

ADITIVNA PROIZVODNJA UZ POMOĆ ELEKTRIČNOG LUKA I ŽICE KAO DODATNOG MATERIJALA (WAAM) – TRENUTNO STANJE I POTENCIJAL

Ključne riječi:

- električni luk
- žica
- proizvodnja

Key words:

- electric arc
- wire
- fabrication

Schusselwörter:

- Licht Bogen
- Draht
- Production

Pregledni članak

Aditivna proizvodnja je način proizvodnje u kojoj se predmeti izrađuju tako da se materijal dodaje sloj po sloj. Razne tehnologije aditivne proizvodnje rabe polimerni materijale ili metale u obliku praha kao dodatni materijal te različite izvore energije (toplina), što često dovodi do problema. WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) tehnologija je aditivne proizvodnje koja je postala popularna i zanimljiva za istraživanje u posljednjih 30-ak godina, iako prvi patent iz tog područja potječe još iz 1925. godine. Svoju popularnost duguje činjenici da se pomoću nje mogu proizvesti komadi od različitih metala s puno manje poroznosti te da je bitno smanjen udio strojnih obrada. Većinom se rabi u modernim industrijama, poput zrakoplovne koje su bile pokretači i sponzori većine istraživanja. Tehnologija WAAM koristi već postojeću opremu za zavarivanje, električni luk kao izvor topline i žicu za zavarivanje kao dodatni materijal, što je čini jeftinijom od ostalih tehnologija aditivne proizvodnje. Postupak se sastoji od nekoliko koraka (dizajniranje CAD modela, rezanje tog modela u slojeve, generiranje putanje alata, odabir parametara za zavarivanje, taloženje materijala i završna strojna obrada). Ti koraci su opisani u ovom radu, zajedno s glavnim prednostima i nedostacima ove tehnologije. Osim toga, cilj ovoga rada je i pružiti uvid u dosadašnja istraživanja te predložiti eventualne buduće korake i ideje koje bi dodatno unaprijedile WAAM tehnologiju i omogućile joj značajniji udio u industrijskoj proizvodnji.

Reviewed paper

WIRE AND ARC ADDITIVE MANUFACTURING (WAAM) – CURRENT SITUATION AND POTENTIAL

Additive manufacturing is a manufacturing process of creating objects by building up materials, layer-by-layer. Different additive manufacturing technologies use polymer materials or metal powders as fillers, as well as different sources of energy (heat), what leads to problems. WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) is an additive manufacturing technology which has become popular and interesting for research over the past 30 years, although the first patent in this field dates all the way back to 1925. It owes its popularity to the fact that it helps to manufacture pieces with different metals with a much lower degree of porosity and considerably decreased share of machining. It is predominantly used in modern industries, such as the aerospace industry. These industries acted as drivers and sponsors of a greater part of research. The WAAM technology is used with the existing welding equipment, an electric arc as heat source and welding wire as filler material, what makes it much cheaper compared to other additive manufacturing technologies. The process consists of several steps (design of a CAD model, model cutting in layers, path generation process, selection of welding parameters, material deposition and final machining). This paper outlines these steps, as well as the main advantages and disadvantages of this technology. In addition, this paper aims to provide an insight into the research undertaken so far and propose any future steps and ideas that could improve the WAAM technology and enable it to obtain a considerable share in industrial manufacturing.

Übersichtsarbeit

GENERATIVES FERTIGUNGSVERFAHREN MIT LICHTBOGEN UND DRAHT ALS ZUSATZMATERIAL (WAAM) – STAND DER TECHNIK UND POTENTIAL

Generatives Fertigungsverfahren ist eine Art von Produktion bei der sich Werkstücke fertigen in dem eine Schichtung nach der anderen gemacht wird. Viele Technologien des generatives Fertigungsverfahren nutzen Polymere und Metalle in Pulverform als Zusatzmaterial, und viele verschiedene Energiequellen (Wärme), was offen zu Problemen führt. WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) ist eine Technologie die in letzter Zeit, seit 30 Jahren, sehr populär ist, obwohl der erste Patent noch von 1925 stand. Die Beliebtheit kam davon, dass sich Werkstücke von verschiedenen Metallen mit weniger Porosität fertigen können, und das sehr viel maschinelle Bearbeitung damit abfallen konnte. Am meisten wird es in modernen Fertigungsanlagen genutzt, wie z.B. die Flugtechnik. In dieser Branche befinden sich die größten Investoren für das Thema. WAAM Technologie nutzt schon vorhandene Schweißanlagenteile, Lichtbogen wird als Wärmequelle genutzt und Draht als Zusatzmaterial wobei der Produktionspreis deutlich gemindert ist. Das Verfahren besteht von mehreren Schritten (CAD Dimensionierung, Schneiden in Teile, generieren der Werkzeugorbit, Schweißparameterauswahl, Materialabladung und maschinelle Bearbeitung). Diese Schritte sind in dieser Arbeit beschrieben zusammen mit allen Vorteilen und Nachteilen dieser Fertigungstechnologie. Dennoch ist das Ziel dieser Arbeit ist den aktuellen Forschungsstand zu zeigen und eventuelle zukünftige Schritte zu machen die die WAAM Technologie zusätzlich verbessern könnten.

Adresa autora (Author's address):

Nikola Knezović
Fakultet strojarstva, računarstva
i elektrotehnike
Sveučilište u Mostaru, Matice hrvatske b.b.
88000 Mostar, Bosna i Hercegovina
nikola.knezovic@sve-mo.ba

Primljeno (Received):

2018-03-19

Prihvaćeno (Accepted):

2018-03-30

1. UVOD

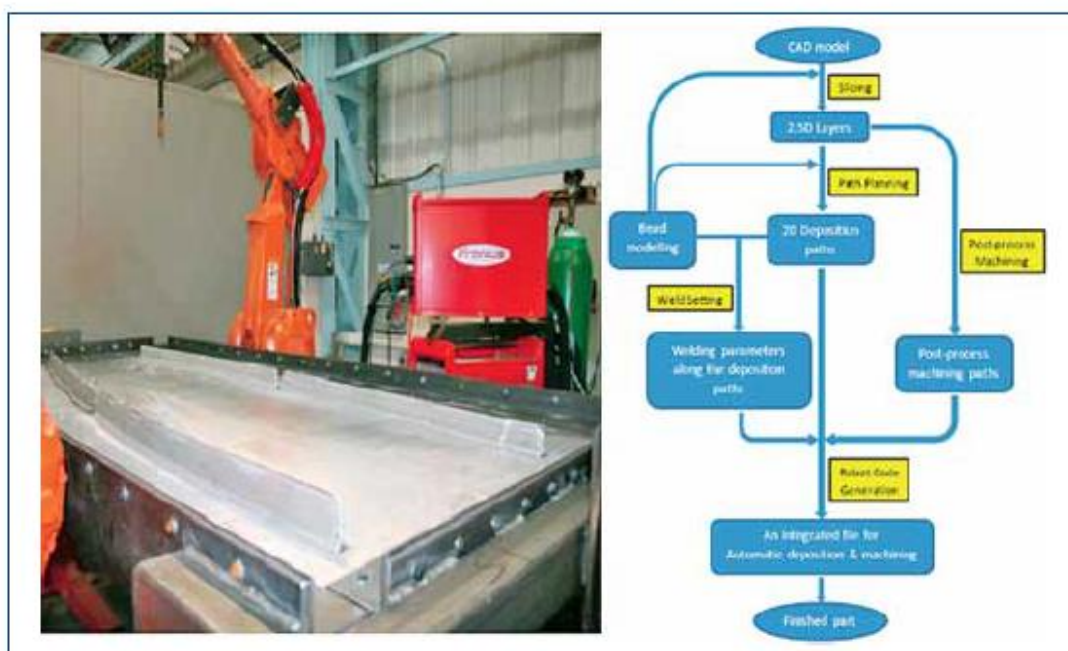
Zahvaljujući stalnom razvitku moderne industrije uvijek postoji neprekidna potreba za istraživanjem i razvijanjem novih naprednih tehnologija. Jedan od najboljih primjera za to je zrakoplovna industrija za koju se predviđa da će u idućih 20-ak godina trebati 20 milijuna tona sirovog materijala. [1] Takva predviđanja su posljedica činjenice da su u toj industriji često korišteni materijali poput titana koji ima izrazito lošu obradivost i nisku iskoristivost materijala, što se u zrakoplovnoj industriji izražava odnosima BTF-a (Buy To Fly). Za titan i konvencionalne načine strojne obrade je taj odnos vrlo visok i teži se njegovu snižavanju. [2] Jedan od načina za bolje iskorištenje materijala su aditivne (AM – Additive Manufacturing) tehnologije. Klasični sustav većine tehnologija aditivne proizvodnje sastoji se od izvora toplote, dodatnog materijala i nekog sustava koji omogućuje kretanje. Nažalost, većina AM tehnologija koristi polimerne materijale ili metal u praškastom obliku, što često rezultira proizvodima koji imaju razne greške (poroznosti, šupljine, slaba mehanička svojstva) i nisu potpuno funkcionalni. Razvitak WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) tehnologije nudi rješenje za većinu problema s kojima se suočavaju ostale AM tehnologije.

WAAM je postao zanimljiv za istraživanje u zadnjim godinama 20. stoljeća, iako prvi patent potječe otprilike gotovo sto godina, iz 1925. [3] Budući da koristi električni luk kao izvor toplote i žicu za zavarivanje kao dodatni materijal, može ga se smatrati svojevrsnom kombinacijom zavarivanja i aditivne tehnologije. Početna prednost u odnosu na ostale AM tehnologije je niža cijena. Dok većina ostalih AM tehnologija zahtijeva posebne uređa-

je i namjenski proizvedene materijale, WAAM koristi već postojeću opremu za zavarivanje (izvore struje, pištolje, zaštitne plinove itd.), koje je potrebno kombinirati s robotskom rukom ili CNC strojevima koji će omogućiti kretanje pištolja. Smatra se obećavajućom tehnologijom budućnosti za proizvodnju funkcionalnih gotovih komada (a ne samo prototipova), koji su praktički neograničeni veličinom. Osim toga, postupak proizvodnje je znatno brži nego kod ostalih AM tehnologija (možeće je taloženje materijala brzinom čak do 130 g/min). [4] Naravno, i ova tehnologija ima svojih mana kojih se treba riješiti. Ističu se zaostala naprezanja i deformacije radi unosa toplote, relativno loša preciznost komada i kvaliteta površine, što zahtijeva dodatnu strojnu obradu. [5] Većina tih problema je predmet istraživanja, neki su već smanjeni ili uklonjeni, ali još uvijek ima materijala i mjesta za napredak.

2. PROVEDBA POSTUPKA I POJEDINAČNI KORACI

Poput svake druge AM tehnologije, izrada proizvoda WAAM tehnologijom za početak zahtijeva konstruiranje proizvoda u obliku 3D CAD modela, korištenjem nekih od specijaliziranih softvera ili još modernijih tehnologija reverznog inženjerstva (3D skeniranje). [4] Potom se tako dizajniran proizvod sprema u neki od standardnih formata (obično je to.stl format). Takvi formati predstavljaju podatke o geometriji proizvoda i služe kao osnova za „rezanje“ komada po visini u dvodimenzionalne slojeve, a onda se kontura svakog takvog sloja koristi za generiranje putanje alata (pištolja za zavarivanje). Po-



Slika 1. Klasični WAAM sustav (lijevo) [6] i shema WAAM postupka (desno) [7]
Figure 1. Conventional WAAM system (left) [6] and scheme of the WAAM process [7]

slije toga je potrebno odabrati optimalne parametre zavarivanja (brzinu zavarivanja, jakost struje, napon itd.) i modelirati veličine koje utječu na geometriju slojeva da ne bi došlo do nepotrebnog preklapanja ili nedovoljnog stapanja slojeva. Koristeći generiranu putanju i odabrane parametre zavarivanja, proizvod se onda izrađuje na način da se na osnovnu ploču nanosi sloj po sloj materijala (nanese se prvi sloj, pištolj se podigne za potrebnu visinu sloja pa se nanosi drugi sloj i tako dok predmet ne bude gotov). Većinom je potrebna i strojna obrada te se ona može uključiti u proces istodobno s nanošenjem slojeva ili se predmet obradi kasnije neovisno o WAAM postupku. [7] Osim toga, predmet se po potrebi može podvrgnuti i nekoj toplinskoj obradi. *Slika 1.* na lijevoj strani prikazuje jedan klasičan WAAM sustav, dok je na desnoj strani prikazan shematski dijagram WAAM postupka.

Iako po ovom kratkom opisu implementacija WAAM tehnologije izgleda jednostavno, potrebno je znati da ti koraci sadrže mnogo manjih operacija koje moraju biti pažljivo osmišljene, proračunate i provedene da bi se dobio kvalitetan proizvod. Npr., da bi se dobili slojevi koji će omogućiti izradu što preciznijega komada, razvijeni su posebni algoritmi za rezanje 3D CAD modela. [8] Osim toga, mnogi su se radovi bavili pitanjem razvoja različitih vrsta i predložaka putanja koje će moći napraviti proizvod sa što manje grešaka. [9]–[11]. Paralelno s tim je potrebno razviti i posebne algoritme za matematički proračun geometrijskih veličina vezanih za pojedine slojeve, što je također bila tema određenog broja radova. [12]–[16]. Posebno područje istraživanja je odabir optimalnih parametara zavarivanja, što je prikazano u radovima [17]–[19]. Svakako je potrebno dodatno pokušati utjecati i na smanjenje broja grešaka vezanih za sami proces zavarivanja, o čemu će više riječi biti u idućem poglavlju. Sva ova istraživanja dovode do zaključka da je to kompleksan proces te da i najmanja greška u nekom od ovih koraka može dovesti do puno većih problema i pogrešaka kod konačnog proizvoda, štetno utječući na kvalitetu površine, mikrostrukturu, mehanička svojstva, dimenzionalnu točnost i ukupnu kvalitetu komada. Međutim, ako se sve izvede kako treba, onda WAAM komadi mogu izgledati kao komad sa *slike 2.*

Najčešće primijenjeni postupak zavarivanja u tehnologiji WAAM je MIG. Razlog za to je činjenica da je žica



Slika 2. Izrada WAAM komada (lijevo) i djelomično strojno obrađeni isti komad (desno) [4]

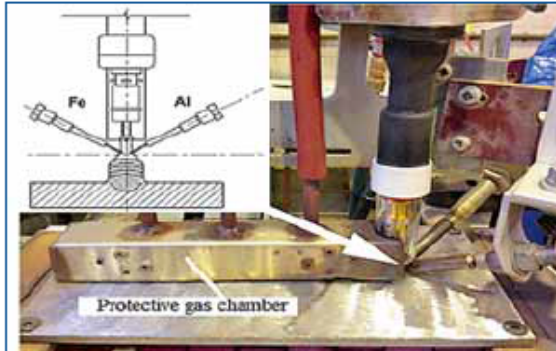
Figure 2. Manufacturing of the WAAM product (left) and partially machined product (right) [4]

koaksijalna s pištoljem za zavarivanje, što omogućuje lako programiranje i generiranje putanje alata.[3] Posebno je popularna inačica hladnog prijenosa metala, CMT (Cold Metal Transfer), kod koje je potrebno strogo kontrolirati parametre zavarivanja, ali je zato moguće postići slojeve izvrsne kvalitete pa su se neki radovi bavili proučavanjem toga postupka u kombinaciji s WAAM tehnologijom.[20]–[22] Taj postupak daje dobre rezultate prilikom uporabe čelika ili aluminija, ali kad se izrađuju proizvodi od titana, dolazi do pojave nestabilnog luka te se onda za titan češće primjenjuje TIG postupak zavarivanja. Problem kod TIG-a je što je dodavanje žice nezavisno od pištolja. Naime, da bi se dobili kvalitetni i homogeni slojevi, potrebno je žicu uvijek dodavati s iste strane, što uvjetuje rotaciju pištolja te komplicira programiranje kretanja alata i generiranje njegove putanje. [3]

3. PREDNOSTI I NEDOSTATCI

Tehnologija WAAM ima brojne prednosti u odnosu na konvencionalne načine obrade. Troškovi opreme su puno manji jer je potrebno samo kombinirati već postojeću opremu za zavarivanje s robotom ili CNC strojem. Budući da se rabi žica za zavarivanje, manji su i troškovi dodatnog materijala, a ujedno je i izbor materijala puno veći nego kod ostalih AM tehnologija. Brzina izrade je znatno veća jer WAAM omogućuje brzine taloženja materijala do 130 g/min, kao što je već spomenuto. Čak je moguće postići i veće brzine, ali tada to negativno utječe na preciznost komada. Manje je otpada, što je u izravnoj vezi s već spomenutim BTF odnosom. Naime, to je odnos mase ili volumena početnoga komada (sirovog materijala) i mase ili volumena gotovog proizvoda. Npr., kod nekih obrada titana taj odnos doseže 20, što znači da za gotov proizvod mase 10 kg, treba kupiti 200 kg sirovog materijala. Korištenjem WAAM tehnologije, BTF odnos je moguće reducirati na 2, što dovodi do velikih ušteda materijala. Osim toga, puno kraće vrijeme izrade i mogućnost izrade „near-net-shape“ (bez potrebe za puno strojne obrade) proizvoda omogućuju puno bržu proizvodnju koju je lako automatizirati. Veličina komada koji se mogu proizvesti je praktično neograničena. Jedina ograničenja su veličina osnovne ploče ili komore za stvaranje zaštitne plinske atmosfere, u slučaju da je potrebna. [4], [6], [23] Kao i kod većine AM tehnologija, velika prednost u odnosu na klasične tehnologije obrade je i puno veća sloboda pri dizajniranju i konstruiranju oblika proizvoda.

WAAM nudi rješenje i za proizvodnju funkcionalno slaganih materijala (FGM, Functionally Graded Materials). To su materijali koje karakteriziraju varijacije u sastavu i strukturi kroz njihov volumen, što rezultira i odgovarajućim promjenama svojstava. Često se koriste i proizvode za neke specifične situacije, upravo zahvaljujući takvim svojstvima. Jedan od najčešće korištenih takvih materijala je željezov aluminid, Fe_3Al . Inače se proizvodi od praškastog materijala, ali takav način često rezultira pojavom poroznosti i šupljina, što je reducirano upotrebom WAAM tehnologije. Postupak proizvodnje takvog materijala je prikazan na *slici 3.* [24] Osim ovoga



Slika 3. Izrada proizvoda od Fe_3Al korištenjem WAAM tehnologije [24]

Figure 3. Manufacturing of the Fe_3Al product using WAAM technology [24]

materijala, zabilježena je i proizvodnja drugih slitina, poput Ti-Al [25] i Ni-Al bronce [26]. Neki autori su zabilježili ista ili bolja mehanička svojstva WAAM proizvoda od kovanih ili lijevanih proizvoda od istog materijala. Npr., prema [27] čvrstoća i duktilnost mogu biti jednaki, dok otpornost na umor može biti i veća, prema [28]. Neka istraživanja su pokazala da se i pukotine sporije šire u WAAM materijalu nego u osnovnom materijalu. [29], [30] Sve te prednosti su donijele WAAM tehnologiji status jedne od potencijalno najboljih zamjena za dosadašnje konvencionalne načine obrade.

Nažalost, još uvijek postoje određene mane i nedostatci koji uzrokuju probleme i ograničuju upotrebu WAAM tehnologije na uže područje, ali svi ti problemi su tema mnogobrojnih istraživanja koja ih nastoje smanjiti ili ukloniti.

Prije svega, WAAM je pogodniji za izradu većih komada jednostavnije geometrije, nego manjih, preciznijih i kompleksnijih komada, što jasno definira njegovu primjenu. [3] Nadalje, iako su zabilježena dobra mehanička svojstva, velik je problem anizotropnost tih svojstava. Neki radovi su se bavili tim problemom i zaključak je da se veća čvrstoća, ali i manja duktilnost javljaju u horizontalnom smjeru (smjer nanošenja slojeva). [27], [28], [31]

Specifičan problem je već spomenuto modeliranje geometrije slojeva (bead modelling). To je skup operacija koji povezuje varijable vezane za planiranje i generiranje putanje s odabirom optimalnih parametara da bi se dobila što bolja geometrija slojeva. Modeliranje poje-

dinačnih slojeva i njihova načina preklapanja značajno utječe na kvalitetu proizvoda jer ako je dobro izvedeno, omogućuje izradu slojeva s finom kvalitetom površine i geometrijskom preciznošću. Ako se taj dio postupka ne izvede kvalitetno, mogu se pojaviti problemi poput suvišnog preklapanja ili nedovoljnog stapanja i vezivanja slojeva. Mnogi istraživači su se bazirali na ovaj problem, razvijajući algoritme koji omogućuju što kvalitetniji proces te je tako nađeno rješenje u obliku TOM-a (Tangent Overlapping Model), modela koji pomaže pri postizanju zadovoljavajuće kvalitete modeliranja slojeva. [12], [14]–[16]

Generiranje i planiranje putanje alata je dio postupka koji je često povezan s problemima poroznosti, šupljina, taloženja viška materijala (peak development) ili nedovoljnog taloženja materijala (deposition failure). Poroznosti i šupljine se pojavljuju najčešće u debljim komadima koje treba popunjavati, dok se problemi s taloženjem pojavljuju kod proizvoda koji sadrže dijelove koji se križaju. Na slici 4. su prikazani ti problemi. Pod a) se nalazi predmet s nastalim šupljinama, dok su pod b) i c) prikazani problemi s taloženjem materijala. [1], [8]

Problemi s poroznošću i šupljinama se obično pojavljuju pri upotrebi tradicionalnih predložaka putanja koji dvodimenzionalnu geometriju popunjavaju na način da se načine vanjske konture pa se puni unutrašnjost. Ako pri modeliranju slojeva nije dobro proračunana vrijednost pomaka alata d (širina između slojeva, koja ovisi o širini sloja w), onda pištolj neće na potrebnim mjestima moći istopiti dovoljno žice te se dva susjedna sloja neće dovoljno dobro vezati i spojiti. Rješenje ovoga problema je korištenje metodologije nazvane MAT (Medial Axis Transformation), pri kojoj se predmet izrađuje na način da pištolj prvo načini središnju konturu, a onda ide prema vanjskim granicama komada. Na taj način se puni kompletna unutrašnjost komada, ali se ostavlja višak materijala izvana, što povećava potrebnu količinu strojne obrade. Ta metodologija je predložena i istraživana u radovima. [9], [11] Višak taloženog materijala ili njegov nedostatak se pojavljuju prilikom križanja te je teško predvidjeti do kojeg od ta dva problema će doći (vezani su uz preveliku akumulaciju topline, pa ako se toplina akumulira na mjestu križanja, dolazi do viška materijala, a ako se akumulira malo dalje od toga mjesta, onda na križanju nedostaje materijala). Rješenje, predloženo u radovima [1], [19], sugerira da se takvi predmeti rade na način da se formiraju dva slova „L“ koja se dodiruju svojim kutom na mjestu gdje treba biti križanje. Tako ne dolazi do prelaska jednog sloja preko drugog i manja je mogućnost ovakve pogreške, ili do nje dolazi u blažem obliku.



Slika 4. Šupljine (a), višak materijala (b) i nedovoljno taloženje (c) [1], [8]

Figure 4. Porosity (a), excessive material (b) and insufficient deposition (c) [1], [284]



Slika 5. Deformacija kod WAAM komada (lijevo) i komad načinjen korištenjem Symmetrical Building strategije [3]
Figure 5. Deformation on WAAM manufactured product (left) and product made using Symmetrical Building strategy [3]

Druga vrsta problema koji se mogu pojaviti su više vezani za zavarivanje, a ističu se zaostala naprezanja, pomaci i deformacije. WAAM proizvodi se obično izrađuju na način da se materijal nanosi s jedne strane osnovne ploče. Zbog velikog unosa topline dolazi do deformacija koje teže tomu da „povuku“ osnovnu ploču prema gore, u smjeru okomitom na smjer taloženja, što dovodi do toga da se i kompletan proizvod deformira. To bi se donekle moglo riješiti uklještenjem osnovne ploče, ali onda se nakon otpuštanja pojavljuju značajna zaostala naprezanja, tako da nije postignut prevelik napredak. *Slika 5.* s lijeve strane prikazuje problem deformacija, dok je s desne strane prikazan jedan od načina rješavanja toga problema.

Naime, strategija nazvana Balanced Building Strategy ili Symmetrical Building zasniva se na tome da se odredi najpogodnija ravnina simetrije komada i da se osnovna ploča podudara s tom ravninom. Slojevi se onda nanose s jedne i s druge strane osnovne ploče, tako da sva naprezanja s jedne strane anuliraju ona nastala s druge strane. Ponekad je ionako potrebno načiniti više komada pa je ovo dodatna prednost, a nekad je nužan redizajn komada.

4. TRENDOVI I PRIJEDLOZI ZA BUDUĆA ISTRAŽIVANJA

WAAM je izrazito interdisciplinarna tehnologija pa se tako i istraživanja mogu podijeliti na više područja. Iako je dosta toga već učinjeno, ipak je ostalo još prostora za dodatni napredak. Npr., neki autori predlažu uvođenje kontrole bez razaranja u proces, što bi omogućilo ranije otkrivanje grešaka. [3] Već spomenuti problemi s anizotropnim svojstvima su se u nekim radovima rješavali upotrebom valjanja određenom silom. [32]–[34]. Budući da je još uvijek potrebna strojna obrada, pojedini istraživači su predložili uključivanje nekih obrada u sami proces izrade, što iziskuje generiranje dodatnih putanja alata. [35] Jedna od ideja je i uključivanje novih materijala, poput magnezija, alatnih ili nehrđajućih čelika. [20], [36], [37] Jedan od najvećih izazova, koji bi donio i značajan napredak, pokušaj je automatizacije kompletnog postupka, gdje bi čovjekov utjecaj bio potreban samo pri pokretanju postupka. [7]

5. ZAKLJUČAK

WAAM je tehnologija s velikim potencijalom iskorištenosti, zahvaljujući prednostima poput brzine izrade komada, manje količine otpada te nižih troškova proiz-

vodnje. Takve značajke bi mogle pomoći da u budućnosti u određenim područjima zamijeni tradicionalne i konvencionalne načine obrade. Postojeći problemi još uvijek ograničuju industrijsku evaluaciju i širenje WAAM tehnologije na još veće područje, ali istraživanja teže tome da se ti problemi reduciraju i uklone. Daljnja istraživanja bi se svakako trebala temeljiti na spomenutim prijedlozima iz prethodnog poglavlja, uključujući i dodatni rad na optimizaciji parametara, dizajniranju komada, monitoringu i kontroli procesa, što sve zajedno može voditi do boljeg razumijevanja i implementacije tehnologije WAAM.

6. LITERATURA

- [1] J. Mehnert, J. Ding, H. Lockett, and P. Kazanas, "Design study for wire and arc additive manufacturing," *Int. J. Prod. Dev.*, vol. 19, no. 1/2/3, p. 2, 2014.
- [2] F. Martina, "Wire + arc additive vs. from solid :," 2015.
- [3] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Parda, and P. Colegrove, "Wire + arc additive manufacturing," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 836, no. March, p. 1743284715Y.000, 2015.
- [4] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, "Process planning strategy for robotic wire and arc additive manufacturing," in *The 4th International Conference on Robotic Welding, Intelligence and Automation (RWIA)*, 2014.
- [5] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, "Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 81, no. 1–4, pp. 465–481, 2015.
- [6] J. Ding, F. Martina, and S. Williams, "Production of large metallic components by additive manufacturing – issues and achievements," *1st Met. Mater. Process. Ind. challenges*, no. June, 2015.
- [7] D. Ding et al., "Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part," *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 73, pp. 66–75, 2016.
- [8] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, N. Larkin, and S. Van Duin, "Automatic multi-direction slicing algorithms for wire based additive manufacturing," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 37, pp. 130–150, 2016.
- [9] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, "A practical path planning methodology for wire and arc additive manufacturing of thin-walled structures," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 34, no. June, pp. 8–19, 2015.
- [10] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, "A tool-path generation strategy for wire and arc additive manufacturing," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 73, no. 1–4, pp. 173–183, 2014.
- [11] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, H. Li, and N. Larkin, "Adaptive path planning for wire-feed additive manufacturing using medial axis transformation," *J. Clean. Prod.*, vol. 133, pp. 942–952, 2016.
- [12] S. Suryakumar, K. P. Karunakaran, A. Bernard, U. Chandrasekhar, N. Raghavender, and D. Sharma, "Weld bead modeling and process optimization in hybrid layered manufacturing," *Comput. Des.*, vol. 43, no. 4, pp. 331–344, 2011.
- [13] W. Aiyiti, W. Zhao, B. Lu, and Y. Tang, "Investigation of the overlapping parameters of MPAW-based rapid prototyping," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 12, no. 3, pp. 165–172, 2006.
- [14] Y. Cao, S. Zhu, X. Liang, and W. Wang, "Overlapping model of beads and curve fitting of bead section for rapid manufacturing by robotic MAG welding process," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 27, no. 3, pp. 641–645, 2011.

- [15] J. Xiong, G. Zhang, H. Gao, and L. Wu, "Modeling of bead section profile and overlapping beads with experimental validation for robotic GMAW-based rapid manufacturing," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 29, no. 2, pp. 417–423, 2013.
- [16] Y. Li, Y. Sun, Q. Han, G. Zhang, and I. Horváth, "Enhanced beads overlapping model for wire and arc additive manufacturing of multi-layer multi-bead metallic parts," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 252, pp. 838–848, 2018.
- [17] A. Adebayo, J. Mehnert, and X. Tonnellier, "Limiting Travel Speed in Additive Layer Manufacturing," *Trends Weld. Res. Proc. 9th Int. Conf.*, vol. 3, pp. 1038–1044, 2013.
- [18] H. Geng, J. Li, J. Xiong, X. Lin, and F. Zhang, "Optimization of wire feed for GTAW based additive manufacturing," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 243, pp. 40–47, 2017.
- [19] G. Venturini, F. Montevecchi, A. Scippa, and G. Campatelli, "Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features," *Procedia CIRP*, vol. 55, pp. 95–100, 2016.
- [20] G. Posch, K. Chladil, and H. Chladil, "Material properties of CMT—metal additive manufactured duplex stainless steel blade-like geometries," *Weld. World*, pp. 1–10, 2017.
- [21] P. Almeida and S. Williams, "Innovative process model of Ti-6Al-4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT)," *Solid Free. Fabr. Symp.*, no. June, pp. 25–36, 2010.
- [22] C. Zhang, Y. Li, M. Gao, and X. Zeng, "Wire arc additive manufacturing of Al-6Mg alloy using variable polarity cold metal transfer arc as power source," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 711, pp. 415–423, 2018.
- [23] J. Ding, P. Colegrove, F. Martina, S. Williams, R. Wiktorowicz, and M. R. Palt, "Development of a laminar flow local shielding device for wire+arc additive manufacture," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 226, no. June 2016, pp. 99–105, 2015.
- [24] C. Shen, Z. Pan, D. Cuiuri, J. Roberts, and H. Li, "Fabrication of Fe-FeAl Functionally Graded Material Using the Wire-Arc Additive Manufacturing Process," *Metall. Mater. Trans. B*, vol. 47, no. 1, pp. 763–772, 2015.
- [25] Y. Ma, D. Cuiuri, H. Li, Z. Pan, and C. Shen, "The effect of post-production heat treatment on γ -TiAl alloys produced by the GTAW-based additive manufacturing process," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 657, pp. 88–95, 2016.
- [26] D. Ding, Z. Pan, S. van Duin, H. Li, and C. Shen, "Fabricating superior NiAl bronze components through wire arc additive manufacturing," *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 8, 2016.
- [27] E. Brandl, B. Baufeld, C. Leyens, and R. Gault, "Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: Comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications," *Phys. Procedia*, vol. 5, no. PART 2, pp. 595–606, 2010.
- [28] F. Wang, S. Williams, P. Colegrove, and A. A. Antony, "Microstructure and mechanical properties of wire and arc additive manufactured Ti-6Al-4V," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 44, no. 2, pp. 968–977, 2013.
- [29] J. Zhang et al., "Crack path selection at the interface of wrought and wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V," *Mater. Des.*, vol. 104, pp. 365–375, 2016.
- [30] F. Martina, "Fracture toughness and fatigue crack growth rate properties in wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V," no. November, 2016.
- [31] B. Baufeld, E. Brandl, and O. Van Der Biest, "Wire based additive layer manufacturing: Comparison of microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V components fabricated by laser-beam deposition and shaped metal deposition," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 211, no. 6, pp. 1146–1158, 2011.
- [32] J. Gu, J. Ding, S. W. Williams, H. Gu, P. Ma, and Y. Zhai, "The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 230, pp. 26–34, 2016.
- [33] J. Donoghue, A. A. Antony, F. Martina, P. A. Colegrove, S. W. Williams, and P. B. Prangnell, "The effectiveness of combining rolling deformation with Wire-Arc Additive Manufacturing on β -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V," *Mater. Charact.*, vol. 114, no. June, pp. 103–114, 2016.
- [34] F. Martina, P. A. Colegrove, S. W. Williams, and J. Meyer, "Microstructure of Interpass Rolled Wire + Arc Additive Manufacturing Ti-6Al-4V Components," *Metall. Mater. Trans. A Phys. Metall. Mater. Sci.*, vol. 46, no. 12, pp. 6103–6118, 2015.
- [35] X. Xiong, H. Zhang, and G. Wang, "Metal direct prototyping by using hybrid plasma deposition and milling," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 209, no. 1, pp. 124–130, 2009.
- [36] J. Guo, Y. Zhou, C. Liu, Q. Wu, X. Chen, and J. Lu, "Wire arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy: Grain refinement by adjusting pulse frequency," *Materials (Basel)*, vol. 9, no. 10, 2016.
- [37] F. Montevecchi, N. Grossi, H. Takagi, A. Scippa, H. Sasahara, and G. Campatelli, "Cutting Forces Analysis in Additive Manufactured AISI H13 Alloy," *Procedia CIRP*, vol. 46, pp. 476–479, 2016.



M&B
TEST

Poduzeće za zavarivanje, ispitivanje i usluge
ZAGREB

KONTROLA BEZ RAZARANJA

- RADIOGRAFSKA
- MAGNETSKA
- ULTRAZVUČNA

Tel./fax: 01/3734-122
10090 Zagreb - Susjedgrad
Ul. Milivoja Matošeca 3

