

MEHANSKE LASTNOSTI ZVARA IZ JEKLA MARAGING PO IZLOČEVALNEM ŽARJENJU

MECHANICAL PROPERTIES OF MARAGING STEEL WELDS AFTER AGING HEAT TREATMENT

Damjan Klobčar, Janez Tušek

Fakulteta za strojništvo, Univerza v Ljubljani, Aškerčeva 6, 1000 Ljubljana, Slovenija

Prejem rokopisa – received: 2006-09-21; sprejem za objavo – accepted for publication: 2007-06-06

V industriji tlačnega litja aluminija so bile narejene pilotne raziskave, ki naj bi potrdile mnenje, da orodja iz jekel maraging dosežejo daljšo trajnostno dobo in s tem nižjo ceno ulitka. Zato smo se odločili, da jekla maraging uporabimo za reparaturno varjenje orodij. Ta raziskava je del tiste, s katero smo ugotavljali primernost tega jekla za reparaturno varjenje orodij za tlačno litje aluminija. Cilj dela je bil ugotoviti optimalne parametre izločevalnega žarjenja varov iz jekla maraging, ki bodo zagotovili optimalne mehanske lastnosti. Posebej pripravljene varjence z utori v obliki črke U smo po postopku TIG navarili z jeklom maraging UTP A702. Varjenje je potekalo z minimalnim vnosom energije v zaščitni atmosferi plina argona. Tako pripravljene varjence smo izločevalno žarili pri časih od 0,7 h do 10,8 h ter temperaturah od 445 °C do 515 °C. Analizirali smo tudi varjence v navarjenem stanju in tiste, katerih varki so bili med varjenjem kovani. Iz posameznega varjenca smo izdelali 3 epruvete ISO-V za žilavost, rezino za analizo mikrostrukture in trdote ter 7 miniaturnih epruвет za natezno trdnost. Navar iz jekla maraging doseže optimalne mehanske lastnosti z 2-urnim izločevalnim žarjenjem na temperaturi 480 °C. Izločevalno žarjenje pri temperaturi 515 °C naj bi trajalo 1 h, pri temperaturi 445 °C pa 3 h. Kovanje varkov povečuje žilavost zvara.

Ključne besede: jeklo maraging, izločevalno žarjenje, mehanske lastnosti, mikrostruktura, varjenje TIG, tlačno litje aluminija

Investigations have shown that tools from maraging steels achieved longer tool life in high pressure die casting of aluminum. We have decided to check the use of maraging steel for repair welding of tools. A part of more extensive investigation aimed to establish the suitability of maraging steel for repair welding of high pressure die-casting toolings is done. In this work the results of the investigation used to establish optimal precipitation hardening parameters of maraging steel welds, which provides optimal mechanical properties is presented. Specimens with a "U" shaped groove were weld cladded with maraging steel UTP A702. GTA welding was carried out in protective atmosphere of argon gas and with minimal heat input. The test specimens were than precipitation annealed from 0.7 h to 10.8 h and temperatures from 445 °C to 515 °C. Specimens in as-welded condition and specimens with hammered welds were checked parallelly. From same specimen 3 ISO-V specimens for toughness test, a slice for microstructure analysis and measurement of hardness, and 7 miniature specimens for tensile test were manufactured. The results showed that maraging steel welds achieve optimal mechanical properties after precipitation annealing for 2.5 h at 480 °C. Precipitation annealing at 515 °C should last for 1 h and at 445 °C for 3 h. The hammering of welds increases weld toughness.

Keywords: maraging steel, precipitation annealing, mechanical properties, microstructure, GTA welding, high pressure die-casting, response surface modelling

1 UVOD

Tlačno litje aluminijevih zlitin je velikoserijski postopek za proizvodnjo izdelkov zahtevnih geometrijskih oblik v ozkih dimenzijskih tolerancah. Med tlačnim litjem se v orodje vliva talino aluminijeve zlitine s temperaturami do 700 °C, pri čemer je hitrost taline od 30 m/s do 100 m/s ter polnilni tlak od 50 MPa do 80 MPa¹. Te obremenitve krajšajo trajnostno dobo orodij s a) termičnimi cikli, ki povzročajo utrujenostne razpoke na površini gravure, b) s korozijo ali sprijemanjem taline aluminija na gravuro, c) z erozijo površine zaradi pretoka aluminija in č) lomom orodja²⁻⁴. Končna cena ulitka je odvisna od parametrov tlačnega litja, ki vplivajo na trajnostno dobo orodja. Namen raziskave je podaljšati trajnostno dobo orodij za tlačno litje aluminija z reparaturnim varjenjem, pri čemer bi kot dodajni material uporabili jekla maraging zaradi njihovih izjemnih mehanskih lastnosti.

Prednost jekel maraging v primerjavi s klasičnimi za delo v vročem se kaže v manjšem modulu elastičnosti in

manjšem linearnem temperaturnem razteznostnem koeficientu (tabela 1). To povzroča manjše napetosti v orodju med temperaturnimi obremenitvami. Večja toplotna prevodnost jekla maraging dodatno zmanjša temperaturo površine in posledično napetosti. Maraging jekla imajo v primerjavi s klasičnimi jekli za delo v vročem večjo žilavost in trdnostne lastnosti, kar vpliva na boljšo odpornost proti termičnemu utrujanju. Za uspešno podaljšanje trajnostne dobe orodja morajo imeti materiali za orodja za tlačno litje aluminija dobro stabilnost mehanskih lastnosti pri povišanih temperaturah. To dosežajo z jekli maraging z vsebnostjo niklja 14 %⁵, 12 % (Thyrotherm 1.2799) ali celo 2 %⁶. Manjša vsebnost Ni premakne transformacijo ferita v avstenit k višjim temperaturam. Slabost manjše vsebnosti Ni je slabša žilavost⁶.

Nasprotno od klasičnih orodnih jekel za delo v vročem imajo jekla maraging omejeno vsebnost C, H in N, svoje odlične lastnosti pa dosežejo z legiranjem s/z Co, Mo, Ti in Al⁷⁻⁹. Dodatna prednost je njihova odlična varivost, saj jih pri varjenju ni treba predgrevati ali

Tabela 1: Mehanske in fizikalne lastnosti jekel^{5,12}
Table 1: Mechanical and physical properties of steels^{5,12}

Lastnost	1.2344	UTP A702 1.6356	Marlok C1650
Gostota /(kg/dm ³)	7,8	–	8,09
Modul elastičnosti /GPa	210	191	186
Natezna trdnost /MPa	1430	1763	1600
Meja plastičnosti /MPa	1230	1688	1500
Trdota /HRC	43–54	40–50	47–51
Žilavost /J			
20 °C	15–20	15–21	25
200 °C	–	–	35
400 °C	–	–	45
Temperaturni koeficient dolžinskega raztezka /(10 ⁻⁶ mm/(mm °C))			
20°C–400°C	12,5	–	10
20°C–600°C	13,1	–	5,6
Toplotna prevodnost /(W/(m °C))			
20 °C	25	–	28
500 °C	28,5	–	32
600 °C	29,3	–	33

Tabela 2: Kemična sestava jekel v masnih deležih (%)^{5,12}
Table 2: Chemical composition of steels in %^{5,12}

Element	1.2344	1.6356	Marlok C1650
C	0,3–0,4	0,02	<0,008
Cr	4,8–5,5	–	<0,30
Mo	1,2–1,5	4,0	4,5
Ni	–	18,0	14,0
Co	–	12,0	10,5
Ti	–	1,6	0,2
Si	0,8–1,2	–	<0,10
Mn	0,2–0,4	–	<0,10
Al	–	0,1	–

pregrevati, da bi dobili duktilen in žilav martenzit. Tudi mehanska in EDM-obdelava se izvajata lažje kot pri klasičnih orodnih jeklih.

Toplotna obdelava jekla maraging zajema topilno in izločevalno žarjenje. Topilno žarjenje poteka pri temperaturah 815–915 °C eno uro, pri tem pa se v avstenitu topijo legirni elementi. Po ohlajanju na zraku se tvori mehak martenzit, nasičen z legirnimi elementi. Pri varjenju z manjšim vnosom energije kot 1,8 kJ/mm topilno žarjenje ni potrebno in varjenju sledi izločevalno žarjenje¹⁰. Slednje navadno poteka pri temperaturah od 470 °C do 550 °C približno tri ure, dejanski parametri pa so odvisni od kemične sestave jekla. Med tem žarjenjem se v materialu tvorijo izločki, ki povzročajo deformacije kristalnih rešetk. To povzroča linearno spremembo dimenzij od 0,05 % do –0,1 %, velikost spremembe pa je odvisna od parametrov izločevalnega žarjenja⁸.

Kljub odličnim mehanskim lastnostim se jekla maraging le malo uporabljajo kot material za orodja. Vzrok je višja cena. Naša ideja je bila, da bi uporabili jekla maraging za reparaturno popravilo orodij oz. za navarjanje na površino. S tem bi dobili cenovno sprejem-

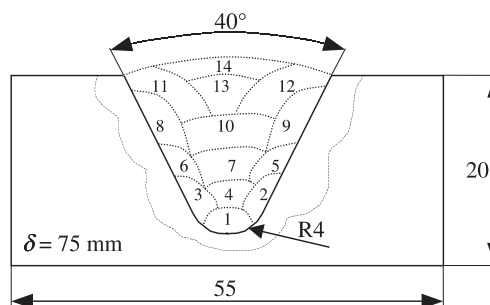
ljiva visokokakovostna orodja. Na površino orodja za tlačno litje aluminija je treba navariti dovolj debelo plast jekla maraging, da preprečimo akumulacijo toplote na prehodu med osnovnim jeklom in navarjeno plastjo. Uspešen odvod energije s površine orodja bomo zagotovili, če bo površinski sloj jekla maraging segal do hladilnih kanalov.

Namen študije je bil karakterizirati jekla maraging (z 18 % Ni) glede na mehanske lastnosti in mikrostrukturo. Narejena je bila analiza varjenja TIG jekla maraging glede na vnos energije, temperaturo predgrevanja in kovanje varkov, analiziran pa je bil tudi vpliv parametrov izločevalnega žarjenja na razvoj mikrostrukture in mehanske lastnosti.

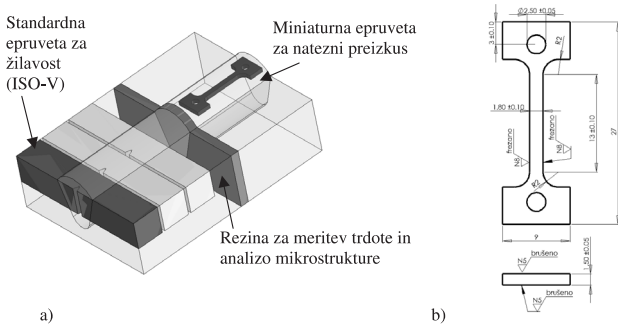
2 EKSPERIMENTALNI DEL

Pripravljena je bila serija vzorcev iz jekla 1.2344 z izdelanim utorom U po **sliki 1**. Pred navarjanjem so bili vzorci poboljšani na trdoto *HRC* 46. V posamezen utor U je bilo po postopku TIG navarjenih 14 varkov, dolgih 75 mm. Varjenje je potekalo z varilnim tokom 150 A, varilno napetostjo 12 V, s hitrostjo varjenja 5 cm/min in vnosom energije 2,1 kJ/mm v zaščiti plina argona s pretokom 10 L/min. Navarjali smo dodatni material jeklo maraging 1.6356 (**tabela 2**), ki je bilo v obliki palic premera 2,5 mm in dolžine 1000 mm. Tik pred varjenjem smo s površine varilnih žic odbrusili bakreno zaščitno plast ter žico očistili z acetonom. S tem smo preprečili kontaminacijo vara z bakrom. Teme varka smo pred varjenjem novega varka očistili z žično ščetko in acetonom. Varjenje večine vzorcev je potekalo pri temperaturi predgrevanja 100 °C, en vzorec je bil varjen s predgrevanjem pri temperaturi 400 °C, varki enega vzorca pa so bili med varjenjem ročno kovani. S kovanjem spremenimo natezne zaostale napetosti v zvaru v tlačne in zmanjšamo verjetnost pokanja med termičnim utrujanjem.

Navarjeni vzorci so bili izločevalno žarjeni po načrtu izločevalnega žarjenja, ki je bil izdelan s statističnim načrtovanjem eksperimentov. Uporabili smo središčno zasnovan načrt eksperimentov in metodologijo površin odziva, ki omogoča razvoj regresijskih modelov višjega reda. Parametri izločevalnega žarjenja so bili določeni tako, da zajamejo širše območje toplotne obdelave.



Slika 1: Shema gradnje varkov v vzorcu z utorom U
Figure 1: Schematic of U groove specimen weld filling



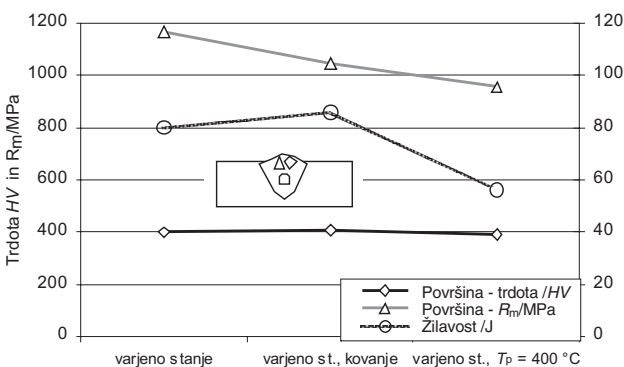
Slika 2: Iz varjenca smo izrezali: a) 7 miniaturnih epruvet za natezni preizkus, 3 standardne epruvete ISO-V za žilavost ter rezino za meritev trdote in analizo mikrostrukture. b) Shematičen prikaz epruvete za natezni preizkus.

Figure 2: From the welded specimen were manufactured: a) 7 tensile test specimens, 3 toughness test specimens and a slice for microstructure analysis. b) Scheme of tensile test specimen.

Temperatura izločevalnega žarjenja je bila izbrana v območju od 445 °C do 515 °C, čas pa v območju od 0,7 h do 10,8 h. Centralna točka središčno zasnovanega načrta eksperimentov je bila izbrana po priporočilu proizvajalca pri 480 °C in treh urah.

Varjenci so bili po varjenju in toplotni obdelavi razrezani po shemi na **sliki 2**. Iz vsakega varjenca so bile izdelane tri epruvete ISO-V za preizkus žilavosti, rezina za analizo mikrostrukture in sedem miniaturnih epruvet za natezni preizkus. Natezni preizkusi so bili narejeni na računalniško krmiljeni napravi Zwick Z050, ki je imela vgrajen senzor sile GTM 50 kN in ekstenziometer tip 66607. Preizkusi so bili izvedeni po standardu EN 10002-1. Preizkus udarne žilavosti po Charpiju je bil opravljen v skladu s standardoma EN 10045-1:2000 in EN 10045-2:1992. Iz posameznega varjenca so bile preizkušene tri epruvete ISO-V in izračunane povprečne vrednosti žilavosti.

Na rezinah vzorcev je bila narejena metalografska analiza in meritev trdote po Vickersu. Vzorci so bili polirani in jedkani v 4-odstotni raztopini nitala (4 % HNO₃ + 96 % C₂H₅OH) ter pregledani na optičnem mikroskopu.



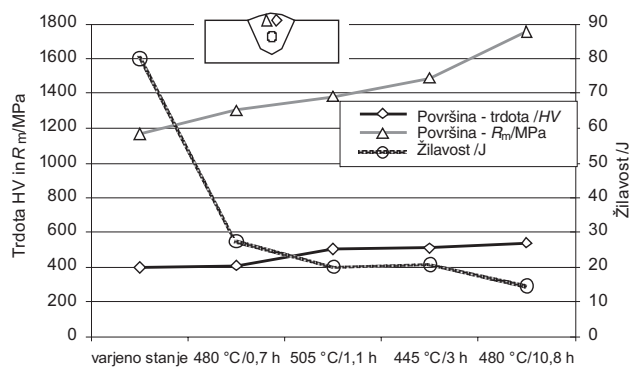
Slika 3: Trdota, žilavost in natezna trdnost temenskih varov v varjenem stanju v odvisnosti od tehnologije varjenja

Figure 3: Hardness, toughness and tensile strength of surfacing weld in as-welded condition of different conditions welding

3 REZULTATI

Diagram na **sliki 3** prikazuje trdoto in natezno trdnost temenskih varkov iz jekla maraging v navarjenem stanju ter žilavost večvarkovnega vara iz jekla maraging. Najvišjo natezno trdnost 1170 MPa je dosegel var, narejen pri temperaturi predgrevanja 100 °C. Kovani varek je imel nekoliko nižjo natezno trdnost (1046 MPa), medtem ko se je pri varku, narejenem pri temperaturi predgrevanja 400 °C, drastično zmanjšala natezna trdnost na 953 MPa. Trdota temenskega vara v navarjenem stanju je bila HV 400, kar je več kot trdota jekla maraging v homogeniziranem stanju, ki ima od HV 305 do HV 339. Trdota se je pri tem povišala zaradi izločevalnega žarjenja med varjenjem TIG ter zaradi temperature predgrevanja. Trdota kovanih varkov se je zvišala na HV 410 zaradi kovanja, ki varke mehansko utrdi. Trdota temenskega varka, narejena pri temperaturi predgrevanja 400 °C je bila HV 390. Padec trdote je posledica večjega vnosa energije med varjenjem, ki se pojavi zaradi višje temperature predgrevanja. Največjo žilavost zvara ~ 86 J smo dobili pri varjencu s kovanimi varki. Žilavost vara v navarjenem stanju je bila 80 J, medtem ko je bila žilavost vara, narejena pri temperaturi predgrevanja 400 °C, le 56 J.

Slika 4 prikazuje potek trdote in natezne trdnosti temenskih varkov iz jekla maraging ter žilavost večvarkovnega vara v navarjenem stanju in po izločevalnem žarjenju z različnimi parametri. Iz diagrama je razvidno, da se z višanjem temperature in daljšanjem časa izločevalnega žarjenja natezna trdnost in trdota povečujeta, medtem ko se žilavost zmanjšuje. Občuten padec žilavosti se pojavi že po kratkotrajnem izločevalnem žarjenju (480 °C/ 0,7 h), ko se v mehkem martenzitu oblikujejo izločki, mikrostruktura pa je še premalo starana (**slika 5a**). Pri tem doseže var žilavost 27,7 J, trdota HV 410 in natezno trdnost 1306 MPa. S povečanjem temperature in časa izločevalnega žarjenja dobimo dobro staran var, katerega mikrostruktura je prikazana na **sliki 5b** (445 °C/ 3 h). Za dobro staran var je značilna žilavost okoli 20 J, trdota okoli HV 505 ter natezna trdnost 1383 MPa. Če čas izločevalnega žarjenja



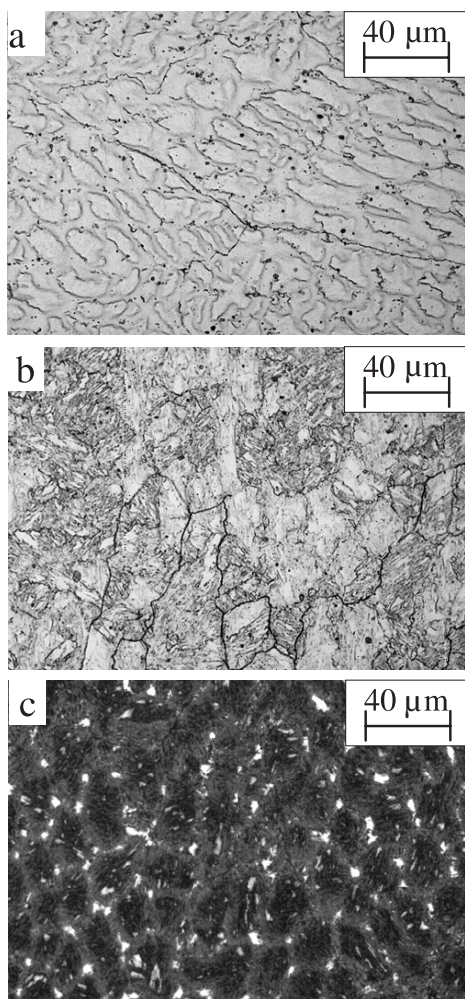
Slika 4: Trdota, žilavost in natezna trdnost varov v varjenem stanju ter po izločevalnem žarjenju z različnimi parametri

Figure 4: Hardness, toughness and tensile strength of a surfacing weld after different precipitation hardening

še podaljšamo in/ali povišamo temperaturo (npr. 480 °C/10,8 h), dobimo preveč starano mikrostrukturo (slika 5c). Zanj je značilna trdota HV 540, natezna trdnost 1758 MPa in žilavost 14,6 J.

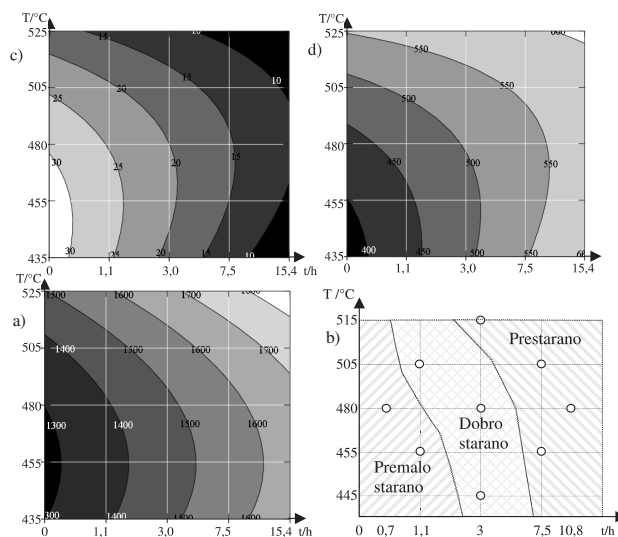
Pri izbiri parametrov toplotne obdelave izločevalnega žarjenja je potrebna posebna pozornost. Izbrati je namreč treba parametre, ki dajo najbolj ustrezne mehanske lastnosti za posamezno aplikacijo. S tem namenom je bila narejena statistična analiza mehanskih lastnosti varov iz jekla maraging z metodologijo površin odziva. Izdelani so bili modeli za napoved trdote, žilavosti in natezne trdnosti v odvisnosti od parametrov izločevalnega žarjenja. Modeli so prikazani v grafični obliki na slikah 6a–c). Povečanje temperature in/ali časa toplotne obdelave izločevalnega žarjenja poveča trdoto in natezno trdnost ter zmanjša žilavost vara iz jekla maraging.

Mikrostrukture varov so primerjane na sliki 5. Mikrostruktura na sliki 5a je premalo starana in je tipična za var v varjenem stanju oz. za var, izločevalno žarjen pri prekratkih časih ali prenizkih temperaturah. Mikrostruktura, prikazana na sliki 5b, je dobro starana in



Slika 5: Mikrostrukture temenskih varkov po izločevalnem žarjenju: a) 480 °C / 0,7 h, b) 445 °C / 3 h, 480 °C / 10,8 h

Figure 5: Microstructures of surfacing welds after precipitation hardening: a) 480 °C / 0,7 h, b) 445 °C / 3 h, 480 °C / 10,8 h



Slika 6: Spreminjanje a) žilavosti /J, b) trdote HV , c) natezne trdnosti /MPa in d) stanja mikrostrukture v odvisnosti od parametrov izločevalnega žarjenja

Figure 6: Change of weld a) toughness, b) hardness, c) tensile strength and d) microstructure after different precipitation annealing

jo dobimo pri izločevalnem žarjenju z optimalnimi parametri. Slika 5c je značilna za preveč starano mikrostrukturo. Na mejah med celičnimi dendriti se pojavijo značilna bela področja, ki so bogata z Ni. Na teh mestih se pretvorba v povratni avstenit pojavi že pri nižjih temperaturah. Taka mikrostruktura ni zelena, ker ima majhno žilavost. Pri bolj izrazitem prestaranju se znižata tudi trdota in natezna trdnost, kar posledično vpliva na večjo obrabo in slabšo odpornost proti termičnemu utrujanju.

Na osnovi analize mikrostrukture je bil izdelan grafični prikaz stanja mikrostrukture glede na parametre izločevalnega žarjenja (slika 6d). Premalo staran var dobimo pri izločevalnem žarjenju pri nižjih temperaturah krajši čas. Dobro staran var dobimo z izločevalnim žarjenjem s parametri iz osrednjega področja, preveč staran var pa z izločevalnim žarjenjem pri visokih temperaturah in dolgih časih. S slike 6d) lahko ugotovimo take parametre izločevalnega žarjenja, pri katerih bomo v izbranem jeklu dobili zeleno mikrostrukturo. Če te rezultate kombiniramo z razvitimi modeli za napoved mehanskih lastnosti, dobimo dodatno informacijo, ki omogoča lažjo izbiro parametrov izločevalnega žarjenja za aplikacijo.

4 DISKUSIJA

Priporočen vnos energije med varjenjem je po literaturi 1,8 kJ/mm¹⁰, mi pa smo varili z vnosom energije 2,1 kJ/mm. Mikrostruktura vara v navarjenem stanju je premalo starana in ima visoko žilavost ter relativno nizko trdoto in natezno trdnost. Glede na trdoto jekla maraging v homogeniziranem stanju je trdota v navarjenem stanju večja. Zaradi manjšega povečanja trdote in premalo starane mikrostrukture topilno žarjenje ni

potrebno. Kljub temu pomeni varjenje z vnosom energije 2,1 kJ/mm zgornjo vrednost vnosa energije.

Kovanje varkov med varjenjem je zamudno. Pri varjenju trdih in krhkih orodij je pogosto neizogibno, da preprečimo pokanje. Kovanje spremeni natezne zaostale napetosti, ki nastanejo v varu zaradi varjenja, v tlačne in posledično preprečuje širjenje razpok. Varom iz jekla maraging poveča žilavost in trdoto. Višja žilavost je najverjetneje posledica drobljenja večjih kristalnih zrn v manjša, višja trdota pa je posledica mehanske utrditve. Kovanje varkov iz jekla maraging je priporočljivo.

Predgrevanje na temperaturo 400 °C negativno vpliva na mehanske lastnosti vara iz jekla maraging, saj zmanjšuje trdoto, natezno trdnost in žilavost, najverjetneje zaradi segrevanja varkov v območju temperatur od 700 °C do 1000 °C, to je v območju krhkosti. Pri tem se na mejah avstenitnih zrn in celičnih dendritov pojavijo Ti(C, N)-izločki, ki povzročajo krhkost jekla⁷. Zaradi pomanjkanja Ti v preostanku mikrostrukture sta manjša tudi natezna trdnost in trdota zvara. Predgrevanje na temperaturo 400 °C se zato ne priporoča. Najvišja temperatura predgrevanja, ki jo priporoča literatura, je 200 °C¹². Jekla maraging so dobro variva tudi pri sobni temperaturi, ker se pri ohlajanju na zraku pojavi duktilen in žilav martenzit.

Povečanje trdote in natezne trdnosti ter zmanjšanje žilavosti s povečevanjem časa in temperature izločevalnega žarjenja je že poznano iz literature. Pri tem je zanimivo, da se povečanje trdote in natezne trdnosti sklada s padcem žilavosti. To je v skladu z objavljenimi podatki v literaturi za jekla maraging^{8,12}. Pri tem velja poudariti, da literatura navadno ne navaja podatkov za natezno trdnost, niti podatkov za mehanske lastnosti zvarov. Prednost razvitih modelov za napoved mehanskih lastnosti po izločevalnem žarjenju je, da lahko parametre določimo na osnovi zelenih mehanskih lastnosti. S tem zagotovimo, da ima material optimalne mehanske lastnosti za določeno uporabo že vnaprej in posledično vplivamo na trajnostno dobo orodja.

Grafičen prikaz stanja mikrostrukture varov iz jekla maraging glede na parametre izločevalnega žarjenja predstavlja pomembno informacijo pri izbiri optimalnih parametrov za posamezno aplikacijo. Če ta model kombiniramo z modeli za napoved mehanskih lastnosti ter z zahtevami orodjarjev, se nam zožijo možnosti izbire parametrov izločevalnega žarjenja. Kljub temu pa lahko izberemo take parametre, ki bodo omogočali višjo trdoto ali natezno trdnost ali višjo žilavost.

5 SKLEPI

Analiza varjenja TIG jekla maraging z 18 % Ni ter analiza izločevalnega žarjenja varov glede na mikrostrukturo in mehanske lastnosti je pokazala naslednje:

- varjenje z vnosom energije do 2,1 kJ/mm je praktično in povzroča le delno izločevalno žarjenje vara, zato topilno žarjenje po varjenju ni potrebno;

- temperatura predgrevanja 400 °C je previsoka za varjenje jekel maraging z vsebnostjo 18 % Ni ali več. Priporoča se predgrevanje do 200 °C;
- kovanje varkov je zaželeno, saj zvišuje žilavost in trdoto varkov ter spreminja natezne zaostale napetosti v tlačne;
- izločevalno žarjenje poteka hitreje pri višjih temperaturah. S povečevanjem temperature in časa izločevalnega žarjenja se natezna trdnost in trdota povečujeta, žilavost pa pada;
- dobro starano mikrostrukturo dobimo npr.: pri izločevalnem žarjenju na temperaturi 515 °C eno uro, pri temperaturi 445 °C tri ure oz. z uporabo razvitih modelov, ki so prikazani na **sliki 6**;
- premalo starano jeklo maraging ni primerno za površinski sloj orodij, ker ima prenizko trdoto, pri preveč staranem materialu pa se pojavi občuten padec žilavosti.

6 LITERATURA

- ¹ A. Srivastava, V. Joshi, R. Shivpuri, Computer modeling and prediction of thermal fatigue cracking in die-casting tooling, *Wear* 256 (2004), 38–43
- ² A. Persson, S. Hogmark, J. Bergstrom, Simulation and evaluation of thermal fatigue cracking of hot work tool steels, *International Journal of Fatigue* 26 (2004), 1095–1107
- ³ A. Persson, S. Hogmark, J. Bergstrom, Thermal fatigue cracking of surface engineered hot work tool steels, *Surface and Coatings Technology* 191 (2005), 216–227
- ⁴ W. Young, Why Die Casting Dies Fail, Paper No. G-T79-092, 10th SDCE International die casting exposition & congress, St. Louis, Missouri, North American Die Casting Association, 1979
- ⁵ Metso Powdermet, Materials Technology Solutions, Marlok, Longer die life Better quality, www.metsopowdermet.com/, (2005)
- ⁶ Y. Wang, A study of PVD coatings and die materials for extended die-casting die life, *Surface and Coatings Technology* 94–95 (1997), 60–63
- ⁷ R. F. Decker, S. Floreen, Maraging steels – The first 30 years, Wilson, R. K., *Maraging steels – recent developments and applications*, The Metals & Minerals Society, Warrendale, PA, 1988
- ⁸ J. Grum and M. Zupančič, Suitability assessment of replacement of conventional hot-working steels with maraging steel, Part I: Mechanical properties of maraging steel after precipitation hardening treatment, *Zeitschrift fuer Metallkunde/Materials Research and Advanced Techniques* 93 (2002), 164–170
- ⁹ J. Grum, M. Zupančič, Suitability assessment of replacement of conventional hot-working steels with maraging steel, Part II: Microstructure of maraging steel after precipitation hardening treatment, *Zeitschrift fuer Metallkunde/Materials Research and Advanced Techniques* 93 (2002), 171–176
- ¹⁰ D. A. Canonico, Gas Metal-Arc Welding of 18 % Nickel Maraging Steel, *Welding Research* (1964), 433–442
- ¹¹ D. Klobčar, J. Tušek, B. Taljat, G. Scavino, Influence of thermal fatigue on materials for die-casting tooling, Rosso, M., Actis Grande, M., in Ugues, D., *Tooling materials and their applications from research to market: proceedings of 7th International Tooling Conference*, 2.5.2006 Torino, Politecnico di Torino, 479–485
- ¹² A. T. Minotto, B. Taljat, J. Tušek, Development of weld-cladding processes for surface enhancement of hot-work tooling, 5th International Conference on Industrial Tools, ICIT 2005, 12.4.2005 Velenje, TECOS Celje, 207–214