

Vpliv homogenizacijskega žarjenja na preoblikovalne lastnosti zlitin vrste AlMgSi

Influence of Homogenization Annealing on the Workability of AlMgSi Alloys

Smolej A¹, FNT Montanistika, Ljubljana
V. Dragojevič, R. Kučič, IMPOL, Slovenska Bistrica

Preoblikovalne lastnosti zlitin vrste AlMgSi so odvisne od načinov toplotne obdelave polkontinuirno ulitih drogov. V delu je opisan vpliv različnih hitrosti ohlajanj ulitkov po homogenizacijskem žarjenju in ponovnih ogrevanj na preoblikovalno trdnost zlitine AlMgSiPb. Različne hitrosti ohlajanj in ogrevanj vplivajo na mikrostrukturo in s tem posredno na preoblikovalno trdnost zlitin.

Ključne besede: zlitina AlMgSiPb, homogenizacijsko žarjenje, mikrostruktura, preoblikovalne lastnosti

Workability of AlMgSi alloys depends on heat treatment of semicontinuously cast poles. The influence of various cooling rates of castings after the homogenization annealing and reheating on the workability of AlMgSiPb alloy is described. Various cooling and heating rates influence the microstructure and thus indirectly also the yield stress of the alloys.

Key words: AlMgSiPb alloy, homogenization annealing, microstructure, workability

1. Uvod

Zlitine skupine AlMgSi (AA 6XXX) so količinsko najbolj razširjene in vsestransko uporabne aluminijeve zlitine, ki se predelujejo z iztiskovanjem v profile, palice in cevi. Te zlitine odlikujejo dobra preoblikovalnost, trdnostne lastnosti, korozijska obstojnost in obdelovalnost z odrezavanjem pri materialih z dodatkom svinca in bizmuta. Mehanske in tehnološke lastnosti so odvisne od kemične sestave ter toplotnih obdelav ulitkov in iztiskovancev. Toplotna obdelava ulitkov sestoji iz homogenizacijskega žarjenja, kjer so glavni parametri temperatura in čas žarjenja ter hitrost ohlajanja materiala do prostorske temperature. Način ohlajanja vpliva na izločanje tistih zlitinskih elementov, ki so med homogenizacijskim žarjenjem v trdni raztopini. Velikost in porazdelitev sekundarnih izločkov vpliva na preoblikovalno trdnost, hitrost iztiskovanja, kakovost površine, in mehanske lastnosti iztiskovancev. Optimalne lastnosti polizdelkov so odvisne tudi od ponovnega ogrevanja homogeniziranih ulitkov na temperaturo iztiskovanja.

Vpliv ohlajanja po homogenizaciji na hitrost iztiskovanja in kakovost površine polizdelkov je bil predmet številnih raziskav, katerih rezultati se pogosto razlikujejo¹⁻⁶. Znano je, da morajo biti izločki Mg₂Si drobni in enakomerno porazdeljeni v matrici⁶. Taka mikrostruktura, ki nastane med dovolj hitrim ohlajanjem ulitkov po homogenizaciji, povzroči dobro površino iztiskovancev in zato omogoča tudi hitrejša iztiskovanja. Večji izločki pospešujejo nastanek površinskih napak na profilih in palicah pri

hitrejšem iztiskovanju in povzročijo slabše mehanske lastnosti polizdelkov¹⁻³. Optimalna hitrost iztiskovanja je zato pogojena s kvaliteto površine in preoblikovalno trdnostjo materiala. Ti dve lastnosti pa sta odvisni predvsem od načinov toplotne obdelave polkontinuirno ulitih drogov. Kljub številnim raziskavam s tega področja je malo kvantitativnih podatkov o vplivu teh toplotnih obdelav na preoblikovalne lastnosti zlitin vrste AlMgSi¹.

V tem delu je opisan vpliv ohlajanja po homogenizacijskem žarjenju in ogrevanja pred preoblikovanjem na mikrostrukturo in preoblikovalno trdnost zlitine AlMgSiPb.

2. Eksperimentalno delo

Preiskusna zlitina AlMgSiPb (tabela 1) je bila ulita po polkontinuirnem postopku v drogove s premerom 165 mm. Iz dela ulitih drogov so bili izrezani vzorci za laboratorijsko homogenizacijsko žarjenje, ki je potekalo v laboratorijski elektroporovni peči pri temperaturi 545°C, času 10 ur in treh hitrostih ohlajanja po končanem žarjenju: 25°C/h, 200°C/h in hlajenje v vodi s temperaturo 18°C. Krivulje dejanska napetost-dejanska deformacija oziroma sila-skrček so bile narejene z osnosimetričnim tlačnim preizkusom na stroju Gleeble 1500 pri preoblikovalni temperaturi 500°C in hitrosti stiskanja 5 mm/s do logaritemske deformacije 0.6. Časi ogrevanja do preoblikovalne temperature so bili 2, 15 in 45 minut.

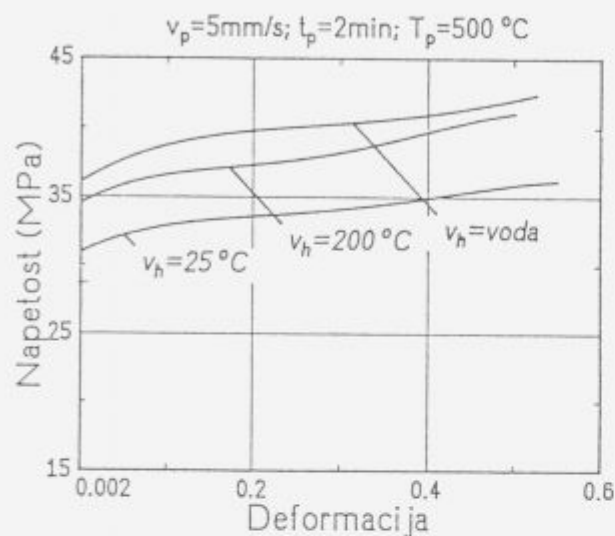
Tabela 1: Kemična sestava preizkusne zlitine (v m. %)
 Table 1: Chemical composition of investigated alloy (wt. %)

Si	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Pb	Bi
1,09	0,28	0,09	0,97	0,70	0,01	1,00	0,02

¹ prof. dr. Anton SMOLEJ, dipl. inž. metal.
FNT, Odsek za metalurgijo in materiale
Aškerčeva 12, 61000 Ljubljana

3. Rezultati preiskav

Dejanske napetosti za preoblikovanje zlitine so v območju deformacij do $\epsilon = 0.6$ najmanjše pri počasno ohlajenih zlitinah s temperature homogenizacijskega žarjenja (25°C/h). Vrednosti napetosti naraščajo s hitrostjo ohlajanja. Rezultati so identični za vse tri čase ogrevanja na preoblikovalno temperaturo (slika 1).



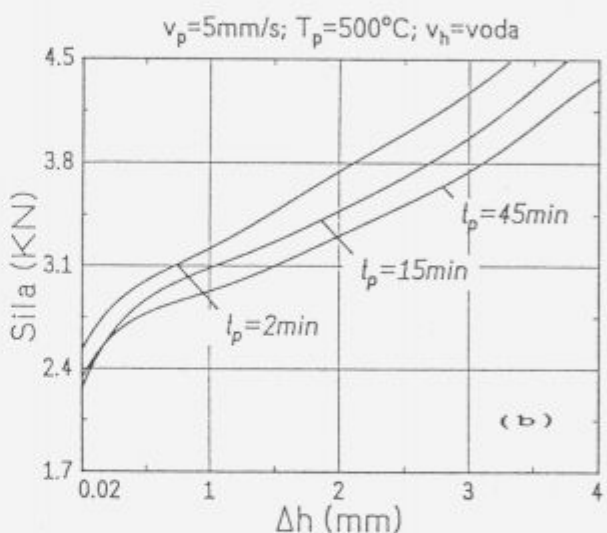
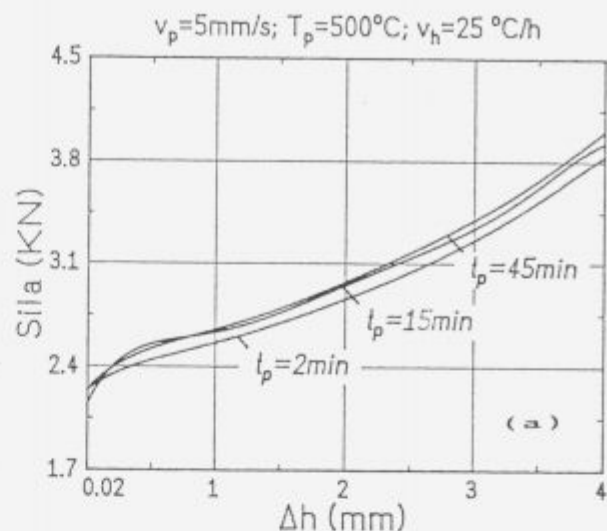
Slika 1: Krivulje dejanska napetost - deformacija za različne hitrosti ohlajanja zlitine po homogenizaciji ($v_h = 25^\circ\text{C/h}$, 200°C/h , voda) po 2 minutnem ogrevanju na preoblikovalno temperaturo 500°C in hitrosti stiskanja 5 mm/s

Figure 1: True stress - strain curves of alloys being cooled at various cooling rates after the homogenization annealing, and after 2 - minute heating to working temperature of 500°C ; compression rate was 5 mm/s

Na sliki 2 so prikazane odvisnosti preoblikovalnih sil od višin preizkušancev med stiskanjem po različnih časih ogrevanja na preoblikovalno temperaturo. Preoblikovalne sile oziroma napetosti so odvisne tako od hitrosti ogrevanja na preoblikovalno temperaturo kakor tudi od predhodnega načina ohlajanja ulitkov s temperature homogenizacijskega žarjenja. Preoblikovalne sile se večajo z daljšimi časi ogrevanja, če so bili ulitki relativno počasi ohlajeni s temperature homogenizacije (slika 2a). Nasprotno pa se preoblikovalne sile manjšajo z naraščajočim časom žarjenja na preoblikovalno temperaturo, če je zlitina po homogenizaciji zelo hitro ohlajena (slika 2b). Vzrok za spreminjanje preoblikovalnih sil temelji na načinu porazdelitve elementov magnezija in silicija v matrici.

Med posthomogenizacijskim ohlajanjem nastajajo v matrici sekundarni izločki. Njihovi velikost in gostota sta odvisni od hitrosti ohlajanja. Med počasnim ohlajanjem (do 200°C/h) nastanejo veliki paličasti in drobni sferični izločki (slika 3a). Paličasti izločki imajo sestavo Mg_2Si , medtem ko sferične izločke sestavljajo elementi Al, Mn, Mg, Si in Cu. V vodi gašena zlitina vsebuje le drobne sferične izločke (slika 3b).

Med ogrevanjem homogenizirane in različno ohlajene zlitine na preoblikovalno temperaturo se ponovno spremenita velikost in gostota izločkov. Obe veličini sta odvisni predvsem od časa ogrevanja. Veliki izločki, ki nastanejo med počasnejšim postho-



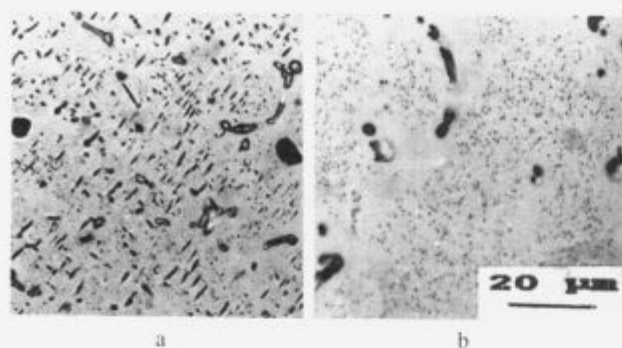
Slika 2: Krivulje preoblikovalna sila (F)-višina stiskanca (Δh) za različne čase ogrevanja ($t_p = 2, 15, 45$ minut) na preoblikovalno temperaturo 500°C pri hitrosti stiskanja 5 mm/s . Zlitina je bila po homogenizaciji ohlajena s hitrostjo 25°C/h (a) in v vodi (b)

Figure 2: Curves of forming force (F) vs. height of specimen (Δh) for various heating times to working temperature of 500°C and compression rate of 5 mm/s . Alloy was after the homogenisation annealing cooled with the rate 25°C/h (a), and dipping in water (b)

mogenizacijskim ohlajanjem (do 200°C/h), se delno raztapljajo (slika 4a). Izločki postajajo manjši, njihovi gradniki pa gredo delno v trdno raztopino. Nasprotno pa se v gašeni zlitini pojavljajo precipitati kot posledica izločanja med prehodom skozi območje nižjih temperatur (slika 4b). To pojavljanje izločkov je vzrok za nižje preoblikovalne sile med stiskanjem hitro ohlajene zlitine po homogenizaciji (slika 2b).

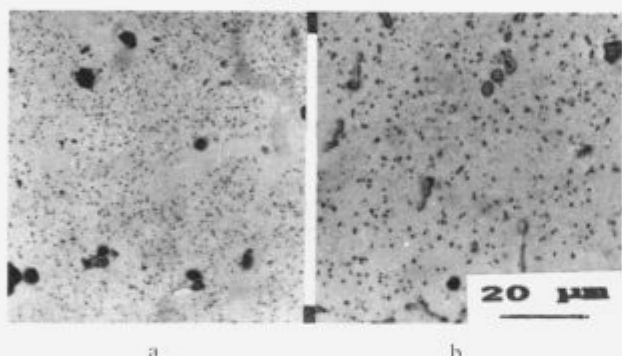
4. Diskusija rezultatov

Homogenizacijsko žarjenje zlitine AlMgSiPb pri temperaturi 545°C je identično z raztopnim žarjenjem. Glavna zlitinska elementa magnezij in silicij sta po 10 urnem žarjenju v trdni raztopini. Procesi izločanja so pod temperaturo solvusa odvisni od



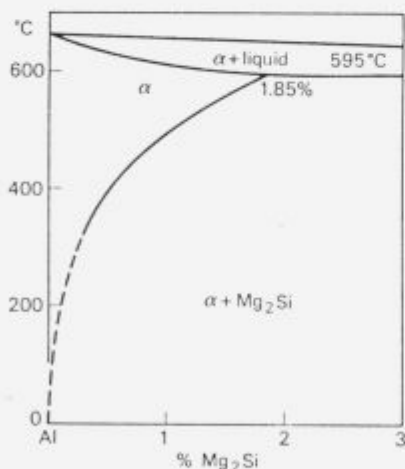
Slika 3: Mikrostruktura zlitine AlMgSiPb po homogenizaciji z različnimi hitrostima ohlajanja: (a) 200°C/h, (b) voda

Figure 3: Microstructure of the AlMgSiPb alloy after the homogenization annealing with various cooling rates: (a) 200°C/h, (b) dipping into water



Slika 4: Porazdelitev in velikost izločkov po 45 minutnem ogrevanju zlitine AlMgSiPb na temperaturo 500°C: (a) hitrost ohlajanja po homogenizaciji 200°C/h, (b) ohlajanje po homogenizaciji v vodi

Figure 4: Distribution and size of precipitates after 45 - minutes heating of the AlMgSiPb alloy to the temperature of 500°C: (a) cooling rate after the homogenization annealing 200°C/h; (b) cooling in water



Slika 5: Kvazibinarni fazni diagram Al - Mg₂Si⁷
Figure 5: Quasibinary phase diagram for Al - Mg₂Si⁷

hitrosti ohlajanja materiala. Med ohlajanjem s temperature 545°C ne poteka sekvenca izločanja v zaporedju kot med umetnim staranjem:



kjer je α_0 prenasičena trdna raztopina, GP so Guinier - Prestonove cone, β' je semikoherentni izloček tipa Mg₂Si s heksagonalno osnovno celico, β je ravnotežni, nekoherentni izloček Mg₂Si s kubično ploskovno centrirano celico^{7,8}, α_1 , α_2 , α_3 so trdne raztopine z vsakokratnimi sestavami, ki so v ravnotežju z izločki GP, β' in β .

Med počasnim ohlajanjem (25°C/h) se zlitina zadržuje relativno dolgo v bližini solvus temperature za ravnotežno fazo Mg₂Si (slika 5). To temperaturno območje je nad navideznima, metastabilnima krivuljama topnosti v ravnotežnem diagramu za izločke β' in GP cone. Ker sta podhladitev in hitrost nukleacije majhni, migracija atomov v tem temperaturnem področju pa velika, so rezultat počasnega ohlajanja redki, relativno veliki, stabilni, izločki Mg₂Si. Med ohlajanjem s hitrostjo 200°C/h nastane zaradi večje podhladitve več aktivnih nukleusov kot v prejšnjem primeru. Hitrost nukleacije je večja zaradi manjše aktivacijske energije, ki je potrebna za nastanek semikoherentnih nukleusov v področju med krivuljo topnosti za β in navidezno krivuljo topnosti za β' . Ti nukleusi zrastejo v relativno velike izločke zaradi visoke temperature, ki pogojuje rast nukleusov z difuzijo. Rezultat ohlajanja s hitrostjo 200°C/h so veliki in gostejše prazdeljeni metastabilni in stabilni izločki tipa Mg₂Si. Med ohlajanjem zlitine v vodi nastane zaradi presežene kritične temperature podhladitve zelo veliko nukleusov, katerih rast je ovirana zaradi majhne difuzijske sposobnosti atomov pri prostorski temperaturi.

Spreminjanje preoblikovalne napetosti oziroma sile s hitrostjo ohlajanja po homogenizaciji in hitrostjo ogrevanja na preoblikovalno temperaturo je posledica porazdelitve zlitinskih elementov v matrici. Preoblikovalna napetost se veča z naraščajočo hitrostjo posthomogenizacijskega ohlajanja pri preizkušancih, ki so hitro ogreti na preoblikovalno temperaturo (slika 1). V primeru ohlajanja zlitine s hitrostmi do 200°C/h in ponovnim ogrevanjem na preoblikovalno temperaturo 500°C v časih do 15 minut sta Mg in Si pred deformacijo še vedno pretežno v obliki izločkov Mg₂Si in le delno med ogrevanjem preideta v trdno raztopino (slika 4a). Grobi sekundarni izločki se lahko ponovno popolnoma raztope le pri preoblikovalni temperaturi, ki je za določeno vsebnost Mg₂Si nad ravnotežno temperaturo solvusa. Preizkusna zlitina ima teoretično 1,51 m. % Mg₂Si. Temperatura solvusa je za to vsebnost približno 525°C (slika 5). Količina in velikost izločkov se zato pri danih pogojih ogrevanja le delno zmanjšata, ker je čas ogrevanja prekratek in preoblikovanje pod ravnotežno temperaturo solvusa. Zlitina se preoblikuje pri nižjih napetostih v primerjavi s hitro ohlajenim materialom v vodi, ki ima pred deformacijo elementa Mg in Si v trdni raztopini ali v obliki zelo drobnih izločkov.

Nasprotno pa se preoblikovalna napetost oziroma sila manjša z naraščajočo hitrostjo posthomogenizacijskega ohlajanja pri preizkušancih, ki so počasi ogreti na preoblikovalno temperaturo (slika 3a). Gašena zlitina se med daljšim zadrževanjem v temperaturnem intervalu med 100°C in 200°C stara z izločanjem magnezija in silicija iz trdne raztopine. Pri višjih temperaturah ogrevanja nastane prestaranje, tako da se zlitina sestoji pred deformacijo iz matrice s stabilnimi izločki Mg₂Si. Zlitina se preoblikuje pri nižjih napetostih v primerjavi s počasneje ohlajenim materialom po homogenizaciji, ker ima pred deformacijo več izločenih zlitinskih elementov.

5. Zaključki

1. Preoblikovalna trdnost zlitin vrste AlMgSi je odvisna od hitrosti ohlajanja po homogenizacijskem žarjenju in načina ponovnega ogrevanja materiala na preoblikovalno temperaturo.

2. Preoblikovalna trdnost se večja z naraščajočo hitrostjo ohlajanja ulitkov po homogenizacijskem žarjenju v primeru hitrega ogrevanja in manjša v primeru počasnejšega ogrevanja na preoblikovalno temperaturo 500°C.

3. Sprememba preoblikovalnih trdnosti je posledica porazdelitve zlitinskih elementov v matrici. Med počasnim ohlajanjem s temperature homogenizacije nastanejo veliki sekundarni izločki, ki se le delno raztapljajo med ponovnim hitrim ogrevanjem na preoblikovalno temperaturo. Taka mikrostruktura zmanjša preoblikovalno trdnost v primerjavi z zlitino, ki ima večji delež magnezija in silicija v trdni raztopini.

6. Literatura

¹ O. Raiso: The Effect of Compositional and Homogenization Treatment on Extrudability of AlMgSi Alloys. The Effect of Microstructure on the Extrudability of Some Aluminium Alloys, Hydro Aluminium, Sundsödra, 1992, 31-40

² P. R. Sperry: Correlation of Microstructure in 6XXX Extrusion Alloys with Process Variables and Properties, Proceedings of Third International Aluminium Extrusion Technology Seminar, Volume I, Aluminium Association, Atlanta, 1984, 21-29

³ J. Langerweger: Metallurgische Einflüsse auf Produktivität beim Strangpressen von AlMgSi-Werkstoffen, *Aluminium*, 58, 1982, 107-109

⁴ D. Marchive: High Extrudability Alloys in the 6000 Series, *Light Metal Age*, 4, 1983, 6-10

⁵ G. Lang, A. F. Castle: Effect of Rate of Cooling after Homogenisation on Direct - Extrusion Parameters of 6063 (Al-Mg-Si) Billet, *Metals Technology*, December, 1978, 434-438

⁶ R. W. Hains: Press Quenching of Aluminium Alloys, Proceedings of Third International Aluminium Technology Seminar, Volume I, Atlanta, 1984, 81-88

⁷ I. J. Polmear: Light Alloys, Second Edition, Edward Arnold, London, 1989, 29

⁸ L. F. Mondolfo: Aluminium Alloys: Structure and Properties, Butterworths, London, 1976, 566-590