

Vpliv procesnih parametrov pri postopku thixocasting na mikrostrukturo zlitine AlSi7

The Influence of Thixocasting Process Parameters on the Microstructure of AlSi7 Alloy

R. Rudolf¹, A. Križman, Fakulteta za strojništvo, Univerza v Mariboru

Prejem rokopisa - received: 1996-10-04; sprejem za objavo - accepted for publication: 1996-11-22

Postopek thixocasting se uporablja za izdelavo nekaterih Al zlitin s posebnimi lastnostmi. Pri tem postopku se spremeni neugodna dendritna morfologija primarnih kristalov α_{Al} v globulitno. Uporablja se pri izdelavi proizvodov s tlačnim litjem, z utopnim kovanjem, pri izdelavi kompozitov ipd. Kot etapno nalogo pri izdelavi kompozitov na osnovi aluminijevih zlitin smo raziskovali vpliv procesnih parametrov (temperatura in hitrost mešanja) na velikost in obliko globulitnih zrn. V tem prispevku podajamo analizo mikrostrukture tako izdelane zlitine AlSi7. Raziskave kažejo, da je globulitna mikrostruktura α -primarnih zmesnih kristalov močno odvisna od hitrosti mešanja in temperature v dvofaznem področju. Na končno mikrostrukturo tako izdelanega materiala pa vpliva tudi hitrost ohlajenja s temperature dvofaznega področja do sobne temperature.

Ključne besede: postopek thixocasting, Al-Si zlitine, globulitna mikrostruktura

Thixocasting is used for manufacturing of some Al alloys with special properties. With this process the undesired dendritic morphology of primary crystals α_{Al} changes to spheroidal. Obtained alloys are used for high pressure die casting, die forging, composites manufacturing and similar. For composite manufacturing the influence of process parameters (temperature and mechanical stirring velocity) on the size and shape of the spheroidal grains were investigated. This paper deals with the microstructure analysis of AlSi7. Results show strong influence of mechanical stirring velocity and temperature in the semisolid on spheroidal microstructure of α primary crystal. Microstructure also depends on cooling velocity from semisolid to room temperature.

Key words: thixocasting, Al-Si alloys, spheroidal microstructure

1 Uvod

Pri litju po postopku thixocasting material, ki ga li-jemo, ni popolnoma tekoč, ampak je zmes trdne in tekoče faze. Intenzivno mešanje zlitine v dvofaznem področju preprečuje normalno rast dendritov in povzroči nastanek globulitnih zrn. Mikrostruktura z globulitno morfologijo faze α in njeno enakomerno porazdelitvijo daje pri kasnejšem segretju v dvofazno področje dobro tekočnost, kar omogoča izdelavo kompleksnih ulitkov ob uporabi relativno majhnih sil¹.

Kritični parameter pri litju je količinsko razmerje tekoče in trdne faze, zato je nujno natančno uravnavanje temperature. Enostavno lahko lijemo zlitine, ki imajo širok interval strjevanja, pri litju materialov z ožjim strjevalnim intervalom, pa je težko zagotoviti ustrezno razmerje trdne in tekoče faze.

Med strjevanjem v dvofaznem področju potekajo številni procesi, kot so kristalizacija, ogrobitve dendritov, meddendritski tok taline, difuzija itd². Razvoj mikrostrukture materiala je v veliki meri odvisen od teh procesov. Po določenem času intenzivnega mešanja materiala v dvofaznem področju dendritna struktura razpade, zrna postajajo rozetaste oblike zaradi lomljenja, ogrobitve ter abrazije dendritov. Pri dovolj počasnem ohlajenju v dvofaznem področju in močnem mešanju dobijo rozete okroglo (v nekaterih primerih elipsasto) obliko, navadno z majhno količino ujete taline (slika 1). Velikost posameznih zrn (rozet ali sferoidov) je odvisna

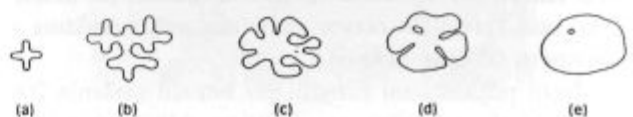
od hitrosti mešanja, ki mora imeti neko minimalno vrednost, pa tudi od hitrosti ohlajenja v posameznih temperaturnih območjih.

Tehnološki pomen ima danes postopek thixocasting predvsem za aluminijeve zlitine, saj širi območje uporabe tlačnega litja. Ulitki imajo zelo majhno poroznost, boljšo varivost, povečano trdnost in duktilnost. Tako ulivajo zavorne cilindre za avtomobile, dele kompresorjev pri klimatskih napravah za avtomobile, električne spojne elemente, ohišja ventilov, dele podvozij¹.

V tem prispevku so podani rezultati raziskav vpliva hitrosti mešanja, časa mešanja, hitrosti ohlajenja in temperature v dvofaznem področju na mikrostrukturo zlitine AlSi7. Vpliv vseh teh parametrov smo ugotavljali s spremljanjem mikrostrukturnih sprememb med procesom.

2 Eksperimentalno delo

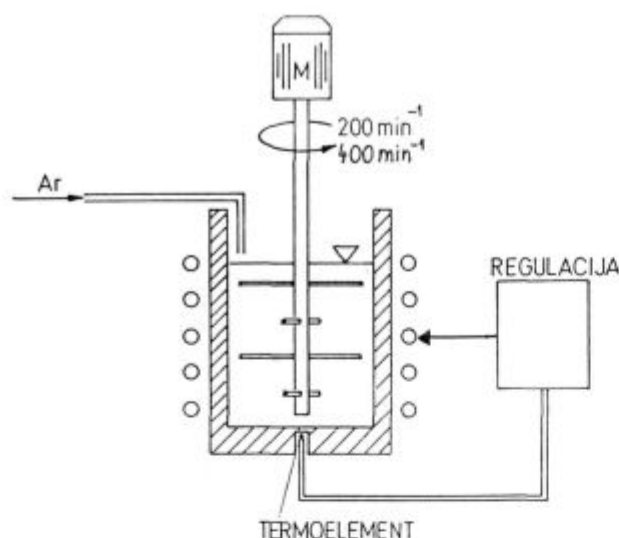
Za poskuse smo uporabili zlitino AlSi7, ki ima likvidus temperaturo $T_l \sim 620^\circ\text{C}$ in evtektično temperaturo



Slika 1: Razvoj globulitne mikrostrukture: (a) začetni dendrit, (b) rast dendrita, (c) rozeta, (d) ogrobitve rozete, (e) sferoid²

Figure 1: Evolution of spheroidal microstructure: (a) initial dendritic fragment, (b) dendritic growth, (c) rosette, (d) ripened rosette, (e) spheroid²

¹ Rebeka RUDOLF
Fakulteta za strojništvo
2000 Maribor, Smetanova 17



Slika 2: Naprava za mehansko mešanje taline
Figure 2: Mechanical stirrer

$T_e = 577^\circ\text{C}$. Zlitina je bila pretaljena pri 640°C in nato prelita v grafitni lonec eksperimentalne naprave, kjer je potekalo mehansko mešanje taline v zaščitni argonski atmosferi (slika 2). Grafitni lonec je bil v napravi za mehansko mešanje segret na temperaturo taline.

Poskuse smo naredili z dvema različnima hitrostima mešanja:

A: 400 min^{-1}

B: 200 min^{-1}

Vzorci smo odvzeli pri dveh temperaturah:

$T_1 = 615^\circ\text{C}$ (delež trdne faze $f_s \sim 12\%$)

$T_2 = 605^\circ\text{C}$ (delež trdne faze $f_s \sim 30\%$)

Pri vsakem odvzemu vzorcev smo večino le-teh gasili v vodi z namenom, da bi ohranili med mešanjem nastalo globulitno mikrostrukturo. Druge smo počasi ohlajali do sobne temperature, da bi ugotovili, kako se globulitna in evtektična morfologija spremeni med počasnim strjevanjem.

Naredili smo štiri poskuse.

Prvi poskus smo naredili pri hitrosti mešanja 400 min^{-1} . Med mešanjem smo zlitino AlSi7 ohlajali s hitrostjo 2°C/min s $T=640^\circ\text{C}$ do temperature 615°C in jo izotermno mešali 30 minut. Nato smo jo kontinuirno ohlajali s hitrostjo 2°C/min do 605°C in jo ponovno izotermno mešali 30 minut.

Drugi poskus smo naredili pri enakih pogojih, le da smo zlitino pri $T=615^\circ\text{C}$ izotermno mešali 60 minut. Tako smo spremljali razvoj globulitne mikrostrukture v odvisnosti od časa mešanja.

Tretji poskus smo naredili pri hitrosti mešanja 200 min^{-1} . Med mešanjem smo zlitino AlSi7 ohlajali s hitrostjo 2°C/min s $T=640^\circ\text{C}$ do temperature 615°C in jo izotermno mešali 30 minut. Nato smo jo kontinuirno ohlajali z enako ohlajevalno hitrostjo do 605°C in jo izotermno mešali še 30 minut.

Četrti poskus smo naredili pri enakih pogojih kot tretjega, le da smo zlitino pri $T=615^\circ\text{C}$ izotermno mešali 60 minut.

Vzorci smo pripravili z običajnimi postopki metalografske analize ter jih opazovali s svetlobnim mikroskopom Neophot 21. Mikrostrukturne raziskave smo opravili tudi z rastrskim elektronskim mikroskopom (REM) JEOL JSM 840A, opremljenim z analizatorjem EDS.

3 Rezultati in diskusija

Pri mehanskem mešanju delujejo na strjevalni fronti strižne sile, ki povzročijo razbijanje primarnih dendritov na več delov in njihovo sferoidizacijo. Napetosti, ki so posledica pritiska toka taline na dendrite, odlomijo dendritne veje. Dendritne veje pa se tudi pretaljujejo. Med pretaljevanjem poteka ogrobitve dendritov, nekatere dendritne veje rastejo, druge pa se raztapljajo. To je posledica različnih toplotnih in difuzijskih polj. Funkcija toka taline je v tem primeru pospešiti difuzijo topljenca ter odnašanje dendritnih vej z mest, kjer so se zlomile².

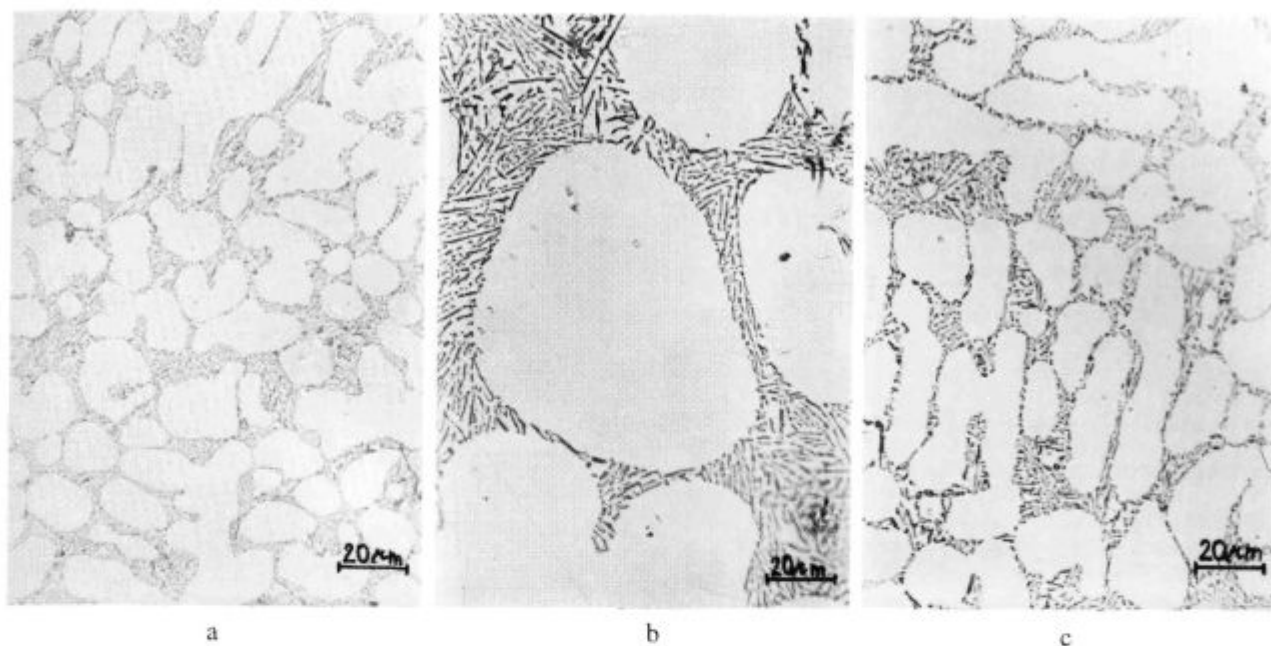
3.1 Mešanje z vrtilno hitrostjo 400 min^{-1}

Vzorci, odvzeti pri $T = 615^\circ\text{C}$

Mikrostruktura vzorca, ki smo ga med mešanjem ohlajali s hitrostjo 2°C/min s $T=640^\circ\text{C}$ do $T=615^\circ\text{C}$ v argonski zaščitni atmosferi, nato izotermno mešali 30 minut in gasili v vodi s temperature 615°C na sobno, je drobno izoblikovana (slika 3a). Globulitna mikrostruktura se je šele začela razvijati, zato opazimo še veliko dendritov. Izoblikovane rozete primarnih kristalov α_{Al} so velikostnega razreda $25\text{ }\mu\text{m}$. Zaradi hitrega ohlajevanja smo zadržali obliko rozet, nastal pa je fino izoblikovan acikularni vlaknat evtektik³.

Drugi vzorec smo odvzeli istočasno, le da smo ga počasi ohlajali na zraku. Med počasnim ohlajanjem na zraku s $T = 615^\circ\text{C}$ na sobno temperaturo smo dobili grobo izoblikovano mikrostrukturo (slika 3b). Delno zlomljeni dendriti so se dalj časa zadrževali v talini, kar je omogočilo rast rozet primarne faze α_{Al} . Rozete primarne faze α_{Al} so tri in pol krat večje od tistih v hitro ohlajenem vzorcu in so velikostnega razreda $70\text{ }\mu\text{m}$. Zaradi počasnega ohlajanja se je preostala talina strjevala v normalni evtektik. Evtektična mikrostruktura je sestavljena iz evtektično izločenega silicija, ki ima ploščato zgradbo, in evtektično izločenega aluminija.

Mikrostruktura zlitine AlSi7, ki smo jo pri $T = 615^\circ\text{C}$ izotermno mešali 60 minut in jo nato gasili v vodi, je zelo globulitna. Proces sferoidizacije in ogrobitve dendritov je zaradi daljšega časa mešanja v primerjavi s prejšnjim poskusom napredoval, zato v mikrostrukturi skoraj ni opaziti več dendritov (slika 3c). Globuliti primarne faze α_{Al} imajo povprečno velikost $30\text{ }\mu\text{m}$ in so elipsaste oblike. Pri evtektični temperaturi je nastal fino izoblikovan acikularni vlaknat evtektik.



Slika 3: Mikrostruktura zlitine AlSi7 pri $T = 615^{\circ}\text{C}$, $f_s = 12,5\%$, $v_{\text{meš}} = 400 \text{ min}^{-1}$ (a) izotermno mešanje: $t_{\text{meš}} = 30 \text{ min}$, gašenje v vodi; (b) izotermno mešanje: $t_{\text{meš}} = 30 \text{ min}$, hlajenje počasi do sobne temp.; (c) izotermno mešanje: $t_{\text{meš}} = 60 \text{ min}$, gašenje v vodi
Figure 3: Microstructure of the AlSi7 alloy at $T = 615^{\circ}\text{C}$, $f_s = 12,5\%$, $v_{\text{stir}} = 400 \text{ r.p.m.}$ (a) isothermally sheared for 30 min, water quenched; (b) isothermally sheared for 30 min, slow cooled; (c) isothermally sheared for 60 min, water quenched

Vzorec, odvzet pri $T = 605^{\circ}\text{C}$

Zlitino AlSi7 smo med mešanjem s $T = 640^{\circ}\text{C}$ ohlajali s hitrostjo 2°C/min na $T = 615^{\circ}\text{C}$, kjer smo jo izotermno mešali 30 minut. Med mešanjem smo jo kontinuirno ohlajali z enako ohlajevalno hitrostjo do 605°C ter jo izotermno mešali še nadaljnjih 30 minut in gasili v vodi. Mikrostruktura vzorca je sestavljena iz globulitov primarne faze α_{Al} in drobno izoblikovanega acikularnega evtektika. Globuliti so velikostnega razreda $50 \mu\text{m}$ in so dvakrat večji od globulitov vzorca, ki smo ga odvzeli pri $T = 615^{\circ}\text{C}$. Zaradi izotermnega mešanja in razvoja globulitne mikrostrukture že pri $T = 615^{\circ}\text{C}$ ter počasnega ohlajanja do $T = 605^{\circ}\text{C}$ je bilo v mikrostrukturi opaziti začetek procesa sferoidizacije globulitov. Velikost globulitov je bila zato večja. Hitrost mešanja 400 min^{-1} je bila pri $T = 605^{\circ}\text{C}$ (z deležem trdne faze $\sim 30\%$) premajhna, da bi strižne sile zadostno lomile sekundarne dendritne veje in preprečile sferoidizacijo dendritov (slika 4).

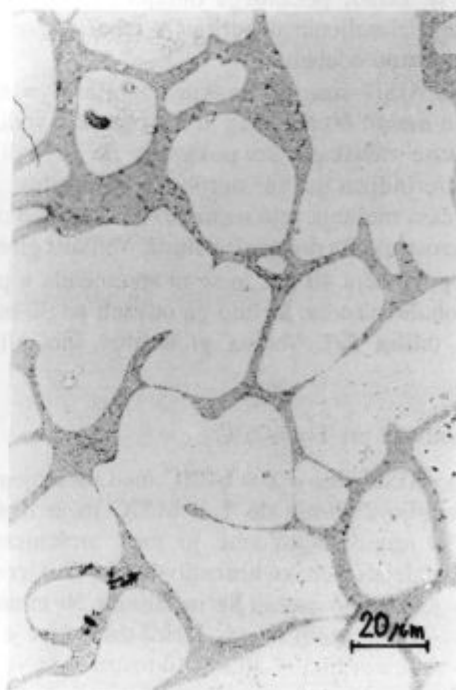
3.2 Mešanje z vrtilno hitrostjo 200 min^{-1}

Vzorci, odvzeti pri $T = 615^{\circ}\text{C}$

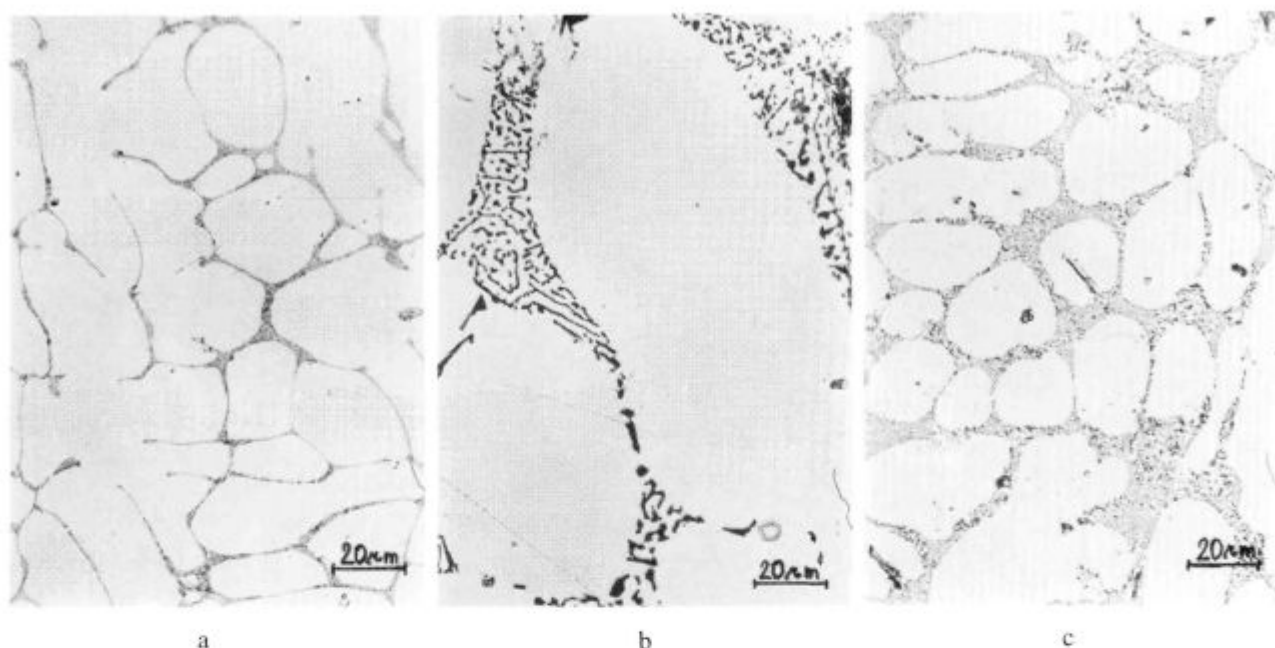
Mikrostruktura zlitine AlSi7, ki smo jo med mešanjem ohlajali s hitrostjo 2°C/min s $T = 640^{\circ}\text{C}$ do $T = 615^{\circ}\text{C}$ in jo nato izotermno mešali še 30 minut ter gasili v vodi, je grobo izoblikovana. Rozete primarne faze α_{Al} so velikostnega razreda $40 \mu\text{m}$ (slika 5a). Hitrost mešanja je bila premajhna, da bi strižne sile povzročile zlom sekundarnih dendritnih vej v takšni meri, kot pri zlitini, ki smo jo mešali s hitrostjo 400 min^{-1} . Pri opazovanju mikrostrukture je vidna sferoidizacija dendritov

v smislu združitve vrhov skupaj rastočih sekundarnih vej dendritov.

Istočasno smo odvzeli še en vzorec in ga počasi ohlajali na zraku s $T = 615^{\circ}\text{C}$ do sobne temperature. Mikro-



Slika 4: Mikrostruktura zlitine AlSi7 pri $T = 605^{\circ}\text{C}$, $f_s = 30,7\%$, $v_{\text{meš}} = 400 \text{ min}^{-1}$, izotermno mešanje: $t_{\text{meš}} = 30 \text{ min}$, gašenje v vodi
Figure 4: Microstructure of the AlSi7 alloy at $T = 605^{\circ}\text{C}$, $f_s = 30,7\%$, $v_{\text{stir}} = 400 \text{ r.p.m.}$ isothermally sheared for 30 min, water quenched



Slika 5: Mikrostruktura zlitine AlSi7 pri $T = 615^{\circ}\text{C}$, $f_s = 12,5\%$, $v_{\text{mes}} = 200 \text{ min}^{-1}$ (a) izotermno mešanje: $t_{\text{meš}} = 30 \text{ min}$, gašenje v vodi; (b) izotermno mešanje: $t_{\text{meš}} = 30 \text{ min}$, hlajenje počasi do sobne temp.; (c) izotermno mešanje: $t_{\text{meš}} = 60 \text{ min}$, gašenje v vodi

Figure 5: Microstructure of the AlSi7 alloy at $T = 615^{\circ}\text{C}$, $f_s = 12,5\%$, $v_{\text{stir}} = 200 \text{ r.p.m.}$ (a) isothermally sheared for 30 min, water quenched; (b) isothermally sheared for 30 min, slow cooled; (c) isothermally sheared for 60 min, water quenched

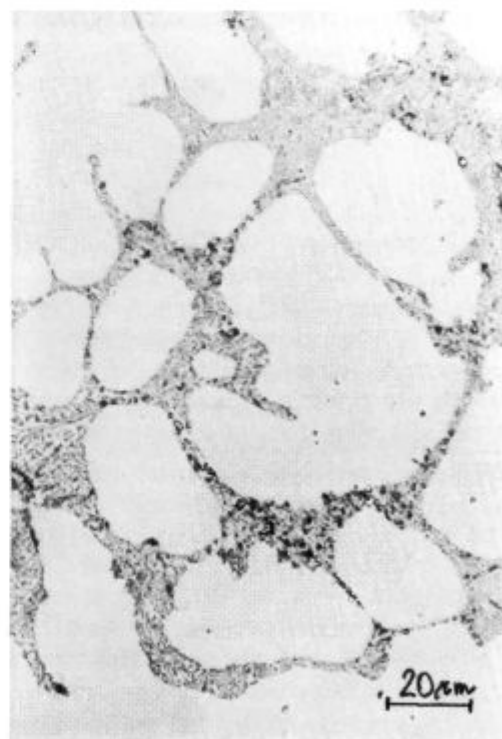
struktura tega vzorca je zelo grobo izoblikovana. Rozete in delno izoblikovani globuliti primarne faze α_{Al} so velikostnega razreda preko $200 \mu\text{m}$ (slika 5b). Globuliti primarne faze α_{Al} so tako veliki zaradi majhne hitrosti mešanja in zaradi počasnega ohlajevanja, kajti daljše zadrževanje zlomljenih dendritov v talini je povzročilo njihovo dodatno odebelitev.

Zlitino AlSi7 smo pri enakih pogojih ($T = 615^{\circ}\text{C}$) izotermno mešali 60 minut in jo nato gasili v vodi. Mikrostrukturalne raziskave so pokazale, da je tudi tukaj proces sferoidizacije in ogrobitve dendritov zaradi daljšega časa mešanja zelo napredoval. Zato smo opazili, da je mikrostruktura dokaj globulitna. Velikost globulitov α_{Al} je v povprečju $40 \mu\text{m}$ in se ni spremenila v primerjavi z globuliti vzorca, ki smo ga odvzeli po 30 minutah mešanja (slika 5c). Večina globulitov ima elipsasto obliko.

Vzorec, odvzet pri $T = 605^{\circ}\text{C}$

Zlitino AlSi7 smo s $T = 640^{\circ}\text{C}$ med mešanjem ohlajali s hitrostjo $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ do $T = 615^{\circ}\text{C}$ in jo izotermno mešali 30 minut. Nato smo jo med mešanjem kontinuirno ohlajali z enako hitrostjo do 605°C , kjer smo jo ponovno izotermno mešali še nadaljnjih 30 minut. Odvzeti vzorec smo gasili v vodi. Delež trdne faze je bil pri tej temperaturi približno 30%. Mikrostruktura vzorca je sestavljena iz globulitov primarne faze α_{Al} in fino izoblikovanega acikularnega vlaknatega eutektika. Globuliti α_{Al} so večji od globulitov vzorca, ki smo ga odvzeli pri 615°C , in so velikostnega razreda $80 \mu\text{m}$. Majhna hitrost

mešanja je omogočala skepljanje zlomljenih dendritov, mikrostruktura je grobo izoblikovana (slika 6).



Slika 6: Mikrostruktura zlitine AlSi7 pri $T = 605^{\circ}\text{C}$, $f_s = 30,7\%$, $v_{\text{mes}} = 200 \text{ min}^{-1}$ izotermno mešanje: $t_{\text{meš}} = 30 \text{ min}$, gašenje v vodi

Figure 6: Microstructure of the AlSi7 alloy at $T = 605^{\circ}\text{C}$, $f_s = 30,7\%$, $v_{\text{stir}} = 200 \text{ r.p.m.}$ isothermally sheared for 30 min, water quenched

4 Sklepi

Pri raziskavi mikrostrukture AlSi7, izdelane po postopku thixocasting, smo ugotovili, da je globulitna mikrostruktura α_{Al} primarnih zmesnih kristalov močno odvisna od hitrosti mešanja. Hitrost mešanja 400 min^{-1} je pri $T = 615^\circ\text{C}$ dovolj velika, da strižne sile povzročijo lomljenje sekundarnih dendritnih vej in razbijanje primarnih dendritov ter omogočijo nastanek globulitne mikrostrukture. Z manjšo hitrostjo mešanja, kot je 400 min^{-1} , ne moremo dobiti fino izoblikovane mikrostrukture.

Za razvoj globulitne mikrostrukture pa je pomemben tudi čas mešanja pri določeni temperaturi. Ugotovili smo, da z izotermnim mešanjem 60 minut dobimo dokaj homogeno in enakomerno globulitno mikrostrukturo, ki je nujno potrebna pri izdelavi tiksotropnih predmaterialov.

Za dosego drobno izoblikovane mikrostrukture pa je pomembna tudi hitrost ohlajevanja s temperature dvofaznega področja do sobne. Z veliko hitrostjo ohlajevanja

(npr. gašenje v vodi) ohranimo globulitno mikrostrukturo, ki nam kaže stopnjo razvoja globulitov, hkrati pa dobimo tudi dokaj drobno izoblikovano mikrostrukturo, saj procesi rasti zlomljenih dendritov ne morejo poteči.

Pomembna pa je tudi temperatura v dvofaznem področju. Pri nižji temperaturi moramo zagotoviti višjo hitrost mešanja zaradi večjega deleža trdne faze. S tem preprečimo sferoidizacijo dendritov in nastanek grobo izoblikovane mikrostrukture.

5 Literatura

- ¹ Hirth G., Wituski T., Kopp R., Bremer R., Tietman A.: Thixoforming: Welche Möglichkeiten bietet die Formgebung im solidus/liquidus Intervall; *EFU-Mitteilungen*, 1994, 1
- ² Flemings Merton C.: Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State; *Metallurgical Transactions B*, 22B, 1991, june
- ³ Johann Högerl, Hans M. Tensi: Metalurške metode za izboljšanje lastnosti modificiranih visokotrdnostnih zlitin Al-Si; *Zbornik referatov 37. livarskega strokovnega posvetovanja*, Portorož 1996, 199-216