

Utjecaj parametara u MIG/MAG postupku navarivanja na geometrijska svojstva izratka pri aditivnoj proizvodnji

Lehpamer, Adam

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:122:220151>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-27**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





**Sveučilište
Sjever**

Diplomski rad br. 115/STR/2024

**Utjecaj parametara u MIG/MAG postupku navarivanja na
geometrijska svojstva izratka pri aditivnoj proizvodnji**

Adam Lehpamer, 0336026868

Varaždin, rujan 2024. godine



Sveučilište Sjever

Odjel za Strojtarstvo

Diplomski rad br. 115/STR/2024

Utjecaj parametara u MIG/MAG postupku navarivanja na geometrijska svojstva izratka pri aditivnoj proizvodnji

Student

Adam Lehpamer, 0336026868

Mentor

Doc.dr.sc. Matija Bušić

Varaždin, rujun 2024. godine

Predgovor

Najprije, zahvaljujem mentoru doc. dr. sc. Matiji Bušiću na savjetima i smjernicama koje su uvelike doprinijele izradi ovog diplomskog rada. Jasnom komunikacijom, poštivanjem planiranih vremenskih rokova i konstruktivnim komentarima, doc. dr. sc. Matija Bušić uvelike je olakšao izradu ovog rada. Također bih se zahvalio ravnatelju Metalske jezgre Čakovec, dr. sc. Mariu Šerceru, koji je omogućio provedbu dijela eksperimenta, te dr. sc. Marini Grabar Branilović, koja je pomogla s izvedbom eksperimentalnog dijela ovog diplomskog rada. Nadalje, zahvalio bih se svima koji su me podupirali tijekom studiranja i na taj način omogućili završetak studija.

Sažetak

Ovaj diplomski rad bavi se temom utjecaja parametara u MIG/MAG postupku navarivanja na geometrijska svojstva izratka u kontekstu aditivne proizvodnje. Rad se sastoji od teoretskog i eksperimentalnog dijela. U teoretskom dijelu, na temelju podataka iz navedene literature, opisan je postupak aditivne proizvodnje pomoću MIG/MAG tehnologije navarivanja. Kratak uvod daje pregled aditivne proizvodnje i njezinih karakteristika. Definirana je aditivna proizvodnja metalnih izradaka te je prikazana podjela postupaka aditivne proizvodnje metala. Glavni dio teoretskog dijela opisuje aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom (WAAM), te su navedeni primjeri metala koji se mogu koristiti kao polazni materijali za WAAM. Navedene su karakteristike postupka, parametri te njegove prednosti i nedostaci. Također su navedene primjene proizvoda izrađenih ovom tehnologijom, a tehnologija je uspoređena s konvencionalnim proizvodnim tehnologijama te s drugima aditivnim tehnologijama. U eksperimentalnom dijelu rada, automatiziranim MIG postupkom i pomoću žice za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika, izrađena su dva uzorka uz primjenu različitih procesnih parametara. Provedeno je ispitivanje geometrijskih karakteristika površine, odnosno topografije ispitivanih površina. Na temelju rezultata zaključeno je na koji način različiti zavarivački parametri utječu na geometrijska svojstva izrađenih uzoraka te koji su parametri prikladniji za izradu struktura od nehrđajućeg čelika.

Ključne riječi: Aditivne tehnologije, zavarivanje, nehrđajući čelici, topografija, 3D skeniranje.

Summary

This master thesis addresses the impact of parameters in the MIG/MAG welding process on the geometrical properties of the workpiece in the context of additive manufacturing. The work consists of both theoretical and experimental parts. The theoretical section, based on data from the referenced literature, describes the additive manufacturing process using MIG/MAG welding technology. A brief introduction provides an overview of additive manufacturing and its characteristics. The thesis defines metal additive manufacturing and presents the classification of metal additive manufacturing processes. The main part of the theoretical section focuses on Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM), providing examples of metals that can be used as feedstock for WAAM. The characteristics of the process, including parameters, advantages, and disadvantages, are discussed. The applications of products made using this technology are also outlined, and the WAAM process is compared with conventional manufacturing technologies as well as other additive technologies. In the experimental part of the master thesis, two samples were produced using an automated MIG process and stainless steel welding wire, with varying process parameters. The geometrical characteristics of the surface, specifically the topography of the examined surfaces, were analyzed. Based on the results, conclusions were drawn on how different welding parameters affect the geometrical properties of the produced samples and which parameters are more suitable for the fabrication of stainless steel structures.

Keywords: Additive technologies, welding, stainless steels, topography, 3D scanning.

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

| | | | |
|-----------------------------|--|--------------|----------------------------------|
| ODJEL | Odjel za strojarstvo | | |
| STUDIJ | diplomski sveučilišni studij Strojstvo | | |
| PRISTUPNIK | Adam Lehpamer | MATIČNI BROJ | 0336026868 |
| DATUM | 11.09.2024. | KOLEGIJ | Suvremene proizvodne tehnologije |
| NASLOV RADA | Utjecaj parametara u MIG/MAG postupku navarivanja na geometrijska svojstva izratka pri aditivnoj proizvodnji | | |
| NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU | Influence of welding parameters in MIG/MAG technology on the workpiece geometry in additive manufacturing | | |
| MENTOR | dr.sc. Matija Bušić | ZVANJE | docent |
| ČLANOVI POVJERENSTVA | 1. izv.prof..dr.sc. Sanja Šolić, predsjednica povjerenstva | | |
| | 2. doc.dr.sc. Matija Bušić, mentor, član povjerenstva | | |
| | 3. doc.dr.sc. Boris Jalušić, član povjerenstva | | |
| | 4. doc.dr.sc. Zlatko Botak, zamjenski član povjerenstva | | |
| | 5. | | |

Zadatak diplomskog rada

BROJ 115/STR/2024

OPIS

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 navesti podjelu postupaka aditivne proizvodnje. Posebno detaljno opisati aditivnu proizvodnju električnim lukom i žicom (engl. Wire Arc Additive Manufacturing). Istražiti i navesti primjere metala koji se mogu koristiti kao polazni materijali za WAAM. Navesti primjere proizvoda koji se mogu izrađivati ovom tehnologijom te usporediti takvu izradu sa konvencionalnim proizvodnim tehnologijama.

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 ispitivanje geometrije proizvoda. Provesti adekvatno ispitivanje geometrijskog stanja površine, Na temelju rezultata preporučiti prikladne parametre i donijeti vlastiti zaključak o provedenom eksperimentu. U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

ZADATAK URUČEN

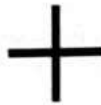
12.09.2024.

POTPIS MENTORA

M. Bušić



Sveučilište Sjever



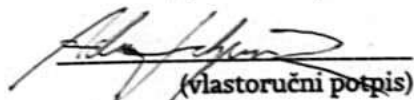
SVEUČILIŠTE
SJEVER

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, ADAM LEHPAMER (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica ~~završnog/diplomskog/specijalističkog~~ (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom UTJECAJ PARAMETARA U HIG/MAG POSTUPKU NAVARIVANJA NA GEOMETRIJSKA SVEJSTVA IZRAZIKA PRI ADITIVNOJ PROJEKCIJI (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljen način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)


(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.

Popis korištenih kratica

| | |
|---------------|---|
| 3D | Trodimenzionalno |
| CAD | eng. Computer aided design Računalom potpomognuto projektiranje |
| FAA | eng. Federal aviation administration Savezna uprava za zrakoplovstvo |
| DMLS | eng. Direct metal laser sintering Direktno lasersko sinteriranje metala |
| SLS | eng. Selective laser sintering Selektivno lasersko srašćivanje |
| SLM | eng. Selective laser melting Selektivno lasersko staljivanje |
| EBM | eng. Electron beam melting Staljivanje elektronskom zrakom |
| UC | eng. Ultrasonic consolidation Ultrazvuča tehnologija |
| EBF | eng. Electron beam freeform fabrication Taloženje elektronskim snopom i žicom |
| WLAM | eng. Wire and laser additive manufacturing Aditivna proizvodnja laserom i žicom |
| WAAM | eng. Wire and arc additive manufacturing Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom |
| LM3DP | eng. Liquid metal 3D printing |
| SFF | eng. Solid freeform fabrication |
| LC | eng. Laser consolidation |
| DLF | eng. Direct light fabrication |
| PBF | eng. Powder-based additive manufacturing Aditivna proizvodnja temeljena na prahu |
| WBAM | eng. Wire-based additive manufacturing Aditivna proizvodnja temeljena na žici |
| CNC | eng. Computer numerical control Računalno numeričko upravljanje |
| O.O.Č. | Obrada odvajanjem čestica |
| TIG | eng. Tungsten inert gas Zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina |
| GTAW | eng. Gas tungsten arc welding Zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina |
| PAW | eng. Plasma arc welding Zavarivanje plazma lukom |
| GMAW | eng. Gas metal arc welding Zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi plina ili plinskih mješavina |
| MIG | eng. Metal inert gas Zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina |

| | |
|-----------------------|---|
| MAG | eng. Metal active gas Zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina |
| He | helij |
| Ar | argon |
| CO₂ | ugljični dioksid |
| O₂ | kisik |
| CMT | eng. Cold metal transfer Hladni prijenos metala |
| WFS | eng. Wire feed speed Brzina dovođenja žice |
| TS | eng. Torch travel speed Brzina zavarivanja |
| Ti | titan |
| Al | aluminij |
| V | vanadij |
| STL | eng. Standard Tessellation Language |
| HCl | Solna kiselina |
| S_q | Srednja kvadratna vrijednost odstupanja površine |
| S_p | Maksimalna visina vrha površine |
| S_a | Aritmetička sredina odstupanja visina površine |

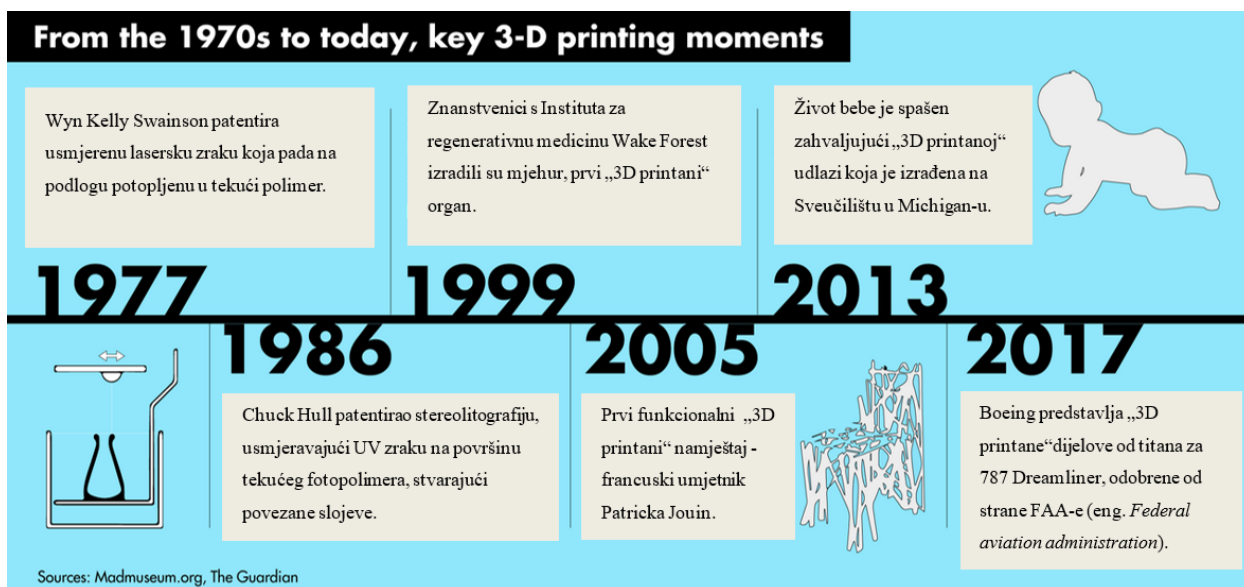
Sadržaj

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | Uvod..... | 1 |
| 2. | Aditivna proizvodnja metalnih materijala | 3 |
| 2.1. | Prednosti..... | 3 |
| 2.2. | Nedostaci..... | 3 |
| 2.3. | Podjela postupaka aditivne proizvodnje metala | 4 |
| 2.3.1. | <i>Aditivne tehnologije na bazi tekućeg metala</i> | 5 |
| 2.3.2. | <i>Aditivne tehnologije na bazi praha</i> | 6 |
| 2.3.3. | <i>Aditivne tehnologije na bazi žice</i> | 8 |
| 3. | Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom | 9 |
| 3.1. | Vrste WAAM postupaka (GTAW, PAW, GMAW) | 11 |
| 3.2. | WAAM sustavi..... | 14 |
| 3.2.1. | <i>Industrijski roboti</i> | 14 |
| 3.2.2. | <i>CNC portalni sustavi</i> | 15 |
| 3.3. | Parametri WAAM procesa | 16 |
| 3.3.1. | <i>Brzina dovođenja žice</i> | 16 |
| 3.3.2. | <i>Brzina kretanja zavarivačkog pištolja</i> | 16 |
| 3.3.3. | <i>Unos topline</i> | 16 |
| 3.3.4. | <i>Temperatura predgrijavanja</i> | 17 |
| 3.3.5. | <i>Međuprolazna temperatura</i> | 17 |
| 3.3.6. | <i>Duljina slobodnog kraja žice</i> | 17 |
| 3.3.7. | <i>Duljina električnog luka</i> | 18 |
| 3.4. | Polazni materijali kod WAAM-a | 18 |
| 3.4.1. | <i>Nehrđajući čelici u WAAM-u</i> | 20 |
| 3.5. | Značajke WAAM-a | 21 |
| 3.6. | Problematika postupka | 23 |
| 3.6.1. | <i>Zaostala naprezanja</i> | 24 |
| 3.6.2. | <i>Poroznost</i> | 24 |
| 3.6.3. | <i>Neravnomjerno taloženje</i> | 26 |
| 3.6.4. | <i>Preljevanje materijala</i> | 26 |
| 3.7. | Primjeri proizvoda izrađenih WAAM postupkom | 27 |
| 4. | Eksperimentalni rad | 32 |
| 4.1. | Korištena oprema, materijali i metode | 32 |
| 4.2. | Postupak navarivanja slojeva | 38 |
| 4.2.1. | <i>Priprema</i> | 38 |
| 4.2.2. | <i>Navarivanje slojeva, parametri procesa</i> | 41 |
| 4.3. | Analiza topografije površine | 45 |
| 5. | Analiza rezultata | 50 |
| 6. | Zaključak..... | 53 |
| 7. | Literatura..... | 55 |

1. Uvod

U posljednje vrijeme vidljiv je značajan porast interesa za aditivnu proizvodnju te njezina značajna popularizacija. Neki od glavnih razloga za to su niži troškovi izrade strojnih dijelova zbog smanjenja otpada materijala i skraćivanja vremena proizvodnje potrebnog za izradu tih dijelova, kao i mogućnost izrade objekata složene geometrije koje bi bilo nemoguće izraditi klasičnim proizvodnim tehnologijama. Ova, nekada futuristička tehnologija, tako je danas sve veći predmet istraživanja, a njezina primjena u modernoj industriji sve je šira [1], [2].

Aditivna proizvodnja je postupak izrade objekta (strojnog dijela) dodavanjem slojeva materijala jedan po jedan. To je suprotno konvencionalnim (subtraktivnim) proizvodnim postupcima, kod kojih se objekt stvara uklanjanjem materijala iz čvrstog bloka dok se ne dobije konačni proizvod. Aditivna proizvodnja se također često naziva „3D printanjem“ ili „3D ispisom“. Prvi puta je korištena za razvoj prototipova 1980-ih. Ti prototipovi, u početku, obično nisu bili funkcionalni. Ovaj proces bio je poznat kao brza izrada prototipova (eng. *Rapid prototyping*) jer je omogućavao brzo stvaranje modela konačnog objekta, bez procesa pripreme i troškova koji su uključeni u izradu prototipa. Kako je aditivna proizvodnja napredovala, njene primjene su se proširile na brzu izradu alata (eng. *Rapid tooling*), koja je korištena za izradu kalupa za konačne proizvode. Do ranih 2000-ih, aditivna proizvodnja je korištena za izradu funkcionalnih proizvoda, a nedavno su kompanije poput Boeinga i General Electrica počele koristiti aditivnu proizvodnju kao integralni dio svojih proizvodnih procesa [3]. Slika 1 prikazuje ključne momente u povijesti aditivne proizvodnje.



Slika 1 Ključni trenuci u povijesti aditivne proizvodnje [3]

Kako bi izradili strojni dio pomoću nekog od postupka aditivne proizvodnje, prvo je potrebno napraviti računalni model dijela. Ovo se obično radi pomoću programa za računalom potpomognuto projektiranje – CAD programa (eng. *Computer aided design*) ili skeniranjem dijela koji se želi reproducirati. Nakon ovoga računalni program „reže“ model na slojeve koje će stroj koji izrađuje sam dio pratiti [3].

Aditivnim proizvodnim postupcima moguće je izraditi predmete od niza različitih materijala. Od polimera, keramike i metala do pjena, gelova, pa čak i biomaterijala. Na Slici 2 lijevo vidljiv je izradak od metala, desno keramike, a dolje od pijeska [3], [4].



Slika 2 Predmeti od različitih materijala izrađeni aditivnim postupcima [4]

2. Aditivna proizvodnja metalnih materijala

Aditivna proizvodnja metalnih materijala ili 3D ispis u posljednje vrijeme doživljava značajan napredak. Razvoj istraživačke i komercijalne opreme za 3D ispis metala tijekom protekla dva desetljeća, zajedno s povećanom raznolikošću polaznih materijala, potaknuo je značajne istraživačke aktivnosti akademskih, vladinih i industrijskih istraživačkih institucija širom svijeta. Najistaknutiji oblici 3D ispisa metala uključuju tehnologije s komorama za prah, mlaznicama za prah potisnut plinom, žicom kao ulaznim materijalom, lasere i elektronske zrake kao izvore energije te preciznu automatizacijsku opremu za digitalno usmjeravanje izvora energije, polaznog materijala ili oboje duž putanja potrebnih za formiranje željenih oblika, sloj po sloj [5].

2.1. Prednosti

Potencijal za izradu metalnih dijelova izravno iz digitalnih podataka koristeći jedan potpuno automatiziran stroj i polazne materijale, bez dodatnih alata i strojeva, vrlo je značajan. Ovakva vrsta proizvodnje rezultira drastičnim smanjenjem troškova i vremena izrade te omogućuje izradu malih serija ili jedinstvenih komponenti na zahtjev. Također, moguće je izraditi strojne dijelove koje se ne mogu proizvesti konvencionalnim postupcima zbog ograničenja geometrije, materijala, mikrostrukture i svojstava. Ove su prednosti prepoznate te se aditivna proizvodnja metalnih komponenti danas koristi za ograničenu proizvodnju u industriji [5].

2.2. Nedostaci

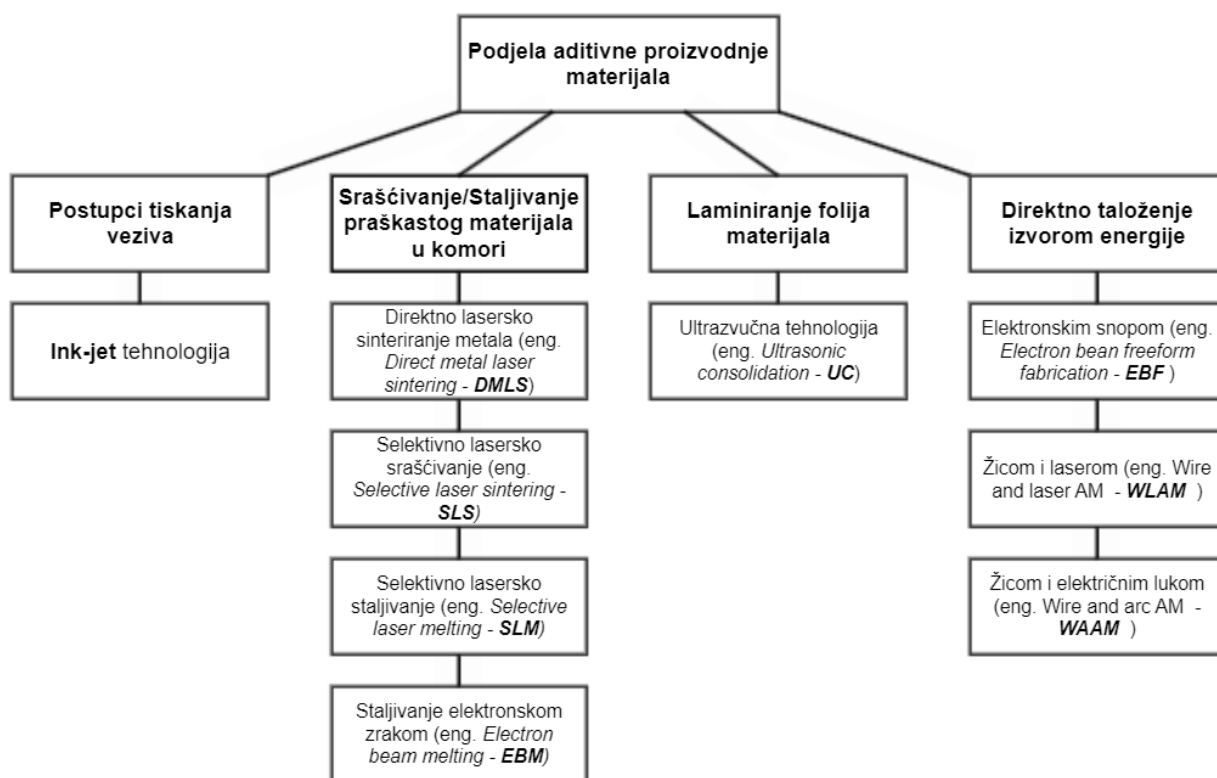
Dok su prednosti 3D ispisa metala privlačne, postoje značajni znanstveni i tehnički izazovi koji ometaju još širu primjenu i prihvaćanje ovakvih tehnologija. Za naglasiti je da su mikrostrukture proizvedene aditivnim postupcima prilično nove i ne nalikuju onima proizvedenim konvencionalnim metodama proizvodnje kao što su lijevanje, obrada odvajanjem čestica ili obrada deformacijom. Drugo, fizički procesi povezani s skrućivanjem slojeva metal, praćeni različitim varijacijama u polaznim materijalima, parametrima obrade, opremi, protokolima opreme, izrazito su složeni, što dovodi do raznolikosti u „proizvedenim“ mikrostrukturama tj. svojstvima. Također, razumijevanje strukturnih i mikrostrukturnih pogrešaka prisutnih u metalnim dijelovima koji su izrađeni aditivnom proizvodnjom i obrađeni naknadnim postupcima kao što je toplinska obrada za postizanje svojstava prihvatljivih za radne uvjete, je ograničeno i predmet je intenzivnih istraživanja [5].

2.3. Podjela postupaka aditivne proizvodnje metala

Mnoštvo metoda aditivne proizvodnje metala koje koriste različite vrste izvora energije i različite polazne materijale je danas u upotrebi. Od sedam razvijenih tehnologija za izradu metalnih komponenti, četiri pripadaju području aditivnih proizvodnih tehnologija, to su:

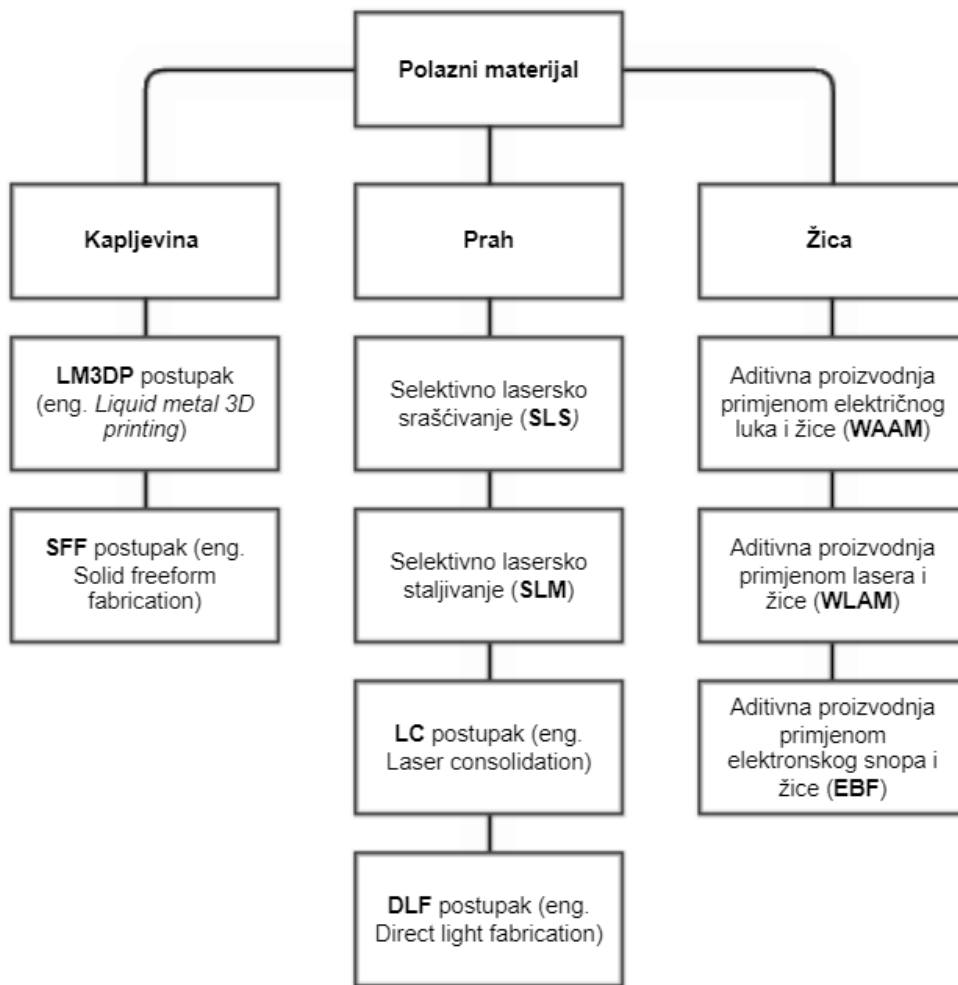
- Postupci tiskanja veziva (eng. *Binder jet fusion*)
- Srašćivanje ili staljivanje praškastog materijala u komori (eng. *Powder bed fusion*)
- Postupci laminiranja folija materijala (eng. *Sheet lamination*)
- Direktno taloženje izvorom energije (eng. *Direct energy deposition*).

Svaka od gore navedenih kategorija sastoji se od različitih tehnologija, kao što je prikazano na slici 3 [6], [7].



Slika 3 Podjela aditivne proizvodnje prema ASTM F2792 [6]

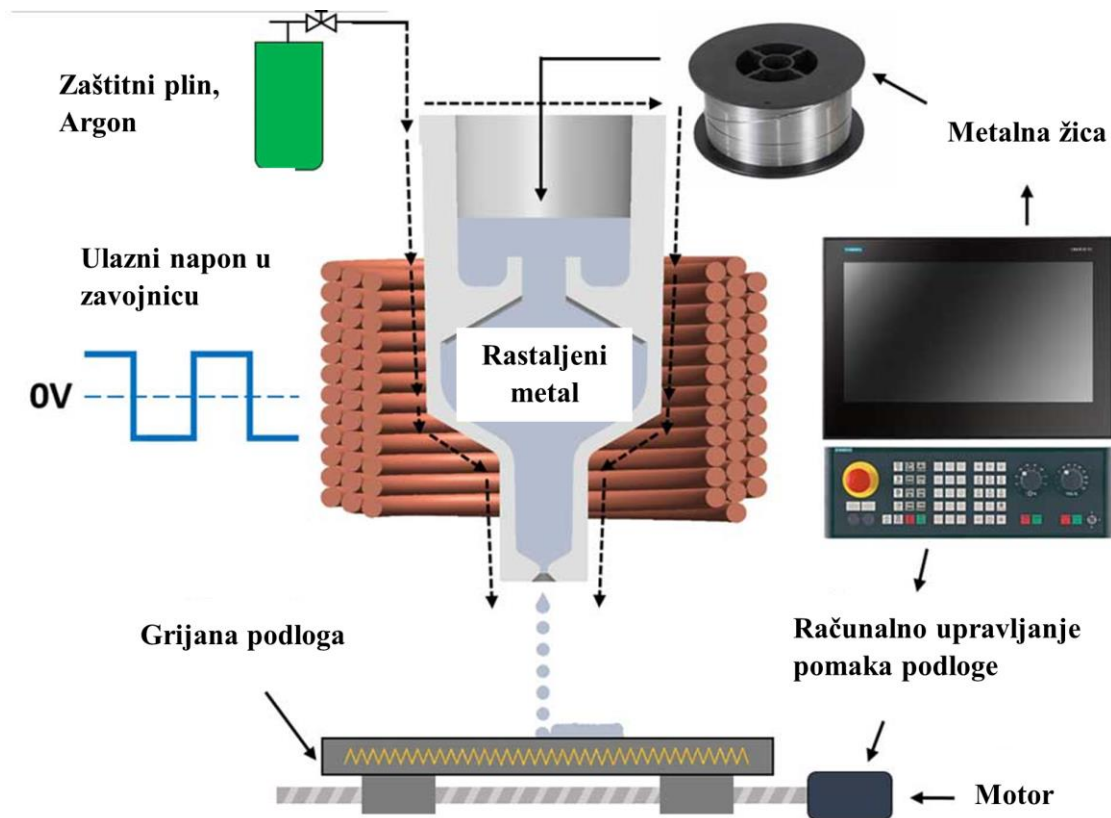
Još jedan od načina klasifikacije postupaka aditivne proizvodnje metala je prema stanju u kojem se nalazi polazni materijal tijekom 3D ispisa materijala. Ovakva podjela vidljiva je na slici 4 [6].



Slika 4 Podjela aditivne proizvodnje metala prema polaznom materijalu [6]

2.3.1. Aditivne tehnologije na bazi tekućeg metala

Primjena polaznog materijala u tekućem stanju relativno je nova u aditivnoj proizvodnji metala. Ova tehnologija pretvara sirovinu iz čvrstog u tekuće stanje i elektromagnetskim poljem usmjerava, na zahtjev, tekuće metalne kapljice. Izbačene kapljice putuju do pokretne podloge gdje se spajaju i skrućuju u krute strukture. Trodimenzionalne strukture proizvoljnog oblika mogu se ispisivati sloj po sloj pomoću pokretne podloge koja omogućuje precizno taloženje kapljica. Time se ubrzava proces izrade i omogućuje proizvodnja metalnih komponenti visoke gustoće. Jedna ovakav postupak aditivne proizvodnje metalnih objekata temeljena na Ink-jet tehnologiji prikazana je na slici 5 [6], [8].



Slika 5 Postupak izrade strojnih dijelova tehnologijom na bazi tekućeg metala kao polaznog materijala [8]

2.3.2. Aditivne tehnologije na bazi praha

Materijali u obliku praha korišteni su prije materijala u obliku žice za izradu metalnih komponenti u aditivnoj proizvodnji. Materijali u prahu prikladni su za izradu malih komponenti zbog bolje geometrijske i dimenzionalne točnosti. Međutim, brzina nanošenja materijala (staljivanja/srašćivanja) je relativno niska, a postoje i ograničenja u volumenu izradaka. Stoga se aditivna proizvodnja temeljena na prahu (PBAM, eng. *Powder-based additive manufacturing*) može koristiti za izradu visokokvalitetnih i složenih metalnih komponenti, pri čemu izrađene strukture imaju zadovoljavajuća mehanička svojstva za praktične primjene. Nažalost, PBAM ima ograničenu primjenu u velikoserijskoj proizvodnji metalnih komponenti zbog niske brzine taloženja materijala i ograničenja u volumenu izradaka. Stoga su proučavani materijali u obliku žice kako bi se prevladala ograničenja materijala u prahu u velikoserijskoj proizvodnji metalnih komponenti [6].

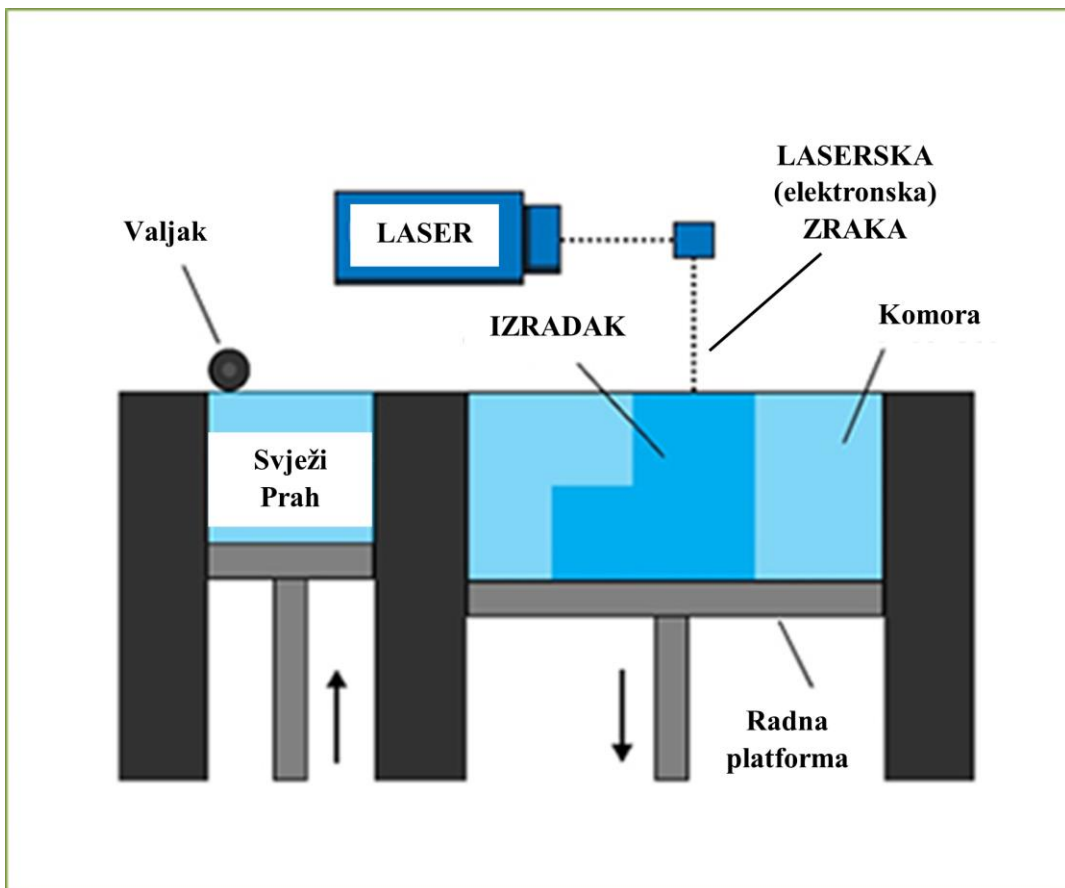
Neki od često korištenih PBF postupaka su SLM, SLS, DMLS i EBM postupci. PBF metode koriste laser ili elektronske zrake za staljivanje ili srašćivanje praškastog materijala u komori.

Metode staljivanja elektronskim zrakama (EBM) zahtijevaju prisutnost vakuuma u komori. Svi PBF procesi uključuju nanošenje slojeva praha na prethodne slojeve. Različiti mehanizmi omogućuju ovo, uključujući valjak ili oštricu. Spremnik ili rezervoar ispod ili sa strane radne platforme osigurava svježi materijal [9].

PBF postupci se obično sastoje od sljedećih koraka:

1. Sloj materijala, obično debljine 0,1 mm se nanosi na radnu podlogu
2. Laser ili elektronska zraka spaja prvi sloj, presjek modela
3. Novi sloj praha se nanosi preko prethodnog sloja pomoću valjka
4. Daljnji slojevi se spajaju i dodaju
5. Proces se ponavlja dok se cijeli model ne izradi. Nepovezani prah ostaje na mjestu, a uklanja se tijekom postprocesiranja [9].

Slika 6 karikirano prikazuje jedan PBF postupak.



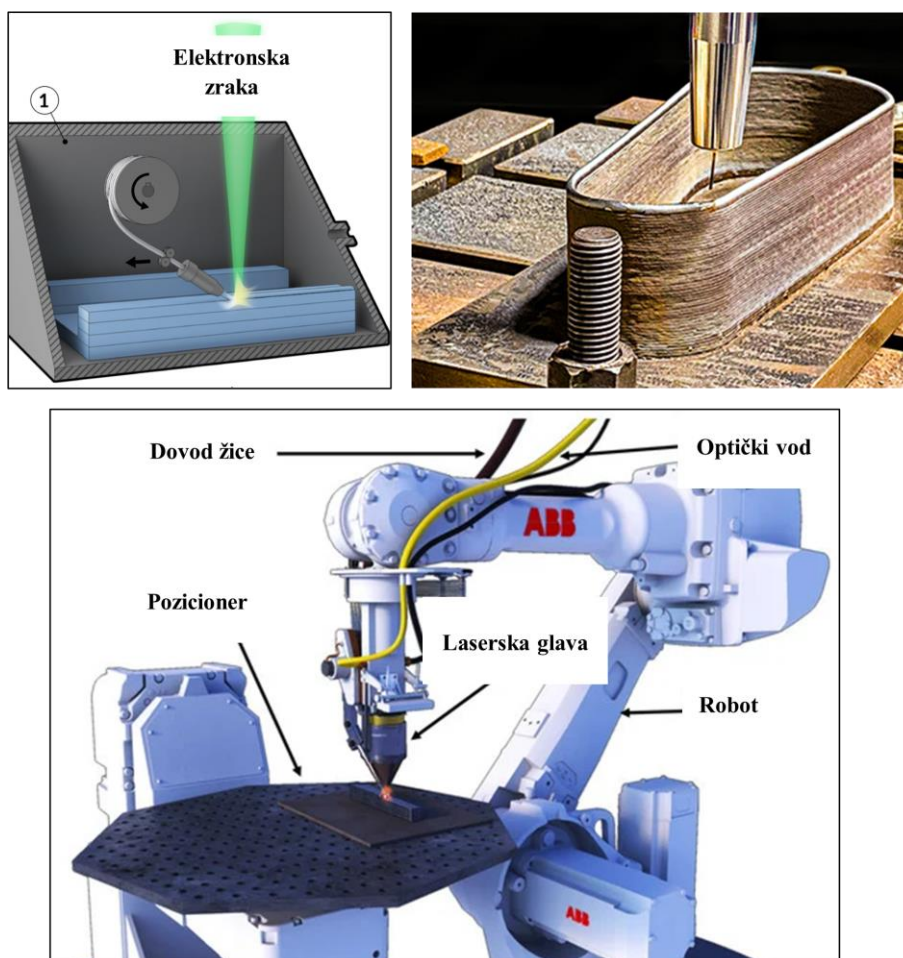
Slika 6 Jedan od PBF postupaka [9]

2.3.3. Aditivne tehnologije na bazi žice

Aditivna proizvodnja temeljena na žici (WBAM, eng. *Wire-based additive manufacturing*) bila je predmet intenzivnog istraživanja zbog svog visokog potencijala za primjenu u 3D ispisu metala. WBAM ima prednosti u smislu učinkovitosti korištenja materijala, budući da se materijal u obliku žice u potpunosti iskorištava u nanošenju prolaz po prolaz. Osim toga, WBAM nema ograničenja u volumenu proizvedenog izratka. Postoje tri različite skupine unutar WBAM-a:

- Postupci temeljeni na laseru
- temeljeni na elektrolučnom zavarivanju
- temeljeni na elektronskoj zruci.

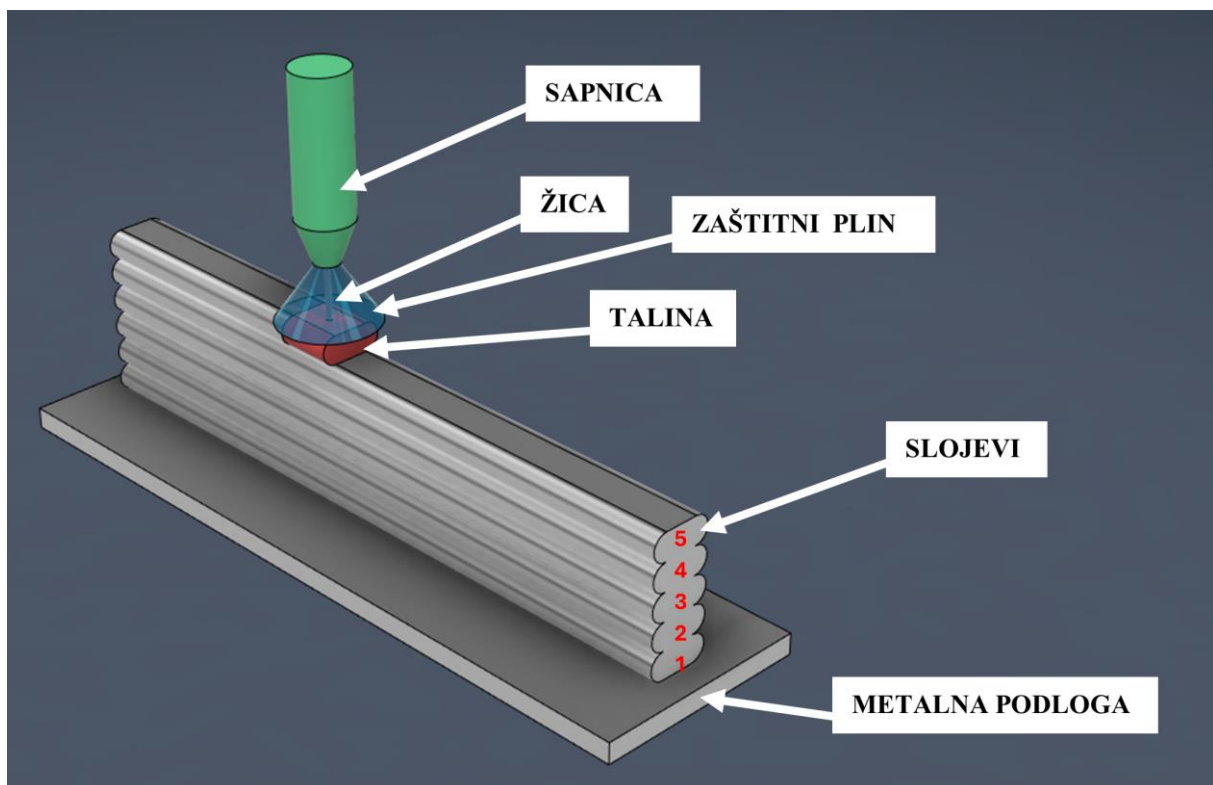
Općenito, ove tri skupine imaju isti postupak, ali se razlikuju po izvorima energije i brzinama taloženja. Na slici 7 lijevo vidljiv je postupak koji koristi elektronsku zraku, desno elektrolučno zavarivanje, a dolje je prikazan robotski sustav koji koristi laser i žicu [6].



Slika 7 Različiti WBAM postupci [10], [11], [12]

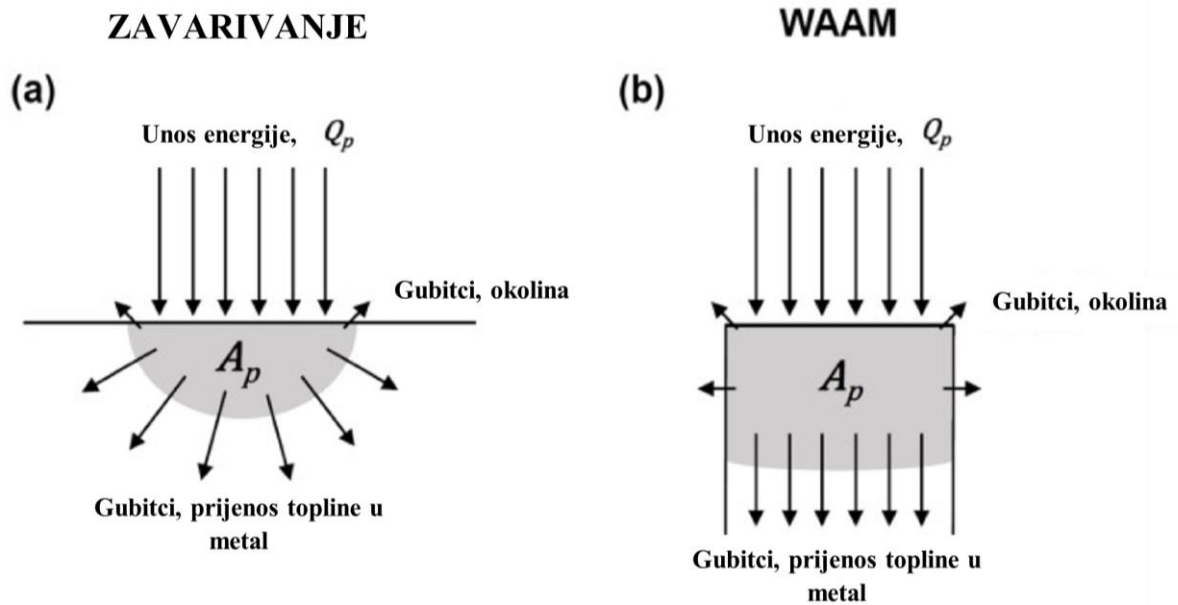
3. Aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom

Postupak aditivne proizvodnje električnim lukom i žicom (WAAM) postao je jedan od poznatijih postupaka aditivne proizvodnje u zadnjih nekoliko desetljeća. Pripada skupini postupaka direktnog taloženja izvorom energije (DED). WAAM je proizašao iz klasičnih tehnologija elektrolučnog zavarivanja, tj. navarivanja. U WAAM postupku, metalna žica se tali zagrijavanjem pomoću električnog luka, rastaljene kapljice se zatim talože u slojevima, sloj na sloj te se na taj načina formira željena struktura, proizvod. Slika 8 prikazuje jednostavnu skicu jednog klasičnog WAAM postupka [13].



Slika 8 Skica WAAM postupka [13]

WAAM je skupni naziv za sve procese aditivne proizvodnje temeljene na žici i elektrolučnom zavarivanju. Zbog dugogodišnjeg istraživanja elektrolučnog zavarivanja i navarivanja, znanje o korištenim materijalima i procesima može se prenijeti na aditivne postupke proizvodnje. Slika 9 prikazuje razliku između zavarivanja spojeva i WAAM -a. Vidljivo je da se kod klasičnog zavarivanja kondukcija topline pojavljuje u više smjerova, dok se kod aditivne proizvodnje najčešće kondukcija odvija u samo jednom smjeru (prema dnu, prvom izrađenom sloju) [14].

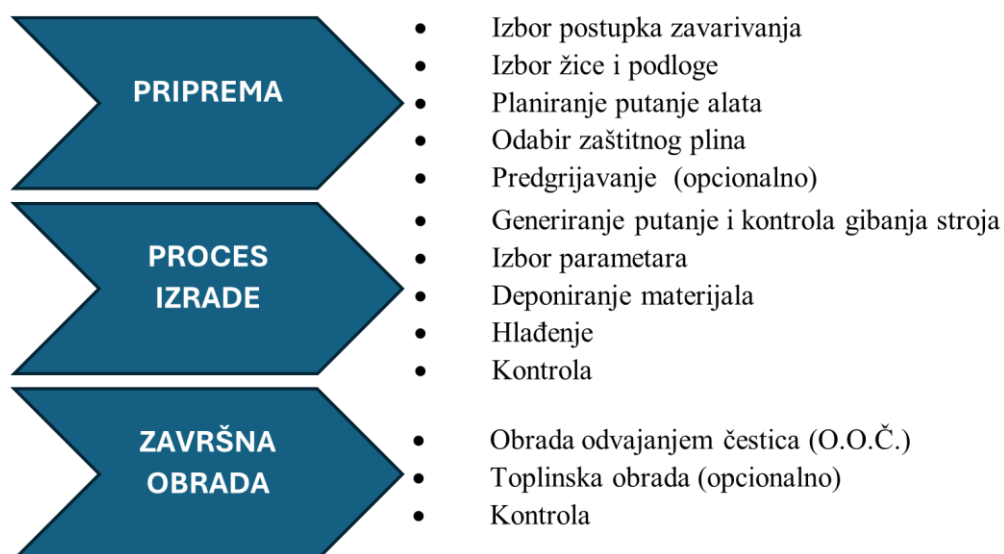


Slika 9 Razlike u unosu energije između WAAM-a i klasičnog zavarivanja [14]

Izrada metalnih struktura WAAM postupkom sastoji se od:

1. izrade CAD modela
2. planiranja putanja pištolja za zavarivanje sa pripadajućim parametrima zavarivanja
3. navarivanja – izrade strojnog dijela, najčešće pomoću robotskog sustava ili CNC (eng. *Computer numerical control*) stroja
4. završne obrade [14].

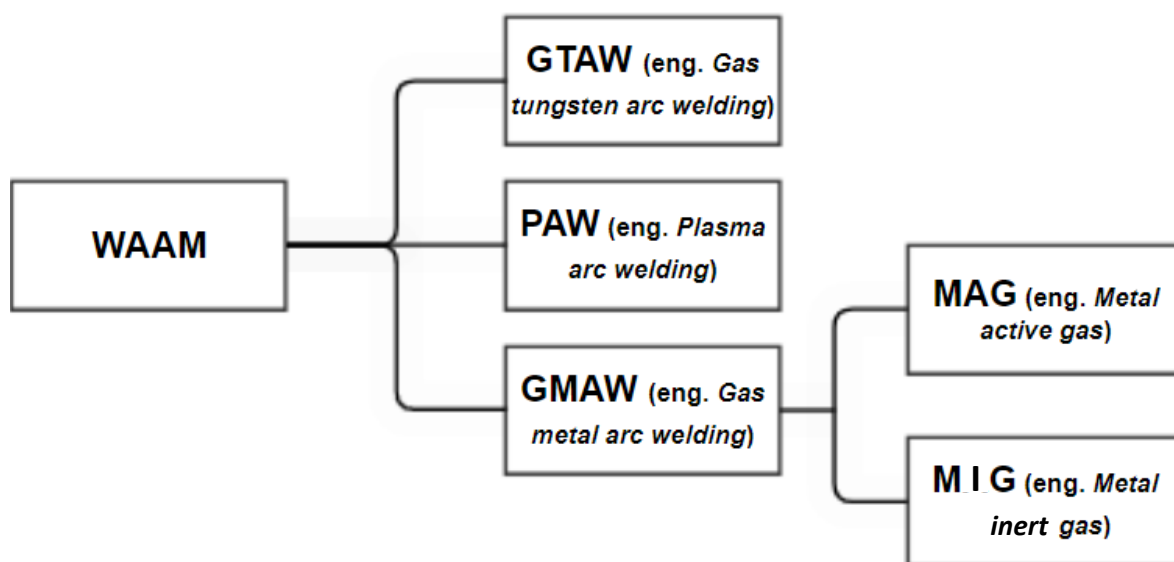
Gore nabrojani koraci su ključni koraci za provedbu WAAM postupka dok je na slici 10 moguće vidjeti detaljnije opis koraka potrebnih za izradu strojnog dijela WAAM postupkom.



Slika 10 Koraci WAAM postupka [13]

3.1. Vrste WAAM postupaka (GTAW, PAW, GMAW)

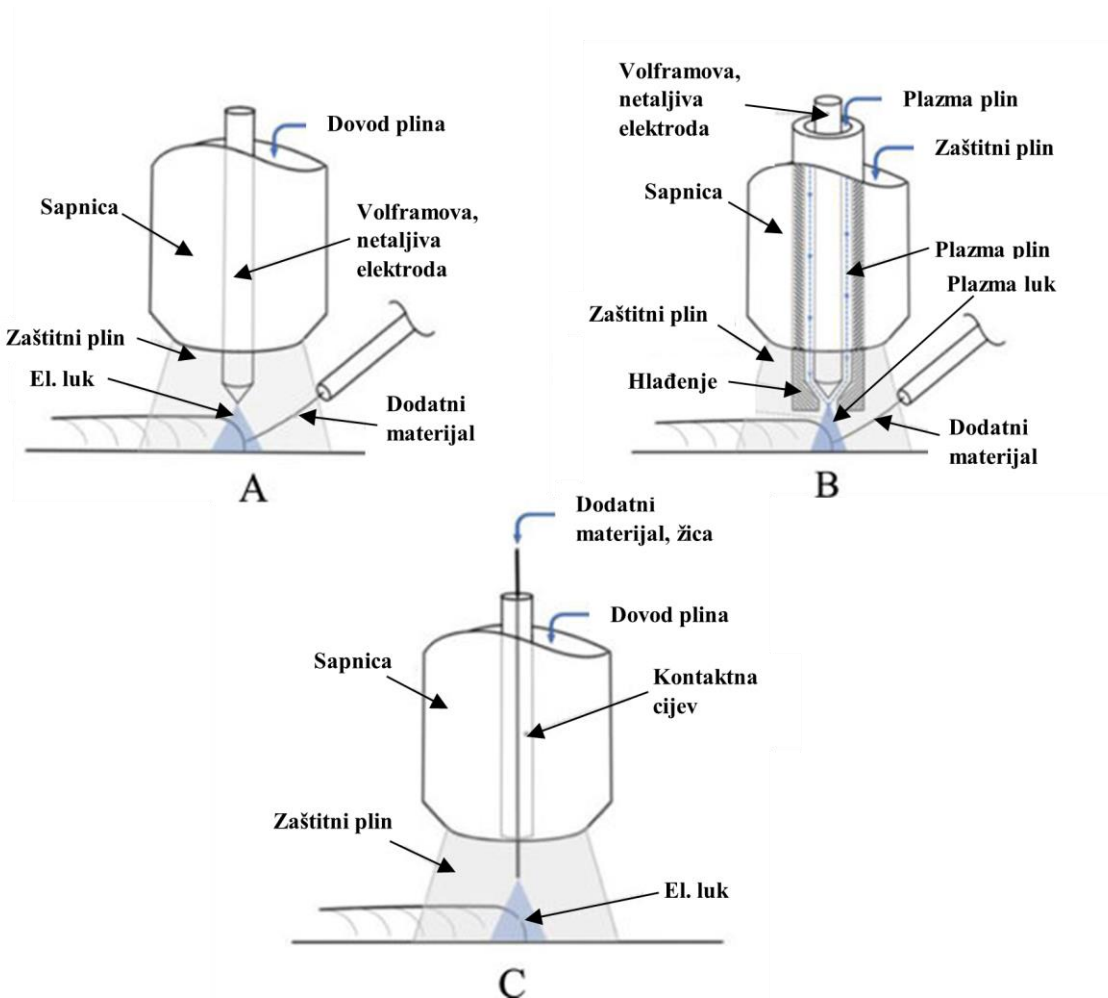
WAAM postupak se može podijeliti u tri glavne kategorije ovisno o vrsti elektrodoznog zavarivanja koja se koristi za taljenje žice i stvaranje 3D objekta sloj po sloj. Te tri vrste uključuju zavarivanje netaljivom volframovom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (TIG, eng. *Tungsten inert 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*). Nadalje GMAW se može podijeliti na zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (MIG, eng. *Metal inert gas*) i u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina (MAG, eng. *Metal active gas*). Ovakva podjela prikazana je na slici 11 [13].



Slika 11 Podjela WAAM postupaka [13]

U WAAM-u temeljenom na GTAW-u, električni luk se spaja između netaljive volframove elektrode i osnovnog materijala. Dodatni materijal, žica, dovodi se sa strane te se tali u električnom luku, a rastaljene kapljice metala talože se na osnovnom materijalu sloj po sloj kako bi se postigla željena geometrija. PAW je sličan GTAW-u po tome što se u obje metode koristi netaljiva elektroda. Međutim, PAW se razlikuje od GTAW-a u konstrukciji zavarivačkog pištolja te je učinkovitiji od GTAW-a jer je plazma luk uži. Luk se spaja između volframove elektrode i vodeno hladene sapnice. Inertni plin koji prolazi kroz sapnicu i zonu električnog luka se ionizira, tj. plin prelazi u stanje plazme. Plazma mlaz pretvara dodatnu žicu u rastaljene kapljice zbog svoje visoke temperature. Osim toga, koristi se zaštitni plin za zaštitu taline od kontaminacije. Međutim, početni su troškovi PAW-a vrlo visoki u usporedbi s GMAW-om i GTAW-om [13].

GMAW se sastoji od MIG i MAG postupka. U MIG postupku se koristi nereaktivni (inertni) zaštitni plin, tj. helij (He) ili argon (Ar). Kod MAG postupka se kao zaštitni plin koristi ugljični dioksid (CO₂) ili mješavina CO₂, kisika (O₂) i inertnih plinova (Ar, He). MIG se koristi za obojene metale, dok se MAG upotrebljuje za zavarivanje tzv. crnih metala. Pojednostavljena skica navedenih postupaka vidljiva je na slici 12, slika 12 A prikazuje GTAW, B PAW, a C GMAW postupak [13].



Slika 12 Skice GTAW, PAW o GMAW postupaka [15]

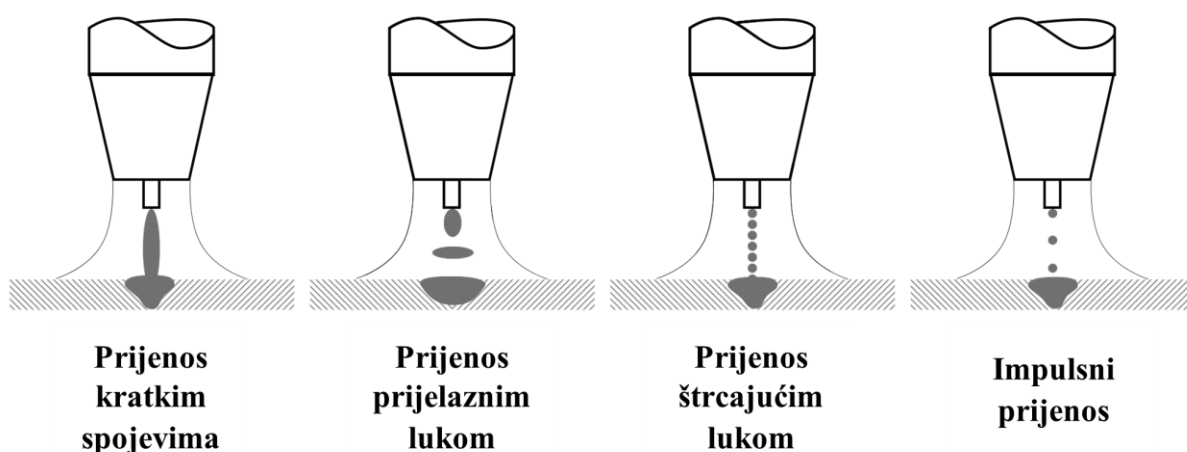
Količina deponiranog materijala u vremenu kod GMAW postupka je veća u usporedbi sa drugim WAAM metodama te je ova usporedba vidljiva u tablici 1 [13].

Tablica 1 Deponirani materijal u različitim WAAM postupcima [13]

| Metoda | GTAW | PAW | GMAW |
|----------------------------|------|-----|------|
| Deponirani materijal, kg/h | 1-2 | 2-4 | 7-8 |

GMAW ima četiri načina prijenosa metala, to su: prijenos metala kratkim spojevima, prijelaznim lukom, štrcajućim lukom, impulsnim prijenosom. Svaka od ovih metoda prijenosa metala ima karakteristična svojstva koja su povezana s jakosti struje zavarivanja, opremom i vrstom korištenog dodatnog materijala, elektrode [13].

Prijenos metala kratkim spojevima je „najhladniji“ oblik zavarivanja te se koristi vrlo nizak napon. U metodi prijenosa kratkim spojevima, žica elektrode stvara električni luk i dodiruje osnovni materijal te uzrokuje kratki spoj. To stvara malu kapljicu rastaljenog metala koja kaplje na spoj te se brzo skrućuje. Ova metoda je primjenjiva za tanje materijale. Prijenos metala prijelaznim lukom vrlo je slična prijenosu kratkim spojevima, pri kojoj žica elektrode stvara električni luk, dodiruje osnovni materijal i uzrokuje kratki spoj. Razlika je u tome što se žica duže zagrijava i stvara veliku količinu zavarenog metala koja prelazi na spoj. Ova metodom ograničena je na ravni i horizontalni položaj. Kod prijenosa štrcajućim lukom, male kapljice rastaljenog metala iz žice raspršuju se u zavareni spoj. Ovo je proces konstantnog napona koji šalje kontinuirani tok dodatnog materijala preko luka na osnovni materijal. Ova metoda koristi veliki unos topline, što nosi rizik probijanja na tanjim materijalima i omogućuje zavarivanje samo u ravnim i horizontalnim položajima. Prijenos metala impulsima zahtjeva poseban izvor napona koji pulsira. To omogućuje formiranje jedne kapljice rastaljenog metala na kraju žice, koja se zatim gura preko električnog luka na spoj. Kapljica se formira svakim pulsom. Pulsirajući prijenos minimizira prskanje, a izvođenje zavara u različitim položajima nije toliko ograničeno kao kod prethodne dvije metode. Ove metode ilustrirane su slikom 13 [16].



Slika 13 Načini prijenosa metala [16]

Značajno poboljšanje WAAM postupka postignuto je kada je uveden hladni prijenos metala (CMT, eng. *Cold metal transfer*). Ovakav prijenos metala temelji na prijenosu kratkim spojevima. Osmislila ga je austrijska tvrtka „Fronius“, a poznata je po niskom unosu topline i visokoj stabilnosti električnog luka. To se postiglo inovativnim sustavom za uvlačenje žice s digitalnim upravljačkim sustavom. Kada vrh žice elektrode dođe u kontakt s rastaljenim metalom, servomotor povlači dodatnu žicu, što rezultira rezanjem kapljica, dok se zavarivačka struja brzo smanjuje na gotovo nulu. To uzrokuje manji unos topline i manje prskanja tijekom taloženja materijala. Slika 14 prikazuje jedan takav sustav [13], [17].



Slika 14 CMT robotski sustav [17]

3.2. WAAM sustavi

Strojni dijelovi se obično izrađuju pomoću standardne zavarivačke opreme (uređaj, dodavač, pištolj) i pomoću industrijskih robota ili portalnim CNC strojevima. Izbor između robotskog i CNC sustava za WAAM postupak ovisi o specifičnim zahtjevima primjene, kao što su troškovi, preciznost, i fleksibilnost [18].

3.2.1. Industrijski roboti

U WAAM postupku, robotski sustavi omogućuju fleksibilnost i prilagodljivost potrebnu za promjene na tržištu i u globalnom ekonomskom okruženju. Robotski sustavi imaju prednosti u:

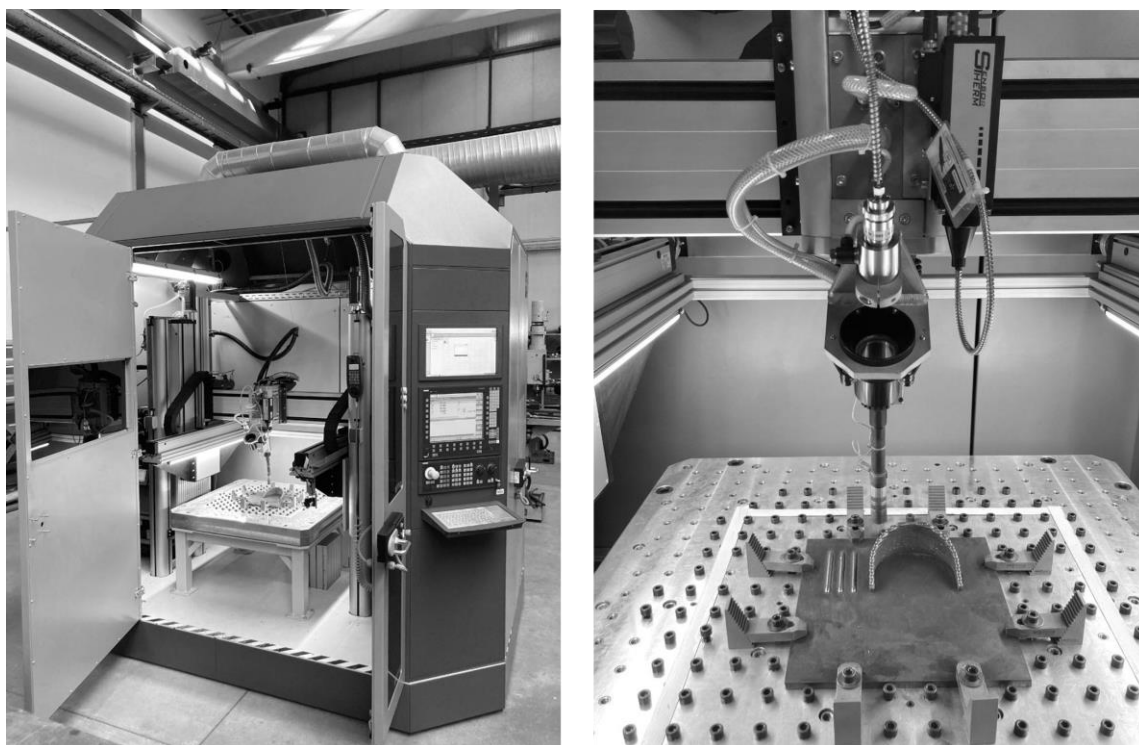
- rotaciji dijelova, roboti mogu lako rotirati dijelove, što je ključno za izradu složenih dijelova ili za obradu s više strana
- fleksibilnosti, roboti omogućuju brze promjene u proizvodnom procesu bez potrebe za velikim preinakama opreme
- nižim troškovima, troškovi robotskih sustava su niži u usporedbi s CNC sustavima, što ih čini ekonomičnijim izborom za određene primjene [18].

3.2.2. CNC portalni sustavi

CNC sustavi su preferirani kada je potrebna visoka preciznost i točnost. Prednosti CNC sustava uključuju:

- visoku preciznost, CNC sustavi postižu visoku razinu preciznosti i točnosti zbog svoje krutosti i stabilnosti
- dodatni procesi, CNC sustavi lakše integriraju dodatne procese kao što su valjanje, obrada odvajanjem čestica i kontrola
- stabilnost, zbog svoje konstrukcije, CNC sustavi su manje osjetljivi na smetnje i osiguravaju konzistentnu kvalitetu zavora [18].

Jedan ovakva CNC WAAM sustav vidljiv je na slici 15.



Slika 15 CNC WAAM sustav [19]

3.3. Parametri WAAM procesa

Parametri korišteni u WAAM postupku variraju ovisno o vrsti WAAM postupka i materijalu žice. U WAAM postupku, taloženje materijala temelji se na taljenju žice korištenjem električnog luka kao izvora topline za izradu ili popravak komponente. Tijekom taloženja materijala, temperatura između slojeva se povećava zbog unosa topline kako se dodaju daljnji slojevi. Procesni parametri ključni su za proizvodnju kvalitetnog strojnog dijela, tj. kvalitetne strukture bez defekata s zadovoljavajućim mehaničkim svojstvima. Ovi procesni parametri uključuju struju zavarivanja, napon, brzina dovođenja žice, brzinu kretanja zavarivačkog pištolja (brzinu zavarivanja), međuprolazna temperatura, vrijeme mirovanja između prolaza, sastav i protok zaštitnog plina, kut elektrode i podloge, promjer elektrode, unos topline, duljina slobodnog kraja žice itd. Ovi parametri različito utječu na svojstva WAAM proizvoda, te je potrebna odgovarajuća kombinacija ovih parametara za postizanje specifičnih ciljeva, tj. zadovoljavajućih mehaničkih svojstava, manje hrapavosti površine itd. [13].

3.3.1. Brzina dovođenja žice

Brzina dovođenja žice (WFS, eng. *Wire feed speed*) ključna je za kontrolu unosa topline. Povećanjem WFS raste visina zavara, ali se smanjuje njegova širina. Više energije je potrebno za taljenje žice pri većim brzinama dovođenja, što izravno utječe na geometriju zavara, čineći ga višim i užim [13].

3.3.2. Brzina kretanja zavarivačkog pištolja

Brzina kretanja zavarivačkog pištolja ili brzina zavarivanja značajno (TS, eng. *Torch travel speed*) utječe na mikrostrukturu i geometriju zavara. Veća brzina smanjuje unos topline, što utječe na širinu zavara više nego na njegovu visinu. Brža kretanja rezultiraju užim, ali višim slojevima taloženog metala, dok sporija kretanja omogućuju šire slojeve [13].

3.3.3. Unos topline

Unos topline ključan je za mikrostrukturu, mehanička svojstva i unutarnje pogreške. Može se izračunati kao $HI = \frac{\eta UI}{TS}$, gdje je η učinkovitost, U napon, I električna struja, TS brzina zavarivanja. Unos topline direktno utječe na taloženje i oblik zavara [13].

3.3.4. Temperatura predgrijavanja

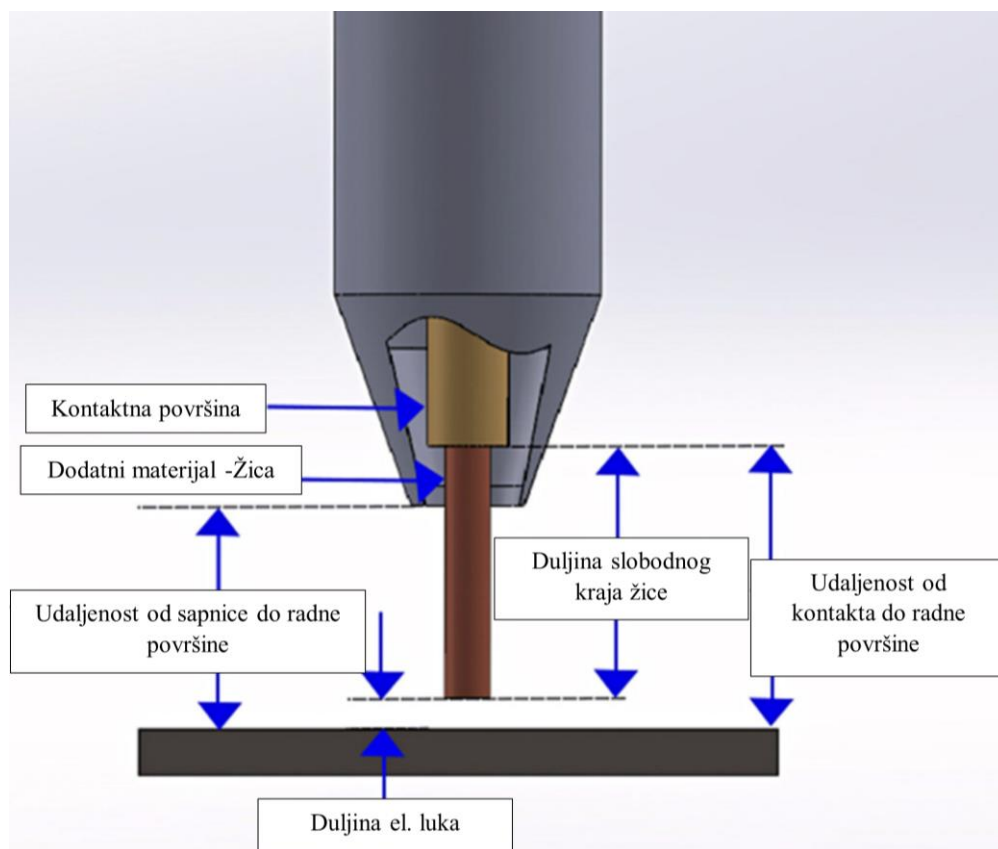
Prethodno zagrijavanje osnovnog materijala utječe na oblik taloženog materijala; povećava širinu zavora dok smanjuje njegovu visinu. Ovaj parametar osigurava bolju prilagodbu geometrije slojeva, smanjujući mogućnost deformacija [13].

3.3.5. Međuprolazna temperatura

Ključna za dobivanje željenog oblika završnog proizvoda. Potrebno je pravilno kontrolirati kako bi se poboljšala završna obrada površine i smanjila zaostala naprežanja. Kontrola ove temperature sprječava pregrijavanje i osigurava konzistentnu visinu slojeva [13].

3.3.6. Duljina slobodnog kraja žice

Udaljenost između kraja kontaktne površine i kraja žice. Povećava električni otpor, što utječe na taljenje žice i geometriju zavora. Dulja ekstenzija može rezultirati širim i nižim slojevima. Ovaj parametar i još neki vidljivi su na slici 16 [13].



Slika 16 Parametri sapnice [13]

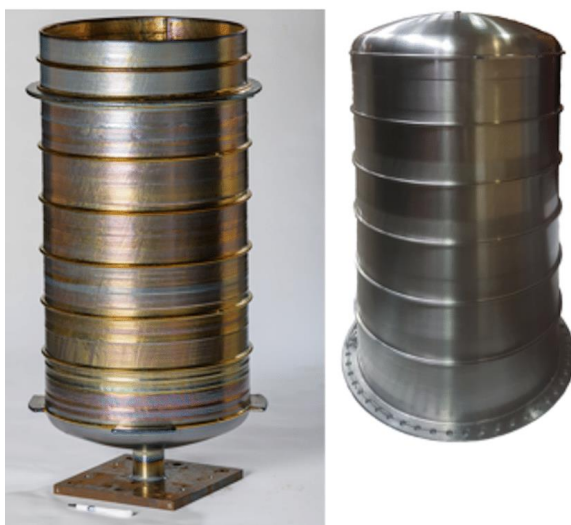
3.3.7. Duljina električnog luka

Udaljenost između vrha žice i radne površine. Kontrola duljine luka smanjuje hrapavost taloženog sloja. Dulji luk može rezultirati širim, ali manje preciznim slojevima, dok kraći luk omogućuje precizniju kontrolu nad oblikom slojeva [13].

3.4. Polazni materijali kod WAAM-a

Općenito, bilo koji dodatni materijal dostupan u obliku žice za zavarivanje može se koristiti za WAAM. Najčešći polazni materijali su aluminij, čelik, titan i legure na bazi nikla. Legure na bazi titana i nikla se sve više proučavaju zbog svoje primjene u zrakoplovnoj i svemirskoj industriji. Kao što je navedeno, širok raspon materijala može se koristiti u WAAM proizvodnji, a ako su materijali metalurški kompatibilni, mogu se i kombinirati za izradu komponenti od sustava više materijala [20], [21].

Legure na bazi titana sve se više proučavaju za primjenu u WAAM-u. Korištenje titanovih legura omogućuje smanjenje visokih troškova obrade koji se povezuju sa ovakvim materijalima. Legure na bazi titana imaju visoku vlačnu čvrstoću, dinamičku izdržljivost, specifičnu čvrstoću, žilavost, izvrsnu otpornost na koroziju i mogu podnositi visoke temperature bez značajnog gubitka mehaničkih svojstava, što ih čini pogodnima za zrakoplovnu industriju i biomedicinske primjene. Među različitim postupcima aditivne proizvodnje, WAAM omogućuje bolju kontrolu mikrostrukture ovih legura. Ti-6Al-4V je najkorištenija i najviše proučavana legura titana u WAAM-u [20]. Slika 17 prikazuje tlačnu posudu izrađenu WAAM postupkom od legure Ti-6Al-4V.



Slika 17 Tlačna posuda izrađena WAAM postupkom [22]

Niklove legure su materijali koji se najčešće koriste u zrakoplovnoj i nuklearnoj industriji, primjerice u plinskim turbinama. Ove legure karakteriziraju visoka vlačna čvrstoća pri visokim temperaturama i izvrsna otpornost na koroziju. Visoki troškovi, sposobnost naljepljivanja na oštrice alata i prisutnost abrazivnih karbidnih čestica čine legure na bazi nikla teškim za obradu odvajanjem čestica, pa WAAM postaje održiva tehnika za eliminaciju otpada materijala i smanjenje ukupnih troškova obrade ove legure [20].

Zavarivanje aluminijskih legura oduvijek je bilo problematično zbog formiranja sloja aluminijskog oksida i ponašanja pri skrućivanju. Korištenje WAAM-a i aluminijskih legura je ograničeno jer je poroznost veliki problem. Takva ograničenja su dovela do istraživanja učinka toplinske obrade na WAAM Al dijelove. Međutim, nisu sve Al legure toplinski obradive. Kao i kod zavarivanja aluminija, pri izradi dijelova preferira se korištenje izmjenične struje (AC, eng. *Alternating current*) kako bi se uklonio prirodni površinski oksidni film koji ima višu točku taljenja. Ako se to ne učini, rastopljeni ostaci ostaju zarobljeni unutar taline, što rezultira porama i unutarnjim pogreškama, koji drastično smanjuju mehanička svojstva dijelova [20].

Čelici su lako dostupne željezne legure koje se široko koriste u automobilskoj, brodograđevnoj, građevinskoj i plinskoj industriji, a u kombinaciji s WAAM-om mogu se koristiti za proizvodnju dijelova s ukupno niskim troškovima. Međutim, neki autori tvrde da je proizvodnja ovih jeftinih legura pomoću WAAM-a izvediva samo za velike dijelove složenih geometrija. Među čelicima, nehrđajući čelici pronašli su primjenu u kemijskim postrojenjima i nuklearnoj industriji, gdje su potrebni dijelovi s visokom otpornošću na toplinu i koroziju (npr. tlačni spremnici). Slika 18 prikazuje izradu velike komponente od visokčvrstog čelika za primjenu u avioindustriji [1], [20].



Slika 18 Izrada čeličnih proizvoda WAAM postupkom [1]

3.4.1. Nehrđajući čelici u WAAM-u

Nehrđajući čelici, kao što su austenitni, martenzitni i dupleks nehrđajući čelici, dobri su kandidati za WAAM zbog svojih izvrsnih mehaničkih svojstava i visoke otpornosti na koroziju. Nedavno je provedeno nekoliko istraživanja o aditivnoj proizvodnji nehrđajućih čelika pomoću električnog luka, područje istraživanja uključivalo je kemijski sastav dodatnih metala, parametre procesa, modeliranje procesa, nedostatke i pogreške, zaostala naprezanja i distorzije, mikrostrukturu i mehanička svojstva. Iz ovakvih se istraživanja dalo zaključiti da se mikrostrukturne značajke i mehanička svojstva nehrđajućih čelika znatno razlikuju nakon WAAM-a [23].

Neke od značajka WAAM-a nehrđajućeg čelika:

- visoka otpornost na koroziju, nehrđajući čelik pruža izvrsnu otpornost na koroziju, što ga čini idealnim za primjene u kemijskoj industriji i nuklearnim postrojenjima.
- Izvrsna mehanička svojstva, austenitni nehrđajući čelici, kao što su SS 304, SS 308LSi i SS 316L, pokazali su dobra mehanička svojstva koja uključuju visoku čvrstoću i duktilnost.
- Brzina ispisa, snaga el. luka WAAM-a omogućuje znatno veću brzinu ispisa u usporedbi s laserskim postupcima, što je korisno za bržu proizvodnju velikih dijelova [23].

Problematika WAAM-a nehrđajućeg čelika:

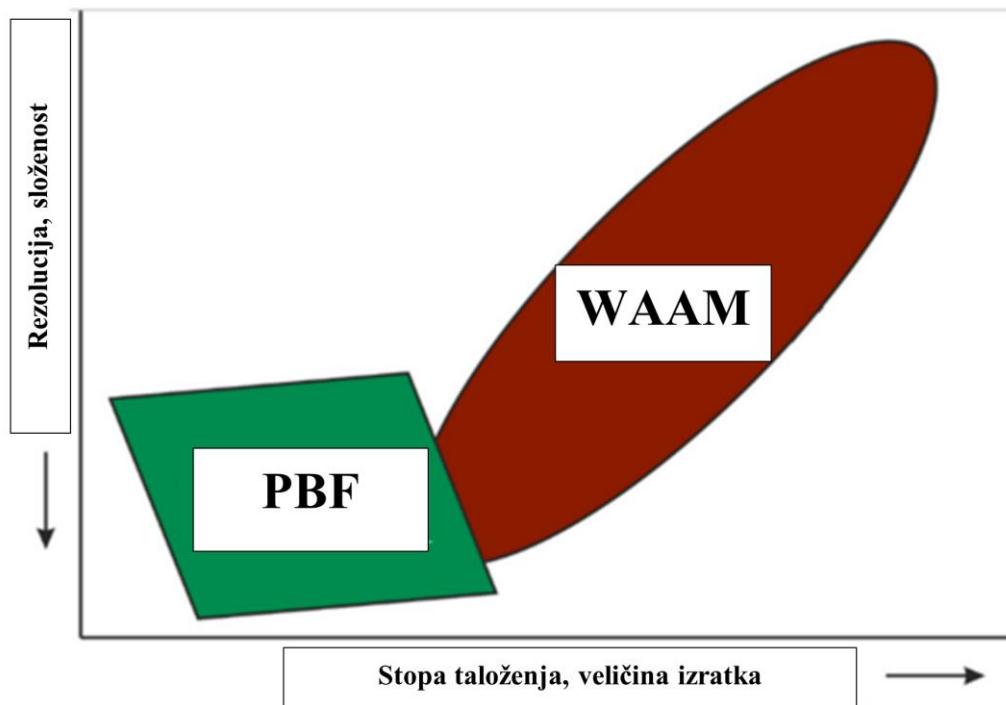
- Poroznost, kao i kod drugih materijala, poroznost je veliki problem kod WAAM-a nehrđajućeg čelika, što može rezultirati unutarnjim pogreškama i smanjenjem mehaničkih svojstava dijelova.
- Zaostala naprezanja i distorzije, WAAM proces može generirati zaostala naprezanja koja uzrokuju deformacije dijelova nakon proizvodnje. To može smanjiti dimenzionalnu točnost i mehaničku pouzdanost komponenti.
- Mikrostrukturne varijacije, različite temperature i brzine hlađenja tijekom procesa mogu rezultirati varijacijama mikrostrukture, što utječe na konačna svojstva dijelova.
- Toplinski unos i brzina hlađenja, toplinski unos i brzina hlađenja imaju značajan utjecaj na morfologiju, mikrostrukturu i mehanička svojstva WAAM komponenti [23].

Za razliku od postupaka koji koriste lasersku ili elektronsku zraku, čija su glavne značajke izrada komponenti složene geometrije, sloboda dizajna i bolja prilagodba, WAAM postupak je primarno osmišljen za smanjenje troškova izrade i vremena isporuke. U usporedbi s konvencionalnim postupcima obrade (npr. lijevanje, O.O.Č.), WAAM omogućuje značajne uštede materijala jer se konačni proizvod može izraditi s malo ili bez otpada materijala. U zrakoplovnoj industriji trošak se uvijek procjenjuje prema BTF omjeru (eng. *Buy to fly*). BTF označava omjer volumena početnog materijala (V_i) i volumena konačnog proizvoda (V_f). BTF omjer pokazuje koliko je puta veći volumen korišten za proizvodnju gotovog proizvoda u odnosu na volumen samog proizvoda. WAAM proces može omogućiti proizvodnju velikih proizvoda srednje složene geometrije s BTF omjerom manjim od 1,5. Slika 20 prikazuje usporedbu 3 različite komponente zrakoplova izrađene konvencionalnim obradama i WAAM postupkom i njihove troškove izrade [1], [25].

| Komponenta | Postupak obrade | BTF | Trošak izrade, € | Smanjenje troška |
|--------------|-----------------|------|------------------|------------------|
| Nosac krila | Konvencionalni | 6.5 | 8110 | - |
| | WAAM | 2.15 | 5750 | 29 % |
| Stajni trap | Konvencionalni | 12 | 18140 | - |
| | WAAM | 2.3 | 5600 | 69 % |
| Nosac pilona | Konvencionalni | 5.1 | 2800 | - |
| | WAAM | 1.5 | 2680 | 7 % |

Slika 20 Usporedba BTF omjera 3 različite zrakoplovne komponente [20]

U usporedbi s drugim postupcima aditivne proizvodnje za metale, WAAM ima niže brzine hlađenja i veći unos topline. To je korisno za većinu komercijalno dostupnih materijala. Također, WAAM se odlikuje znatno većom stopom taloženja materijala i nižim troškovima. Potencijalno neograničena veličina komponenti velika je prednost koja čini WAAM proces superiornim u odnosu na druge aditivne proizvodne procese. Slika 21 prikazuje usporedbu rezolucije i složenosti sa stopom taloženja i veličinom izratka kod WAAM-a i ostalih postupaka aditivne proizvodnje [1], [14], [25].



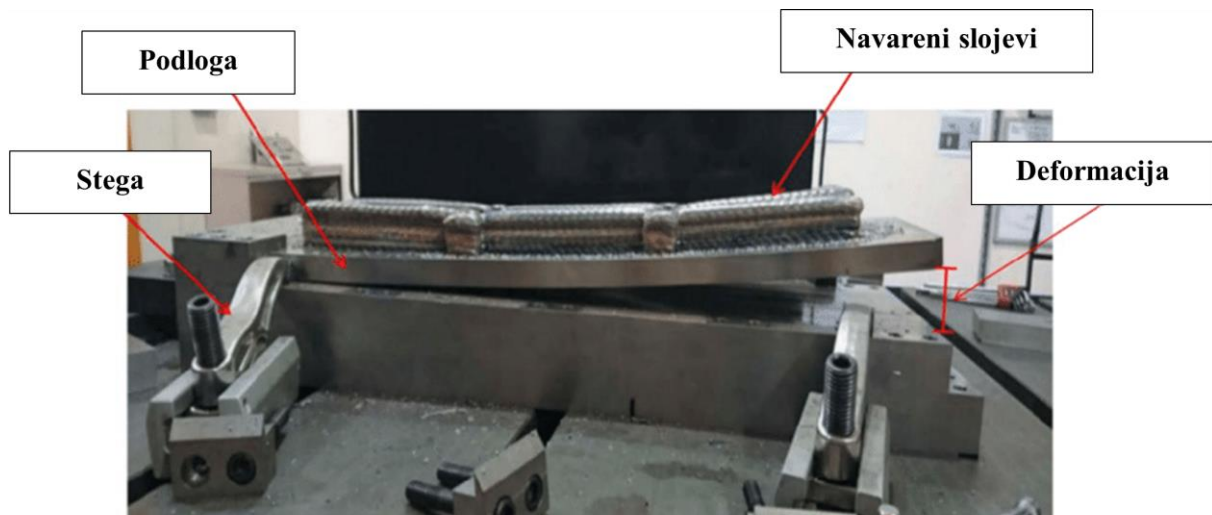
Slika 21 Usporedba WAAM-a i ostalih aditivnih tehnologija [14]

3.6. Problematika postupka

Jedan od glavnih nedostataka WAAM-a je hrapavost površine koja utječe na dimenzije i kvalitetu samog proizvedenog strojnog dijela. Kvaliteta površine ovisi o nekoliko ključnih parametara, među kojima su stabilnost električnog luka, temperatura između slojeva, brzina dovođenja žice, brzina zavarivanja, i konstantan omjer brzine dovođenja žice prema brzini zavarivanja. Drugo ograničenje WAAM procesa odnosi se na zaostala naprezanja u proizvedenom strojnom dijelu. Zaostala naprezanja generirana tijekom postupka često dovode do neprihvatljivih distorzija i značajnog pogoršanja mehaničkih svojstava. Zaostala naprezanja nastaju zbog nakupljanja ciklički ponavljanih toplinskih ekspanzija i kontrakcija. Općenito, nedostaci u WAAM procesu mogu se pojaviti iz brojnih razloga, kao što su loša strategija programiranja, nestabilna dinamika taline zbog loše postavljenih parametara, toplinske deformacije uzrokovane akumulacijom topline, utjecaj okoliša (poput kontaminacije plinom) i druge kvarove stroja. U osnovi, greške (defekti) u WAAM-u vrlo su slični onima u zavarivanju, poput poroznosti, pucanja, delaminacije i prskanja. Neki utjecaji WAAM procesa mogu utjecati na kvalitetu dijela i geometrijsku točnost. U daljnjem tekstu navedene su i opisane neke od čestih grešaka u WAAM postupku [25], [26].

3.6.1. Zaostala naprezanja

Kao i kod drugih postupaka aditivne proizvodnje, zaostala naprezanja su glavni uzrok distorzija i gubitka geometrijske točnosti kod WAAM komponenti. To je posljedica velikih toplinskih gradijenata tijekom ponovljenih procesa taljenja i hlađenja, što također utječe na mehanička svojstva i strukturu zrna materijala. Zaostalo naprezanje je naprezanje koje ostaje u materijalu nakon uklanjanja svih vanjskih opterećenja. Zaostala naprezanja koja rezultiraju iskrivljenjem komponente oslobađaju se kada se izrađena komponenta otpusti iz stezanja, ova pojava prikazana je slikom 22. Iako tehnologije naknadne obrade mogu smanjiti zaostala naprezanja, zaostale distorzije uzrokovane naprezanjima glavni su uzrok gubitka geometrijskih tolerancija. Stoga je kontrola i minimizacija deformacija i zaostalih naprezanja ključno područje istraživanja, a najbolji način za minimiziranje deformacija je regulacija akumulacije zaostalih naprezanja tijekom taloženja [26].

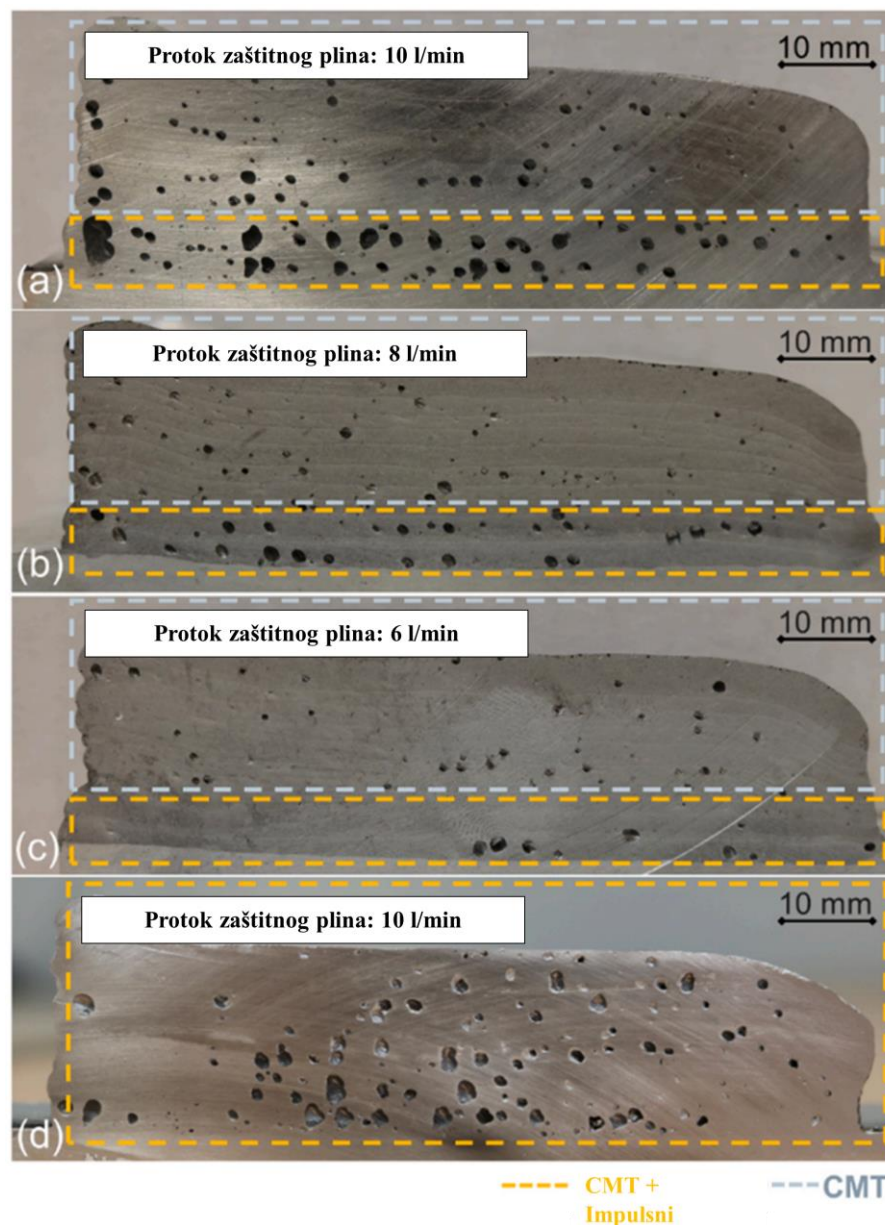


Slika 22 Rezultat zaostalih naprezanja [26].

3.6.2. Poroznost

Poroznost je još jedan uobičajeni pogreška koji je potrebno minimizirati u WAAM procesu, posebno kod specifičnih legura poput legura aluminija i titana. Poroznost rezultira komponentama s niskom vlačnom čvrstoćom zbog mikro-pukotina i smanjuje otpornost na zamor materijala zbog različitih veličina i oblika pora. Ova greška se općenito klasificira kao uzrokovana materijalom ili procesom. Poroznost uzrokovana materijalom se pojavljuje kada sirovine koje se koriste u WAAM procesu, uključujući žicu i podlogu, sadrže određeni stupanj površinske kontaminacije poput vlage, masnoće i drugih ugljikovodika. Ove kontaminacije se brzo apsorbiraju u talinu i nakon skrućivanja stvaraju poroznost. Poroznost uzrokovana procesom obično je nepravilnog oblika i

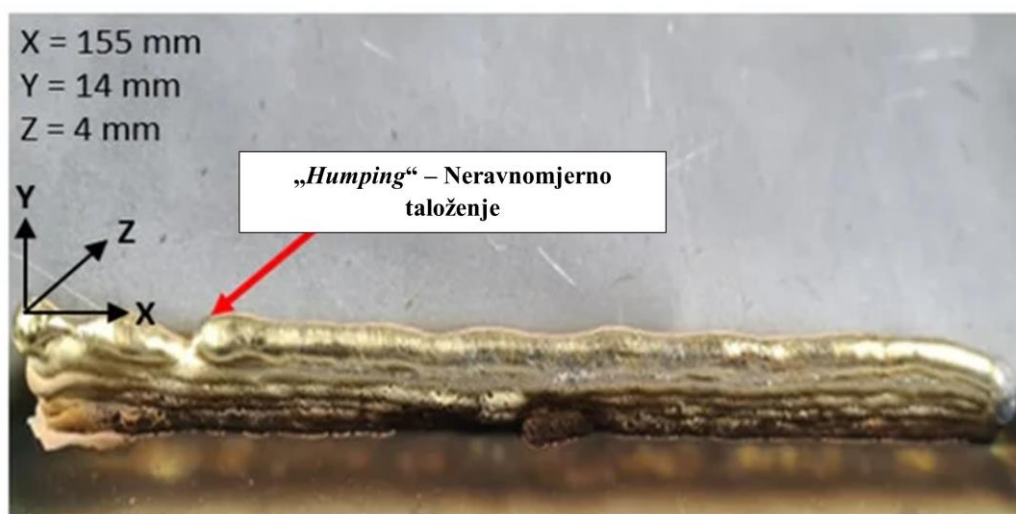
često je uzrokovana lošim planiranjem putanje alata za zavarivanje ili nestabilnim taloženjem materijala. Ako je putanja taloženja složena ili je proces proizvodnje promjenjiv, lako dolazi do nedovoljne fuzije ili izbacivanja kapljica rastaljenog materijala, što stvara rupe ili praznine u zahvaćenim područjima. Poroznost se može pojaviti kao sferične pore uzrokovane zarobljenim plinovima, nepravilno oblikovane pore zbog skupljanja tijekom skrućivanja, ili značajne pore uzrokovane kontaminacijom žice. Visoka razina poroznosti može značajno smanjiti ključna mehanička svojstva materijala i otežati standardizaciju procesa i komponenti, što ograničava komercijalnu primjenu WAAM-a. Da bi WAAM bio komercijalno održiv, potrebno je razumjeti, pratiti i smanjiti poroznost na prihvatljivu razinu. Slika 23 prikazuje poroznost aluminijske legure izrađene WAAM postupkom pri različitim parametrima procesa [26], [27].



Slika 23 Poroznost kod aluminijske legure pri različitim parametrima procesa [27]

3.6.3. Neravnomjerno taloženje

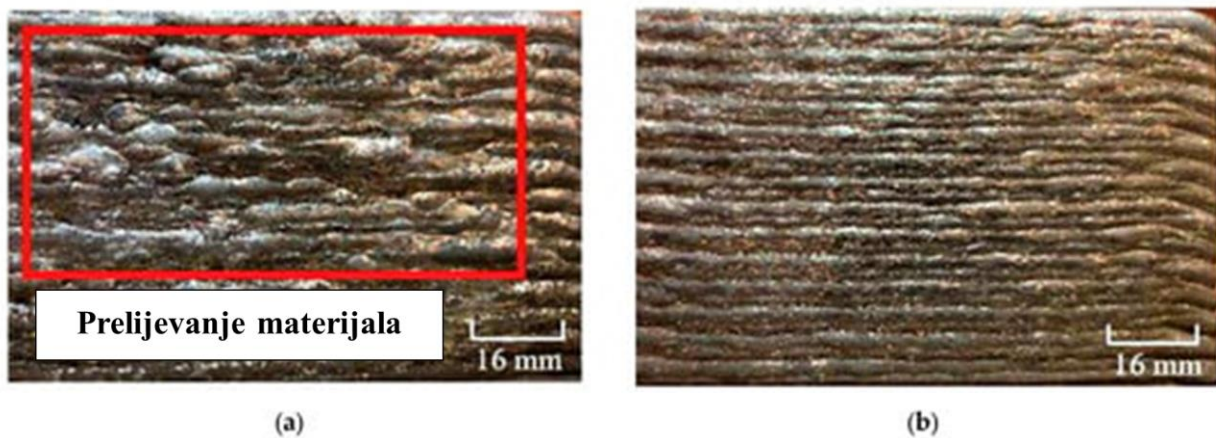
Neravnomjerno taloženje (eng. *Humping*) je uobičajena pojava u WAAM procesu, uglavnom uzrokovan neprikladnim omjerom brzine dovođenja žice (WFS) i brzine zavarivanja (TS). Ova pogreška utječe na daljnje taloženje materijala u procesu i pojavljuje se u obliku izbočina i udubljenja, kao što je prikazano na slici 24. Također se može definirati kao slijed ponovljenih valovitih deformacija zavarenog materijala. Ovaj problem se može riješiti korištenjem prikladnog omjera WFS/TS. Prema nekim autorima Da bi se izbjegla pojava "humpinga", omjer širine i duljine rastaljenog metala mora biti iznad određene kritične vrijednosti [13], [26].



Slika 24. Neravnomjerno taloženje [13]

3.6.4. Prelijevanje materijala

Prekomjerno prelijevanje materijala može se pojaviti u WAAM proizvodima, ponekad zbog prekomjerne akumulacije topline. Ova pogreška nastaje kao posljedica visoke sposobnosti širenja rastaljenog metala kada je vrijeme između polaganja slojeva prekratko, kao što je prikazano na slici 25a. To može rezultirati urušavanjem, što povećava potrebnu količinu dodatne obrade. Ovaj problem se može izbjeći korištenjem prikladnog vremena između polaganja slojeva. Dakle, sljedeći sloj treba se taložiti tek kada prethodni sloj postigne odgovarajuću temperaturu, tj. korištenjem razumnog vremena između slojeva, kao što je prikazano na slici 24b [13].

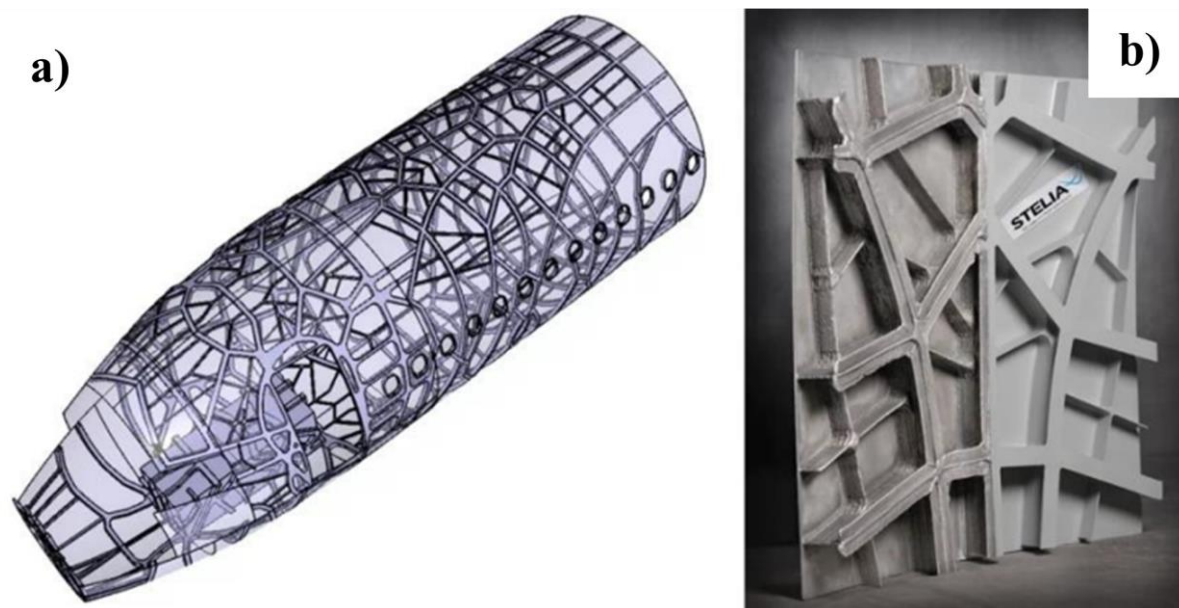


Slika 25 Prelijevanje materijala (a) i struktura bez prelijevanja [13]

3.7. Primjeri proizvoda izrađenih WAAM postupkom

Opisane značajke i posebnosti WAAM-a čine ga pogodnim za izradu velikih dijelova srednje složenih geometrija, izrađenih od visokokvalitetnih materijala. Stoga je ova tehnologija pogodna za primjenu u industrijama kao što su zrakoplovna, svemirska, automobilska, obrambena industrija, izrada kalupa i alata, brodograđevna industrija i nuklearno-energetska industrija [20].

Zrakoplovna i svemirska industrija neprestano traži nove tehnologije za izradu pouzdanih i laganih zrakoplovnih dijelova s dobrim mehaničkim svojstvima i visokim omjerom čvrstoće prema težini (specifičnom čvrstoćom). Ovi materijali pomažu unaprijediti zrakoplovnu industriju poboljšanjem učinkovitosti, smanjenjem emisije ugljika, povećanjem veličine i sigurnosti tereta te ispunjavanjem ciljeva industrije u pogledu sigurnosti i pouzdanosti. Glavno područje primjene WAAM-a u zrakoplovnoj industriji je stvaranje velikih dijelova poput spremnika, okvira i nosivih konstrukcija. Na Slici 26 vidljive su aluminijske konstrukcije koje je WAAM postupkom izradila tvrtka STELIA Aerospace, 26a prikazuje model konstrukcije cijelog trupa zrakoplova, a 26b prikazuje jedan izrađeni segment [28].



Slika 26 Aluminijske komponente zrakoplova izrađene WAAM-om [28]

Slika 27 prikazuje nosivu komponentu zrakoplova od titanove legure (Ti-6Al-4V) izrađenu WAAM-om korištene na Boeing 787 Dreamlineru, vidljiva je ista komponenta prije i poslije završne obrade na petosnom CNC obradnom centru kako bi se proizvela gotova komponenta [29].



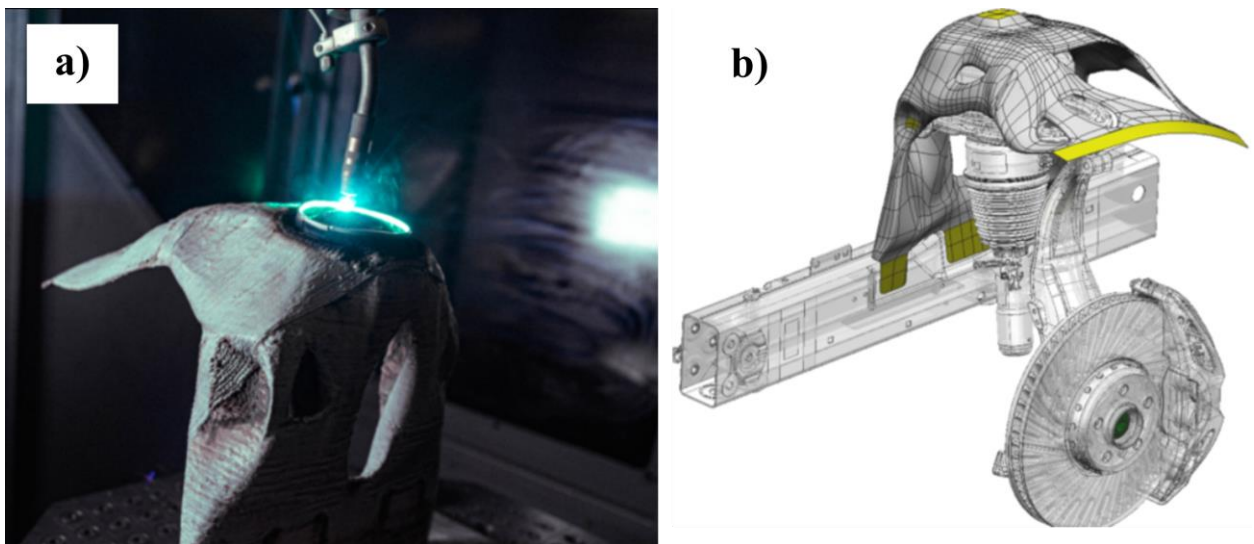
Slika 27 Komponenta zrakoplova 787 Dreamliner izrađena WAAM postupkom [29]

WAAM postupak je također pronašao primjenu u svemirskoj industriji. Jedan od primjera ove primjene je na slici 28, koja prikazuje spojni prsten rakete izrađen WAAM postupkom od aluminijske legure [30].



Slika 28 Spojni prsten rakete [30]

WAAM tehnologija našla je primjenu i u automobilskoj industriji, posebice u proizvodnji velikih metalnih komponenti i alata. BMW grupa koristi WAAM tehnologiju, koja se pokazala osobito prikladnom za veće komponente koje se koriste u dijelovima karoserije, pogona i ovjesa, kao što je, primjerice, nosač amortizera koji je vidljiv na slici 29, 29a prikazuje komponentu u izradi, a 29b model montirane komponente u sklopu. BMW Grupa planira proširiti primjenu WAAM-a u serijskoj proizvodnji vozila u bliskoj budućnosti [31].



Slika 29 BMW komponenta izrađena WAAM postupkom[31]

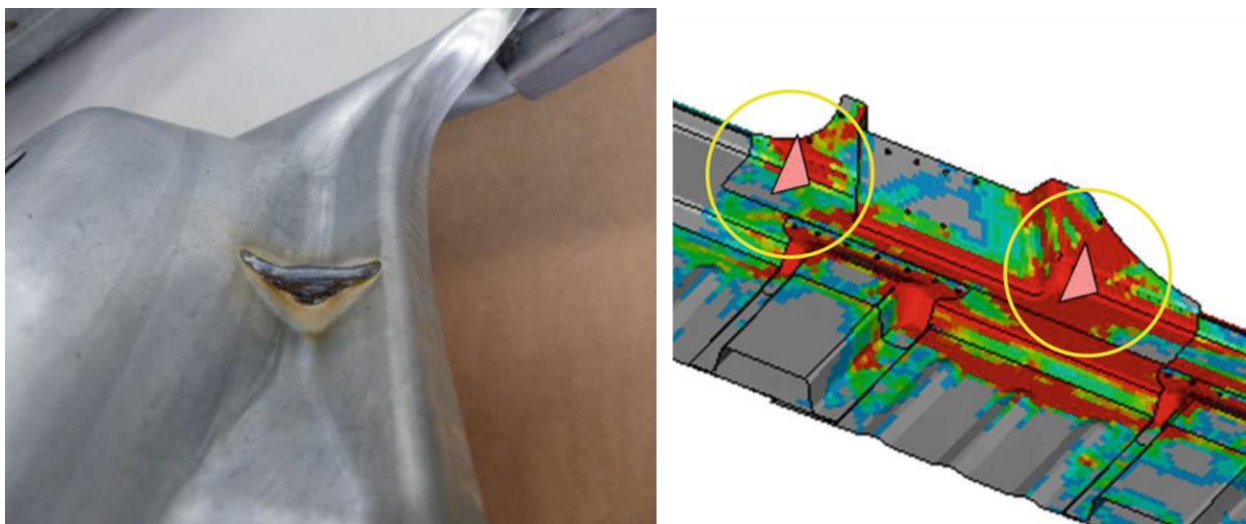
WAAM tehnologija postaje sve značajnija u brodogradnji zbog svojih prednosti u proizvodnji velikih i složenih metalnih komponenti. Brodogradnja je industrija koja zahtijeva izradu velikih dijelova, poput strukturnih komponenti brodova, koje često moraju izdržati ekstremne uvjete u

morskom okruženju. Slika 30 prikazuje dio turbopunjača brodskog dizel motora izrađenog WAAM postupkom. Radi se o turbini izrađenoj od nehrđajućeg čelika [32].



Slika 30 Turbina brodskog dizel motora izrađena WAAM-om [32]

WAAM se ne koristi samo za proizvodnju novih dijelova, već se može koristiti i za modifikaciju ili prenamjenu postojećih dijelova. Jedan primjer modifikacije je u vidu pojačanja automobilskih dijelova što je prikazano slikom 31. Nadalje, WAAM se može koristiti za lokalizirani popravak i reparaturu kalupa i drugih dijelova, kao što je vidljivo na slici 32 [14], [33].



Slika 31 Ojačanja karoserije automobilom izrađeno WAAM tehnologijom [33]



Slika 32 WAAM i reparatura kalupa [34]

4. Eksperimentalni rad

Zadatak eksperimentalnog dijela ovog rada bio je pomoću automatiziranog MIG postupka, koristeći žicu za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika, izraditi dvije strukture (zida) navarivanjem sloj po sloj, primjenjujući različite procesne parametre. Ti parametri uključivali su različite brzine, napone i struje zavarivanja uz pažljivu kontrolu međuprolazne temperature. Analiza geometrije izrađenih proizvoda provedena je 3D skeniranjem, što je omogućilo procjenu hrapavosti površine, jednog od poznatih nedostataka WAAM postupka. Cilj eksperimentalnog dijela rada bio je razumjeti kako različiti procesni parametri utječu na geometrijske karakteristike izrađenih struktura, uključujući hrapavost površine. Na kraju rada provedena je analiza dobivenih rezultata te je izveden zaključak koji je omogućio bolje razumijevanje odnosa između procesnih parametara i konačne kvalitete proizvoda.

4.1. Korištena oprema, materijali i metode

Kao polazni materijal odabrana je žica za zavarivanje austenitnih nehrđajućih čelika ER 308Lsi promjera 1 mm. Prema normi HR EN ISO 14343-A, oznaka ove žice je G 19 9 Lsi. Vlačna čvrstoća navara dobivenih navedenom žicom je 510 MPa za strukture od punog metala, istezanje je 30%, a udarni rad loma iznosi 80 J na 20 °C. Na Slici 33 prikazana je korištena žica za zavarivanje, dok slika 34 prikazuje kemijski sastav iste žice.



Slika 33 Korišteni polazni materijal – žica

KEMIJSKI SASTAV ŽICE ER 308Lsi

| Tip žice | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni |
|----------|---------|-----------|-----------|---------|---------|-------------|------------|
| ACX 605 | <=0.030 | 0.60-1.00 | 1.00-2.00 | <=0.030 | <=0.030 | 19.50-22.00 | 9.00-11.00 |

Slika 34 Kemijski sastav žice ER 308Lsi [35]

Za sam postupak navarivanja korišten je uređaj za zavarivanje Fronius TransSteel 3000 Pulse/FSC. TransSteel 3000 Pulse je višenamjenski MIG/MAG uređaj za zavarivanje dizajniran da zadovolji potrebe različitih zavarivačkih procesa. Ovaj uređaj je pogodan za upotrebu na gradilištima, u radionicama, te u različitim industrijama poput poljoprivredne, metaloprerađivačke i automobilske industrije. Dodatno, TransSteel 3000 Pulse omogućuje preciznu kontrolu zavarivačkih parametara, poput dužine luka i dinamike luka, što zavarivačima omogućuje optimizaciju kvalitete zavara. Tablica 2 prikazuje tehničke karakteristike uređaja, dok je na slici 35 prikazan izgled samog uređaja za zavarivanje [36].

Tablica 2 Tehničke karakteristike uređaja Fronius TransSteel 3000 Pulse [36]

| Tehničke karakteristike uređaja Fronius TransSteel 3000 Pulse | |
|---|--------------------|
| Napon napajanja | 380 / 400 V |
| Tolerancija napona napajanja | -10 / + 15 % |
| Min. jakost struje zavarivanja | 10 A |
| Maks. jakost struje zavarivanja | 300 A |
| Jakost struje/Radni ciklus, 10 min/40 °C | 300 A / 40 % |
| Jakost struje/Radni ciklus, 10 min/40 °C | 280 A / 60 % |
| Jakost struje/Radni ciklus, 10 min/40 °C | 240 A / 100 % |
| Razina zaštite | IP23 |
| Dimenzije | 747 x 300 x 497 mm |
| Masa | 34,64 kg |



Slika 35 Fronius TransSteel 3000 Pulse

Za samo vođenje zavarivačkog pištolja uređaja za zavarivanje TransSteel 3000 Pulse pri navarivanju slojeva korišten je uređaj za automatizirano pravocrtno vođenje gorionika Promotech Rail Bull, vidljiv na slici 36. Rail Bull je uređaj za vođenje zavarivačkog pištolja, dizajniran za izvođenje sučeonih i kutnih zavora, s mogućnošću oscilacije zavarivačkog pištolja. Ovaj uređaj koristi se na krutim ili polufleksibilnim tračnicama koje se mogu pričvrstiti na feromagnetne i neferomagnetne materijale, omogućujući rad na ravnim ili zakrivljenim površinama. Rail Bull podržava više položaja zavarivanja, uključujući horizontalne, vertikalne i nadglavne položaje, što

ga čini izuzetno svestranim za različite primjene, kao što su brodogradnja i izrada spremnika pod tlakom. Tablica 3 prikazuje tehničke karakteristike navedena naprave za vođenje [37].



Slika 36 Promotech Rail Bull [37]

Tablica 3 Tehničke karakteristike naprave Rail bull [37]

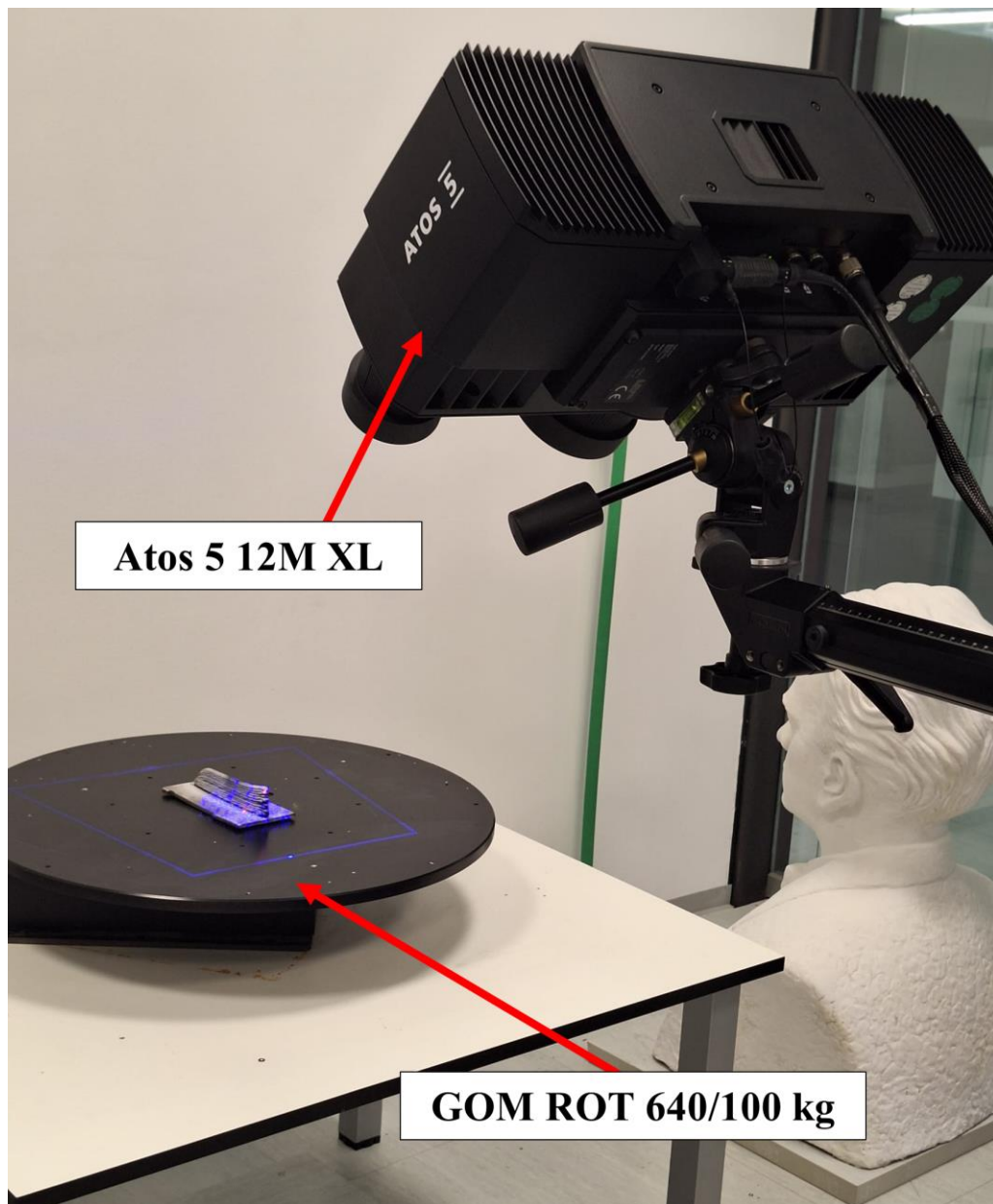
| Tehničke karakteristike uređaja Rail bull | |
|--|--|
| Napon napajanja | 1~ 115–230 V, 50–60 Hz 42 V, 50–60 Hz |
| Snaga | 100 W |
| Položaji zavarivanja | PA, PB, PC, PD, PE, PF, PG |
| Prihvat pištolja | 16 – 35 mm |
| Min. radijus zakrivljenih radnih komad | 5000 mm |
| Min. debljina radnog komada | 5 mm |
| Horizontalna brzina | 0 – 120 cm/min |
| Vertikalna brzina | 0 – 110 cm/min |
| Masa | 20 kg |

Za kontrolu međuprolazne temperature korišten je SKF TKTL 20 ThermoLaser termometar, koji omogućuje korištenje kao kontaktni termometar. Ovaj prijenosni, lagani i jednostavan za korištenje infracrveni termometar, proizveden od strane SKF-a, dizajniran je za precizne termalne inspekcije u različitim tehničkim i netehničkim primjenama te uključuje opciju mjerenja kontaktne temperature. Na Slici 37 prikazan termometar korišten u eksperimentalnom dijelu rada [38].



Slika 37 SKF TKTL 20 ThermoLaser

Za analizu topografije površine uzorci su skenirani pomoću 3D optičkog skenera ATOS 5 12M XL s rotacijskim stolom GOM ROT 640/100 kg, ova dva uređaja vidljiva su na slici 38. ATOS 5 serija je industrijski mjerni sustav dizajniran za precizno i brzo 3D skeniranje u zahtjevnim uvjetima. Ovi sustavi pružaju visoku razlučivost i kvalitetu podataka, omogućujući detaljno skeniranje složenih geometrija, uključujući male radijuse i oštre rubove. Zahvaljujući snažnom izvoru svjetlosti i niskoj razini šuma, ATOS 5 osigurava precizne rezultate čak i u teškim radnim uvjetima, a robusno industrijsko kućište štiti uređaj od prašine i vode. Ovaj sustav koristi optičke kabele za brzi prijenos podataka, što omogućuje učinkovito skeniranje velikih volumena [39], [40].



Slika 38 Atos 5 12M XL i GOM ROT 640/100 kg

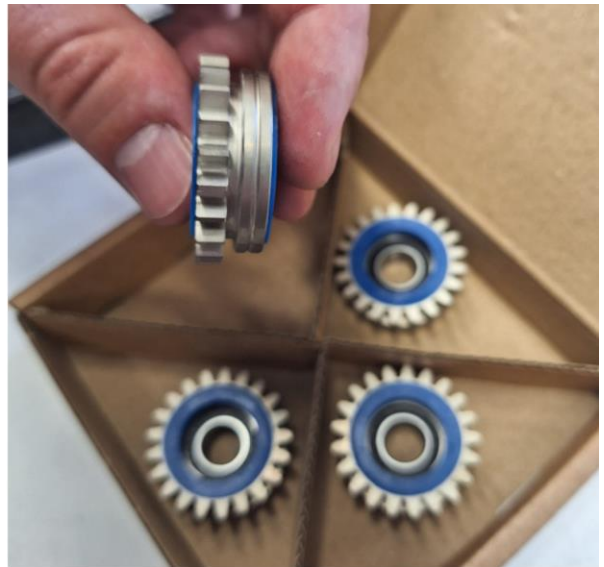
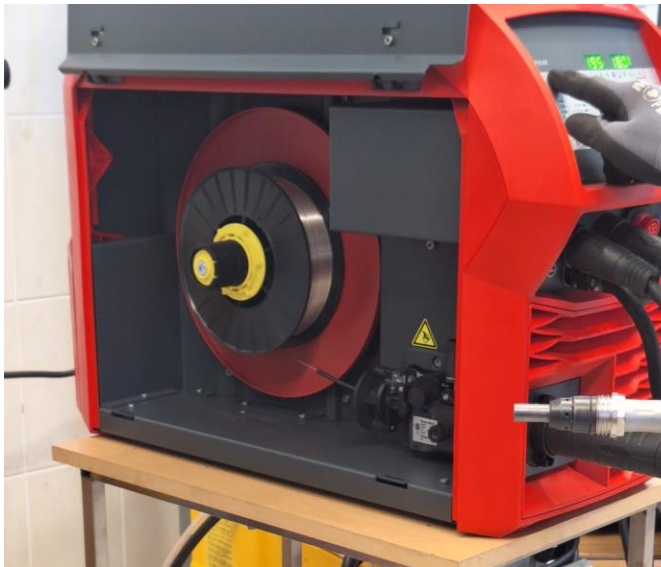
Za obradu podataka nakon skeniranja (STL datoteke, eng. *Standard Tessellation Language*) i izračun vrijednosti površinske hrapavosti korišten je računalni program Mountains Premium 9. Mountains 9 je napredni računalni program za analizu površina, koji se koristi za obradu i analizu podataka dobivenih iz 3D profilometara, mikroskopa i drugih instrumenata za mjerenje površina. Omogućuje vizualizaciju površinske topografije u 3D-u, detaljnu analizu hrapavosti površine te filtriranje i odvajanje različitih površinskih značajki. Podržava višeskalnu analizu i automatizaciju zadataka putem skriptiranja. Također, nudi mogućnost izrade detaljnih izvještaja koji uključuju grafičke prikaze i statističku analizu, što ga čini korisnim u različitim industrijama. [41].

4.2. Postupak navarivanja slojeva

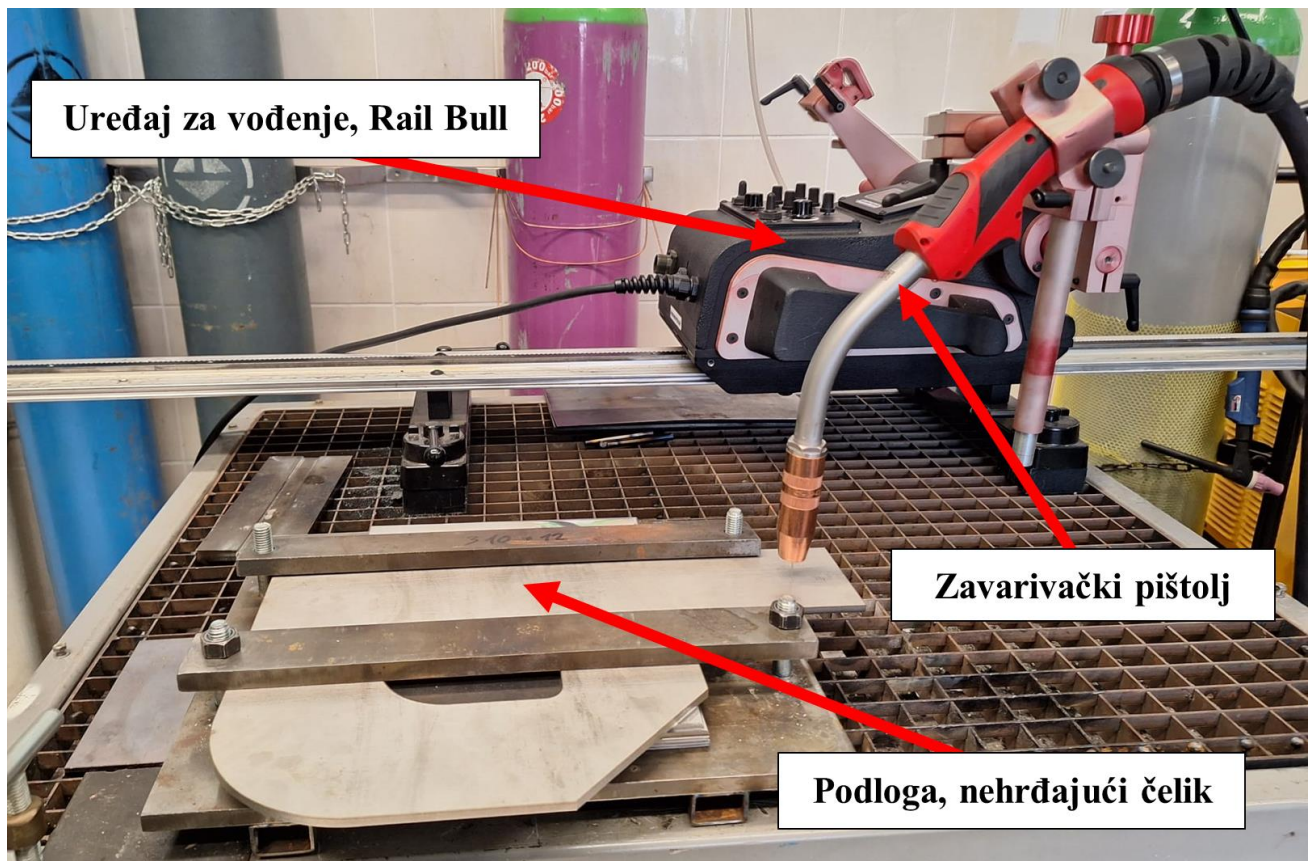
Postupak navarivanja slojeva, odnosno WAAM postupak, proveden je u laboratoriju za tehnike spajanja i alatne strojeve Sveučilišta Sjever.

4.2.1. Priprema

Prije same izrade uzoraka MIG navarivanjem bilo je potrebno odabrati podlogu na koju će se navariti prvi sloj. Odabrana je radna podloga od nehrđajućeg čelika, koja je potom stegnuta i učvršćena na stolu za zavarivanje. Također, bilo je potrebno umetnuti žicu u uređaj za zavarivanje te promijeniti kotačiće koji vode žicu i sapnicu za žicu promjera 1 mm, ovaj dio pripreme vidljiv je na slici 39. Nakon ove pripreme, zavarivački pištolj postavljen je u uređaj za vođenje i pozicioniran na željeno mjesto na kojem će se navariti prvi sloj, što je prikazano slikom 40. Slika 40 isto tako prikazuje i radnu podlogu od nehrđajućeg čelika.



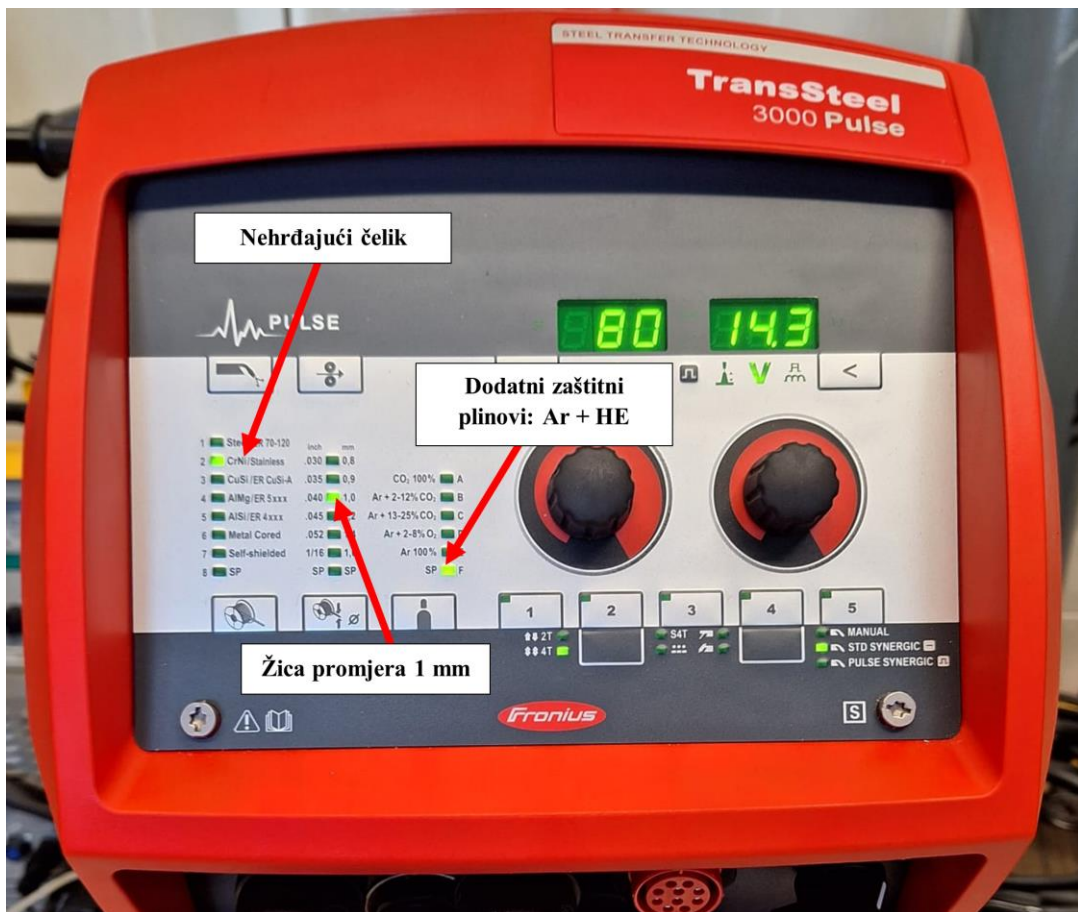
Slika 39 Umetanje žice i kotačića za vođenje u uređaj za zavarivanje



Slika 40 Pozicija za navarivanje prvog sloja

Kao zaštitni plin u ovom postupku odabrana je mješavina inertnih plinova Argona i helija u omjeru 50:50, koja je u skladu s predloženim zaštitnim plinovima za MIG zavarivanje nehrđajućih čelika. Protok zaštitnog plina namješten je na 16 l/min.

Na sučelju zavarivačkog uređaja TransSteel 3000 Pulse odabrani su zavarivački parametri; dodatni materijal, promjer žice i vrsta zaštitnog plina. Odabrani je nehrđajući čelik kao dodatni materijal, promjer žice od 1 mm, dok je za zaštitni plin odabrana opcija dodatni zaštitni plinovi. Prijenos metala u eksperimentu vršen je kratkim spojevima. Izbor parametara na sučelju navedenog uređaja prikazan je slikom 41.



Slika 41 Izbor parametara na sučelju uređaja za zavarivanje

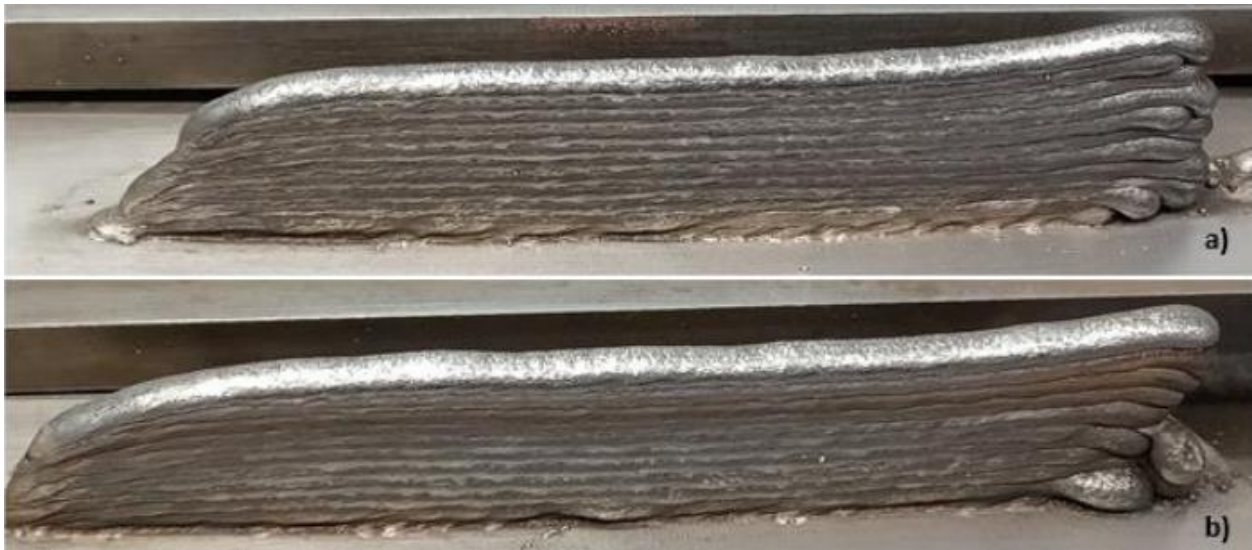
Parametar brzine zavarivanja biran je na sučelju uređaja za vođenje Rail Bull. Te je izbor ovog parametra vidljiv na slici 42.



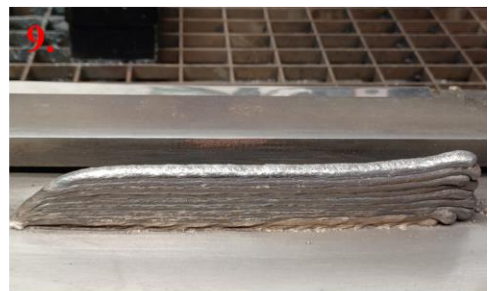
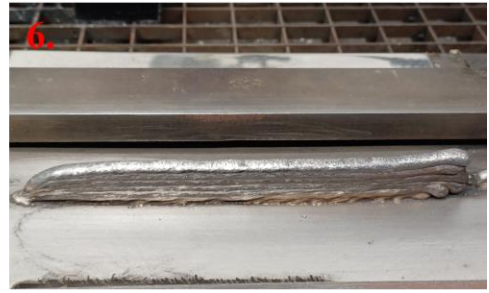
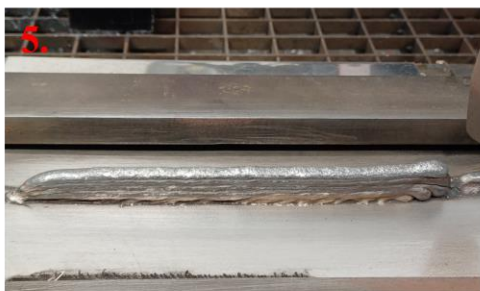
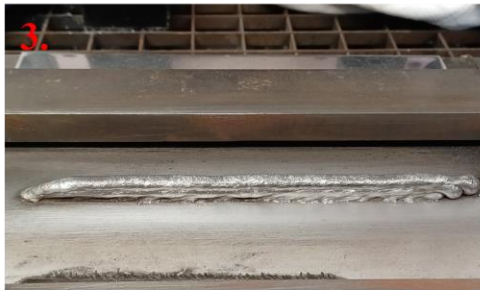
Slika 42 Namještanje brzine zavarivanja

4.2.2. Navarivanje slojeva, parametri procesa

Izrađene su dvije zidne strukture, svaka s različitim parametrima zavarivanja: naponom, jakosti električne struje i brzinom zavarivanja. Udaljenost sapnice od radne podloge ili od prethodnog sloja iznosila je 3 mm te se nakon svakog prolaza ručno korigirala na uređaju za vođenje. Slika 43 prikazuje izrađene uzorke WAAM postupkom, 43a prikazuje uzorak 1, a 43b uzorak 2. Slikom 44 prikazana je „gradnja“ strukture, uzorka 1 sloj po sloj, sa svakim slojem vidljivim, a slikom 45 uzorka 2 s određenim slojevima. Temperatura između svakog prolaza kontrolirana je već spomenutim kontaktnim termometrom i nije smjela prelaziti 100 °C, što je prikazano na slici 46. Između svakog sloja bilo je potrebno očistiti izrađeni sloj od nečistoća i oksida kako bi se sljedeći sloj kvalitetnije zavarilo i kako ne bi došlo do grešaka i slabosti između slojeva.



Slika 43 Uzorci nakon izrade WAAM postupkom



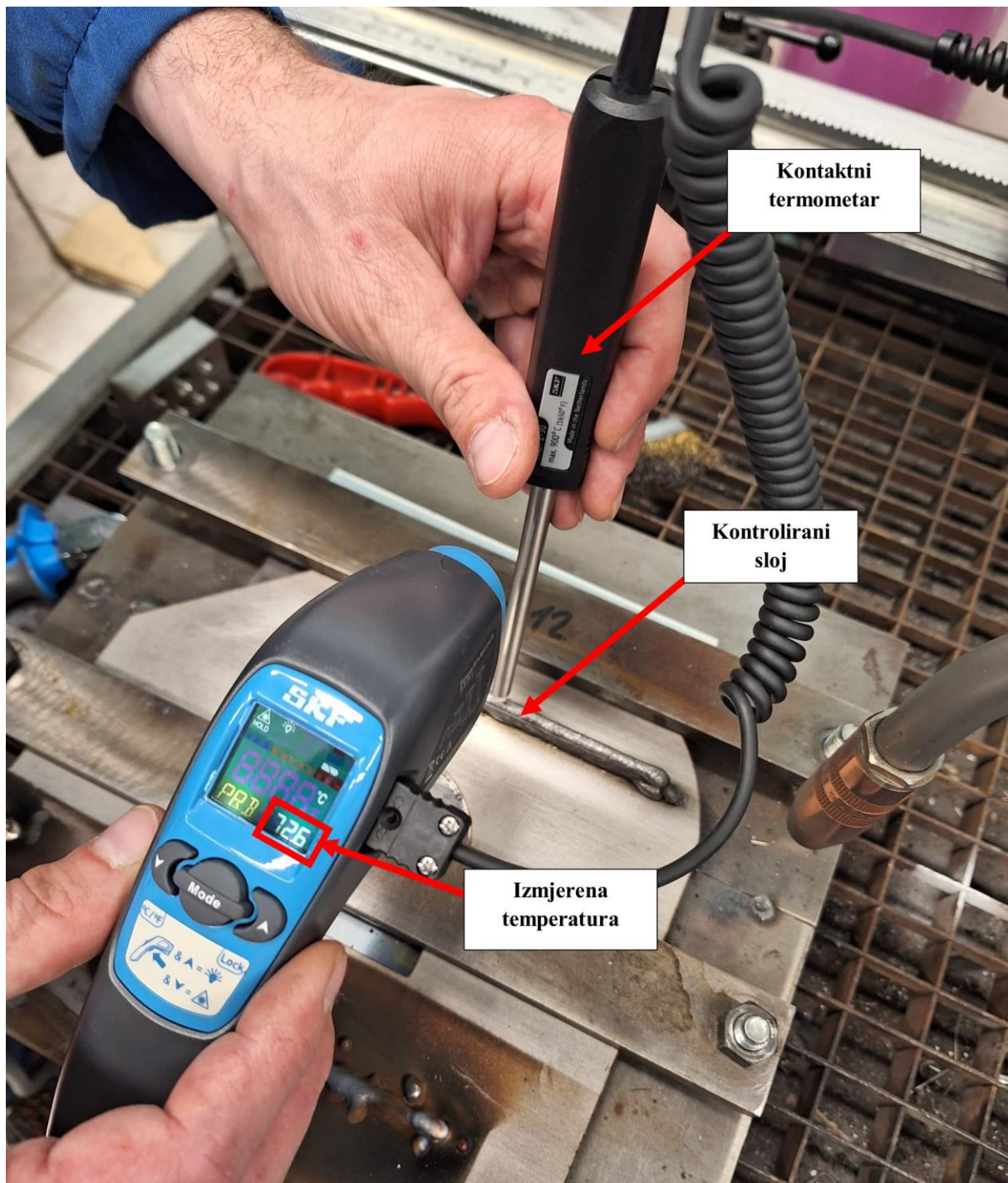
Uzorak 1

Slika 44 Izrada uzorka 1 sloj po sloj



Uzorak 2

Slika 45 Izrada uzorka 2 sloj po sloj



Slika 46 Mjerenje međuprolazne temperature

Tablica 4 prikazuje različite parametre navarivanja za dva izrađena uzorka. Prikazane su vrijednosti brzine zavarivanja, prosječne električne struje i prosječnog napona za svaki navareni sloj. Uzorak 1 izrađen je od 11 navarenih slojeva, dok je uzorak 2 izrađen od 12 slojeva. U prvom prolazu kod uzorka korištena je manja brzina zavarivanja od ostatka prolaza, a kod uzorka 2 je u prvom prolazu korištena veća brzina zavarivanja od ostalih prolaza.

Tablica 4 Parametri navarivanja po sloju/prolazu

| Sloj/Prolaz | Uzorak 1 | | | Uzorak 2 | | |
|-------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------------------|--------------------|
| | Brzina zavarivanja, cm/min | Prosječna jakost el. struje, A | Prosječni napon, V | Brzina zavarivanja, cm/min | Prosječna jakost el. struje, A | Prosječni napon, 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 |

Iz prikazanih parametara izračunat je unos topline za svaki uzorak prema već spomenutom izrazu: $HI = \frac{\eta UI}{TS}$. Prosječni unos topline izračunat na temelju svih slojeva u zidu 1 iznosio je 3,3 kJ/cm, dok je u zidu 2 iznosio 3,221 kJ/cm.

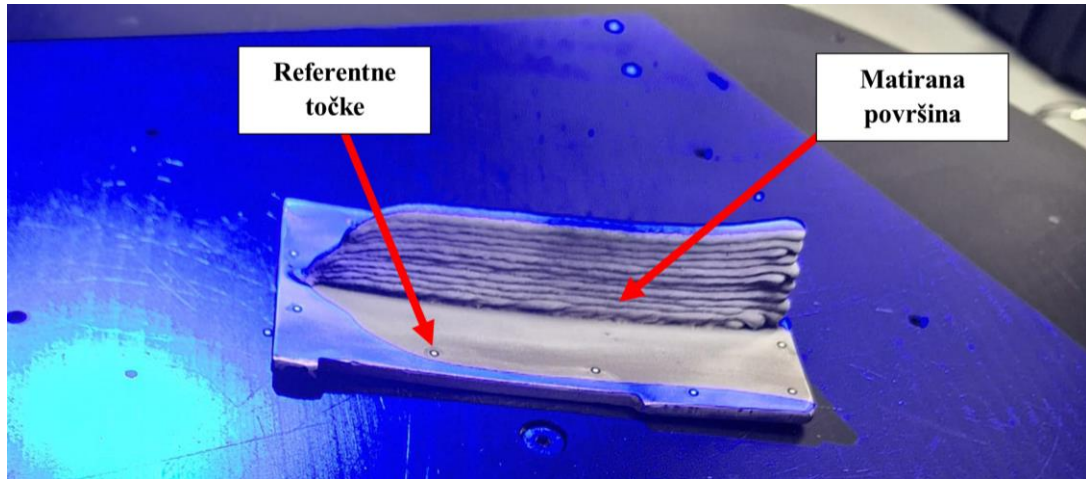
4.3. Analiza topografije površine

Nakon izrade uzoraka WAAM postupkom provedena je analiza topografije površine, pomoću 3D optičkog skenera ATOS 5 12 M XL u Metalskoj jezgri Čakovec. Prije skeniranja na površinu uzorka nanošeno je sredstvo (sublimacijski sprej) za matiranje površine koje olakšava skeniranje i onemogućuje refleksiju, jedno ovakvo sredstvo vidljivo je na slici 47.



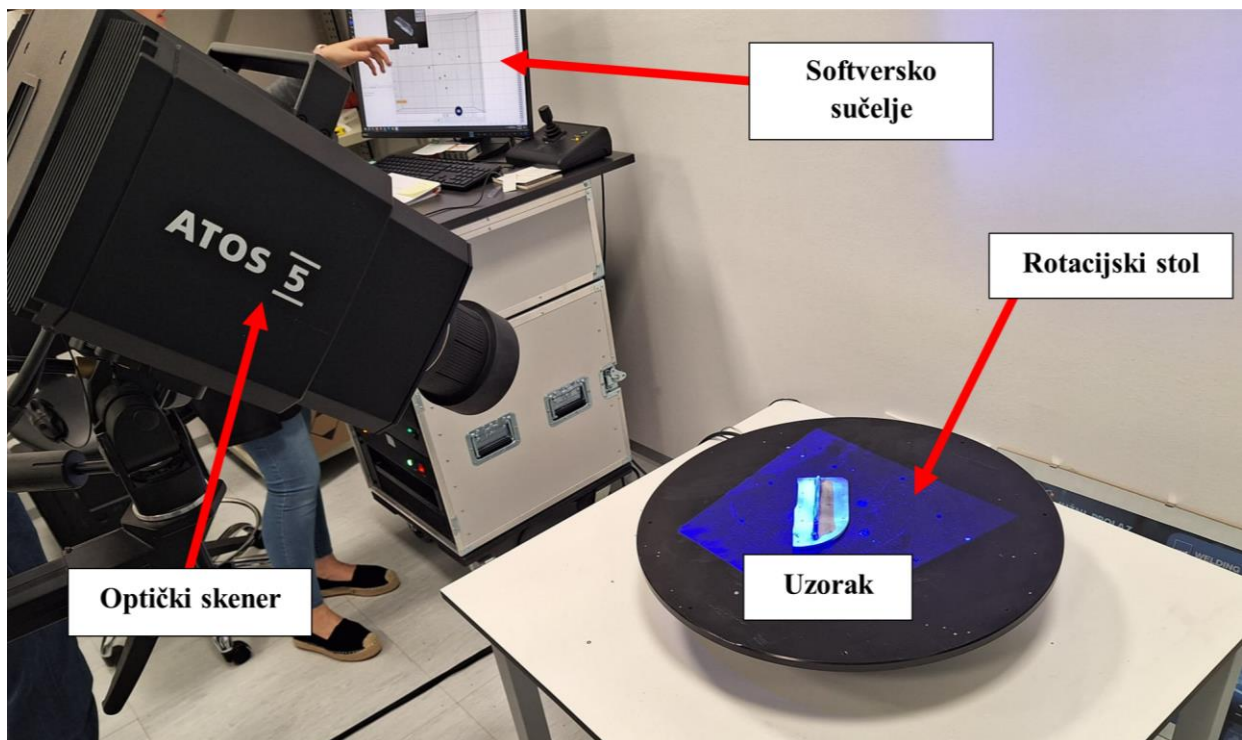
Slika 47 Sublimacijski sprej [42]

Također, na samu površinu uzorka zalijepljen su naljepnice za 3D skeniranje koje služe kao referentne točke tijekom 3D skeniranja. Nakon ovakve pripreme uzorci su postavljeni na rotacijski stol GOM ROT 640/100 kg, koji tijekom postupka skeniranja rotira uzorak te tako omogućuje lakše i stabilnije skeniranje samih uzoraka. Tijekom skeniranja odmah je moguće vidjeti skenirane površine u sučelju računalnog programa GOM Inspect. Slikom 48 prikazan je pripremljen uzorak.



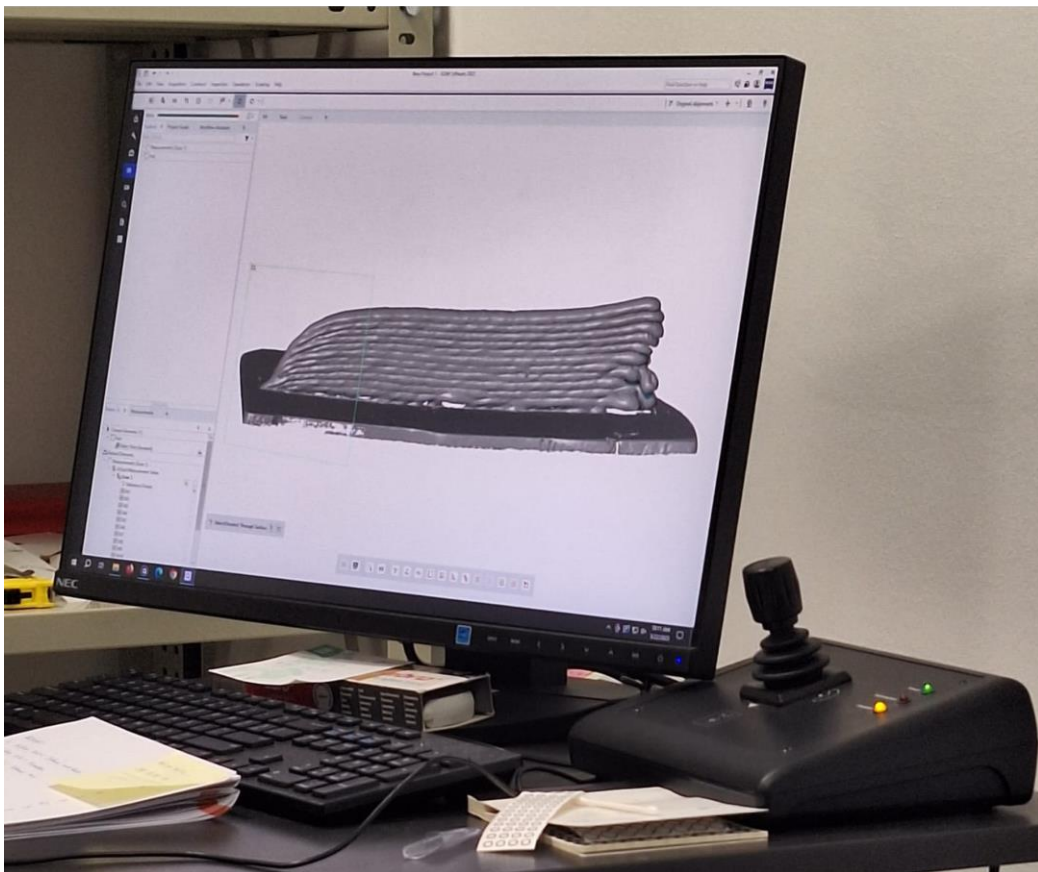
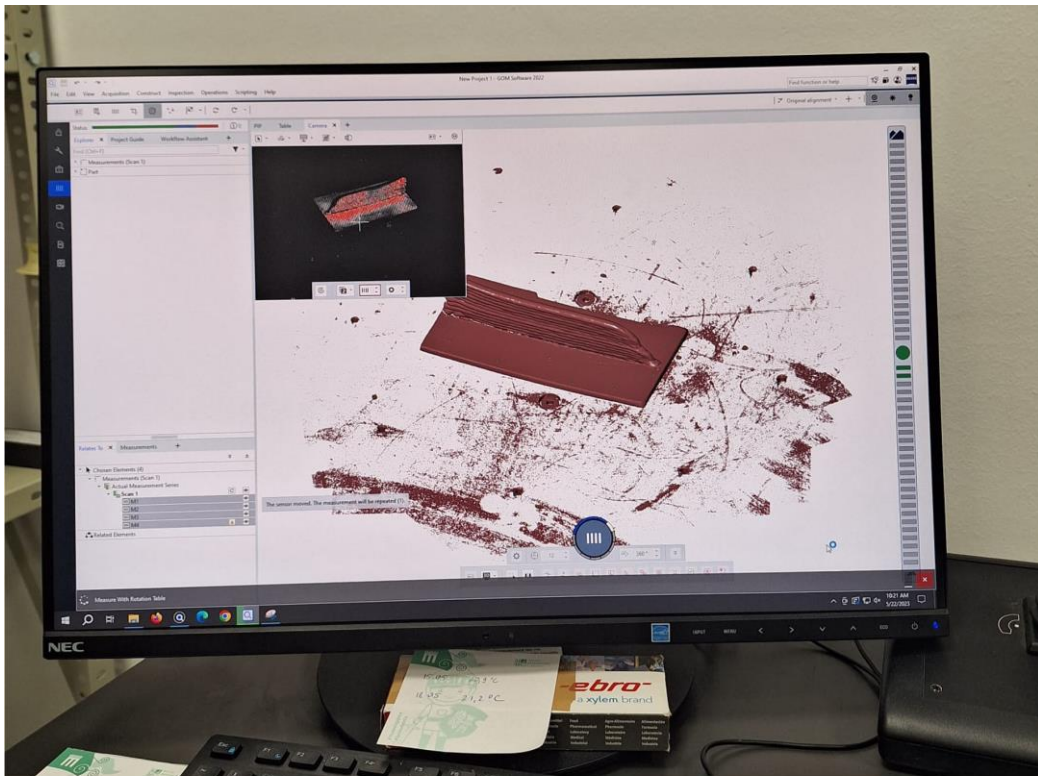
Slika 48 Uzorak pripremljen za 3D skeniranje

Slika 49 prikazuje postupak 3d skeniranja i položaj uzorka tijekom skeniranja.



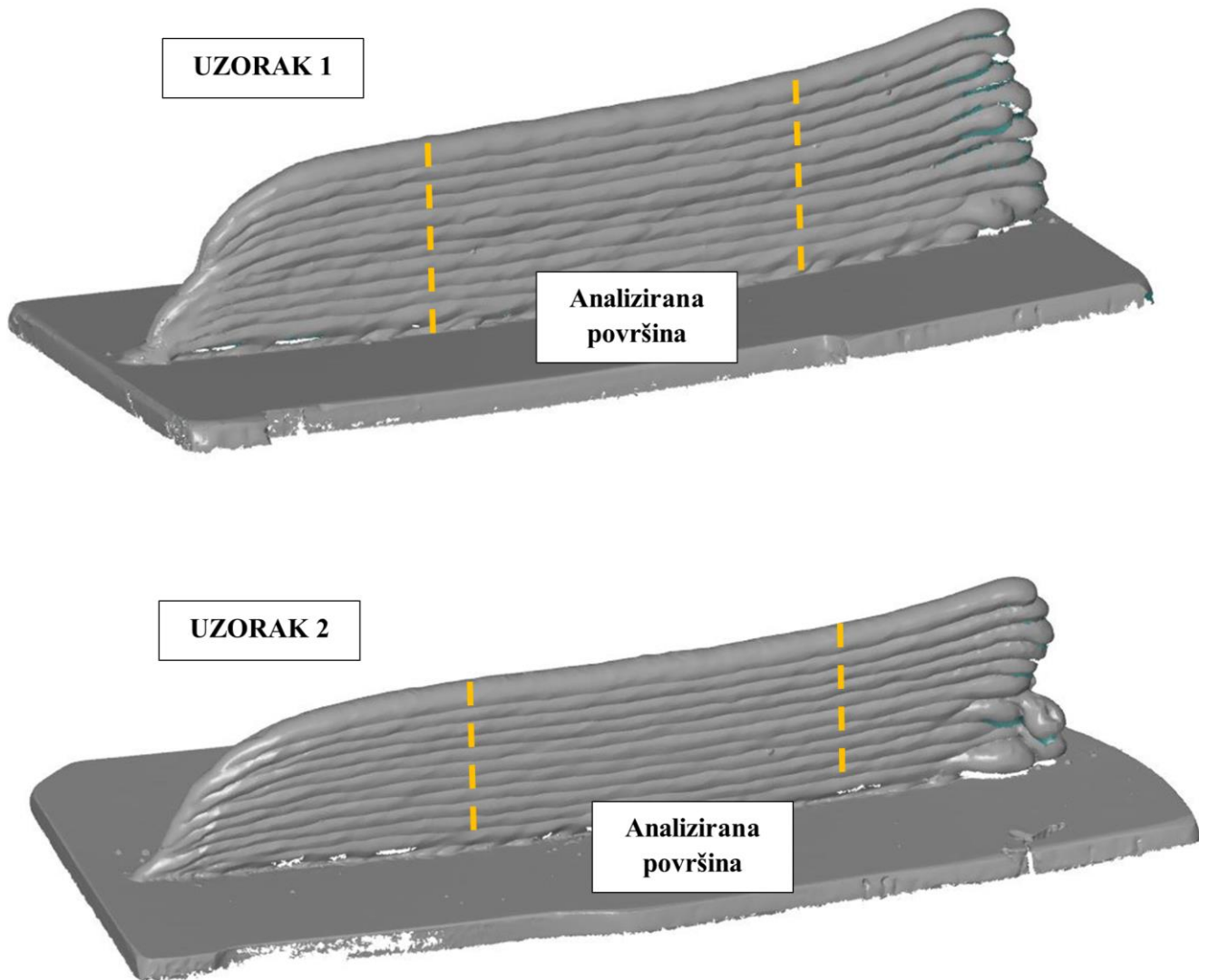
Slika 49 Postupak 3D skeniranja

Na slici 50 vidljiv je izgled skenirane površine na programskom sučelju GOM Inspecta tijekom (dolje) i nakon (gore) samog postupka skeniranja.

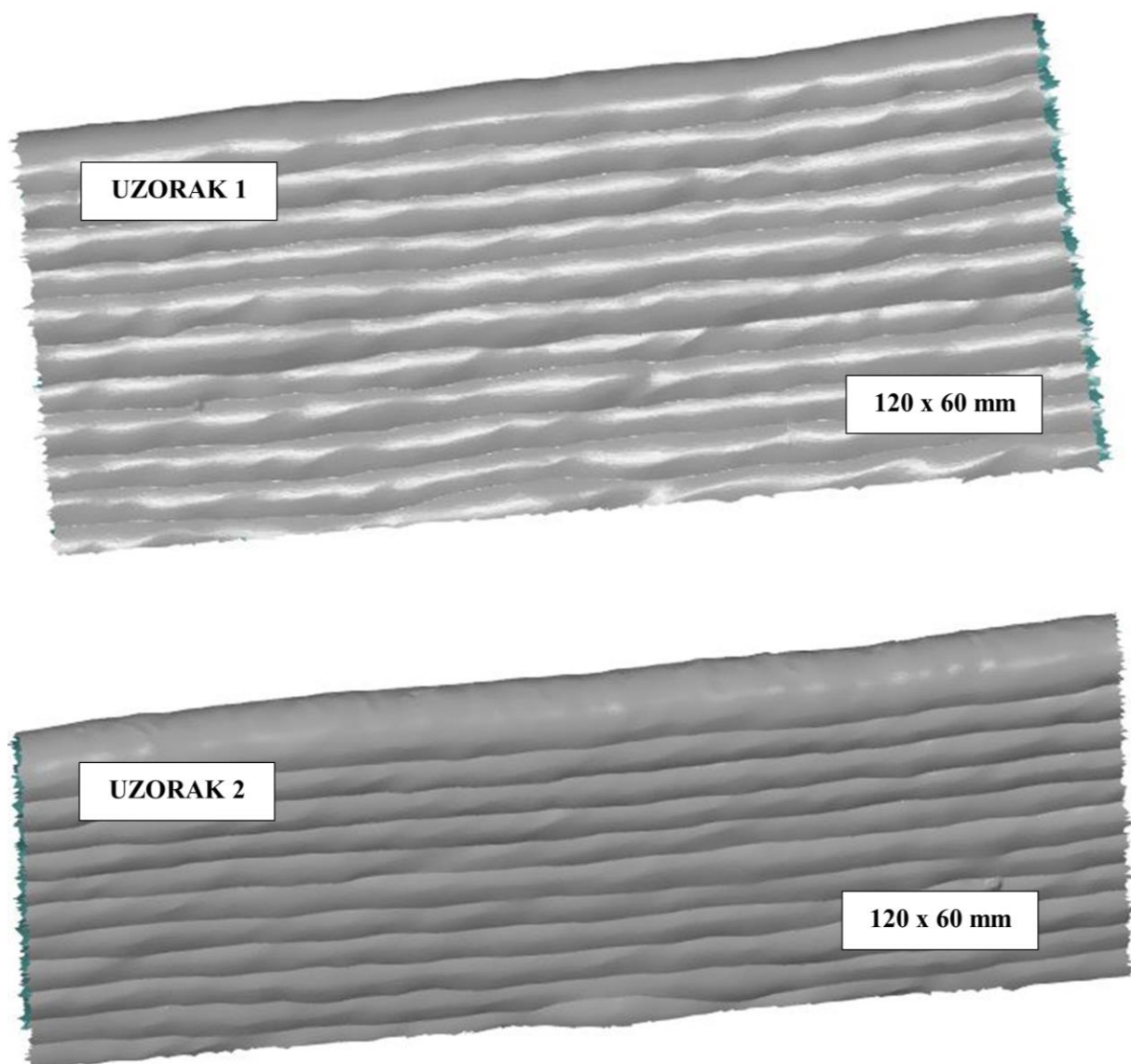


Slika 50 Izgled programskog sučelja tijekom i poslije 3D skeniranja

Slikom 51 prikazani su rezultati 3D skeniranja uzoraka u obliku STL datoteka, dok su slikom 52 prikazani segmenti dimenzija 120 x 60 mm na kojima će se analizirati topografija površine, tj. hrapavost same površine, analizirane u računalnom programu Mountains 9 Premium. Ovi segmenti uzeti su iz središnjeg dijela uzoraka (vidljivo na slici 53).



Slika 51 STL datoteke dobivene 3D skeniranjem

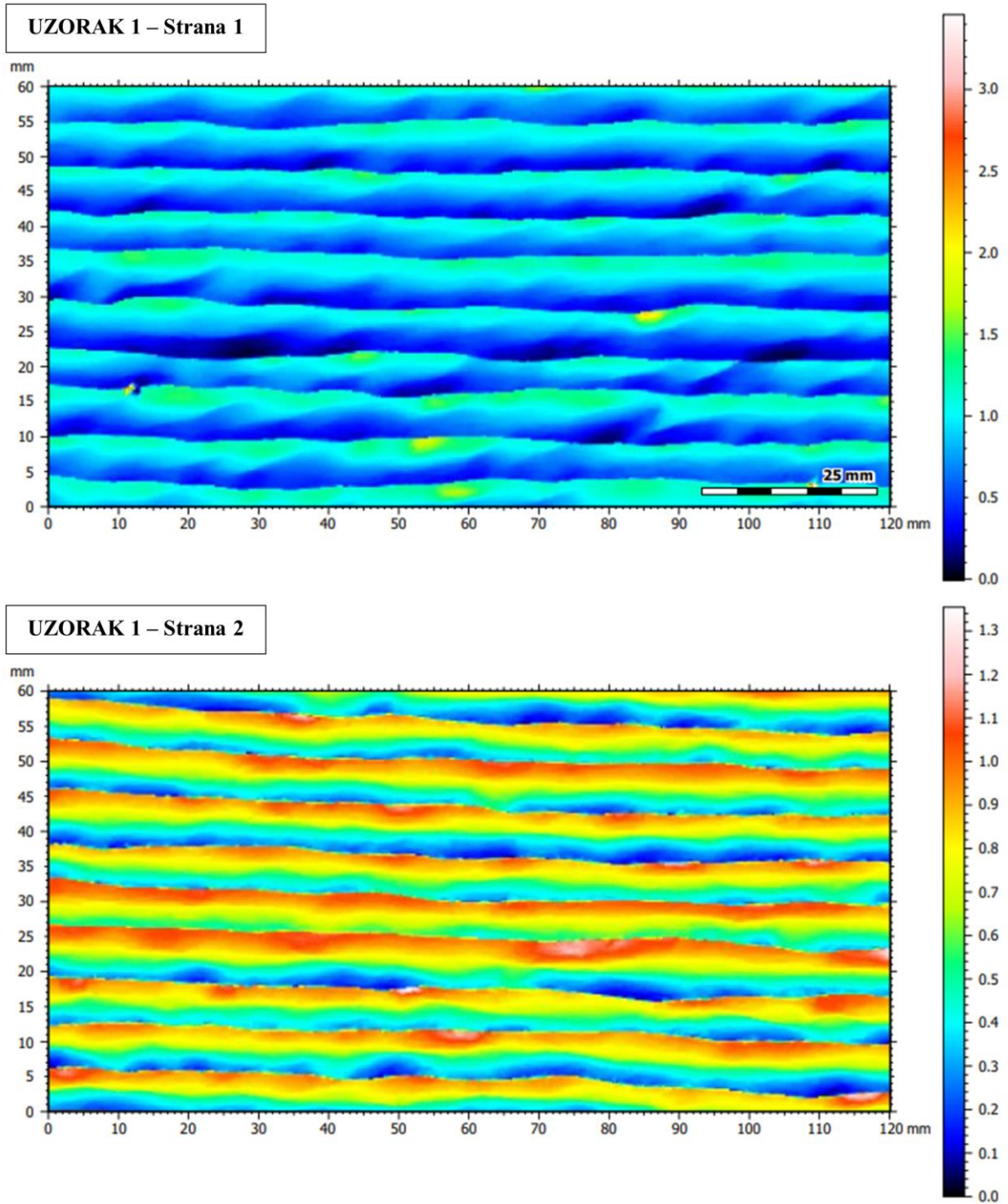


Slika 52 Analizirani segmenti uzoraka

Nakon skeniranja i određivanja segmenata koji će biti analizirani pomoću Mountains 9 Premium programa, dobiveni su podaci o topografiji površine uzorka. Podaci su dobiveni za obje strane oba uzorka: aritmetička sredina apsolutnih odstupanja profila, maksimalna visina vrha profila i kvadratna vrijednost odstupanja profila.

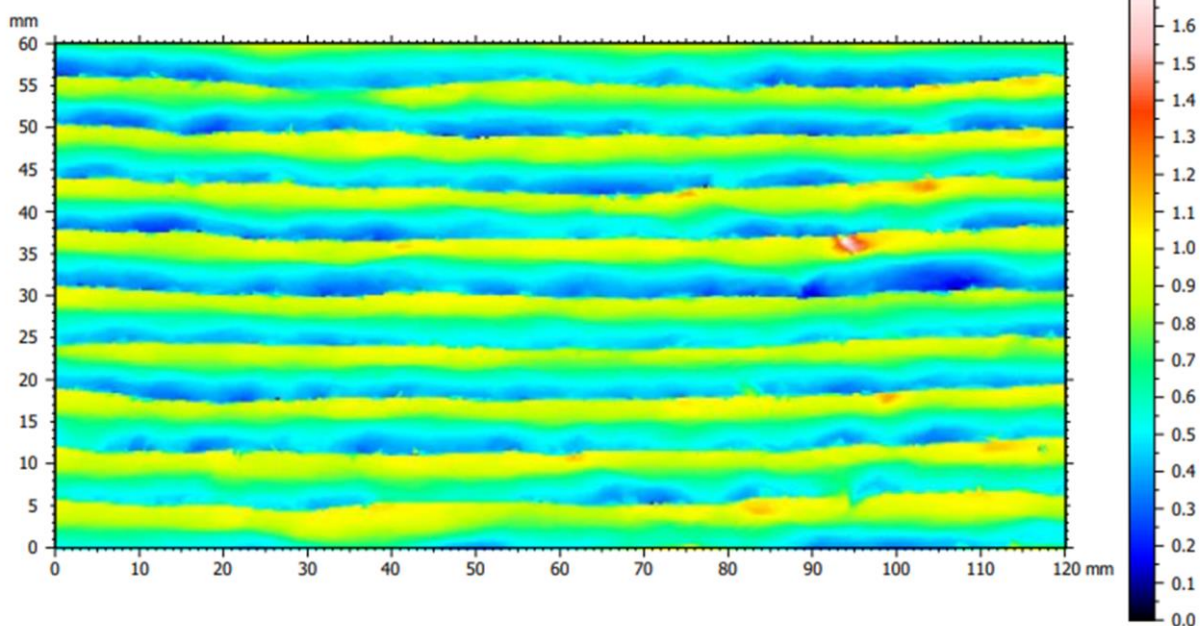
5. Analiza rezultata

Rezultati topografske analize bočnih površina na uzorku izrađenom WAAM postupkom prikazani su na slici 53. Ova slika prikazuje rezultate analize za obje strane uzorka 1, dok slika 54 prikazuje rezultate analize obje bočne površine uzorka 2.

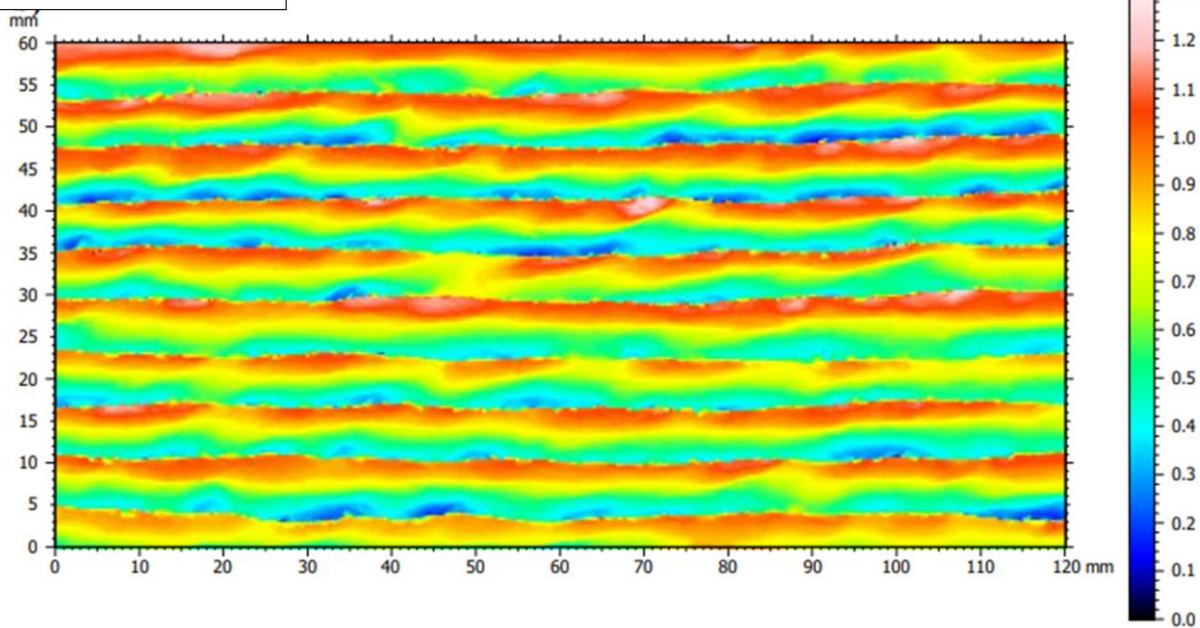


Slika 53 Rezultati topografske analize površine uzorka 1 [43]

UZORAK 2 – Strana 1



UZORAK 2 – Strana 2



Slika 54 Rezultati topografske analize površine uzorka 2 [43]

Tablica 5 prikazuje statističke rezultate topografskih mjerenja. U ovoj tablici, srednja kvadratna vrijednost odstupanja površine označena je kao S_q , maksimalna visina vrha površine kao S_p , a aritmetička sredina odstupanja visina površine kao S_a .

Tablica 5 Statistički rezultati topografskih mjerenja

| | Uzorak 1 | | Uzorak 2 | |
|--------------------------------|----------|----------|----------|----------|
| | Strana 1 | Strana 2 | Strana 1 | Strana 2 |
| S_q , mm | 0.303 | 0.248 | 0.202 | 0.225 |
| S_p , mm | 2.658 | 0.705 | 1.074 | 0.62 |
| S_a , mm | 0.258 | 0.217 | 0.177 | 0.196 |
| Unos topline, kJ/cm | 3,3 | | 3,221 | |

Iz dobivenih rezultata je očito da je površina uzorka 1 na strani 1 grublja u usporedbi s stranom 2. Maksimalna visina vrhova na strani 1, uzorka 1 iznosi 2,534 mm, dok na strani 2 maksimalna visina vrhova iznosi 0,7051 mm. Maksimalna visina vrhova na strani 1, uzorka 2 iznosi 1,074 mm, dok na strani 2 maksimalna visina vrhova iznosi 0,6197 mm. Na temelju srednje kvadratne visine i aritmetičke srednje visine iz oba zida može se zaključiti da uzorak 1 ima veće nepravilnosti i veću hrapavost površine. S obzirom na to da je prosječan unos topline za uzorak 1 iznosio 3,3 kJ/cm, a za uzorak 2 3,221 kJ/cm, može se zaključiti da manji unos topline rezultira manjom hrapavošću površine.

6. Zaključak

Aditivna proizvodnja bilježi značajan porast i popularizaciju u posljednjem desetljeću. Postaje sve primjenljivija u industriji te se zbog svojih prednosti sve češće odabire umjesto konvencionalnih proizvodnih tehnologija. Naravno, ima i svojih nedostataka koje je važno prepoznati kako bi se aditivne proizvodne tehnologije pravilno primijenile. Metal se sve češće koristi kao polazni materijal u aditivnoj proizvodnji. Aditivna proizvodnja metala može se podijeliti na više načina, prema izvoru energije ili prema korištenom polaznom materijalu, koji može biti u obliku žice, praha ili tekućeg metala.

Svoju primjenu u industriji također je našla i aditivna proizvodnja električnim lukom i žicom ili WAAM, kod koje se proizvod formira navarivanjem sloj po sloj taljenjem metalne žice u električnom lukom. U usporedbi s konvencionalnim proizvodnim tehnologijama, WAAM omogućuje značajnu uštedu na otpadu materijala i skraćeno vrijeme izrade. Također, u usporedbi s drugim aditivnim tehnologijama, ovaj postupak omogućuje proizvodnju struktura gotovo neograničene veličine. U WAAM-u se kao polazni materijal mogu koristiti sve žice namijenjene za zavarivanje, pri čemu su najčešće legure aluminija, titana i čelici. Pravilan odabir parametara WAAM postupka od velike je važnosti za postizanje željenih svojstava izratka u skladu s njegovom primjenom. Kao i svaka tehnologija, WAAM ima svoje izazove i nedostatke, kao što su površinska hrapavost, poroznost i zaostala naprezanja, o čemu se u ovom radu raspravlja. Široka je primjena proizvoda izrađenih WAAM postupkom, a to je najčešće u industrijama koje žele smanjiti masu svojih proizvoda, a zadržati zadovoljavajuća mehanička svojstva kao što su zrakoplovna, automobilska i svemirska industrija. Također, WAAM je našao svoju primjenu i u reparaturi istrošenih dijelova i komponenti.

Cilj eksperimentalnog dijela ovog rada bio je analizirati utjecaja zavarivačkih parametara, odnosno parametara WAAM postupka, na topografske karakteristike izrađenih površina. Izrađena su dva uzorka od nehrđajućeg čelika s različitim zavarivačkim parametrima. Rezultati su analizirani putem topografske analize 3D skeniranjem bočnih površina uzoraka. Rezultati su pokazali da varijacije u zavarivačkim parametrima, kao što su napon, električna struja i brzina zavarivanja, značajno utječu na hrapavost površine i kvalitetu taloženja materijala. Uzorak 1 je pokazao veću hrapavost površine i izraženiju valovitost u usporedbi s uzorkom 2, što je povezano s većim unosom topline. Manji unos topline kod uzorka 2 rezultirao je glatkijom površinom i manjim nepravilnostima, što ukazuje na važnost optimizacije parametara kako bi se postigli bolji rezultati.

U konačnici, ovaj rad pruža kratki uvid u WAAM tehnologiju s posebnim naglaskom na izradu struktura od nehrđajućeg čelika. Istaknuta je važnost pravilnog izbora parametra postupka i njihov utjecaj na svojstva izratka, koja trebaju biti u skladu s namjenom proizvoda. Također, vidljivo je da WAAM postupak uključuje mnoštvo parametara, što čini njihovu optimizaciju izazovnu. Važno je naglasiti da su za izradu kvalitetnih i pouzdanih proizvoda potrebna daljnje istraživanja i razvoj, posebno za primjenu u industrijama kao što su zrakoplovna i svemirska.

7. Literatura

- [1] J. Ding i F. Martina, „Production of large metallic components by additive manufacture-issues and achievements“, stu. 2015. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.researchgate.net/publication/284721257>
- [2] M. K. Thompson i ostali, „Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints“, CIRP Ann Manuf Technol, sv. 65, izd. 2, str. 737–760, 2016, doi: 10.1016/j.cirp.2016.05.004.
- [3] R. Linke, „Additive manufacturing, explained | MIT Sloan“. Pristupljeno: 15. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://mitsloan.mit.edu/ideas-made-to-matter/additive-manufacturing-explained>
- [4] „Materials | Additive Manufacturing“. Pristupljeno: 15. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.additivemanufacturing.media/kc/what-is-additive-manufacturing/am-materials>
- [5] S. Das, D. L. Bourell, i S. S. Babu, „Metallic materials for 3D printing“, 01. listopad 2016., Materials Research Society. doi: 10.1557/mrs.2016.217.
- [6] J. L. Z. Li, M. R. Alkahari, N. A. B. Rosli, R. Hasan, M. N. Sudin, i F. R. Ramli, „Review of wire arc additive manufacturing for 3d metal printing“, International Journal of Automation Technology, sv. 13, izd. 3, str. 346–353, svi. 2019, doi: 10.20965/ijat.2019.p0346.
- [7] M. Šercer, D. Godec, A. Pilipović, i M. Katalenić, „Aditivna proizvodnja s polimerima“. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.youtube.com/watch?v=OORnMYoWX9c>
- [8] „Liquid Metal 3D Printing | Additive Manufacturing | FLOW-3D AM“. Pristupljeno: 30. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.flow3d.com/liquid-metal-3d-printing/>
- [9] „Powder Bed Fusion | Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University“. Pristupljeno: 31. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/the7categoriesofadditivemanufacturing/powderbedfusion/>
- [10] „Electron Beam Freeform Fabrication, EBF3 | Find suppliers, processes & material“. Pristupljeno: 31. srpanj 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.manufacturingguide.com/en/electron-beam-freeform-fabrication-ebf3>
- [11] „What is Additive Manufacturing (WAAM) - Gedik Welding“. Pristupljeno: 01. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://gedik.com.tr/en/blog/what-is-additive-manufacturing-waam>

- [12] M. Abuabiah i ostali, „Advancements in Laser Wire-Feed Metal Additive Manufacturing: A Brief Review“, *Materials* 2023, Vol. 16, Page 2030, sv. 16, izd. 5, str. 2030, ožu. 2023, doi: 10.3390/MA16052030.
- [13] A. Shah, R. Aliyev, H. Zeidler, i S. Krinke, „A Review of the Recent Developments and Challenges in Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) Process“, 01. lipanj 2023., MDPI. doi: 10.3390/jmmp7030097.
- [14] K. Treutler i V. Wesling, „The current state of research of wire arc additive manufacturing (Waam): A review“, 01. rujan 2021., MDPI. doi: 10.3390/app11188619.
- [15] J. Norrish, J. Polden, i I. Richardson, „A review of wire arc additive manufacturing: Development, principles, process physics, implementation and current status“, *J Phys D Appl Phys*, sv. 54, izd. 47, stu. 2021, doi: 10.1088/1361-6463/AC1E4A.
- [16] S. Williams, „MIG Welding Transfer Methods - A.E.D. Motorsport Products“. Pristupljeno: 09. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.aedmetals.com/news/mig-welding-transfer-methods>
- [17] „PushPull Systems“. Pristupljeno: 09. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/robotic-welding/migmag-single-wire/pushpull-systems/pushpull-systems>
- [18] Y. K. Bandari, S. W. Williams, J. Ding, i F. Martina, „ADDITIVE MANUFACTURE OF LARGE STRUCTURES: ROBOTIC OR CNC SYSTEMS?“
- [19] „Metal 3D printing: Additive manufacturing | Nordmetall GmbH“. Pristupljeno: 09. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.nordmetall.net/en/metal-3d-printing-additive-manufacturing/>
- [20] T. A. Rodrigues, V. Duarte, R. M. Miranda, T. G. Santos, i J. P. Oliveira, „Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM)“, *Materials*, sv. 12, izd. 7, 2019, doi: 10.3390/ma12071121.
- [21] S. Williams, „Use of WAAM for manufacture of reconfigurable tooling with conformal features“.
- [22] „A Ti-6Al-4V pressure vessel prototype manufactured by the Cranfield... | Download Scientific Diagram“. Pristupljeno: 14. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: https://www.researchgate.net/figure/A-Ti-6Al-4V-pressure-vessel-prototype-manufactured-by-the-Cranfield-University-WAAM_fig6_346189674
- [23] W. Jin, C. Zhang, S. Jin, Y. Tian, D. Wellmann, i W. Liu, „Wire arc additive manufacturing of stainless steels: A review“, 01. ožujak 2020., MDPI AG. doi: 10.3390/app10051563.

- [24] G. Çam, „Prospects of producing aluminum parts by wire arc additive manufacturing (WAAM)“, *Mater Today Proc*, sv. 62, str. 77–85, sij. 2022, doi: 10.1016/J.MATPR.2022.02.137.
- [25] M. Bušić, I. Jurić, I. Garašić, i Z. Kožuh, „Influence of Shielding Gas Composition on Microstructure and Mechanical Properties of Wire and Arc Additive Manufactured Inconel 625“. [Na internetu]. Dostupno na: https://scholar.google.hr/citations?hl=hr&user=sgIPyVoAAAAJ&view_op=list_works&sortby=pubdatehttp://www.ftn.uns.ac.rs/n1062635133/sebastian-balos
- [26] D. Jafari, T. H. J. Vaneker, i I. Gibson, „Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts“, *Mater Des*, sv. 202, tra. 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2021.109471.
- [27] T. Hauser i ostali, „Porosity in wire arc additive manufacturing of aluminium alloys“, *Addit Manuf*, sv. 41, svi. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.101993.
- [28] H. Pant, A. Arora, G. S. Gopakumar, U. Chadha, A. Saeidi, i A. E. Patterson, „Applications of wire arc additive manufacturing (WAAM) for aerospace component manufacturing“, 01. kolovoz 2023., Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. doi: 10.1007/s00170-023-11623-7.
- [29] T. Childerhouse i M. Jackson, „Near net shape manufacture of titanium alloy components from powder and wire: A review of state-of-the-art process routes“, 01. lipanj 2019., MDPI AG. doi: 10.3390/met9060689.
- [30] Y. Li, C. Su, i J. Zhu, „Comprehensive review of wire arc additive manufacturing: Hardware system, physical process, monitoring, property characterization, application and future prospects“, 01. ožujak 2022., Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.rineng.2021.100330.
- [31] „MX3D | WAAM for automotive at BMW Group“. Pristupljeno: 20. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://mx3d.com/automotive-bmwgroup/>
- [32] C. Schwaar, „WAAM! What Is Wire Arc Additive Manufacturing? | All3DP Pro“, *All3DP Pro*. Pristupljeno: 20. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://all3dp.com/1/waam-what-is-wire-arc-additive-manufacturing/>
- [33] A. Josten i & M. Höfemann, „Arc-welding based additive manufacturing for body reinforcement in automotive engineering“, doi: 10.1007/s40194-020-00959-3/Published.
- [34] R. Wu, Z. Yu, D. Ding, Q. Lu, Z. Pan, i H. Li, „OICP: An online fast registration algorithm based on rigid translation applied to wire arc additive manufacturing of mold repair“, *Materials*, sv. 14, izd. 6, ožu. 2021, doi: 10.3390/ma14061563.
- [35] „EN 1.4316 / AISI AW 308LSi - Acerinox Stainless Steel Manufacturer“. Pristupljeno: 21. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na:

- <https://www.acerinox.com/en/soluciones/listado-de-tipos-de-acero/EN-1.4316---AISI-AW-308LSi/>
- [36] „TransSteel 3000 C PULSE“. Pristupljeno: 21. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.fronius.com/en/welding-technology/products/manual-welding/migmag/transsteel/transsteel-compact/transsteel-3000-c-pulse>
- [37] „Rail Bull | Welding & Cutting Track Carriage — PROMOTECH“. Pristupljeno: 21. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: https://www.promotech.eu/en/product/rail-bull-welding-cutting-track-carriage-2/?utm_term=&utm_campaign=Promotech+Performance+Max-1&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=8923307651&hsa_cam=21013214544&hsa_grp=&hsa_ad=&hsa_src=x&hsa_tgt=&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMI5bXYtJuGiAMViYCDBx3MdTL1EAAAYASAAEgI49vD_BwE
- [38] „Advanced infrared thermometer TKTL 21 | SKF“. Pristupljeno: 21. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.skf.com/au/products/condition-monitoring-systems/basic-condition-monitoring-products/temperature-measurement/infrared-and-contact-thermometer>
- [39] „ATOS 5/ 5 Airfoil/ 5X – industrijsko mjeriteljstvo | TOPOMATIKA trodimenzionalno skeniranje, optički mjerni sustavi i računalna obrada d.o.o.“ Pristupljeno: 22. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://topomatika.hr/proizvodi/3d-skeneri/atos-5-5x-industrijsko-mjeriteljstvo/>
- [40] „ATOS 5 12M XL | Metalska jezgra Čakovec“. Pristupljeno: 22. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://metalskajezgra.hr/atos-5-12m-xl/>
- [41] „Official launch of Mountains® 9 - Digital Surf“. Pristupljeno: 22. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://www.digitalsurf.com/news/official-launch-of-mountains-9/>
- [42] „AESUB Plavi spray za 3D skeniranje — Printer3D“. Pristupljeno: 28. kolovoz 2024. [Na internetu]. Dostupno na: <https://printer3d.hr/shop/aesub-spray-za-3d-skeniranje-plavi/>
- [43] G. Tunić, A. Lehpamer, M. Bušić, i M. Šercer, „THE INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS IN WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING OF STAINLESS STEEL STRUCTURES; UTJECAJ PARAMETARA PROCESA PRI ADITIVNOJ PROIZVODNJI ELEKTRIČNIM LUKOM I ŽICOM STRUKTURA OD NEHRĐAJUĆIH ČELIKA“.

Popis slika

| | |
|--|----|
| Slika 1 Ključni trenutci u povijesti aditivne proizvodnje [3] | 1 |
| Slika 2 Predmeti od različitih materijala izrađeni aditivnim postupcima [4] | 2 |
| Slika 3 Podjela aditivne proizvodnje prema ASTM F2792 [6] | 4 |
| Slika 4 Podjela aditivne proizvodnje metala prema polaznom materijalu [6]..... | 5 |
| Slika 5 Postupak izrade strojnih dijelova tehnologijom na bazi tekućeg metala kao polaznog materijala [8]..... | 6 |
| Slika 6 Jedan od PBF postupaka [9] | 7 |
| Slika 7 Različiti WBAM postupci [10], [11], [12] | 8 |
| Slika 8 Skica WAAM postupka [13] | 9 |
| Slika 9 Razlike u unosu energije između WAAM-a i klasičnog zavarivanja [14] | 10 |
| Slika 10 Koraci WAAM postupka [13] | 10 |
| Slika 11 Podjela WAAM postupaka [13] | 11 |
| Slika 12 Skice GTAW, PAW o GMAW postupaka [15] | 12 |
| Slika 13 Načini prijenosa metala [16] | 13 |
| Slika 14 CMT robotski sustav [17]..... | 14 |
| Slika 15 CNC WAAM sustav [19] | 15 |
| Slika 16 Parametri sapnice [13]..... | 17 |
| Slika 17 Tlačna posuda izrađena WAAM postupkom [22]..... | 18 |
| Slika 18 Izrada čeličnih proizvoda WAAM postupkom [1]..... | 19 |
| Slika 19 Hladno valjanje između slojeva [24]..... | 21 |
| Slika 20 Usporedba BTF omjera 3 različite zrakoplovne komponente [20] | 22 |
| Slika 21 Usporedba WAAM-a i ostalih aditivnih tehnologija [14]..... | 23 |
| Slika 22 Rezultat zaostalih naprezanja [26]. | 24 |
| Slika 23 Poroznost kod aluminijske legure pri različitim parametrima procesa [27] | 25 |
| Slika 24. Neravnomjerno taloženje [13]..... | 26 |
| Slika 25 Preljevanje materijala (a) i struktura bez prelijevanja [13] | 27 |
| Slika 26 Aluminijske komponente zrakoplova izrađene WAAM-om [28] | 28 |
| Slika 27 Komponenta zrakoplova 787 Dreamliner izrađena WAAM postupkom [29] | 28 |
| Slika 28 Spojni prsten rakete [30] | 29 |
| Slika 29 BMW komponenta izrađena WAAM postupkom[31] | 29 |
| Slika 30 Turbina broskog dizel motora izrađena WAAM-om [32]..... | 30 |
| Slika 31 Ojačanja karoserije automobilom izrađeno WAAM tehnologijom [33]..... | 30 |
| Slika 32 WAAM i reparatura kalupa [34] | 31 |

| | |
|--|----|
| Slika 33 Korišteni polazni materijal – žica..... | 32 |
| Slika 34 Kemijski sastav žice ER 308Lsi [35] | 33 |
| Slika 35 Fronius TransSteel 3000 Pulse | 34 |
| Slika 36 Promotech Rail Bull [37] | 35 |
| Slika 37 SKF TKTL 20 ThermoLaser..... | 36 |
| Slika 38 Atos 5 12M XL i GOM ROT 640/100 kg | 37 |
| Slika 39 Umetanje žice i kotačića za vođenje u uređaj za zavarivanje | 38 |
| Slika 40 Pozicija za navarivanje prvog sloja | 39 |
| Slika 41 Izbor parametara na sučelju uređaja za zavarivanje | 40 |
| Slika 42 Namještanje brzine zavarivanja..... | 40 |
| Slika 43 Uzorci nakon izrade WAAM postupkom..... | 41 |
| Slika 44 Izrada uzorka 1 sloj po sloj..... | 42 |
| Slika 45 Izrada uzorka 2 sloj po sloj..... | 43 |
| Slika 46 Mjerenje međuprolazne temperature..... | 44 |
| Slika 47 Sublimacijski sprej [42]..... | 45 |
| Slika 48 Uzorak pripremljen za 3D skeniranje..... | 46 |
| Slika 49 Postupak 3D skeniranja | 46 |
| Slika 50 Izgled programskog sučelja tijekom i poslije 3D skeniranja | 47 |
| Slika 51 STL datoteke dobivene 3D skeniranjem | 48 |
| Slika 52 Analizirani segmenti uzoraka | 49 |
| Slika 53 Rezultati topografske analize površine uzorka 1 [43] | 50 |
| Slika 54 Rezultati topografske analize površine uzorka 2 [43] | 51 |

Popis tablica

| | |
|--|----|
| Tablica 1 Deponirani materijal u različitim WAAM postupcima [13] | 12 |
| Tablica 2 Tehničke karakteristike uređaja Fronius TransSteel 3000 Pulse [36] | 33 |
| Tablica 3 Tehničke karakteristike naprave Rail bull [37] | 35 |
| Tablica 4 Parametri navarivanja po sloju/prolazu | 45 |
| Tablica 5 Statistički rezultati topografskih mjerenja | 52 |