

TOPLOTNA OBDELAVA MARAGING JEKLA, NAVARJENEGA S POSTOPKOM OBLIKOVNEGA OBLOČNEGA NAVARJANJA Z ŽICO

Maja Lindič, Boštjan Podlipec, Matija Bušić, Damjan Klobčar

Izvleček:

Oblikovno obločno navarjanje z žico (ang. WAAM – wire arc additive manufacturing) je postopek dodajalnih tehnologij, ki ima velik potencial tudi pri izdelavi in popravilu orodij. Maraging jeklo v primerjavi s klasičnimi orodnimi jekli odlikujeta dobra varivost in enostavna toplotna obdelava. Zaradi neenakomernega ohlajanja taline med varjenjem in toplotne obdelave predhodno nanesenih varkov je mikrostruktura materiala po navarjanju nehomogena, zato je za doseg optimalnih mehanskih lastnosti izdelka nujna naknadna toplotna obdelava. Žico iz maraging jekla smo navarjali na osnovni material po postopku obločnega oblikovnega navarjanja z uporabo varilnega programa MIG CMT+pulz. Tako izdelane vzorce smo toplotno obdelali v dveh sklopih: s topilnim žarjenjem in z izločevalnim žarjenjem. Analizirali smo mikrostrukturo in izmerili trdoto po posameznih fazah toplotne obdelave. Rezultati bodo služili za določitev vpliva pogojev toplotne obdelave na strukturo materiala in za primerjavo z deklariranimi vrednostmi.

Ključne besede:

oblikovno obločno navarjanje z žico (WAAM), maraging jeklo, toplotna obdelava

1 Uvod

Oblikovno obločno navarjanje – WAAM (ang. *Wire and Arc Additive Manufacturing*) – je postopek dodajalnih tehnologij, ki kot vir energije za taljenje dodatnega materiala v obliki žice uporablja varilni oblok. Sistem za izdelavo po postopku WAAM je sestavljen iz vira varilnega toka in CNC-naprave, običajno robota, ki zagotavlja gibanje varilnega gorilnika. Roboti se običajno uporabljajo zaradi cenovne dostopnosti, fleksibilnosti, velikega delovnega prostora. Kot vir varilnega toka se lahko uporablja katerakoli tehnologija obločnega navarjanja, npr. varjenje TIG, plazemsko navarjanje in varjenje MIG/MAG, pri katerem lahko avtomatsko dodajamo varilno žico. Uporabljajo pa se lahko tudi hibridni postopki obločnega varjenja [1, 2].

Navarjati je mogoče širok spekter dodatnih materialov: različne vrste konstrukcijskih, nerjavnih in legiranih jekel [3–9], aluminijevih [10–13], titanovih zlitin [14–21] ter ostalih materialov (npr. magnezijevih zlitin [22]). Zaradi različnih fizikalnih lastnosti materialov, ki se uporabljajo pri navarjanju, so izzivi, s katerimi se srečujemo pri tem, za vsak tip materiala povsem specifični. Pojavljajo se npr. izzivi, povezani z vnosom energije, vključki v materialu, s poroznostjo itd. Med raziskavami se je kot prednost postopka WAAM izkazala predvsem možnost izdelave izdelkov z velikim volumnom, izdelkov, ki dopuščajo nizko ločljivost izdelave oz. omogočajo naknadno obdelavo z odrezavanjem za doseganje ustreznih geometrijskih toleranc. Velika prednost se kaže pri klasični izdelavi izdelkov, pri kateri bi sicer z odrezavanjem odvzeli veliko količino materiala [23]. Smiselna je uporaba tistih materialov, pri katerih cena materiala predstavlja velik del končnih stroškov izdelka, zato se velik potencial za navarjanje po postopku WAAM kaže tudi pri uporabi maraging jekel.

Maraging jekla so posebna vrsta visoko trdnih jekel, pri katerih je visoka trdnost posledica izločanja intermetalnih spojin – precipitativ in martenzitne transformacije, ki ne izhaja iz prisotnosti ogljika kot pri ostalih jeklih [24]. Zaradi dobrih mehanskih lastnosti se pogosto uporabljajo v orodjarski industriji, so tudi dobro variva in jih za razliko od klasičnih orodnih jekel ni potrebno predgrevati [25, 26]. Ma-

Maja Lindič, mag. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo;

Boštjan Podlipec, univ. dipl. inž., Razvojni center Jesenice, d. o. o., Jesenice;

dr. **Matija Bušić**, Univerza v Zagrebu, Fakulteta za strojništvo in ladjedelništvo;

Doc. dr. **Damjan Klobčar**, univ. dipl. inž., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo

maraging jekla je potrebno variti s čim nižjim vnosom energije ($< 1,8 \text{ kJ/mm}$ [26]) in vzdrževanjem nizke medvarkovne temperature ($< 120 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Večji vnos energije vpliva na nastanek bolj grobe, segregirane strukture z nizko trdnostjo. Prav se tako podaljša čas, ko je zvar segret na visoko temperaturo, in čas ohlajanja. To spodbuja formacijo precipitativ na mejah kristalnih zrn, zaradi česar lahko material postane krhek. Trdnost lahko izboljšamo z ustrezno toplotno obdelavo, običajno topilnim in izločevalnim žarjenjem oz. staranjem [25, 27].

Izbira pogojev in ciklov toplotne obdelave je v veliki meri odvisna od kemične sestave jekla in vnosa energije med varjenjem. Če zagotavljamo dovolj nizke vnose energije, topilno žarjenje ni potrebno in lahko varjenju takoj sledi staranje [26]. Glede na stanje, v katerem je material dobavljen, ločimo dve vrsti toplotne obdelave: za lite in kovane strukture.

Topilno žarjenje za lite strukture se običajno izvaja v treh fazah. Najprej predgrejemo material na $1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ za 1 uro in ga ohladimo na zraku do temperature okolice. S tem homogeniziramo strukturo. Nato material segrejemo na $595 \text{ }^{\circ}\text{C}$, pri čemer se formira povratni avstenit, ki zagotavlja nukleacijska mesta za rekristalizacijo, ko izvajamo 3. fazo topilnega žarjenja – raztopno žarjenje. V tej fazi se v avstenitu raztopijo legirni elementi [26, 29].

Topilno žarjenje za kovane materiale obsega le eno fazo. Poteka pri enakih pogojih kot raztopno žarjenje (3. faza) za lite strukture – običajno $815\text{--}950 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (1 uro). Temperatura, pri kateri poteka, ima zamenljiv vpliv na trdnost materiala po staranju [26, 28]. V primeru obdelave velikih kosov je lahko cena toplotne obdelave zelo visoka, zaradi česar se material v praksi velikokrat samo stara na temperaturi okrog $480 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [25, 27].

Temperatura transformacije avstenita v martenzit – M_s – pri maraging jeklih znaša $200\text{--}300 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Pretvorba avstenita v martenzit je neodvisna od hitrosti ohlajanja in poteče tudi pri počasnem ohlajanju na zraku. Nizko temperaturo začetka transformacije je mogoče doseči z ustreznimi legirnimi elementi. Večini maraging jekel se dodajajo Ni, Co, Ti, Al, Mo itd. Precipitate tvorita Ti in Mo, ostali legirni elementi pa so zgolj vključeni v reakcije, ki potekajo pri njihovem izločanju.

Običajno se kot legirni element dodaja tudi Co, ki v osnovi vpliva na zvišanje temperature M_s in omogoči večjo stopnjo izločanja ostalih legirnih elementov [25] ter prav tako tvori intermetalno fazo [29].

2 Eksperiment

Varilno žico premera $1,2 \text{ mm}$ s komercialno oznako Capilla 2709 MAG in kemično sestavo po standardu EN 14700: $<0,03 \text{ } \%$ C, $17\text{--}19 \text{ } \%$ Ni, $10\text{--}12 \text{ } \%$ Co, $4\text{--}4,5 \text{ } \%$ Mo, $<0,3 \text{ } \%$ Mn, $<0,8 \text{ } \%$ Si, ravnovesni delež Fe, smo navarjali na blok z enako kemično sestavo. Uporabili smo varilni vir Fronius Trans Pulse Synergic 3200, gibanje gorilnika smo izvajali z varilnim robotom ABB IRB 140. Program za gibanje varilnega robota smo izdelali z uporabo programa SprutCAM.

Na osnovi preliminarne testov smo ugotovili, da sta linijski vnos energije in medvarkovna temperatura ključna za razlivanje materiala ter s tem preprečitev makro poroznosti in neprevaritev. V fazi optimizacije procesa navarjanja žice iz maraging jekla smo izbrali varilni program CMT+pulz pri procesnih parametrih, ki so prikazani v tabeli 1. Navarjali smo steno dimenzij $120 \times 70 \times 14 \text{ mm}$ z izmeničnim menjavanjem smeri navarjanja za vsako posamezno navarjeno plast.

Tabela 1 : Procesni parametri

Hitrost gibanja [mm/s]	3
Varilni tok [A]	172
Medvarkovna temperatura [$^{\circ}\text{C}$]	250
Zaščitni plin	100 % Ar
Pretok zaščitnega plina [l/min]	12

Vzorke za toplotno obdelavo dimenzij $10 \times 10 \times 10 \text{ mm}$ smo izrezali iz navarjene stene in jih toplotno obdelali. Na istih vzorcih smo opravili tudi meritve trdote in analizo mikrostrukture. Glede na podatke iz literature [29] in opravljene preliminarne teste smo se odločili za pogoje toplotne obdelave, ki so prikazani v tabeli 2. Toplotna obdelava je sestavljena iz dveh sklopov: iz topilnega žarjenja in izločevalnega žarjenja oz. staranja.

Tabela 2 : Parametri topilnega žarjenja in izločevalnega žarjenja

Št. vzorca	Topilno žarjenje			Izločevalno žarjenje ali staranje
	1. faza	2. faza	3. faza	
	Homogenizacijsko žarjenje	Zmanjšanje velikosti kristalnih zrn z ogrevanjem	Raztopno žarjenje	
1				$490 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 4 h
2	$1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 h	$595 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 h	$850 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 1 h	$480 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 3 h
3				$480 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 5 h

Pogoji topilnega žarjenja, ki smo ga izvedli, ustrezajo tistim za lite strukture, saj takšne strukture s toplotno obdelavo, namenjeno materialom v kovnem stanju, ne moremo homogenizirati. Mikrostruktura v navarjenem stanju je imela nehomogeno mikrostrukturo z velikimi in usmerjenimi zrni.

Toplotno obdelavo smo izvajali v zračni atmosferi. Med posameznimi fazami so bili vzorci hlajeni na zraku do sobne temperature. Ohlajali smo jih na šamotnih podlogah.

Vzorci smo pripravili za metalografsko analizo in jih jedkali z jedkalom Kalling (100 ml etanol, 100 ml HCl, 5 g CuCl₂). Trdoto materiala smo merili na treh naključno izbranih mestih na vsakem vzorcu po Vickersu s 5-kilogramsko utežjo – HV5. Meritve smo izvajali na napravi Struers Duramin A300. Za analizo mikrostrukture smo uporabili optični mikroskop Zeiss Axio Imager M2.

3 Rezultati in diskusija

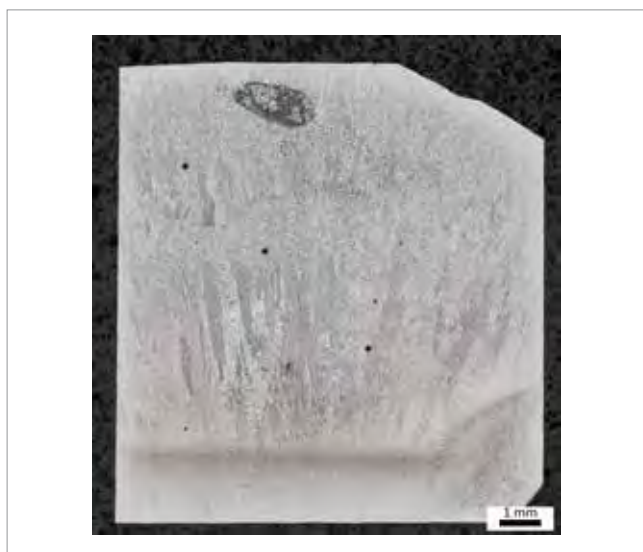
Za določitev vpliva toplotne obdelave smo analizirali vzorec v navarjenem stanju, katerega mikrostruktura je prikazana na *sliki 1*. Po pričakovanjih so bili v vzorcu razvidni dolga usmerjena kristalna zrna in izrazita segregacija, kar je posledica neenakomernega ohlajanja varkov med varjenjem. Mikrostruktura je bila vzdolž prereza nehomogena. Z navarjanjem višjih plasti je prišlo do delnega staranja spodnjih varkov, zaradi česar je raztros izmerjenih meritev trdote na vzorcu v navarjenem stanju večji. Povprečna vrednost trdote vzorca v navarjenem stanju znaša 394 HV.

Mikrostruktura je po homogenizacijskem žarjenju (1. faza topilnega žarjenja) postala homogena (*sli-*

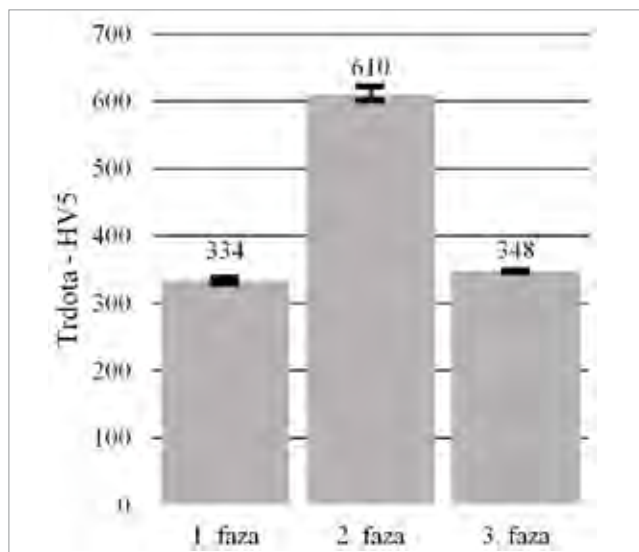
ka 3a), saj smo vzorec segreli nad linijo AC1 v faznem diagramu. Mikrostruktura se je med toplotno obdelavo delno pretvorila v avstenit, ki se je pri ohlajanju transformiral v nikljev martenzit. V drugi fazi topilnega žarjenja so se začeli na mejah kristalnih zrn izločati precipitati, ki so blokirali meje ter tako preprečili rast kristalnih zrn med nadaljnjo toplotno obdelavo (*slika 3b*). Zaradi izločanja precipitativ se je po drugi fazi povečala tudi trdota, kot je razvidno iz diagrama na *sliki 2*. V fazi raztopnega žarjenja (3. faza topilnega žarjenja) smo segreli material nad linijo AC1, vendar ne tako visoko v avstenitno področje kot pri homogenizacijskem žarjenju v prvi fazi. Legirni elementi so se enakomerno porazdelili po strukturi materiala. Pri ohlajanju se je tvoril martenzit z nizko trdoto, ki je nasičen z legirnimi elementi.

Trdota se je po tej fazi zmanjšala skoraj za 100 % (*slika 3c*). Zaradi nizke trdote, če je to potrebno, postopki odrezavanja potekajo po končani tretji fazi topilnega žarjenja. Odrezavanje po končani toplotni obdelavi je zahtevnejše, ker staranje vpliva na povečanje trdote materiala [28].

Staranje smo izvedli pri treh različnih pogojih. Iz mikrostruktur na *sliki 5* je razvidno, da je struktura materiala homogena, kristalna zrna vseh treh vzorcev pa so primerljive velikosti. S staranjem smo dosegli, da so se iz strukture izločili precipitati, ki so povzročili utrjevanje materiala, zato se je trdota materiala povečala skoraj za 100 %. Trdoti vzorcev 1 in 3 sta večji od trdote vzorca 2 za približno 12 %. Kar se sklada s tem, da daljši čas oz. višja temperatura staranja vpliva, da se izloči več precipitativ, kar ima za posledico tudi večjo trdoto materiala. Povprečna vrednost trdot vzorcev, ki smo jih merili po staranju, je prikazana na *sliki 4*.



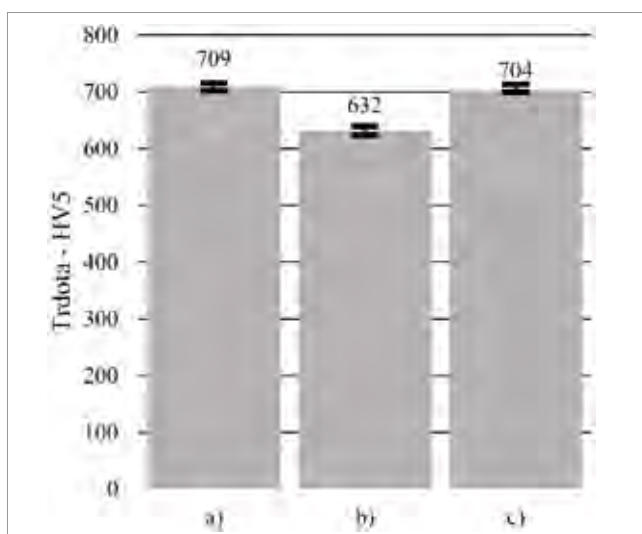
Slika 1 : Vzorec iz maraging jekla, navarjen po postopku CMT+pulz; 50-kratna povečava



Slika 2 : Povprečne vrednosti trdot, izmerjene po posamezni fazi topilnega žarjenja



Slika 3 : Mikrostrukture po posamezni fazi topilnega žarjenja pri 50-kratni povečavi: a) 1. faza homogenizacijsko žarjenje, b) 2. faza – zmanjšanje velikosti kristalnih zrn z ogrevanjem, c) 3. faza – raztopno žarjenje

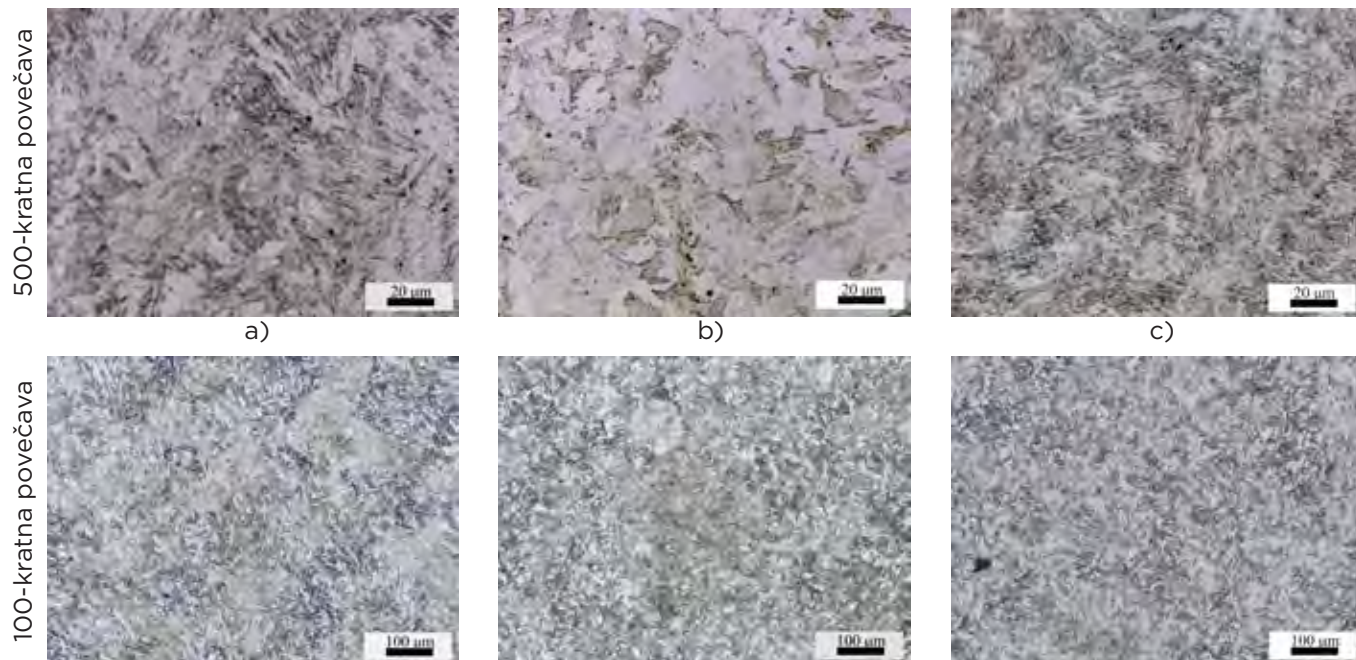


Slika 4 : Povprečne vrednosti trdot, izmerjene po staranju pri različnih pogojih: a) vzorec 1 (490 °C, 4 h), b) vzorec 2 (480 °C, 3 h), c) vzorec 3 (480 °C, 5 h)

Če material prestavimo, to pomeni, da poteka toplotna obdelava predolgo ali pri previsoki temperaturi, začno kristalna zrna rasti in dobimo grobozrnato strukturo, kar vpliva na znižanje trdot in običajno tudi natezne trdnosti in žilavosti. Pri prestaranju pride tudi do raztapljanja metastabilnih nikljevih precipitativ in nastaja povratni avstenit. S prestaranjem lahko zato dobimo mikrostrukturo z veliko vsebnostjo avstenita (tudi do 50 %) [30].

Izmerjena trdota vzorca 2, ki je bil staran pri pogojih 480 °C, 3 h, znaša 632 HV in je za 10 % višja od vrednosti, ki jo pri enakih pogojih staranja navaja proizvajalec (559–576 HV [31]). Materiala predhodno niso topilno žarili.

Na osnovi preliminarne testov smo ugotovili, da zgolj staranje vzorcev iz maraging jekla, navarjenih z izbranimi procesnimi parametri, ne odpravi nehomogenosti v strukturi, saj so dobljeni varki veliki in struktura preveč usmerjena. Zato je pred staranjem



Slika 5 : Mikrostrukture vzorcev po staranju, ki je bilo izvedeno pri različnih pogojih – 100-kratna, 500-kratna povečava: a) vzorec 1 (490 °C, 4 h), b) vzorec 2 (480 °C, 3 h), c) vzorec 3 (480 °C, 5 h)

potrebno izvesti topilno žarjenje za lite strukture. Najprimernejši proces toplotne obdelave se razlikuje glede na dobljeno mikrostrukturo. Če bi varili z nižjim vnosom energije, bi bil vpliv usmerjene mikrostrukture manjši in bi lahko zadostovala že toplotna obdelava za materiale v kovanem stanju ali zgolj izločevalno žarjenje. Posledično bi se razlikovala tudi izmerjena trdota po toplotni obdelavi, izvedeni pri enakih pogojih.

Zgolj meritev trdot in analiza mikrostrukture nista zadosten kriterij za določitev optimalnih pogojev toplotne obdelave. Za to bi bilo potrebno pridobiti podatek o natezni trdnosti in žilavosti materiala pri različnih pogojih.

4 Zaključek

Ugotovili smo, da je s postopkom WAAM ob primeri izbiri varilnega programa in ustreznih procesnih parametrih mogoče uspešno navarjati maraging jeklo. Zaradi visokega vnosa energije med procesom navarjanja smo izvedli naknadno toplotno obdelavo, ki je primerna za lite strukture:

- ▶ Izmerjena trdota materiala v navarjenem stanju (394 HV) je primerljiva tisti, ki jo o materialu podaja proizvajalec (370–390 HV [31]) ob upoštevanju velikega raztrosa meritev, saj se trdota močno razlikuje glede na mesto merjenja v navaru.
- ▶ Mikrostruktura materiala v navarjenem stanju je nehomogena in grobozrnata. Z ustreznim topilnim žarjenjem za lite strukture je mogoče odpraviti nehomogenost, izceje in zmanjšati velikost kristalnih zrn.
- ▶ Po homogenizacijskem žarjenju postane mikrostruktura homogena z nizko trdoto v vrednosti okoli 330 HV. Po 2. fazi topilnega žarjenja se zaradi izločenih precipitativ trdota v mikrostrukturi poveča na okoli 610 HV. Pri raztopnem žarjenju se tvori martenzit, ki je nasičen z legirnimi elementi. Njegova trdota se zniža na okrog 350 HV.
- ▶ Temperatura in čas izločevalnega žarjenja močno vplivata na trdoto materiala. Pri daljšem času oz. višji temperaturi smo zaradi večje količine izločenih precipitativ v strukturi izmerili višjo trdoto materiala.
- ▶ Analiza mikrostrukture in merjenje trdote nista zadostna kriterija, da bi lahko z gotovostjo sklepali o najprimernejši izbiri parametrov toplotne obdelave za maraging jeklo, navarjeno po postopku WAAM.

Viri

- [1] Wong, K. V., Hernandez, A.: A review of additive manufacturing, ISRN Mechanical Engineering, New York, 2012.
- [2] Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., Colegrove, P.: Wire + arc

additive manufacturing, Materials Science and Technology 21/2016/7, str.: 641–647.

- [3] Wang, J., Sun, Q. J., Wang, H., Liu, J. P., Feng, J. C.: Effect of location on microstructure and mechanical properties of additive layer manufactured Inconel 625 using gas tungsten arc welding, Materials Science and Engineering: A 676/2016/, str. 395–405.
- [4] Coules, H. E., Colegrove, P., Cozzolino, L. D., Wen, S. W., Ganguly, S., Pirling, T.: Effect of high pressure rolling on weld-induced residual stresses, Science and Technology of Welding and Joining 17/2012/5, str. 394–401.
- [5] Adebayo, A., Mehnen, J., Tonnellier, X.: Effects of solid lubricants on wire and arc additive manufactured structures, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 228/2014/4, str.: 563–571.
- [6] Colegrove, P. A., Coules, H. E., Fairan, J., Martina, F., Kashoob, T.: Microstructure and residual stress improvement in wire and arc additively manufactured parts through high-pressure rolling, Journal of Materials Processing Technology 213/2013/10, str.: 1782–1791.
- [7] Youheng, F., Gulian, W., Haiou, Z., Liye, L.: Optimization of surface appearance for wire and arc additive manufacturing of Bainite steel, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 91/2017/1–4, str. 301–313.
- [8] Stockinger, J., Wieding, C., Enzinger, N., Sommitsch, C., Huber, D., Stocklinger, M.: Additive Manufacturing via Cold Metal Transfer, Metal Additive Manufacturing Conference 2016: Industrial perspectives in Additive Technologies, 2016, str. 117–125.
- [9] Zhao, H., Zhang, G., Wu, L.: A 3D dynamic analysis of thermal behavior during single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping, Journal of Materials Processing Technology, 211/20113, str.: 488–495.
- [10] Haselhuhn, A. S., Buhr, M. W., Wijnen, B., Sanders, P. G., Pearce, J. M.: Structure-property relationships of common aluminum weld alloys utilized as feedstock for GMAW-based 3-D metal printing, Materials Science and Engineering, 673/2016/A, str.: 511–523.
- [11] Cong, B., Ding, J., Williams, S.: Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3% Cu alloy, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 76/2015/9–12, str.: 1593–1606.
- [12] Ayarkwa, K., Williams, S., Ding, J.: Investigation of pulse advance cold metal transfer on aluminium wire arc additive manufacturing, International Journal of Rapid Manufacturing, 5/2015/1, str.: 44–57.
- [13] Gu, J., Cong, B., Ding, J., Williams, S. W., Zhai, Y.: Wire+ arc additive manufacturing of aluminium, Proceedings of the 25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, 2014, str.: 4–6.
- [14] Ma, Y., Cuiuri, D., Hoyer, N., Li, H., Pan, Z.: The

- effect of location on the microstructure and mechanical properties of titanium aluminides produced by additive layer manufacturing using in-situ alloying and gas tungsten arc welding, *Materials Science and Engineering*, 631/2015/A, str.: 230-240.
- [15] Donoghue, J., Antony, A. A., Martina, F., Colegrove, P., Williams, S. W., Pragnell, P. B.: The effectiveness of combining rolling deformation with Wire-Arc Additive Manufacture on beta-grain refinement and texture modification in Ti-6Al-4V, *Materials Characterization* 114/2016/, str.: 103-114.
- [16] Martina, F., Roy, M., Colegrove, P., Williams, S. W.: Residual stress reduction in high pressure interpass rolled wire+ arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components, *Proc. 25th Int. Solid Freeform Fabrication Symp*, 2014, str.: 89-94.
- [17] Szost, B. A., Martina, F., Boisslier, D., Prytulak, A., Pirling, T., Hofmann, M., Jarvis, D. J.: A comparative study of additive manufacturing techniques: Residual stress and microstructural analysis of CLAD and WAAM printed Ti-6Al-4V components, *Materials & Design* 89/2016/, str.: 559-567.
- [18] Zhang, J., Zhang, X., Wang, X., Ding, J., Traore, Y., Paddea, S., Williams, S.: Crack path selection at the interface of wrought and wire+ arc additive manufactured Ti-6Al-4V, *Materials & Design* 104/2016/, str.: 365-375.
- [19] Zhang, J., Wang, X., Paddea, S., Zhang, X.: Fatigue crack propagation behaviour in wire+ arc additive manufactured Ti-6Al-4V: Effects of microstructure and residual stress, *Materials & Design* 90/2016/, str.: 551-561.
- [20] Martina, F., Colegrove, P. A., Williams, S. W., Meyer, J.: Microstructure of interpass rolled wire+ arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components, *Metallurgical and Materials Transactions*, A46/2015/12, str.: 6103-6118.
- [21] Yilmaz, O., Uglav, A. A.: Shaped metal deposition technique in additive manufacturing: A review, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 230/2016/10, str.: 1781-1798.
- [22] Guo, J., Yong, Z., Changmeng, L., Qianru, W., Xianping, C., Jiping, L.: Wire arc additive manufacturing of AZ31 magnesium alloy: Grain refinement by adjusting pulse frequency, *Materials*, 9/2016/10: str.: 824-836.
- [23] Recent developments in fusion processing of aluminium alloys (www.latest2.manchester.ac.uk/documents/2011joining/S.Williams.pdf).
- [24] Totten, G.E.: *Steel heat treatment: metallurgy and technologies*, Taylor and Francis Group, Oregon, 2006.
- [25] Lang, F. H., Kenyon, N.: *Welding of maraging steels*, WRC Bulletin, Toronto, 1971.
- [26] Klobčar, D., Tušek, J.: Mehanske lastnosti zvara iz jekla maraging po izločevalnem žarjenju, *Materiali in tehnologije* 41/2007/4, str.: 167-171.
- [27] INCO Data: 18 Percent Nickel Maraging Steels-Engineering Properties, INCO Databook, 1976.
- [28] Hashmi, S.: *Comprehensive Materials Finishing*, Elsevier, Oxford, 2016.
- [29] ASM Handbook, Vol. 4 - Heat Treating, ASM International, 1964.
- [30] ASM Handbook, Vol. 1 - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys, ASM International, 1990.
- [31] Capilla special welding consumables, Leopoldshoehe, 2013.

Heat treatment of maraging steel deposited by WAAM process

Abstract:

Wire and arc additive manufacturing is one of the additive manufacturing processes, which show great potential for die tool manufacturing and repairing, because of the excellent weldability, unnecessary pre-heating and simple post heat treatment in comparison to tool steels. Because of the uneven cooling conditions during welding process and heat treatment of previous deposited welds is material structure inhomogeneous and post heat treatment is absolutely necessary to achieve appropriate optimal mechanical properties of product. We were deposited maraging steel welding wire by WAAM process using GMAW CMT+puls welding program to base material and heat-treating specimens in two stages: solution annealing and age-hardening. Microstructure were analysed and hardness were measured after each stage of heat-treating process. Results were used for determination of influence of heat treatment conditions on material microstructure and for comparison to characteristic given by the manufacturer.

Keywords:

Wire and additive manufacturing (WAAM), maraging steel, heat treatment

Zahvala

Avtorji se za finančno pomoč zahvaljujemo Javni agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (raziskovalni program št. P2-0270 in raziskovalna projekta št. L2-8181 in L2-818). Prispevek je delno sofinanciran iz Strategije pametne specializacije v okviru projekta Materiali in tehnologije za nove aplikacije - MARTINA. Naložbo sofinancirata Republika Slovenija in Evropska unija iz Evropskega sklada za regionalni razvoj. Avtorji se zahvaljujejo tudi podpori akcije COST (European Cooperation in Science and Technology) v sklopu projektov CRM-EXTREME in AFLaser.