

PRESKOK IZ MIG/MAG VARJENJA V VISOKO PRODUKTIVEN 3D TISK KOVIN

Aljaž ŠČETINEC¹, Damjan KLOBČAR¹, Drago BRAČUN²

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za varjenje

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za proizvodno kibernetiko in eksperimentiranje

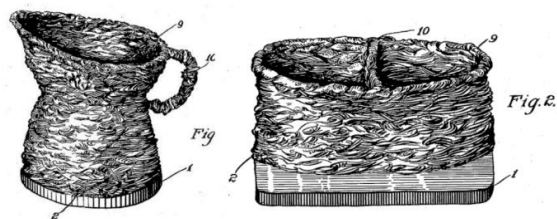
IZVLEČEK

Predstavljena je tehnologija 3D tiska kovin, osnovana na konvencionalnem varilskem postopku MIG/MAG (ang. Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM). Glavni izzivi procesa so v doseganju geometrijske točnosti končnih izdelkov, stabilnosti in robustnosti procesa. Predstavljen je sistem za WAAM, ki je bil zasnovan v Laboratoriju za varjenje, skupaj z glavnimi nadgradnjami, ki so bile razvite za rešitev predstavljenih izzivov. Rezultati tekočih raziskav kažejo, da je za povečanje robustnosti in večjo geometrijsko točnost končnih izdelkov potrebno on-line krmiljenje procesa. Zagotavljanje ponovljive geometrije posameznih varkov se zagotovi z regulacijo medvarkovne temperature. Razvit sistem regulacije izniči kopičenje toplote v varjencu in s tem posedanje posameznih slojev in degradacijo geometrije končnega izdelka. Predstavljen je sistem za merjenje višine posameznega sloja prek električnih karakteristik obloka in prostega konca žice. Sistem omogoča ohranjanje konstantne razdalje med gorilnikom in varjencem tekom izdelave. Na koncu je predstavljen še sistem za adaptivno generacijo poti navarjanja. Razviti algoritem samodejno prepozna odstopanje višine izdelka od vhodnega CAD modela. Pot navarjanja prilagodi tako, da so dimenzije končnega izdelka v dobrem ujemanju z vhodnim CAD modelom.

1 UVOD

V strojništvu se v zadnjem času pogosto govori o aditivnih tehnologijah kovin. Te tehnologije omogočajo izdelavo izdelkov z nalaganjem materiala sloj za slojem, za razliko od konvencionalnih izdelovalnih tehnologij, ki temeljijo na odnašanju materiala [1]. Obločno navarjanje z žico (ang. WAAM - Wire and Arc additive Manufacturing) je aditivna tehnologija, ki temelji na že obstoječih obločnih varilskih postopkih. Z WAAM sicer ni mogoče doseči tako visokih dimenzijskih toleranc kot pri istemih, ki uporabljajo material v prašni obliki (npr. SLM), omogoča pa doseganje mnogo večjih produktivnosti. [2]. Prvi patent na postopku WAAM je Bakerjev iz leta 1926 (slika 1), vendar do devetdesetih let WAAM ni bil prepoznan kot izdelovalna tehnologija, primerna za industrijsko rabo [3]. Danes WAAM omogoča izdelavo izdelkov iz titanovih, aluminijevih in nikljevih zlitin ter jekla [4], pogosto se uporablja v letalski industriji [5]. V primerjavi s konvencionalnimi tehnologijami, ki temeljijo na odnašanju materiala, ta tehnologija zmanjša izdelovalne čase

za 40-60 % in čase končnih obdelav za 15-20 %, odvisno od velikosti komponente [6].



Slika 1: Izdelki predstavljeni v prvem prijavljenem patentu za oblikovno obločno navarjanje [3].

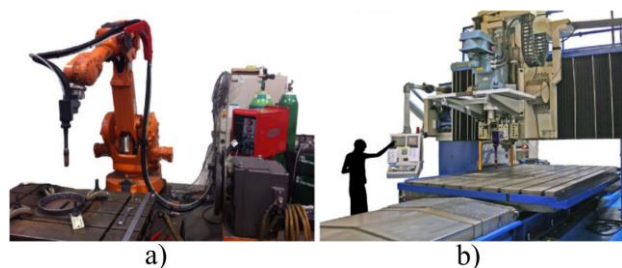
Omogoča izdelavo srednjih do velikih kovinskih izdelkov, teoretično celo neomejenih velikosti [7], kar dokazuje dekorativni most iz nerjavnega jekla podjetja MX3D, v celoti izdelan z WAAM, prikazan na sliki 2a in del raketnega motorja podjetja Relativity Space na sliki 2b. V splošnem je postopek prepoznan kot aditivna tehnologija, ki omogoča izdelavo skoraj-končne oblike izdelka. To pomeni, da je po navarjanju, odvisno od končne aplikacije, potrebna še naknadna fina obdelava z odrezavanjem. V primerjavi z ostalimi

kovinskimi aditivnimi tehnologijami je WAAM drastično cenejša tehnologija. To je zaradi zaradi nizke cene dodatnega materiala, in ker je osnovna oprema za WAAM že zrela varilska tehnologija tehnologija [6,8,9].



Slika 2: Izdelki velikih gabaritov, narejeni z WAAM: a) most MX3D na sejmu Dutch Design Week 2018 in b) del raketnega motorja Relativity Space [7,10]

Sistemi za navarjanje so sestavljeni iz vira varilnega toka in manipulatorja. Manipulator je običajno industrijski robot ali več osni CNC stroj (slika 3), obstajajo pa tudi komercialno dostopni namenski WAAM sistemi [11]. Največkrat se uporablja MIG/MAG varilni postopek. Produktivnost se giblje med 1-9,5 kg/h, ki so jo z uporabo dveh žic dosegli Filomeno in sodelavci [12]. To naredi postopek primeren za hitro izdelavo izdelkov velikih gabaritov [2].

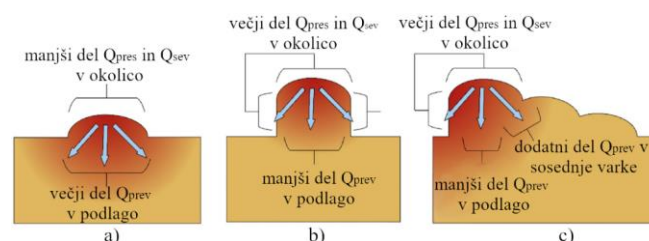


Slika 3: a) WAAM sistem na 6-osnem ABB robotu in CMT viru varilnega toka ter b) stroj za varjenje s trenjem in mešanjem, predelan v WAAM sistem [6]

Hitrost prenosa toplote iz izdelka v okolico in podlago med navarjanjem ima ključen vpliv na geometrijo in mikrostrukturo navarov. Pri hitrem odvodu toplote, se talina hitro strdi in nastanejo ozki in visoki varki drobnozrnate mikrostrukture. Nizek odvod toplote povzroči razlivanje varkov (nizki in široki) grobnozrnate mikrostrukture [13].

Slika 4 prikazuje tri tipične pogoje, ki vplivajo na prenos toplote iz izdelka v okolico. Pri navarjanju prvega varka pride do primarno prevoda toplote iz varka v podlago. Pri navarjanju višjih slojev tanke stene se delež odvoda toplote v podlago zmanjša, poveča pa se prenos toplote v okolico preko sevanja in konvekcije. Tak odvod toplote je počasnejši. Pri navarjanju debelostenskih izdelkov pa se poleg sevanja in konvekcije v okolico pojavi še večji delež odvoda toplote s prevodom v sosednje varke.

Eden od izzivov pri postopku WAAM je njegova občutljivost na spremembe procesnih parametrov. Odklon od nominalnih vrednosti parametrov povzroči neželen odklon od višine in širine navarjenih plasti [6,14]. Eden od načinov zagotavljanja ustrezne geometrije zadnjega sloja pred nanosom novega je izdelava sloja s predvideno nadmero in odrezavanjem po vsakem sloju. Vendar dodajanje vmesne operacije poveča kompleksnost postrojenja, čas in stroške izdelave [15].



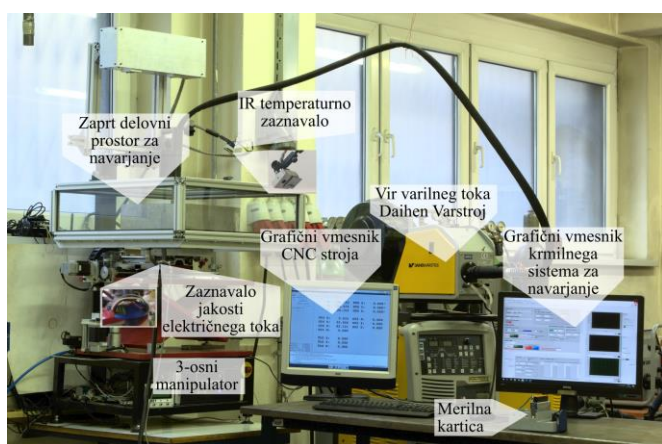
Slika 4: Diagram prevoda (Q_{prev}), prestopa (Q_{pres}) sevanja (Q_{sev}) pri: a) navarjanju prvega sloja, b) višje tanke stane in c) debelostenskega izdelka [4].

2 SISTEM ZA NAVARJANJE

V Laboratoriju za varjenje Fakultete za strojništvo smo razvili napredni WAAM sistem za navarjanje, prikazan na sliki 5. Za sistem so bile razvite nadgradnje, ki omogočajo večjo stabilnost procesa: a) sistem za brezdotično regulacijo medvarkovne temperature, b) sistem za merjenje višine posameznega sloja in c) sistem za adaptivno generacijo poti navarjanja. Brezdotična regulacija temperature omogoča krajše čase izdelave in večjo geometrijsko ponovljivost varkov. Sistem za merjenje višine posameznega sloja omogoča ohranjanje razdalje med gorilnikom in varjencem. Sistem za adaptivno

generacijo poti navarjanja pa zagotavlja geometrijsko točnost končnih izdelkov. Delovanje posameznega sistema je opisano v nadaljevanju.

Proces generacije poti navarjanja je sestavljen iz dveh korakov: a) razrez 3D modela izdelka na plasti navarjanja in b) generacija poti navarjanja za vsako plast posebej. Zaporedno se po predvideni trajektoriji navarjajo plasti. Med dvema slojema pa je potrebno zagotoviti ustrezen čas pavze, ki zagotovi, da navarjeni del izdelka doseže ustrezno medvarkovno temperaturo, da ne pride do prekomernega razlivanja navarov.



Slika 5: Sistem za navarjanje, razvit v Laboratoriju za varjenje Fakultete za strojništvo.

2.1 Vir varilnega toka in manipulator

Sistem za navarjanje je sestavljen iz vira varilnega toka in CNC pozicionirnega sistema, ki omogoča pomike gorilnika v treh različnih oseh. Na pomično mizo CNC stroja je bila nameščena zaščitna posoda, ki ščiti stroj in okolico pred UV sevanjem in izbrizgi taline med procesom varjenja. Obdelovalna površina je fluidno hlajena in električno izolirana od ostalih delov stroja.

Za navarjanje je bil uporabljen MIG/MAG varilni stroj z inverterskim sinergetskim virom varilnega toka WELBEE P500L proizvajalca Daihen Varstroj. Uporabljeni varilni programi so bili DC Pulse in DC Low Spatter. DC Low Spatter deluje v kratkostičnem režimu prehoda materiala skozi oblok z dinamično karakteristiko, ki omogoča varjenje z nizkim vnosom energije pri nizkih jakostih varilnega toka. DC Pulse

deluje v pulznem režimu prehoda materiala skozi oblok.

2.2 Brezdotična regulacija medvarkovne temperature

Na pozicionirnem sistemu je z magnetnim gibljivim nosilcem, nameščen brezdotični IR merilnik temperature (slika 6). Ta meri povprečno temperaturo površine v določenem vidnem območju. Zaznavalo je zaprto v robustnem ohišju z avtomatsko loputo, ki se zapre med varjenjem, da zaščiti pirometer pred izbrizgi, iskrenjem in dimom. Po izvedenem navarjanju sloja, se loputa odpre in zaznavalo skenira teme navara toliko časa, dokler ni temperatura po celotni opazovani površini nižja od nastavljene. Takrat se loputa zapre in krmilnik zaznavala pošlje CNC krmilniku ukaz za navarjanje naslednjega sloja.

Za merjenje medvarkovne temperature je uporabljen IR termometer iz družine MLX90614, umerjen za merjenje temperature površine od -70 do 380 °C. Zaznavalo ima lečo, ki mu daje zorni kot 5°, kar omogoča merjenje relativno majhnih površin z večjih razdalj.

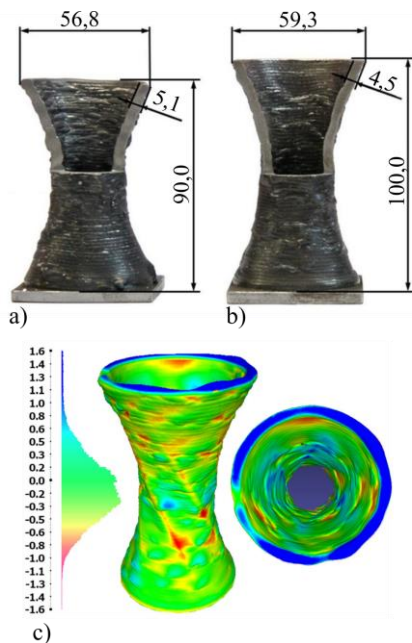


Slika 6: Brezdotično IR temperaturno zaznavalo na gibljivem nosilcu.

Gorilnik za navarjanje je opremljen s specialno plinsko šobo. Ta med navarjanjem ustvarja zaščitno atmosfero, med fazo hlajenja pa skozi njo pod pritiskom piha zrak in s prisilno konvekcijo odvaja toploto iz navarjenega izdelka. S tem se časi pavze med dvema slojema skrajšajo.

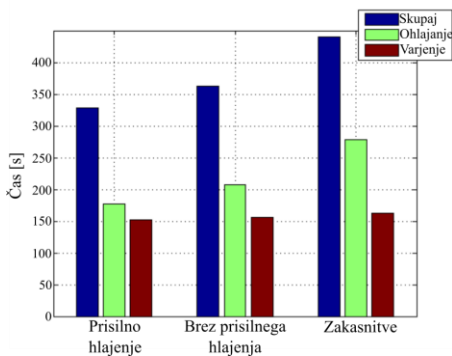
Slika 7 kaže primerjavo končne geometrije dveh izdelkov. Prvi izdelek je izdelan brez regulacije medvarkovne temperature, s prekratnim časom pavze med dvema slojema. Posledica je neželjeno posedanje izdelka in napačna končna geometrija. V drugem primeru je uporabljen krmilnik medvarkovne temperature in

prisilno hlajenje s stisnjenim zrakom. Slika 7c prikazuje dobro ujemanje geometrije izdelka s CAD modelom z navarjenjem z regulacijo medvarkovne temperature.



Slika 7: a) Demonstracijski izdelek izdelan: a) s prekratnim časom pavze, b) z regulacijo medvarkovne temperature in c) primerjava vhodnega CAD modela s 3D skenirano geometrijo izdelano z regulacijo medvarkovne temperature. [13]

Slika 8 prikazuje razlike v časih izdelave ravne stene, zgrajene iz šestih slojev pri: a) prisilnem hlajenju s stisnjenim zrakom, b) brez prisilnega hlajenja s stisnjenim zrakom in c) s konstantnim časom zakasnitve v fazi hlajenja.



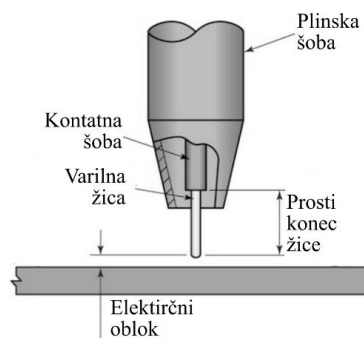
Slika 8: Primerjava časa izdelave, časa ohlajanja in časa navarjanja pri uporabi sistema za hlajenje s stisnjenim zrakom in merjenjem temperature,

brez hlajenja s stisnjenim zrakom in merjenjem temperature in s prisilnim hlajenjem s konstantnim časom pavze 30 s (zakasnitve) [13].

2.3 Regulacija oddaljenosti gorilnika od varjenca

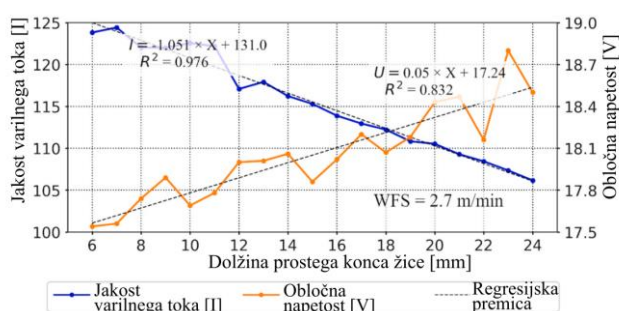
Ohranjanje oddaljenosti gorilnika od varjenca je pomembno za zagotavljanje stabilnosti procesa. Prekomerna oddaljenost vpliva na slabšo kakovost zaščitne atmosfere, v skrajnem primeru pa se zaradi nezmožnosti vžiga obloka proces ustavi. Premajhna razdalja med gorilnikom in varjencem povzroča preveliko količino sprijetih obrizgov na kontaktni in plinski šobi. V skrajnem primeru pa se proces zaradi kolizije med gorilnikom in varjencem lahko tudi ustavi.

Pri TIG varjenju je že krmilnik dolžine obloka že zrela tehnologija. Razvit je bil soroden sistem, ki omogoča nadzor oddaljenosti MIG/MAG gorilnika od varjenca. Prosti konec žice je dolžina varilne žice, izmerjena od kontaktne šobe do obloka (Slika 9). Električni tok teče po vodniku (masi) do kontaktne šobe, kjer se prenese na varilno žico. Notranja regulacija vira varilnega toka skuša držati dolžino obloka konstantno. Pri konstantni dolžini obloka je električna upornost med varjenjem sestavljena iz konstantne električne upornosti obloka in spremenljive električne upornosti prostega konca žice. Dolžina prostega konca žice se po vsakem navarjenem sloju spremeni, ker višina navara zaradi narave procesa ni konstantna. Spremembe električne upornosti zaradi variacij v dolžini prostega konca varilne žice vodijo do sprememb v jakosti električnega toka in obločni napetosti.



Slika 9: Prikaz prostega konca žice v MIG/MAG gorilniku.

Relacija med obločno napetostjo oz. jakostjo električnega toka in dolžino prostega konca žice se je določila eksperimentalno. Na ploščo so se navarjali ravni varki, kjer se je za vsak sosednji varek dolžina prostega konca žice povečala za 1 mm. Prvotna dolžina je bila 8 mm, končna pa 26 mm. Slika 10 kaže odvisnost med dolžino prostega konca žice in jakostjo varilnega toka oz. obločno napetostjo. Na podlagi empiričnih rezultatov, je bil razvit krmilnik, ki med navarjanjem ohranja konstantno razdaljo med gorilnikom in izdelkom, ki se navarja.



Slika 10: Povprečna jakost električnega toka in povprečna napetost kot funkcija dolžine prostega konca žice pri hitrosti dodajanja žice 2,7 m/min. Aproximacija z linearno funkcijo je boljša pri funkciji jakosti varilnega toka [16].

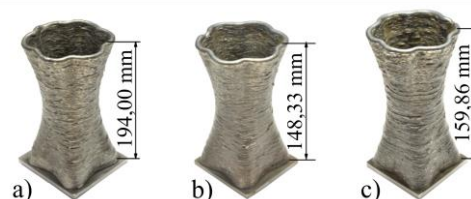
Krmilnik na podlagi meritev električnih karakteristik med navarjanjem izračuna višino predhodno navarjenega sloja. To omogoča ustrezen pomik gorilnika po z-osi v naslednji sloj. To je pomembno, ker se brez nadzora napake višine sloja akumulirajo. Razdalja med gorilnikom in varjencem se tudi pri navarjanju kompleksnih geometrij in visokih izdelkov ohranja konstantna, kot kaže slika 12.

2.4 Adaptivna generacija poti navarjanja

Za doseganje ujemanja končne geometrije izdelka z vhodnim 3D modelom je bil razvit algoritem adaptivne generacije poti navarjanja. Algoritem po nanosu vsakega sloja primerja trenutno višino izdelka s predvideno glede na vhodni 3D model. Trenutna višina izdelka je izračunana kot vsota vseh predhodnih višin posameznih slojev. V kolikor se višini ne ujemata, se pot orodja ponovno generira s

prirejeno vrednostjo višine sloja. Nova višina posameznega sloja se izračuna kot povprečna višina vseh predhodno navarjenih slojev.

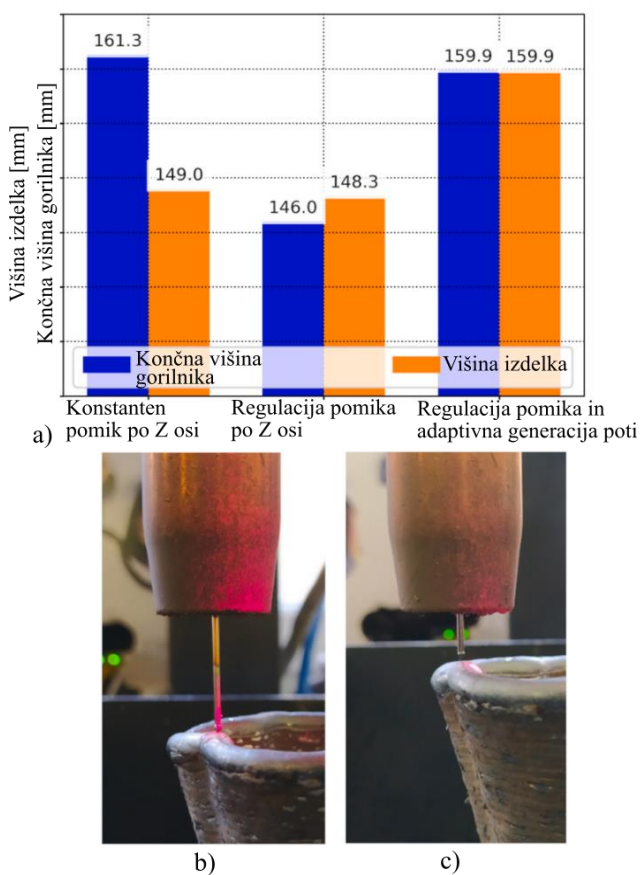
Na sliki 11 so prikazani demonstracijski izdelki, kjer je bil CAD model visok 160 mm. Izdelki so bili navarjeni: brez (Slika 11a) in z regulacijo pomika gorilnika (Slika 11b) in adaptivno generacijo poti navarjanja (Slika 11c). Jasno se vidi razlika v končni višini izdelkov. Primerjava 3D skeniranih izdelkov s CAD modelom pa je prikazana na sliki 13.



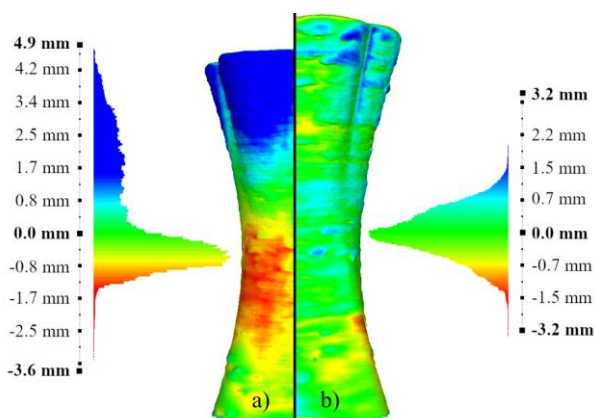
Slika 11: Demonstracijski kosi izdelani: a) brez regulacije pomika gorilnika po Z osi, b) krmiljenje oddaljenosti gorilnika od varjenca in c) krmiljenje oddaljenosti gorilnika od varjenca v kombinaciji z adaptivno generacijo poti orodja. [16]

Demonstracija vpliva regulacije oddaljenosti gorilnika od varjenca v kombinaciji z adaptivno generacijo poti navarjanja je prikazana na sliki 12. V primeru konstantnega pomika gorilnika po z-osi pride zaradi posedanja izdelka do prevelike oddaljenosti gorilnika od varjenca (slika 12b). Regulacija pomika gorilnika po z-osi omogoča ohranjanje razdalje med gorilnikom in varjencem (slika 12c), še vedno pa je končni izdelek napačne geometrije. Regulacija pomika gorilnika po z-osi v kombinaciji z adaptivno generacijo poti navarjanja zagotavlja dobro ujemanje končnega izdelka s CAD modelom.

Slika 13 prikazuje primerjavo med 3D skeniranim izdelkom in odstopanja teh od vhodnega 3D modela. Pri izdelku, narejenem brez adaptivne generacije poti se akumulira napaka višine posameznega sloja, kar privede do »povešene« geometrije končnega izdelka. Pri drugem izdelku, se je pri prekomernem odstopanju višine v primerjavi s 3D modelom popravila višina sloja in znova generirala pot navarjanja. Končni rezultat je geometrija izdelka, ki se dobro ujema z vstopnim 3D modelom.



Slika 12: a) Primerjava končne razdalje šobe od varjenca in končne višine izdelka. b) Razlika v končni razdalji šobe od varjenca pri navarjanju brez adaptivne generacije poti in c) razlika pri navarjanju z adaptivno generacijo poti [16].



Slika 13: Odstopanje geometrije 3D skeniranega izdelka od vhodnega CAD modela: a) brez uporabe adaptivne generacije poti in b) z uporabo adaptivne generacije poti navarjanja [16]

3 SKLEP

Zagotavljanje stabilnosti procesa WAAM zahteva interdisciplinaren pristop, kjer so ključna znanja iz varilstva, materialov in mehatronike. Rezultati dosedanjega razvoja WAAM sistema kažejo, da je z adaptivnim krmiljenjem možno drastično izboljšati stabilnost procesa in natančnost izdelave. Razvit sistem preko grafičnega vmesnika uporabnika vodi od vhodnega CAD modela do razreza modela na plasti in generacijo g-kode ter nastavitve procesnih parametrov. Na poslgi eksperimentov lahko ugotovimo, da:

1. Pravilen čas pavze med sloji oz. medvarkovna temperatura sta pomembna za zagotavljanje stabilnosti geometrije navarov. Brez regulacije lahko pride do kopičenja toplote v varjencu in posedanja slojev, ali pa do predolgh časov pavze, ki lahko močno podaljšajo proces izdelave. Regulacija medvarkovne temperature izključi potrebo po nastavljanju ustreznega časa pavze med sloji.
2. Hlajenje varjenca med sloji s stisnjenim zrakom močno skrajša celotni čas izdelave.
3. Merjenje razdalje med gorilnikom in varjencem je možno prek spremljanja električnih parametrov obloka. Krmiljenje razdalje med gorilnikom in varjencem omogoča stabilno navarjanje s konstantno idealno dolžino prostega konca žice.
4. Adaptivna generacija poti omogoča točne končne geometrije izdelka. Izniči napake geometrije, ki je posledica akumulacije odstopkov višine posameznega sloja od predvidene.

Viri:

[1] Dinovitzer M, Chen X, Laliberte J, Huang X, Frei H. Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure. *Addit Manuf* 2019;26:138–46. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.12.013>.

[2] Rodrigues TA, Duarte V, Miranda RM, Santos TG, Oliveira JP. Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials (Basel)* 2019;12. <https://doi.org/10.3390/ma12071121>.

- [3] R. Baker. Method of making decorative articles. US Pat 1925:1–3.
- [4] Cunningham CR, Flynn JM, Shokrani A, Dhokia V, Newman ST. Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing. *Addit Manuf* 2018;22:672–86. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.06.020>.
- [5] Wu B, Pan Z, Ding D, Cuiuri D, Li H, Xu J, et al. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *J Manuf Process* 2018;35:127–39. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2018.08.001>.
- [6] Williams SW, Martina F, Addison AC, Ding J, Pardal G, Colegrove P. Wire + Arc additive manufacturing. *Mater Sci Technol (United Kingdom)* 2016;32:641–7. <https://doi.org/10.1179/1743284715Y.0000000073>.
- [7] Joosten SK. Printing a stainless steel bridge: An exploration of structural properties of stainless steel additive manufactures for civil engineering purposes. *Struct Eng* 2015;Master of:213.
- [8] Buchanan C, Gardner L. Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges. *Eng Struct* 2019;180:332–48. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.045>.
- [9] Thompson MK, Moroni G, Vaneker T, Fadel G, Campbell RI, Gibson I, et al. Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. *CIRP Ann - Manuf Technol* 2016;65:737–60. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.05.004>.
- [10] Relativity Space: Terran 1 n.d. <https://www.relativityspace.com/terran> (accessed July 23, 2020).
- [11] Singh SR, Khanna P. Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials. *Mater Today Proc* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.030>.
- [12] Martina F, Ding J, Williams S, Caballero A, Pardal G, Quintino L. Tandem metal inert gas process for high productivity wire arc additive manufacturing in stainless steel. *Addit Manuf* 2019;25:545–50. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.11.022>.
- [13] Kozamernik N, Bračun D, Klobčar D. WAAM system with interpass temperature control and forced cooling for near-net-shape printing of small metal components. *Int J Adv Manuf Technol* 2020. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05958-8>.
- [14] Xiong J, Yin Z, Zhang W. Closed-loop control of variable layer width for thin-walled parts in wire and arc additive manufacturing. *J Mater Process Technol* 2016;233:100–6. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.02.021>.
- [15] Kwak YM, Doumanidis CC. Geometry regulation of material deposition in near-net shape manufacturing by thermally scanned welding. *J Manuf Process* 2002;4:28–41. [https://doi.org/10.1016/S1526-6125\(02\)70131-X](https://doi.org/10.1016/S1526-6125(02)70131-X).
- [16] Ščetinec A, Klobčar D, Bračun D. In-process path replanning and online layer height control through deposition arc current for gas metal arc based additive manufacturing. *J Manuf Process* 2021;64:1169–79. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.02.038>.

PRESKOK IZ MIG/MAG VARJENJA V VISOKO PRODUKTIVEN 3D TISK KOVIN

Aljaž ŠČETINEC¹, Damjan KLOBČAR¹, Drago BRAČUN²

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za varjenje

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo, Laboratorij za proizvodno kibernetiko in eksperimentiranje
