezultat, utječe na mehaničku čvrstoću dijela. Ovaj se nedostatak uglavnom javlja zbog vlage, masti itd. na površini žice ili podloge. Također, može nastati zbog zaštitnog ili drugog plina u okolini. Stoga, kako bi se izbjegli takvi problemi, treba koristiti čistu i glatku žicu, odgovarajući zaštitni plin, odgovarajuću mješavinu plinova i odgovarajuću brzinu protoka zaštitnog plina [20].

#### 6. Neravnomjerno taloženje

Neravnomjerno taloženje je uobičajen nedostatak te utječe na daljnje taloženje u WAAM procesu. Ovaj nedostatak pojavljuje se u obliku grba i dolina. Ovaj se problem može riješiti korištenjem odgovarajućeg omjera brzine dovođenja žice i brzine zavarivanja.

#### 7. Nehomogena mikrostruktura

Mikrostruktura dijela proizvedenog WAAM procesom prolazi kroz značajne promjene zbog različitih brzina zagrijavanja i hlađenja, što dovodi do njezine nehomogenosti. Toplinski unos tijekom WAAM procesa značajno utječe na nukleaciju, toplinski gradijent i brzinu rasta zrna. Parametri procesa izravno utječu na mikrostrukturu i čvrstoću materijala zbog višestrukih slojeva zavarivanja i s njima povezanih temperaturnih ciklusa. Različite operacije tijekom i nakon procesa provode se kako bi se smanjila anizotropija u mikrostrukturi dijela, ovisno o specifičnim primjenama [20].

Nedostaci koji se mogu pojaviti tijekom WAAM procesa i na proizvodima izrađenim ovim postupkom mogu se najčešće spriječiti ili smanjiti odgovarajućim odabirom parametara procesa.

## **4.6. Ekonomske i ekološke prednosti WAAM proizvodnje u odnosu na konvencionalne proizvodne tehnologije**

WAAM tehnologija, osim što nudi iznimne mogućnosti u pogledu proizvodne učinkovitosti i fleksibilnosti, također donosi značajne ekološke i energetske prednosti u usporedbi s tradicionalnim metodama proizvodnje.

### **4.6.1. Ekonomske prednosti**

Aditivna proizvodnja donosi brojne ekonomske prednosti u usporedbi s konvencionalnim metodama, osobito kada je riječ o proizvodnji malih serija u kraćim vremenskim okvirima. Ova tehnologija se u svojim počecima prvenstveno koristila za prototipiranje, znatno skraćujući vrijeme izrade u usporedbi s tradicionalnim metodama, koje su mogle trajati mjesecima. Korištenjem aditivnih metoda, proces izrade se može skratiti na nekoliko dana, pa čak i sati, eliminirajući potrebu za dodatnim alatima poput kalupa i dugih proizvodnih linija. To smanjuje troškove i ubrzava cjelokupni proizvodni proces [26], [14].

Tvrtke koje žele zadržati konkurentsku prednost u usporedbi s jeftinom masovnom proizvodnjom sve više se okreću inovacijama i razvoju složenih proizvoda prilagođenih manjim tržišnim segmentima ili pojedinačnim korisnicima. Aditivna proizvodnja omogućuje visoku razinu prilagodbe, pružajući ekonomsku održivost i otpornost na promjene globalnih tržišnih uvjeta [10]. Ova tehnologija donosi značajne uštede kroz smanjenje operativnih troškova, kraći opskrbeni lanac i optimizaciju cijelog životnog ciklusa proizvoda. U proizvodnji, aditivna tehnologija smanjuje potrebu za složenim alatima i omogućuje brzu proizvodnju na zahtjev, čime se minimiziraju troškovi skladištenja i radne snage [26].

Primjerice, u zrakoplovnoj industriji, dijelovi izrađeni aditivnom proizvodnjom omogućuju smanjenje mase proizvoda, što izravno smanjuje potrošnju goriva. Osim toga, slojevita proizvodnja smanjuje količinu otpada, čineći proces energetski i materijalno učinkovitijim od konvencionalnih metoda [26]. Ova tehnologija je posebno učinkovita za proizvodnju malih serija, gdje konvencionalne metode postaju neisplative zbog visokih fiksnih troškova [26].

Iako aditivna proizvodnja ima svoje prednosti, poput fleksibilnosti dizajna i mogućnosti stvaranja složenih geometrija, ostaje manje konkurentna u masovnoj proizvodnji. Tradicionalne metode postaju ekonomski isplativije s povećanjem obujma proizvodnje. No, aditivne



tehnologije zadržavaju svoju važnost na tržištima koja zahtijevaju prilagodbu i brzu isporuku; primjerice specijalizirani proizvodi i prototipi [26].

Jedna od najvećih prednosti aditivne proizvodnje je sloboda u dizajnu. Bez potrebe za posebnim alatima, moguće je proizvoditi složene geometrije, koje bi tradicionalnim tehnikama bile neizvedive ili bi zahtijevale mnogo više proizvodnih koraka. Aditivna proizvodnja smanjuje broj proizvodnih operacija na samo nekoliko faza, čime se smanjuju ukupni troškovi proizvodnje, energije i vremena, osobito kod proizvodnje dijelova visoke složenosti [26], [14].

Aditivna tehnologija također omogućuje integriranje više dijelova u jedan jedinstveni dio, eliminirajući potrebu za dodatnim spojnim elementima. To rezultira dijelovima koji mogu obavljati više funkcija istovremeno, uz smanjene troškove rada i kraće vrijeme izrade. Smanjenje ukupnog broja dijelova doprinosi stvaranju lakših struktura, što je posebno korisno u industrijama poput zrakoplovstva i svemirske tehnologije [26].

S obzirom na prednosti aditivne proizvodnje, ipak postoji ograničenje kada je riječ o većim serijama. Troškovi proizvodnje ne opadaju značajno s povećanjem obujma, što znači da cijena po jedinici ostaje relativno stabilna, čak i pri većim količinama. Ipak, složeni dijelovi s integriranim funkcijama i prilagođene geometrije, koje bi bile neizvedive ili preskupe konvencionalnim metodama, čine aditivnu proizvodnju isplativom opcijom za specijalizirane primjene [26].

Troškovi u aditivnoj proizvodnji raspodjeljuju se drugačije nego u tradicionalnim metodama, pri čemu oprema može činiti od 45 % do 75 % ukupnih troškova, ovisno o specifičnoj primjeni. Iako dijelovi proizvedeni ovom tehnologijom često zahtijevaju naknadnu obradu, poput toplinskih i strojnih obrada, takvi postupci mogu rezultirati superiornim karakteristikama koje nije moguće postići konvencionalnim metodama [26].

Industrija aditivne proizvodnje bilježi značajan rast, zahvaljujući sve većem broju tvrtki koje primjenjuju ovu tehnologiju za komercijalnu proizvodnju dijelova za krajnju upotrebu. Pritom zrakoplovna i medicinska industrija prednjače u korištenju aditivnih tehnologija, jer njihovi zahtjevi za malim serijama, složenim dijelovima i visokim stupnjem prilagodbe najbolje odgovaraju ovoj tehnologiji [26].

Ovaj rast potiče i razvoj novih generacija proizvodnih strojeva, koji postaju sve dostupniji i troškovno učinkovitiji, čime se otvaraju nove mogućnosti za širu komercijalnu primjenu aditivne proizvodnje [26], [14].

#### **4.6.2. Ekološke prednosti**

Ekološke procjene aditivnih tehnologija omogućuju proizvođačima da analiziraju i usporede utjecaje na okoliš različitih proizvodnih metoda. Na temelju tih procjena, mogu donijeti informirane odluke o odabiru tehnologije s najvećim potencijalom za ekološke koristi ili prepoznati područja za optimizaciju kako bi dodatno povećali vrijednost uvođenja aditivnih tehnologija [27].

Aditivne tehnologije nude brojne ekološke prednosti, poput smanjenja otpada materijala, energetske učinkovitosti i lokalizirane proizvodnje koja smanjuje potrebu za dugim opskrbnim lancima. Ove značajke čine aditivne metode atraktivnima u kontekstu globalnih napora za smanjenje emisija stakleničkih plinova i poticanje održivih industrijskih praksi [27].

Za razliku od konvencionalnih metoda, poput injekcijskog prešanja, koje su energetske učinkovitije u masovnoj proizvodnji, aditivne tehnologije pokazuju prednost u izradi manjih serija. Naime, one ne zahtijevaju alate poput kalupa, čime se smanjuju troškovi i potrošnja energije, koja ostaje stabilna čak i za veće količine proizvoda [27].

Nadalje, redizajn proizvoda omogućuje jednostavnije oblike i smanjenje broja potrebnih komponenti, čime se poboljšava ekološka održivost smanjenjem resursa i otpada [10]. Uz to, lokalizirana proizvodnja omogućuje smanjenje potrebe za transportom i skladištenjem, čime se dodatno doprinosi ekološki održivijim opskrbnim lancima. Primjerice, u građevinskom sektoru, *in-site* proizvodnja s pomoću aditivnih tehnologija pokazuje potencijal za smanjenje ekoloških utjecaja [27].

Aditivne tehnologije omogućuju precizno korištenje materijala, smanjujući količinu otpada. Dok tradicionalne metode, poput strojne obrade, imaju sklonost većim količinama otpada, a aditivna tehnologija koristi samo potrebnu količinu materijala. Neiskorišteni materijal poput praha, može predstavljati izazov, no tehnologije aditivne proizvodnje općenito su učinkovitije u korištenju resursa [10]. Iako neki procesi aditivne tehnologije poput lasera ili hlađenja, troše više energije, ova potrošnja je često niža u usporedbi s konvencionalnim metodama [27].

Aditivna proizvodnja također pokazuje potencijal za smanjenje emisija stakleničkih plinova kroz cijeli životni ciklus proizvoda. Posebno u zrakoplovnoj industriji, poboljšani omjer čvrstoće i mase dijelova može značajno doprinijeti smanjenju emisija CO<sub>2</sub> [10]. Uz to, procesi aditivne tehnologije troše manje resursa poput vode, što dodatno doprinosi smanjenju iscrpljivanja prirodnih resursa u usporedbi s konvencionalnim metodama [27].

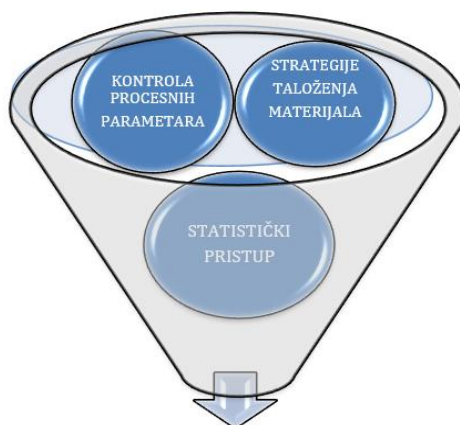
Ipak, iako aditivne tehnologije smanjuju otpad i potiče učinkovitost resursa, materijali korišteni u nekim procesima, poput metalnog praha u laserskom sinteriranju; mogu biti energetski intenzivni za proizvodnju i potencijalno toksični [27]. Zbog toga, važno je nastaviti optimizirati proizvodne procese kako bi se smanjili energetski zahtjevi i negativni ekološki utjecaji materijala.

Jedna od ključnih prednosti aditivne proizvodnje s ekološke strane je i mogućnost smanjenja otpada i povećanje stope recikliranja. U primjeni s metalima, otpadni materijal može se smanjiti i do 40 % u usporedbi s konvencionalnim metodama, a čak 95-98 % otpadnog materijala iz AM procesa može se ponovno iskoristiti [27]. Ovo značajno smanjenje otpada čini aditivnu proizvodnju važnim korakom prema održivijim proizvodnim praksama. S druge strane, tradicionalne metode poput CNC obrade, generiraju više otpada materijala, a upotreba ulja za rezanje stvara dodatni ekološki teret. U CNC procesima procjene proizvodnje otpada variraju između 10 % i 60 %, no većina tog otpada može se reciklirati. Ipak, potrošnja resursa i energija u CNC procesima veća je nego kod aditivnih metoda, osobito u metalnom sektoru [27].

#### **4.7. Optimizacija procesa**

Pitanje optimizacije procesa je kategorički imperativ u zavarivanju jer parametri poput brzine zavarivanja  $v$  [mm/min], struje zavarivanja  $I$  [A], napona zavarivanja  $U$  [V], protoka zaštitnog plina  $Q$  [l/min] i dodatnog materijal uvelike utječu na konačna svojstva zavarenog spoja [28]. Buy to fly omjer ili BTF je svojevrsna „valuta“ WAAM tehnologije jer projicira omjer mase uloženog materijala te mase finalnog proizvoda. Razlog zašto se može nazvati valutom je radi svoje efikasnosti. Naime, cilj svakog proizvođača je konstruirati tehnički sustav koji može proizvoditi s minimalnim gubitcima. Cilj je približiti se vrijednosti 1 jer je tada masa uloženog materijala jednaka masi gotovog proizvoda. Stoga, tržište „drže i diktiraju“ oni čiji BTF omjer konvergira ka broju 1. U narednim poglavljima slijede neke od tehnika i tehnologija čija je primarna misija prethodno spomenuto, kreirati visoko učinkovit WAAM sustav.

Slika 18 prikazuje neke od tehnika optimizacije WAAM procesa [28].



Slika 18: Tehnike optimizacije WAAM postupka [28]

### 1. Kontrola procesnih parametara i statistički pristup

Procesni parametri su baza svega. Razumijevanje utjecaja svakog parametra je bitno za podizanje efikasnosti procesa. Proces počinje s bazičnim parametrima poput struje zavarivanja I, brzine zavarivanja v, protoka zaštitnog plina Q, napona zavarivanja U, dodatnog materijala. [28] Statistički pristup je veoma koristan u optimiranju procesnih parametara jer je s pomoću različitih metoda moguće pronaći optimalne parametre za uvjete eksploatacije [28]. Neke od često korištenih statističkih metoda uključuju [28], [29], [30].

- a) Taguchi metodu: Cilj metode je identificirati najvažnije čimbenike koji „diktiraju“ rezultat te shodno tome ih se optimira u svrhu poboljšanja procesa.
- b) Analiza varijance (ANOVA): Primarni fokus ove metode je analizirati razlike među grupama srednjih vrijednosti i determinirati razlog nastajanja razlika (slučajan ili s razlogom)

### 2. Strategije taloženja materijala

Primaran cilj strategije taloženja materijala je što niži BTF omjer [28]. Općenito, strategija se provodi kroz sljedeće faze prikazane na slici 19 [28]:



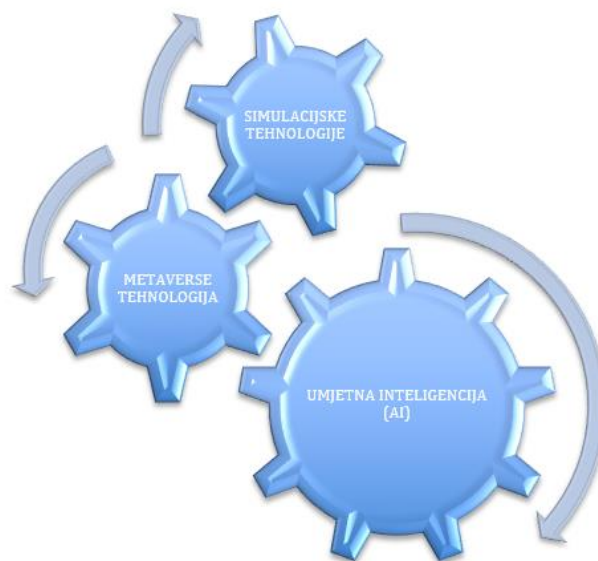
Slika 19: Faze strategije taloženja materijala [28]

### 3. Aplikacija novih tehnologija u WAAM

Sektor Informacijskih Tehnologija (IT) uvelike utječe na WAAM zbog nekoličine razloga [31]:

- vizualizacija modela
- simulacija procesa
- obrada velike količine podataka

Slika 20 prikazuje tehnologije koje se uvode u WAAM u vidu optimiranja procesa [31].



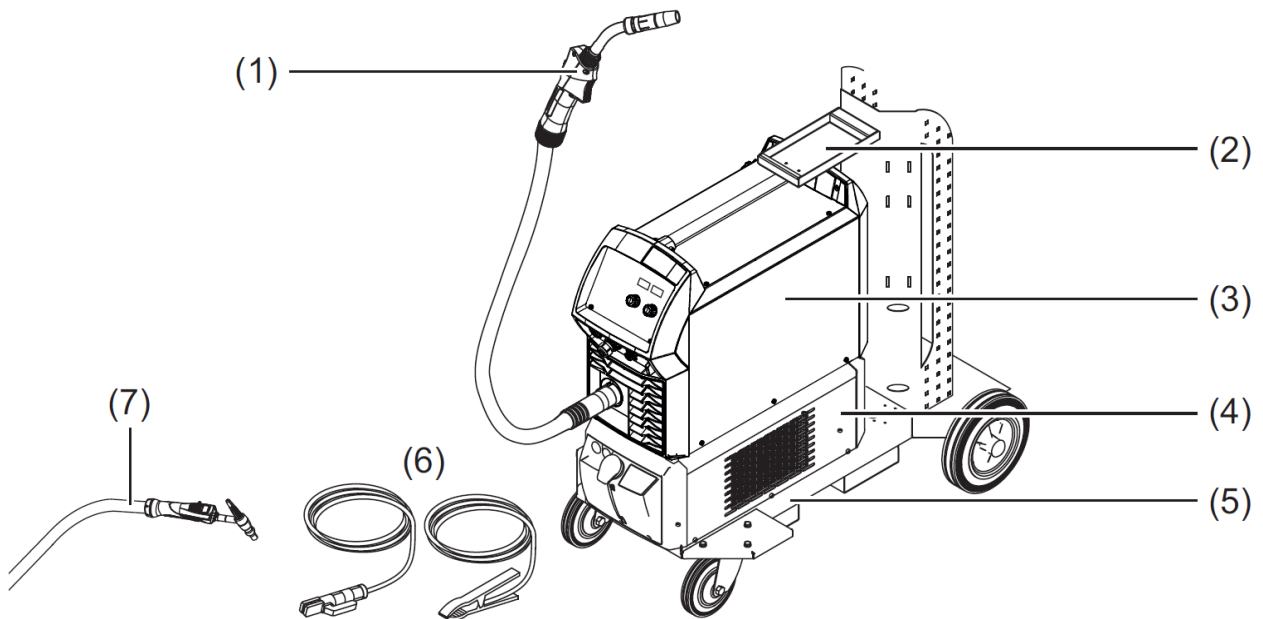
*Slika 20: Implementacija novih tehnologija u WAAM*

Spomenute tehnologije svakim danom bivaju sve više i više razvijene što znači također isto i za zavarivački proces. Uvelike je lakše projektirati tehnologiju zavarivanja uz prisutnost softvera i široke baze podataka jer se golema količina podataka može istovremeno interpretirati i konvergirati k rješenju. Spomenuto nije bilo mogućnost u prošlosti jer umjetna inteligencija, simulacijske tehnologije i ostala pomagala nisu postojala ili su bila relativno slabo razvijena.

## 5. Eksperimentalan dio

U eksperimentalnom dijelu diplomskog rada, za izradu komponenti je korišten zavarivački uređaj Fronius TransSteel 3000 Pulse/FSC kao izvor energije za navarivanje. Fronius TransSteel 3000 Pulse/FSC je multifunkcionalni zavarivački uređaj dizajniran za MIG/MAG zavarivanje impulsnim električnim lukom, MIG/MAG standardno zavarivanje, TIG zavarivanje i ručno elektrolučno zavarivanje. Uređaj, prikazan na slici 21, sastoji se od sljedećih komponenti:

- (1) gorionik za zavarivanje za MIG/MAG
- (2) stabilizator držača za plinske boce
- (3) izvor struje
- (4) rashladni uređaj
- (5) kolica s držačem za plinske boce
- (6) kabel elektrode
- (7) tijelo gorionika za TIG.



Slika 21: Uređaj za zavarivanje Fronius TransSteel 3000 Pulse/FSC [32]

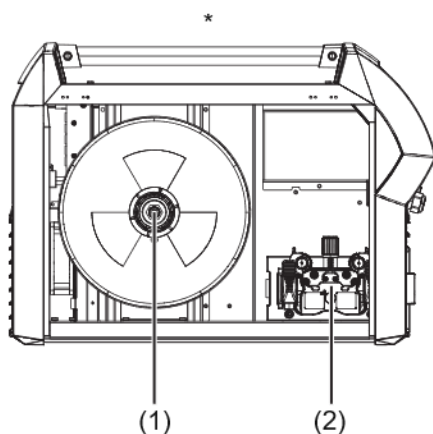
Na slici 22 prikazan je uređaj s pogledom sa strane, gdje su prikazani njegovi sljedeći dijelovi:

(1) prihvatnik za kolut za žicu s kočnicom:

za prihvat standardiziranih kolutova za žicu s promjerom do maksimalno 300 mm i masom do maksimalno 19 kg.

(2) pogon s 4 kotačića

omogućuje precizno i pouzdano vođenje žice. Kotačići su ključni za osiguravanje stalne napetosti i ravnomjernog protoka žice kroz uređaj [32].



*Slika 22: Bočni pogled na uređaj za zavarivanje [32]*

Na slici 23 su prikazani korišteni kotačići za pogon žice.



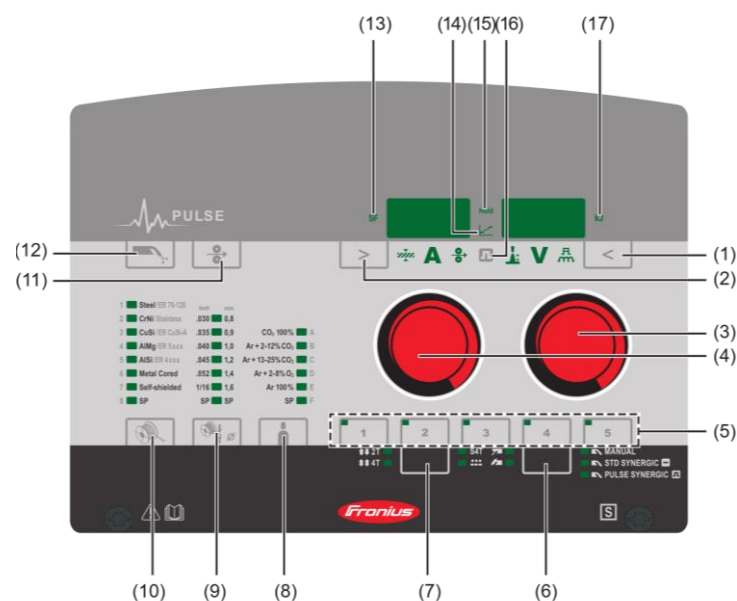
*Slika 23: Kotačići za pogon žice*

Na slici 24 je prikazan uređaj za zavarivanje s pogledom s bočne strane. Unutar uređaja vidljivi je kotač s dodatnim materijalom. Žica je provučena kroz kotačiće koji služe za pogon žice, prikazane na slici 23, omogućujući njezino ravnomjerno izvlačenje prilikom navarivanja.



Slika 24: Bočni pogled na uređaj za zavarivanje

Za postizanje optimalnih rezultata prilikom navarivanja, ključno je pravilno postavljanje uređaja i odabir odgovarajućih parametara putem korisničkog sučelja. Korisničko sučelje Fronius TransSteel 3000 Pulse/FSC uređaja za zavarivanje je prikazano na slici 25 [32].

























Slika 25: Korisničko sučelje Fronius TransSteel 3000 Puls/FSC uređaja [32]



Svaka tipka na uređaju ima specifičnu funkciju, čiji se detaljan opis nalazi u tablici 1.

Tablica 1: Definiranje funkcija na uređaju [32]

Broj	Funkcija	Opis	Simbol
(1)	<b>Tipka Odabir parametara zavarivanja zdesna</b>	Ispravak duljine električnog luka  Napon zavarivanja U (V) Spravak impulsa/dinamike	  
(2)	<b>Tipka Odabir parametara zavarivanja slijeva</b>	Debljina lima (mm)  Struja zavarivanja I (A) Brzina žice (m/min)	  
(3)	<b>Okretni gumb prema desno</b>	Izmjena parametara zavarivanja Ispravak duljine električnog luka, Napon zavarivanja U (V) i Dinamika	
(4)	<b>Okretni gumb prema lijevo</b>	Izmjena parametra zavarivanja: Debljina lima (mm), Struja zavarivanja I (A) i Brzina žice (m/min)	
(5)	<b>Tipke za memoriranje EasyJoba</b>	Memoriranje do 5 radnih točaka	
(6)	<b>Tipka Postupak</b>	MIG/MAG standardno ručno zavarivanje MIG/MAG standardno sinergijsko zavarivanje MIG/MAG impulsno sinergijsko zavarivanje Zavarivanje postupkom TIG Ručno elektrolučno zavarivanje	    
(7)	<b>Tipka Način rada</b>	Dvotaktni pogon Četverotaktni pogon Posebni četverotaktni pogon Točkasto zavarivanje / zavarivanje u intervalima	   
(8)	<b>Tipka Zaštitni plin</b>	Odabir upotrijebljenog zaštitnog plina.	
(9)	<b>Tipka Promjer žice</b>	Odabir upotrijebljenog promjera žice.	
(10)	<b>Tipka Vrsta materijala</b>	Odabir korištenog dodatnog materijala.	
(11)	<b>Tipka Uvlačenje žice</b>	Uvlačenje žice bez plina u paket crijeva za gorionik za zavarivanje	
(12)	<b>Tipka za provjeru plina</b>	Namještanje potrebne količine plina na regulatoru tlaka plina.	
(13)	<b>SF – prikaz Točkasto zavarivanje / interval / SynchroPuls</b>		<b>SF</b>
(14)	<b>Prikaz Prijelazni električni luk</b>	Između kratkog električnog luka i štrcajućeg električnog luka nastaje prijelazni električni luk s prskotinama.	
(15)	<b>Prikaz HOLD</b>	Nakon svakog kraja zavarivanja spremaju se trenutačne vrijednosti struje zavarivanja i napona zavarivanja	<b>Hold</b>
(16)	<b>Prikaz Puls</b>	Svijetli ako je odabran postupak zavarivanja MIG/MAG impulsno sinergijsko zavarivanje	
(17)	<b>Real Energy Input (stvarni unos energije)</b>	Za prikaz energije koja je uložena u zavarivanje.	<b>kJ</b>

## 5.1. Postavljanje parametara

Prije početka navarivanja, potrebno je precizno postaviti sve potrebne parametre na uređaju kako bi se postigli optimalni rezultati. Najprije se pritiskom na gumb "Materijal" odabire kvaliteta dodatnog materijala koji će se koristiti tijekom navarivanja. Nakon toga, pritiskom na gumb "Promjer žice", odabire se odgovarajući promjer žice za navarivanje; odnosno elektrode. Postavljanje odgovarajućeg zaštitnog plina provodi se pritiskom na gumb "Zaštitni plin". Sljedeći korak uključuje odabir procesa zavarivanja pritiskom na gumb "Proces". U ovom istraživanju korišteno je MIG/MAG standardno sinergijsko zavarivanje, odabrano između dostupnih opcija koje uključuju standardno sinergijsko zavarivanje i impulsno sinergijsko zavarivanje. Željeni način rada postavljen je pritiskom na gumb "Način", gdje su bile ponuđene opcije dvotaktni, četverotaktni i posebni četverotaktni način rada. Odabran je četverotaktni način rada. Ključni parametri navarivanja, uključujući duljinu luka, struju navarivanja, brzinu žice i napon zavarivanja. Spomenuti parametri su postavljeni koristeći gumbe "Odabir parametara". Tijekom procesa navarivanja korišten je MIG postupak s prijenosom materijala kratkim spojem.

## 5.2. Postavljanje podloge

Nakon što su svi parametri pažljivo postavljeni, sljedeći korak uključuje pripremu podloge za navarivanje. Podloga za navarivanje je ploča od nehrđajućeg čelika. Prije navarivanja, ploča se temeljito čisti kako bi se uklonile sve nečistoće. To je ključno, jer čistoća podloge značajno pridonosi kvaliteti električnog luka i konačnoj kvaliteti navara. Nakon čišćenja, ploča se pričvršćuje stegama na radnu površinu, osiguravajući stabilnost tijekom navarivanja i smanjenje mogućnosti deformacija. Dodatno, ispod nehrđajućeg čelika je postavljena bakrena pločica, koja služi kao izvrsni vodič topline, čime se poboljšava odvođenje topline iz zone navarivanja; što dodatno doprinosi kvaliteti izvedenih navara.

## 5.3. Dodatni materijal

Za dodatni materijal je korištena žica od nehrđajućeg čelika promjera 1 mm. Ova žica je prema AWS/ASME normi označena kao ER308LSI, dok je prema HR EN ISO 14343-A normi poznata kao G 19 9 L Si. Žica pripada grupi austenitnih nehrđajućih čelika i primarno se koristi za zavarivanje istovrsnih, te sličnih 18/8 CrNi čelika. Njen nizak sadržaj ugljika ključan je za otpornost na interkristalnu koroziju, dok povišeni sadržaj silicija značajno poboljšava zavarivačka svojstva. Prema tehničkim specifikacijama proizvođača, vlačna čvrstoća  $R_m$  ove žice iznosi više od 510 MPa, izduženje  $A$  je veće od 30 %, a udarna žilavost  $KV$  pri temperaturi

od +20 °C iznosi 80 J. Slika 26 prikazuje spomenuti dodatni materijal, a detaljni kemijski sastav žice prikazan je u tablici 2 [33].



Slika 26: Dodatni materijal korišten u eksperimentalnom dijelu

Tablica 2: Kemijski sastav dodatnog materijala [33]

%	C	Mn	Si	Cr	Ni
	≤0,02	1,95	0,8	20,0	10,0

#### 5.4. Zaštitni plin

Za proces navarivanja je korišten inertni zaštitni plin, mješavina 50 % argona i 50 % helija, s konstantnim protokom od 16 l/min. Primarna funkcija zaštitnog plina je zaštita rastaljenog i zagrijanog materijala od utjecaja okolne atmosfere, čime se sprječava neželjena oksidacija i kontaminacija zavarene površine. Osim što štiti zavar od emisije produkata izgaranja, zaštitni plin utječe na prijenos metala, gdje način prijenosa metala uvelike ovisi o vrsti korištenog plina. Također, zaštitni plin ima utjecaj na stabilnost luka, što je ključno za dosljednu kvalitetu zavara. Izgled površine zavara, količina rasprskavanja i troske, također ovise o vrsti plinske zaštite, dok

zaštitni plin utječe na izgaranje legiranih elemenata i reakcije s kisikom, dušikom i ugljikom, što direktno utječe na mehanička svojstva zavara. Zaštitni plin utječe i na geometriju zavara, gdje njegov utjecaj određuje oblik završnog prolaza i penetraciju. Stoga je odabir odgovarajućeg zaštitnog plina od presudne važnosti za postizanje optimalnih mehaničkih svojstava, izgleda i kvalitete zavara [2].

## 5.5. Uređaj za vođenje

Nakon što su parametri navarivanja pažljivo konfigurirani i osiguran dotok zaštitnog plina, potrebno je precizno pozicionirati gorionik za početak procesa navarivanja. U ovom radu se koristi uređaj Promotech Rail Bull za pravocrtno vođenje gorionika tijekom navarivanja. Uređaj je prikazan na slici 27 ispod koje su nabrojani njegovi dijelovi s oznakama.



Slika 27: Uređaj za vođenje gorionika tijekom zavarivanja [34]

Na slici 28 je prikazan uređaj za vođenje, na njemu su pozicionirani gorionik i postavljena podloga za navarivanje.





*Slika 28: Postavljena podloga za navarivanje, gorionik i uređaj za vođenje*

## **5.6. Navarivanje**

Tijekom procesa navarivanja izrađene su dvije strukture, svaka s individualno podešenim parametrima navarivanja, koji uključuju napon, struju i brzinu navarivanja. Prva struktura, nazvana Zid 1, izrađen je s 11 slojeva navarivanja. Druga struktura, nazvana Zid 2, izrađena je s 12 slojeva.

Svi parametri navarivanja, za svaki pojedini zid, kao i za svaki sloj unutar oba zida, prikazani su u tablici 3.

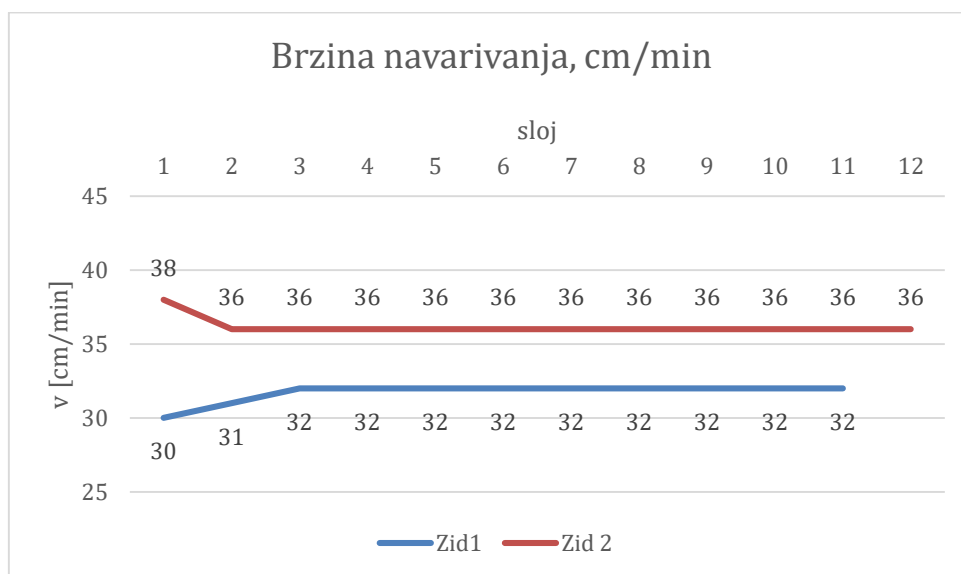
Tablica 3: Parametri navarivanja u eksperimentalnom dijelu

Sloj:	Zid 1			Zid 2		
	Brzina navarivanja, cm/min	Prosječan iznos jakosti struje, A	Prosječan iznos napona, V	Brzina navarivanja, cm/min	Prosječan iznos jakosti struje, A	Prosječan iznos napona, V
1	30	120	19,1	38	148	18,6
2	31	116	19,6	36	140	18,3
3	32	118	18,8	36	122	19,5
4	32	117	19,1	36	122	19,5
5	32	115	19,2	36	120	19,6
6	32	113	19,1	36	118	19,7
7	32	114	19,1	36	116	20,1
8	32	113	19,1	36	125	19,2
9	32	110	18,7	36	134	18,3
10	32	108	19,5	36	135	18,3
11	32	108	19,4	36	143	17,5
12				36	110	20,2

Usporedbom parametara navarivanja Zida 1 i Zida 2 može se primijetiti nekoliko ključnih razlika. Prvenstveno, vidljivo je da Zid 2 ima veću brzinu navarivanja u usporedbi sa Zidom 1. Konkretno, Zid 2 započinje s brzinom od 38 cm/min u prvom sloju, koja se stabilizira na 36 cm/min od drugog sloja nadalje. S druge strane, brzina navarivanja kod Zida 1 započinje s vrijednošću od 30 cm/min, te se postupno povećava do 32 cm/min, gdje se stabilizira od trećeg sloja pa nadalje.

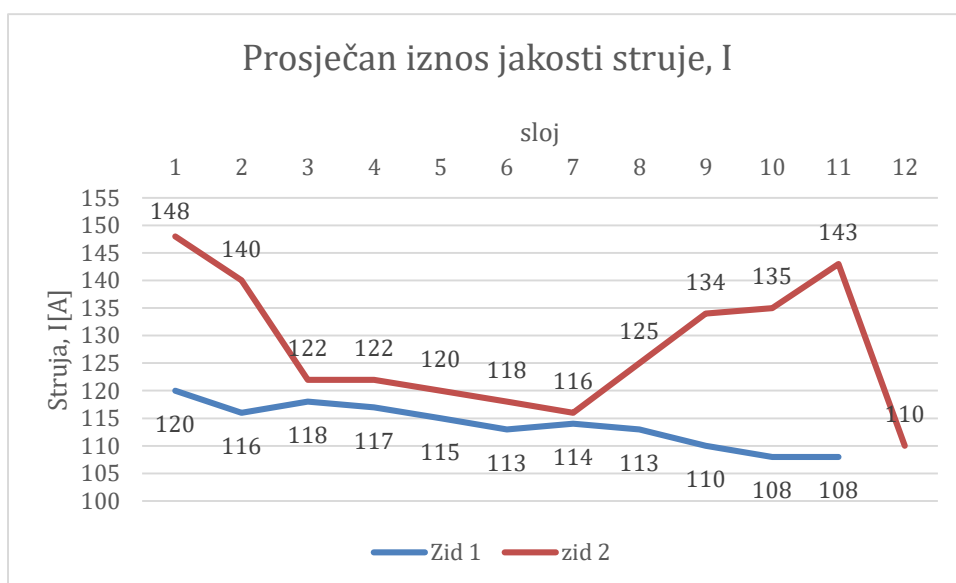
Brzina navarivanja Zida 1 i Zida 2 prikazana je na grafičkom prikazu 1

Grafički prikaz 1: Usporedba brzina navarivanja u eksperimentalnom dijelu



Grafički prikaz 2 prikazuje prosječne iznose jakosti truje tijekom navarivanja za Zid 1 i Zid 2. Iz prikazanih podataka jasno je da Zid 2 započinje s visokom jakosti struje od 148 A u prvom sloju, nakon čega slijedi izrazit pad na 122 A u trećem sloju. Od trećeg do sedmog sloja, jakost struje kod Zida 2 ostaje relativno stabilna, ali niža, nakon čega ponovno raste, dosežući vrhunac od 143 A u jedanaestom sloju. Zatim, naglo se smanjuje na 110 A u dvanaestom sloju. S druge strane, Zid 1 pokazuje relativno stabilnu jakost struje koja se kreće između 120 A i 108 A, s manjim varijacijama kroz sve slojeve navarivanja što ukazuje na stabilnije uvjete navarivanja.

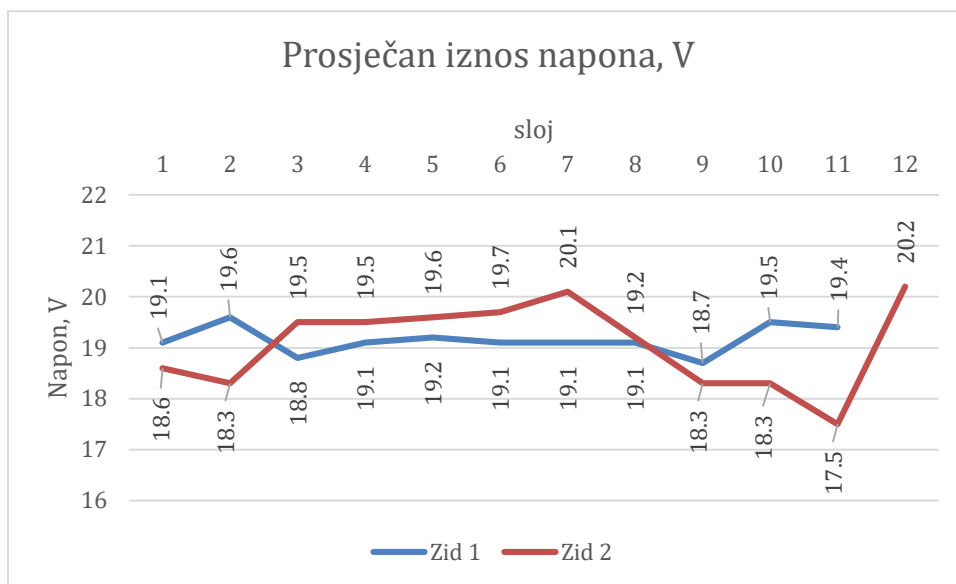
Grafički prikaz 2: Usporedba prosječnih vrijednosti jakosti struje u eksperimentalnom dijelu



Grafički prikaz 3 prikazuje prosječne iznose napona tijekom navarivanja za Zid 1 i Zid 2. Zid 1 pokazuje relativno stabilan profil napona s manjim varijacijama tijekom cijelog procesa. Početni napon u prvom sloju iznosi 19,1 V, nakon čega se blago povećava na 19,6 V u drugom sloju. U narednim slojevima, napon se održava unutar uskog raspona između 18,9 V i 19,2 V. Na kraju, u jedanaestom i dvanaestom sloju, napon raste na 19,5 V odnosno 19,4 V.

S druge strane, napon kod Zida 2 pokazuje značajnije varijacije tijekom procesa. Početni napon u prvom sloju iznosi 18,6 V, nakon čega dolazi do blagog pada na 18,3 V u drugom sloju. Zatim, slijedi postupan porast napona koji doseže vrhunac od 20,1 V u sedmom sloju. Nakon sedmog sloja, napon počinje opadati, dosegnuvši najnižu vrijednost od 17,5 V u desetom sloju. Međutim, nakon ovog pada, napon ponovno naglo raste na 20,2 V u dvanaestom sloju.

*Grafički prikaz 3: Prosječan iznos napona u eksperimentalnom dijelu*



Zid 1 pokazuje stabilnije uvjete navarivanja s manje varijacija u jakosti struje i naponu, dok Zid 2 pokazuje dinamičnije promjene. Zid 2 ima veću brzinu navarivanja u usporedbi sa Zidom 1. Zid 2 pokazuje veće varijacije, ali i veće početne i maksimalne vrijednosti jakosti struje, dok Zid 1 ima stabilniju i nižu jakost struje. Zid 1 ima stabilniji i uglavnom niži napon, dok Zid 2 pokazuje veće fluktuacije i više maksimalne vrijednosti napona. Tablica 4 prikazuje paralelnu usporedbu parametara eksperimenta dviju struktura.

*Tablica 4: Usporedba prosječnih vrijednosti parametara*

	Prosječna vrijednost brzine navarivanja [cm/mm]	Prosječna vrijednost jakosti struje [A]	Prosječna vrijednost napona [V]
<b>Zid 1</b>	31,73	113,82	19,15
<b>Zid 2</b>	36,17	127,75	19,07



Zid 2 ima veću prosječnu brzinu navarivanja u usporedbi sa Zidom 1. Zid 2 ima veću prosječnu jakost struje u usporedbi sa Zidom 1. Zid 1 ima viši prosječan napon u usporedbi sa Zidom 2. Zid 2 koristi intenzivnije parametre navarivanja s većom brzinom navarivanja i većom jakosti struje u odnosu na Zid 1, dok Zid 1 ima malo viši prosječan napon.

Nakon završetka svakog sloja navarivanja, pištolj za zavarivanje se podizao za 3 mm u vertikalnom smjeru. Ovaj proces se ponavljao kontinuirano, polažući slojeve jedan na drugi dok se nije dosegla željena visina zida. Prije nanošenja novog sloja na prethodni, posebna je pažnja posvećena kontroli temperature prethodnog navara, koji se hladio s pomoću okolišnog zraka. Temperatura se redovito mjerila korištenjem kontaktnog termometra. Navarivanje novog sloja je započinjalo tek kada je temperatura prethodnog sloja pala ispod 100 °C.

Za mjerenje temperature navara tijekom procesa korišten je termometar model TKTL 20, opremljen kontaktnom sondom koja omogućuje mjerenje u rasponu od -64 do +1400 °C. Prikaz rezultata na termometru varira, ovisno o temperaturnom rasponu; za temperature između -9,9 i 199,9 °C razlučivost je 0,1 °C, dok je za ostale vrijednosti razlučivost 1 °C. Slika 29 prikazuje spomenuti termometar [35].



*Slika 29: Termometar [35]*

Zahvaljujući svojim tehničkim karakteristikama, TKTL 20 je iznimno pogodan za upotrebu u procesima navarivanja. Omogućuje precizno mjerenje temperature na sigurnoj udaljenosti. Osim toga, osigurava pouzdanost i otpornost u zahtjevnim uvjetima.

Mjerenje temperature jednog od navara prikazan je na slici 30. Kontaktna sonda se prislanja na navar, nakon čega se na ekranu očitava temperatura.



*Slika 30: Mjerenje temperature navarenog sloja*

Osim mjerenja temperature, prije navarivanja novog sloja, prethodni sloj četkan je metalnom četkom kako bi se uklonili metalni oksidi.

Proces nastanka zidova navarivanjem sloja po sloj detaljno je prikazan na slici 31 za Zid 1 i na slici 32 za zid 2.



*Slika 31: Proces navarivanja Zida 1 sloj po sloj*





*Slika 32: Proces navarivanja Zida 2 sloj po sloj*

## 5.7. Priprema uzoraka za ispitivanje

Nakon izrade zidova, potrebno je provesti temeljitu pripremu uzoraka, kako bi oni bili prikladni za daljnja ispitivanja i analize. Proces pripreme ispitnih uzoraka započinje čišćenjem izradaka i njihovim rezanjem s pomoću tračne pile, čime se dobivaju uzorci potrebnih dimenzija. Pravilno rezanje osigurava da uzorci imaju ravne i glatke površine, što je presudno za daljnje obrade i analize. Tijekom rezanja, potrebno je pažljivo kontrolirati brzinu i pritisak, kako bi se izbjeglo pregrijavanje materijala, što bi moglo negativno utjecati na njegovu mikrostrukturu.

Nakon rezanja, uzorci se podvrgavaju brušenju korištenjem brusnih papira različitih granulacija u sljedećem redoslijedu: P120, P180, P320, P600 i P1000. Ovaj postupak omogućava uklanjanje nepravilnosti i postupno smanjenje dubine ogrebotina, stvarajući sve finiju površinu uzoraka. Brušenje i poliranje uzoraka obavlja se ručnim uređajem PRESI MINITECH 250 SP1, prikazanim na slici 33 [36].

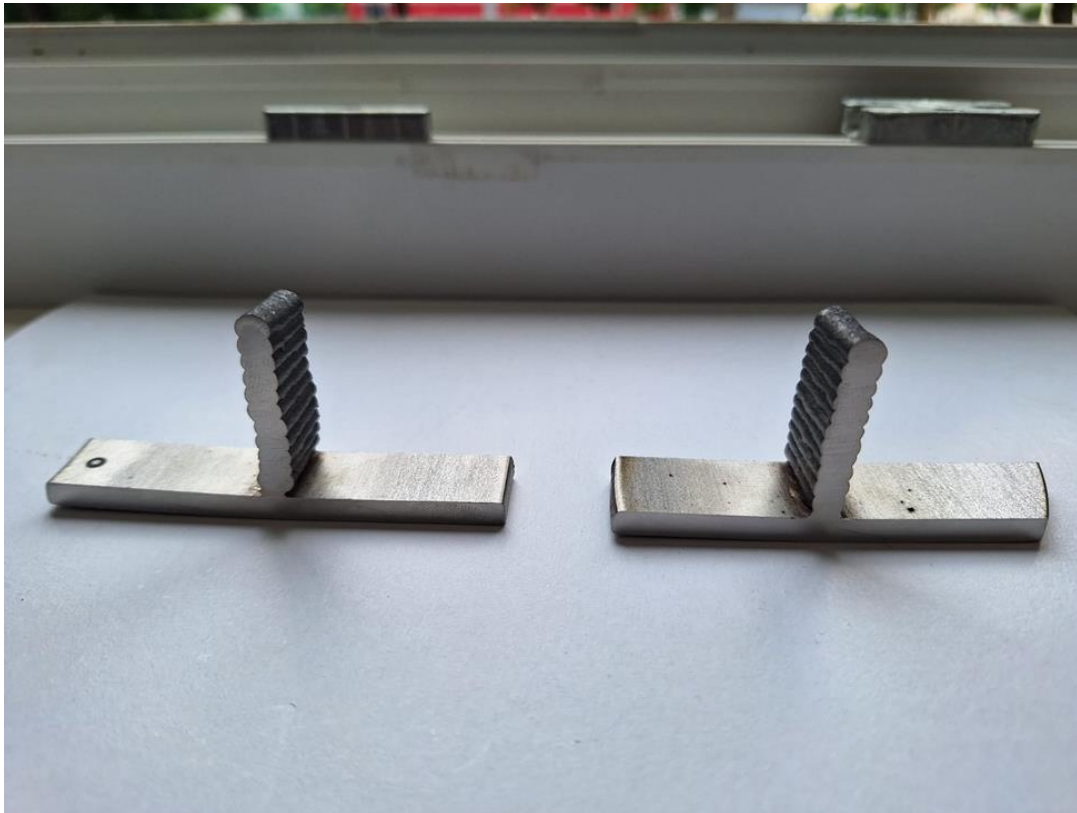


*Slika 33: Uređaj za brušenje i poliranje uzoraka [36]*

Ovaj uređaj omogućava preciznu kontrolu postupka, osiguravajući ravnomjerno brušenje i poliranje svih uzoraka. Između svake faze brušenja, uzorci se temeljito čiste sapunicom i alkoholom, kako bi se uklonili svi produkti brušenja i poliranja. Ova temeljita čišćenja između svake faze ključna su za sprječavanje kontaminacije uzoraka, što bi moglo utjecati na rezultate ispitivanja. [36]

Nakon čišćenja, uzorci se pažljivo suše kako bi se spriječila korozija i osigurala čistoća površine. Važno je osigurati da na površini uzoraka ne ostanu nikakvi ostaci tekućina ili čestica, koji bi

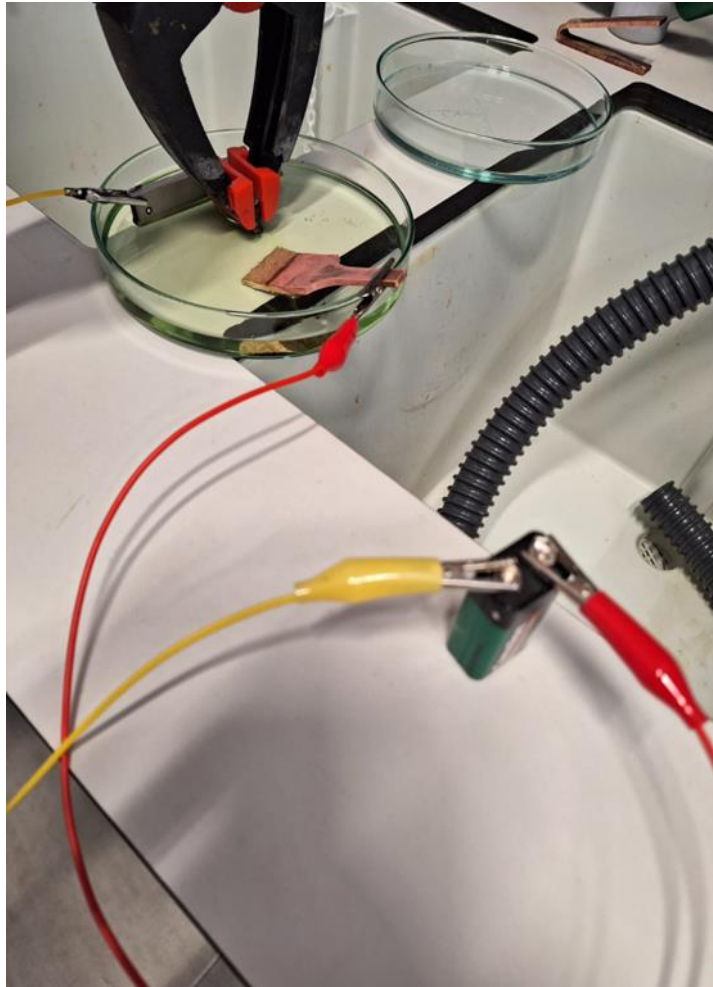
mogli negativno utjecati na rezultate daljnjih ispitivanja. Na slici 34 prikazani su uzorci nakon rezanja, brušenja i poliranja.



*Slika 34: Uzorci nakon rezanja pilom, brušenja i poliranja*

Posljednji korak u pripremi uzoraka je postupak elektrokemijskog nagrivanja. Ovaj postupak uključuje korištenje otopine 19 % HCl (klorovodične kiseline) tijekom jedne minute pri naponu od 9 V. U otopinu se uranja radna elektroda, odnosno uzorak zida, zajedno s bakrenom pločicom, koja služi kao elektroda za održavanje konstantnog potencijala. Kao izvor energije koristi se baterija.

Proces nagrivanja prikazan je na slici 35. Prilikom procesa nagrivanja obavezno je korištenje zaštitne opreme, uključujući zaštitne naočale, rukavice i pregaču, kako bi se spriječile moguće ozljede poput opekline.



*Slika 35: Proces nagrivanja*

Prije i nakon nagrivanja, uzorak je potrebno temeljito očistiti, kako bi se uklonile nečistoće i produkti nagrivanja. Za čišćenje se koriste sapunica i alkohol, čime se osigurava čistoća površine uzoraka, te sprječava kontaminacija koja bi mogla utjecati na rezultate ispitivanja.



## 6. Analiza i rezultati

U okviru ovog rada, glavni cilj je bio detaljno analizirati geometriju poprečnog presjeka zida, te izračunati njegovu efektivnu širinu. Za provedbu analize korišten je stereomikroskop Olympus SZX10, opremljen digitalnom kamerom visoke rezolucije, što je omogućilo iznimno detaljno snimanje fotografija poprečnog presjeka. Korišteni mikroskop je prikazan na slici 36.

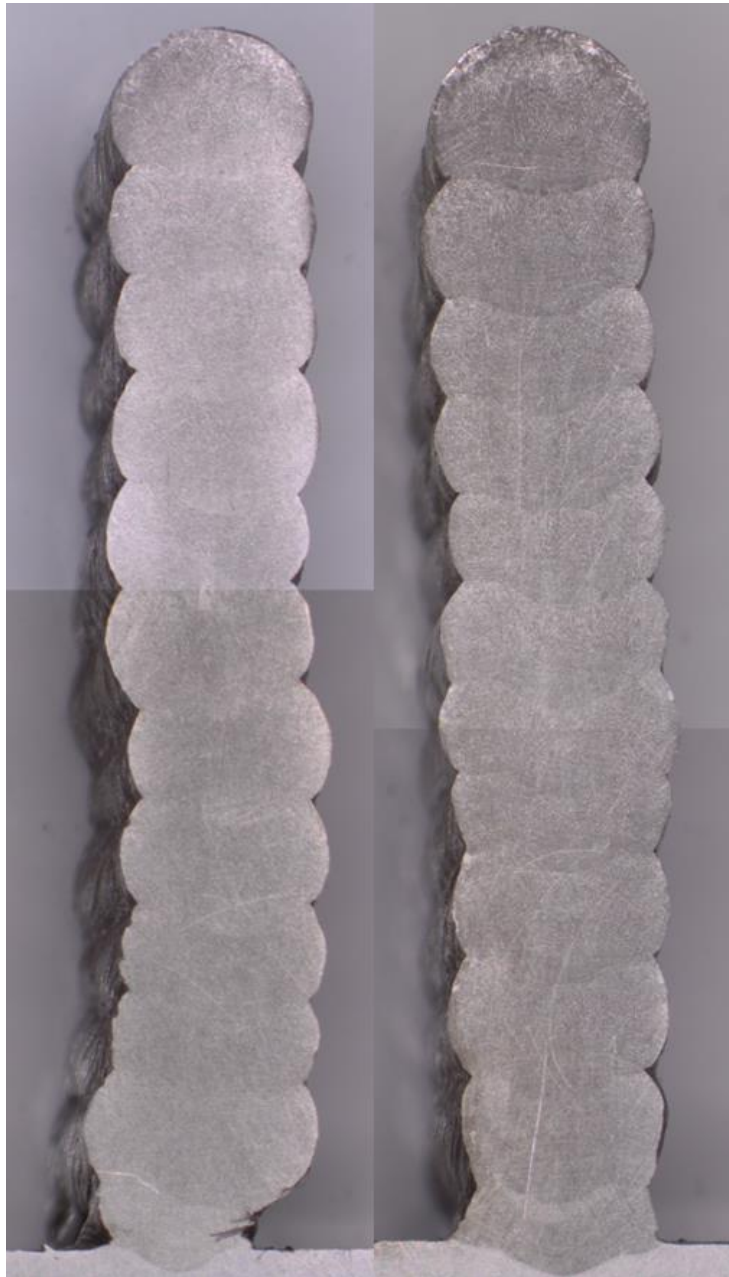


*Slika 36: Olympus SZX10 mikroskop [37]*

Integracija mikroskopa s računalnom jedinicom ostvarena je s pomoću softvera Olympus Stream, koji omogućava upravljanje snimkama i daljnju obradu podataka. Postupak započinje pokretanjem računala i mikroskopa, te otvaranjem navedenog softvera. Uzorak je zatim smješten na radnu površinu mikroskopa i precizno pozicioniran u središte vidnog polja, kako bi se osigurala jasna vidljivost cjelokupnog uzorka. Fokusiranje i podešavanje osvjetljenja provedeni su kako bi se optimizirala kvaliteta slike, što je preduvjet za precizno mjerenje.



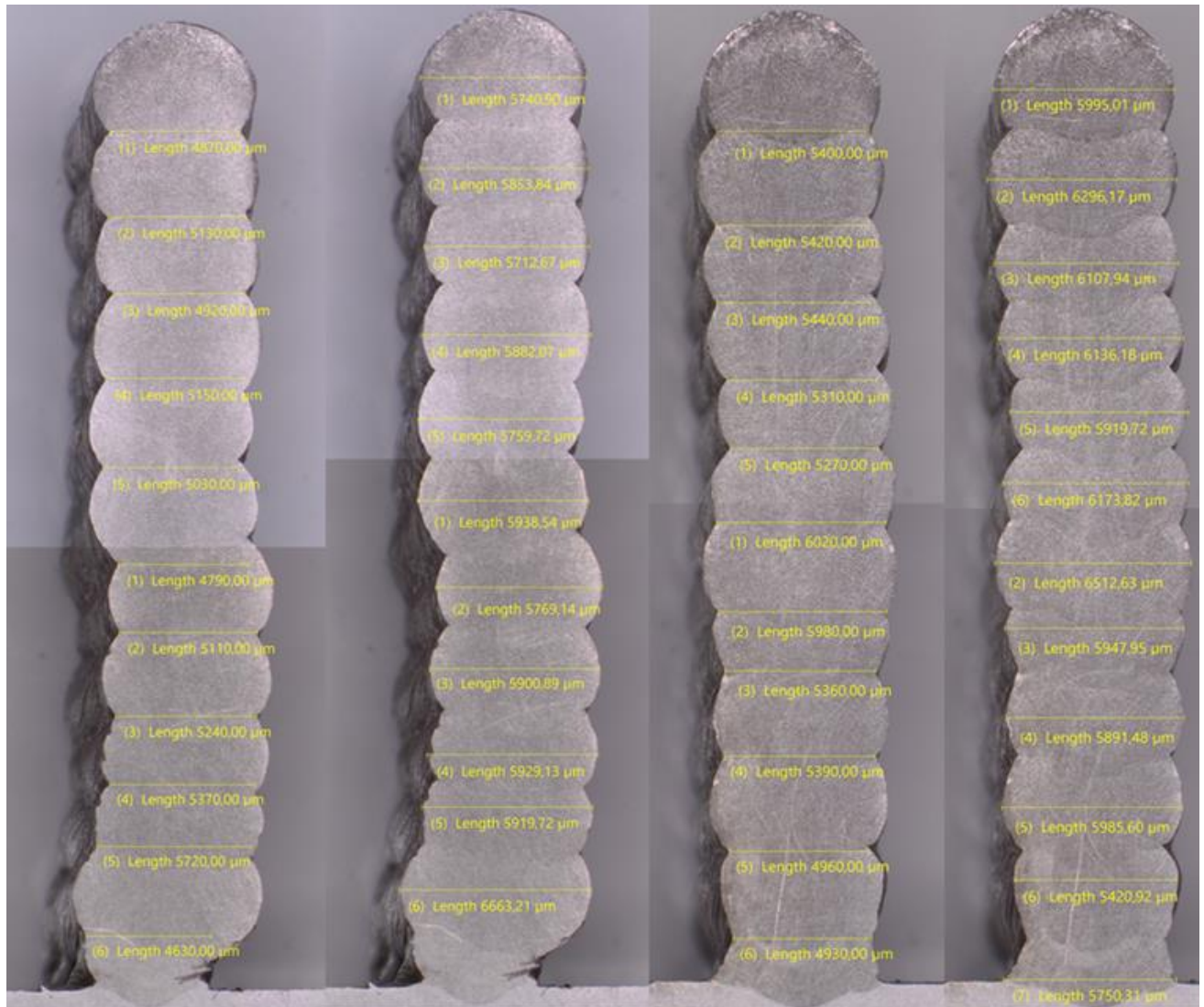
Nakon uspješnog podešavanja, izvršeno je snimanje slike uzorka, koje je zatim pohranjeno za daljnju analizu. Slike poprečnih presjeka prije mjerenja dužine prikazane su na slici 37.



*Slika 37: Poprečni presjeci*

Korištenjem specijaliziranog alata za mjerenje unutar softvera Olympus Stream, provedeno je mjerenje širine tako da su označene krajnja lijeva i krajnja desna točka ruba svakog od navara. Softver automatski prikuplja i obrađuje podatke, izračunavajući vrijednosti širine između te dvije točke u mikrometrima, koje su zatim dokumentirane i vizualno prikazane u softveru.

Prikaz poprečnog presjeka s dimenzionalnim vrijednostima prikazan je na slici 38, a rezultati mjerenja prikazani su u tablici 5.



Slika 38: Poprečni presjeci s dimenzionalnim vrijednostima brijegova i dolova

Za prvi zid, širina dolova varira od 4,63 mm na prvom navarenom sloju do 5,72 mm na drugom navarenom sloju. Širina brijegova oscilira od 5,71 mm na devetom navarenom sloju do 6,66 mm na prvom navarenom sloju, gdje je zid najširi.

Za drugi zid, širina dolova varira od 4,93 mm na prvom navarenom sloju do 6,02 mm na šestom navarenom sloju, dok širina brijegova varira od 5,42 mm na drugom navarenom sloju do 6,51 mm na šestom navarenom sloju, gdje je zid najširi.

Tablica 5 prikazuje rezultate mjerenja poprečnog presjeka.

Tablica 5: Rezultati mjerenja poprečnog presjeka

Sloj	Zid 1		Zid 2	
	Širina dola [mm]	Širina brijega [mm]	Širina dola [mm]	Širina brijega [mm]
12				5,99
11	4,87	5,74	5,40	6,30
0	5,13	5,85	5,42	6,11
9	4,92	5,71	5,44	6,14
8	5,15	5,88	5,31	5,92
7	5,03	5,76	5,27	6,17
6	4,79	5,94	6,02	6,51
5	5,11	5,77	5,98	5,95
4	5,24	5,90	5,36	5,89
3	5,37	5,93	5,39	5,99
2	5,72	5,92	4,96	5,42
1	4,63	6,66	4,93	5,75

Tablica 6 prikazuje usporedbu rezultata mjerenja dimenzija poprečnog presjeka.

Tablica 6: Usporedba rezultata mjerenja dimenzija poprečnog presjeka

	Zid 1			Zid 2		
	Minimalna [mm]	Maksimalna [mm]	Prosječna [mm]	Minimalna [mm]	Maksimalna [mm]	Prosječna [mm]
Širina dola	4,63	5,72	5,09	4,93	6,02	5,41
Širina brijega	5,71	6,66	5,92	5,42	6,51	6,01

Minimalna širina dola kod Zida 1 iznosi 4,63 mm, dok maksimalna vrijednost doseže 5,72 mm, što rezultira prosječnom širinom od 5,09 mm. Usporedbom sa Zidom 2, primjećuje se da je minimalna širina dola nešto veća i iznosi 4,93 mm, dok je maksimalna širina 6,02 mm, što daje prosječnu vrijednost od 5,41 mm. Ovi rezultati upućuju na to da Zid 2 ima nešto širi raspon i veće prosječne vrijednosti širine dola u usporedbi sa Zidom 1.

Kod brijegova, Zid 1 pokazuje minimalnu širinu od 5,71 mm, dok maksimalna širina doseže 6,66 mm, s prosječnom vrijednošću od 5,92 mm. Zid 2, s druge strane, ima nešto manje razlike između minimalne i maksimalne širine brijegova. Minimalna širina brijega Zida 2 iznosi 5,42 mm, dok maksimalna iznosi 6,51 mm, a prosječna širina iznosi 6,01 mm. Iako Zid 2 pokazuje manji raspon širina brijega, prosječna vrijednost širine ipak je nešto viša u odnosu na Zid 1.

Analiza standardne devijacije  $\sigma$  i varijance  $\sigma^2$  širine dola i brijega kod Zida 1 i Zida 2 prikazana je u tablici 7.

*Tablica 7: Usporedba standardne devijacije i varijance širine dola i brijega između zidova*

	Zid 1		Zid 2	
	$\sigma$	$\sigma^2$	$\sigma$	$\sigma^2$
Širina dola	0.2838	0.0805	0.3252	0.1058
Širina brijega	0.2491	0.062	0.2627	0.069

Analiza ukazuje na određene razlike u stabilnosti dimenzija između ovih dvaju zidova. Širina dola Zida 1 ima standardnu devijaciju od 0,2838 mm, dok je devijacija širine brijega nešto manja i iznosi 0,2491 mm. Širina dola Zida 2 pokazuje veću varijabilnost sa standardnom devijacijom od 0,3252 mm, dok širina brijega također pokazuje nešto veću varijabilnost u usporedbi sa Zidom 1, s devijacijom od 0,2627 mm.

Varijanca širine dola Zida 1 iznosi 0,0805 mm<sup>2</sup>, dok je varijanca za širinu brijega manja i iznosi 0,062 mm<sup>2</sup>. Zid 2 pokazuje veću varijabilnost, s varijancom širine dola od 0,1058 mm<sup>2</sup>, što ukazuje na manju konzistentnost u dimenzijama dna u usporedbi sa Zidom 1. Varijanca širine brijega Zida 2 iznosi 0,069 mm<sup>2</sup>, što je blizu vrijednostima Zida 1, ali ipak pokazuje nešto veću varijabilnost.

Usporedba Zida 1 i Zida 2 u cjelini pokazuje da Zid 1 općenito ima veću stabilnost i konzistentnost u dimenzijama u usporedbi sa Zidom 2. Zid 1 pokazuje manju varijabilnost u dimenzijama, što se očituje kroz niže vrijednosti standardne devijacije i varijance u širini, kako dola, tako i brijega. S druge strane, Zid 2 pokazuje veću varijabilnost dimenzija, što se očituje višim vrijednostima standardne devijacije i varijance. Iako Zid 2 ima nešto veće prosječne širine dola smanjena je stabilnost dimenzija.

## 7. Zaključak

Aditivna proizvodnja predstavlja napredan tehnološki proces izrade proizvoda koji omogućuje preciznu i efikasnu proizvodnju složenih geometrijskih oblika. Razvijena kao odgovor na potrebu za bržim i ekonomičnijim metodama izrade prototipa, aditivna proizvodnja je evoluirala od laboratorijskih istraživanja do industrijske primjene u brojnim sektorima.

Jedna od glavnih prednosti aditivne proizvodnje u usporedbi s tradicionalnim metodama je smanjenje otpada materijala. Tradicionalne metode su temeljene na uklanjanju materijala, često rezultiraju značajnim gubicima, dok aditivna proizvodnja dodaje materijal sloj po sloj; čime se maksimizira iskoristivost materijala i smanjuje količina otpada. Ova prednost je osobito izražena u proizvodnji kompleksnih metalnih dijelova, gdje preciznost i prilagodba igraju ključnu ulogu.

Među tehnologijama koje spadaju u domenu aditivnih proizvodnja, tehnologija WAAM se ističe zbog svoje primjene u proizvodnji velikih metalnih dijelova. Ova tehnologija, koja kombinira principe zavarivanja i aditivne proizvodnje, omogućuje taloženje materijala korištenjem metalne žice i električnog luka. WAAM je posebno pogodan za proizvodnju komponenti koje zahtijevaju visoku prilagodbu i smanjenje troškova materijala.

Primjena aditivnih tehnologija donosi brojne ekonomske i ekološke prednosti. U ekonomskoj sferi, smanjenje vremena izrade i mogućnost proizvodnje malih serija bez potrebe za skupim alatima omogućuju tvrtkama značajne uštede. Smanjena potreba za skladištenjem materijala i brza prilagodba promjenama tržišnih uvjeta dodatno povećavaju fleksibilnost proizvodnih procesa. S ekološkog aspekta, smanjenje otpada i optimizacija korištenja materijala čine aditivnu proizvodnju održivom i ekološki prihvatljivom tehnologijom.

Zaključno, na temelju provedenog eksperimentalnog navarivanja u kojem su analizirane dvije strukture, Zid 1 i Zid 2, s posebnim naglaskom na usporedbu njihovih geometrijskih karakteristika i parametara navarivanja, utvrđene su značajne razlike između ovih struktura. U eksperimentu je posvećena posebna pažnja preciznom postavljanju ključnih parametara, poput napona, struje, brzine žice te odabiru odgovarajućih materijala i zaštitnih plinova kako bi se osigurali točni i usporedivi rezultati. Rezultati istraživanja su ukazali nekoliko ključnih razlika između Zida 1 i Zida 2. Zid 2 je imao veću prosječnu brzinu navarivanja i veću prosječnu jakost struje u odnosu na Zid 1. Nadalje, Zid 2 je pokazao dinamičnije promjene u parametrima navarivanja, što je rezultiralo većim širinama slojeva, ali i smanjenom stabilnošću dimenzija tih slojeva. S druge strane, Zid 1 je zabilježio stabilnije uvjete navarivanja s manjim varijacijama u jakosti struje i napona, što je rezultiralo većom stabilnošću dimenzija slojeva. Analiza dimenzija poprečnog presjeka oba zida pokazala je da Zid 1 ima ujednačenije dimenzije, premda manje širine, dok Zid 2 pokazuje veće varijacije u dimenzijama, unatoč tome što ima šire slojeve.

Sveukupno, Zid 1 nudi veću stabilnost u pogledu dimenzija i konzistentnost u parametrima navarivanja, što ga čini boljim izborom kada su stabilnost i preciznost ključni zahtjevi. S druge strane, Zid 2 nudi prednost u većim širinama slojeva, no po cijenu smanjene dimenzionalne stabilnosti. Odabir između Zida 1 i Zida 2 ovisit će o specifičnim zahtjevima konačne primjene. Ako je prioritet stabilnost i konzistentnost, Zid 1 je bolji izbor, dok Zid 2 može biti primjereniji za aplikacije koje zahtijevaju šire slojeve uz dopuštanje većih varijacija u dimenzijama.

## 8. Literatura

- [1] "Welding Terminology," Welding Intro, 2024. Dostupna na:  
<https://weldingintro.com/welding-terminology/>
- [2] H. Marko, "Tehnike spajanje, zavarivanje III", nastavni materijali.
- [3] K. Weman, Welding Processes Handbook, 2nd ed., Cambridge: Woodhead Publishing Ltd., 2012.
- [4] K. Weman, MIG Welding Guide, 2nd ed., Cambridge: Woodhead Publishing, 2013.
- [5] A. Andryansyah, A. Mardhi, M. Haryanto, Darlis, and A. Nugroho, "Effect of heat on coating process of joint tube wall ascending tube fuel handling system RDE," Journal of Physics: Conference Series, vol. 1198, no. 2, p. 022044, 2019, doi:10.1088/1742-6596/1198/2/022044.
- [6] Aditivna proizvodnja," Tehnička enciklopedija, 2024., Dostupno na:  
<https://tehnika.lzmk.hr/aditivna-proizvodnja/>.
- [7] C. Borg Costanzi, Reinforcing and Detailing of Thin Sheet Metal Using Wire Arc Additive Manufacturing as an Application in Facades, Germany: Springer Fachmedien, Imprint: Springer Vieweg, 2023.
- [8] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, 2nd ed., New York: Springer, 2015.
- [9] Additive Manufacturing for Metals," Formnext, Mesago Messe Frankfurt, 2024. Dostupno na: [https://formnext.mesago.com/frankfurt/en/industry-insights/am-field-guide/am\\_metal.html](https://formnext.mesago.com/frankfurt/en/industry-insights/am-field-guide/am_metal.html).
- [10] ISO/ASTM 52900:2015 - Additive Manufacturing - General Principles - Terminology," International Organization for Standardization, 2024. Dostupno na:  
<https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en:en>.
- [11] "7 Categories of Additive Manufacturing," Loughborough University Additive Manufacturing Research Group, 2024. Dostupno na:  
<https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/>

- [12] F. Hilal Halicioglu and S. Koralay, "Applicability analysis of additive manufacturing methods on construction projects", *Građevinar*, vol.72, no. 04., pp. 335-349, 2020.  
<https://doi.org/10.14256/JCE.2334.2018>
- [13] "Advantages of an Integrated Technology Provider," WAAM3D White Paper, Feb. 2022.  
 Dostupno na: [https://cdn.prod.website-files.com/624ca1135ead34247b2b23ec/62d51370708378550af018b0\\_WAAM%203D%20-%20White%20Paper%20-%20Advantages%20of%20an%20integrated%20technology%20provider%20-%20February%202022.pdf](https://cdn.prod.website-files.com/624ca1135ead34247b2b23ec/62d51370708378550af018b0_WAAM%203D%20-%20White%20Paper%20-%20Advantages%20of%20an%20integrated%20technology%20provider%20-%20February%202022.pdf)
- [14] Metal 3D Printing: The Complete Guide," Hubs, 2024. Dostupno na:  
<https://www.hubs.com/guides/metal-3d-printing/#design-for-metal-3d-printing>.
- [15] Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)," WAAM3D, 2024. Dostupno na:  
<https://www.waam3d.com/learn-waam>
- [16] A. Paul, A. A. Ilyas, and A. R. Vijay, "Sustainable additive manufacturing processes for 3D printed materials," in *Advances in 3D Printing & Additive Manufacturing Technologies*, Singapore: Springer, 2021.
- [17] P. Henckell, M. Gierth, Y. Ali, J. Reimann, and J. Bergmann, "Reduction of Energy Input in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) with Gas Metal Arc Welding (GMAW)," 2020.
- [18] Y. Yehorov, L. da Silva, and A. Scotti, "Balancing WAAM Production Costs and Wall Surface Quality through Parameter Selection: A Case Study of an Al-Mg5 Alloy Multilayer-Non-Oscillated Single Pass Wall," 2019.
- [19] A. Adebayo, J. Mehnen, and X. Tonnellier, "Limiting Travel Speed in Additive Layer Manufacturing," in *ASM Proceedings of the International Conference: Trends in Welding Research*, 2012.
- [20] A. Shah, R. Aliyev, H. Zeidler, and S. Krinke, "A Review of the Recent Developments and Challenges in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 7, no. 3, p. 97, 2023, doi:  
[10.3390/jmmp7030097](https://doi.org/10.3390/jmmp7030097).



- [21] A. Busachi, J. Erkoyuncu, P. Colegrove, F. Martina, C. Watts, and R. Drake, "A review of Additive Manufacturing technology and Cost Estimation techniques for the defence sector," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 19, pp. 117–128, 2017, doi: 10.1016/j.cirpj.2017.07.001.
- [22] F. Martina, J. Mehnen, S. W. Williams, P. Colegrove, and F. Wang, "Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti–6Al–4V," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 212, no. 6, pp. 1377–1386, 2012, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.02.002.
- [23] WAAM 101," RAMLAB, 2024. Dostupno na: <https://www.ramlab.com/resources/waam-101/>.
- [24] "Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Explained," MakerVerse, 2024. Dostupno na: <https://www.makerverse.com/resources/3d-printing/wire-arc-additive-manufacturing-waam-explained/>.
- [25] "Marine Guide," WAAM3D, May 2023. Dostupno na: [https://cdn.prod.website-files.com/624ca1135ead34247b2b23ec/6491876472e27cbaf2d6b259\\_W3D056%20-%20Marine%20Guide%20-%20May%202023\\_v1.2\\_Pages\\_High.pdf](https://cdn.prod.website-files.com/624ca1135ead34247b2b23ec/6491876472e27cbaf2d6b259_W3D056%20-%20Marine%20Guide%20-%20May%202023_v1.2_Pages_High.pdf)
- [26] F. Nonino, M. K. Niaki, *The Management of Additive: Enhancing Business Value*, Rome: Springer International Publishing, 2018.
- [27] T. Wohlers, T. Caffrey, and O. Campbell, *The Management of Additive Manufacturing*, Springer, 2017.
- [28] N. Jiaqiang, Z. Ting, and W. Zhijun, "The influence of parameters on the quality of wire arc additive manufacturing: A case study of Ti-6Al-4V," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 25, 2024.
- [29] Marjanović, Vinko.2023. Primjena Taguchi temeljne sive relacijske analize za optimiranje laserskog zavarivanja. Diplomski rad. Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet. Dostupno na: <https://repository.riteh.uniri.hr/islandora/object/riteh:3658>
- [30] "ANOVA (Analysis of Variance)," Investopedia, 2024. [Online]. Available: <https://www.investopedia.com/terms/a/anova.asp>.

- [31] Huang, Lei & Chen, Xizhang & Konovalov, Sergey & Su, Chuanc & Fan, Pengfei & Wang, Yanhu & Xiaoming, Pan & Panchenko, Irina. (2023). A Review of Challenges for Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM). Transactions of the Indian Institute of Metals. 76. 10.1007/s12666-022-02823-y
- [32] Fronius Manual, 2024. Dostupno na: <https://manuals.fronius.com/html/4204260354/hr.html#Cover>.
- [33] EZ-MIG 308 LSi," EZG Group, 2024. Dostupno na: <https://ezg.hr/en/products/wires/ez-mig-308-lsi/>.
- [34] Rail Bull: Track Welding Tractor with Oscillator, Promotech, 2023 Dostupno na: [https://www.promotech.eu/en/wp-content/uploads/2023/01/Rail-Bull\\_Track-Welding-Tractor-with-Oscillator\\_21.10.pdf](https://www.promotech.eu/en/wp-content/uploads/2023/01/Rail-Bull_Track-Welding-Tractor-with-Oscillator_21.10.pdf).
- [35] "TKTL 20 ThermoLaser," Reliability Direct Store, 2024. Dostupno na: <https://www.reliabilitydirectstore.com/TKTL-20-ThermoLaser-p/skf-ktl%2020.htm>.
- [36] "Minitech 250 SP1," Presi, 2024. Dostupno na: <https://www.presi.com/en/product/minitech-250-sp1/>.
- [37] Odjel za Strojarsvo - Laboratoriji 2024, University North, 2024. Dostupno na: <https://www.unin.hr/wp-content/uploads/ODJEL-ZA-STROJARSTVO-LABORATORIJI-2024.pdf>.
- [38] M. Bušić, "Suvremeni postupci MIG/MAG zavarivanja," nastavni materijali, Varaždin, 2023.
- [39] *Operating Instructions TransSteel 3000c Pulse*, Fronius International GmbH, 2022.
- [40] "Argon," Messer Croatia Plin, 2024. Dostupno na: <https://www.messer.hr/argon>.

## Popis slika

Slika 1: Oprema MIG/MAG zavarivanja [3].....	3
Slika 2: Zavarivački pištolj [5] .....	4
Slika 3: Procesi proizvodnje [7] .....	7
Slika 4: Koraci aditivne proizvodnje [9] .....	11
Slika 5: Podjela aditivne proizvodnje metala [9].....	12
Slika 6: PBF postupak [9].....	13
Slika 7: DED postupak [9].....	14
Slika 8: MEX postupak [9] .....	14
Slika 9: BJT postupak [9] .....	15
Slika 10: MJT postupak [9] .....	16
Slika 11: WAAM oprema [7] .....	17
Slika 12: WAAM postupak [16].....	18
Slika 13: Glavni postupci WAAM proizvodnje: TIG, PAW, MIG/MAG [7].....	19
Slika 14: Zavar izložen visokim razinama dušika [7] .....	20
Slika 15: Utjecaj pojedinog plina na oblik i dubinu penetracije zavara [7] .....	21
Slika 16: Utjecaj slobodnog kraja žice na ekscentričnost vrha elektrode [7] .....	22
Slika 17: Učinci slobodnog kraja žice na visinu profila [7] .....	23
Slika 18: Tehnike optimizacije WAAM postupka [28].....	33
Slika 19: Faze strategije taloženja materijala [28].....	33
Slika 20: Implementacija novih tehnologija u WAAM.....	34
Slika 21: Uređaj za zavarivanje Fronius TransSteel 3000 Pulse/FSC [32] .....	35
Slika 22: Bočni pogled na uređaj za zavarivanje [32] .....	36
Slika 23: Kotačići za pogon žice .....	36
Slika 24: Bočni pogled na uređaj za zavarivanje.....	37
Slika 25: Korisničko sučelje Fronius TransSteel 3000 Puls/FSC uređaja [32] .....	37
Slika 26: Dodatni materijal korišten u eksperimentalnom dijelu .....	40
Slika 27: Uređaj za vođenje gorionika tijekom zavarivanja [34] .....	41
Slika 28: Postavljena podloga za navarivanje, gorionik i uređaj za vođenje .....	42
Slika 29: Termometar [35] .....	46
Slika 30: Mjerenje temperature navarenog sloja .....	47
Slika 31: Proces navarivanja Zida 1 sloj po sloj.....	48
Slika 32: Proces navarivanja Zida 2 sloj po sloj.....	49
Slika 33: Uređaj za brušenje i poliranje uzoraka [36] .....	50

Slika 34: Uzorci nakon rezanja pilom, brušenja i poliranja.....	51
Slika 35: Proces nagrizanja.....	52
Slika 36: Olympus SZX10 mikroskop [37].....	53
Slika 37: Poprečni presjeci .....	54
Slika 38: Poprečni presjeci s dimenzionalnim vrijednostima brijegova i dolova.....	55

## Popis tablica

Tablica 1: Definiranje funkcija na uređaju [32] .....	38
Tablica 2: Kemijski sastav dodatnog materijala [33] .....	40
Tablica 3: Parametri navarivanja u eksperimentalnom dijelu .....	43
Tablica 4: Usporedba prosječnih vrijednosti parametara .....	45
Tablica 5: Rezultati mjerenja poprečnog presjeka .....	56
Tablica 6: Usporedba rezultata mjerenja dimenzija poprečnog presjeka .....	56
Tablica 7: Usporedba standardne devijacije i varijance širine dola i brijega između zidova.....	57



### 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 (knjiga, 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 prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, Gabrijela Tunić (*ime i prezime*) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica diplomskog rada pod naslovom Utjecaj parametara navarivanja na konačnu iskoristivost izratka pri aditivnoj proizvodnji MIG/MAG tehnologijom (*upisati naslov*) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:  
Gabrijela Tunić

Gabrijela Tunić  
(vlastoručni potpis)

Sukladno članku 58., 59. i 61. Zakona o visokom obrazovanju i znanstvenoj djelatnosti završne/diplomske/specijalističke radove sveučilišta su dužna objaviti u roku od 30 dana od dana obrane 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 sastavnice 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.