بررسی اثر دمای قالب و عملیات گرمایش مجدد بر ریزساختار آلیاژ آلومینیم A360 در فرآیند شکل‌دهی نیمه‌جامد

سلمان نوروزی*، محمد مهدی کیخا

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل

تاریخ ثبت اولیه:۱۳۸۸/۵/۸، **تاریخ دریافت نسخهٔ اصلاح‌شده:**۱۳۸۸/۹/۲، **تاریخ پذیرش قطعی:**۱۳۸۹/۳/۱۵

چکیده یکی از جدیدترین تکنولوژهای ریز کردن دانه‌ها، فرآیند شکل‌دهی فلزی نیمه‌جامد می‌باشد که در صنایع مختلف مورد توجه زیادی قرار گرفته است. روش ریخته‌گری سطح شیب‌دار مبتنی بر این فرآیند است که در آن از طریق ریختن مذاب روی سطح شیب‌دار خنک شونده به منظور ریز و کروی شدن ریزساختار استفاده می‌شود. پارامترهای زیادی همانند مشخصه‌های سطح شیب‌دار، دمای قالب و عملیات حرارتی بعدی روی ریزساختار و خواص مکانیکی قطعه تولیدی در این روش تأثیر گذارند. در این تحقیق تأثیر دمای قالب فلزی و عملیات گرمایش مجدد روی ریزساختار و مقدار سختی آلیاژ آلومینیم A360 مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی‌های به عمل آمده مشخص کرد که نمونه تهیه شده با ویژگی‌های مناسب سطح شیب‌دار و دمای قالب ۳۰۰°C از شرایط مطلوب‌تری برخوردار است. در ادامه تعدادی نمونه با شرایط مطلوب در دمای ۵۸۰°C برای مدت زمان‌های ۵ و ۱۰ و ۱۵ دقیقه گرمایش مجدد داده شده و بلافاصله در آب سرد شدند. نتایج نشان می‌دهد نمونه‌ای که به مدت ۱۰ دقیقه در دمای ۵۸۰°C قرار گرفته بود از نظر اندازه، توزیع و شکل ذرات دارای خواص مطلوب‌تری است به‌طوری‌که در این حالت مقدار سختی از ۸۰/۶ HB به ۸۷/۱ HB افزایش می‌یابد. علت این امر را می‌توان ناشی از اصلاح فازهای یوتکتیکی از نظر شکل، اندازه و توزیع یکنواخت‌تر آن دانست.

کلمات کلیدی شکل‌دهی نیمه‌جامد، سطح شیب‌دار خنک شونده، فازهای یوتکتیکی، آلیاژ آلومینیم A360.

Investigation on effect of die temperature and reheating treatment on microstructure of A360 aluminium alloy semi-solid forming

S. Nourouzi*, M. M. Kykha

Mechanical Engineering Department, Babol University, Babol, Iran

Abstract One of the newest technologies of grain refining is semi-solid metal process that noted in different industrials. In cooling slope casting method indicated of semi-solid method has been used in order of microstructure refining and spheroidizing by pouring molten on cooling slope. Some parameters such as cooling slop characteristics die temperature and next heat treatment on microstructure and mechanical properties of produced work piece effect on this method. In this present the effect of die temperature and heat treatment have been investigated on microstructure and A360 aluminum alloy hardness. After sample providing the sample with suitable cooling slop characteristics, investigations recognized that sample has suitable condition by 300°C die temperature. Then some samples with suitable condition reheated in 580°C for 5,10 and 15 min, then immediately quenched in 25°C water. Results indicate that the sample in 580°C has better properties in order of size, and grain shape, by the way that in this condition, the amount of hardness increase of 80.6 HB to 87.1HB, because of optimizing eutectic phases from the point of shape, size and monotonous dispense.

Keywords Semi-solid forming, Cooling slope, Eutectic phases, A360 aluminum alloy.

*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل، بابل.

تلفن: ۳۲۳۴۲۰۵-۰۱۱۱، **دورنگار:** ۳۲۱۲۲۶۸-۰۱۱۱، **پیام‌نگار:** S-nourouzi@nit.ac.ir.

۱– مقدمه

تحقیقات زیادی در زمینه شکل‌دهی نیمه‌جامد آلیاژهای مختلف انجام می‌شود. عمده این پژوهش‌ها بر روی آلیاژهای با نقطه ذوب پایین همانند آلیاژ آلومینیم متمرکز شده‌اند. از مزیت‌های این فرآیند می‌توان به کاهش مصرف انرژی، کاهش انقباض حین انجماد و افزایش خواص مکانیکی نسبت به حالت ریخته‌گری معمولی اشاره کرد. از روش‌های ایجاد ساختار کروی در حالت نیمه‌جامد می‌توان، هم‌زدن مکانیکی، تلاطم الکترومغناطیسی و سطح شیب‌دار را نام برد [۳–۱].

روش سطح شیب‌دار یکی از روش‌های جدید شکل‌دهی نیمه‌جامد می‌باشد که به دلیل برخورداری از تکنولوژی ساده به خصوص در ریخته‌گری مداوم مورد توجه می‌باشد. در این روش مذاب با فوق گداز مناسب از روی یک سطح شیب‌دار خنک شونده به داخل یک قالب هدایت می‌شود. در اثر تماس مذاب با سطح شیب‌دار و انتقال حرارت زیاد، جوانه‌های جامد تشکیل می‌شود که این جوانه‌ها به دلیل تلاطم جریان مذاب و اعمال تنش برشی، از سطح جدا شده و داخل مذاب توزیع می‌شوند [۴و۵]. در این روش پارامترهای مختلفی همچون میزان فوق گداز، طول سطح شیب‌دار، زاویه سطح شیب‌دار، جنس سطح و دمای مذاب، دمای قالب و گرمایش مجدد می‌تواند بر مورفولوژی ریزساختار نهایی موثر باشد. در پژوهشی که توسط هاگا و همکارانش [۶] بر آلیاژهای ریختگی آلومینیم برای تهیه قطعات تیکسوفرم به روش سطح شیب‌دار خنک شونده صورت گرفت، اعلام کردند که از فاکتورهای بسیار مهم بر ریز دانگی، نرخ خنک‌کنندگی سطح شیب‌دار و مدت زمان گرمایش مجدد در دمای نگهداری در برد انجماد است. همچنین بیرول [۷] در تحقیق بر روی آلیاژ آلومینیم A357، به بررسی اثر عوامل مختلف همچون طول سطح شیب‌دار خنک شونده، دمای بار ریزی و عملیات گرمایش مجدد پرداخته است و به این نتیجه رسید که با افزایش دمای بار ریزی طول سطح شیب‌دار خنک شونده نیز بایستی افزایش یابد. همچنین با گرمایش مجدد قطعه در دمای ۵۸۰ ºC برای مدت ۵ min دقیقه باعث کروی شدن فاز اولیه می‌گردد. همچنین در پژوهش‌های جداگانه‌ای که توسط کجانگ و گارات [۸و۹] بر روی آلیاژهای آلومینیم در حالت نیمه‌جامد صورت گرفت به این نتایج رسیدند که شرایط گرمایش مجدد مانند دما و زمان نگهداری، جهت دست‌یابی به ساختار دانه ریز و یکنواخت بسیار حائز اهمیت می‌باشد. مرادیان و همکاران [۱۰] بیان کردند که با گرمایش مجدد آلیاژ آلومینیم A357 تهیه شده به روش سطح شیب‌دار در دمای ºC ۵۸۰ و به مدت ۵ min، ساختار کروی و افزایش استحکام کشش نهایی از ۱۶۵MPa به ۲۲۵ MPa حاصل می‌گردد.

در این تحقیق به بررسی تأثیر دمای قالب و عملیات گرمایش مجدد بر قطعه تولیدی از آلیاژ آلومینیم A360 به روش سطح شیب‌دار خنک شونده پرداخته شده است.

۲– نحوهٔ انجام آزمایش

۲–۱– مواد اولیه و روش آزمایش

در این تحقیق آلیاژ آلومینیم A360 مورد استفاده قرارگرفته است که ترکیب شیمیایی آن در جدول ۱ آمده است. شرایط انجام آزمایش‌ها در جدول ۲ درج شده است. پس از ذوب شدن کامل آلیاژ در دمای ºC ۵۹۶ و افزایش دمای آن به دمای ºC ۶۳۰ به آرامی بر روی سطح شیب‌دار خنک شونده ریخته شد. مذاب پس از جاری شدن بر روی سطح شیب‌دار در انتهای آن به حالت نیمه‌جامد تبدیل شده و به داخل قالب فلزی هدایت شد. انجماد کامل آلیاژ پس از پر شدن قالب،

صورت گرفت.

جدول ۱. درصد عناصر تشکیل دهنده آلیاژ آلومینیم A360.

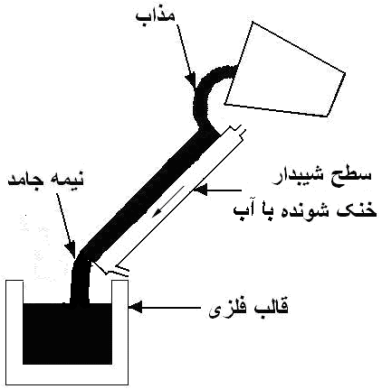
عنصر آلیاژی	Si	Cu	Mg	Zn	Fe	Al
درصد وزنی	۹/۰	۰/۲۹	۰/۲۹	۰/۱۱	۰/۴۲	بقیه

جدول ۲. شرایط انجام آزمایش‌ها.

دمای بار ریزی مذاب (ºC)	۶۳۰
دمای قالب (ºC)	۲۵ ،۳۰۰، ۵۸۰
مدت گرمایش مجدد (min)	۵ ،۱۵،۱۰

در زیر سطح شیب‌دار محفظه‌ای تعبیه شده که دارای مجاری ورودی و خروجی آب به منظور خنک نگه‌داشتن سطح در نظر گرفته شده است. سطح شیب‌دار از تسمه مسی به ضخامت ۱۰ mm، طول ۴۰۰ mm و زاویهٔ 60° تشکیل شد. لازم به توضیح است که طول و زاویه مناسب سطح شیب‌دار در تحقیقات قبلی به‌دست آمده بود. این مجموعه به طور شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است. روی سطح شیب‌دار خنک شونده با لایه‌ای نازک از اکسید زیرکونیم به جهت نچسبیدن مذاب و تسهیل در جریان مذاب و جلوگیری از ایجاد اغتشاش در جریان مذاب پوشش داده شده است. قالب استوانه فولادی با قطر داخلی ۷۰ mm و ارتفاع ۱۵۰ mm با دماهای ۲۵ ºC، ۳۰۰ ºC و ۵۸۰ ºC در نظر گرفته شد.

پس از سرد شدن قطعات استوانه‌ای، نمونه‌هایی به شکل دیسک از مرکز آن‌ها جهت بررسی ریزساختار و تعیین سختی برنیل و انجام عملیات گرمایش مجدد تهیه شد. سپس سه نمونه برای گرمایش مجدد در دمای ۵۸۰ ºC برای مدت زمان‌های ۵، ۱۰و ۱۵ دقیقه در کوره الکتریکی قرار گرفته و پس از اتمام مدت زمان مورد نظر بلافاصله در آب ۲۵ ºC سرد شدند. نمونه‌ها از نظر ریزساختاری و عدد سختی برنیل مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی‌های میکروسکوپی توسط میکروسکوپ نوری مدل REICHERT-cet 44 66 انجام شد. نمونه‌های متالوگرافی در محلول HF ۰/۵ درصد اچ شدند.



شکل ۱. ریخته‌گری به روش سطح شیب‌دار.

۳- نتایج و بحث

شکل ۲ ریزساختار آلیاژ آلومینیم A360 در حالت ریختگی معمولی در قالب فلزی با دمای بار ریزی ۶۷۰ ºC را نشان می‌دهد. ساختار دندریتی حاصل از ریختگی در این شکل به وضوح قابل رؤیت است. مقدار سختی حاصل از این نمونه ۶۰ HB اندازه گیری شد.

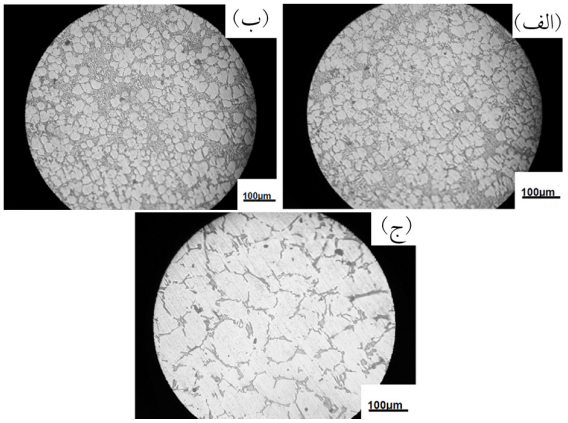
در تحقیقات انجام شده توسط نگارندگان که روی تأثیر دمای بار ریزی بر خواص آلیاژ آلومینیم با استفاده از سطح شیب‌دار صورت گرفت این نتیجه حاصل شد که با بار ریزی در دمای ۶۳۰ ºC ضمن دست‌یابی به ریزساختار غیر دندریتی، خواص مکانیکی مطلوبی نیز حاصل می‌شود به‌طوری‌که در این حالت بالاترین مقدار سختی یعنی ۶۹/۶ HB به‌دست آمد.

۱-۳- دمای قالب

سرعت سرد شدن به‌عنوان یک پارامتر مهم در انجماد قطعات ریختگی همواره مورد توجه است. سرعت‌های انجمادی مختلف باعث تغییر در ریزساختار، اندازه دانه، مورفولوژی فازهای یوتکتیکی، فاصله بین بازوهای دندریتی و فازهای بین فلزی می‌گردد. برای بررسی اثر سرعت سرد کردن بر ریزساختار، نمونه‌هایی با دماهای قالب ºC ۲۵، ºC ۳۰۰ و ºC ۵۸۰ ریخته گری شد.

در شکل ۳ ریزساختار آلیاژ آلومینیم A360 حاصل از ریخته‌گری در روی سطح شیب‌دار با طول mm ۴۰۰، زاویه °۶۰، دمای بار ریزی ºC ۶۳۰ و با دماهای مختلف قالب نشان داده شده است. شکل ۳–الف ریزساختار نمونه با دمای قالب ºC ۲۵ را نشان می‌دهد. به علت شیب حرارتی بالا در این حالت، انجماد سریع مذاب با جوانه‌زنی اولیه روی دیواره قالب شروع شده و به سمت مرکز آن پیش می‌رود، لذا فرصت کافی برای جابجایی ذرات جامد اولیه در داخل مذاب فراهم نبوده بنابراین دارای ساختاری با توزیع تقریباً غیریکنواخت می‌باشد.

با افزایش دمای قالب به ºC ۳۰۰ (شکل ۳–ب) نرخ انجماد مذاب و رشد جوانه‌ها در مقایسه با شکل ۳–الف کاسته شده، لذا امکان جابجایی و انتقال نسبت به حالت قبل فراهم‌تر شده است بنابراین ضمن توزیع مناسب‌تر فاز جامد-α Al اولیه، تجزیه یوتکتیک با سرعت کمتری نیز صورت می‌گیرد. بنابراین آنچه که در این حالت حاصل می‌شود ایجاد دانه‌های ریز هم‌محور آلومینیم ثانویه به همراه توزیع یکنواخت‌تر این فازها می‌باشد. با مقایسه شکل‌های ۳–الف و ۳–ب مشاهده می‌شود که افزایش دمای قالب از ºC ۲۵ به ºC ۳۰۰ تأثیر چندانی روی اندازه فازهای جامد α-Al اولیه ندارد بلکه روی توزیع و مورفولوژی ریزساختار حاصل از واکنش یوتکتیکی اثر قوی‌تر دارد.



شکل۳. ریزساختار آلیاژ آلومینیم A360 تولید شده به کمک سطح شیب‌دار خنک شونده با زاویه °۶۰ و طول mm ۴۰۰، دمای بار ریزی ºC ۶۳۰ و دمای قالب : (الف) ºC ۲۵ ، (ب) ºC ۳۰۰ ، (ج) ºC ۵۸۰.

با توجه به شکل ۳–ج مشاهده می‌شود که دانه‌های آن در مقایسه با دو حالت قبلی درشت‌تر شده است و فازهای حاصل از یوتکتیک به مقدار اندک در بین آن‌ها توزیع شده‌اند. افزایش دمای قالب از ºC ۳۰۰ به ºC ۵۸۰ باعث شده است تا اولاً انجماد فازهای حاصل از یوتکتیک با سرعت بسیار کمتر صورت گیرد. ثانیاً فاز آلومینیم جامد اولیه نیز از طریق پیوستن ذرات جامد دندریتی معلق در مذاب و همچنین ذرات آلومینیم ثانویه به آن درشت‌تر شوند. به بیان دیگر پایین بودن سرعت انجماد شرایط مناسبی را برای استحاله نفوذ فراهم ساخته تا ذرات جامد اولیه به‌عنوان مراکز جوانه زنی ذرات آلومینیم ثانویه و همچنین پیوستن شاخه‌های دندریتی به آن عمل کرده و افزایش اندازه دانه‌ها را به دنبال داشته باشد که این پدیده به سبب کاهش انرژی سیستم از طریق کاهش فصل مشترک ذرات صورت گرفته است.

در جدول ۳ مقادیر سختی نمونه‌های ریخته‌گری شده روی سطح شیب‌دار با دمای قالب مختلف درج شده است. نمونه حاصل از قالب با دمای ºC ۳۰۰، به علت ریزتر شدن و

توزیع یکنواخت‌تر ساختار، مقدار سختی بالاتر یعنی HB ۸۰/۶ نسبت به دو حالت دیگر دارا می‌باشد.

جدول ۳. مقادیر سختی نمونه‌های تهیه شده به روش سطح شیب‌دار در قالب فولادی با دمای مختلف.

دمای قالب (°C)	۵۸۰	۳۰۰	۲۵
سختی (HB)	۷۶/۲	۸۰/۶	۷۷

۲-۳- عملیات گرمایش مجدد

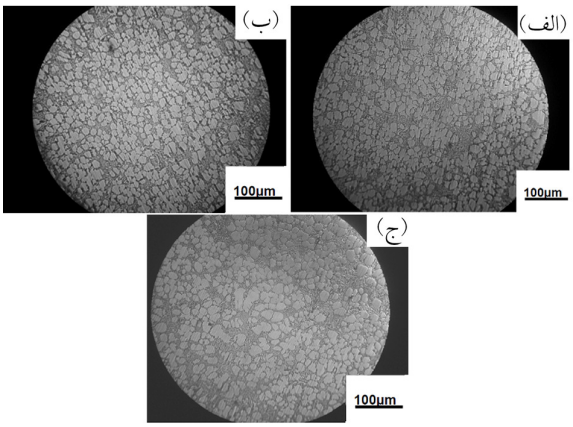
عملیات گرمایش مجدد در محدوده دمایی که شمش قبل از عملیات کار مکانیکی در آن نگه داشته می‌شود (در حالت تیکسوفرم) بسیار مهم می‌باشد. در این حالت باید مقدار مذاب ۳۰–۵۰٪ باشد لذا دمای ۵۸۰ °C برای این منظور مناسب است. عملیات گرمایش مجدد اغلب موجب اصلاح ساختار و توزیع مناسب‌تر فازهای حاصل از یوتکتیک می‌شود. خصوصیات مکانیکی آلیاژهای Al-Si علاوه بر مورفولوژی فاز آلومینیم α-Al توسط مورفولوژی و توزیع فیبرهای سیلیسیم یوتکتیکی نیز کنترل می‌شود بطوریکه ذرات سیلسیم کروی خصوصیات مکانیکی را بهبود می‌بخشد [۱۱]؛ بنابراین برای بهبود ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژهای Al-Si، اصلاح مورفولوژی و توزیع ذرات سیلیسیم ضروری است. لازم به توضیح است که میزان ریز دانگی و چگونگی توزیع فازها به شدت وابسته به دما و زمان نگهداری در گرمایش مجدد است. در عملیات گرمایش مجدد پدیده نفوذ ذرات سیلیسیم به صورت نفوذ در خود و از طریق طی شدن مسیر مرز دانه و بهم پیوستن این ذرات و کاهش انرژی سطحی آن‌ها صورت می‌پذیرد.

شکل ۴ ریزساختارهای نمونه‌های حاصل از عملیات گرمایش مجدد در ۵۸۰ °C برای مدت زمان‌های ۵،۱۰ و ۱۵ دقیقه را نشان می‌دهد. لازم به توضیح است که این نمونه‌ها از قطعات تهیه شده با ریخته‌گری بر روی سطح شیب‌دار خنک شونده با زاویه °۶۰، طول mm ۴۰۰، دمای بار ریزی ۶۳۰ °C و دمای قالب ۳۰۰ °C تهیه شده بودند. با مقایسه شکل ۴–الف با شکل ۳–ب مشاهده می‌شود. ریزساختار حاصل از گرمایش مجدد اندکی توزیع یکنواخت‌تری دارد. در جدول ۵ مقادیر سختی نمونه‌ها حاصل از عملیات گرمایش مجدد در دمای °C ۵۸۰ برای مدت زمان‌های ۵، ۱۰ و ۱۵ دقیقه درج شده است. مقدار سختی اندازه‌گیری شده نمونه با عملیات گرمایش مجدد به مدت min ۵ برابر HB ۸۱/۲ بوده است که در مقایسه با حالت قبل از عملیات گرمایش مجدد که برابر HB ۸۰/۶ بود تغییر اندکی حاصل شده است. افزایش اندک مقدار سختی را می‌توان ناشی از اصلاح توزیع فازهای حاصل از یوتکتیک دانست.

در شکل ۴–ب ریزساختار نمونه حاصل از گرمایش مجدد در دمای ۵۸۰ °C و مدت زمان min ۱۰ نشان داده شده است. این شکل در مقایسه با شکل ۳–ب مشاهده می‌شود که با افزایش زمان نگهداری از min ۵ به min ۱۰ اندازه ذرات آلومینیم α-Al اندکی ریزتر شده‌اند. این امر را می‌توان به کاهش انرژی فصل مشترک بین فازها از طریق ذوب شدن انحنای گوشه‌های تیز ذرات جامد اولیه مربوط کرد. شکل ۵ ریزساختارهای شکل‌های ۴–الف و ۳–ب با بزرگنمایی بالاتر را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود ریزساختار مربوط به شکل ۵–ب از کروی بودن بالاتری نسبت به شکل ۵–الف برخوردار می‌باشد. لازم به توضیح است که اندازه ذرات (مطابق با استدلال بیان شده) در شکل ۵–ب کمی ریزتر و دارای توزیع یکنواخت‌تری نیز می‌باشد.

شکل ۴–ب در مقایسه با شکل ۴–الف از نظر اندازه ذرات شبه کروی تغییر محسوسی مشاهده نمی‌شود ولی در

مورفولوژی و توزیع فازهای حاصل از یوتکتیک تغییر حادث شده است. مقدار سختی HB ۸۷/۱ مربوط به نمونه با زمان گرمایش min ۱۰ در مقایسه با HB ۸۱/۲ حاصل از نمونه با زمان نگهداری min ۵ حاکی از تأثیر زیاد مورفولوژی و توزیع فازهای حاصل از یوتکتیک بر خواص مکانیکی آلیاژ در این حالت می‌باشد. با افزایش زمان نگهداری از min ۵ به min ۱۰ در عملیات گرمایش مجدد به نظر می‌رسد که تجمع ناخالصی‌ها و فازهای یوتکتیکی Si در مرزها افزایش پیدا کرده و مانع حرکت مرزها می‌شوند لذا تحرک آن‌ها کاهش می‌یابد. البته این پدیده در دماهای پایین‌تر بیشتر اتفاق می‌افتد، با افزایش بیشتر زمان نگهداری، تحرک اتم‌ها و نفوذ آن‌ها و نیز میزان تأثیرشان در تحرک مرز دانه‌ها نیز افزایش می‌یابد که این اثر در شکل ۴–ج دیده می‌شود. همان طوری که در این شکل قابل مشاهده است با افزایش زمان عملیات گرمایش مجدد از ۱۰ به ۱۵دقیقه، اندازه دانه‌ها بزرگ‌تر شده است.

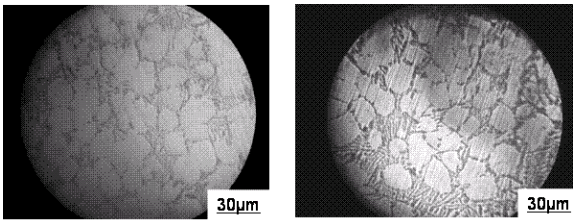


شکل ۴. ریزساختار آلیاژ آلومینیم A360 تولید شده به روش نیمه‌جامد به کمک سطح شیب‌دار خنک شونده با زاویه °۶۰ و طول mm ۴۰۰، دمای بار ریزی ºC ۶۳۰ و دمای قالب ºC ۲۵ زمان نگهداری قطعه در دمای ºC۵۸۰: (الف) min ۵، (ب) min ۱۰، (ج) min ۱۵.

این پدیده ناشی از اتصال ناخالصی‌ها به یکدیگر و ایجاد شبکه‌ای بهم پیوسته می‌باشد. این اثر منجر به مهاجرت مرز دانه‌ها به منظور کاهش انرژی فصل مشترک می‌شود که حاصل آن بزرگ‌تر شدن دانه‌ها و همچنین کاهش مقدار سختی به HB ۸۲/۴ را به دنبال خواهد شد.

جدول ۵. مقادیر سختی نمونه‌های تهیه شده به روش سطح شیب‌دار و انجام گرمایش مجدد در ºC ۵۸۰ و زمان نگهداری مختلف.

زمان نگهداری (min)	۵	۱۰	۱۵
سختی برینل (HB)	۸۱/۲	۸۷/۱	۸۲/۴



ب الف

شکل ۵. ریزساختار آلیاژ آلومینیم A360 تولید شده به کمک سطح شیب‌دار خنک شونده با زاویه °۶۰ و طول mm ۴۰۰، دمای بار ریزی ºC ۶۳۰ و (الف) دمای قالب : ºC ۲۵ بدون عملیات گرمایش مجدد، (ب) دمای قالب: ºC ۲۵ و عملیات گرمایش مجدد در دمای ºC ۵۸۰ با زمان نگهداری: min ۱۰.

۴– نتیجه گیری

طی آزمایش‌ها و بررسی‌های انجام شده در این تحقیق نتایج زیر حاصل شده است:

۱. تهیه نمونه‌ها با استفاده از قالب با دمای محیط به دلیل انجماد سریع مذاب امکان توزیع یکنواخت ریزساختار مهیا نبوده است.

۲. انتقال آلیاژ به داخل قالب فولادی در دمای ºC ۳۰۰ موجب توزیع یکنواخت‌تر ریزساختار و افزایش سختی آن از HB ۷۷ به HB ۸۰/۶ شده است.

۳. افزایش دمای قالب از ۳۰۰ به ºC ۵۸۰ اگر چه شرایط برای یکنواختی بهتر ریزساختار فراهم‌ترشده است ولی

به دلیل امکان نفوذ راحت‌تر اتم‌ها موجب بزرگ‌تر شدن اندازه دانه‌ها شده است که در نهایت موجبات کاهش سختی از HB ۸۰/۶ به HB ۷۶/۲ را به دنبال داشت.

۴. نمونه‌ریزی در قالب با دمای ۳۰۰ ºC و عملیات گرمایش مجدد به مدت ۱۰ min در دمای ۵۸۰ ºC و سپس سرد شدن آن در آب سرد سبب می‌شود تا ضمن اصلاح ریزساختار و مورفولوژی ذرات، خواص مکانیکی نیز بهبود یابد. با اعمال این شرایط سختی از HB ۸۰/۶ به HB ۸۷/۱ افزایش یافته است.

مراجع

1. Fan, Z. "Semisolid metal processing," ***International Materials Reviews***, vol. 47, No. 2 (2002) 49–86.
2. Pilling, J. and Hellawell, A. "Mechanical deformation of dendrites by fluid flow***", Journal of Metallurgical and Materials Transactions***, Vol. 27A(1) (1996) 229-232.
3. Fan, Z., "Slurry base dicasting ", ***Journal of Materials Processing*** , Vol. 14, No. 8, (2001) 247–253.
4. Kenney, M.P., Courtois, J.A., Evans, R.D., Farrior G., Kyonka, C.P., Koch, A.A., Yong, K.P. "Semi-solid metal casting and forging metals handbook", Vol . 15, 9th ed. (1988) 327-338.
5. M. C. Flemings, "Behavior of metal alloys in the semi-solid state", ***Metal. Trans. A***, Vol. 22A (1991) 957-981.
6. Haga, T. and Suzuki, Sh. "Casting of aluminum alloy ingots for thixoforming using a cooling slope", ***Journal of Matrials Processing Technology***, Vol. 118 (2001) 169-172.
7. Birol, Y. "A357 thixoforming feedstock produced by cooling slope casting", ***Journal of Matrials Processing Technology***, Vol. 186 (2007) 94-101.
8. Garat, M., Blais, S., Pluchion, C. "Aluminum semi-solid processing from the billet to the finished part", 5th international conference on semi-solid processing of alloys and composites, Colorado (1998).
9. Kang, C. G., Jung, K. D., Jung, H. K. "Control of Liquid Segregation of Semi-Solid Aluminum Alloys During Intelligent Compression Test", ***Intelligent processing and manufacturing of matrials*** (1999) 609-703.

۱۰. م. مرادیان و همکارانش «بررسی تأثیر پارامترهای ریخته‌گری بر ریزساختار تولید شده در حالت نیمه‌جامد به روش تیکسوکستینگ» چهارمین کنفرانس شکل‌دهی فلزات و مواد ایران، تهران، ۱۳۸۷.

11. Wang, H., St John, D.H., Davidson, C.J. "Semisolid microstructural evolution of AlSi7Mg alloy during partial remelting", ***Mater. Sci. Eng.***, Vol. A368 (2004) 159-167.