

# Kombinacija aditivne tehnologije i zavarivanja u izradi metalnih proizvoda - WAAM

Nikola Knezović, Angela Topić

Fakultet strojarstva, računarstva i elektrotehnike

Sveučilište u Mostaru

Mostar, 88000, Bosna i Hercegovina

[nikola.knezovic@sve-mo.ba](mailto:nikola.knezovic@sve-mo.ba); [angela@sve-mo.ba](mailto:angela@sve-mo.ba)

*Sažetak* — Aditivna proizvodnja je način proizvodnje u kojoj se predmeti izrađuju na način da se materijal dodaje sloj po sloj. Razne tehnologije aditivne proizvodnje koriste polimerne materijale ili metale u obliku praha kao dodatni materijal, te različite izvore energije, što često dovodi do problema. WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) je tehnologija aditivne proizvodnje koja je postala zanimljiva za istraživanje u zadnjih 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 manje poroznosti, te da je značajno smanjen udio strojnih obrada. Većinom se koristi u modernim industrijama, poput avionske, koje su bile pokretači i sponzori većine istraživanja. WAAM tehnologija koristi 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 ovome 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.

*Ključne riječi* – WAAM, aditivna proizvodnja, zavarivanje

## I. UVOD

Zahvaljujući konstantnom razvitku i napretku moderne industrije, uvijek postoji neprekidna potreba za istraživanjem i razvijanjem novih tehnologija. Jedan od najboljih primjera za to je avionska 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 radi dobre žilavosti ima lošu obradivost i nisku iskoristivost materijala, što se u avionskoj industriji izražava preko BTF (Buy To Fly) odnosa. 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 se sastoji od kombinacije izvora topline, dodatnog materijala i nekog sustava koji omogućava kretanje. Nažalost, većina AM tehnologija koristi polimerne materijale ili metal u praškastom obliku, što često može rezultirati izradom proizvoda 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 tehnologija koja je postala zanimljiva za istraživanje u zadnjim godinama dvadesetog stoljeća, iako prvi patent potječe otprilike skoro sto godina, iz 1925. [3] Budući da koristi električni luk kao izvor topline 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 značajno niža cijena. Dok većina ostalih AM tehnologija zahtijeva posebne uređaje i namjenski proizvedene materijale, WAAM koristi postojeću opremu za zavarivanje (izvore struje, pištolje, dodavače žice, zaštitne plinove, itd.), koje je potrebno kombinirati sa robotskom rukom ili CNC strojevima koji će omogućiti kretanje. 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 (moguće je taloženje materijala brzinom čak do 130 g/min). [4] Naravno, WAAM ima svojih mana kojih se treba riješiti. Ističu se zaostala naprezanja i deformacije radi unosa topline, relativno loša preciznost komada i kvaliteta površine, što zahtijeva dodatnu strojnu obradu. [5] Većina ovih problema je predmet istraživanja, neki su već smanjeni ili uklonjeni, ali još uvijek ima mjesta za napredak.

## II. IMPLEMENTACIJA TEHNOLOGIJE

Poput svake druge tehnologije aditivne proizvodnje, izrada proizvoda WAAM tehnologijom za početak zahtijeva konstruiranje proizvoda u obliku 3D CAD modela, korištenjem nekih od specijaliziranih softvera, ili još modernijih tehnologija reverznog inženjstva (3D skeniranje). [4] Potom se tako dizajniran proizvod sprema u neki od standardnih formata (obično je to .stl format). Takvi formati predstavljaju samo podatke o geometriji proizvoda, a ne informacije o načinu modeliranja, te služe kao osnova za „rezanje“ komada po visini u dvodimenzionalne slojeve. Nakon rezanja se kontura svakog takvog sloja koristi za generiranje putanje alata (pištolja za zavarivanje). Poslije toga je potrebno odabrati optimalne parametre zavarivanja (jačinu struje, napon, brzinu zavarivanja, itd.) i modelirati veličine koje utječu na geometriju slojeva da ne bi došlo do nepotrebnog preklapanja ili nedovoljnog stapanja i spajanja 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, pa se ona može uključiti u proces istovremeno s nanošenjem slojeva, ili se predmet obradi kasnije neovisno o WAAM postupku. [7] Osim toga, predmet se, ako je potrebna modifikacija određenih svojstava, može podvrgnuti i nekoj toplinskoj obradi.

Iako po ovom kratkom opisu implementacija WAAM tehnologije izgleda jednostavno, potrebno je znati da ovi koraci sadrže mnogo manjih operacija, koje moraju biti pažljivo proračunate i provedene da bi se dobio kvalitetan proizvod. Npr., da bi se dobili slojevi koji će omogućiti izradu što preciznijeg komada, razvijeni su posebni matematički algoritmi za rezanje 3D CAD modela. [8] Osim toga, mnogi su se radovi bavili pitanjem razvoja različitih vrsta i predložaka putanja čijim će se korištenjem moći napraviti proizvod sa što manje grešaka. [9]–[11]. Paralelno s razvijanjem i proučavanjem putanja je potrebno razviti i posebne algoritme za matematički proračun geometrijskih veličina vezanih za pojedine slojeve, što je tema radova [12]–[15]. Posebno područje istraživanja je odabir optimalnih parametara zavarivanja, što je prikazano u radovima [16]–[18]. 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 ovo kompleksan proces te da i najmanja greška u nekom od ovih koraka može dovesti do puno većih problema i grešaka kod konačnog proizvoda štetno utječući na kvalitetu površine, mikrostrukturu, mehanička svojstva i ukupnu kvalitetu komada. Međutim, ako se sve izvede kako treba, onda WAAM komadi mogu izgledati kao komad sa Sl. 1. [6]

Najčešće korišteni postupak zavarivanja u WAAM tehnologiji je MIG zavarivanje. Razlog za to je činjenica da je žica koaksijalna s pištoljem za zavarivanje, što omogućava lako programiranje i generiranje putanje alata. [3] Posebno je popularna varijanta 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. [19], [20] Ovaj postupak daje dobre rezultate prilikom korištenja čelika ili aluminija, ali kad se izrađuju proizvodi od titana, dolazi do pojave nestabilnog luka, pa se onda za titan češće koristi TIG postupak zavarivanja.



Slika 1. Izrada WAAM komada i djelomično strojno obrađeni komad [6]

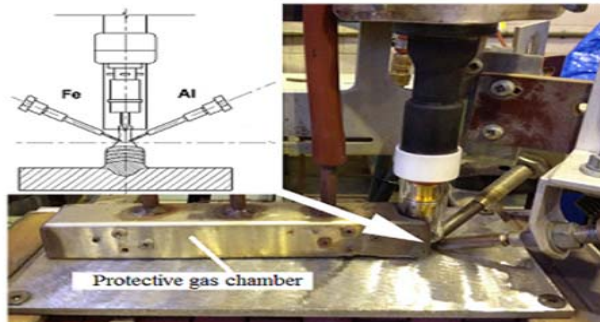
Problem kod TIG-a je što je dodavanje žice nezavisno od pištolja. Naime, da bi se dobili kvalitetni i homogeni slojevi, potrebno je žicu uvijek dodavati s iste strane, što uvjetuje rotaciju pištolja, te komplicira programiranje kretanja alata i generiranje njegove putanje. Može se koristiti i postupak zavarivanja plazmom, ali cijena takvog postupka je visoka i onda se tako anulira jedna od osnovnih prednosti WAAM postupka – niža cijena. [3]

### III. PREDNOSTI I MANE

WAAM tehnologija ima brojne prednosti u odnosu na konvencionalne načine strojne obrade i izrade proizvoda. Troškovi opreme su manji, jer nije potrebno kupovati posebnu opremu. Dovoljno je samo kombinirati postojeću opremu za zavarivanje s robotom ili CNC strojem. Budući da se koristi žica za zavarivanje, jeftiniji su i troškovi dodatnog materijala, a ujedno je i izbor materijala puno veći nego kod ostalih AM tehnologija, koji koriste polimere ili praškaste metale (dosta su rjeđi i skuplji od žice za zavarivanje). Brzina izrade je mnogo veća u usporedbi s takvim tehnologijama, jer WAAM omogućuje brzine taloženja materijala do 130 g/min. Čak je moguće postići i veće brzine, ali onda to može negativno utjecati na preciznost komada. Manje je otpada, što je u izravnoj vezi s već spomenutim BTF odnosom. Naime, to je odnos mase ili volumena početnog komada (sirovog materijala) i mase ili volumena gotovog proizvoda. Npr., kod nekih strojnih 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 dodatne 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 veličina komore za stvaranje zaštitne plinske atmosfere, u slučaju da je potrebna. [4], [6], [21] 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, budući da konstruktori nisu ograničeni oblikom i dimenzijama sirovog materijala.

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 i određene situacije i namjene, upravo zahvaljujući takvim svojstvima. Jedan od najčešće korištenih takvih materijala je željezov aluminid, Fe<sub>3</sub>Al. Inače se proizvodi od praškastog materijala, ali takav način često rezultira pojavom poroznosti, što je reducirano upotrebom WAAM-a. Postupak proizvodnje takvog materijala je prikazan na Sl. 2. [22] Osim ovoga materijala, zabilježena je i proizvodnja drugih legura, poput Ti-Al [23] i Ni-Al bronce [24]. Neki autori su istraživali i uspoređivali mehanička svojstva WAAM proizvoda sa proizvodima napravljenim na konvencionalne način, te su zabilježili ista ili bolja mehanička svojstva WAAM proizvoda od kovanih ili lijevanih proizvoda od istog materijala. Npr., prema [25] čvrstoća i duktilnost mogu biti jednaki, dok

otpornost na umor može biti i veća, prema [26]. Neka istraživanja su pokazala da se i pukotine sporije šire u WAAM materijalu nego u osnovnom materijalu, što dodatno dokazuje tvrdnju da WAAM komadi mogu imati mehanička svojstva u najmanju ruku usporediva sa proizvodima napravljenima na druge načine. [27], [28] Sve ove prednosti su donijele WAAM tehnologiji status jedne od potencijalno najboljih zamjena za dosadašnje konvencionalne načine obrade.



Slika 2. Proizvodnja Fe<sub>3</sub>Al WAAM postupkom [24]

Nažalost, još uvijek postoje određene mane i nedostaci koji uzrokuju probleme i ograničavaju upotrebu WAAM tehnologije na uže područje.

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, veliki 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). [25], [26], [29]

Specifičan problem je već spomenuto modeliranje geometrije slojeva (bead modelling). To je skup operacija koji povezuje varijable vezane za planiranje i generiranje putanje sa odabirom optimalnih parametara, da bi se dobila što bolja geometrija slojeva. Modeliranje pojedinačnih slojeva i njihovog načina preklapanja značajno utječe na kvalitetu proizvoda, jer ako je dobro izvedeno, omogućava izradu slojeva s finom kvalitetom površine i geometrijskom preciznošću. Ako se ovaj dio postupka ne odradi kvalitetno, mogu se javiti problemi poput suvišnog preklapanja ili nedovoljnog stapanja i vezivanja slojeva. Mnogi istraživači su se bazirali na ovaj problem, razvijajući algoritme koji omogućavaju što kvalitetniji proces, te je tako nađeno rješenje u vidu TOM-a (Tangent Overlapping Model), modela koji pomaže pri postizanju zadovoljavajuće kvalitete modeliranja slojeva, na način da proračunava potrebnu udaljenost između dva susjedna sloja. [12], [14], [15]

Generiranje i planiranje putanje alata je korak u WAAM postupku koji često može izazvati probleme poput poroznosti, šupljina, taloženja viška materijala (peak development - camber) ili nedovoljnog taloženja i vezivanja materijala (deposition failure - sag). Poroznosti i šupljine se javljaju najčešće u komadima s većom debljinom zida, jer ih treba popunjavati, dok se problemi s taloženjem javljaju kod proizvoda koji sadrže dijelove koji se križaju.

Problemi s poroznosti i šupljinama se obično javljaju pri upotrebi tradicionalnih predložaka putanja, koji dvodimenzionalnu geometriju popunjavaju na način da se naprave vanjske konture, pa se puni unutrašnjost. Ako pri modeliranju slojeva nije dobro proračunata vrijednost pomaka alata  $d$  (širina dvije različite pozicije alata između susjednih slojeva), onda pištolj neće na potrebnim mjestima moći istopiti dovoljno žice, te se dva susjedna sloja neće dovoljno dobro vezati. Rješenje ovoga problema je korištenje metodologije nazvane MAT (Medial Axis Transformation), pri kojoj se predmet izrađuje na način da pištolj prvo napravi središnji "kostur" proizvoda, a onda ide prema vanjskim granicama. Na taj način se puni kompletna unutrašnjost komada, iako to dovodi do potrebe za dodatnom strojnom obradom, tako da se treba pronaći kompromis pri dizajniranju komada. Ova metodologija je predložena i istraživana u radovima. [9], [11]

Višak taloženog materijala ili njegov nedostatak se javljaju 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). Na Sl. 3. [1] se može vidjeti kako izgledaju predmeti na kojima su se javile takve vrste grešaka. Rješenje koje je predložio rad [1] je da se ovakvi predmeti rade na način da se formiraju dva slova „L“ koja se dodiruju svojim kutem na mjestu gdje treba biti križanje. Tako ne dolazi do prelaska jednog sloja preko drugog, te je manja mogućnost ovakve pogreške, ili do nje dolazi u nekom manjem obliku.

Druga vrsta problema koji se mogu javiti su klasični problemi zavarivanja, a od njih se posebno ističu zaostala naprezanja, pomaci i zaostale deformacije. WAAM proizvodi se obično izrađuju na način da se materijal nanosi s jedne strane osnovne ploče. Budući da u postupcima zavarivanja dolazi do velikih unosa topline, stvaraju se deformacije, jer se osnovna ploča savija pa ima tendenciju da onda savije i za sobom "povuče" i komad koji se izrađuje. To bi se donekle moglo riješiti uklještenjem osnovne ploče, ali onda se nakon otpuštanja javljaju značajna zaostala naprezanja, koja će se kad-tad manifestirati, tako da nije postignut prevelik napredak. Jedno od potencijalnih rješenja je razvijanje nove strategije nanošenja slojeva, koja se naziva Balanced Building Strategy ili Symmetrical Building [3]. Ta strategija se bazira na tome da se odredi najpogodnija ravnina simetrije komada i da se osnovna ploča podudara s tom ravninom (dakle, praktički se osnovna ploča namješta da bi bila pozicionirana na sredini komada). 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 napraviti više komada, pa je ovo dodatna prednost, a nekad je nužan redizajn komada.



Slika 3. Camber and sag in WAAM products [1]

#### IV. BUDUĆNOST I POTENCIJALNA ISTRAŽIVANJA

WAAM je izrazito multidisciplinarna tehnologija, sastavljena od tehnologija iz više različitih područja, pa se tako i istraživanja mogu podijeliti na više područja. Iako je dosta toga već urađeno, ipak je ostalo još prostora za dodatni napredak i istraživanja. Npr., neki autori predlažu uvođenje kontrole bez razaranja u proces, što bi omogućilo ranije otkrivanje grešaka (*on-line monitoring*). [3] Već spomenuti problemi s anizotropnim svojstvima su se u nekim radovima rješavali upotrebom valjanja određenom silom, što je dovelo do rafiniranja zrna. [30]–[32]. Budući da je još uvijek potrebna strojna obrada, neki istraživači su predložili uključivanje nekih obrada u sami proces izrade, što iziskuje generiranje dodatnih putanja alata. [33] Jedna od ideja je i uključivanje novih materijala, poput magnezija ili nehrđajućih čelika. [20], [34]. Jedan od najvećih izazova, koji bi donio i značajan napredak, je pokušaj automatizacije kompletnog postupka, gdje bi čovjekov utjecaj bio potreban samo pri pokretanju postupka. [7]

#### V. ZAKLJUČAK

WAAM je tehnologija s velikim potencijalom iskoristivosti, zahvaljujući prednostima poput brzine izrade komada, manje količine otpada te nižih troškova proizvodnje. Takve karakteristike bi mogle pomoći da u budućnosti u određenim područjima zamijeni tradicionalne i konvencionalne načine obrade. Postojeći problemi još uvijek ograničavaju industrijsku evaluaciju i širenje WAAM tehnologije na još veće područje, ali istraživanja teže tome da se ti problemi reduciraju i uklone. Daljna istraživanja bi se svakako trebala bazirati 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 WAAM tehnologije, te do šire upotrebe te tehnologije u modernoj industriji.

#### VI. LITERATURA

- [1] J. Mehnen, J. Ding, H. Lockett, and P. Kazanas, "Design study for wire and arc additive manufacture," *Int. J. Prod. Dev.*, vol. 19, no. 2, pp. 2-20, 2014.
- [2] F. Martina, "Wire + arc additive vs . from solid:," 2015.
- [3] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove, "Wire + arc additive manufacturing," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 2, no.7, pp. 641-647, 2015.
- [4] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, "Process planning strategy for robotic wire and arc additive manufacturing," in proceedings of 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 manufacture – issues and achievements," in proceedings of 1st Met. Mater. Process. Ind. challenges, 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] A. Adebayo, J. Mehnen, and X. Tonnellier, "Limiting Travel Speed in Additive Layer Manufacturing," *Trends Weld. Res. Proc. 9th Int. Conf.*, vol. 3, pp. 1038-1044, 2013.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Y. Ma, D. Cuiuri, H. Li, Z. Pan, and C. Shen, "The effect of postproduction heat treatment on  $\gamma$ -TiAl alloys produced by the GTAW-based additive manufacturing process," *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 657, pp. 86-95, 2016.
- [24] 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, pp. 652-663 2016.
- [25] 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.
- [26] F. Wang, S. Williams, P. Colegrove, and A. A. Antonysamy, "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.
- [27] 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.

- [28] F. Martina, "Fracture toughness and fatigue crack growth rate properties in wire + arc additive manufactured Ti-6Al-4V," *Fat. & Frac. of Eng. Mat. and Str.*, vol. 40, no. 5, pp. 790-803, 2017.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] J. Donoghue, A. A. Antonysamy, F. Martina, P. A. Colegrove, S. W. Williams, and P. B. Prangnell, "The effectiveness of combining rolling deformation with Wire-Arc Additive Manufacture on  $\beta$ -grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V," *Mater. Charact.*, vol. 114, no. June, pp. 103–114, 2016.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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, pp. 823-835, 2016.

#### ABSTRACT

Additive Manufacturing (AM) is a technique which produce structures by building up material in a layer by layer fashion. Mostly, AM technologies use powder material as feedstock and different heat sources, so different kind of problems can occur. WAAM (Wire and Arc Additive Manufacturing) is a technology which has been investigated in last 30 years, although first patent dates from 1925. It became popular and interesting to investigate due to its ability to produce fully dense metal parts and large near-net-shape product, which are mostly used in aerospace industry. WAAM uses existing welding equipment, electric arc as heat source and wire as feedstock, which makes it cheaper compared to the most of the other AM technologies. Process consists of few steps (CAD model designing, slicing into layers, generating tool path, choosing welding parameters, material deposition and post-processing) which are explained in this paper, as well as main advantages and disadvantages of the process. Also, aim of the paper is to give review about researches so far in this area and to give suggestions what can be done in the future.

#### COMBINATION OF ADDITIVE MANUFACTURING AND WELDING - WAAM

Nikola Knezović; Angela Topić