تأثیر دما روی ریزساختار آلیاژ ریخته‌گری نیمه‌جامد روی سطح شیب‌دار خنک‌کننده

سلمان نوروزی[۱]، محمد بخشی جویباری[۲]، امین کلاهدوز[۳] و سید جمال حسینی‌پور[۴]
دانشکده مهندسی مکانیک
دانشگاه صنعتی بابل
(تاریخ دریافت: ۹۱/۰۳/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۰۹/۱۰)

چکیده

روش ریخته‌گری روی سطح شیب‌دار، یکی از روش‌های شکل‌دهی نیمه‌جامد است که در آن مذاب با فوق‌گداز مناسب روی سطح شیب‌دار خنک‌کننده به منظور ریز و غیردندریتی نمودن ریزساختار ریخته می‌شود. در این تحقیق تأثیر دما که شامل دمای مذاب‌ریزی، دمای سطح شیب‌دار و دمای قالب می‌باشد، روی ریزساختار و مورفولوژی آلیاژ آلومینیوم A356 مورد مطالعه قرار گرفته است. در این راستا، مذاب‌ریزی روی سطح شیب‌دار در دو حالت استفاده و یا عدم استفاده از سیستم خنک‌کننده و برای ۵ دمای مختلف روی سطح شیب‌داری با طول و زاویه ثابت و در داخل قالبی فلزی در ۳ دمای مختلف انجام شده است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که کاهش دمای مذاب ریزی تا ۶۲۵°C موجب می‌شود تا ساختار به دست آمده به طور قابل توجهی ریزدانه‌تر شود. سیستم خنک‌کننده مورد استفاده در این تحقیق نیز که باعث کنترل دمای سطح شیب‌دار می‌شود، اثر قابل توجهی بر روی ریزساختار آلیاژ داشته که در ضعیف‌ترین حالت باعث کاهش ۲۲ درصدی قطر متوسط دانه و ۸/۵ درصدی فاکتور شکل می‌شود. همچنین مذاب‌ریزی در قالبی با دمای ۲۰۰°C سبب می‌شود تا ساختار به دست آمده از لحاظ مورفولوژی شرایط مطلوب‌تری داشته باشد، به طوری که ریزساختار از کرویت و یکنواختی بالاتری برخوردار باشد.

واژه‌های کلیدی: ریخته‌گری نیمه‌جامد، سطح شیب‌دار خنک‌کننده، آلیاژ آلومینیوم A356، دمای مذاب‌ریزی، دمای قالب

Effect of Temperature on the Microstructure of Semi-Solid Casting in Cooling Slope Method

S. Nourouzi, M. Bakhshi-Juybari, A. Kolahdooz, and S.J. Hosseinipour
Mech. Eng. Dep't.
Babol Univ. of Tech.
(Received: 29 May, 2012; Accepted: 30 November, 2012)

ABSTRACT

The cooling slope (CS) method is one of the semi-solid methods that the molten alloy with a suitable amount of superheat is poured on a cooling slope for achieving fine and non-dendritic structure. This paper discusses the effect of temperature on the final microstructure of A356 aluminum alloy. These temperatures are casting temperature, mold temperature and CS plate temperature. The dendritic primary phase in the conventionally cast A356 alloy has transformed into a non-dendritic one in cast ingots on a cooling plate at 5 different casting temperature, 3 different mold temperature and also two conditions of using a cooling system or without it. It was found that the microstructure gets finer decreasing casting temperature to 625°C. The CS used in this study, which also controls the surface temperature, has a significant effect on the microstructure. This effect is 22% decrease on average grain diameter and 8.5% increase on the shape factor at the weakest case. Also increasing the mold temperature up to 200°C causes globularity and appropriate distribution of α-Al particles.

Keywords: Semisolid, Casting, Cooling Slope, Solidification, A356, Temperature Alloy

۱- دانشیار (نویسنده پاسخگو): s_nourouzi@nit.ac.ir
۲- استاد: bakhshi@nit.ac.ir
۳- دانشجوی دکتری: aminkolahdooz@stu.nit.ac.ir
۴- دانشیار: j.hosseini@nit.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

آلیاژهای آلومینیوم به دلیل دارا بودن وزن کم و نسبت استحکام به وزن بالا، نقش مهمی را در ساخت قطعات صنایع هوایی و خودروسازی به دلیل کاهش وزن و صرفه‌جویی در مصرف سوخت ایفا می‌کنند. در حال حاضر در حدود ٪۸۵ تولیدات قطعات آلومینیومی به روش ریخته‌گری تحت‌فشار انجام می‌شود. اما وجود تخلخل، کاربرد این روش را در مواردی که نیاز به کیفیت بالا وجود داشته باشد محدود ساخته و علاوه بر این، امکان بهبود خواص با عملیات حرارتی را نیز از بین می‌برد. تا چند سال گذشته فورج کردن تنها راه ساخت قطعات سبک و مطمئن بود، اما مصرف انرژی بالا، عدم توانایی تولید با شکل نهایی، هزینه بالای ماشین آلات و نرخ تولید کم، از مشکلات این روش تولید محسوب می‌شود. واضح است که افزایش روز افزون استفاده از آلومینیوم در صنعت، نیاز به توسعه تکنولوژی‌های پیشرفته دارد. فرآیندهای جدید باید قابلیت ساخت قطعات پیچیده و با خواص مکانیکی بالا را دارا بوده و از نظر هزینه تولید، قابل رقابت با ریخته‌گری تحت فشار باشند. تخلخل‌هایی که به دلیل جریان متلاطم مذاب ایجاد می‌شوند را می‌توان با بالا بردن ویسکوزیته مذاب و پایین آوردن عدد رینولدز و در نتیجه کاهش هوای محبوس، کاهش داد. علاوه بر این، استفاده از شکل موادی که نسبت به حالت جامد نیاز به نیروهای شکل‌دهی کمتری داشته باشند، باعث کاهش هزینه‌های فرآیندهای شکل‌دهی حالت جامد نظیر فورج می‌شود. این موضوع تصویر کلی فرآیند شکل‌دهی نیمه جامد می‌باشد [۵-۱].

فرآیند شکل‌دهی نیمه‌جامد، فن‌آوری به نسبت جدیدی در شکل‌دهی فلزات است که با روش‌های معمول شکل‌دهی فلزات که در آن از فلز مذاب (فرآیند ریخته‌گری) و یا فلز جامد (فرآیند فورج)، به عنوان مواد اولیه استفاده می‌شود، متمایز است. در فرآیندهای نیمه جامد از مخلوط‌های مذاب- جامد[1] به عنوان ماده اولیه برای شکل‌دهی استفاده می‌شود. مخلوط مذاب- جامد ایده‌آل به صورت حجم مناسبی از ذرات جامد ریز با مورفولوژی کروی که به طور یکنواخت در زمینه‌ای از فاز مذاب پراکنده‌اند تعریف می‌شود [۶]. چنین مخلوط‌هایی خواص رئولوژیکی منحصر بفردی را از خود نشان می‌دهند که به خواص تیکسوتروپی[2] و خاصیت شبه‌پلاستیک[3] موسوم هستند. موادی با خاصیت تیکسوتروپی، با اعمال نیروی برشی مانند مایعات جریان می‌یابند و با برداشته شدن آن، مانند جامدات شکل خود را حفظ می‌کنند. این خاصیت مهم‌ترین خاصیتی است که شکل‌دهی نیمه‌جامد بر پایه آن قرارگرفته است [۷]. در میان روش‌های گوناگون تولید مخلوط مذاب- جامد با خواص تیکسوتروپ مورد نیاز برای فرآیندهای شکل‌دهی نیمه‌جامد، روش هم‌زدن مکانیکی [۸]، هم‌زدن الکترومغناطیسی[4] [۸] و تا حدودی روش SIMA[5] [۹]، بیشترین توجه را به خود معطوف ساخته‌اند. اما مشکلاتی همچون امکان فرسایش پروانه همزن و آلوده ساختن مذاب در روش همزن مکانیکی، هزینه بالا و عدم توانایی در تولید ساختار یکنواخت همزن مغناطیسی و محدودیت ابعادی در شمش‌های تولید شده در فرآیند SIM به همراه هزینه بسیار بالای آن توسعه روش‌های مذکور را با مشکل مواجه کرده است. بنابراین نیاز به توسعه فرآیندهایی ساده، با هزینه کم تجهیزات و عدم وجود محدودیت در ابعاد، که قادر به تولید ساختارهای مناسب جهت شکل‌دهی نیمه‌جامد باشند احساس می‌شود. از جمله چنین فرآیندهایی می‌توان به فرآیند سطح شیب‌دار اشاره کرد که در آن، مذاب با فوق گداز مناسب پس از سیلان بر روی سطح شیب‌دار خنک‌کننده به داخل قالب هدایت می‌شود [۱۳-۱۰]. بر اثر تماس مذاب با سطح شیب‌دار و انتقال حرارت بین آنها، جوانه‌های جامد تشکیل می‌شوند. جوانه‌های فاز جامد اولیه به دلیل جریان مذاب از سطح شیب‌دار جدا شده و در داخل مذاب سیلان می‌یابند. این ذرات جامد پس از پراکنده‌شدن در توده مذاب در حال سرد شدن، ساختار غیردندریتی مورد نیاز را ایجاد می‌کنند. در روش سطح شیب‌دار، پارامترهای مختلفی از قبیل دمای مذاب‌ریزی مشخصه‌های سطح شیب‌دار، نرخ سردشدن مخلوط مذاب و جامد و دمای قالب، بر ریز ساختار نهایی تأثیرگذار است [۱۴-۱۱]. محققین زیادی برای رسیدن به ریزساختاری ریزتر و غیردندریتی‌تر به بررسی این پارامترها در این روش پرداخته‌اند. تقوی و همکاران [۱۵] مطالعاتی بر روی طول و زاویه سطح شیب‌دار به صورت آزمایشگاهی روی آلیاژ آلومینیوم A356 انجام داده‌اند. آنها گزارش نمودند که این پارامترها اثرات بنیادی بر روی تغییرات ریزساختاری بیلت‌های تولیدی دارد. بیرول[6] [۱۶] نیز به بررسی اثرات دمای مذاب‌ریزی و طول سطح شیب‌دار روی آلیاژ آلومینیوم A357 پرداخته است. در تحقیق حاضر، تأثیر دما که شامل

1- Slurry
2- Thixotropy
3- Pseudoplastic
4- Magneto Hydro Dynamic
5- Strain Induced Melt Activation
6- Birol

Archive of SID

www.SID.ir

دمای بارریزی، دمای سطح شیب‌دار و دمای قالب می‌شود، روی ریزساختار و مورفولوژی آلیاژ آلومینیوم A356 مورد مطالعه قرار گرفته است.

۲- روش تحقیق

در این تحقیق آلیاژ آلومینیوم A356 با ترکیب شیمیایی مندرج در جدول **۱** مورد استفاده قرار گرفته است. به منظور انجام هر یک از آزمایشات، میزان ۲/۵ کیلوگرم از آلیاژ فوق را در بوته‌ای از جنس کاربید سیلسیم و توسط یک کوره مقاومتی ذوب کرده و پس از آنکه آلیاژ مذاب به دماهای مذاب‌ریزی مورد نظر رسید (جدول ۲) روی سطح شیب‌دار از جنس مس به طول ۷۰۰mm و عرض ۱۰۰mmجریان یافته و در انتها به درون قالب استوانه‌ای به قطر ۸۰mm و طول ۲۰۰mm هدایت شده‌است. در شکل **۱** دستگاه ریخته‌گری سطح شیبدار نمایش داده شده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده (درصد وزنی).

Al	Si	Mg	Fe	Ti	Other
۹۲/۱۴	۷/۱۰	۰/۳۳	۰/۱۷	۰/۱۰	<۰/۰۸

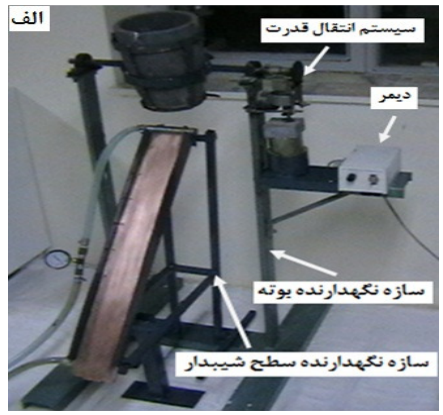
جدول (۲): پارامترهای مورد مطالعه در این تحقیق.

دمای بارریزی (°C)	۶۰۰، ۶۱۵، ۶۲۵، ۶۵۰ و ۶۸۰
کنترل دمای سطح	با سیستم خنک‌کننده و بدون سیستم خنک‌کننده
دمای قالب (°C)	۲۵، ۲۰۰ و ۴۰۰

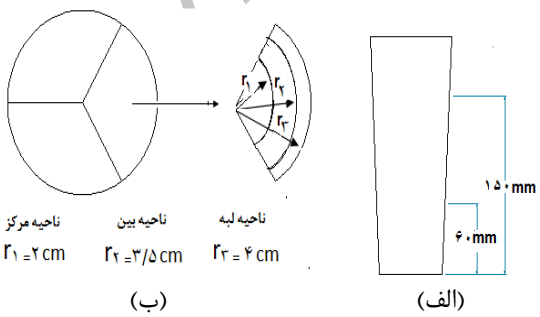
صفحه مسی در این فرآیند برای مذاب ریزی در طول ۵۰۰mm و زاویه ۵۰° نسبت به افق تنظیم شده است. دو حالت مختلف در این تحقیق برای اعمال تغییرات دمایی سطح شیب‌دار مورد استفاده قرار گرفته که این دو حالت استفاده و عدم استفاده از سیستم خنک‌کننده است.

سیستم خنک‌کاری مورد استفاده، شامل مخزن آب، پمپ آب و مسیر مارپیچی تعبیه شده درون دو صفحه مسی که بر روی هم مونتاژ شده، می‌باشد. در این تحقیق برای ثابت نگه‌داشتن دمای سطح شیب‌دار از ۴۰ لیتر آب با دمای اولیه ۱۸°C استفاده شده که با فشاری معادل ۱ بار پمپاژ می‌شود.

علاوه بر این، برای جلوگیری از چسبیدن مذاب به سطح، تسهیل در جریان یافتن مذاب و جلوگیری از ایجاد اغتشاش در آن، از پوشش اکسید زیرکونیوم بر روی صفحه مسی استفاده شده است. مذاب در انتهای سطح به حالت نیمه‌جامد به درون قالب هدایت شده و پس از پرکردن قالب انجماد می‌یابد. ریخته‌گری بر روی سطح شیب‌دار در دماهای مختلف مذاب‌ریزی و قالب صورت گرفته است. پس از اتمام مذاب‌ریزی و خنک شدن نمونه در دمای محیط، برش آن در فاصله ۶۰ و ۱۵۰mm از قسمت تحتانی آن صورت گرفته و بخش میانی نمونه‌ها به منظور کاهش اثرات محیطی و قالب برای انجام آزمایش‌های متالوگرافی مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۲).



شکل (۱): الف) دستگاه ریخته‌گری سطح شیب‌دار مورد استفاده در این تحقیق و ب) مسیر جریان آب برای خنک‌کاری سطح شیب‌دار مسی.



شکل (۲): شماتیک برش نمونه‌ها، الف) نمونه ریخته‌گری شده و ب) قسمت‌های مشخص شده برای تصاویر میکروساختاری.

Archive of SID

www.SID.ir

پس از عملیات سنباده‌زنی، صیقل‌کاری و حکاکی با محلول weck، از تصویر میکروسکوپی نمونه‌ها ۲۰۰ دانه انتخاب شده و قطر متوسط[1] و فاکتور شکل[2] آنها مورد محاسبه قرار گرفته است. برای محاسبه فاکتور شکل دانه‌ها که بیانگر میزان کرویت آنها است از رابطه (۱) استفاده شده است [۱۷].

$$F = \frac{4\pi A}{P^2}, \qquad (۱)$$

که در آن، A مساحت و P محیط دانه‌ها در سطح مقطع نمونه می‌باشد و افزایش فاکتور شکل بیانگر کروی‌تر شدن دانه‌ها است.

۳- یافته‌ها و بحث

دمای سطح شیب دار، مذاب ریزی و قالب تاثیر زیادی روی ریزساختار و خواص مکانیکی قطعه در فرآیند شکل دهی نیمه جامد دارند لذا در این بخش به بررسی تاثیر این عوامل پرداخته خواهد شد.

۳-۱- تاثیر دمای سطح شیب‌دار

شکل **۳** ریزساختار نمونه ریخته‌گری ثقلی را نشان می‌دهد که در این آزمایشگاه، در دمای مذاب ریزی ۶۸۰ºC و دمای قالب ۲۵ºC و بدون استفاده از سطح شیب‌دار انجام شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در شرایط ریخته‌گری معمولی ساختار به دست آمده در ناحیه (الف و ب) شامل دندریت‌های درشت فاز جامد اولیه α-Al است. این دندریت‌ها دارای طول بازوی اصلی با اندازه‌ای بزرگ‌تر از ۳۷۰µm می‌باشند که در زمینه‌ای از فاز یوتکتیک پراکنده شده‌اند. شکل **۴** ریزساختارهای نمونه ریخته‌گری شده بر روی سطح شیب‌دار در دمای مذاب‌ریزی ۶۸۰ºC و دمای قالب ۲۵ºC را نشان می‌دهد. با مقایسه شکل **۳** با شکل **۴** مشاهده می‌شود که در دمای یکسان مذاب‌ریزی، با استفاده از سطح شیب‌دار خنک‌کننده، ذرات درشت فاز α-Al شکسته شده و ساختار غیر دندریتی با مقادیر اندک دندریت‌های ریزتر ایجاد شده است.

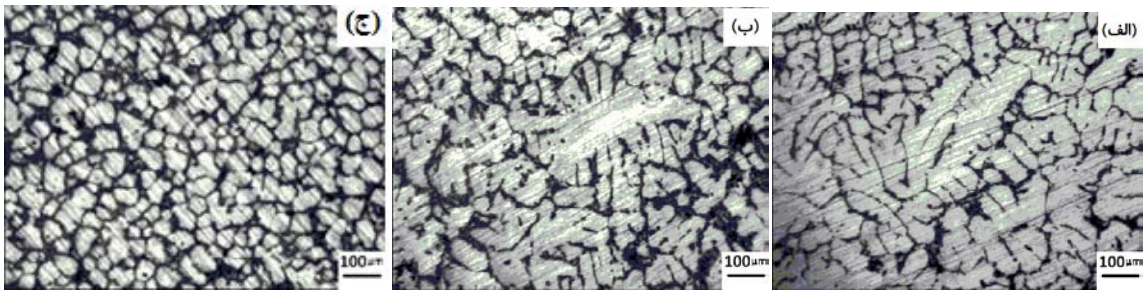
برای بررسی اثر خنک‌کنندگی سطح شیب‌دار، مذاب با دماهای مختلف ۶۸۰ºC، ۶۵۰ºC و ۶۲۵ºC در طول ثابت ۵۰۰mm و زاویه ۵۰° ابتدا بر روی سطح شیب‌دار بدون سیستم خنک‌کننده و در مرحله بعد با استفاده از سیستم آبگرد و با دمای آب ۱۸ºC، ریخته‌گری شده است (شکل ۵). با مقایسه ریزساختارهای به دست آمده مشاهده می‌شود که در دماهای یکسان باریزی، استفاده از سیستم خنک‌کننده در سطح شیب‌دار موجب بهبود ریزساختار از طریق کاهش قطرمتوسط و افزایش فاکتور شکل ذرات فاز اولیه شده است.

شکل **۶** بیانگر تأثیر وضعیت خنک‌کاری بر قطر متوسط و فاکتور شکل ذرات می‌باشد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، قطر متوسط ذرات بعد از استفاده از سیستم خنک‌کننده، برای دماهای باریزی ۶۸۰ºC ، ۶۵۰ºC و ۶۲۵ºC به ترتیب به میزان ۲۸/۹٪، ۲۲/۶٪ و ۲۲/۱٪ کاهش یافته و میزان کرویت دانه‌ها در این دماها به میزان ۱۳/۹٪، ۱۲/۲٪ و ۸/۵٪ افزایش یافته است. دلیل این موضوع را می‌توان این‌گونه توضیح داد که با انجام ریخته‌گری روی سطح شیب‌دار بدون سیستم خنک‌کننده، دمای سطح افزایش می‌یابد. این افزایش دما باعث کاهش اثر خنک کنندگی سطح شیب‌دار می‌شود. این امر، پدیده تشکیل ذرات جامد روی سطح شیب‌دار و جدا شدن آنها را محدود کرده و موجب می‌شود تا در دماهای بالاتر تنها مذاب از روی سطح عبور کرده و تقریباً به صورت کامل به درون قالب هدایت شود. علاوه بر این، به دلیل افزایش حجم مذاب ورودی به قالب، احتمال ذوب مجدد همان مقدار محدود ذرات جامد که بر روی سطح شکل گرفته، درون قالب بیشتر می‌شود. در نتیجه ساختاری با ذرات فاز اولیه درشت‌تر و با فاکتور شکل کمتر ایجاد می‌شود. با افزایش میزان خنک‌کنندگی سطح شیب‌دار، تشکیل ذرات جامد و احتمال جدا شدن و وارد شدن آنها به مذاب در حرکت زیاد شده که این امر موجب می‌شود تا در حین حرکت به صورت کروی رشد کنند. این ذرات با ورود به قالب نیز می‌توانند به صورت محلی برای جوانه‌زنی ذرات جدید عمل نمایند. با افزایش کسر جامد وارد شده به قالب، ایجاد ساختار دندریتی محدودتر و ساختارهای مطلوب‌تری با قطر متوسط کمتر و فاکتور شکل بیشتر ذرات فاز اولیه شکل می‌گیرد. نکته قابل ذکر این است که کاهش بیش از اندازه دمای سطح شیب‌دار همچنین می‌تواند موجب انجماد زیاد مذاب و تشکیل کسر جامد بالاتر روی سطح شیب‌دار و در نهایت پر نشدن قالب را به دنبال داشته باشد.

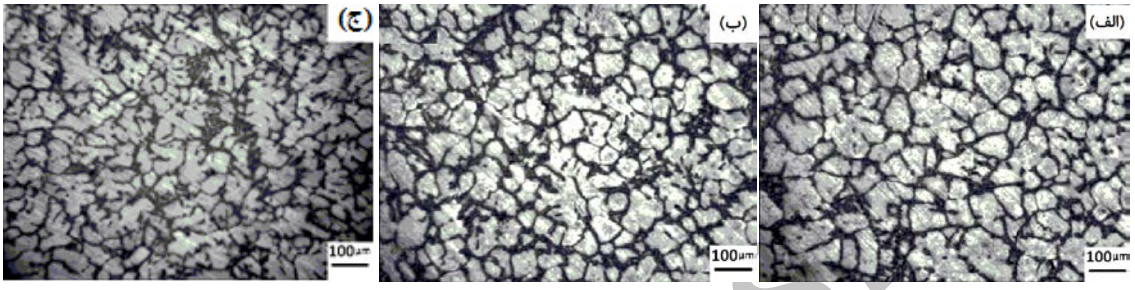
1- Average Grain Size
2- Shape Factor

Archive of SID

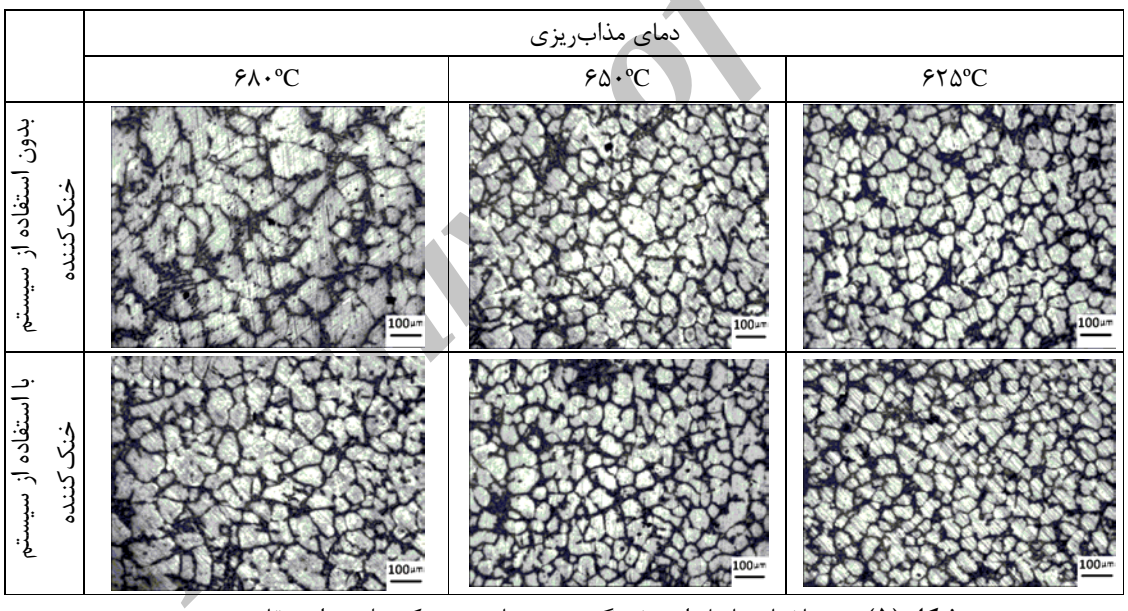
www.SID.ir



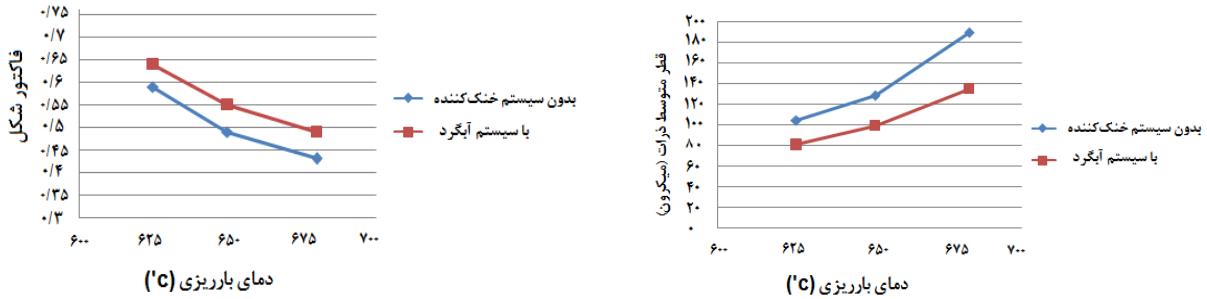
شکل (۳): ریزساختار نمونه ریخته‌گری ثقلی با دمای بارریزی ۶۸۰°C و دمای قالب ۲۵°C، الف) مرکز، ب) بین و ج) لبه.



شکل (۴): ریزساختار نمونه ریخته‌گری بر روی سطح شیب‌دار در دمای مذاب ریزی ۶۸۰°C و دمای قالب ۲۵°C الف) مرکز، ب) بین و ج) لبه.



شکل (۵): ریزساختار حاصل از ریخته‌گری نیمه‌جامد در مرکز بیلت برای مقایسه هر دو حالت استفاده و یا عدم استفاده از سیستم خنک‌کاری.



شکل (۶): تأثیر وضعیت خنک‌کاری بر قطر متوسط و فاکتور شکل ذرات فاز اولیه در دماهای مختلف بارریزی.

www.SID.ir

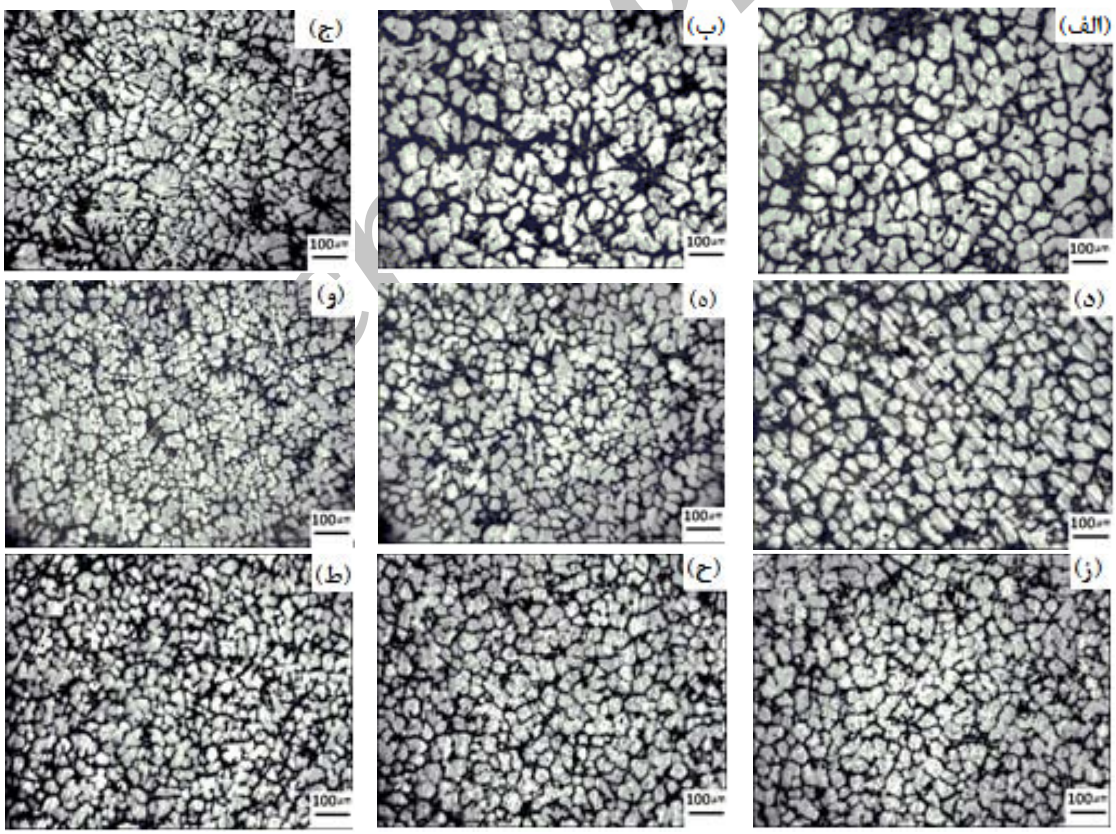
۳-۲- تأثیر دمای مذاب ریزی

شکل **۷** ریزساختار نمونه‌های تهیه شده از ریخته‌گری بر روی سطح شیب‌دار در دمای مذاب ریزی ۶۵۰، ۶۲۵ و ۶۱۵ºC و دمای قالب ۲۵ºC را نشان می‌دهد. روند تغییر در طرح‌های ریزساختاری با کاهش دمای مذاب‌ریزی بسیار واضح است. مورفولوژی فاز اولیه α-Al در ناحیه مرکز با کاهش دمای مذاب ریزی به طور کامل به حالت غیردندریتی درآمده است.

اصلاح و تغییر مورفولوژی فاز اولیه در شمش‌های فرآوری شده در فرآیند سطح شیب‌دار به واسطه ایجاد کسر جامد مناسب بر روی سطح خنک کننده است. هنگامی که آلیاژ مذاب با آلیاژ فوق گداز مناسب بر روی سطح خنک کننده ریخته‌گری می‌شود، دمای آن به سرعت تا زیر دمای لیکوییدوس افت می‌کند در نتیجه کریستال‌های فاز اولیه α-Al که بر روی سطح شیبدار خنک کننده شکل گرفته، بر اثر تنش برشی ناشی از نیروی ثقلی و جریان مذاب، کنده شده و به همراه مذاب در حال جریان به درون قالب هدایت می‌شوند. این ذرات به عنوان مکان‌های جوانه زنی مانع از شکل‌گیری ساختار دندریتی می‌شود [۱۴].

در دمای مذاب ریزی ۶۸۰ و ۶۵۰ºC، میزان فوق‌گداز آنقدر زیاد است که که تعداد کریستال‌های جوانه‌زده و جدا شده از سطح برای ایجاد ساختاری شبه‌کروی کافی نباشد. این در حالی است که در دماهای مذاب‌ریزی بالا حجم مذاب بیشتر با دمای بالاتر وارد قالب می‌شود که می‌تواند امکان انجماد ذرات دندریتی را افزایش دهد. با کاهش دمای مذاب‌ریزی به ۶۲۵ºC، مقدار کسر جامد ایجاد شده بر روی سطح شیب‌دار افزایش می یابد که این امر سبب افزایش میزان جوانه زنی کریستال‌های فاز اولیه می‌شود.

نتیجه این رخداد از هم‌گسستگی و خرد شدن هر چه بیشتر ساختار دندریتی و جایگزینی آن با دانه‌های ریز و نزدیک به شکل کروی فاز α–Al است. در دمای مذاب ریزی پایین‌تر از ۶۵۰ºC، امکان انجماد بیش از حد مذاب روی سطح شیب‌دار و تشکیل یک لایه جامد پیوسته روی آن می‌شود، به طوری‌که در دمای مذاب‌ریزی پایین‌تر ممکن است پر نشدن قالب را به دنبال داشته باشد.



شکل (۷): ریزساختارنمونه ریخته‌گری بر روی سطح شیب‌دار در دمای قالب ۲۵ºC و دماهای مذاب ریزی، الف) ۶۵۰ºC- مرکز، ب) ۶۵۰ºC- بین، ج) ۶۵۰ºC- لبه، د) ۶۲۵ºC- مرکز، ه) ۶۲۵ºC- بین، و) ۶۲۵ºC- لبه، ز) ۶۱۵ºC- مرکز، ح) ۶۱۵ºC- بین و ط) ۶۱۵ºC- لبه.

www.SID.ir

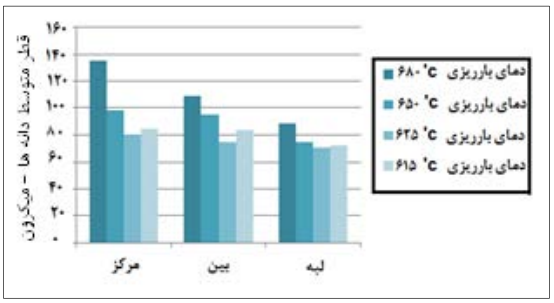
شکل **۸** مقایسه لایه جامد ایجاد شده بر روی سطح شیب‌دار درزاویه ۵۰°، طول ۵۰۰mm و دماهای مختلف بارریزی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود در دمای بارریزی ۶۸۰°C لایه جامدی روی سطح شیب‌دار مشاهده نمی‌شود اما با کاهش دمای بارریزی به دمای ۶۵۰°C لایه نازکی روی سطح تشکیل می‌شود که با کاهش بیشتر دمای مذاب‌ریزی ضخامت این لایه جامد رفته رفته بیشتر می شود. در مذاب ریزی در ۶۲۵°C هنوز میزان سیالیت آلیاژ به مقداری است که توانسته قالب مورد نظر را به طور کامل پر نماید. با کاهش دمای بارریزی به زیر ۶۲۵°C مشاهده می‌شود که سهم لایه جامد به اندازه‌ای زیاد است که بخش عمده مذاب روی سطح شیب‌دار منجمد شده و یا درون بوته باقی می‌ماند و این امر عدم پر شدن مناسب قالب را به همراه دارد.

شکل (۸): مقایسه لایه جامد ایجاد شده بر روی سطح شیب‌دار در دماهای مختلف بارریزی الف) ۶۸۰°C، ب) ۶۵۰°C، ج) ۶۲۵°C، د) ۶۱۵°C و ه) ۶۰۰°C.

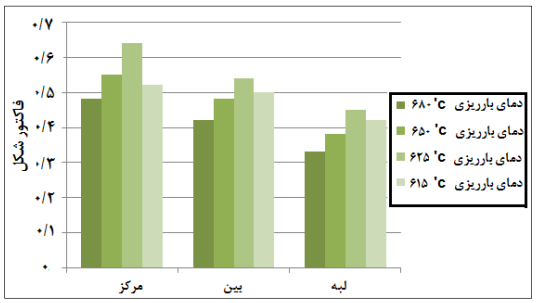
شکل **۹**- **الف** و **ب** به ترتیب تأثیر دمای مذاب‌ریزی بر قطر میانگین دانه‌ها و فاکتور شکل را نشان می‌دهد. تغییر این دو پارامتر در مرکز با تغییر دمای مذاب‌ریزی، به طور کامل مشهود است، به طوری‌که قطر میانگین دانه‌ها و فاکتور شکل به ترتیب از مقدار ۱۳۵/۲µm و ۰/۴۸ برای دمای مذاب‌ریزی ۶۸۰°C به مقدار ۸۰/۷µm و ۰/۶۴ برای دمای مذاب‌ریزی ۶۲۵°C تغییر می‌یابند. کاهش دمای مذاب‌ریزی تا یک حد معین، در یک طول و زاویه ثابت سطح شیب‌دار، سبب می‌شود تا ریزساختار مرکز نمونه در مقایسه با دماهای بالاتر، به مراتب ریزتر شوند. فاکتور شکل در لبه نمونه‌ها همواره کمتر و برای این دو دما بین ۰/۴۵و۰/۳۳ است که حاکی از نزدیک بودن ریزساختار این بخش به ساختار دندریتی است.

۳-۲- تأثیر دمای قالب

شکل **۱۱** ریزساختار به دست آمده در دماهای قالب ۲۵، ۲۰۰ و ۴۰۰°C به ازای دمای مذاب‌ریزی ۶۲۵°C را نشان می‌دهد. با افزایش دمای قالب از ۲۵°C به ۲۰۰°C، قطر میانگین دانه‌ها و فاکتور شکل مرکز نمونه‌ها به ترتیب به مقدار ۱۸/۶٪ و ۱۴٪ افزایش می‌یابند. همچنین یکنواختی و کرویت مناسبی در ساختار مشاهده می‌شود. با افزایش بیشتر دمای پیشگرم قالب به ۴۰۰°C، شاهد رشد بیش از حد قطر میانگین ذرات در کل ساختار بوده، این در حالی است که بر خلاف دمای قالب ۲۰۰°C فاکتور شکل، کاهش قابل توجهی می‌یابد. شکل‌های **۱۰- الف** و **ب** به ترتیب بیانگر تغییرات قطر میانگین ذرات و فاکتور شکل با تغییردمای قالب است. سرعت سرد شدن به عنوان یک پارامتر مهم در ریخته‌گری قطعات همواره مورد توجه بوده است. سرعت‌های انجمادی مختلف باعث تغییر در ریز ساختار، اندازه دانه، مورفولوژی فازهای یوتکتیکی، فاصله بین بازوهای دندریتی و فازهای بین فلزی می‌شود [۱۸ و ۱۹].



(الف)

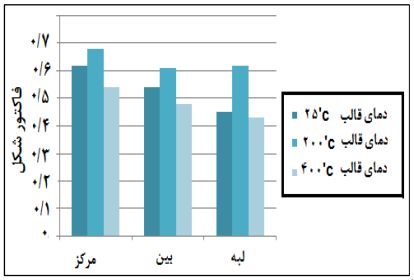


(ب)

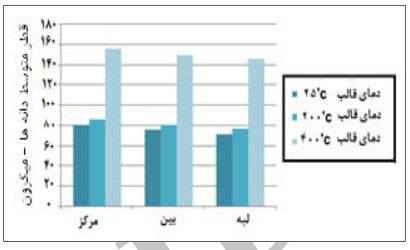
شکل (۹): تأثیر دمای مذاب ریزی بر الف) قطر میانگین و ب) فاکتور شکل در نواحی مختلف مقطع برش.

Archive of SID

www.SID.ir



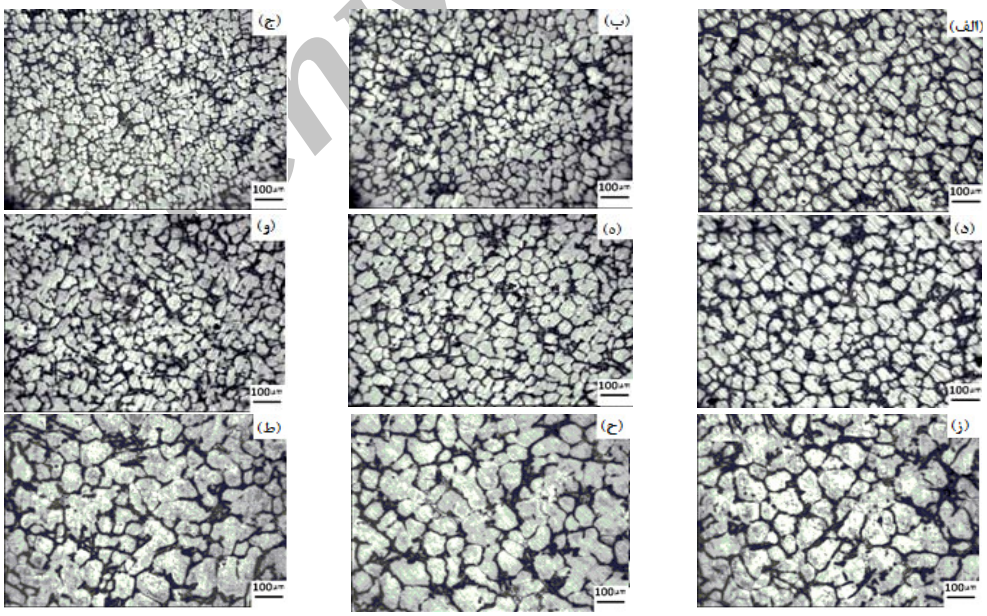
(الف)



(ب)

شکل (۱۰): تأثیر دمای پیشگرم قالب بر الف) قطر میانگین و ب) فاکتور شکل در نواحی مختلف مقطع برش.

شکل **۱۱- الف، ب** و **ج** ریزساختار حاصل ازمذاب‌ریزی در دمای قالب ۲۵°C را نشان می‌دهد. بالا بودن شیب حرارتی در این حالت سبب می‌شود فاز مذابی که به همراه فاز جامد اولیه، پس از جاری شدن مذاب روی سطح شیب‌دار خنک‌کننده به درون قالب هدایت شده بلافاصله منجمد شود. این انجماد سریع فرصت توزیع و پیکربندی یکنواخت را از دانه‌های فاز جامد اولیه می‌گیرد. همچنین با پیوستن احتمالی دانه‌ها فاز جامد ثانویه با شکل‌های مختلف به دانه‌های فاز جامد اولیه، ساختاری غیرهمگن با میزان کرویت پایین ایجاد می‌شود. با افزایش دمای قالب به ۲۰۰°C، نرخ انجماد کاهش یافته بنابراین فرصت برای جابه‌جایی و نفوذ بیشتر نسبت به حالت قبل فراهم شده و دگرگونی یوتکتیکی با تأخیر اتفاق می افتد، در نتیجه دانه‌ها فاز جامد اولیه Al–α که پس از ورود مخلوط مذاب- جامد به قالب در زمینه مذاب وجود دارند، فرصت کافی برای تبدیل از شکل گل‌بوته‌ای به کروی را پیدا می‌کنند. همچنین کاهش نرخ انجماد سبب می شود که در ناحیه ریشه بازوهای دندریتی، مکانیزم ذوب مجدد اتفاق افتد تا علاوه بر کاهش سطح انرژی، به عنوان عامل کمکی در افزایش میزان کرویت باشد. در نتیجه ساختاری همگن‌تر، درشت‌تر با فاکتور شکل نزدیک به یک مشاهده می شود. در دمای قالب ۴۰۰°C، انجماد فاز مذاب بسیار طولانی شده است در نتیجه شرایط مناسبی برای نفوذ فراهم می شود. این شرایط سبب می شود تا دانه‌های جامد اولیه به عنوان مراکز جوانه‌زنی دانه‌های Al–α ثانویه عمل کرده که با رخ دادن احتمالی آگلومراسیون، سبب رشد بیش از حد اندازه دانه و کاهش فاکتور شکل می‌شود (شکل ۱۱- د، ه، و، ز، ح و ط).



شکل(۱۱): ریزساختار نمونه ریخته‌گری بر روی سطح شیب‌دار در دمای باریزی ۶۲۵°C و دماهای قالب الف) ۲۵°C– مرکز، ب) ۲۵°C– بین، ج) ۲۵°C– لبه، د) ۲۰۰°C– مرکز، ه) ۲۰۰°C– بین، و) ۲۰۰°C– لبه، ز) ۴۰۰°C– مرکز، ح) ۴۰۰°C– بین و ط) ۴۰۰°C – لبه.

www.SID.ir

۵- نتیجه‌گیری

با استفاده از سطح شیب‌دار، ریز ساختار دندریتی موجود در نمونه متداول ریخته‌گری به ساختاری ریز و غیردندریتی تغییر می‌یابد. ریزساختار تولید شده توسط فرآیند سطح شیب‌دار از نظر اندازه و مورفولوژی دانه‌های فاز جامد اولیه تحت تأثیر دمای مذاب‌ریزی، دمای سطح شیب‌دار و دمای قالب قرار دارد. با تجهیز سطح شیب‌دار به سیستم آبگرد، میزان کسر جامد ایجاد شده بر روی سطح مسی افزایش یافته و ریزساختار نمونه‌های به دست آمده در دماهای بارریزی مختلف در مقایسه با حالت بدون آبگرد دارای دانه‌های فاز اولیه ریزتر با فاکتور شکل بالاتر می‌باشند. با بارریزی در دماهای مختلف در طول ۵۰mm و زاویه ۵۰° بهترین نتیجه در دمای ۶۲۵ºC حاصل می‌شود. با کاهش دمای مذاب‌ریزی به ۶۲۵ºC، تشکیل و جدا شدن دانه‌ها روی سطح افزایش یافته و نتیجه این رخداد، از هم‌گسستگی و خرد شدن هر چه بیشتر ساختار دندریتی و جایگزینی آن به دانه‌های ریز و نزدیک به شکل کروی فاز جامد اولیه Al–α است. همچنین با ریختن مخلوط مذاب و جامد به داخل قالب با دماهای مختلف، مطلوب‌ترین ساختار در دمای قالب ۲۰۰ºC حاصل می‌شود. با افزایش دمای قالب ۲۵ºC به ۲۰۰ºC، نرخ انجماد کاهش یافته، بنابراین فرصت برای جابه‌جایی و نفوذ بیشتر، نسبت به حالت قبل فراهم می‌شود. در نتیجه ساختاری همگن‌تر، با قطر میانگین و فاکتور شکل بیشتر ذرات در مقایسه با دمای قالب ۲۵ºC مشاهده می‌شود. دردمای قالب ۴۰۰ºC، کاهش هر چه بیشتر نرخ انجماد و افزایش نفوذ سبب افزایش بیش از حد قطر میانگین و کاهش فاکتور شکل ذرات می‌شود.

۶- مراجع

1. Spencer, D.B. “Rheology of Liquid–Solid Metallic Alloys”, Ph.D Thesis, /MIT & Cambridge Univ., 1971.
2. Shiomi, M., Takano, D., Osakada, K., and Otsu, M. “Forming of Aluminum Alloy at Temperatures Just Below Melting Point”, Int. J. Mach. Tool Manuf., Vol. 15, No. 2, pp. 229-235, 2003.
3. Giordano, P. and Chiarmetta, G. “Thixo and Rheo Casting: Comparison on a High Production Volume Component”, Proc. of the 7th Int. Conf. on Semisolid Proc. of Alloys and Composites, Japan, pp. 665-70, June 2002.
4. Kang, C.G., Seo, P.K., and Lim, M.D. “Rheo and Thixo Die Casting for Automobile Suspension Parts”, Proc. of the 8th Int. Conf. on Semisolid Proc. of Alloys and Composites, Cyprus, 2004.
5. Flemings, M.C. “Behavior of Metal Alloys in the Semisolid State”, Met. Trans., Vol. 13, No. 4, pp. 957-981. 1991.
6. Tzimas, E. and Zavaliangos, A. “Evolution of Near-Equiaxed Microstructure in the Semisolid State”, Mater. Sci. Eng. A289, Vol. 26, No. 8, pp. 228-240, 2000.
7. Motegi, T., Tanabe, F., and sugiura, E. “Continuous Casting of Semisolid Aluminium Alloys”, Mater. Sci. Forum, Vol. 1, No. 9, pp. 203-208, 2002.
8. Barabazon, D., Browne, D.J., and Carr, A.J. “Mechanical Stir Casting of Aluminium Alloy from the Mushy State, Process, Microstructure and Mechanical Properties”, Mater. Sci. Eng., Vol. 24, No. 9, pp. 370-381, 2002.
9. Young, K.P., Kyonka, C.P., and Courtois, J.A. “Fine Grained Metal Composition”, US Patent (4,415,374), 1982.
10. Birol, Y. “Cooling Slope Casting and Thixoforming of Hypereutectic A390 Alloy”, J. Mater Proc. Tech., Vol. 25, No. 2, pp. 315-326, 2007.
11. Qin, Q.D., Zhao, Y.G., Cong, P.J., Zhou, W., and Xu, B. “Semisolid Microstructure of Mg2Si/Al Composite by Cooling Slope Cast and Its Evolution During Partial Remelting Process”, Mater Sci. Eng., Vol. 44, No. 6, pp. 99-103. 2007.
12. Salarfar, S., Akhlaghi, F., and Nili-ahmadabadi, M. “Influence of Pouring Conditions in the Inclined Plate Process and Reheating on the Microstructure of the Semisolid A356 Aluminum Alloy”, 8th Int. Conf. on Semisolid Proc. Of Alloys and Composites, Cyprus, 2004.
13. Movahedi, M., Karimi, A., and Nia-Manesh, H. “Effect of Angle of Inclined Plate on the Microstructure of 7075 Aluminum Alloy”, 10th Congress of Iranian Institute of Materials and Metallurgy Eng., Mashhad, Iran, 2006 (In Persian).
14. Birol, Y. “Semi-Solid Processing of the Primary Aluminum Die-Casting Alloys A356”, J. Alloys and Compounds, Vol. 473, No. 7, pp. 133-138, 2009.
15. Taghavi, F. and Ghassemi, A. “Study on the Effects of the Length and Angle of Inclined Plate on the Thixotropic Microstructure of A356 Aluminum Alloy”, Materials and Design, Vol. 30, No. 5, pp. 1762-1767, 2009.
16. Birol, Y. “A357 Thixoforming Feedstock Produced by Cooling Slope Casting”. J. of Materials Proc. Tech., Vol. 186, No. 6, pp. 94-101, 2006.
17. Fan, Z. “Semisolid Metal Processing”, Int. Mater Rev., Vol. 47, No. 2, pp. 49-85, 2002.
18. Kamareie, A., Nourouzi, S., Bakhshi, M., and Gorji, A. “An Investigation on The Effect of Mechanical Stirring Parameters on Mechanical Properties of A360 Aluminum Alloy in Semi-Solid Formin”, J. Eng. Faculty, Vol. 43, No. 6, pp. 751-759, 2009 (In Persian).
19. Nourouzi, S., Kykha, M.M. “Investigation on Effect of Die Temperature and Reheating Treatment on Microstructure of A360 Aluminum Alloy Semi-Solid Forming” J. Eng. Materials, Vol. 2, No. 4, pp.341-347, 2005 (In Persian).

Archive of SID

www.SID.ir