

Oblikovno navarjanje kovinskih izdelkov z uporabo tehnologije WAAM

Damjan KLOBČAR, Janez TUŠEK

Izvleček: Prikazan je pregled aditivnih tehnologij, ki omogočajo izdelavo kovinskih izdelkov. Poudarek je na obločnih tehnologijah navarjanja, pri katerih kot dodajni material uporabljamo varilno žico (WAAM – wire arc additive manufacturing). Gre za tehnologije varjenja TIG, varjenja MIG/MAG in plazemskega varjenja. Njihova osrednja prednost v primerjavi z uporabo laserja ali elektronskega snopa so nižji investicijski stroški in stroški obratovanja. Imajo pa te tehnologije nekoliko slabšo natančnost izdelave. Prednosti tehnologije WAAM se kažejo pri izdelavi večjih izdelkov, pri katerih se nadomešča izdelava z odrezovanjem, ko je potrebno iz velikega in dragega surovca odvzeti večje količine materiala. S tehnologijo WAAM smo ob uporabi varilnega robota in tehnologije CMT izdelovali tanke stene v različnih legah. Uporabljali smo varilno žico VAC 60. Na izdelanih zvarih smo izmerili trdoto in pregledali mikrostrukturo. Ugotavljali smo vpliv varilnih parametrov na stabilnost gradnje tankih sten. S pomočjo programa SprutCam smo izdelali program za krmiljenje robota in izdelali vzorčni izdelek.

Ključne besede: robotsko varjenje MIG/MAG, trdota, aditivne tehnologije z uporabo obloka in varilne žice (WAAM), SprutCAM

1 Uvod

Ameriško društvo za testiranje in materiale (ASTM – American Society for Testing and Materials) je definiralo postopke aditivnih tehnologij kot postopke spajanja materialov za izdelavo 3D-izdelkov z nanašanjem (navarjanjem) plasti za plastjo. Te tehnologije se močno razlikujejo od tehnologij z odvzemanjem materialov. Postopke lahko poimenujemo z različnimi izrazi, kot so: aditivna proizvodnja, aditivni procesi, aditivne tehnologije, 3D- tiskanje, hitro prototipiranje, hitra izdelava prototipov, hitra izdelava orodij [1].

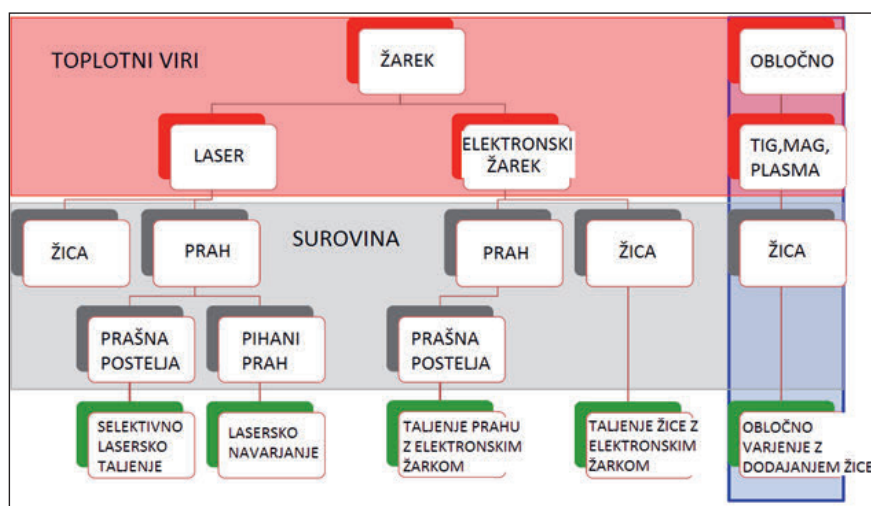
Razvoj aditivnih tehnologij na področju izdelave izdelkov na osnovi polimerov v primerjavi s kovinami poteka različno hitro. Področje hitre izdelave izdelkov iz polimerov je že zelo uveljavljeno. Na trgu obstaja-

jo različne rešitve, ki omogočajo izdelavo kompleksnih izdelkov v ozkih tolerancah. Cena izdelkov je običajno odvisna od natančnosti in kakovosti izdelave. Temu primerne pa so tudi cene naprav. Na trgu obstajajo tudi nizkocenovne naprave, t. i. 3D-tiskalniki, ki so že na voljo za domačo uporabo. Prednosti teh sistemov sta enostavna uporaba in cena izdelka, medtem ko je včasih njihova uporabnost omejena [2].

Na področju izdelave kovinskih materialov se razvijajo različne tehnologije. Baker je leta 1926 patentiral »uporabo električnega obloka kot vira toplote za izdelavo 3D-objektov z navarjanjem materiala v plasteh«. Ujiiie (Mitsubishi) je leta 1971 izdeloval tlačne posode z uporabo postopkov varjenja EPP, uporabnega varjenja pod žlindro, varjenja TIG, pri tem pa je uporabljal tudi več žic iz različnih dodajnih materialov za izdelavo sten s funkcionalno porazdeljenimi lastnostmi. Kussmaul je leta 1983 uporabil »oblikovno varjenje« za izdelavo velikih in visoko kakovostnih strukturnih izdelkov za nuklearno indu-

strijo iz jekla 20MnMoNi5 5, pri čemer je bila produktivnost 80 kg/h, posamezen izdelek pa je tehtal 79 ton. Leta 1993 sta Prinz in Weiss patentirala kombinacijo navarjanja izdelka s CNC-frezanjem, ki sta jo poimenovala »Shape Deposition Manufacturing« (SDM) [3], [4]. Med leti 1994 in 1999 so na Univerzi Cranfield razvili postopek »Shaped Metal Deposition« (SMD) za podjetje Rolls Royce za navarjanje ulitkov motorjev. Ocenjeni in razviti so bili različni procesi in materiali, postopek pa je še vedno v proizvodnji. Leta 2006 so podjetja izrazila željo po postopku hitre izdelave izdelkov iz titanovih zlitin. Ideja je bila zamenjati klasično izdelavo izdelkov z odrezovanjem iz blokov ali odkovkov, ki ni trajnostna. Predvideva se, da bi v naslednjih 20 letih letalska industrija potrebovala preko 18 milijonov ton titanovih zlitin, pri čemer je razmerje »buy to fly« (volumen surovca glede na volumen materiala v končnem izdelku) 5. To pomeni, da bo 15 milijonov ton titanovih zlitin predstavljalo odpadni material [5–7].

Doc. dr. Damjan Klobčar, univ. dipl. inž., prof. dr. Janez Tušek, univ. dipl. inž., oba Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo



Slika 1. Razdelitev postopkov aditivnih tehnologij za izdelavo kovinskih izdelkov [5]

Aditivne tehnologije na področju izdelave kovinskih materialov lahko v grobem razdelimo na tehnologije z uporabo žarkov in tehnologije z uporabo varilnega obloka. Za gradnjo izdelkov z uporabo žarka uporabljamo elektronski snop in laserski žarek. Pri obeh postopkih lahko kot dodajni material uporabljamo material v obliki prahu ali v obliki žice. Pri laserskih sistemih lahko dodajni prah dovajamo s plinom (pihanjem). Takrat govorimo o postopku laserskega navarjanja (Laser Cladding). Če pri laserskih sistemih uporabljamo prahove v posodi (powder bed), govorimo o postopku selektivnega laserskega taljenja (Selective Laser Melting), pri uporabi elektronskega snopa pa o taljenju z elektronskim snopom (Electron Beam Melting). Pri laserskih sistemih lahko varilno žico dodajamo s strani ali pravokotno na mesto dodajanja materiala, pri elektronskem snopu pa je poznan Sciakyjev sistem. Med obločnimi sistemi se uporabljajo tehnologije varjenja TIG, MIG in plazma. V vseh primerih se uporablja dodajni material v obliki žice. Te postopke skupno imenujemo postopki aditivne tehnologije z uporabo varilne žice in obloka (ang. Wire + arc additive manufacturing – WAAM) [5].

Če primerjamo tehnologije z direktnim dodajanjem prahu in žice med sabo, lahko ugotovimo, da je cena prahov visoka, njihova kakovost variira, dodajanje prahu je

zapleteno, razen če se lahko dovaja s strani. Izkoristek prahu je med 40 in 60 %. Prah se lahko reciklira, potrebno je pazljivo ravnanje s stališča varnosti in varstva pri delu. Pojavijo pa se tudi težave z rotacijo glave, če prah dovajamo s strani. Pri dodajanju materiala v obliki žice je cena žice srednje visoka, kakovost materialov je visoka (Ti, Fe, Ni) in variira pri uporabi aluminijevih zlitin. Izkoristek dodatnega materiala je blizu 100 %, sistemi za dodajanje žice so razviti, recikliranje materiala ni potrebno, dodajni material lahko nanese tudi izven želenega mesta, težave pri rotaciji glave se pojavijo pri navarjanju s plazmo in TIG-om, ne pa tudi pri postopku MIG [5].

Investicijski stroški na vneseno energijo so pri laserskih sistemih zelo visoki, pri uporabi plazme ali navarjanja MIG pa so nizki. Obratovalni stroški laserskega sistema so srednje visoki, medtem ko so pri obločnih sistemih nizki. Skupen izkoristek vira energije in izkoristek energije pri spajanju materiala znaša pri uporabi laserja okoli 10 %, pri uporabi varilnega obloka pa kar okoli 80 %. Varnostno tveganje je pri uporabi laserskih sistemov visoko (poškodbe oči, strupeni in eksplozivni prahovi, ...), medtem ko je relativno nizko pri uporabi varilnega obloka. Produktivnost laserskega sistema je srednja do visoka, najmanjša debelina nanosa znaša od 0,2 mm naprej. Produktivnost

obločnega sistema je visoka do zelo visoka, najmanjša debelina sloja znaša od 1 mm naprej [5].

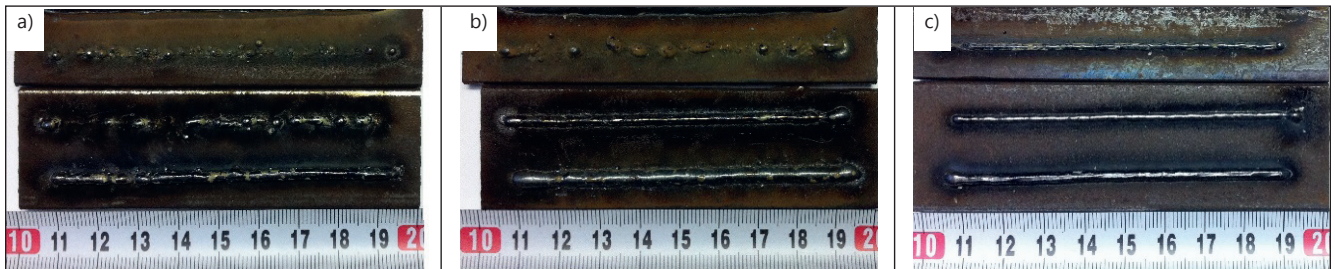
Primerjava med višinami posameznega sloja ter produktivnostjo in horizontalno resolucijo kaže, da imajo postopki s prahom v posodi najmanjšo produktivnost, dosejajo pa visoko resolucijo izdelave. Dodajanje prahu s pihanjem poveča produktivnost in zmanjša horizontalno resolucijo, medtem ko imajo tehnologije WAAM še večjo produktivnost in še manjšo horizontalno resolucijo. Ugotovljeno je bilo, da je pri enojnem osno simetričnem viru energije pri maksimalni talilni učinkovitosti produktivnost odvisna od kvadrata višine posameznega nanosa. Resolucija je odvisna od razmerja med širino in višino nanosa. Odvisna je od številnih faktorjev in je običajno najboljša pri razmerju 1,5 višine plasti [5].

■ 2. Eksperiment

Varjenje je potekalo na pločevine iz konstrukcijskega jekla S355 z dimenzijami 100 ´ 25 ´ 8 mm. Varili smo po postopku MIG/MAG z varilno žico VAC 60 (G3Si1) premera 1 mm, v zaščiti plina CO₂, Ar ali mešanice CORGON 18 s pretokom 10 l/min. Varili smo z virom varilnega toka Fronius TransPuls Synergic 3200 CMT ob uporabi varilnega robota ABB IRB 140.

Iz zvarov smo izdelali vzorce za analizo mikrostrukture, pri katerih smo merili trdoto po Vickersu ter izdelali miniaturne epruvete za natezni preizkus v različnih smereh glede na gradnjo varkov. Natezne teste smo izvedli na trgalnem stroju Zwick/Z250. Jedkanje je potekalo z 2-odstotnim jedkalom nital, optična mikroskopija pa na merilnem mikroskopu Mitutoyo TM.

Namen raziskave je bil določiti optimalne tehnološke parametre navarjanja za izdelavo tankih varov, ki bodo omogočili stabilno gradnjo varkov v višino v različnih varilnih legah. Preliminarno varjenje je potekalo s postopki standard (CO₂),



Slika 2. Varjenje pri 40 A: a) standard, b) pulzno in c) CMT (hitrosti varjenja od spodaj navzgor 3, 7,5 in 12 mm/s)

pulzno (Ar) in CMT (CO_2), z varilnimi tokovi 40 A, 90 A in 140 A ter pri hitrostih varjenja 3, 7,5 in 12 mm/s. Uporabljali smo prednastavljene programe, pri katerih je vnos energije znašal med 57 kJ/m in 989 kJ/m za standardne programe varjenja, med 59 kJ/m in 1075 kJ/m za pulzno varjenje in med 34 kJ/m in 649 kJ/m za varjenje CMT. Na osnovi rezultatov primarnega testiranja smo izbrali postopek CMT, ki smo ga optimirali, da smo dosegli optimalne razmere navarjanja – raven nanos zvara. Pri optimiranju smo uporabili varilni program CMT in CMT v kombinaciji s pulznim varjenjem, pri tem pa smo uporabili mešanico CORGON 18. Med navarjanjem v višino smo merili tudi temperaturo navarov, del testov smo opravili pri medvarkovni temperaturi 200 °C, del pa v hladnem pri temperaturi okoli 50 °C. Varili smo v varilnih legah PA, PC in PG.

Z optimalnimi parametri varjenja smo izdelali demonstracijski izdelek, za katerega smo program za krmiljenje procesa varjenja izdelali s pomočjo programa SprutCam [9].

■ 3. Rezultati in diskusija

Cilj te raziskave je bil določiti parametre navarjanja, ki bi omogočali stabilno navarjanje tankih sten. Slika 2 prikazuje rezultate navarjanja enega sloja z varilnim tokom 40 A na pločevino debeline 8 mm. V primeru standardnega krmiljenja prenosa materiala je bil navar sprejemljiv le pri najmanjši hitrosti varjenja, pri kateri je bil vnos energije dovolj velik (137,3 kJ/m). Pri višjih hitrostih varjenja je bil vnos energije premajhen za izdelavo navara. Nekoliko bolje je bilo v primeru krmiljenja s pulznim načinom. Tu

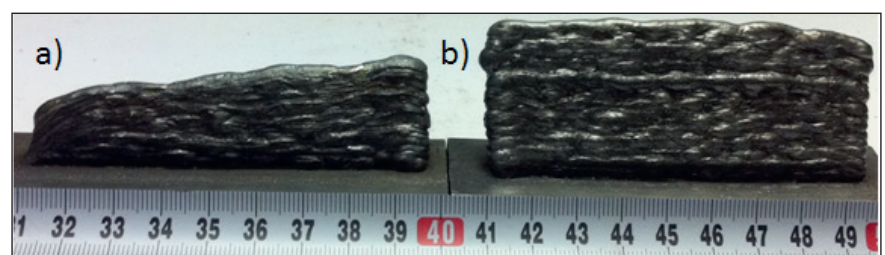
smo dobili sprejemljiv zvar tudi pri hitrosti 7,5 m/s, pri kateri je bil vnos energije 94 kJ/m. V primeru varjenja s postopkom CMT smo sprejemljive enovarkovne navare dobili pri vseh hitrostih varjenja in tudi pri vnosu energije 34,3 kJ/m ($I_v = 40$ A, $U_v = 10,3$ V in $v_v = 12$ mm/s). Pri varjenju z večjim varilnim tokom smo v vseh primerih dobili sprejemljive rezultate izdelanih navarov, vari pa so bili širši.

Slika 3 prikazuje gradnjo varkov (navarjenih par slojev) pri varjenju s postopkom CMT pri varilnem toku 40 A in varilni napetosti 10,3 V. Navarjanje, prikazano na zgornji sliki, je potekalo z desne proti levi, na sredinski in spodnji sliki pa od leve proti desni. S slike opazimo, da smo deloma sprejemljivi navar dobili le v primeru navarjanja s hitrostjo 3 mm/s, pri katerem je prišlo do uspešne gradnje varka. Na začetku vara se je že pri drugem navaru po-

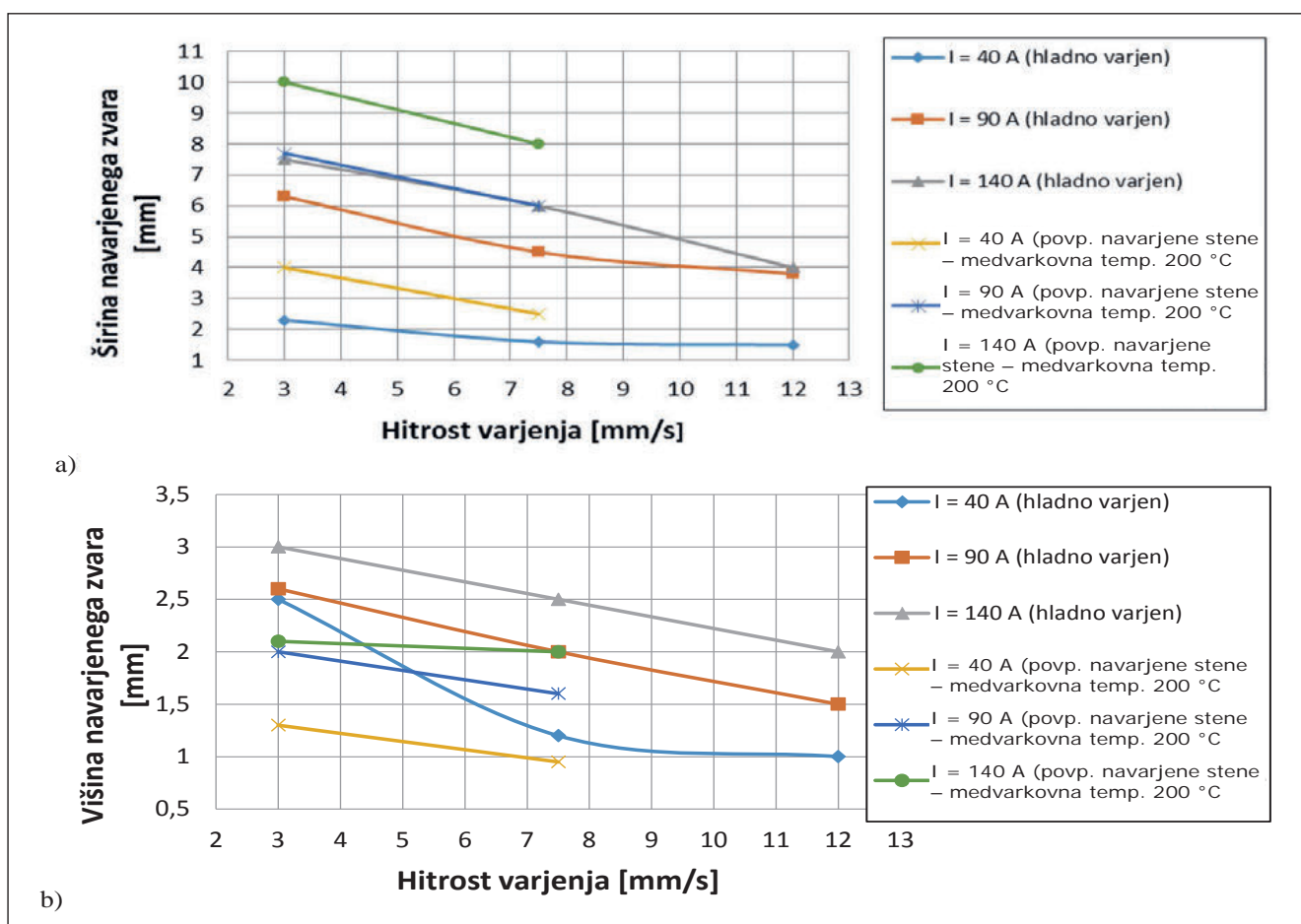


Slika 3. Varjenje pri jakosti varilnega toka 40 A in oblačni napetosti 10,3 V po postopku CMT (hitrosti varjenja od zgoraj navzdol 3, 7,5 in 12 mm/s)

javila težava, povezana z vžigom varilnega obloka. Takrat varjenje ni bilo stabilno in se je v navaru pojavila prekinitev. Ob koncu varjenja je bilo mogoče opaziti manjše težave s prelivanjem materiala zaradi nekoliko višje temperature podlage. Z zmanjševanjem vnosa energije med varjenjem so se težave, povezane s stabilnostjo navarjanja, v višjih višinah stopnjevale in navarjanje ni bilo več mogoče že pri manjšem številu slojev. Slika 4a prikazuje potek navarjanja pri varilnem toku 90 A od



Slika 4. Varjenje z optimiranimi parametri s programom CMT v zaščiti plina CO_2 ($I_v = 90$ A, $U_v = 11,9$ V in $v_v = 7,5$ mm/s, $Q = 142,8$ kJ/m) a) v levo (čas čakanja 5 s) in b) obojestransko (čas čakanja 10 s)



Slika 5. Vpliv varilnih parametrov pri varjenju CMT pri medvarkovni temperaturi 50 °C (hladno varjen) in 200 °C na a) širino in b) višino navara

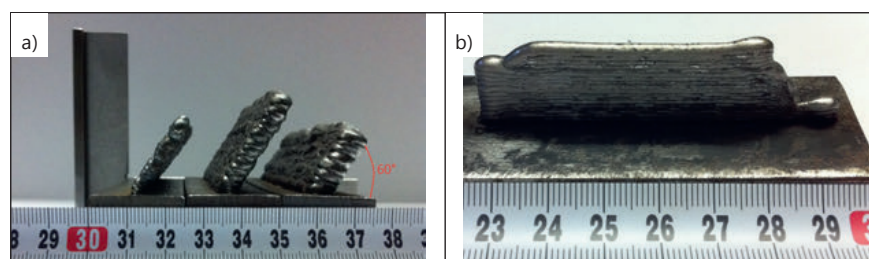
desne proti levi s hitrostjo varjenja 7,5 mm/s in 5-sekundno pavzo pri varjenju. S slike 4a opazimo, da je stena širša, sam zvar pa nižji, hkrati pa se pojavi izrazita poševnost stene. Vzrok za poševnost je v pregrevanju stene proti koncu varjenja in v posedanju navara zaradi lezenja vstran. Poševnost navara smo deloma odpravili z menjavanjem smeri navarjanja (slika 4b), večjo višino pa s podaljšanjem časa hlajenja med varki na 10 s.

S parametrično analizo in meritvijo debeline (širine) in višine zvarov smo ugotovili, da se širina in višina zvara manjšata s povečevanjem hitrosti varjenja (slika 5). Z večanjem jakosti varilnega toka se povečujeta hitrost dovajanja varilne žice in vnos energije, s tem pa tudi širina in višina navara. Pri navarjanju pri višji medvarkovni temperaturi – 200 °C – se širina navara povečuje, višina zvara pa ob ohranjenem volumnu nižja. Na višino in širino navara poleg varilnih parametrov vpliva tudi medvarkovna

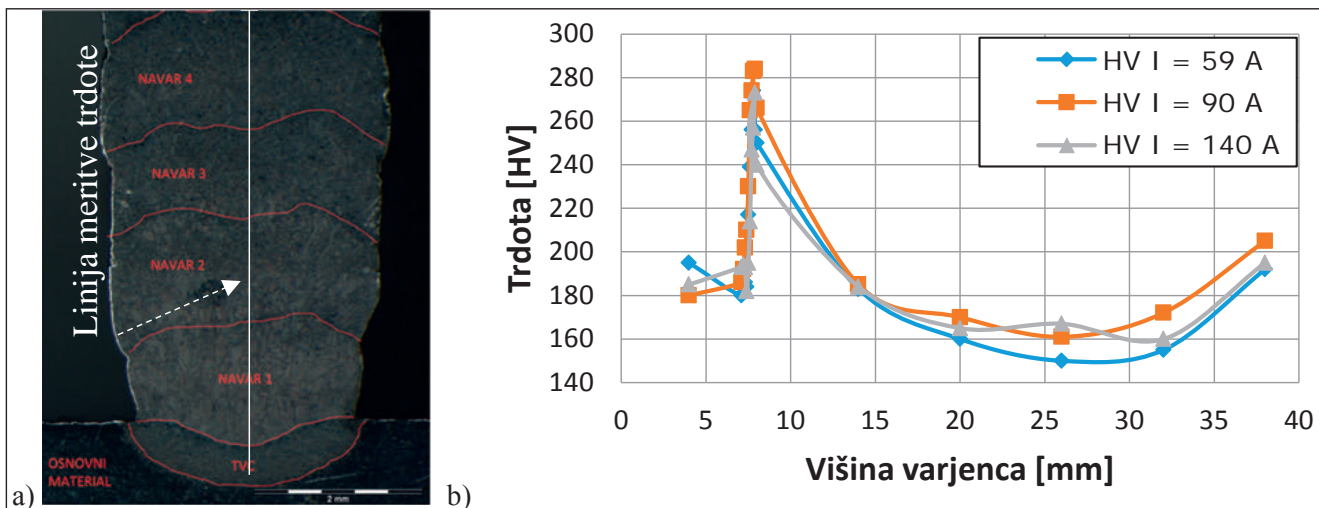
temperatura oz. čas ohlajanja med posameznimi navari. Pri varjenju v hladnem je medvarkovna temperatura znašala do 50 °C.

Varili smo tudi v prisilnih legah in pod različnimi koti gorilnika. V vseh primerih ima poleg vnosa toplote velik vpliv tudi medvarkovna temperatura. Varjenci na sliki 6a so bili varjeni v legi PA z različnimi vnosi energije (82,4 kJ/m, 142,8 kJ/m, 259,5 kJ/m) pri medvarkovni temperaturi 200 °C. Gorilnik je potoval pod kotom 60°, podobno kot nastajajoči

zvari. Varjenje v legi PC je bilo zelo zahtevno, saj je prevroča talina kar naprej uhajala v smeri gravitacije. Navarjanje je bilo najbolj optimalno pri varjenju z nižjim vnosom energije 84,4 kJ/m ($I = 40$ A, $v = 5$ mm/s) in pri postavitvi gorilnika pod kotom 90° (v smeri gradnje varka). Pri varjenju v legi PG (slika 6b) se opazi, da je z naraščanjem medvarkovne temperature prišlo do vpliva gravitacije na oblikovanje navara. Zaradi gravitacije se je ob koncu navara oblikovala »kapljica« (višek) materiala, kar je zmanjšalo ravnost nanosa.



Slika 6. Varjeno pri kotu gorilnika 60° a) v legi PA z $I = 40$ A, $v = 5$ mm/s, 82,4 kJ/m; $I = 90$ A, $v = 7,5$ mm/s, 142,8 kJ/m in $I = 140$ A, $v = 7,5$ mm/s, 259,5 kJ/m in b) v legi PG z $I = 40$ A, $v = 5$ mm/s



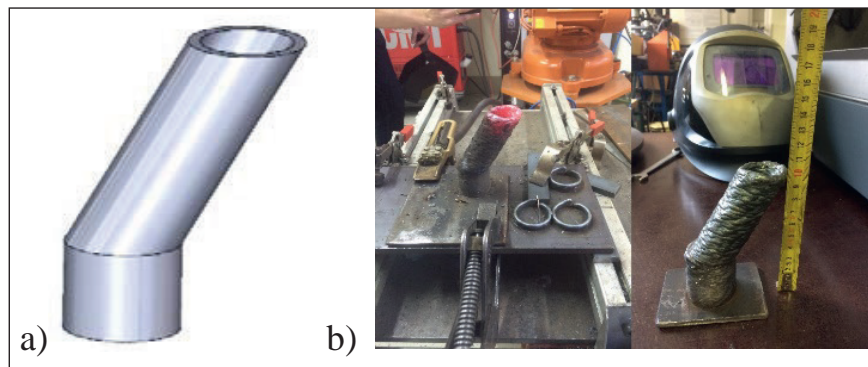
Slika 7. a) Makroobrus, izdelan pri jakosti varilnega toka 59 A in hitrosti varjenja 5 mm/s. b) Potek trdote v odvisnosti od varilnih parametrov (5 mm/s (59 A – 103,8 kJ/m), 7,5 mm/s (90 A – 244,8 kJ/m in 140 A – 419,2 kJ/m).

Slika 7 prikazuje rezultate varjenja z optimiranim postopkom CMT + pulz, pri čemer je bila medvarkovna temperatura med 250 in 300 °C. Slika 7a prikazuje makroobrus zvara, varjenega z jakostjo varilnega toka 59 A pri hitrosti varjenja 5 mm/s in vnosom energije 103,8 kJ/m. S slike lahko opazimo, da je prvi navarek ožji in višji zaradi hladnega varjenca in večjega odvoda toplote v osnovni material. V višjih slojih se širina navara povečuje zaradi slabšega odvoda toplote in višje medvarkovne temperature. Slika 7b prikazuje potek trdote v smeri iz osnovnega materiala, preko TVC in serije navarkov. Trdota je bila v več točkah pomerjena v TVC, kjer smo zaznali tudi skok proti vrednosti 280 HV. Trdota osnovnega materiala varjenca je znašala okoli 190 HV. V višjih slojih navarov je bila trdota pomerjena nekje na sredini vsakega vara. Tu vidimo, da je prišlo do medvarkovnega popuščanja zvarov zaradi navarjenja višje ležečih navarov. Pri tem se je vrednost izmerjene trdote znižala z okoli 200 HV, kolikor jih je imel zadnji zvar, na okoli 160 HV. Navarjeni sloj je bil za okoli 20 HV mehkejši od osnovnega materiala.

Slika 8 prikazuje 3D-model izdelka in sam izdelek, izdelan s tehnologijo WAAM. Varjenje je potekalo brez prekinitvev, torej brez kontrole medvarkovne temperature. Na

sredinski sliki lahko opazimo, da je bila medvarkovna temperatura relativno visoka, saj je del varjenca na sliki še vedno zelo žareč. Na sliki opazimo, da sta obliki modela in izdelka podobni. Zaradi nekoliko višje medvarkovne temperature je površina končnega izdelka nekoliko bolj groba, prišlo pa je tudi do manjšega razlivanja materiala. Bolj gladko površino bi

- Optimalni način krmiljenja vnosa energije in prenosa materiala pri gradnji tankih slojev je kombinacija krmiljenja CMT v povezavi s pulznim varjenjem. Optimalni parametri za gradnjo tankih slojev so bili pri jakosti varilnega toka 59 A, obločni napetosti 8,8 V, hitrosti varjenja 5 mm/s in vnosu energije 103,8 kJ/m.



Slika 8. a) 3D-model in b) končni izdelek, varjen po postopku CMT v kombinaciji s pulzi brez prekinitvev (varilni tok 59 A, hitrost varjenja 5 mm/s in vnos energije 103,8 kJ/m)

verjetno dosegli, če bi vzdrževali nižjo medvarkovno temperaturo. To bi lahko dosegli z vključitvijo nekaj sekundnih pavz med posameznimi varki.

4 Zaključek

Izdelana je bila parametrična analiza varjenja tankih sten z uporabo tehnologije WAAM in varjenja MIG/MAG ter varilne žice VAC 60 f1,2 mm. Ugotovili smo:

- Za zagotavljanje stabilne gradnje slojev je potrebno upoštevati kombinacijo varilnih parametrov in medvarkovne temperature. Za doseganje stabilnih pogojev varjenja naj medvarkovna temperatura ne preseže 100 °C. Pri varjenju z manjšim vnosom energije je lahko medvarkovna temperatura nekoliko višja, pri varjenju z večjim vnosom pa naj bo nižja.
- Vnos energije naj bo med 100 in 300 kJ/m. Pri vnosu energije pod

100 kJ/m pride do valovitega videza površine zvara, pri vnosu nad 300 kJ/m pa se pojavijo težave s prelivanjem taline. Pri tem se poruši razmerje med višino in širino zvara.

- Trdota vara se le malo spreminja, večje skoke v trdoti dobimo le v TVC.
- Varjenje lahko izvajamo v različnih legah, vendar je najbolj enostavno varjenje v legi PA. V vseh legah je zelo pomembno kontrolirati medvarkovno temperaturo, ki naj bo pri varjenju, čim nižja. V ostalih legah je potrebno upoštevati še vpliv gravitacije, še nižjo medvarkovno temperaturo, zaželeno pa je variti z minimalnim vnosom energije okoli 100 kJ/m.

Literatura

- [1] W. E. Frazier, "Metal additive manufacturing: A review," *Journal of Materials Engineering and Performance* 23(6) (2014): 1917–1928.
- [2] K. V. Wong and A. Hernandez, "A review of additive manufacturing," *ISRN Mechanical Engineering* 2012 (2012).
- [3] Robert Merz et al., *Shape deposition manufacturing* (Engineering Design Research Center, Carnegie Mellon Univ., 1994).
- [4] L. E. Weiss et al., "Shape deposition manufacturing of heterogeneous structures," *Journal of Manufacturing Systems* 16(4) (1997): 239.
- [5] S. W. Williams et al., "Wire+ arc additive manufacturing," *Materials Science and Technology* (2016): 1–7.
- [6] F. Martina et al., "Residual stress reduction in high pressure interpass rolled wire+ arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components," *Proc. 25th Int. Solid Freeform Fabrication Symp* (2014): 89–94.
- [7] P. A. Colegrove et al., "High pressure interpass rolling of wire+ arc additively manufactured titanium components," *Advanced Materials Research* 996 (2014): 694–700.
- [8] Y. Nilsiam et al., "Integrated Voltage–Current Monitoring and Control of Gas Metal Arc Weld Magnetic Ball-Jointed Open Source 3-D Printer," *Machines* 3(4) (2015): 339–351.
- [9] SprutCam software, www.sprutcam.com.

Surfacing of 3D metal shapes using Wire Arc Additive Manufacturing technology

Abstract: An overview of additive manufacturing technologies for the production of metal parts is presented. Special attention is given to Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) technologies, which include MIG/MAG welding, TIG welding, and plasma welding. Their advantage compared to laser or electron beam technologies are lower investment and operational costs, while the disadvantage could be a lower resolution. Due to special features and higher productivity, the WAAM technologies are more suitable for the production of bigger parts made from big blocks of expensive materials, where a majority of metal is removed with milling or turning. We used WAAM technology together with welding robot and a CMT power source. We welded thin walls using VAC 60 welding wire. The microstructure and hardness of produced welds was analysed and measured. Some research was done to find the optimal welding parameters for the production of stable weld surfacing in the production of thin walls. A SprutCAM software was used to make a code for the 3D printing of a sample part.

Keywords: robotic MIG/MAG welding, hardness, wire-arc additive manufacturing (WAAM), SprutCAM

HIWIN®

Motion Control & Systems



KROGLIČNA VRETENA

Živimo gibanje.

www.hiwin.si