

## EVOLUCIJA GLOBULARNE MIKROSTRUKTURE PRI POSTOPKU RHEO-LIGHT

### EVOLUTION OF GLOBULAR MICROSTRUCTURE AT THE RHEO-LIGHT PROCESS

Matjaž Torkar, Matjaž Godec

Inštitut za kovinske materiale in tehnologije, Lepi pot 11, 1000 Ljubljana, Slovenija  
matjaz.torkar@imt.si

Prejem rokopisa – received: 2005-09-29; sprejem za objavo – accepted for publication: 2005-11-29

Razvoj mikrostrukture pri postopku rheo-light temelji na dejstvu, da najprej hitro ohlajanje taline zagotovi veliko število kali, počasno ohlajanje v nadaljevanju pa omogoči rast globulitnih kristalov primarne faze in prepreči nastanek dendritne mikrostrjevalne strukture. Preoblikovanje materiala se izvaja ob prisotnosti od 20 % do 30 % taline (evtektika), kar omogoča dobro polnjenje orodja tudi kompliciranih oblik. Prikazana so izhodišča za zagotavljanje globulitne mikrostrukture in značilna mikrostruktura komponente, izdelane po postopku rheo-light.

Ključne besede: testasto stanje, globuliti, dendriti, kali, postopek rheo-light

Evolution of the microstructure at the Rheo-light process bases on fact that rapid cooling of the melt enables formation of numerous nucleus in the melt and further slower cooling rate enables the growth of globulitic primary phase and prevents the formation of dendritic microstructure. Hot working of material starts at presence of 20 % to 30 % of liquid eutectic phase that enables good filling of the tool cavity. Presented are conditions for formation of globulitic microstructure and typical microstructure of the component, processed by rheo-light process.

Key words: semi solid state, globulites, dendrites, nuclei, rheo-light process

#### 1 UVOD

Med ocenjevanjem mikrostrukture komponent, izdelanih po postopku rheo-light, so bile opažene na globularnih zrnih  $\alpha_{Al}$  izbokline, ki se lahko razvijejo v dendrite. Razlago za ta pojav je treba poiskati v teoriji strjevanja.

Zlitine z dendritno mikrostrukuro v dvofaznem območju niso primerne za postopek rheo-light, ker material, strjen v obliki dendritov, nima izotropnih lastnosti. Šele ugotovitev Fleminga, da se material z globulitno mikrostrukuro v dvofaznem področju ( $L + \alpha$ ) vede tikotropno, je omogočila razvoj preoblikovanja v testastem stanju<sup>1-6</sup>, kot sta postopka thixocasting in new rheo-light (NRC). Preoblikovanje kovin v testastem stanju temelji na pripravi surovcev, v katerih je primarna faza v bolj ali manj okrogli (globulitni) obliki.

Prosta Gibbsova molarna energija sistema je predstavljena z:

$$\Delta G_{\gamma} = 2 \gamma / R \quad (1)$$

kjer je  $R$  polmer ukrivljene medfazne meje in  $\gamma$  medfazna prosta energija za površino strjeno/staljeno. Očitna je enakost s klasično teorijo nukleacije, kjer je prosta energija, potrebna za nastanek kali s kritičnim polmerom  $R^*$ , enaka

$$\Delta G_{\gamma} = 2 \gamma / R^* \quad (2)$$

V primeru ravnotežja med fazami trdno/talina in zaradi vpliva ukrivljenosti trdne faze po Gibbs-Thom-

sonu velja, da je  $\Delta G_L$  enaka  $\Delta G_{\gamma}$ . Z upoštevanjem tega ravnotežja in s predpostavko, da je specifična površinska energija strjene faze izotropna, iz obeh izrazov za  $\Delta G_L$  in  $\Delta G_{\gamma}$  izhaja, da je prosta energija sorazmerna znižanju temperature:

$$\Delta T_R = \frac{2\gamma}{\Delta S} \frac{1}{R} \quad (3)$$

kjer je  $\Delta S$  razlika entropije trdno/talina,  $R$  je polmer ukrivljene medfazne površine in  $\gamma$  prosta energija površine trdno/talina. Okrogle kali so stabilne, dokler je  $R > R^*$ , in se raztalijo, ko je  $R < R^*$ .

V začetku rasti so majhne stabilne kali z  $R > R^*$  in mogoči so le izrastki z zelo majhnim polmerom  $r < R^*$ . V primeru da je  $\Delta T_R > |\Delta T_L + \Delta T_C|$  se izrastki raztalijo.  $\Delta T_R$  je delež podhladitve zaradi ukrivljenosti izrastka,  $\Delta T_L$  je podhladitv zaradi lokalne temperature taline in  $\Delta T_C$  je prispevek konstitucijske podhladitve zaradi sestave taline. Tako lahko rastejo nedendritni globuliti, vse dokler je  $\Delta T_R$  dovolj visok. Ko strjene globule postajajo vse večje, se lahko razvijejo izrastki z večjim polmerom, in taki izrastki se lahko razvijejo naprej v dendrite.

Ko primarna faza nadalje raste v testastem območju (mešanica strjeno–talina), pomembnost prispevka  $|\Delta T_L + \Delta T_C|$  narašča. Za nadaljnjo rast globulitov morata biti ta dva prispevka zmanjšana na minimum. To je mogoče doseči na dva načina: s prisilnim premešavanjem taline ali pa s počasnim ohlajanjem.

Pri postopku NRC se uporablja počasno ohlajanje med rastjo primarne faze v predobliki. Zaradi vpliva premešavanja in difuzije pri majhnih hitrostih ohlajanja je razporeditev strjene faze v talini blizu stika strjeno/staljeno bolj enakomerna kot razporeditev strjene faze v hitro ohlajani talini. To vodi do manjše konstitucijske podhladitve  $\Delta T_C$ . Pri nizki  $\Delta T_C$  vpliva Gibbs-Thompsonov učinek na povečanje stabilnosti medfazne ploskve. Torej, majhna hitrost ohlajanja pospešuje rast globulitov<sup>7,8</sup>.

Celično in dendritno strjevanje je posledica pojava konstitucijske podhladitve, kar pomeni, da ima talina pred strjevalno fronto nižjo temperaturo od temperature ravnotežnega strjevanja.

Za zeleno globulitno mikrostrukturo je treba najprej zagotoviti veliko število majhnih kali in nato talino naprej ohlajati počasi.

V primerjavi s postopkom thixocasting ima postopek NRC<sup>9</sup> nekaj dodatnih prednosti: kontinuirno litje z elektromagnetnim premešavanjem ni potrebno, ni rezanja gredic in ni ogrevanja surovcev v testasto področje pred vročo predelavo. Postopek rheo-light se prične s staljeno fazo in pripravo surovca, ki se ga neposredno prenese v orodje za oblikovanje komponente.

Glavni namen te preiskave je bila ocena mikrostrukture realne komponente, izdelane po postopku NRC.

## 2 EKSPERIMENTALNO DELO

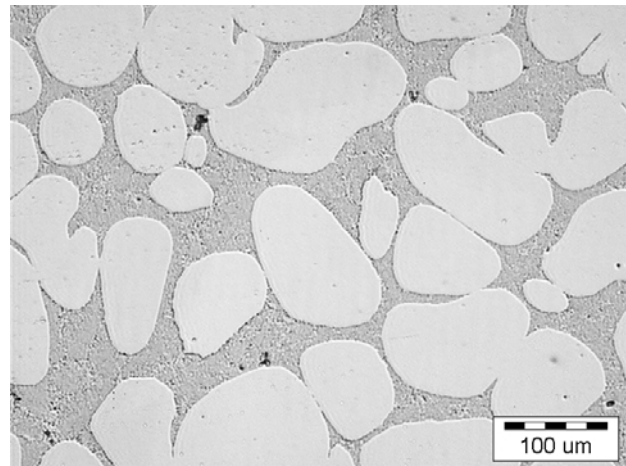
Preiskana je bila mikrostruktura surovca in komponente, oboje iz hipoevtektičnega silumina A 357. Značilna sestava je prikazana v tabeli 1. Surovec je bil prerezan v testastem stanju. Komponenta je bila toplotno obdelana (T5, 6 h na 170 °C, s trdoto HB 5/250 = 92–96).

Vzorci za metalografsko preiskavo so bili odrezani iz surovca in iz komponente ter pripravljene po običajnem postopku priprave metalografskih obruskov.

Metalografske preiskave mikrostrukture so bile izvršene s svetlobnim mikroskopom Nikon Microphot FXA, opremljenim z 3CCD-videokamero Hitachi HV-C20A, in programsko opremo analySIS za analizo metalografskih slik. Trdota je bila izmerjena po Brinellu.

## 3 REZULTATI IN DISKUSIJA

Mikrostruktura na sredini surovca je prikazana na sliki 1. Opazi se globulite primarne faze  $\alpha_{Al}$ , med kate-



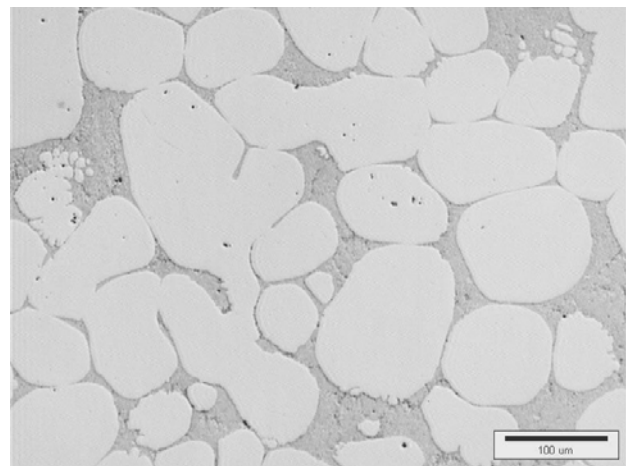
Slika 1: Mikrostruktura surovca

Figure 1: Microstructure of the slurry

rimi je enakomerno razporejen evtektik. Drugih posebnosti v mikrostrukturi surovca ni bilo opaziti.

Podobna je tudi mikrostruktura komponente. Srednji del sestoji iz globulitov primarne faze  $\alpha_{Al}$  med katerimi je enakomerno razporejen evtektik (slika 2). Poleg tega se, predvsem v tankih delih komponente, opazi izrastke, podobne prstom (pričetek rasti dendritov), ki štrlijo s površine globulitov (slika 3).

Obstajata dve možnosti za pojav teh izrastkov. Prva je lokalna sprememba zaradi podhladitve, med deformacijo v orodju, kar omogoča nastanek dendritov. Druga možnost pa je nedokončana globularizacija med strjevanjem surovca. Bolj verjetna je razlaga z lokalno spremembo podhladitve in njen vpliv na razporeditev



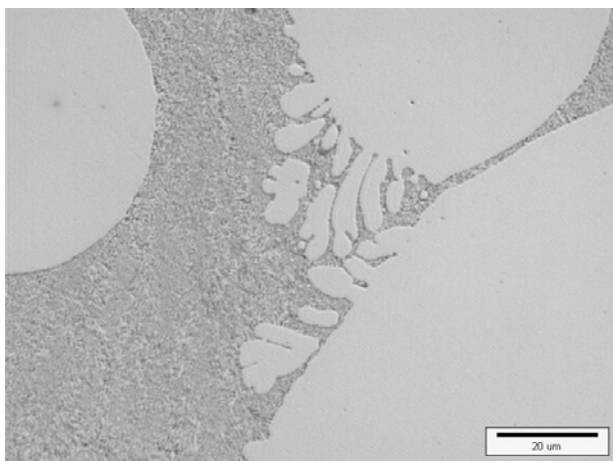
Slika 2: Mikrostruktura komponente

Figure 2: Microstructure of the component

Tabela 1: Tolerance kemične sestave zlitine A357

Table 1: Tolerances of chemical composition of A 357 alloy

Zlitina	Cu w/%	Mg w/%	Si w/%	Fe w/%	Mn w/%	Ti w/%	Zn w/%	Sr w/%	Al w/%
A 357	0,2	0,4–0,7	6,5–7,5	Maks. 0,2	Maks. 0,2	0,05–0,2	Maks. 0,2	0,03	Ostanek



**Slika 3:** Izrastki na površini globulitnih zrn primarne faze  $\alpha_{Al}$  v komponenti

**Figure 3:** Protuberances on globulitic grains of primary  $\alpha_{Al}$  phase in component

strjene faze med procesom deformacije v orodju. Poznano je namreč, da večja podhladitev in delitev strjene faze pospešujeta nastanek dendritov. Drugo možnost ovržemo tudi na podlagi mikrostrukture surovca (slika 1), kjer ni opaziti izrastkov, poleg tega pa se surovec strjuje v bolj kontroliranih temperaturnih razmerah.

Razlago za pojav izrastkov in dendritov, ki se jih opazi v mikrostrukturi komponente, se lahko dobi tudi v teoriji strjevanja. Dokler je prispevek  $\Delta T_R$  k podhladitvi dovolj velik, je površina rastoče krali stabilna in se nadaljuje rast globula. Strjeni globul postaja vedno večji in obstaja vedno večja verjetnost, da se razvije izrastek z večjim polmerom, ki lahko degenerira v dendrit.

Poleg tega študije<sup>7</sup> profilov koncentracije topljenca v talini med nastajanjem primarne faze pri različnih hitrostih ohlajanja kažejo, da se pri velikih hitrostih ohlajanja topljenec hitro obogati v talini blizu površine S/L površine zaradi razdelitve raztopine na mejni ploskvi in kratkega razpoložljivega časa za difuzijo topljenca. Stabilnost mejne ploskve se hitro poruši, kar omogoča pojav izrastkov in pričetek rasti dendritov na površini primarne faze  $\alpha_{Al}$ .

Nižja temperatura litja, kombinirana z manjšo hitrostjo ohlajanja, pospešuje nastanek globularne mikrostrukture. Tudi cepljenje taline pospešuje nastanek globulitne strukture.

Mikrostruktura komponente pokaže poleg globulitov tudi nekaj dendritov primarne faze, kar pomeni, da temperaturni režim procesa NRC še ni bil optimalen.

## 4 SKLEPI

Mikrostruktura surovca kaže dobro homogenost in enakomerno velikost primarno strjenih globulitnih zrn.

V komponenti se opazi več nepravilnosti v mikrostrukturi v primerjavi z mikrostrukturo surovca.

Pojav dendritov in izrastkov na globulitih iz primarne faze  $\alpha_{Al}$  je posledica lokalne spremembe v podhladitvi med deformacijo materiala v testastem stanju v orodju.

Izoblikovanje primarne faze  $\alpha_{Al}$  v obliki globulitov in dendritov v komponenti kaže, da temperaturni režim procesa NRC še ni optimalen.

## ZAHVALA

Avtorja se zahvaljujeva EU za financiranje projekta GIRD-CT-2002-03012 iz 5. okvirnega programa.

## 5 LITERATURA

- <sup>1</sup> Giordano P., Chiarmetta G. L., Thixo and Rheo Casting: Comparison on a High Production Volume Component, Proceedings of the 7th S2P Advanced Semi-solid Processing of Alloys and Composites, ed. Tsutsui, Kiuchi, Ichikawa, Tsukuba, Japan, (2002), 665–670
- <sup>2</sup> Müller-Späth H., Sahm P. R., Razvojni dosežki na področju Thixocasting postopka na livarskem inštitutu RWTH Aachen, Livarski vestnik, 44 (1997) 2, 33–42
- <sup>3</sup> Wabusseg H., Kaufmann H., Wahlen A., Uggowitzer P. J., Theoretische Grundlagen und praktische Umsetzung von New Rheocasting von Al-Legierungen, Druckguss-Praxis, 1 (2002), 16–19
- <sup>4</sup> Kaufmann H., Uggowitzer P. J., The Fundamentals of the New Rheocasting – Process for Magnesium Alloys, Advanced Engineering Materials, 3 (2001) 12, 963–967
- <sup>5</sup> Hall K., Kaufmann H., Mundl A., Detailed Processing and Cost Consideration for New Rheocasting of Light Metal Alloys, Proceedings 6th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, ed. G. L. Chiarmetta, M. Rosso, Torino, (2000), 23–28
- <sup>6</sup> Blazek K. E., Kelly J. E., Pottore N. S., The Development of a Continuous Rheocaster for Ferrous and High Melting Point Alloys, ISIJ Intern., 35 (1995) 6, 813–818
- <sup>7</sup> Zhu M. F., Kim J. M., Hong C. P., Modeling of Globular and Dendritic Structure Evolution in Solidification of an Al–7mass %Si Alloy, ISIJ Intern., 41 (2001) 9, 992–998
- <sup>8</sup> Uggowitzer P. J., Kaufmann H., Evolution of Globular Microstructure in New Rheocasting and Super Rheocasting Semi-Solid Slurries, Steel research Int. 75 (2004) 8/9, 525–530
- <sup>9</sup> Torkar M., Breskvar B., Preiskave komponent za avtomobilsko industrijo, Mater. tehnol. 36 (2002) 6, 407–410